

# 熊本市におけるグリーンインフラの暑熱環境改善効果に関する研究

劉 海強

熊本市都市政策研究所 研究員

キーワード：暑熱環境、グリーンインフラ (GI)、CFD シミュレーション、地表面温度 (LST)、平均放射温度 (MRT)

## 1 はじめに

### 1.1 研究背景

環境省 (2024) によれば、気候変動の進行に伴い、日本国内の都市部では猛暑日 (最高気温 35°C以上) および熱帯夜 (最低気温 25°C以上) が増加している。また熊本県 (2024) によれば、熊本県においても 1930 年から 2020 年の 90 年間で猛暑日が 10 年あたり約 2 日、熱帯夜が 10 年あたり約 4 日の増加となっている。さらに著者の別報<sup>1</sup>においては、熱環境緩和効果の高い江津湖の周辺地域においても、熊本市の市街地平均より 1.5°C高い、熱の滞留現象の出現が認められる状況となっている。

熱滞留は熱中症をはじめとする暑熱ストレスを引き起こし、健康リスクの増大につながり、特に夜間の熱蓄積が解消されない環境下においては、高齢者への影響が危惧される。熊本県においては、総務省消防庁 (2022) のデータによれば、過去 10 年で熱中症による搬送者数が 2.3 倍に増加し、2022 年には人口 10 万人あたり 89.4 人と全国第 4 位を記録した。同年の同県の高齢化率は 32.1%と、全国より 3.1 ポイント高く、今後も増加が予想される中、大きな課題となっている。

こうした課題に対して熊本市では、遮熱舗装やクーリングシェルター対策を実施している。ただ、これらの効果には空間的・時間的にも限界がある。遮熱舗装は路面温度を低下させるが、熱放射により周辺の気温上昇を完全に抑制するのは難しく、またクーリングシェルターは日中の利用がメインであり、熱帯夜対策として不十分なためである。根本的な解決には、都市構造に内在する熱滞留の発生メカニズムを解明し、それへの対応が必要となる。

そこで、近年注目されているのが「風の道<sup>2</sup> (Ventilation Path)」という概念である。これは、自然風と緑地や水域

といったグリーンインフラ<sup>3</sup> (Green Infrastructure、以下「GI」という) との相乗効果に着目し、これを活用し、都市の暑熱環境を面的に緩和しようとするものである。具体的には、建物配置などで形成される風の道を利用して GI の蒸散冷却によって生成される冷気を、市街地へ循環させる、自然風を活かして熱輸送システムの構築を目指すものである。

### 1.2 先行研究及び目的

先行研究では、GI の冷却効果について「どの程度の気温低下があるのか」という視点を中心だったが、最近では「どのように配置すれば風と相乗して効果が最大化するか」といった空間設計的アプローチへと関心が移ってきている。Taleghani ら (2019) は水面の蒸発が最大 7°Cの気温低下をもたらすことを、Bowler ら (2010) は樹冠密度が 60%以上の緑地が地表温度を最大 5°C下げ、相対湿度を 15%向上させることを報告している。一方で、Krayenhoff ら (2020) は、夜間風速が変動することで蒸散効果が最大 40%低下し、GI の配置には風の動きとの調和が必要であることを明らかにしている。また、入江ら (2018) の 3 次元数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics、以下「CFD」という) 解析によれば、樹木群は風速を 30%抑えるが、逆に風の通り道を塞ぎ、熱を溜めやすくするという両義的な二面性を持つことが示されている。

以上の知見を踏まえ、本研究では江津湖周辺における局地的な熱の滞留現象問題に着目し、Landsat 8 による衛星熱画像解析と ENVI-met<sup>4</sup>を用いた CFD シミュレーションを併用して、GI の冷却効果を定量的に把握し、GI と風環境の相互作用を活用した最適な GI 配置モデルを検証する。それにより、地域固有の特性を踏まえた暑熱環境改善の取組みなど、都市政策への反映を可能とすることを目的とする。

### 1.3 論文の構成

本研究では、「風環境を活用した GI 配置による暑熱緩和効果の評価」を目的に、以下のフレームワークで研究を構成した (図1参照)。

第1章では、暑熱環境の課題を整理し、先行研究を踏まえ本研究の目的を述べる。第2章では、対象地域である江津湖周辺の地理的・気候的条件の概要を整理し、衛星データ、気象観測データ、CFD 解析の統合手法について説明する。第3章では、地表面温度 (Land surface temperature、以下「LST」という) 分布と GI の関係性を解析し、GI の形態別に冷却効果を比較するとともに、ENVI-met シミュレーションを用いた風熱環境の評価を行う。第4章では、得られたデータをもとに熱リスクマップを作成し、江津湖モデルの市全体への拡張可能性について考察する。第5章では、研究の要点を総括し、今後の課題や社会実装の可能性について展望する。

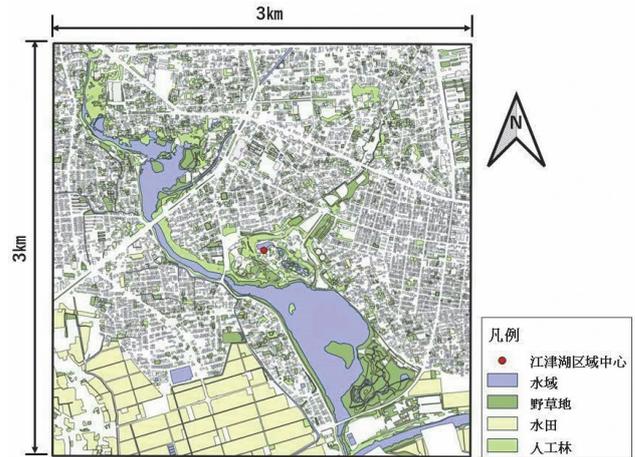


図2 研究の対象地域とグリーンインフラの分布 (動植物園内の池を中心とした)

出典：地理院地図江津湖の範囲、熊本市統合型GISデータより作成

表1 対象地域におけるGIタイプの分類

GIタイプ	面積 (ha)	空間パターン	課題
水域	63.9	連続配置	周辺緑地との断絶
野草地	54.4	線状分布	幅員が平均8mと狭小で風の流れが制限される
水田	91.2	南西部に集中	冷却持続性の課題
人工林	59.1	分散配置	蒸散効率が低く、通風阻害要因になり得る (LAI=3.2)

図2は、本研究における対象地域と主要なGIの分布を示している。本地域では+1.8℃ (ピーク時) の熱の滞留現象が観測されており<sup>1</sup>、風とGIの相互作用を定量的に解析する上で有効な地域である。

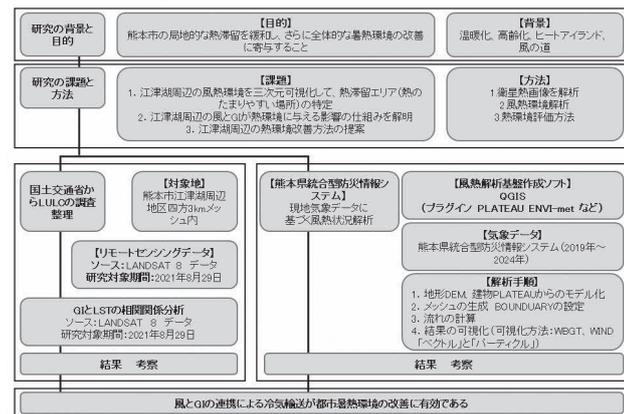


図1 研究フロー図

## 2 研究手法

### 2.1 江津湖周辺の地域特性分析

#### (1) 地理的・気候的特徴

本研究の対象地域は、熊本市動植物園 (32° 48' N、130° 42' E) を中心とした3km四方の熊本市東部に位置する江津湖周辺で、面積は約9km<sup>2</sup>、標高は約15mの平坦な地形を有する地域である。本地域は、水域 (河川)、野草地、水田、人工林、農地、公園などの自然環境と、住宅地や商業地などの都市的土地利用がモザイク状に分布しており、自然と都市機能が混在している。夏季の気候は、温暖湿潤で平均気温は28.5℃、最高気温は35℃を超え、卓越風向は北北東 (45° ±15°) で、平均風速は1.0m/sと緩やかである。

#### (2) 現存GIの特性と課題

図2および表1に示すように、研究対象地域には水域、野草地、水田、人工林の4つの主要なGIが分布している。ただ、現状は、第1章で述べたような「風の道形成」や「冷気輸送ネットワーク」の構築において、空間的な連続性が確保されておらず、形状的にも配置と言いが難しい状況である。

### 2.2 データソースと解析手法

#### (1) 衛星リモートセンシング (Landsat 8)

本研究では、冷気動態の可視化および緑地の冷却効果定量化のために、Landsat 8 OLI データ (2021年8月29日 10:43:23 JST) を使用した。雲量5%以下の晴天時データを選定し、以下の4段階で処理を行った (図3) :

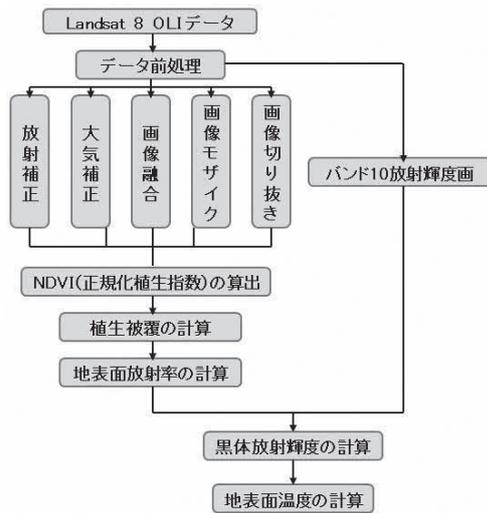


図3 LST 推定プロセス

- 1) 放射・大気補正（正規化差植生指数、〔以下「NDVI」という〕等を用いた地表放射率の推定）
- 2) 画像のモザイク統合および対象地域への抽出
- 3) Band10 を用いた LST の演算処理
- 4) NDVI→FVC→放射率→輻射輝度→LST への一連の物理モデルに基づく段階的推定による温度マッピング

このプロセスにより、LST と植生状況の関係を定量的に把握し、暑熱環境におけるGIの冷却効果を評価するための基礎データを構築した。

## (2) 気象データ処理

熊本地方気象台（アメダス ID:50236）の観測データを基に、CFDシミュレーション用の気象条件を設定した。図4に示すように、(a) 気温・相対湿度、(b) 風向・風速、(c) 日射強度の時系列データを取得し、以下の前処理を実施した。

まず、10 分間隔の風向風速データに移動平均法を適用し、抽出された衛星通過時間帯（10:00-14:00）の卓越風向は北北東（ $45^\circ \pm 15^\circ$ ）、平均風速 1.0m/s（ $\pm 0.3\text{m/s}$ ）であった。気象庁の1時間毎のデータについては、①検定基準に基づくスパイク除去、②近傍観測点を用いた欠損値補間、③CFD用5秒ステップへの時間補間を実施した。さらに、WRF（Weather Research and Forecasting、気象研究および予報モデル）によるメソスケール気象場との整合性を検証するため、同日時のWRF出力データ（気温・風速・風向）を用いて、CFD用の地表観測データ（アメダス）と比較検証を行った。その際、特に境界条件として使用する上空100mにおける風速・風向の鉛直プロファイルが一致していることを確認し、WRFから抽出した代表的な気象境界値（例：風速

1.0~1.3m/s、風向  $45^\circ \pm 15^\circ$ 、潜熱フラックス等）をCFDモデルに反映した。

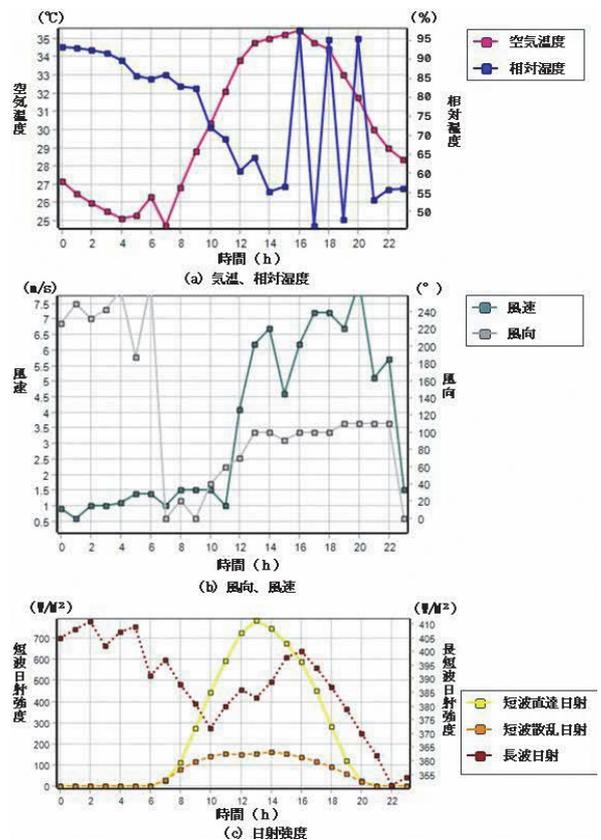


図4 シミュレーション使った気象条件

## (3) CFDシミュレーション (ENVI-met) 手法の構築

風と熱の相互作用を高精度に評価するため、ENVI-met v5.0.3を用いて、3,000m×3,000m×100mの解析ドメインを設定し、都市微気候の3次元数値シミュレーションを実施した。

シミュレーションの建材パラメータ、気象初期条件、解析解像度などのパラメータ及び初期・境界条件の設定理由については、各種文献（Lai et al., 2019; Liu et al., 2017; Toparlar et al., 2017; 潘ら, 2023 など）に示されている「CFDモデルにおける建物形状データの取り扱い」、「熱物性値の設定範囲（熱伝導率・アルベド等）」、「シミュレーション時間・解像度設定」などを参考にした。

CFDシミュレーションの設定にあたっては、以下のような手順および初期・境界条件を構築した。

- ① 建物形状は国土交通省「PLATEAUプロジェクト」のCityGML (LOD2) データを使用
- ② 地表面条件（農地・舗装地等）および建材（外壁や屋根）の物理パラメータ（熱伝導率  $[\lambda]$ 、アルベドなど）の設定

- ③ 水平方向解像度 10m、鉛直方向 10 層で総高さ 100m
- ④ 2021 年 8 月 29 日 10 時の実測気象値（気温 25.0°C、湿度 58%、風速 1.0m/s）を初期条件とし、6:00~24:00 の 18 時間連続シミュレーションを実施

出力結果としては、平均放射温度（Mean Radiation Temperature、以下「MRT」という）、風速分布、温位（Potential Air Temperature、以下「PAT」という）などを取得し、都市スケールでの風と熱との連成現象を評価可能とした。

### 2.3 モデルの検証手法

本研究では ENVI-met モデルの予測精度を評価するため、シミュレーション結果と衛星観測データを統合した多層的な検証フレームワークを以下の 3 段階で構築した。

第 1 に、ENVI-met シミュレーションから算出された MRT および PAT を、Landsat 8 衛星の熱赤外センサー（TIRS）バンド 10 から導出された LST データと照合した。両データセット間の空間解像度の非整合性（シミュレーション：10m グリッド [アップスケーリング]、Landsat 8 30m グリッド）に対処するため、QGIS (Ver. 3.40.2) 上で最近傍補間法<sup>5</sup>を用いて、共通グリッドへの再投影処理を実施した。この前処理により、異なる計測プラットフォームから得られたデータを直接比較することが可能となった。

第 2 に、モデル予測値と観測値の適合度を定量的に評価するため、次の 4 種類の統計指標を算出して検証した。

- ① 均方根誤差 (RMSE) による全体的な予測誤差の評価
- ② 平均絶対誤差 (MAE) による系統的偏りの検出
- ③ 決定係数 ( $R^2$ ) によるモデルの説明力の定量化
- ④ ピアソン相関係数 ( $r$ ) による線形関連性の強度測定

これらを活用し、モデルの総合精度 (accuracy)、バイアス (bias)、説明可能性 (interpretability)、および相関性 (correlation) といった多面的な機能評価を行った。

第 3 に、GI タイプの空間分布特性に基づく誤差解析を実施した。30m 解像度グリッドデータを用いて、緑地タイプ（野草地/水田/人工林）・水域・非 GI 地域の 5 カテゴリーを定義し、各 GI タイプの面積割合と暑熱環境誤差の相関関係を比較した。

本稿では、QGIS (Ver. 3.40.2) の「区域統計」ツールを用いて、以下の 3 点を三次元ヒートマップにより可視化した。

- ① GI (グリーンインフラ) カテゴリー別の平均誤差
- ② 緑被面積率を 10% 間隔で階級化した場合の誤差分布
- ③ 水域からの距離を 100m 単位で区分した際の LST (地表

面温度) 偏差

都市生態系及び GI 設計の理論的基盤については、Aherm (2013) による都市レジリエンスに関する研究も参考にした。

## 3 結果

### 3.1 衛星熱画像解析に基づく暑熱環境の時空間特性

#### 1) GI 地域と非 GI 地域の LST 差異分析

衛星熱画像解析 (Landsat 8 TIRS) の結果、GI 地域と非 GI 地域の LST には明確な差異が確認された (図 5 参照)。

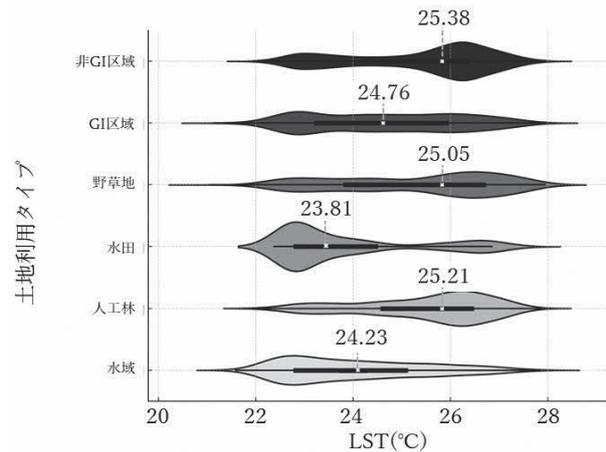


図 5 土地利用タイプ別の LST 温度分布図

GI 地域全体の平均 LST は 24.76°C であるのに対し、非 GI 地域では 25.38°C と、統計的に有意な 0.62°C の温度差 ( $p < 0.05$ ) が認められた。時間帯別分析では、日中の 10:00~14:00 にかけて最大 1.20°C の差が観測され、植生による蒸散効果やアルベドの違いが複合的に影響していると考えられる。特に水田は 10:00~11:00 にかけて  $\Delta LST \geq 1.80^\circ C$  の強い冷却効果を示し、潜熱放出が都市部の熱蓄積抑制に寄与していた。また、LST の分布密度を比較したバイオリンプロット (図 5) においても、非 GI 地域は 26.00~28.00°C に集中し、広く分布していることから、高温域が存在する。

一方で、GI 地域では LST の分布が 22.00~26.00°C の範囲に収まり、バイオリンプロット (図 5) 上で 23.00~24.00°C 付近および 24.50~25.50°C 付近に密度のピークが観測される二峰性 (バイモーダル) の分布特性を示していた。このことから、温度のばらつきが小さいことに加え、冷却効果の空間的安定および階層的構造が示唆される。この分布特性は、GI 導入による局所的なヒートアイランド緩和効果の定量的裏付けとして有効である。

#### 2) GI タイプ別冷却効果の比較

各 GI タイプの冷却効果を比較した結果、水田が最も強い

冷却効果を示し、平均LSTは23.81°Cと非GI地域に比べ1.57°C低い結果となった。これは湛水層からの水が蒸発する過程で熱が奪われ、周囲の気温を下げると考えられ、特に10時観測時に最大2.10°Cの差が確認されている。水域も平均24.23°Cと安定した冷却傾向を示し、これは水塊の大きな熱容量によるものである。

一方、人工林の結果は予測と相反する傾向を示し、LST 25.21±0.57°Cと、非GI地域比でわずかに0.17°Cの低減効果しか得られなかった。原因としては、人工林の構造が風の流れに影響を与え、局所的な通風機能低下を引き起こした可能性が考えられる。また、野草地のLSTは25.05°Cと平均値に近いものの、降雨条件に依存した蒸散過程の変動により、冷却効果の季節的安定性が低い可能性が示唆される。

バイオインフラ（図5）における各GIタイプのLSTの中央値と分布幅から、冷却効果の強さに加え、その空間分布の偏りも明らかになった。

### 3) 暑熱環境の空間分布特性

図6は、3km×3kmの対象地域におけるLSTの等温線分布（0.5°C刻み）と土地利用の重ね合わせ、地域内の暑熱環境構造を視覚的に示したものである。この図から以下の特徴が読み取れる。

市街地のヒートアイランド現象：図の北部から東部の市街地では、舗装率や建物密度が高く、日中の太陽熱が蓄積し夜間も放熱しにくいいため、局所的な熱蓄積が進んでいる。LSTが27.5~28.0°Cに達するなど、ヒートアイランド現象が観測された。

水域の熱環境緩和効果：水域が集積する図の中央部から南東部の青色の地域では、LSTは22.5~23.5°Cと低く、水の蒸発冷却効果が周囲の気温上昇を抑制していることが分かる。これらは冷気源としての役割を担い、対象地域の熱拡散を抑

制している。

緑地・農地の熱環境緩和効果：野原地や田畑、人工林などの緑被地帯では、LSTが24.0~25.5°Cに分布し、周辺市街地に比べ1.5~3.5°Cの冷却差が見られた。中でも人工林（黄緑色表示）は農地よりもやや低温であり、遮蔽と蒸散の複合作用が推定される。

都市熱環境の構造的な特徴：市街地と自然エリアの境界では、LSTの等温線が密に集まり、3.00~4.00°Cの温度差が短距離で形成されている。これにより、緑地・水域が市街地の熱の拡大を抑える“壁”となっている構造が読み取れる。

ホットスポットの形成：図6において、赤円の市街地エリアでは、LSTが27.50°C以上の熱集中ゾーンが形成されている。建物の密集や交通量の多さ、人口集積が複合的に影響した結果と考えられる。

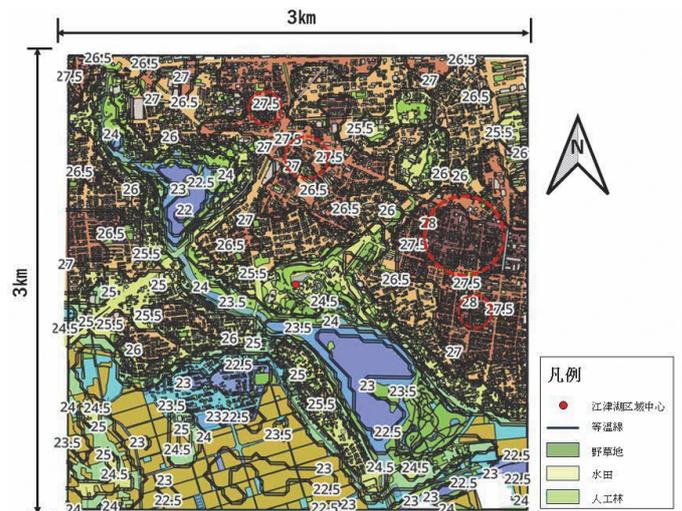


図6 LST等温線（0.5°C温度差）分布と土地利用分布図

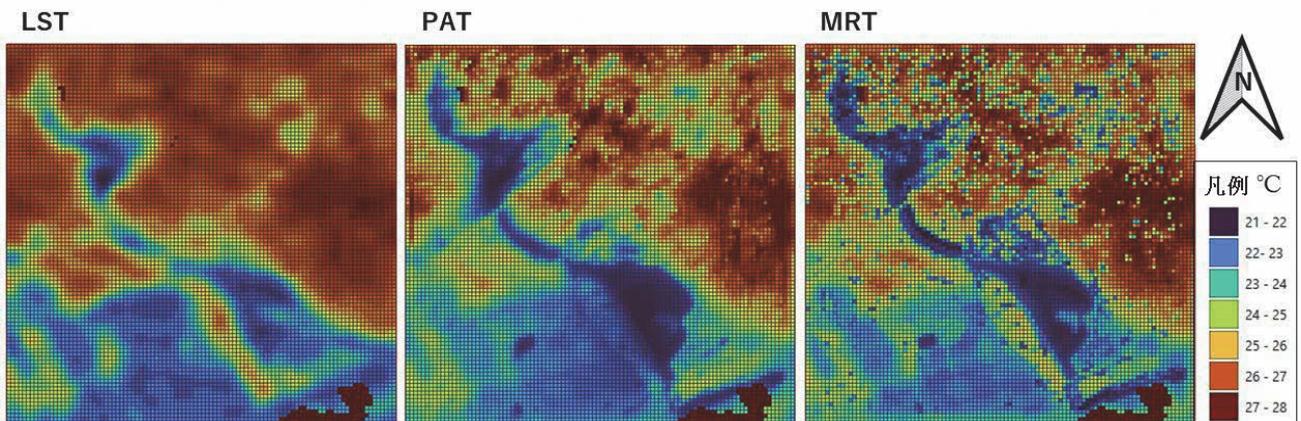


図7 LST、MRT、およびPATモデルの温度分布図

### 3.2 ENVI-met シミュレーションによる風-熱環境連成解析

#### 1) モデル精度評価

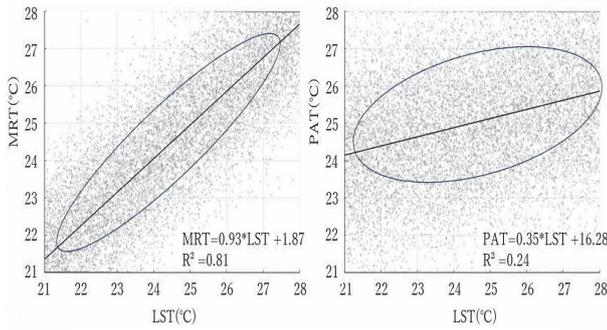


図 8 MRT、PAT と LST の線形回帰関係

図7、図8で示すように、ENVI-met シミュレーション結果と Landsat 衛星の LST との比較から、MRT モデルは RMSE=1.20°C、MAE=0.94°C と、予測精度の高い結果を示した。また、決定係数 ( $R^2=0.81$ ) およびピアソン相関係数 ( $r=0.806$ ) も高い値を示し、シミュレーション結果が実測 LST の約 81% の変動を説明可能であることが確認された (表 2)。

一方、PAT モデルにおいては  $R^2=0.24$  と説明力が低く、モデルによる気温鉛直分布や潜熱交換過程の再現性に課題が見られた。特に、地表面条件が複雑に変化する市街地においては、PAT の実測値との乖離があり、大気鉛直構造や大気安定度に係るモデルのパラメータ改善が求められる。さらに、GI タイプ別の誤差分析からは、水域 ( $R^2=0.92$ ) および市街地 ( $R^2=0.82$ ) において、モデル再現性が高いことが明らかになった (表 3 参照)。これは、水域の物理特性 (熱容量・蒸発冷却) がモデルに十分に反映されているためと考えられる。一方で、水田における RMSE は 1.50°C と最も高く、これは灌漑水の断熱効果がモデル上で十分に反映されていないこと

が主要因である。また、実際に通風性が悪く冷却効果が抑制されるとともに、モデル上でも樹冠の蒸散量が過小評価される傾向が見られた。

表 2 MRT・PAT モデルの精度検証

指標	MRT	PAT
RMSE (°C)	1.20	1.52
決定係数 ( $R^2$ )	0.81	0.24
MAE (°C)	0.94	1.21
ピアソン相関係数	0.806	0.802

表 3 GI タイプ別モデル精度検証

土地利用	RMSE (°C)	$R^2$	主な誤差要因
市街地	1.20	0.82	人工排熱 (冷房室外機等) 無
野草地	0.80	0.85	植生被覆率・地表放射率の推定誤差
人工林	0.80	0.65	樹冠蒸散量の過小評価
水田	1.50	0.79	灌漑水の断熱効果未反映
水域	0.45	0.92	モデル最適

#### 2) 熱滞留エリアの特定

図 9 は、左側に MRT の空間分布、右側に風速の空間分布を示しており、図の右上の住宅密集地における暑熱環境の偏在性が視覚的に把握できる。図中の白い破線の円で囲まれた領域は、本研究で特に注目する「熱滞留エリア (Heat-stagnant Area)」として、MRT が周囲平均より +2°C 以上高く、かつ風速が周囲平均より 0.5 m/s 以上低い、という厳密な条件により定義した。本稿において「熱滞留エリア」という用語は、特に断りのない限り、この定義に基づくものとする。この白色の円内は、極めて高温・低風速の状態下で、MRT が 27.00°C、風速が 0.20~0.40 m/s 以下となっている。

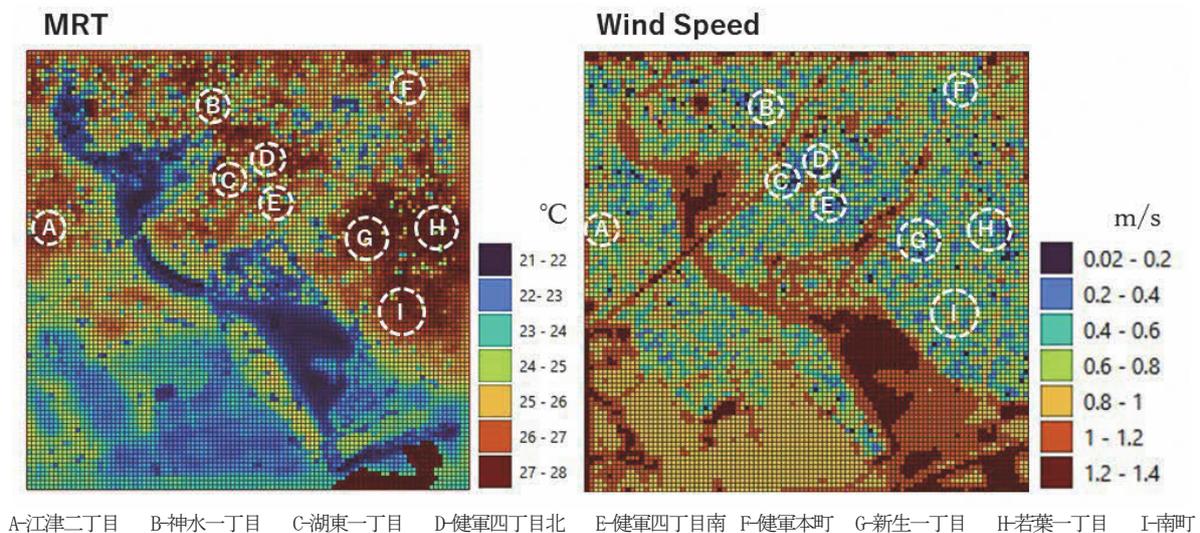


図 9 MRT と風速分布図

一方で、図全体を見ると、非GI区域面積の約38%が高温かつ低風速の条件下にあることが確認される。つまり、熱滞留現象が一定水準以上のエリアに発生し、特に白い破線の円で囲まれた領域は、前掲条件を満たす「熱滞留エリア」である。

また、湖面や水田周辺では、MRTが最大7℃低下し、風速も1.2~1.4 m/sに達する局地的な冷却ゾーンが形成されていた。特に、熊本市動植物園付近では、GI(緑地・水面)が連続的に分布し、建物の密度が低く、かつ建築物の高さも低いため、風環境が良好に保たれ、MRTも周辺より低い傾向を示している。このように、対象地域における都市構造とGIの分布が連動することで、熱滞留の抑制に寄与していることが示唆される。これらの結果は、水域および緑地が暑熱環境の改善に重要な役割として位置づけることが可能である。

### 3) 風環境の非線形応答特性

図10および図11は、対象地域における都市構造と風環境の空間的関係性を可視化したものである。これらの図をもとに、以下のような非線形応答特性が明らかとなった。

緑地幅員の影響：河岸緑道の幅員を15mから30m(図2の河川沿い緑地分布に対応)に拡張すると、風速が約50%増加(1.2→1.8m/s)、冷氣輸送距離が約130m延伸(+52%)された。これは、図11に見られる風向の直進性(青~緑の連続帯)が強化されることと整合している。

建物の高さや密度の影響：図10に示されるように、江津湖北側の非GI区域では建物の高さが30m以上(橙~赤色)に達しており、局所的な風速低下であり、図11の該当区域における風向の乱れと一致している。これは、建物によって風が遮られ乱流が誘発される非線形応答を示している。図10中の青色から緑色の領域に対応する容積率300%以上の

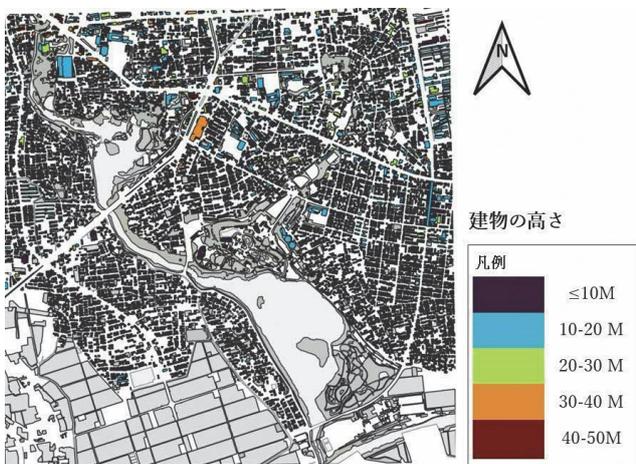


図10 建物の高さ分布図

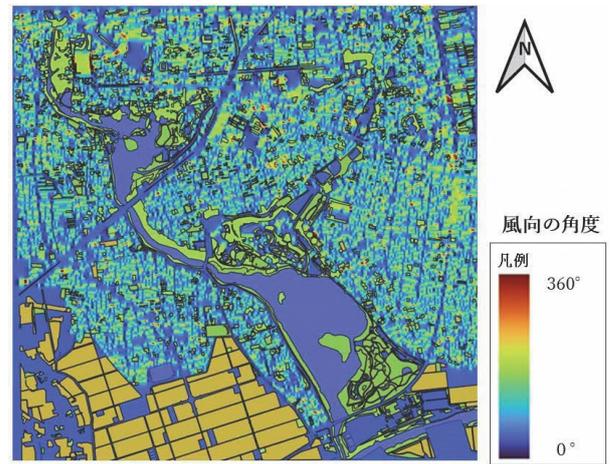


図11 風向の角度分布図

区域では、地表風速が0.5m/s以下に抑制され、(乱流強度は0.35から0.62に増加する。これに伴い熱拡散効率が34%低下し、日中の顕熱が局所的に蓄積する傾向が強り、特に、建築物の集積区域やT字路交差点周辺では、多重反射によりMRTが1.8℃/h上昇し、ホットスポットの形成が示された。

## 4 考察

### 4.1 風・熱環境の相互作用に基づく暑熱緩和効果

#### 4.1.1 風・熱環境に係るGIの役割

本研究の結果、GIが対象地域の暑熱環境を明確に緩和する効果を持つことが定量的に示された。特に、水田や水域といった冷却ポテンシャルの高いGIは、単独でも冷却源として機能するとともに、周囲との相互作用により冷気の顕熱輸送のハブとしても機能していた。3章で示したように、水田は蒸発冷却効果により周辺地域の温度低下に寄与し、水域は高い熱容量によって日中の温度上昇を抑え、最大6~7℃の平均MRT低下にも寄与していた。これらのGIは「冷氣発生源」として機能しており、風の流れと結びつくことで、多くの風の道がGIを経由して形成されていることが確認された。

特に、江津湖の北側および南側は、水域と接続した広域なGIが面的に配置され、風速も0.6~0.8m/sと相対的に高く、冷気流が持続的に形成される地域であり、冷氣供給と伝播の核として機能している。また、江津湖区域中心に位置する動植物園周辺は緑が連続し、低層開放的な配置であり、MRTが周辺よりも低く、冷却の緩衝帯としての役割を果たしていた。

図2および図11で示されるGI分布と冷気流路の重なりを分析した結果、本研究で対象とした主要な通風路の解析では、その半数以上がGI区域を経由しており、冷気の生成お

よび伝播においてGIが重要な役割を果たしていることが示唆された。また、研究範囲内における3つの主要な風の道(57号線、庄口公園～動植物園沿線、自衛隊通り)については、それぞれ異なる暑熱緩和効果を示すことが明らかとなった。

最も効果的であったのは庄口公園～動植物園沿線であり、周辺への降温効果が最も顕著であった。その要因としては、豊富なGIの面的連続性、そして谷状地形による冷気の集積・誘導効果が複合的に作用した結果である。次いで57号線熊本東バイパスでは、相対的に大きな道路幅と複数のGI節点の連結により、クールスポットがネットワーク化され、冷気輸送回廊として機能していた。

以上の結果は、水域および緑地が暑熱環境の改善に重要な役割を果たすことを裏付けるものであり、「都市の風環境の確保がヒートアイランド対策の根幹である」という国土交通省の基本的立場とも一致している。

#### 4.1.2 熱滞留エリア発生に係る通風経路の影響

GIの存在が必ずしも暑熱緩和に直結するとは限らず、通風経路が確保されていない区域では、GIがあっても熱滞留が発生する事例も多数確認された。特に、自衛隊通りでは期待された通風経路としての機能が十分に発揮されておらず、冷気の通過が断絶していた。その要因として、①道路と主風向との角度不整合、②沿道における高層建築物の密集、③建物間距離の狭小、④周辺地形の微細な起伏などが複合的に風の遮断を引き起こしていた。

さらに、図9に示すMRT分布と風速分布の重ね合わせ解析から、熱滞留が発生しているエリアは、第3章で定義した「熱滞留エリア」と一致していた。

特に、A：江津二丁目、B：神水一丁目、C：湖東三丁目、D：健軍四丁目北、E：健軍四丁目南、F：健軍本町、G：新生一丁目、H：若葉二丁目、I：南町などの9地点では、風速が著しく低下し、MRTが27.0～28.0℃に達していた(図9)。各エリアで熱滞留が発生する主因として、「通風路の物理的遮断」と「GIの連続性不足」が共通して確認された。

- 神水一丁目(B)では、周囲が中高層建物で囲まれていることで冷気の流入が完全に遮断されている。
- 江津二丁目(A)、南町(I)、新生一丁目(G)、
- 若葉二丁目(H)では、一戸建の住宅が高密度に集積し、建物間隔が狭く、風の抜け道が確保されていない。
- 健軍四丁目南(E)では、緑地が乏しく、建物スケールが大きいため風が滞留しやすい。

- 健軍四丁目北(D)および健軍本町(F)では、アスファルトとコンクリートに囲まれた閉鎖的な構造となっており、通風性が著しく低下している。

これらの地点では、GIが局所的に点在していても、その面的連続性が乏しく、冷気の輸送が途中で遮断されることで構造的に熱滞留傾向を示すエリアを形成していた。

## 4.2 暑熱環境緩和に向けたGI配置の空間最適化

### 4.2.1 都市スケールでのGI配置と風の道の確保

前節において、GIの空間配置および道路を含む対象地域の都市構造が、熱滞留エリアの発生と密接に関係することが明らかとなった。

シミュレーション結果によると、風速の低下とMRTの上昇が重なるエリアの形成には、以下の3つの都市構造特性が強く関連していた。

- (1) 建築物の高密度配置による通風阻害
- (2) 建物群の閉鎖的配置(クラスター形成)に伴う熱滞留
- (3) GIの空間的断絶による冷却連続性の喪失

これを踏まえ、市街地の暑熱環境を改善に向け、以下のことが重要である。

第一に、「風の道」のセグメント化設計と段階的導入である。本研究において、江津湖・画図町の水田地帯・広木町・健軍町に形成された個別冷気流路の存在が確認された(図2・図9・図11)。これらのセグメントをネットワーク化することで、都市内部における冷気流通システムの再構築を図る必要がある。

第二に、GIの幅員と連続性に関する制度的基準の確立である。河岸緑道の幅員を拡張することで、風速が50%以上向上し、冷気輸送距離が約130m拡大したことが確認された。これは、GIが単なる局所緑化ではなく、都市冷却ネットワークを形成する要素として機能させるために、「風の道としての役割」を制度的に担保することが必要である。

### 4.2.2 地区・街区スケールでのGI配置と建築・街区構造の確保

第3章および第4.1節で示したMRTと風速の重ね合わせ解析(図9～図11)から、GIの配置そのものよりも、風の流れを導く空間構造が都市冷却において極めて重要であることが明らかになった。特に、神水一丁目、健軍四丁目北・南、健軍本町、新生一丁目、若葉一丁目、南町、江津二丁目の地点では、GIが存在しても連続性に乏しく、風速は0.2m/s未満に低下し、MRTが27～28℃に達する構造的に熱滞留傾向が顕在化していた。

図 10 および図 11 を用いた建物分布・風向分析からも、建築物の集積が高密度なエリアでは風向が乱れ、風速が低下する傾向があり、GI が「風の通り道」形成に十分反映されていないことが視覚的に確認された。「緑地の配置最適化」と「建物の低層化・開放的配置」の両面から課題が指摘される。また、動植物園や新生地区などの潜在熱滞留エリアでは、GI が点在していても冷気が周囲に広がりにくい傾向があり、GI の配置形状（点状／線状）や周囲の建築形態との関係性を再評価する必要がある。さらに、人工林は日陰効果により冷却が期待される一方で、密集度や高さによって風を遮断し、熱滞留を引き起こすリスクも確認された。GI の質的評価が求められる。

### 4.3 熱・風環境に係る GI 形状の影響

本研究では、GI の空間形状を分類するために、既往研究（図 12 参照）に基づき、以下の 5 つの代表的な配置パターンを採用した。

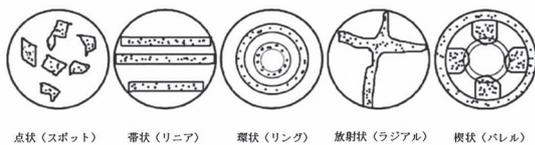


図 12 GI 形状別の分類

出典：ANL, 2023 による作成

- ① 市街地に点在する緑地を表す「点状（スポット）」
- ② 道路や水路に沿って帯状に伸びる「帯状（リニア）」
- ③ 中心から外周に向かって円環状に分布する「環状（リング）」
- ④ 放射線状に広がる「放射状（ラジアル）」
- ⑤ 中央部が広く、周縁部に向けて層状に配置される「楔状（パレル）」

これら 5 種類のうち、本研究の対象地域で観測されたのは、「点状」「帯状」「放射状」の 3 パターンであり、それぞれ風・熱環境に対して異なる効果と空間的特徴を示した。

以下では、各形状の特徴とその効果について、①～③の順で説明する。

- ① 点状 GI（例：街区内の小規模緑地、一部の人工林）においては、局地的な熱緩和や日陰の提供には有効であるが、風の流れを妨げる配置の場合、むしろ熱滞留を助長するリスクがあることも確認された。
- ② 帯状 GI（例：河岸緑道）においては、風の流れに沿って冷気を線状に輸送する経路として機能し、通風機能と冷却効果の両面で高い有効性が確認された。特に、

幅員の拡張によって冷気輸送の距離が大きく向上し、市街地への影響範囲が広がる傾向が見られた。

- ③ 放射状 GI（例：水田帯）においては、郊外から市街地へ冷気を輸送する構造があり、市街地の冷却効果に貢献していた。特に風向と整合性がある場合において、その効果が最大化された。

このように、GI の形状と風は一体として評価すべきであり、今後の都市計画においては「GI の面積」ではなく、「GI 配置の連続性」や「風の流れとの整合」がより重要となる。これは国土交通省が提案する「ヒートアイランド対策に資する『風の道』を活用した都市づくりガイドライン」に整合する示唆であり、今後、GI の設計を都市計画や土地利用と連携して運用することが求められる。

また、GI の形状だけでなく、周辺の道路構造や建築物の配置とも連動させて設計する必要がある。例えば、帯状 GI が幅広い開放的な道路と連続する場合、風の流路としての機能が強化される一方で、高層建物に囲まれた点状 GI では風の流れが阻害される恐れがある。このように、GI 形状・配置と建築物の配置・都市構造を一体的・統合的に捉える視点が、今後の都市における気候変動適応や GX 施策において不可欠である。

## 5 結論

### 5.1 主要知見の総括

本研究では、熊本市江津湖周辺を対象に、グリーンインフラ（GI）と風環境の相互作用が暑熱環境に及ぼす影響を、Landsat 8 による地表面温度（LST）解析および ENVI-met を用いた CFD シミュレーションの統合により検討した。その結果、熊本市の暑熱環境は、単に緑地や水面の「量」によって規定されるのではなく、それらが風の流れとどのように接続されているかという空間構造によって大きく左右されることが明らかとなった。

都市スケールでみると、水田や水域といった冷却ポテンシャルの高い GI は、局所的な冷却源にとどまらず、風の道と結びつくことで市街地へ冷気を供給・輸送する広域的な環境インフラとして機能していた。特に江津湖および画図町周辺では、面的に連続した GI が冷気発生源となり、庄口公園から動植物園沿線や国道 57 号線沿いを通じて冷気が市街地へ導かれている様子が確認された。これは、都市スケールで GI を評価する際に、個別緑地の性能だけでなく、風環境と一体化したネットワーク構造として位置付ける必要性を示して

いる。

地区スケール（江津湖周辺）に着目すると、GIが存在していても、建築物の高密度配置や街区構造の閉鎖性によって通風が阻害される場合には、熱滞留が顕在化することが明確となった。神水一丁目、健軍四丁目、本町地区などでは、本研究で定義した「熱滞留エリア」が形成されており、これらの地域ではGIの点在的配置が十分な冷却効果を発揮していなかった。さらに、街区スケールでみると、街区内部における建物配置・高さ・道路幅員といった要素が、GIの効果を決定づける重要な要因であることが示された。

以上の結果から、本研究は、暑熱対策において「緑を増やすこと」に加え、「風が通る空間構造をいかに確保するか」という視点が不可欠であることを示している。これは、都市スケールから街区スケールに至る多層的な空間構造の中で、GIを風環境と不可分な要素として捉える必要性を示唆するものである。

## 5.2 政策への貢献

本研究の成果は、熊本市の暑熱環境の改善および気候変動への対応において、以下の示唆の貢献が期待される。

### ① 空間的分析に基づく政策支援

MRTおよび風速の分布データを重ね合わせ、暑熱リスクが高い区域と冷却ポテンシャルの高いGI分布との対応関係を可視化することで、都市環境による風の道の違いを考慮しながら、地域の実情に応じた暑熱環境対策の検討に活用できる。また、「熱滞留エリア」を定量的に抽出することで、暑熱環境においてリスクの高い高齢者等の熱中症予防など、短期的に優先すべき対策の提案が可能となる。

### ② 都市における気候変動政策の科学的根拠強化

CFDと衛星リモートセンシングの統合手法により、建築物・道路・GIの配置が風環境に与える影響を高解像度で可視化できた。この手法は、都市構造と風の流れの整合性を前提とした施設等の設計や土地利用の見直し等に活用することで、気候変動に伴う暑熱環境のリスク低減につなげられる。

### ③ 持続可能なGI配置モデルの設計支援

「緑化の量」に加え、「風向との整合性」および「質の高い緑の配置」を踏まえたGIのネットワーク設計が可能となり、今後の都市計画や土地利用の見直し等において活用できる。特に帯状や放射状のGIを骨格とした配置が有効かつ有用であることから、GI施

策と農地保全施策との連携強化により、都市生態系の再構築を図ることで、暑熱環境対策と景観保全の両面での推進が可能となる。さらに、建築物の低層化や開放的配置といった方向GI配置の連携により、風の流れを都市構造へ組み込む方向性が明確となった。

## 5.3 限界と今後の課題

都市の微気候解析において一定の成果を得たが、以下の限界が存在する。

- ① 衛星LSTデータは1日1時点のみの取得であり、日中の温度変動を捉えるには不十分である。今後はリアルタイム観測との統合が求められる。
- ② ENVI-metモデルには、PATモデルの説明力の向上に課題が残された。また、人工排熱や灌漑水温など一部の都市的要素が十分に反映されておらず、特に密集市街地での誤差があった。今後は都市エネルギーモデルとの連携が課題となる。
- ③ GISプラットフォームによる視覚化と一般市民への周知・活用が現段階では限定的であり、社会実装に向けたユーザーエクスペリエンス設計や行政連携が不可欠である。
- ④ 本研究における気象条件の設定は、主に山風（陸風）の流入を想定したものであり、熊本市に特徴的な海陸風循環のうち「海風」の影響が残っている。今後は海風条件下における風と熱との連成の反映に取り組む必要がある。
- ⑤ 本研究ではENVI-metの水平解像度を10m×10mに設定しているが、この解像度では建築物の細部形状や複雑な街路構造の再現が困難である。より高解像度メッシュの導入やマルチスケールモデリングの検討が求められる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、東京農業大学の入江彰昭教授には、多大なるご指導と貴重なアドバイスをいただきました。ここに記して深謝いたします。

(参考文献・資料)

- (1) 環境省 (2024) 「日本の気候に起きている変化とその影響 (2024年版)」 [https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\\_neutral/topics/20240924-topic-61.html](https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/topics/20240924-topic-61.html) (2025年4月15日閲覧)
- (2) 熊本県 (2024) 「熊本県気候変動適応センター通信 第6号」、

- <https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/243011.pdf> (2024年4月15日閲覧)
- (3) 総務省消防庁 (2022) 「熱中症搬送者数統計報告」  
[https://www.fdma.go.jp/publication/heatstroke/nennpou\\_r5.pdf](https://www.fdma.go.jp/publication/heatstroke/nennpou_r5.pdf)  
(2024年12月26日閲覧)
- (4) 熊本県 (2024) 「高齢者関係資料集」
- (5) 熊本市 (2020) 「熊本連携中枢都市圏地球温暖化対策実行計画」  
[https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDisp.aspx?c\\_id=5&id=1283&sub\\_id=247947&flid=15E3H6QU](https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDisp.aspx?c_id=5&id=1283&sub_id=247947&flid=15E3H6QU) (2024年12月24日閲覧)
- (6) Taleghani, M., Sailor, D., & Bar-Weiss, G. A. (2019). Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood. *Sustainable Cities and Society*, 49, 101599. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101599>
- (7) Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., & Knight, T. M. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- (8) Krayerhoff, E. S., Broadbent, A. M., & Georgescu, M. (2020). Cooling hot cities: A systematic review of green infrastructure interventions. *Nature Climate Change*, 10(3), 267-274. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0698-z>
- (9) 入江 彰昭、上原 拓三、荒屋 亮、金子 忠一 (2018) 「熱環境と風況解析に基づく大学キャンパスの環境評価と環境計画への応用」 *東京農業大学農学集報*, 62(3-4), 69-79  
<https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010921335.pdf>
- (10) 熊本市 (2021) 「熊本市緑の基本計画 (令和3年3月改定)」  
<https://www.city.kumamoto.jp/ki.ji003930/index.html> (2025年2月12日閲覧)
- (11) 国土交通省 都市局都市計画課 (2013) 「ヒートアイランド現象緩和に向けた都市づくりガイドライン」 <https://www.mlit.go.jp/common/001023246.pdf> (2025年2月12日閲覧)
- (12) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (2013) 「ヒートアイランド対策に資する「風の道」を活用した都市づくりガイドライン」 [https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/urbanplanning/hi\\_guidebook.html](https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/urbanplanning/hi_guidebook.html) (2025年4月12日閲覧)
- (13) Lai, D., Liu, W., & Chen, Q. (2019). Quantitative analysis of the cooling effect of green infrastructure under different wind speed conditions. *Energy and Buildings*, 198, 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.012>
- (14) Liu, Y., Harris, D. J., & Wu, J. (2017). Diurnal variation of urban heat island effects in high-density cities using CFD modelling. *Atmospheric Environment*, 163, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.021>
- (15) Toparlar, Y., Blocken, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, 123, 565-579. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.040>
- (16) 潘 毅、一ノ瀬 俊明、森本 健弘 (2023) 「リモートセンシングと ENVI-met を用いた都市内公園が屋外熱環境に与える影響の分析」 *日本地理学会発表要旨集, 2023a*, 117  
[https://doi.org/10.14866/ajg.2023a.0\\_117](https://doi.org/10.14866/ajg.2023a.0_117)
- (17) Ahern, J. (2013). Urban landscape sustainability and resilience: The promise and challenges of integrating ecology with urban planning and design. *Landscape Ecology*, 28(6), 1203-1212. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9799-z>
- (18) AN, L., LI, Q. M., LIANG, J., et al. (2024). A review of Computational Fluid Dynamics applications in urban wind and thermal environments in China. *Acta Aerodynamica Sinica*, 42(3), 1-18. <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0047>

<sup>1</sup> 劉海強 (2024) 「熊本市におけるグリーンインフラの暑熱環境改善効果」, 熊本都市政策 vol.11 の結果から読み取った。

<sup>2</sup> 風の道とは、海や山、緑地等の地域の冷熱源からの風を都市空間内に導く連続したオープンスペース (開放的な空間) であり、都市における通風・換気を促進し、ヒートアイランド現象の緩和に資する都市構造のひとつである。都市の立地条件に応じて「外部風導入型」「通風ネットワーク型」「重点風道型」「都市計画連携型」などの類型に分類され、CFD や GIS 等を用いた定量的な評価手法が提案されている。国土技術政策総合研究所『ヒートアイランド対策に資する「風の道」を活用した都市づくりガイドライン』第1~4章, <https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryuu/tnn/tnn0730pdf/ks073004.pdf> (2025年4月18日閲覧)。

<sup>3</sup> グリーンインフラとは、社会資本整備や土地利用等のハード・

ソフト両面において、自然環境が有する多様な機能を活用し、持続可能で魅力ある国土・都市・地域づくりを進める取組である。(国土交通省 (2019) 「グリーンインフラ推進戦略」より引用)

<sup>4</sup> ENVI-met とは、都市環境における微気象 (マイクロクライメート) を高解像度で解析する三次元の数値シミュレーションモデルである。主に建築物、植生、地表面などの都市構造物と気象因子 (温度、風、湿度、日射等) との相互作用を解析するために用いられる。ENVI-met GmbH『マイクロクライメートシミュレーションソフトウェア』ENVI-met 公式サイト, <https://envi-met.com/microclimate-simulation-software/> (2025年4月17日閲覧)。

<sup>4</sup> 最近傍補間法 (Nearest Neighbor interpolation) は、ラスタのサンプリング時に各出力セルへ最も近い入力セルの値をそのまま

---

割り当てる最も単純な手法であり、土地利用分類などカテゴリカルデータの変換に適する一方、連続値データではピクセル化した段差が目立つことがある。QGIS Project 『13.1.3.3. リサンプリング (最近傍 NearestNeighbour)』 QGIS Documentation, [https://docs.qgis.org/3.40/ja/docs/user\\_manual/working\\_with\\_raster/raster\\_properties.html#id13-1-3-3](https://docs.qgis.org/3.40/ja/docs/user_manual/working_with_raster/raster_properties.html#id13-1-3-3) (2025年4月17日閲覧)。

---

劉 海強 (熊本市都市政策研究所 博士研究員)

平成29(2017)年9月佐賀大学大学院工学系研究科システム創成科学専攻博士後期課程修了、博士(工学)学位取得。令和5(2023)年度より現職。(令和7[2025]年7月31日退職)