

熊本市における緑地及び水面による 都市熱環境の調節効果に関する研究

劉 海強

熊本市都市政策研究所 研究員

キーワード：都市熱環境、緑地、水面、土地利用土地被覆（LULC）、地表面温度（LST）、GIS

1 はじめに

1.1 背景

2023年7月27日、国連事務総長アントニオ・グテーレスの「地球温暖化の時代は終わり、地球沸騰化の時代が到来した」という発言にあるとおり、気候変動の深刻化による暑熱環境の悪化が懸念されている。IPCC第6次評価報告書（2021）によれば、全球平均気温は2011-2020年に工業化以前より1.09℃上昇し、都市域の温暖化速度は農村部の2倍以上に達すると予測されている。都市部では、Landsberg（1981）が指摘するように、コンクリートやアスファルトなどの人工的被覆面が太陽の熱を吸収し、それを放出することで周囲の気温を上昇させる「ヒートアイランド現象」が発生している。

中川（2011）が指摘し、環境省（2004）が報告しているように、この現象は、特に夏季において都市住民の健康や生活の質に影響を与え、熱中症などの健康問題の発生、二酸化炭素の排出を伴うエネルギー消費量の増加にもつながる。このように都市熱環境の問題は、市民生活に様々な影響を及ぼしており、対策は重要かつ喫緊の課題となっている。

1.2 先行研究及び目的

ヒートアイランド現象は、都市の持続可能な発展における重要課題として広く認識されている。この現象の空間的・時間的特性、都市環境への影響については、三上（2005）や横山（2015）など多くの研究者によって詳細に調査されてきた。

緑地や水面が都市熱環境に与える調節効果についても研究が蓄積されており、この効果がヒートアイランド現象の緩和に貢献することが期待されている。Couttsら（2016）はマレーシアの都市公園、Irie（2022）は東京の代々木公園を対象に分析を行い、グリーンインフラの効果を明らかに

している。また、環境省「平成17年度都市緑地を活用した地域の熱環境改善構想の検討調査報告書」（2006）と「ヒートアイランド対策大綱」（2013）によると、緑被率が高い地域において良好な熱環境が確認されている。

こうした先行研究の知見を活かして、都市熱環境の改善に向けた都市計画施策を検討するためには、各都市について熱環境に関する詳細なデータを収集することが不可欠である。なぜなら、ヒートアイランド現象の特性や、緑地・水面の温度調節効果は、都市特有の気候や地理的条件によって異なることが知られているためである。

熊本市を対象として都市熱環境を扱った研究としては、入江ら（1995）、斎藤ら（2007）がある。入江らは、熊本市の白川周辺における河川緑地幅員と低温域（クールアイランド）の関係を分析し、河川緑地の幅が広いほど周辺地域の気温低下効果が大きいことを報告している。斎藤らは、熊本市中心部の緑地における気温と湿度の実測調査を行い、緑地の冷却効果と蒸発散作用による湿度上昇効果を確認した。

こうした先行研究から、熊本市のヒートアイランド現象の緩和に緑地や水面が効果的であることが示唆される。しかし、近年の都市環境や気象条件の変化を踏まえた包括的な分析や、緑地・水面の最適な配置に関する詳細な検討はなされていない。特に、リモートセンシング技術を用いた長期的な土地利用変化と地表面温度の関連性分析、および緑地や水面の特性と熱環境の調節効果との関連性の分析は十分に行われていない。このように、熊本市の都市熱環境の動態を総合的に理解し、効果的なヒートアイランド対策を立案するためのエビデンスが不足している。

この課題に取り組むため、本研究では以下の2点を主な目的として設定した。第一に、熊本市における緑地および水面が都市の温度変化に与える影響を明らかにすること。第

二に、「どの地域に、どのような形で」緑地や水面を配置すればヒートアイランド現象の緩和に効果的かを解明すること。都市の熱環境は複雑な要因によって形成されるが、本研究ではその中でも特に地表面温度変化に注目することで、緑地や水面が都市熱環境に与える影響をより明確に把握することを目指す。

これらの目的を達成するため、本研究ではリモートセンシング技術を活用し、熊本市の時系列での土地利用土地被覆(LULC)の変化と地表面温度(LST)の関連性を分析する。さらに、江津湖周辺の緑地や水面の配置が地表面温度(LST)に与える影響を定量的に分析し、最適な配置パターンを探ることで、効果的なヒートアイランド対策の提案を目指す。

1.3 論文の構成

論文の構成としては、第1章で背景と目的を述べ、第2章で研究方法を記述し、第3章で課題に対するアプローチを示し、結果を述べる。第4章で結果に基づいて考察し、最終的に第5章で結論を整理する。特に第4章は、考察として位置づけることを明確にし、研究の構成(図1)を整理する。具体的には、まず、熊本市における緑地・水面が都市熱環境に与える影響を解明するため、①時系列データとGISを活用して土地利用土地被覆(LULC)の変遷について整理する。②次に、土地利用土地被覆(LULC)の変化が地表面温度(LST)に与える影響について統計的に評価し、関連性を特定する。③ケーススタディとして、江津湖周辺と他地域の緑地・水面配置を比較し、ヒートアイランド現象への影響について分析する。①、②により、「どの地域に、どのような形で」都市の熱環境が変化しているかについて示すことができ、③では、緑地・水面の環境改善への可能性について示す。

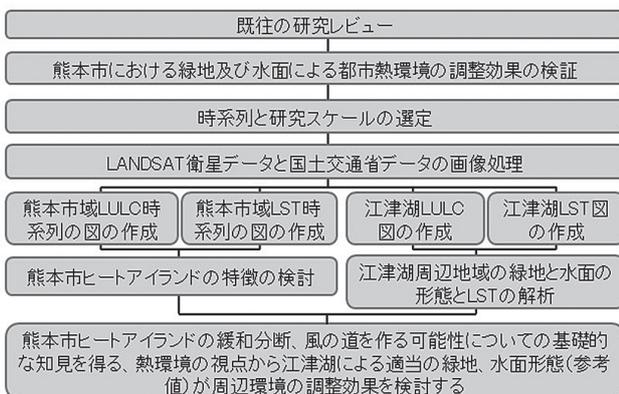


図1 論文の構成

2 研究の方法

本章では研究方法を詳述する。まず、研究目的達成に必要な課題を明確にし、研究対象地域、データソース、処理・分析手法を紹介する。これらが研究課題の解決と目的達成にどう寄与するかを論じる。研究方法として、まず①時系列データとGISを活用して熊本市全域の土地利用土地被覆(LULC)の変遷を整理する。次に②土地利用土地被覆(LULC)の変化が地表面温度(LST)に与える影響を統計的に評価し、その関連性を特定する。さらに③ケーススタディとして、江津湖周辺と他地域の緑地・水面配置を比較し、ヒートアイランド現象への影響について定量的に分析する。これにより、緑地や水面がどのように都市の熱環境に影響を与えているかを明らかにする。

本研究の特徴は、他都市で局所的にしか検討されてこなかった緑地や水面の配置効果に関する手法を熊本市全域に適用することである。特に、熊本市の都市発展の特徴を考慮し、衛星データを用いて時系列の土地利用土地被覆(LULC)および地表面温度(LST)の変化を定量的に把握する。これにより、緑地や水面が都市熱環境に与える影響を明確にし、それをどのように都市施策に反映できるかを探る。

2.1 研究対象地域とデータソース

本研究の重要な特徴は、1976年から2021年にわたるLandsatデータを用いる時系列分析にある。この時系列分析により、熊本市の土地利用および地表面温度(LST)の長期的な変遷を詳細に検証し、その結果として熊本市特有の地域特性を明らかにする。研究に使用する土地利用土地被覆(LULC)データについては、国土交通省が提供する国土数値情報ダウンロードサイト(2023年10月20日閲覧)から取得する。公開する土地利用細分メッシュの統計年度は、1976年、1987年、1991年、1997年、2006年、2009年、2014年、2016年、2021年である。

また、熊本市は豊富な緑地と森林資源が都市の気候調節に大きく寄与してきた。しかし、1976年から1987年および2006年から2009年の2つの期間に、特に熊本市の西部と東部において大きな土地利用の変化が見られた。東部では都市化の進行に伴い、地表面温度(LST)の高温域が集中する傾向が示されており、これにより都市熱環境に大きな影響を与えている。本研究では、この歴史的背景を考慮に入れ、緑地の減少が都市熱環境に与える影響を分析する。特に、時系列データを用いた分析により、森林減少による温度上昇の傾向や、特定地域でのヒートアイランド現象の進行を明

確にする（表1）。

土地利用土地被覆（LULC）変遷及び地表面温度（LST）変化の分析では、前述した統計年度を研究対象とした。市域範囲については、熊本市は、1976年から2021年まで合併により市域が拡大したため、2021年時点を基準とした。また、夏季の日中に焦点を当てた。なお衛星画像取得の時間帯については、衛星画像が取得できる時間の都合から10時台とした。

2.2 衛星画像解析処理

衛星画像を分類するための手法として、地物分類の識別精度を向上させるために、QGISを用いた最尤法（Maximum Likelihood Estimation, MLE）及び地理的加重判別分析（Geographically Weighted Discriminant Analysis, 以下GDAという）を採用した。なお最尤法は、地物の特徴量を各バンドの平均輝度値と分散で表し、これを教師あり学習¹として分類する手法である。GDAは、空間データの分類により使用されている手法であり、回帰係数が地点ごとに異なるモデルを考慮する手法である。

まず、データの品質を確保するため、衛星データの生データに対し、トリミング、ノイズ除去、校正などの前処理を行った。次に、地表物の分光反射特性に基づいて、衛星画像から赤外線、近赤外線、可視光波長の反射率などを抽出し、データクリーニングを経たデータセットを用いて最尤法による画像のピクセル分類を行う。最尤法においては、反復回数を500回、収束閾値を0.01と設定する。

GDAは、リモートセンシング画像内の地理的位置、環境特性、地表面温度（LST）データを結びつけてダウンスケーリングし、地表面温度（LST）分布を示すことができる。この技術を活用し、気候分析やヒートアイランド現象の評価を行うためのデータを作成した。最後に、土地利用細分メッシュデータを用いた交差検証などにより分類結果を評価し、衛星画像分類における最尤法、GDAの有効性及び精度を検証した。なお統計年度によっては土地利用の区分が異なっていたため、2006年度の土地利用の区分に統一した。

2.3 K-Means クラスタリングと Jenks 自然分類法

地表面温度（LST）データの分析に際し、年度ごとの変動による影響を最小化するために、K-Means クラスタリングアルゴリズムと Jenks 自然分類法を用いてデータを7つの段階に分類した。分類では、低温ゾーンから高温ゾーンの順にゾーン1からゾーン7とした。

なお、K-Means クラスタリングアルゴリズムとは、ユーザーが指定するクラスター数Kに基づいてデータをK個のクラスターに分割する手法である。

Jenks 自然分類法は、クラス内の分散を最小化し、クラス間の分散を最大化することを目的としている。まず、K-Means クラスタリングの結果を基に、さらに Jenks 自然分類法を適用して分類の精度を高めた。具体的には、データを繰り返し異なるクラスに分類し、それぞれのクラス分けに対してクラス内の平方偏差和（SDCM）を計算した。

表1 本論で使用した衛星画像データ

衛星名	統計年度	撮影日	撮影時間	センサー	雲量 (%)	セルサ
Landsat5	1976	1976.8.10	10:23:05	TM	7.00	30x30M
Landsat5	1987	1987.8.29	10:22:59	TM	2.00	30x30M
Landsat5	1991	1992.9.17*	10:15:33	TM	2.00	30x30M
Landsat7	1997	1997.9.7	10:31:37	ETM+	7.00	30x30M
Landsat7	2006	2006.8.29	10:35:24	ETM+	3.00	30x30M
Landsat7	2009	2009.8.24	10:36:45	ETM+	3.00	30x30M
Landsat8	2014	2013.8.19*	10:49:17	OLI_TIRS	0.98	30x30M
Landsat8	2016	2016.8.11	10:47:17	OLI_TIRS	1.78	30x30M
Landsat8	2021	2021.8.29	10:43:23 (JST)	OLI_TIRS	2.44	30x30M

*1991年度と2014年度においては、当該機関の衛星画像データの欠落があったため、最も近い時期の入手可能なデータ（1992年、2013年）を活用した。

2.4 景観パターンの指数計算 (LAI、LSI、NDVI)

緑地や水面の量、形状、および質が地表面温度 (LST) に与える影響を適切に評価するため、景観面積指数(LAI、Landscape Area Index)、景観形状指数(LSI、Landscape Shape Index)、および正規化植生指数(NDVI、Normalized Difference Vegetation Index)の指標を用いて定量的な評価を行った。

LAI は、特定の地域内において緑地や水面などの自然要素が占める面積を示す値であり自然要素の広がりを示す。

$$LAI = A$$

A は景観面積である。

LSI は、緑地や水面などの自然要素の形状の複雑さを定量的に評価するために用いられる。LSI は、特定の地域内の

自然要素の周囲の長さをその面積で割った値であり、形状の複雑さを示す。本研究のLSIの対象は水面と緑地であり、本文中のVSI (Vegetation Shape Index) は緑地の景観形状指数、WBSI (Water Body Shape Index) は水面の景観形状指数である。

$$LSI = \frac{E}{A}$$

A は景観面積、*E* は景観の周囲の長さである。

NDVI は、植生の健康状態や密度を示す指標であり、衛星画像から赤色波長と近赤外波長の反射率の差を利用して計算される。計算式は $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ である。NIR は近赤外バンドの反射率、RED は赤バンドの反射率である。

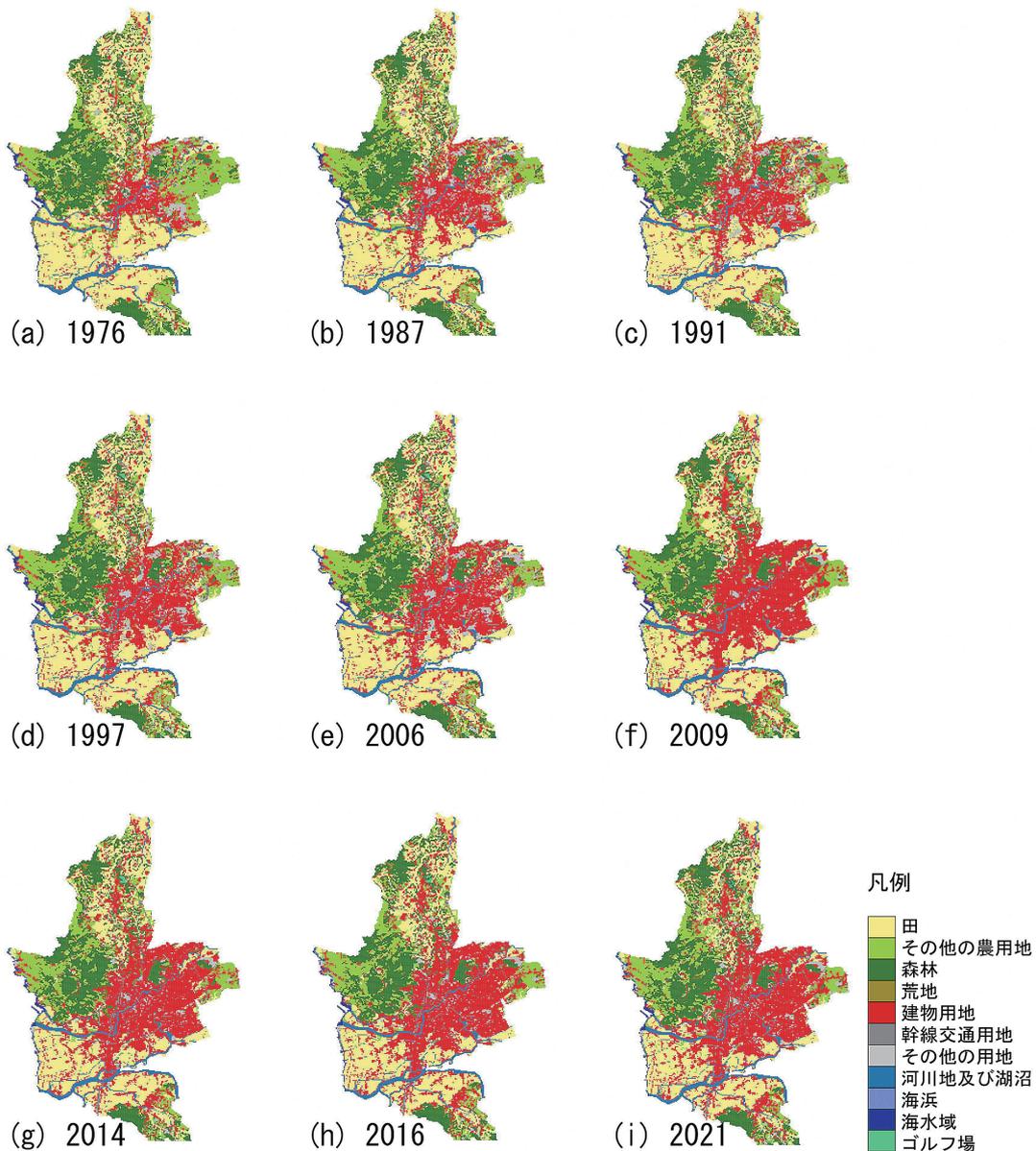


図2 土地利用土地被覆 (LULC) 状況の変遷

3 結果

1976年から2021年までの期間を対象とし、熊本市における土地利用土地被覆（LULC）の変化が地表面温度（LST）に与える影響について定量的な分析を行った。本研究では、熊本市全体の都市熱環境と江津湖周辺地域の局所的な環境を区分して分析した。まず、熊本市全体では、都市化の進展に伴い、特に東部地域で高温域が顕著に拡大し、ヒートアイランド現象が加速していることが確認された。その一方で、緑地や水面がある地域では、地表面温度（LST）の上昇が抑制されていることが観察された。そこで、豊富な緑

地と水面の存在が特徴的である江津湖に着目し、都市熱環境の調節効果を検証するためにケーススタディを行った。なお、江津湖周辺は風致地区に指定されている。その結果、江津湖周辺では、緑地や水面の配置が地表面温度（LST）の低下に寄与し、都市熱環境の調節にも重要な役割を果たしていることが明らかになった。これにより、熊本市の緑地や水面の配置が、都市熱環境に与える効果を地域ごとに検証し、それぞれの地域に応じた対策を検討する必要があることが示された。

表1 土地利用土地被覆（LULC）の面積推移 (ha)

	建物用地	田	その他の農用地	森林	ゴルフ場	その他	河川地及び湖沼	海水域	幹線交通用地	未利用地
1976	5412	13357	8608	7932	0	1133	1594	97	281	334
1987	7764	12877	6694	7467	0	1629	1524	86	449	257
1991	7767	12714	6619	7423	23	1832	1521	86	505	257
1997	9566	11878	6090	6972	33	1858	1551	86	543	170
2006	10170	11294	5676	6876	33	2284	1547	71	558	237
2009	13057	10621	5313	6850	50	928	1464	75	206	184
2014	12586	10360	5138	6861	49	1021	1682	63	811	177
2016	12900	10004	5113	6832	41	1175	1684	81	744	174
2021	13108	9205	5219	7098	30	1402	1707	79	714	186

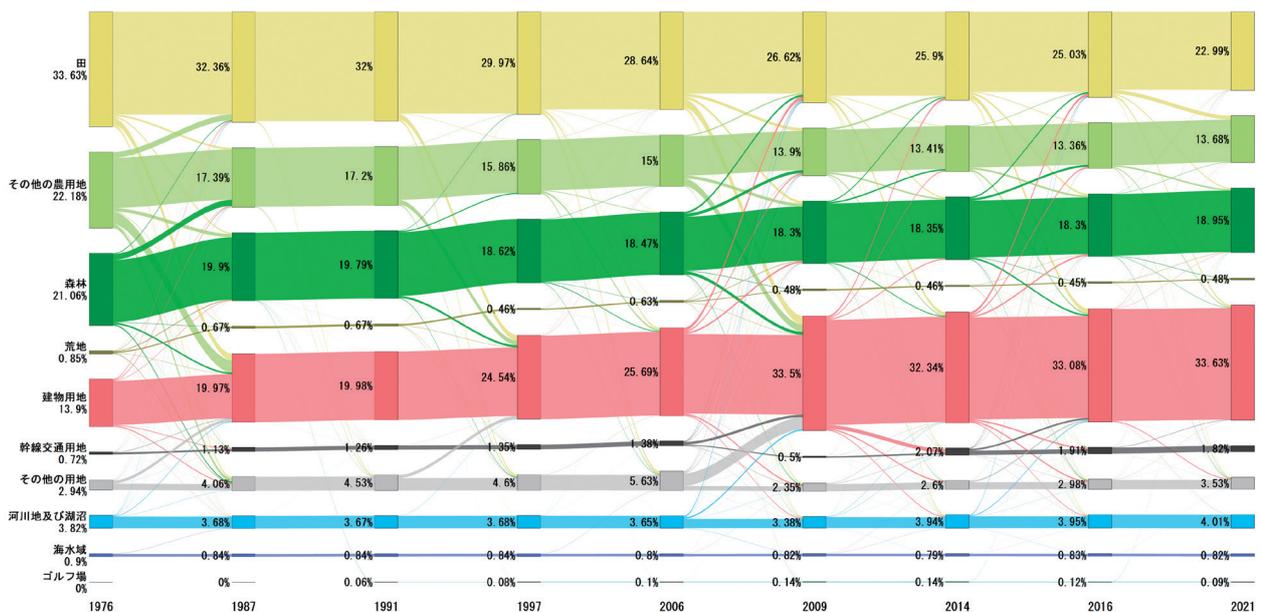


図3 各土地利用土地被覆（LULC）の面積比率の変遷

3.1 熊本市全域の結果

3.1.1 土地利用土地被覆 (LULC) 変遷

図2、表2、図3に、1976年から2021年までの熊本市における土地利用土地被覆(LULC)の変遷を示した。1976年から2021年にかけて、熊本市の土地利用は大きく変化している。特に森林の減少が著しいのは、花園や島崎地区である。これらの地域では、森林が建物用地に転換されたことで地表面温度(LST)が顕著に上昇し、自然の冷却効果が失われた結果、ヒートアイランド現象が進行した。また、東部地区では、1976年からの開発により都市化が進行し、地表面温度(LST)の高温域が拡大したことが確認された(図2、図3)。QGISを用いた差分分析では、これらの地域での森林減少が地表面温度(LST)の上昇と直接関連していることが明らかとなった。具体的には、森林の面積は7932ヘクタール(総面積の21.60%)から7098ヘクタール(総面積の18.95%)に減少し、約834ヘクタール、2.65%減少する。また、田の面積は13357ヘクタール(総面積の33.63%)から9205ヘクタール(総面積の22.99%)に減少し、約4153ヘクタール、10.64%減少する。その他の農用地も、面積が8608ヘクタール(総面積の22.18%)から5219ヘクタール(総面積の13.68%)に減少し、約3389ヘクタール、8.5%減少する。

図2と図3を比較すると、熊本市の発展と土地利用土地被覆(LULC)の拡大は循序漸進的に進んでいるが、土地利用土地被覆(LULC)変化が顕著である時間帯は1976年から1987年と2006年から2009年の二つの期間であり、他の期間の変化は比較的緩やかであるか、または徐々に進行する。まず、1976年から1987年の間では、土地利用土地被覆(LULC)の変化が特に顕著であったのは、西部の花園、島崎地区である。この期間の変化は、1971年第11回熊本県都市計画地方審議会において、熊本都市計画区域市街化調整区域として立田山付近の東地区、金峰山付近の南地区などが指定されたことに始まり、1974年の熊本市都市計画区域用途指定により、土地利用の転換が促進される。また、1981年の熊本駅の開通および1982年に開始された流通業務地区の据え置き、広域交通インフラの整備(九州縦貫自動車道の植木、菊水、熊本IC、御船の開通)、国道57号東バイパスが1985年前線開通などにより、住宅団地の建設や学校新設、文化施設の移転が進み、これに伴って人口が東部と南部へと移動

し、土地利用が大きく変化する。このため、花園、島崎地区では森林が建物用地に変わり、東部の長嶺の西原地区付近では、主にその他の農用地が建物用地や幹線交通用地に転換される。さらに、南部の近見地区、田迎や西熊本駅付近では、田が建物用地に転換される。

次に、2006年から2009年の間では、変化が特に顕著であったのは、北部の植木町中心部であり、主に森林、田、その他の農用地が建物用地に転換される。この期間の背景には、2005年の九州新幹線開通とそれに伴う熊本駅周辺整備計画があり、これにより都市開発が進む。また、植木、長嶺地区、健軍地区、近見地区でも土地利用の転換が進み、建物用地の増加と建築密度の上昇が見られる。東部の長嶺地区周辺や健軍地区では、その他の農用地およびその他の用地が建物用地に転換され、さらに南部の西熊本駅南側地区では、主に田が建物用地に転換される。

3.1.2 土地利用土地被覆 (LULC) の変遷による地表面温度(LST)の経年変化

図4に示すとおり、横軸は選定された年度、縦軸は地表面温度(LST)を表す。各年に対応するバイオリンプロットの「幅」は、その時点で熊本市の地表面温度(LST)が特定の温度に集中する程度を示し、幅が広いほどその温度帯のデータ密度が高いことを意味する。プロットの上下の長さは地表面温度(LST)の分布範囲を表し、図が上下に伸びるほど温度分布の範囲が広いことを示す。

1976年から2021年にかけて、熊本市の地表面温度(LST)は全体的に上昇傾向を示している。1976年のプロットは、Landsat TM データが100×100メートルの解像度でデータを取得したため、リサンプリング後も分布の連続性に課題があるものの、地表面温度(LST)の全体的な分布を正確に反映している。プロットは下部、地表面温度(LST)が低い範囲の幅が大きく、この温度範囲のデータ密度が高いことを表している。時間の経過とともに、第二の密度の集中点は低温域から高温域へと徐々に形成された。特に2009年には、高温域の密度がピークに達し、上下に2つのデータ集中点が形成されている。2009年以降、高温域の密度はやや低下するものの、引き続き高い密度を維持している。

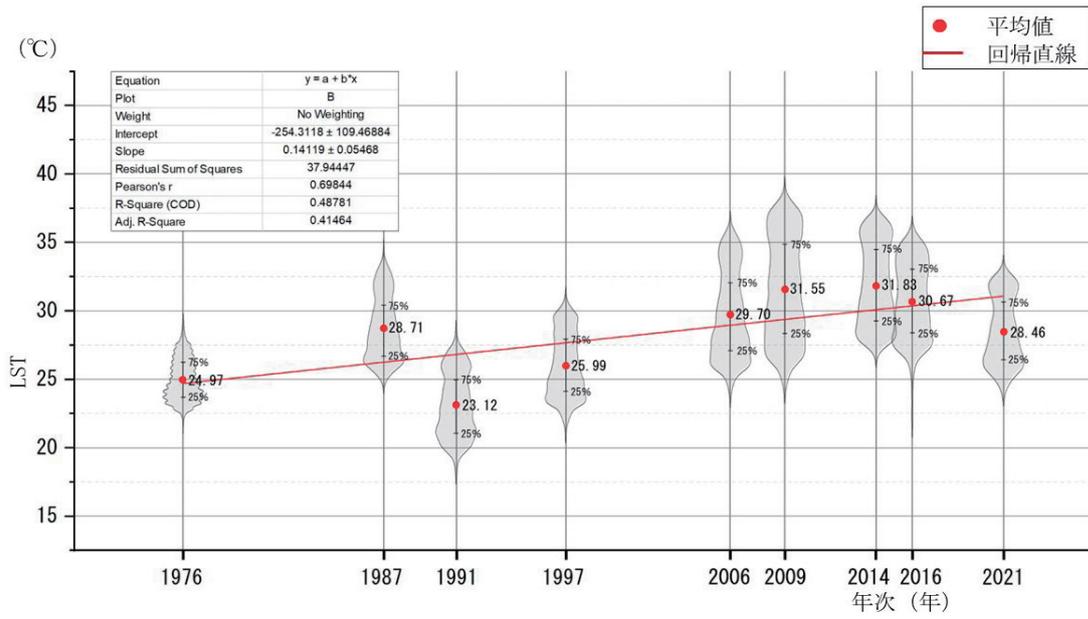


図4 各年地表面温度 (LST) の分布

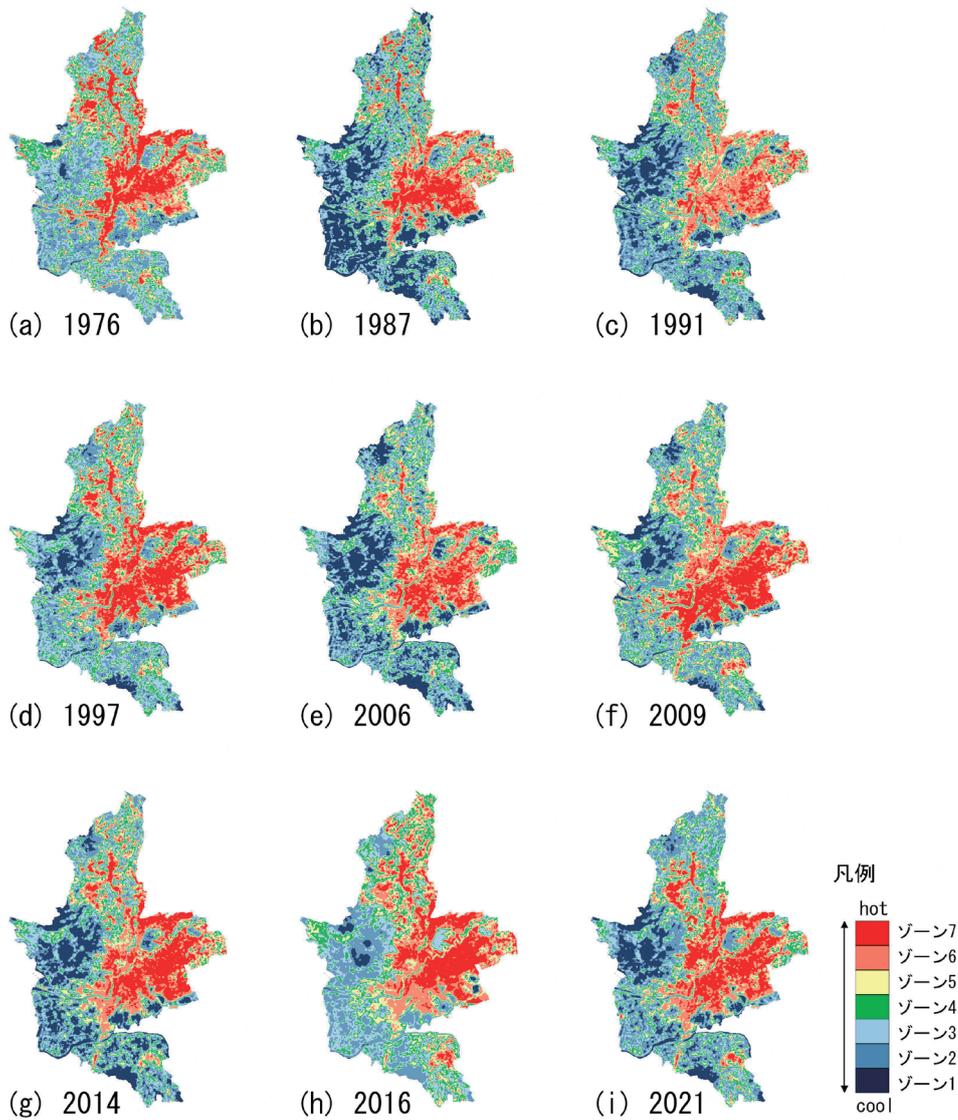


図5 地表面温度 (LST) 状況の変化

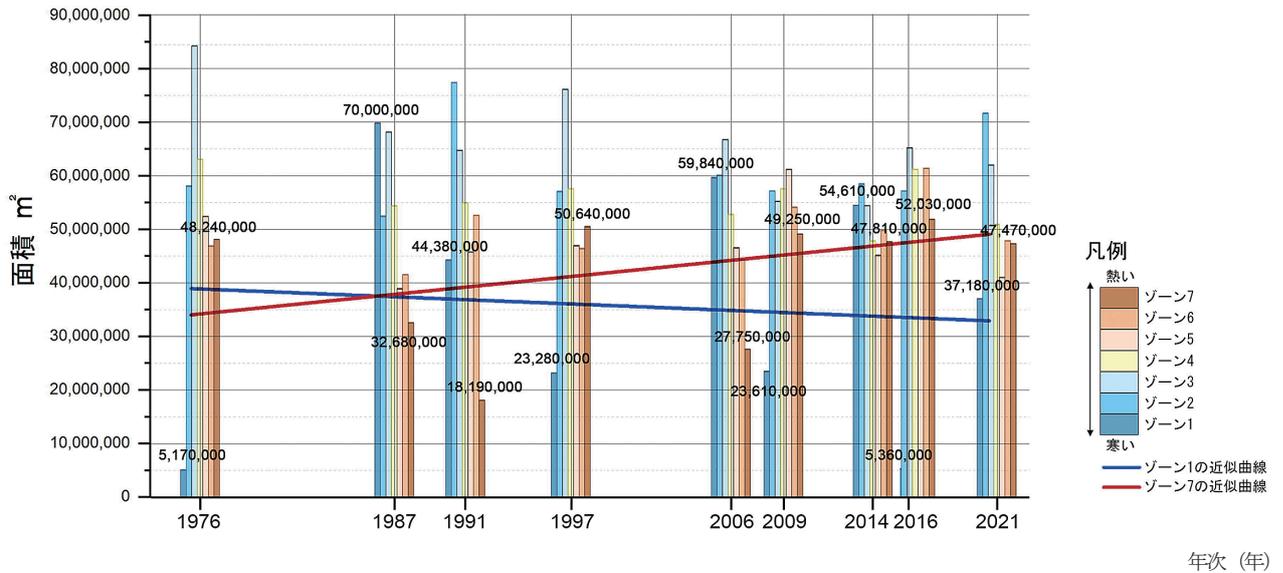


図6 地表面温度 (LST) ゾーン1、ゾーン7の面積変化

全体的な傾向の中で、1976年から1987年、および2006年から2009年の2つの期間において、地表面温度 (LST) の分布形状が顕著に変化している。1976年から1987年にかけて、密度の集中点が低温域から高温域へと移動し始めている。2006年から2009年にかけては、図の形状に大きな変化が見られ、低温域と高温域の集中点のデータ密度がほぼ同じになっている。これらの期間における変化は、図3に示された各土地利用土地被覆 (LULC) の面積比率の変遷と一致しており、土地利用土地被覆 (LULC) と地表面温度 (LST) の間に強い関連性があることを示唆している。

土地利用土地被覆 (LULC) の変遷が地表面温度 (LST) に与える影響をさらに詳細に分析する結果、森林の減少が著しい西部で地表面温度 (LST) の上昇が顕著に見られることが分かる。図4に示されるように、1976年から2021年にかけて、これらの地域では平均地表面温度が2.5°C上昇し、これは森林の減少と都市化の進展が主要な原因である。この結果は、土地利用土地被覆 (LULC) の変化がヒートアイランド現象の拡大に直接的な影響を与えることを示す。この傾向の主な原因は、建物用地の増加や森林、田畑などの農用地の減少が自然の温度調節機能を弱めることにある。これらの要因が地表面温度 (LST) 分布範囲の拡大と分散性の増加をもたらす。その結果、熊本市の地表面温度 (LST) は平均で2.5°C上昇することが確認される。このように、気候変動や熊本市の土地利用土地被覆 (LULC) の変化に伴い、地表面温度 (LST) は全体的に上昇傾向を示し、その分布範囲も拡大している。

異なる年度間で地表面温度 (LST) を比較するため、2.3で述べたように、各年の地表面温度 (LST) を7つの温度段階に分類した。1987年から2021年までの地表面温度 (LST) 段階に基づく面積の変化を図5及び図6に示す。

図5を見ると、図2に示されている熊本市の建物用地の広がりに合わせて、それらの地域で温度が高くなっていることがわかる。図6を見ると、最高温度段階のゾーン7と最低温度段階のゾーン1の面積に変化がみられる。1976年のデータでは、温度は主にゾーン2、ゾーン3及びゾーン4に集中し、最高温度段階の面積も1987年、1991年などより大きかったことが確認できる。1987年から2021年にかけて、最高温度段階の面積は増加する傾向にあり、最低温度段階の面積は減少していることが確認できる。これは、地表面温度 (LST) が全体的に上昇している傾向にあることを示しているが、土地利用土地被覆 (LULC) の種類による上昇の程度には異なりがみられる。この節を総括すると、都市化に伴う建物用地の増加と、田やその他の農用地の減少は、ヒートアイランド現象の増強に直接関連しており、これにより温度が上昇している。

さらに、全体の変化の傾向を把握するため、図7に示すとおり、7つの温度段階を3つの温度段階に再分類する。ゾーンAは「ゾーン1」、「ゾーン2」で構成される低温ゾーン、ゾーンBは「ゾーン3」、「ゾーン4」、「ゾーン5」で構成される中温ゾーン、ゾーンCは「ゾーン6」と「ゾーン7」で構成される高温ゾーンをとした。

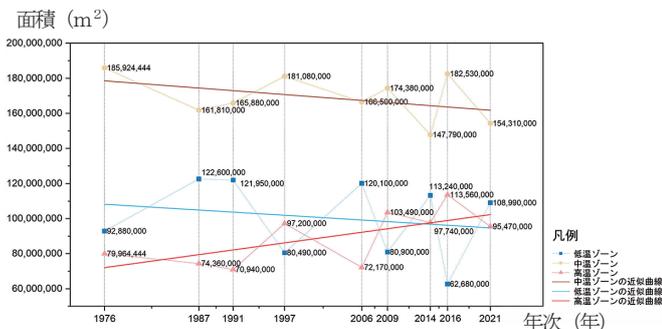


図7 地表面温度 (LST) ゾーンの面積変化と線形回帰線

この分類により、各ゾーンの面積変化を明確に捉えることができた。図7に示すとおり、ゾーンC (高温ゾーン) とゾーンA (低温ゾーン) の面積変化の近似曲線は2014年頃に交差している。これは2014年を境にして高温ゾーンの面積が低温ゾーンの面積を上回るようになったことを示している。この結果から、熊本市における都市化の進展が地表面温度 (LST) に与える影響の大きさとその変化の様相を具体的に理解することができる。

また、1976年から2021年までの各温度ゾーンの面積の変化を見ると、ゾーンAは大きく増減を繰り返しつつ、大きな変動を示している。しかし全体的には減少傾向にある。ゾーンBは、ゾーンAまではないが、こちらも増減を繰り返しつつ、全体として下降傾向にある。一方、ゾーンCの面積は、こちらも増減を繰り返しているが、全体としては上昇傾向にある。

3.1.3 土地利用土地被覆 (LULC) と地表面温度 (LST) の相関性の検証

熊本市における土地利用土地被覆 (LULC) と地表面温度 (LST) の相関性についても検証を行った。2021年の土地利用土地被覆 (LULC) データと、同位置の衛星画像から得られた地表面温度 (LST) データを重ね合わせ、900mメッシュを作成し、土地利用と地表面温度 (LST) の関係性を評価した。この900mメッシュは、熊本市の緑の基本計画で採用されている1kmメッシュに基づいており、都市計画における緑地配置の検討に適した解像度である。また、900mメッシュは、徒歩で約10~15分で移動できる範囲であり、緑地や水面の冷却効果が市民の生活環境に直接的に影響を与える範囲として適切であると考えられる。また各土地利用土地被覆 (LULC) の割合が、そのメッシュ内の平均地表面温度²⁾にどの程度影響を与えているかを分析した (図8, 9, 10)。

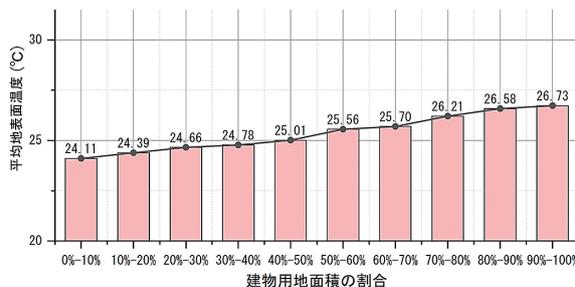


図8 建物用地の面積割合と平均地表面温度

建物用地については、図8に示すとおり、メッシュ内における建物用地の面積割合の増加に従い、平均地表面温度の上昇が確認できる。建物用地の面積割合が10%未満のメッシュと90%以上のメッシュでは、平均地表面温度が2.6°Cの差がある。建物用地の面積割合が10%増加するごとに、平均地表面温度は約0.3°C上昇する。これは、建物用地の広がり温度を上げる効果があることを示している。

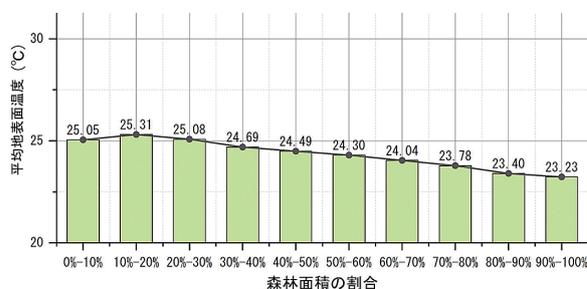


図9 森林の面積割合と平均地表面温度

森林については、図9に示すとおり、メッシュ内の森林の面積割合が増加すると、平均地表面温度が低下する傾向が確認できる。森林の面積割合が10%未満のメッシュと90%以上のメッシュとでは、平均地表面温度に約1.7°Cの差がある。さらに、森林の面積割合が10%増加するごとに、地表面温度 (LST) は約0.2°C低下する。この結果は、森林の広がり地表面温度 (LST) を低下させる効果があることを示している。

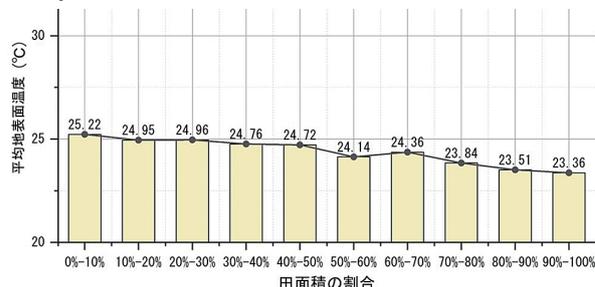


図10 田の面積割合と平均地表面温度

田については、図10に示すとおり、メッシュ内の田の面積割合が増加すると、平均地表面温度が低下する傾向が確認できる。田の面積割合が10%未満のメッシュと90%以上のメッシュとでは、平均地表面温度に約2.1°Cの差がある。さ

らに、田の面積割合が10%増加するごとに、平均地表面温度は約0.3°C低下する傾向にある。これは、田の広がり地表面温度 (LST) を低下させる効果があることを示している。ただし、この傾向には一部例外がみられる。これは田の分布が集中しており、メッシュデータ数が少ないことが原因と考えられる。

これまでの分析結果から、熊本市におけるヒートアイランド現象の特徴が徐々に明らかになっている。特に、都市化の進展による建物用地の増加と森林の減少が地表面温度 (LST) の上昇に大きく寄与していることが示されている。これに基づき、次に熊本市全体の検証と江津湖周辺の局所的な検証を行い、それぞれの地域における効果的な緑地及び水面配置の対策を提案する。

3.2 江津湖周辺地域の結果

地表面温度 (LST) に対する土地利用土地被覆 (LULC) の影響を定量的に評価するため、緑地と水面を有し、内部の形状と植生も多様である江津湖周辺地域をケーススタディとして、2021年の土地利用土地被覆 (LULC) データと2021年8月29日 (表1参照) の地表面温度 (LST) データから、緑地と水面の景観面積指数 (LAI)、景観形状指数 (LSI)、正規化植生指標 (NDVI) を測定し、冷却効果の分析を行った。

3.2.1 地表面温度 (LST) に対する土地利用土地被覆 (LULC) の影響

分析に先立ち江津湖の中心部を軸とした3kmメッシュを8等分に区域分けした (図11)。また2021年の江津湖周辺8つの区域における土地利用土地被覆 (LULC) の割合と平均地表面温度を図12に示す。図12に示すとおり、ゾーンS-SEでは河川地及び湖沼 (以下、水面という) の割合が39%と最も高く、平均地表面温度も最も低いことがわかった。次いでゾーンS-SWでは、緑地と水面の面積の合計は6%と少ないものの、田の面積が58%を占めていたため、平均地表面温度はゾーンS-SEに次いで低くなった。一方、ゾーンE-NEとN-NEでは緑地と水面の割合が最も低く、平均地表面温度が最も高かった。このことから、緑地と水面の割合が高いほど平均地表面温度は低くなる負の相関関係が確認された。また、田の冷却効果は緑地や水面ほど高くはないものの、その割合が大きければ、地表面温度 (LST) の低下に大きく寄与することがわかった。

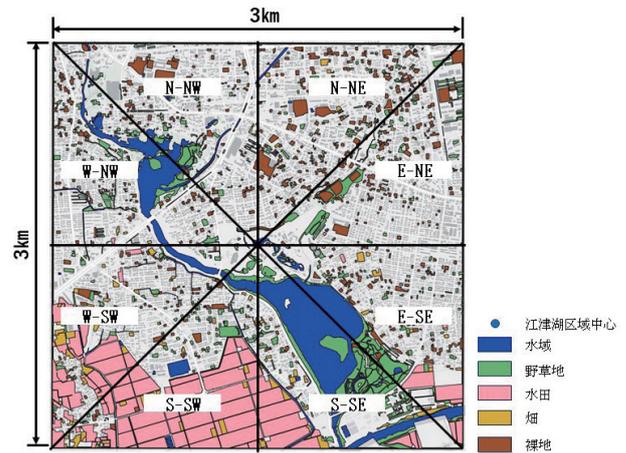


図11 研究の範囲 (動植物園内の池を中心に3kmメッシュ)

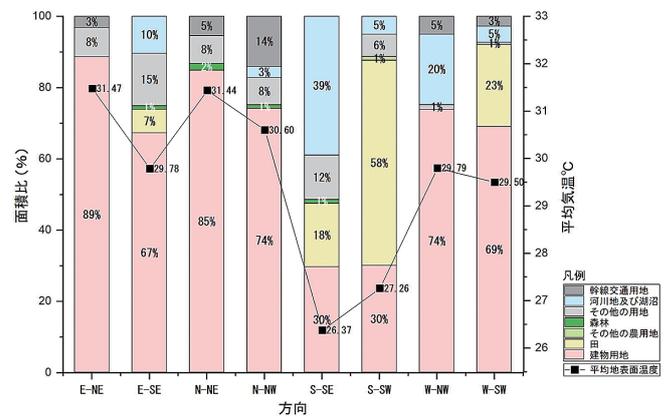


図12 8区域における土地利用土地被覆 (LULC) の割合と平均地表面温度

2021年の熊本市における異なる土地利用土地被覆 (LULC) と地表面温度 (LST) の分布、範囲、平均値について、図13に8つの区域における土地利用土地被覆 (LULC) の面積を示す。8つの区域のうち、ゾーンS-SEの南側境界が熊本市の範囲内に含まれていないため、S-SEの面積は他の区域と比べて小さくなっている。また、図14に8つの区域における各土地利用土地被覆 (LULC) の地表面温度 (LST) の分布を示す。

図14をみると、建物用地と幹線交通用地の地表面温度 (LST) 分布は高く、平均地表面温度は31.59°C、最低温度は26.37°Cである。また、これらの地域では温度分布の範囲が他の土地利用土地被覆 (LULC) と比べて広いことが特徴である。これは、人工被覆材の熱特性、人間活動による熱発生、緑地の不足、都市構造による熱の滞留が主要な要因と考えられる。

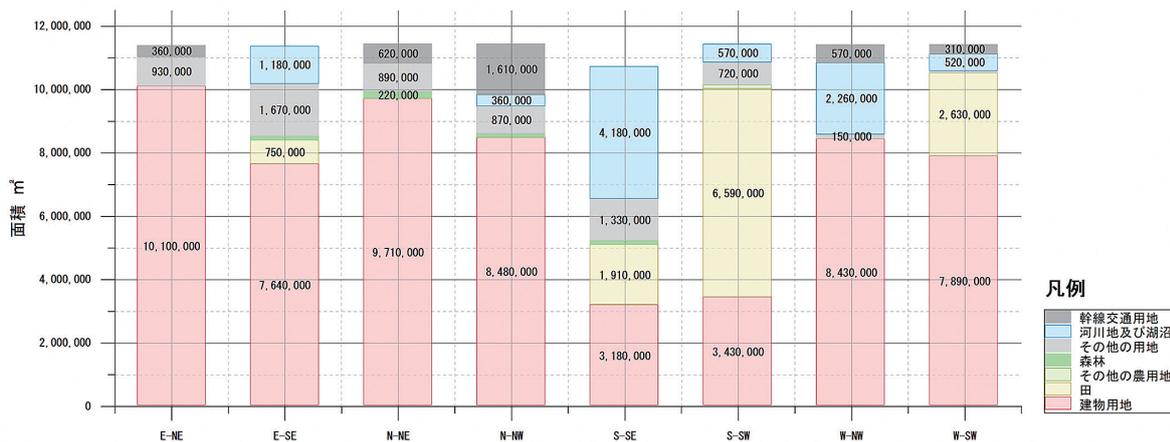


図 13 8つの区域における土地利用土地被覆 (LULC) の面積

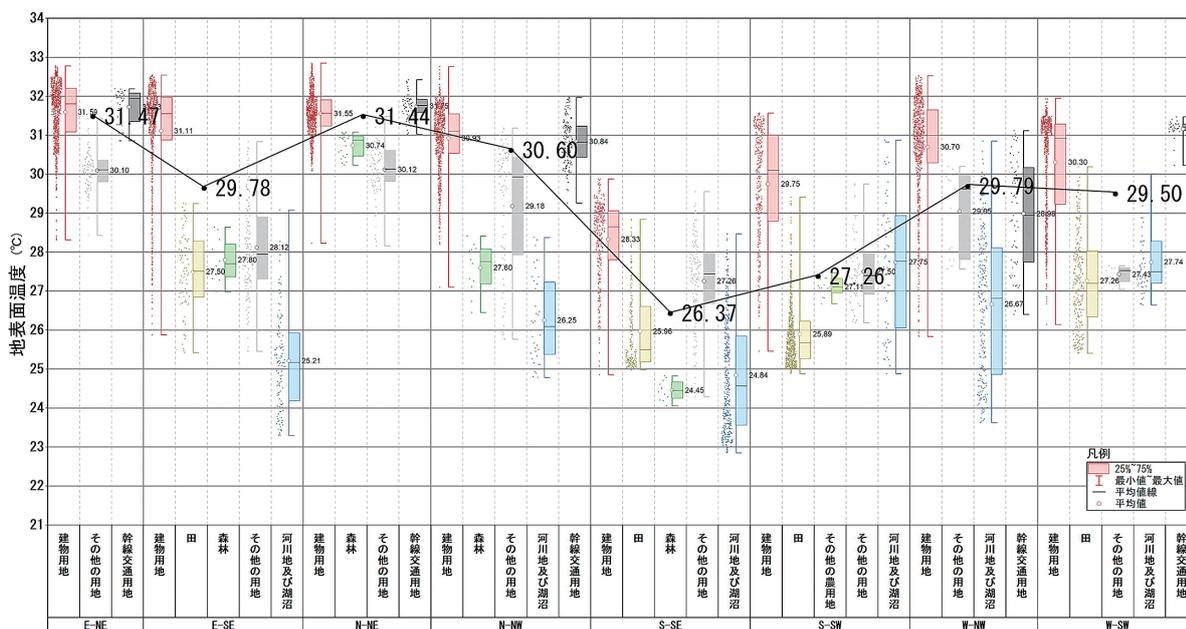


図 14 8つの区域における各土地利用土地被覆 (LULC) の地表面温度 (LST) 分布

河川地及び湖沼は平均地表面温度が最も低い。これらの土地利用土地被覆 (LULC) における地表面温度 (LST) 分布範囲は広く、最低地表面温度は24.84°Cである。これは水面が蒸発冷却を通じて周囲の気温を効果的に下げることが主な要因と考えられる。

田やその他の農用地の平均地表面温度は低い。特に、田は集中して分布しており、その周辺地域が涼しい環境であることを示している。植物が太陽放射の一部を吸収、発散させることが、冷却効果の主要な要因といえる。

森林とその他の用地の地表面温度分布は、特に森林で温度変化が大きく温度分布の範囲が広いことを示している。

3.2.2 景観面積指数 (LAI)

熊本市内の緑地及び水面が都市熱環境に与える影響について、景観面積指数 (LAI) を用いて定量的に分析を行った。

分析の結果、緑地や水面の面積と都市熱環境との間に明確な相関関係が確認された。

図 13 および図 14 に示すように、公園や水面が豊富な地域では、地表面温度 (LST) が周辺地域と比較して平均 5.1°C 低くなることが判明した。この冷却効果は、緑地や水面の面積が拡大するにつれて顕著になる傾向が見られた。

対照的に、景観面積指数 (LAI) が低い、すなわち緑地や水面の面積が小さい地域では、地表面温度 (LST) が高く、熱環境が悪化していることが確認された。この結果は、都市部における緑地や水面の重要性を定量的に示すものである。

特に注目すべきは、江津湖周辺地域における LAI の分析結果である。この地域では、LAI の値が高いほど地表面温度 (LST) が低下する傾向が顕著に観察された (図 14)。この結果は、緑地や水面の面積が都市の冷却効果に大きく寄与

していることを明確に示している。

3.2.3 景観形状指数 (LSI)

熊本市内の緑地や水面が都市熱環境に及ぼす影響について、景観形状指数 (LSI)、緑地の形状指数 (VSI)、水面の形状指数 (WBSI) を用いて詳細な分析を行った。

緑地の影響に関しては、図 15 の分析結果から、VSI が低い (0~4 の範囲) ほど、つまり緑地の境界が複雑であるほど、周囲の地表面温度 (LST) が低下することが明らかになった。これは、複雑な形状の緑地が蒸発冷却や日射の遮断効果をより効果的に発揮するためと考えられる。同じ植被面積でも、形状が複雑で境界線が長い緑地ほど、周辺の熱環境改善に良い影響を与えることが確認された。

水面の影響については、図 16 の分析結果から、WBSI が高くなるにつれて地表面温度 (LST) が低下し、特に WBSI が 9 付近の時に最も顕著な冷却効果が現れることが判明した。W

BSI が 9 付近というのは、水面の形状が一定の複雑さを持ち、かつ面積とのバランスが最も効率的に冷却効果を発揮するポイントを指している。この段階で水面が単に広だけでなく、周囲との接触面が増えることで、周囲により効果的な冷却効果を与えることが確認されている。

さらに、景観形状指数 (LSI) の分析では、緑地や水面の形状が都市熱環境に与える総合的な影響を評価した。結果として、景観形状指数 (LSI) の値が高く形状が複雑な緑地や水面ほど、その周囲の地表面温度 (LST) が効果的に低下することが確認された (図 15, 16)。

これらの分析結果から、都市熱環境対策において、緑地や水面の面積だけでなく、その形状も重要な考慮要素であることが明らかになった。複雑な形状の緑地や適切な形状の水面を戦略的に配置することで、より効果的な都市熱環境の改善が可能であることが示唆される。

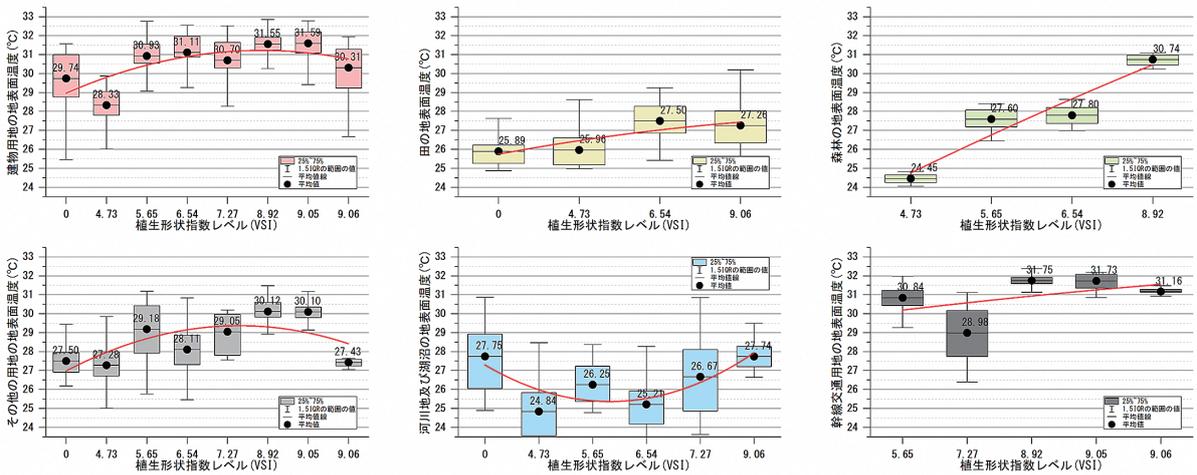


図 15 緑地の形状指数 (VSI) が他の単一の土地利用土地被覆 (LULC) の地表面温度 (LST) に及ぼす影響

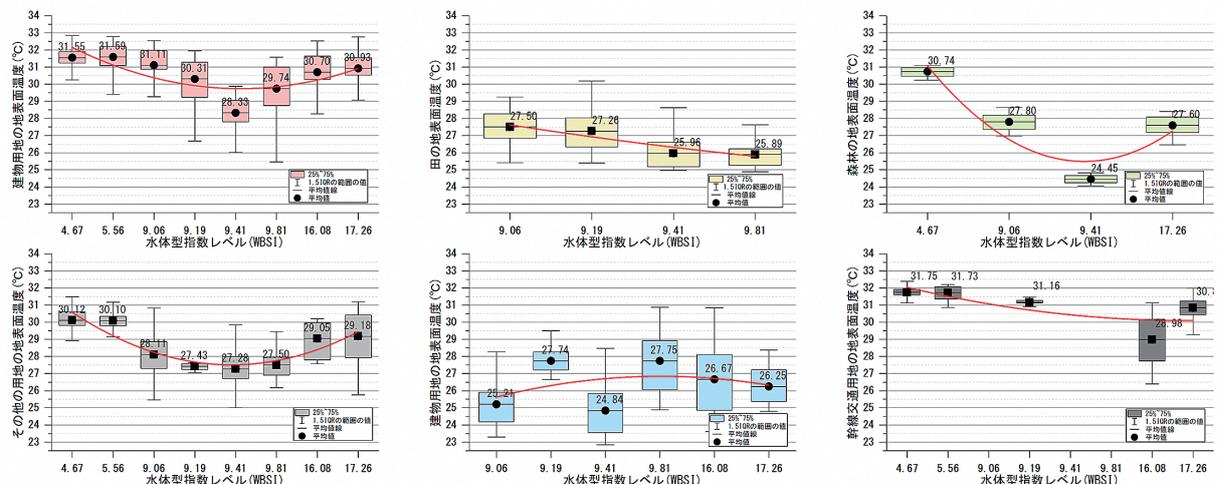


図 16 水面の形状指数 (WBSI) が他の単一の土地利用土地被覆 (LULC) の地表面温度 (LST) に及ぼす影響³

3.2.4 正規化植生指標 (NDVI)

建築物が密集する地域におけるNDVIと地表面温度(LST)の関係を図17に示した。曲線は地表面温度(LST)の近似曲線である。NDVI値は主に-0.3から0.6の範囲に分布している。NDVI値が0に近い区間では、主に建築物と裸地面が該当し、地表面温度(LST)が最も高くなる傾向が見られた。特に、NDVI値が-0.02の時に建物用地の地表面温度(LST)が最高値の31.43℃に達した。

一方、NDVI値が-0.3から-0.2付近では地表面温度(LST)が低くなる傾向が観察されたが、この現象については更なる調査が必要である。NDVI値が0を超え、特に0.3以上になると、地表面温度(LST)が相対的に低くなることが確認された。さらに、NDVI値が0.5から0.6の範囲では、最も冷却効果が確認できた。

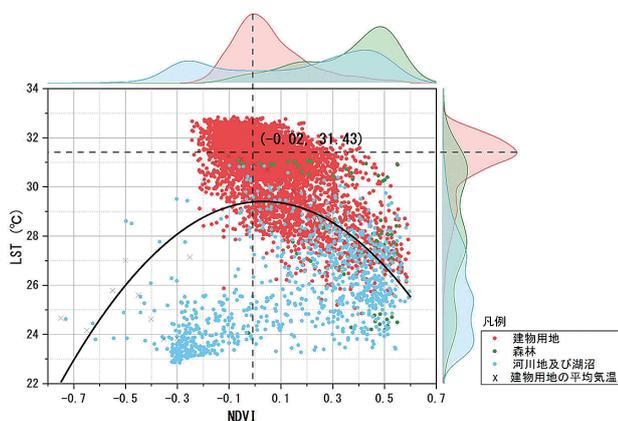


図17 正規化植生指標 (NDVI) と地表面温度 (LST)

4 考察

本章では、熊本市におけるヒートアイランド現象の特徴とその緩和策について、熊本市全域と江津湖周辺地域の二つのスケールで分析した結果を基に、3つの観点から考察を行った。まず、1976年から2021年にかけての熊本市全域の都市発展による土地利用土地被覆(LULC)の変化が、地表面温度(LST)に及ぼす影響について検討する。次に、緑地・水面の特性と調節効果の関連性について、江津湖周辺地域におけるケーススタディを踏まえて検討を行う。さらに、これらの結果をもとにして、ヒートアイランド現象の緩和を図るうえで、熊本市における緑地や水面の保全・整備の今後の方向性について考察する。

4.1 都市化の進展が地表面温度 (LST) に与えた影響

1976年から2021年にかけて、熊本市では都市化の進展に伴い、土地利用土地被覆(LULC)に大幅な変化がみられた。

具体的には、田、その他の農用地、森林等の緑地が減少する一方で、建物用地をはじめとする都市的な土地利用が増加した。地域性に注目すると、市東部におけるその他の農用地から建物用地への変化が顕著であった。地表面温度(LST)の時系列変化については、都市化が進展するにつれて高温ゾーンが拡大する傾向がみられた。高温ゾーンの広がりが目立つのは市東部であり、都市的土地利用への転換と地表面温度の上昇には連動性があると考えられる。

土地利用土地被覆(LULC)と地表面温度(LST)の関係については、900mメッシュを単位として分析を行い、建物用地の面積割合が増加すれば地表面温度が上昇する一方で、森林・田の面積割合が増加すれば地表面温度が低下する相関性が確認された。こうしたことから、都市化の進展、すなわち建物用地の拡大と緑地の減少が、地表面温度(LST)の上昇に寄与していたと考えられる。

図5に示される地表面温度(LST)の時系列分析を通じて、高温ゾーンに属する年が多い中で、特定の年において低温ゾーンに含まれる地域が観察された(例:2016年の市南東部)。このような状況は、土地利用土地被覆(LULC)の変化だけでは説明できず、他の要因が関与していることが示唆される。具体的には、湧水水域を通る風によって冷たい空気が市街地に運ばれ、局所的にヒートアイランド現象が緩和されている地域が存在することが推測される。このように、地形や風環境といった要因も、熊本市の都市熱環境に重要な影響を与えている可能性がある。したがって、今後の研究では、地形や風速・風向、さらには水系の分布といった要素も含めて分析を行い、都市熱環境調節効果をより包括的に評価することが求められる。

4.2 緑地・水面の特性と熱環境の調節効果の関連

本研究では、江津湖周辺地域をケーススタディとして、緑地や水面が地表面温度(LST)の調節効果に与える影響を定量的に評価した。景観面積指数(LAI)の分析を通じて、緑地や水面の面積が大きいほど、都市熱環境の調節効果が高まることが確認された。この結果を基に、都市計画においては、まとまった緑地・水面の保全が都市熱環境の改善に寄与する重要な要素となる。

さらに、景観形状指数(LSI)の分析では、緑地や水面の形状が複雑であるほど冷却効果が高まることが確認された。しかし、VSI(緑地の形状指数)やWBSI(水面の形状指数)の分析結果では、冷却効果が最大となる数値が存在し、必ずしも大きければ良いわけではないことが明らかとなった。

例えば、細長すぎる形状では、効果が減少することも確認された。これにより、単に形状を複雑にするだけでなく、適切なバランスを保った形状設計が、冷却効果を最大化するために重要であると考えられる。これは、単一の大規模な緑地だけでなく、住宅地や市街地に分散して配置された小規模な緑地が複雑な形状を形成することで、より広範な冷却効果が期待できることを示唆している。特に、農地を住宅地に転用する際にも、このような緑地・水面の形状を意識することが、都市熱環境の改善に寄与する可能性が高いと考えられる。

また、NDVI の数値が高いほど、植生が健康で密度が高い状態が保たれ、都市の冷却効果に大きく寄与することが明らかとなった。特に、NDVI が 0.3 以上の場合、地表面温度 (LST) の顕著な低下が観察され、NDVI が 0.5 から 0.6 の範囲では最大の冷却効果が確認された。このように、緑地や水面の面積だけでなく、植生の質や健康状態が都市熱環境改善において重要な要素であることが示された。

4.3 緑地・水面の保全・整備の方向性

これまでの分析を踏まえて、都市熱環境の緩和に向けた緑地や水面の保全・整備において、以下の点が重要であることが明らかになった。

まず、大規模な緑地や水面の保全が都市熱環境の改善に大きく寄与することが確認された。江津湖のようなまとまった緑地は、その広範な冷却効果により、都市のヒートアイランド現象を効果的に緩和する。このため、緑地や水域が存在する地域におけるこれらの空間資源の保全を今後も強化する必要がある。一方で、都市全体の熱環境改善には、大規模な緑地だけでなく、小規模緑地の効果的な配置も重要である。住宅地や市街地においても緑地の分散配置と相互の連結を図ることで、より広範囲にわたる冷却効果を発揮させることが期待される。

さらに、緑地や水面の形状も冷却効果に影響を与えることが分かった。水面形状の異なるタイプとして、線状の河川と面状の湖が存在する。本研究の広がりとして、入江ら (1995) の白川周辺における河川緑地幅員と低温域 (クールアイランド) に対する影響を分析した研究と本研究の江津湖周辺の分析を比較すると、白川流域では形状が複雑であるため、周囲との境界面積が大きくなり、局所的な冷却効果が高いことが確認されている。これを景観形状指数 (LSI) の観点から考察すると、水面の面積が同等であっても、形状が複雑な河川の方が冷却効果が高いと考えられる。一方、広範

にわたる温度変化については、江津湖周辺でさらなる検証が必要であるものの、江津湖を中心に、その影響範囲が湖周辺の広い地域にまで冷却効果をもたらし、さらに遠くまで波及する可能性が高い。

これらの知見を踏まえると、熊本市のヒートアイランド対策においては、局所的な冷却効果を持つ白川と、広域的な冷却効果を期待される江津湖の両方を保全し、有効活用することが重要である。さらに、これらの大規模な水域と緑地を核としつつ、都市全体に小規模緑地を配置することで、より効果的な都市熱環境の改善が期待できる。

江津湖は、風致地区としての役割も考察されている。これらの地区は、景観の保全だけでなく、都市の熱環境を緩和する上でも重要な役割を果たしている。風致地区内の緑地や水面は、都市の中で冷却効果を持つ「クールスポット」として機能し、周辺の熱環境を改善する一助となる。

5 結論

熊本市全域で見た結果、都市化の進展が都市熱環境に与える影響と、緑地および水面がその緩和に果たす役割が明らかになった。特に、都市中心部や建物が密集する地域ではヒートアイランド現象が顕著に見られるが、これに対し、緑地と水面の適切な配置が都市熱環境の調節に重要な効果を持つことが確認された。

江津湖周辺の分析結果からも、緑地や水面の適切な配置が局所的な冷却効果を生み出し、地表面温度 (LST) の低減に寄与することが示された。また、緑地や水面の形状が複雑であるほど、その冷却効果が高まることも明らかになり、単に面積を確保するだけでなく、配置や形状が都市熱環境の改善において重要な要素であることが示唆された。さらに、植生の質や密度を考慮した適切な管理が、冷却効果をさらに高める可能性があることが示された。

今後は、これらの結果を基に、都市の温熱環境の改善に貢献する緑地・水面の効果的な配置モデルを構築し、その実証を行いたい。また、地形データの導入による都市熱環境への影響を検証していきたい。

謝辞

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

(参考文献・資料)

- (1) 国連のアントニオ・グテーレス事務総長。記者会見におけるアントニオ・グテーレス国連事務総長発言 (ニューヨーク、2023年7月27日) 国連広報センター、unic.or.jp (2024年2月12日閲覧)
- (2) Landsberg, H.E. (1981) 『The Urban Climate』 Academic Press.
- (3) 中川清隆 (2011) 「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)、255-284。
- (4) 環境省 (2004) 「ヒートアイランド現象の影響と問題点」『平成15年度 ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書』第四章
- (5) 三上岳彦 (2005) 「都市のヒートアイランド現象とその形成要因—東京首都圏の事例研究—」『地学雑誌』114(3)、496-506
- (6) 横山仁 (2015) 「都市のヒートアイランド現象と緑」『表面科学』36、319-321。
- (7) Coutts, A.M., White, E.C., Tapper, N.J. et al (2016). “Erratum to: Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments”, Theoretical and Applied Climatology 126, 815.
- (8) 環境省 (2006) 『平成17年度都市緑地を活用した地域の熱環境改善構想の検討調査報告書』。
- (9) ヒートアイランド対策推進会議 (2013) 『ヒートアイランド対策大綱』
- (10) Teruaki Irie (2022) “The cooling effect of green infrastructure in mitigating nocturnal urban heat islands: a case study of Yoyogi Park and Meiji Jingu Shrine in Tokyo”, Landscape Research 47(5):559–583.
- (11) 齊藤郁雄, 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』(611)、59-66
- (12) Y. Lin et al (2020) “Water as an urban heat sink: blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration” J. Clean. Prod..
- (13) Tadahisa Katayama (1993) " Effects of Water Surface, Vegetation And Sea Breeze on Urban Warming" Proceedings of the 8th National Congress for Environmental Studies, 91-96.
- (14) 下村孝 (2007) 「都市における緑の効用—身近な緑がもたらす心身の健康と人間らしい生活」『Urban・Advance』44、13-21
- (15) 鈴木昌 (2019) 「環境温度が与える生体への負荷と環境障害」『日本内科学会誌』108.12、2443-2453
- (16) 入江章昭、平野侃三 (1995) 「ランドサットTM データ解析による都市の気象緩和に有効な緑地形態に関する基礎的研究」『都市計画論文集』30、325-33。
- (17) 澤田大介、本條毅、丸田頼一、木村圭司 (2002) 「ランドサットTMデータによる都市の緑被地と表面温度分布との関係の解析」『環境情報科学論文集』Vol.16(第16回環境研究発表会)

¹ 教師あり学習というのは、もともとのデータで正解/不正解が分かっている状況の下、機械としてはできるだけ正確率を上げるように「学習」する(回帰分析のパラメータを決めるなど)ものである。

(『データサイエンス入門』第二版 P109)
² 平均地表面温度は、特定のメッシュ(格子)内に存在する全てのLST (Land Surface Temperature、地表面温度) 測定点の温度値の算術平均として定義される。

³ 一部の土地利用土地被覆 (LULC) は区域に存在しないため、それらの区域では該当する指標の値が表示されていない。このため、各LULCタイプの横軸の目盛りが異なっている場合がある。

劉 海強 (熊本市都市政策研究所 博士研究員)

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年(2023)年度より現職。(令和7[2025]年7月31日退職)