

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研究区分 : 環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）

研究実施期間 : 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課題番号 : 2MF-2201

体系的番号 : JPMEERF2022M01

研究課題名 : 気候変動の暑熱リスクに対する学校建築の緩和と適応のシナジー

Project Title : Synergies of Mitigation and Adaptation of School Buildings to the Heat Risks of Climate Change

研究代表者 : 中谷 岳史

研究代表機関 : 信州大学

研究分担機関 : 東京理科大学、長野県環境保全研究所、芝浦工業大学、名古屋工業大学

キーワード : 気候変動影響、緩和策と適応策のシナジー、学校建築、環境設計、断熱改修、機械学習

2025（令和7）年5月



環境研究総合推進費  
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人  
環境再生保全機構  
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

## 内容

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	<b>1</b>
研究課題情報 .....	<b>3</b>
<基本情報> .....	3
<研究体制> .....	3
<研究経費> .....	5
<研究の全体概要図> .....	5
1. 研究成果.....	<b>6</b>
1. 1. 研究背景 .....	6
1. 2. 研究目的 .....	6
1. 3. 研究目標 .....	6
1. 4. 研究内容・研究結果.....	8
1. 4. 1. 研究内容 .....	8
1. 4. 2. 研究結果及び考察 .....	8
1. 4. 2. 1 テーマ全体.....	8
1. 4. 2. 2 サブテーマ1.....	9
1. 4. 2. 3 サブテーマ2.....	9
1. 4. 2. 4 サブテーマ3.....	10
1. 5. 研究成果及び自己評価.....	10
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献.....	10
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価.....	12
1. 6. 研究成果発表状況の概要.....	12
1. 6. 1. 研究成果発表の件数.....	12
1. 6. 2. 主要な研究成果発表.....	13
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動.....	13
実施していない。 .....	13
1. 7. 國際共同研究等の状況.....	13
1. 8. 研究者略歴 .....	14
2. 研究成果発表の一覧 .....	<b>15</b>
(1) 研究成果発表の件数.....	15
(2) 産業財産権 .....	15
(3) 論文 .....	15
(4) 著書 .....	16
(5) 口頭発表・ポスター発表.....	16
(6) 「國民との科学・技術対話」の実施.....	19
(7) マスメディア等への公表・報道等.....	21
(8) 研究成果による受賞.....	21
(9) その他の成果発表 .....	21
権利表示・義務記載 .....	<b>21</b>

Abstract

## 研究課題情報

## &lt;基本情報&gt;

研究区分 :	環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）
研究実施期間 :	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研究領域 :	気候変動領域
重点課題 :	【重点課題8】気候変動への適応に係る研究・技術開発 【重点課題7】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発
行政ニーズ :	(2-5) 地域特性に応じた適応の優先度と限界等を考慮した適応策立案手法の開発
課題番号 :	2MF-2201
体系的番号 :	JPMEERF2022M01
研究課題名 :	気候変動の暑熱リスクに対する学校建築の緩和と適応のシナジー
研究代表者 :	中谷 岳史
研究代表機関 :	信州大学
研究分担機関 :	東京理科大学、長野県環境保全研究所、芝浦工業大学、名古屋工業大学
研究協力機関 :	国立環境研究所、類設計室、東畠建築事務所、株式会社 IDAJ、 株式会社アドバンスドナレッジ研究所、株式会社クアトロ

## &lt;研究体制&gt;

サブテーマ1 「リスクコミュニケーションによる建築分野の適応策の検討」					
<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>					
役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	信州大学	工学部	助教	中谷岳史	
分担者	長野県環境保全研究所	自然環境部	主任研究員	浜田 崇	
協力者	国立環境研究所	気候変動適応センター	室長	岡 和孝	
協力者	類設計室	設計事業部	ディレクター	齊藤 直	
協力者	東畠建築事務所	設計室	主任技師	久保久志	2023年度

サブテーマ2 「シミュレーションによる暑熱ストレス評価システムと実環境計測基盤の構築」					
<サブテーマリーダー (STL)、研究分担者、及び研究協力者>					
役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	芝浦工業大学	工学部	准教授	前田慶博	
分担者	東京理科大学	工学部電気工学科	教授	長谷川幹雄	
分担者	名古屋工業大学	大学院 工学研究科 情報工学専攻	准教授	福嶋慶繁	
分担者	芝浦工業大学	工学部	准教授	菅宣理	

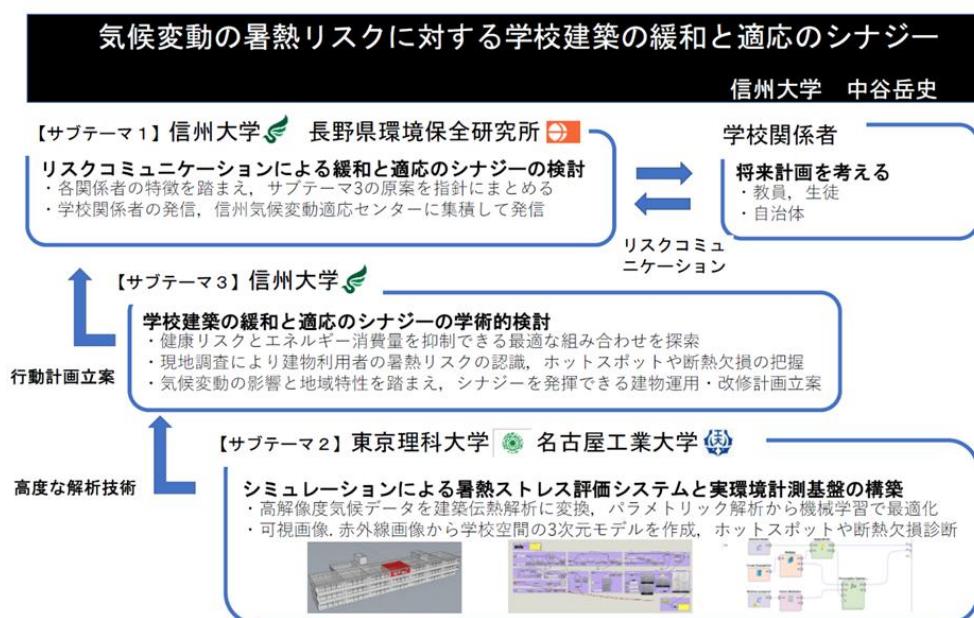
サブテーマ3 「学校建築の緩和と適応のシナジーの学術的検討」					
<サブテーマリーダー (STL)、研究分担者、及び研究協力者>					
役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	信州大学	工学部	助教	中谷岳史	
協力者	国立環境研究所	気候変動適応センター	主任研究員	石崎 紀子	2023年度～ 2024年度
協力者	株式会社 IDAJ	営業本部		岡田 敏樹	2023年度～ 2024年度
協力者	株式会社アドバンスドナレッジ研究所	代表取締役		黒岩真也	2023年度～ 2024年度
協力者	株式会社クト	代表取締役		安田 雄市	2023年度～ 2024年度

## &lt;研究経費&gt;

&lt;研究課題全体の研究経費（円）&gt;

年度	直接経費	間接経費	経費合計	契約上限額
2022	15380000	4614000	19994000	19994000
2023	15370000	4611000	19981000	19981000
2024	15380000	4614000	19994000	19994000
全期間	46130000	13839000	59969000	59969000

## &lt;研究の全体概要図&gt;



## 1. 研究成果

### 1. 1. 研究背景

IPCC第6次評価報告書により気候変動影響が顕在化して様々な分野に影響することが報告され、国内外で適応策の重要性が改めて確認された。気候変動の影響は、農業、自然災害、生態系、健康等の分野で生じ、地域毎に異なる。適応策は地域特性や社会経済状況で異なる為、自治体が学術的知見を考慮した上で主体的に適応策を進めることが重要である。気候変動に伴う影響として、健康が挙げられる。熱中症搬送者数は増加傾向であり、対策が求められる。建物の断熱性能や日射遮蔽性能は外から室内に向けた熱貫流低減が期待できるまた適切な能力の設備機器を選定・運用することで建物のエネルギー消費が抑制でき、建築が果たす適応の役割は大きい。

公共建築である小学校は高度成長期に建築されており、熱中症などの健康リスクを低減する観点から、建物や設備の改修を隨時行う必要がある。市町村の財政や人口増減など地域によって事情が異なり、建物を現行のままで空調設備や室利用者の調節行動で運用する、断熱・日射遮蔽の改修工事を行い部分的に補強する、建替えを行うといった判断が現在から将来にわたり、自治体に求められる。

建築の断熱性能が低く冷房を使わなければ、居住者の適応は限界に達する。健康リスクを下げるために冷房を使えばエネルギーが増大し、緩和と適応はトレードオフになる。また断熱性能が高くて日射遮蔽性能が低ければ夏に室温が過剰に高くなり、緩和と適応はコンフリクトする。本研究では解析の最適化分析と現地診断を行い、緩和と適応がシナジーになり、エネルギー消費量と健康リスク低減を達成できる条件を導く。学校建築の断熱・日射遮蔽性能の費用対効果と優先順位を検討して学校関係者とリスクコミュニケーションを行い、各立場の意思決定に必要な情報を導き広く公開する。

### 1. 2. 研究目的

本研究では、気候変動の暑熱リスクに対する学校建築の緩和と適応のシナジーを検討する。情報処理及び画像処理技術を基盤におき、学校建築の緩和策と適応策の優先度、そして適応の効果と限界を検討する。気候変動による健康被害を低減する為、地域特性を反映した上で建物運用や建物補修、建替えの最適手順を立案する。その上で学校関係者とリスクコミュニケーションを繰り返しながら適宜修正し、各立場の意思決定に必要な情報を導く。

本研究は3つのサブテーマから構成される。サブテーマ1では、環境研究総合推進費で取り組んできた学術的知見やサブテーマ3で新たに導いた情報について、学校関係者とリスクコミュニケーションを行う。成果は建物運用指針や建物改修・建替えのガイドラインとしてまとめる。サブテーマ2では、建物熱伝導解析を複数地点、複数条件、複数の気候シナリオの膨大な組み合わせをパラメトリック解析できるシステム開発を行い、解析結果を集計、分析して機械学習により最適化する。また可視画像と赤外線画像から3次元建物モデルを合成する。サブテーマ3では、解析と調査で構成される。高解像度気象データを建築分野に利用することで、各建物の地域気候に沿った気象条件を検討する。多地域、多条件、複数気候シナリオの組み合わせをパラメトリック解析することで、気候変動による健康リスクとエネルギー消費量について、現在の建物運用だけの対応、断熱・日射遮蔽の部分改修について、対策の優先順位、適応策の効果と限界を定量的に明らかにした情報を提供する。実測では、温熱環境計測と熱ストレスの主観調査を行い、教員や生徒の熱リスクの認識を確認し、自発的な調節行動による適応の効果と限界を把握する。また赤外線領域の画像解析技術を用い、学校の活動範囲における局所的に温度上昇するホットスポットや断熱の弱い箇所をみつける。さらに放射を考慮した非定常数値解析を行い、学校敷地内のホットスポットの探索と改善策を検討する。以上により、運用や断熱改修の効率を向上する。

### 1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	気候変動の暑熱リスクに対する学校建築の緩和と適応のシナジー
全体目標	<p>本研究の目標は、気候変動の暑熱リスクに対する学校建築の緩和と適応のシナジーを達成することである。そのために、サブテーマ1はリスクコミュニケーションを軸に情報集約と発信を行う。サブテーマ2は高度化する情報処理・画像処理技術を本研究用途にあわせて技術開発を行い、サブテーマ3ではパラメトリック解析と最適化、現場診断によって学術的知見をサブテーマ1に提供する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>サブテーマ1：気候変動情報（既往研究だけでなくサブテーマ3で開発される情報を含む）と自治体の特徴（SSP別人口シナリオ、学校の統廃合、財政など）を整理し、関係者とリスクコミュニケーションを行う。各関係者の状況を踏まえ、限界や対策の優先度をスケジュールに入れた運用、</li> </ul>

	<p>改修、建替えに関する指針を立案し、各立場で意思決定しやすい情報を目指す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>サブテーマ2：学際的チームで構成しており、高度な情報処理・画像処理技術によってサブテーマ3に必要な解析と計測の基盤技術を開発する。</li> <li>サブテーマ3：気候変動の将来予測データを建物伝熱解析で再度計算する。多地点、多条件、複数気候シナリオのパラメトリック解析を行い、健康リスクとエネルギー消費削減を目標に最適化する。放射を考慮した非定常数值解析を行い、学校敷地内のホットスポットの探索と改善策を検討する。また実測によって、建物利用者の熱ストレスの調節行動や健康リスクの認識、また空間のホットスポットや断熱欠損などの現場の特徴を明らかにし、解析アプローチを補う。これらの学術的知見をサブテーマ1と情報共有する。</li> </ul> <p>サブテーマ1で開発した建築の運用、改修、建替えの指針は、新たに開設する専用ホームページに随時集積する。また長野県の信州気候変動適応センターや信州・気候変動適応プラットフォームを通じて広く発信する。</p>
--	--

## &lt;サブテーマ1の研究目標&gt;

サブテーマ1名	リスクコミュニケーションによる建築分野の適応策の検討
サブテーマ1実施機関	信州大学、長野県環境保全研究所
サブテーマ1目標	学校関係者にヒアリングとアンケート調査を行い、建築物の運用実態や将来計画を把握する。インターネットホームページを作成し、学術的知見を集約して発信する。学校関係者と学術的知見について情報交換を行い、適応策と緩和策の両観点から学校建築の改修・建替えの指針をまとめる。信州気候変動適応センターに知見を集約する。

## &lt;サブテーマ2の研究目標&gt;

サブテーマ2名	シミュレーションによる暑熱ストレス評価システムと実環境計測基盤の構築
サブテーマ2実施機関	芝浦工業大学、東京理科大学、名古屋工業大学
サブテーマ2目標	高解像度(1km)の気象データを建築伝熱用形式に変換して、データベース化する。多地点多条件複数気候シナリオを検討可能な前述の3Dモデルを用いたパラメトリック解析システムを構築する。学校空間を画像統合して3次元モデリングして、建物伝熱計算のモデリングを補助する。学校の活動空間を赤外線画像で3次元モデリングして、滞在危険領域を抽出する。IoTデバイスによる気温などの暑熱リスク評価のための指標を計測する。

## &lt;サブテーマ3の研究目標&gt;

サブテーマ3名	学校建築の緩和と適応のシナジーの学術的検討
サブテーマ3実施機関	信州大学
サブテーマ3目標	長野県公立小学校365校を対象に、高解像度気象データを用いて建物伝熱解析をする。また全国の傾向を確認する為、県庁所在地46か所も併せて計算する。健康リスクとエネルギー消費量の観点から、現行建物のまま運用で対応、部分改修、建替えの各方策について、将来予測により効果と限界、対策の優先度を提案する。

## 1. 4. 研究内容・研究結果

### 1. 4. 1. 研究内容

サブテーマ1では、気候変動の影響に対する学校施設の適応策と緩和策のシナジーに関して、学校関係者、先進事例実施機関、建築設計事務所を対象としたヒアリング及びアンケートを実施した。調査対象は、学校関係者（長野県長野市、京都府宇治市、東京都板橋区の学校および教育委員会）、先進事例（弘前大学教育学部附属幼稚園）、建築設計事務所（類設計室、東畠建築事務所）である。ヒアリングに際しては、サブテーマ3で得られた気候変動影響の学術情報と自治体の特徴に関する情報を提示し、意見交換を行った。ヒアリングからアンケート内容を作成し、気候変動適応センターと連携して協力可能な自治体に対して全国調査を行った。サブテーマ3で得た知見をサブテーマ1で各ステークホルダーに情報提供し、コミュニケーションを行った。サブテーマ1と3の代表者が兼任することで、アウトリーチとフィードバックを効率よく行った。

サブテーマ2では、サブテーマ3の研究推進の基盤技術開発を担当し、以下の6項目の研究開発及び検証を推進した。

- (1) 大規模気象データの建築伝熱用形式への変換・データベース化
- (2) 多地点・多条件・多シナリオのパラメトリック解析を実現するシステム構築および運用
- (3) 画像情報を用いた建築物の三次元モデリングによる情報取得
- (4) 遠赤外画像を用いた三次元モデリングによる熱分布情報取得
- (5) 暑熱リスク評価を実現する大規模IoT計測環境の構築
- (6) 機械学習の活用による解析支援

(1)(2)はサブテーマ2と3で頻繁に意思疎通を行い、協力して推進した。(3)(4)(5)はサブテーマ3からサブテーマ2に開発の重要性を説明し、サブテーマ2で開発したシステムをサブテーマ3の実測で活用した。(6)の一部は、サブテーマ3の多目的最適化の結論がサブテーマ1の環境コミュニケーションを行った際に伝わりにくいくらいから、サブテーマ2でインタラクティブ形式のdashboardの開発に協力した

サブテーマ3は学校建築の断熱改修や適応策に関して、建物熱解析や実測などを行い、証拠に基づく政策立案(EBPM)に資する研究を目指し、以下の8項目に関して研究および技術開発を実施した：

- (1) 将来予測データから気温上昇率や高温化の不確実性を検討
- (2) 将来予測からデグリーデーを作成し、省エネルギー基準の地域区分の気候変動影響を検討
- (3) 力学ダウンスケーリングから学校校舎の建物熱解析を行い、長野領域の健康リスク及び空調負荷の気候変動影響を検討
- (4) 統計ダウンスケーリングから学校校舎の建物熱解析を行い、全国8地域の健康リスク及び空調負荷の気候変動影響を検討
- (5) 統計ダウンスケーリングから学校校舎の建物熱解析を行い、多目的最適化とexplainableAIから気候変動対策を検討
- (6) 学校体育館の断熱改修について、コストと健康リスクの多目的最適化と感度分析を行う為、建物熱解析－建物熱流体解析－人体熱モデルを最適化ソフトウェア下で統合し、最適化探索システムを開発する。その上で断熱改修の気候変動対策を検討
- (7) 既存建物の断熱改修診断を行う為、可視画像と赤外線画像、計測データから、熱流分布画像を測定して学校建築を診断
- (8) 屋外環境の放射環境を解析する事前準備として、ソフトウェアの解析理論を確認

サブテーマ3で得られた知見は、サブテーマ1で環境コミュニケーションの情報技術として提供した。

### 1. 4. 2. 研究結果及び考察

#### 1. 4. 2. 1 テーマ全体

サブテーマ1は環境コミュニケーションの役割を担い、ヒアリングとアンケートで発信及び情報収集を行った。サブテーマ2はサブテーマ3と連携して、情報処理技術により高度な建物熱解析及び建物計測の基礎技術開発を担当した。またサブテーマ1でサブテーマ3の多目的最適化が非専門家に伝わりにくかった為、インタラクティブグラフなど伝達方法の開発も担当した。サブテーマ3は、サブテーマ1の環境コミュニケーションによる問題意識により分析テーマを設定し、サブテーマ2と連携して分析手法を開発した。発表済の研究成果はサブテーマ2の一部である為、公開内容は限定的である。

#### 1. 4. 2. 2 サブテーマ1

研究成果は未発表であるため、記載事項はない。

#### 1. 4. 2. 3 サブテーマ2

- (1) 画像情報を用いた建築物の三次元モデリングによる情報取得(成果3, 8)

本項目では、以下の三点について報告する：1. 学校建築に対する三次元モデリングの実施、2. 建築図面に存在しない物体を抽出する三次元モデリングシステムの構築、3. 素材情報を付与可能な三次元モデリングシステムの構築。なお、3. は研究計画を超える発展的成果である。

##### 1. 学校建築に対する三次元モデリングの実施

京都府宇治市の西小倉中学校を対象として、画像と奥行き情報に基づく三次元モデリングを実施した。ここでは、画像のみの幾何関係に基づく再構成ではなく、画像とLiDAR等から得られた奥行き情報を統合することで、高精度な三次元モデリングを行った。これに先立ち、画像と奥行きセンサのキャリブレーションを実施し、幾何的整合性を確保した。また、用いた画像に対するノイズ除去処理のためのアルゴリズムも開発した。これにより、画像の保存形式であるJPEGの鮮明化やノイズ除去を高速に行うことが可能になった。

三次元モデリング結果の例を図1-4-A、図1-4-Bに示す。得られた三次元モデルは、後述する解析手法の開発および熱解析の精度向上に活用された。



図1-4-A 三次元モデリング結果（屋外）



図1-4-B 三次元モデリング結果（屋内）

##### 2. 建築図面にない物体の抽出する三次元モデリングシステムの構築(成果3, 8)

屋内空間を対象に、複数の可視画像および奥行き画像を用いて三次元点群を生成し、これを基に建築図面に記載されていない什器等を抽出するシステムを構築した。図1-4-Cにシステム全体の構成を示す。本システムでは、まず複数視点からのRGB-D画像を用いて視点ごとの三次元点群を作成し、次にこれらの点群を位置合わせして統合的な三次元モデルを生成する。統合された三次元点群に対しては、机や椅子などの意味的カテゴリに基づいたセマンティックセグメンテーションを実施し、建築構造体（壁や床など）を除去した後、残存する什器類に対して直方体フィッティングを行い、図面に記載のない物体を抽出する処理を行う。

システムの実地検証として、長野県長野市の芹田小学校を対象に調査を実施した。図1-4-Dに小学校の教室の三次元モデリング結果を示す。この図の左側は、撮影した可視画像と奥行き画像である。また、右側は再構成された三次元点群である。この図より、教室を精度よく三次元モデル化が実現できていることが分かる。そして、この三次元モデルから物体抽出を行った結果を図1-4-Eに示す。この図において、赤色で囲われた領域が、物体として抽出された部分であることを表す。この図より、建築図面にないような机等の什器を抽出できていることが確認できる。

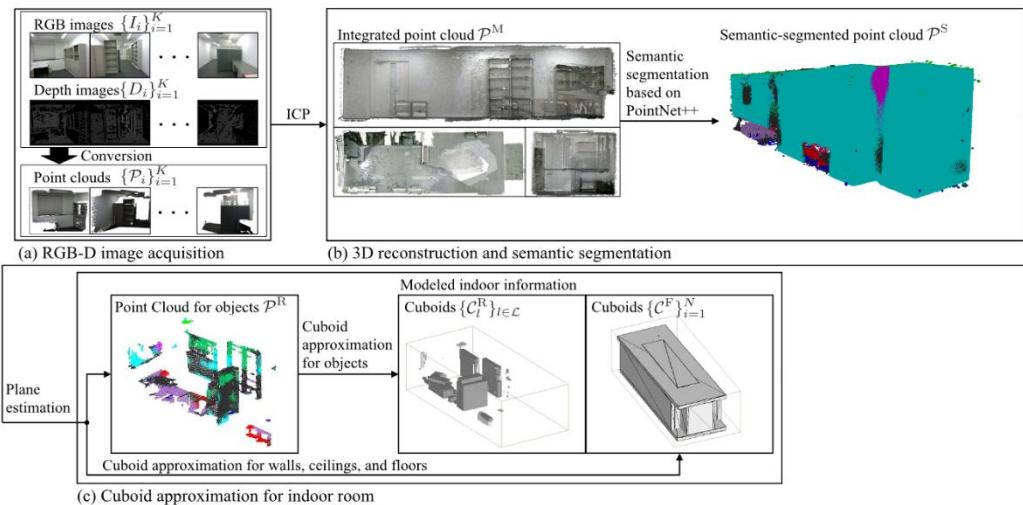


図 1-4-C 建築図面にない物体の抽出システムの流れ



図 1-4-D 三次元モデリング結果

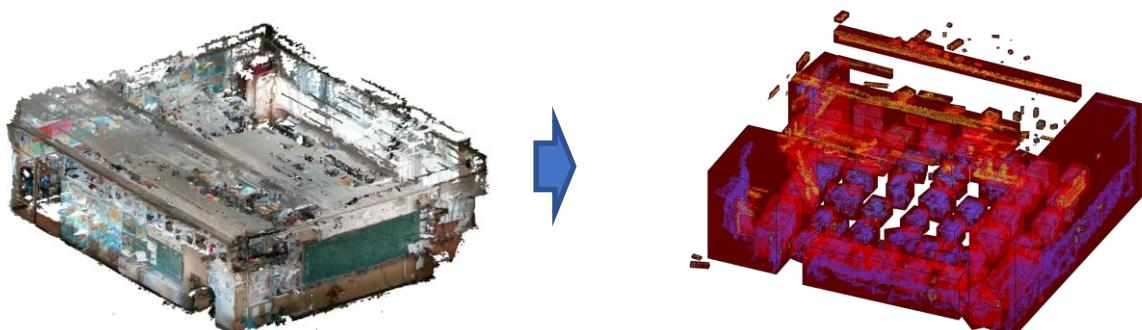


図 1-4-E 物体抽出結果

#### 1. 4. 2. 4 サブテーマ3

研究成果は未発表であるため、記載事項はない。

#### 1. 5. 研究成果及び自己評価

##### 1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

本課題では、教育施設および建築設計の現場における省エネルギー対応や高温化対策に関する認識と行動のずれを整理し、その要因を明確化する。これにより、行政が省エネルギー施策や熱中症対策を関係者へ周知する際の課題点を把握し、情報提供や支援手法の改善の活用が見込まれる。また、建築設計においては、将来の気候条件を踏まえた設計手法の再検討が必要となる点を示すため、行政による設計基準や技術支援策の検討に寄与する。これらは、学校施設や公共建築物の安全性・環境性能の向上に資する知見が見込まれる。

サブテーマ2の以下の項目に関して、学術的意義を記す。

#### 1. 画像統合による三次元モデリング技術の確立

画像と奥行き情報を用いた三次元モデリング技術を開発し、図面に記載されていない物体の抽出や素材分類にも対応したシステムを構築した。これらの成果は熱解析の精度向上に貢献するだけでなく、BIM (Building Information Modeling)への応用可能性も有する。4の熱流画像と組み合わせることで、屋根面の流入熱量というように面の熱移動を取り扱えるようになった。発展性を有する。

サブテーマ3は研究成果が未発表であるため、記載事項はない。

#### <環境政策等へ既に貢献した研究成果>

東京都板橋区の政策経営部及び都市整備部に、学校校舎の断熱改修に関する多目的最適化の結果を提示し、屋根断熱の有効性を伝えた(本報告の図2-3-V)。今後は年間2~3棟のペースで断熱改修することで運用が始まった。

#### <環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

本サブテーマの成果は、気候変動下で求められる学校施設および公共建築の計画・運用・改修に関する基礎情報として、行政、教育機関、建築産業の各分野で幅広く活用されることが期待される。以下に主な見通しを示す。

##### 1. 地域差に応じた行政施策への活用

気温上昇の地域差に関する知見は、自治体が地域特性に応じた省エネルギー施策や暑熱対策を整理する際の根拠となる。また、建築設計者が地域条件を考慮した計画を進めるための基礎情報としても有用である。

##### 2. 地域区分・基準見直しの検討材料

将来の地域区分の変化は、断熱や設備基準の見直しが必要となる可能性を示すものであり、行政や関連団体が基準改定を検討する際の判断材料となる。建築産業においても、将来需要を踏まえた技術開発や製品戦略の立案に活かすことができる。

##### 3. IoTデバイスとLoRa通信を用いた暑熱リスク観測デバイスを試作し、通信条件の最適化を含む性能評価を行った。本技術は、今後の設定温度最適化や自然通風戦略の検討において重要な役割を果たし、IoTと時系列最適化を組み合わせた分析手法の発展に貢献する。

##### 4. 暖冷房負荷の将来変化に基づく設備計画

地域別の暖冷房負荷の傾向は、学校施設の設備更新計画や運用改善の方向性を明確にするうえで重要である。設備投資の最適化や維持管理方針の検討に資するほか、関連企業が必要変化に応じた製品・サービスを展開する際にも参考となる。

##### 5. 熱中症リスク評価による安全管理の強化

将来の熱中症リスク評価は、教育委員会や施設管理者が安全性向上のための計画を立てる際に重要な基礎資料となる。行政の適応策支援や学校現場での具体的対策の検討にも有効である。

##### 6. 断熱重要度に基づく改修の優先順位

設定部位別の断熱性能の影響に関する整理は、予算に制約がある中で効果的な改修順序を設定する際に役立つ。自治体による補助制度の設計、建築事業者による改修提案の高度化、製品開発の方向づけにつながる。

##### 7. 多目的最適化による地域別改修計画への利用

複数の目標を考慮した改修方針は、行政の支援制度設計や建築事業者の提案業務に応用でき、地域特性に応じた改修戦略の策定に寄与する。持続可能な建築運用に向けた実務的な検討を支援する。

##### 8. 体育館解析結果の改修戦略への反映

体育館に関する統合解析の成果は、全国の自治体が共通して抱える暑熱環境や断熱改修の課題に対し、有効な技術的資料となる。改修計画の基礎情報として用いられるほか、企業による技術提案やモデル事業の検討にも活用できる。

##### 9. 熱流画像を活用した現場診断の高度化

熱流画像による可視化技術は、改修効果の説明や関係者間の合意形成を支援するツールとして機能する。学校施設や公共建築の診断業務の高度化に寄与し、建築産業における診断・改修サービスの質向上にもつながる。

## 1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

&lt;全体達成状況の自己評価&gt; · · · · ·

2. 目標を上回る成果をあげた

&lt;サブテーマ1 達成状況の自己評価&gt; · · · · ·

3. 目標どおりの成果をあげた

&lt;サブテーマ2 達成状況の自己評価&gt; · · · · ·

2. 目標を上回る成果をあげた

&lt;サブテーマ3 達成状況の自己評価&gt; · · · · ·

2. 目標を上回る成果をあげた

## 1. 6. 研究成果発表状況の概要

## 1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	8
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	31
口頭発表・ポスター発表	28
マスコミ等への公表・報道等	0
成果による受賞	2
その他の成果発表	0

## 1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」の査読付き論文又は著書から10件まで抜粋)
1	Kaito Furuhashi, Takashi Nakaya, Yoshihiro Maeda: Prediction of Occupant Behavior toward Natural Ventilation in Japanese Dwellings: Machine Learning Models and Feature Selection, Energies, 15(16), 5993, 2022; <a href="https://doi.org/10.3390/en15165993">https://doi.org/10.3390/en15165993</a>
2	Kaito Furuhashi, Takashi Nakaya: Investigating the Effects of Parameter Tuning on Machine Learning for Occupant Behavior Analysis in Japanese Residential Buildings, Buildings, accepted: 21 July 2023
3	Norisato Suga, Yoshihiro Maeda, Koya Sato, "Indoor Radio Map Construction via Ray Tracing with RGB-D Sensor-Based 3D Reconstruction: Concept and Experiments in WLAN Systems," IEEE Access, vol. 11, pp. 24863--24874, Mar. 2023.
4	Teppei Tsubokawa, Hiroshi Tajima, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "Local Look-Up Table Upsampling for Accelerating Image Processing," Multimedia Tools and Applications, pp. 26131--26158, Aug. 2023.
5	Yuki Naganawa, Hiroyasu Kamei, Yamato Kanetaka, Haruki Nogami, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "SIMD-Constrained Lookup Table for Accelerating Variable-Weighted Convolution on x86/64 CPUs," IEEE Access, vol. 12, pp. 15800--15819, Jan. 2024.
6	Yamato Kanetaka, Hiroyasu Takagi, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "SlidingConv: Domain-Specific Description of Sliding Discrete Cosine Transform Convolution for Halide," IEEE Access, vol. 12, pp. 7563--7583, Jan. 2024.
7	Haruki Nogami, Yamato Kanetaka, Yuki Naganawa, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "Decomposed Multilateral Filtering for Accelerating Filtering with Multiple Guidance Images," Sensors, vol. 24, no. 2, 633, pp. 1--22, Jan. 2024.
8	Norisato Suga, Naoya Yoshida, Ryotaro Gozono, Yoshihiro Maeda, Koya Sato, "RGB-D Sensor-Aided Radio Map Estimation Using Materials Classification," IEEE Wireless Communications Letters, 5 pages, Apr. 2025.

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

## 1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

実施していない。

## 1. 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究の概要>

国際共同研究を実施していない。

## 1. 8. 研究者略歴

&lt;研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴&gt;

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
中谷岳史	研究代表者及びサブテーマ1リーダー 名古屋大学農学部生命農学研究科博士後期課程修了 博士（農学） 岐阜工業高等専門学校講師を経て、 現在、信州大学工学部建築学科助教 専門は建築環境工学、研究テーマは建物熱解析
前田慶博	サブテーマ2リーダー 名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程 修了 博士（工学） 東京理科大学 助教、講師を経て、現在、芝浦工業大学 准教授 主に画像処理、画像センシングに関する研究に従事
中谷岳史	研究代表者及びサブテーマ3リーダー 名古屋大学農学部生命農学研究科博士後期課程修了 博士（農学） 岐阜工業高等専門学校講師を経て、 現在、信州大学工学部建築学科助教 専門は建築環境工学、研究テーマは建物熱解析

## 2. 研究成果発表の一覧

### (1) 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	8
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	31
口頭発表・ポスター発表	28
マスコミ等への公表・報道等	0
成果による受賞	2
その他の成果発表	0

### (2) 産業財産権

特に記載する事項は無い。

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号

### (3) 論文

<論文>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2022	Kaito Furuhashi, Takashi Nakaya, Yoshihiro Maeda: Prediction of Occupant Behavior toward Natural Ventilation in Japanese Dwellings: Machine Learning Models and Feature Selection, Energies, 15(16), 5993, 2022; <a href="https://doi.org/10.3390/en15165993">https://doi.org/10.3390/en15165993</a>	1	有
2	2023	Kaito Furuhashi, Takashi Nakaya: Investigating the Effects of Parameter Tuning on Machine Learning for Occupant Behavior Analysis in Japanese Residential Buildings, Buildings, accepted: 21 July 2023	1	有

3	2022	Norisato Suga, Yoshihiro Maeda, Koya Sato, "Indoor Radio Map Construction via Ray Tracing with RGB-D Sensor-Based 3D Reconstruction: Concept and Experiments in WLAN Systems," IEEE Access, vol. 11, pp. 24863--24874, Mar. 2023.	2	有
4	2023	Teppei Tsubokawa, Hiroshi Tajima, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "Local Look-Up Table Upsampling for Accelerating Image Processing," Multimedia Tools and Applications, pp. 26131--26158, Aug. 2023.	2	有
5	2023	Yuki Naganawa, Hirokazu Kamei, Yamato Kanetaka, Haruki Nogami, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "SIMD-Constrained Lookup Table for Accelerating Variable-Weighted Convolution on x86/64 CPUs," IEEE Access, vol. 12, pp. 15800--15819, Jan. 2024.	2	有
6	2023	Yamato Kanetaka, Hiroyasu Takagi, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "SlidingConv: Domain-Specific Description of Sliding Discrete Cosine Transform Convolution for Halide," IEEE Access, vol. 12, pp. 7563--7583, Jan. 2024.	2	有
7	2023	Haruki Nogami, Yamato Kanetaka, Yuki Naganawa, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "Decomposed Multilateral Filtering for Accelerating Filtering with Multiple Guidance Images," Sensors, vol. 24, no. 2, 633, pp. 1--22, Jan. 2024.	2	有
8	2025	Norisato Suga, Naoya Yoshida, Ryotaro Gozono, Yoshihiro Maeda, Koya Sato, "RGB-D Sensor-Aided Radio Map Estimation Using Materials Classification," IEEE Wireless Communications Letters, 5 pages, Apr. 2025.	2	有

## (4) 著書

&lt;著書&gt;

特に記載する事項は無い。

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ

## (5) 口頭発表・ポスター発表

&lt;口頭発表・ポスター発表&gt;

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
9	2022	佐藤光哉, 菅宣理, 前田慶博, "イメージセンサおよび三次元再構成を用いた屋内電波伝搬シミュレーションの自動化に向けた検討," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 122, no. 12, SR2022-12, pp. 55--57, May 2022.	2	無
10	2022	塩塚卓平, 本多顕太郎, ライプニツツ賢治, ペペーフエルディナンド, 若宮直紀, 前田慶博, 長谷川幹雄, "多数LoRaデバイスを用いた性能評価および最適パラメータの探索に関する考察," RISING, 1 page, Oct. 2022.	2	無

11	2022	Kohei Shiotsuka, Kentaro Honda, Kenji Leibnitz, Ferdinand Peper, Naoki Wakamiya, Yoshihiro Maeda, Mikio Hasegawa, "Experimental Demonstration of APCMA's Scalability Advantage over Current LPWA," in Proc. International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP), pp. 13–16, Mar. 2023.	2	有
12	2022	林晃平, 福嶋慶繁, "フーリエ級数展開を用いた局所コントラスト変換によるエッジ保存型ウェーブレット変換," 電子情報通信学会東海支部 卒業研究発表会, Mar. 2023.	2	無
13	2022	ノグチジョゴ, 福嶋慶繁, "重み再割り当てによるロングテール重みをもつ円形カーネルの正確な畳み込み," 電子情報通信学会東海支部 卒業研究発表会, Mar. 2023.	2	無
14	2023	林晃平, 前田慶博, 福嶋慶繁, "局所コントラスト変換画像のウェーブレット変換によるエッジを考慮したマルチスケール処理," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 29, IE2023-4, pp. 10–15, May 2023.	2	無
15	2023	長縄侑樹, 福嶋慶繁, "仮想パターンを使用したディスプレイ投影によるカメラキャリブレーション," 画像センシングシンポジウム (SSII), Jun. 2023.	2	無
16	2023	野上遙貴, 福嶋慶繁, "方向性Cubic補間による画像アップスケーリングの高効率実装," 画像センシングシンポジウム (SSII), Jun. 2023.	2	無
17	2023	金高倭士, 前田慶博, 福嶋慶繁, "短時間フーリエ変換による高速な広範囲畳み込みのドメイン固有言語表現," 画像センシングシンポジウム (SSII), 6 pages, June 2023.	2	無
18	2023	野上遙貴, 前田慶博, 福嶋慶繁, "Tensor Coreを用いたガウシアンフィルタの高効率実装," 画像符号化シンポジウム (PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム (IMPS), 2 pages, Nov. 2023.	2	無
19	2023	遊佐和樹, 前田慶博, 福嶋慶繁, 中谷岳史, 浜本隆之, "可視画像の特徴量を併用した遠赤外画像の三次元再構成の検討," 画像符号化シンポジウム (PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム (IMPS), 2 pages, Nov. 2023.	2	無
20	2023	林晃平, 前田慶博, 福嶋慶繁, "値域フーリエ級数展開画像群のウェーブレット変換による局所コントラスト操作," 画像符号化シンポジウム (PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム (IMPS), 2 pages, Nov. 2023.	2	無
21	2023	Kohei Hayashi, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "Local Contrast Enhancement with Multi-Scale Filtering," in Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), pp. 765–770, Nov. 2023.	2	有
22	2023	黒岩天心, 栗原康佑, 前田慶博, 杉村大輔, 浜本隆之, "画素毎の時間変動に基づく重みづけによる遠赤外動画像のぼけ除去," 電子情報通信学会総合	2	無

		大会, 1 page, Mar. 2024.		
23	2024	林晃平, 本田宗一朗, 龜井宏和, 前田慶博, 福嶋慶繁, "局所コントラストを考慮した冗長ウェーブレット変換フィルタ," 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 1 page, Aug. 2024.	2	無
24	2024	林晃平, 本田宗一朗, 龜井宏和, 前田慶博, 福嶋慶繁, "値域フーリエ級数展開による冗長ウェーブレット変換," 情報科学技術フォーラム (FIT), 9 pages, Sep. 2024.	2	無
25	2024	吉田樹, 前田慶博, 福嶋慶繁, "Tensor Coreを用いた高効率FIRフィルタの実装," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), 2 pages, Nov. 2024.	2	無
26	2024	亀井宏和, 本田宗一朗, 林晃平, 前田慶博, 福嶋慶繁, "近似範囲の限定による指數関数の高速な近似ベクトル計算手法," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), 2 pages, Nov. 2024.	2	無
27	2024	峰尾光治, 前田慶博, 栗原康佑, 浜本隆之, "画像生成と知識蒸留によるデータフリーな量子化モデル探索," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), 2 pages, Nov. 2024.	2	無
28	2024	林晃平, 本田宗一朗, 龜井宏和, 前田慶博, 福嶋慶繁, "局所コントラストに基づくエッジ保存型の冗長ウェーブレット変換及び逆変換," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), 2 pages, Nov. 2024.	2	無
29	2024	亀井宏和, 本田宗一朗, 林晃平, 前田慶博, 福嶋慶繁, "x86/64CPU上における効率的な画像変換のためのルックアップレジスターテーブル補間," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 300, IE2024-36, pp. 25--30, Dec. 2024.	2	無
30	2024	林晃平, 本田宗一朗, 龜井宏和, 前田慶博, 福嶋慶繁, "局所コントラスト変換を用いたDCTによるJPEG互換性を持つ符号化," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 300, IE2024-35, pp. 19--24, Dec. 2024.	2	無
31	2024	Kohei Hayashi, Soichiro Honda, Hirokazu Kamei, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "Contrast-Aware DCT for Image Enhancement with JPEG Compatible Coding," in Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 6 pages, Dec. 2024.	2	有
32	2024	Hirokazu Kamei, Soichiro Honda, Kohei Hayashi, Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, "Lookup Register-Tables with Interpolation for Effective Image Transformation on x86/64 CPUs," in Proc. IEEE International Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP), 5 pages, Dec. 2024.	2	有
33	2025	【発表予定】黒岩天心, 栗原康佑, 前田慶博, 杉村大輔, 浜本隆之, "熱の時間遷移モデルに基づいた深層展開による遠赤外画像のボケ除去," 電子情報	2	無

		通信学会技術研究報告, 6 page, June 2025.		
34	2024	大星直也, 中谷岳史, 前田慶博, 福嶋慶繁: 長野県領域における学校建築に対する冷暖房負荷を対象とした気候変動影響評価, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学I, 779-780, 2024	3	無
35	2024	大星直也, 中谷岳史, 前田慶博, 福嶋慶繁: 長野県領域における学校建築に対する熱的快適性を対象とした気候変動影響評価, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 67, 113-115, 2024	3	無
36	2025	中谷岳史: 学校建築の気候変動影響評価と対策立案に関する研究 その1-断熱改修の多目的最適化-, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学I, 2025(予定)	3	無

## (6) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
37	2022	気候変動教育ワークショップ『ミステリー』（主催:長野県辰野町、2022年5月28日、辰野町民会館、参加者約20名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
38	2022	SDGs勉強会（主催:HAKUBAVALLEY TOURISM SDGs小委員会、2022年7月5日、サンアルプス大町（長野県大町市）、参加者35名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
39	2022	SDGs勉強会（主催:HAKUBAVALLEY TOURISM SDGs小委員会、2022年7月6日、五竜エスカルプラザ（長野県白馬村）、②参加者55名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
40	2022	SDGs勉強会（主催:HAKUBAVALLEY TOURISM SDGs小委員会、2022年7月7日、小谷複合拠点施設（長野県小谷村）、参加者38名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
41	2022	自然との共生ー地球に学び・森と遊ぼうー ミニ講座（主催：公益社団法人八十二文化財団、ギャラリー82（長野県長野市）、2022年7月23日、参加者約20名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
42	2022	ゼロカーボンナビゲーター養成講座（主催：長野県地球温暖化防止活動推進センター、オンライン開催、2022年10月15日、参加者30名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
43	2022	上田地域でのゼロカーボン推進のための情報発信事業（主催：長野県上田地域振興局、事前に動画で撮影し上田ケーブルビジョンから市民に配信、2022年11月7日以降、視聴者数は不明）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
44	2022	教員を対象としたゼロカーボンに係る指導者養成研修会（主催：長野県松本地域振興局、オンライン開催、2022年11月15日、参加者10名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
45	2022	つばさプロジェクトに係る事前学習会（信州環境カレッジ運営事務局、JA長野県ビル、2022年11月19日、参加者約15名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
46	2022	気候変動ってどんな影響があるの？～持続可能な社会を目指して～（主催：長野県山ノ内町、山ノ内町文化センター、2023年2月16日、参加者約50名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
47	2022	信州アーツカウンシル×信州大学人文学部 連携フォーラム2023『気候変動時代、未来を創造するアート・アクション』（主催：信州アーツカウンシル、信毎メディアガーデン（長野県松本市）+YouTube配信、2023年3月1日、参加者約40名（会場のみ））、長野県の気候変	1

		動とその影響について講演	
48	2023	信州大学教育学部附属長野中学校における特別授業「気候変動影響の緩和策と適応策について」（2023年07月12日，聴講者約40名）中学一年生向けに気候変動影響と建築分野の対策を講義	1
49	2023	一般公開シンポジウム，「ゼロカーボンミーティングin諫訪」（主催：長野県，2023年05月29日、茅野市民館コンサートホール、観客約80名）登壇して他の登壇者や一般市民の参加者と対話	1
50	2023	信州大学教育学部附属長野中学校における特別授業「気候変動影響の緩和策と適応策について」（2023年07月12日，聴講者約40名）中学一年生向けに気候変動影響と建築分野の対策を講義	1
51	2023	長野県と気候変動（主催：平和と手仕事 多津衛民芸館、多津衛民芸館館内、2023年6月4日、約30名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
52	2023	地場産業への気候変動影響調査アドバイザー研修会（主催：長野県地球温暖化防止活動推進センター、JA長野県ビル+オンライン、2023年6月23日、参加者9名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
53	2023	信州大学教育学部附属長野中学校における特別授業「気候変動影響の緩和策と適応策について」（2023年07月12日，聴講者約40名）中学一年生向けに気候変動影響と建築分野の対策を講義	1
54	2023	親子環境学習会（主催：長野市地球温暖化防止活動推進センター、長野県環境保全研究所、2023年7月22日、参加者12名）、長野県の気候変動とその影響について講演	1
55	2024	長野県新任職員研修，2024年5月13日	1
56	2024	長野県シニア大学，2024年5月29日	1
57	2024	長野県上伊那ゼロカーボンフェア，2024年6月5日	1
58	2024	長野県気象予報士研修会，2024年7月20日	1
59	2024	長野県小諸市民大学，2024年8月24日	1
60	2024	長野県経営大学，2024年8月27日	1
61	2024	気候市民会議まつもと，2024年9月7日	1
62	2024	長野県東御市地球温暖化対策職員研修会，2024年10月23日	1
63	2024	SDGs学び合いワークショップ，2024年11月1日	1
64	2024	土作り研修会，2024年11月14日	1
65	2024	自治ゼミナール，2024年12月6日	1
66	2024	IDAJ, Solution Seminar, 気候変動時代における建築最適化技術の革新，対面、2025/6/6	3
67	2024	アドバンスドナレッジ研究所、Flowdesignerフォーラム事例発表，気候変動適応に向けた体育館の断熱改修のCFD活用－ツール間連携が実現するコストと健康リスクの最適化－、オンライン、約100名，2025/2/28	3

## (7) マスメディア等への公表・報道等

特に記載する事項は無い。

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ

## (8) 研究成果による受賞

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
68	2024	林晃平, 本田宗一朗, 龜井宏和, 前田慶博, 福嶋慶繁, "値域フーリエ級数展開による冗長ウェーブレット変換," 情報科学技術フォーラム (FIT), 9 pages, Sep. 2024. FIT論文賞	2
69	2024	亀井宏和, 本田宗一朗, 林晃平, 前田慶博, 福嶋慶繁, "x86/64CPU上における効率的な画像変換のためのルックアップレジスターブル補間," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 300, IE2024-36, pp. 25–30, Dec. 2024. IE賞	2

## (9) その他の成果発表

特に記載する事項は無い。

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ

## 権利表示・義務記載

特に記載する事項は無い。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に参画した研究者にあります。

この研究成果報告書の著作権は、引用部分及びERCAのロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。

独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）は、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

**Abstract****[Project Information]**

Project Title :	Synergies of Mitigation and Adaptation of School Buildings to the Heat Risks of Climate Change
Project Number :	JPMEERF2022M01
Project Period (FY) :	2022-2024
Principal Investigator :	Nakaya Takashi
(PI ORCID) :	ORCID0000-0001-6401-3909
Principal Institution :	Shinshu University 4-17-1 Wakasato, Nagano City, Nagano Prefecture, Japan Tel: +81-260269-5364 E-mail: t-nakaya@shinshu-u.ac.jp
Cooperated by :	Shibaura Institute of Technology, Tokyo University of Science, Bulletin of Nagano Environmental Conservation Research Institute
Keywords :	Climate change impacts, synergy between mitigation and adaptation strategies, school buildings, environmental design, insulation retrofitting, machine learning

**[Abstract]**

Public buildings such as elementary and junior high schools were predominantly constructed during the period of rapid economic growth, necessitating the renovation of both structures and facilities. Japanese public schools are generally characterized by reinforced concrete (RC) rectangular buildings with minimal insulation. Given their decades-long lifespan, it is essential to implement insulation retrofits that account not only for the current climate but also for future warming.

This study employed the latest CMIP6-based GCM data to generate meteorological data for building thermal analysis. Based on this data, we targeted school buildings and gyms, exploring the optimization of design variables that maximize the synergistic effects of mitigation and adaptation strategies. Specifically, we utilized machine learning to identify effective insulation retrofit specifications, aiming to reduce operational energy consumption and mitigate health risks.

Furthermore, this study facilitated environmental communication among government agencies, school officials, architectural design firms, and researchers. By sharing academic findings and receiving feedback from various stakeholders, the research benefited from a diverse range of perspectives.

The study revealed that rising outdoor temperatures due to climate change were particularly pronounced in higher latitudes. Calculations of heating degree days based on future projected outdoor temperatures indicated that the regional classifications of energy efficiency standards could shift around 2010 or, depending on the scenario, as early as the mid-2000s. Although the current regional classifications rely on standard data from 2000 to 2010, subsequent warming suggests the possibility of shifts to warmer classifications. Moreover, the background data for primary energy calculations are based on data from 1980 to 1995, and such reliance on historical observations may lead to policies that underestimate future warming.

In addition, a large-scale simulation of building thermal analysis based on CMIP6 data was conducted, and multi-objective optimization was used to extract recommended insulation specifications for each region. Commonly effective measures included enhancing roof insulation and reducing solar heat gain through windows. Roof insulation is particularly important because it reduces heat influx in summer and heat loss in winter. It is advisable to prioritize this measure, and by performing waterproofing and insulation work simultaneously, both costs and labor can be minimized.

This research was performed by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF2022M01) of the Environmental Restoration and Conservation Agency provided by Ministry of the Environment of Japan.