

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公 募 区 分 : 環境問題対応型研究 (一般課題)

研究予定期間 : 令和3 (2021) 年度 ~ 令和5 (2023) 年度

課 題 番 号 : 【2-2106】

体系的番号 : J P M E E R F 2 0 2 1 2 0 0 6

研 究 課 題 : 「人口流動データと温熱シミュレータによる都市におけるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」

Research Title : Research on the Heat Risk Related to Urban Heat Islands Using Population Flow Data and a Thermal Simulator

研 究 代 表 者 : 足永 靖信

研究代表機関 : 国立研究開発法人 建築研究所

研究分担機関 : 国土交通省国土技術政策総合研究所、早稲田大学、公益財団法人東京都環境公社東京都環境科学研究所

研 究 領 域 : 気候変動領域

キ ー ワ ー ド : 暑さ対策、暑さ指数、人流、温熱シミュレータ、ヒートアイランド

令和6 (2024) 年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	3
1. はじめに（研究背景等）	5
2. 研究開発目的	5
3. 研究目標	5
4. 研究開発内容	6
5. 研究成果	6
5-1. 成果の概要	6
5-2. 研究目標の達成状況	14
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	16
6. 研究成果の発表状況の概要	18
6-1. 成果の件数	18
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	18
7. 国際共同研究等の状況	19
8. 研究者略歴	19
II. 成果の詳細	20
II-1 サブテーマ1「サブテーマ1名」	20
〔サブテーマ1要旨〕	20
1. サブテーマ1研究開発目的	20
2. サブテーマ1研究目標	20
3. サブテーマ1研究開発内容	21
4. サブテーマ1結果及び考察	27
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	34
II-2 サブテーマ2「サブテーマ2名」	35
〔サブテーマ2要旨〕	35
1. サブテーマ2研究開発目的	35
2. サブテーマ2研究目標	35
3. サブテーマ2研究開発内容	35
4. サブテーマ2結果及び考察	36
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	47
6. 参考文献	48
III. 研究成果の発表状況の詳細	50
(1) 誌上発表	50
(2) 口頭発表	51
(3) 知的財産権	52
(4) 「国民との科学・技術対話」の実施	52
(5) マスメディア等への公表・報道等	52
(6) 研究成果による受賞	53
(7) その他の成果発表	53
Abstract	54

I. 成果の概要

<課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度～令和5（2023）年度
課題番号：	【2-2106】
研究課題：	「人口流動データと温熱シミュレータによる都市におけるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」
研究代表者：	足永靖信（国立研究開発法人建築研究所、研究専門役）
重点課題（主）：	【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（副）：	【重点課題①】持続可能な社会の実現に向けたビジョン・理念の提示
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	（2－2）地域特性に応じた気候変動影響予測及び適応の推進に関する研究
研究領域：	気候変動領域

<キーワード>

暑さ対策
暑さ指数
人流
温熱シミュレータ
ヒートアイランド

<研究体制>

サブテーマ1「人口流動データによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国土交通省国土技術開発総合研究所	都市研究部	主任研究官	熊倉永子	2021年度～2023年度
早稲田大学	理工学術院	講師	上野貴広	2021年度～2023年度

サブテーマ2「温熱シミュレータによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」

＜サブテーマ２リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立研究開発法人 建築研究所	所付	研究専門役	足永靖信	2021年度～2023 年度
公益財団法人東京 都環境公社東京都 環境科学研究所	環境資源研究科	研究員	常松展充	2021年度～2022 年度
公益財団法人東京 都環境公社東京都 環境科学研究所	環境資源研究科	研究科長	上野広行	2022年度～2023 年度

＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	22,500千円	5,440千円	27,940千円
2022	29,714千円	4,412千円	34,126千円
2023	27,764千円	6,185千円	33,949千円
合計	79,978千円	16,037千円	96,015千円

1. はじめに（研究背景等）

気候変動に伴う様々な影響が懸念されており、近年の都市の暑熱化と熱中症などの健康被害の深刻化はその一つである。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の報告書（AR6/WG2、2022年2月）では「変化する都市形態と曝露及び脆弱性の相互作用によって、気候変動に起因するリスク及び損失が、都市及び居住地に生じうる。」と記載されている。「熱中症対策実行計画」（令和5年5月30日、閣議決定）では、2030年に熱中症による死亡者数半減が目標に掲げられている。早急に都市の暑熱リスクの評価法を確立し、気候にレジリエントな都市開発に向けて、国、自治体が進めている暑さ対策に反映する必要がある。

2. 研究開発目的

交通網の発達、超高層ビルの建設などに伴い、対象地域の建築床面積や交通輸送量は飛躍的に増加し、人の流れも変容する。人が都市生活で感じる暑さを低減させる適応策の推進において、これまで、様々な技術（地表面材料、木陰配置等）が提案されてきた。しかし、通行人や居住者などの暑熱環境に曝される人がどのように地域内に分布するかはほとんど検討されておらず、暑熱による影響という観点では的確な情報提供に至っていないのが現状である。一方、携帯電話ネットワークの仕組みを使用して人口流動データが整備されるようになり、地域内の人の流れを街路、建物単位の詳細な空間解像度で追跡可能となってきた。本研究では、人口流動データを暑熱問題へ新たに適用することにより、暑熱の影響を受ける暴露人口について地域レベルの定量化を試みる。

本研究のもう一つの柱は、都市の暑さ対策を予測する温熱シミュレータの開発である。我が国では暑さ対策の指標に、暑さ指数（WBGT：湿球黒球温度）が広く用いられていることを踏まえ、本研究で都市空間において暑さ指数の時空間分布を数値予測する温熱シミュレータを開発する。温熱シミュレータは、数値流体力学をベースとして、都市空間の放射交換モデル、建物内の伝熱モデルを連成することにより、都市の風の道確保や暑熱対策における建物配置や被覆材料などの選択が都市空間の風通し、放射、温湿度にどのように影響するかを予測し、暑さ指標に集約するものである。本研究では、建物、道路の配置を判別する超高解像度で暑熱ハザードの定量化に取り組む。

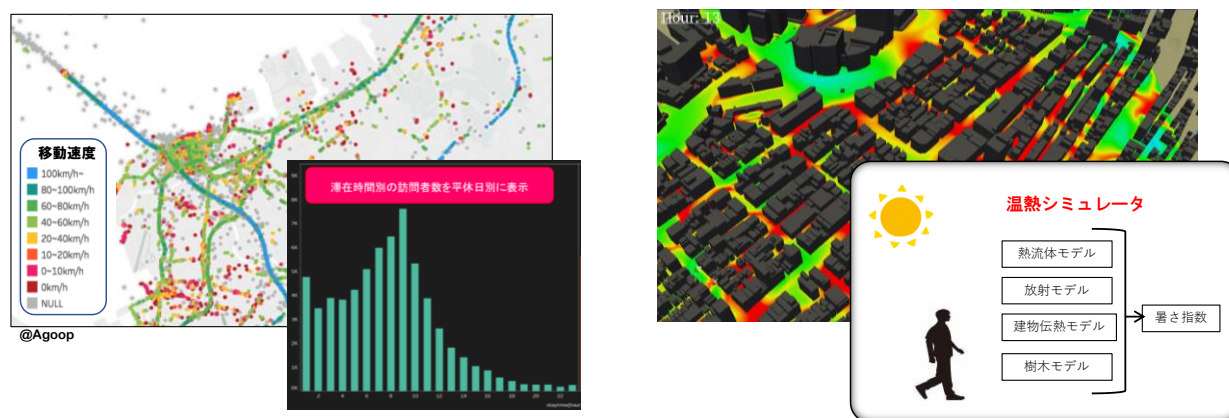
3. 研究目標

全体目標	都市街区内の温湿度、放射、風速を超高解像度で予測する温熱シミュレータを開発し、それを用いて実際の都市を対象にして暑熱ハザードを定量化するとともに、人口流動データを用いて暑熱暴露、熱的脆弱性に関する分析を実施し、地域総体の暑熱リスクの低減方策について取りまとめ、その結果を、東京都等の地域気候変動適応計画等における暑熱対策推進のための科学的エビデンスとして提供する。
サブテーマ1	「人口流動データによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」
サブテーマ1 実施機関	国土技術政策総合研究所、早稲田大学
サブテーマ1 目標	サブテーマ1では、人口流動データを用いて、暑熱暴露、熱的脆弱性に関する分析および各種統計資料の統合化を行い、得られた情報をサブテーマ2に提供する。具体的な目標は次の二つである。 （1）人口流動データを用いて、対象地域における人の流入、流出と地域内の移動に関わる人の挙動を追跡し、屋外における滞在人数の密度や移動時間、移動手段等に分類し、暑熱暴露の実態を定量的に評価する。 （2）人口流動データに加え、高齢者や低所得者の割合などの関連情報を様々なソースから抽出し、各種統計資料を統合化するロジックを構築することにより、都市の暑熱リスク評価において熱的脆弱性を適切に反映する。

サブテーマ2	「温熱シミュレータによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」
サブテーマ2 実施機関	国立研究開発法人建築研究所、公益財団法人東京都環境公社東京都環境科学研究所
サブテーマ2 目標	サブテーマ2では、都市街区内の温湿度、放射、風速を超高解像度で予測する温熱シミュレータを開発し、それを用いて実際の都市を対象にして暑熱ハザードを定量化する。さらに、サブテーマ1から提供される情報と合わせて、地域総体の暑熱リスクの低減方策について取りまとめ、その結果を、東京都等の地域気候変動適応計画等における暑熱対策推進のための科学的エビデンスとして提供する。そのために、温熱シミュレータは下記の性能を有することとする。 (1) 数値シミュレーションにおいては、各種数値モデルを適切に選択、組み合わせた先進性を有し、暑熱ハザードの時空間分布の再現性、計算精度を確保している。 (2) シミュレーション及び解析システムは、建物や道路の配置を判別可能な超高分解能メッシュを使用可能であるように適切に構築され、自治体等の環境行政にとって実効性を伴う研究情報を提供できる。

4. 研究開発内容

本研究で目指したのは、都市内でどの程度の人数が暑さに曝されているかを明らかにして暑熱リスクを評価し、適切な暑さ対策を行うことである。そのためには、人と熱の状況を正確に把握する手法を確立する必要がある。本研究の全体概要を図0-1に示す。本研究は2つのサブテーマから構成されている。サブテーマ1では、携帯電話の信号等を活用した人口流動データの拡大推計手法を開発し、街路単位で人の移動、滞留のデータベース化を達成した。サブテーマ2では、温熱シミュレータによる温湿度、風、放射および暑さ指数のスーパーコンピュータ解析を実施し、街なかの暑さ指数の実態を高解像度で再現することに成功した。さらに、暑さ指数および屋外歩行者数の地域分布を作成、集計することにより、都市における暑熱リスクの評価手法としてとりまとめたものである。



サブテーマ1：人口流動データによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究（国総研、早大）

サブテーマ2：温熱シミュレータによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究（建研、都環研）

図0-1 研究の全体概要

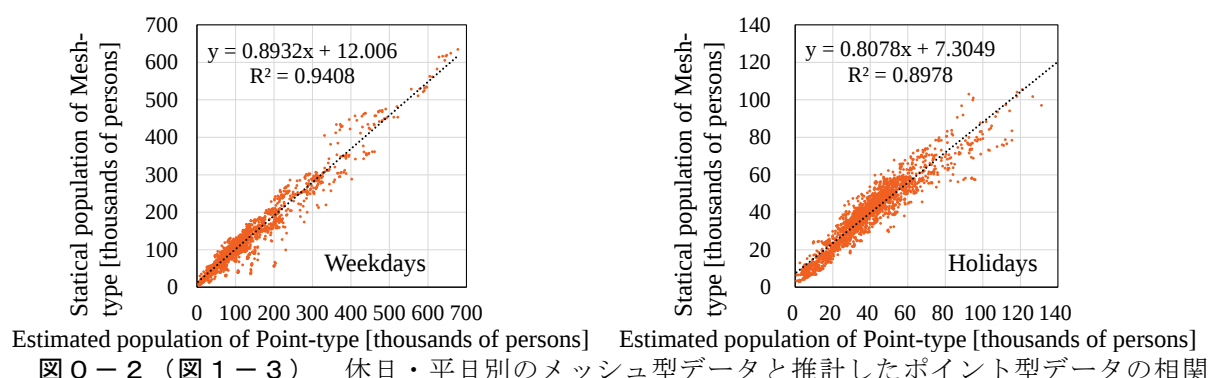
5. 研究成果

5-1. 成果の概要

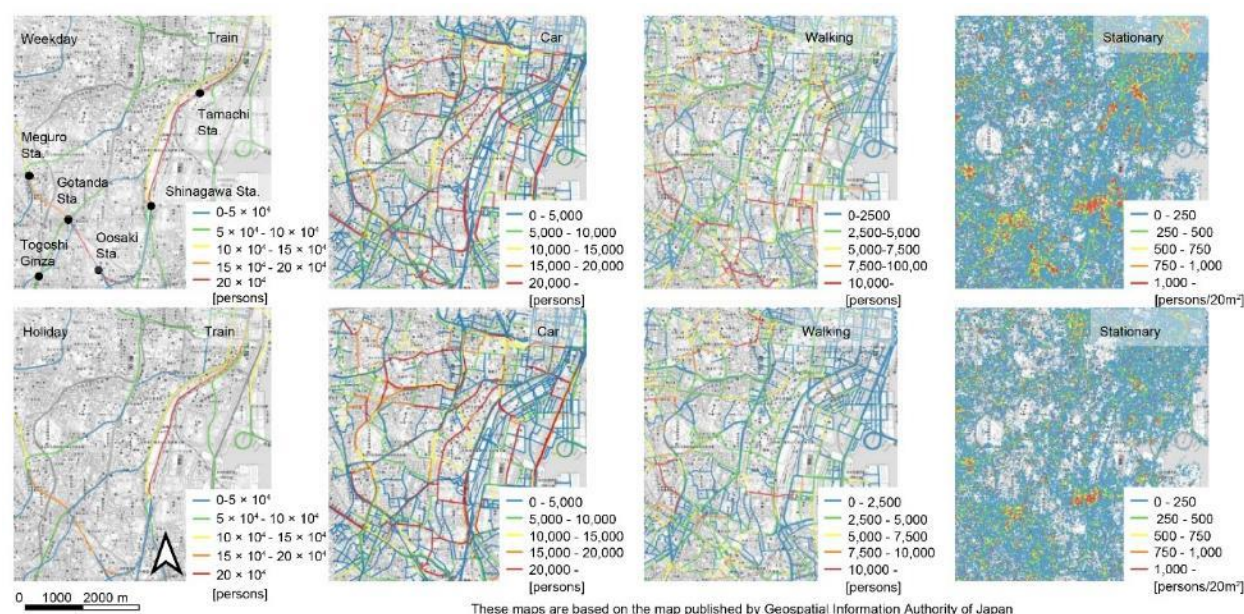
全体としては、都市の暑さ対策を講じる上で必要となる人や熱の状況を把握する技術開発を行い、環境行政にとって実効性を伴う研究情報を提供することを目的としている。

サブテーマ1では、近年様々な分野での活用が進んでいる携帯電話の信号等を暑熱の問題に適用を試みたものである。携帯電話の信号は、ポイント型人流データとも称されるものであり、携帯電話から取得されるGPSの測位信号から位置の挙動が文字通りピンポイントで取得される。しかしながら、GPS信号には幾何的誤差が含まれており、そのままの形では街路単位の判別方法としては正確とは言えない。

一方、携帯基地局と携帯電話の通信情報から正確な人口密度の500mメッシュデータベースがNTT等から公開されている。そこで、この携帯基地局の情報を教師データとして、ポイント型人流データのコントロールトータルを処理し、データ解像度を向上させる拡大推計手法を採用することにする。図0-2（図1-3）は拡大推計の結果を表したものである。両者の決定係数は0.9以上で、全データの紐づけとしては十分な推定精度を得ることができた。



次に、携帯電話の信号（ポイント型人流データ）の移動速度に着目し、交通手段を推定する。この目的は路上に位置する人を全体のデータから抽出することであるが、あわせて人工排熱の算定方法の高度化にも活用を試みている。対象地域の幹線道路、鉄道の交通網を基に、各ポイントデータの挙動から、交通手段を車、鉄道、徒歩、滞在（移動速度小）の4種類に分類した。分類結果を図0-3（図1-10）に示す。夜間の滞在人口は国勢調査と良く合致した。ただし、車の移動人口は道路交通センサスとの相関はあまり得られなかった。



休日における歩行者と滞在者について暑さ指数（WBGT）との関係を図0-4（図1-12）に示す。ここで、WBGTは環境省の暑さ指数（WBGT）の配信データを用いており、徒歩は8時、13時、14時、20時の4時刻、滞在は14時、20時の2時刻とした。これを見ると、暑さ指数（WBGT）により徒歩と滞在の傾向が異なり、暑さ指数（WBGT）が大きくなると、歩行者は減り、滞在者が増えることが解った。また、朝8時と晩20時の歩行者を比較すると、両者の暑さ指数（WBGT）のレベルが同程度であるものの、暑さ指数（WBGT）に対する感度は晩20時が朝8時のものより4倍大きくなっている。これは、日中に暑い時間帯が続くと外出する人が減って、日中の外出者の総和である帰宅者が大きく減るためと考えられる。このことは、休日の天候（暑さ）が外出の判断に影響することを示唆している。居住者が暑さに対して自ら適応している事例として興味深い。なお、平日にはこの傾向は見られなかった。

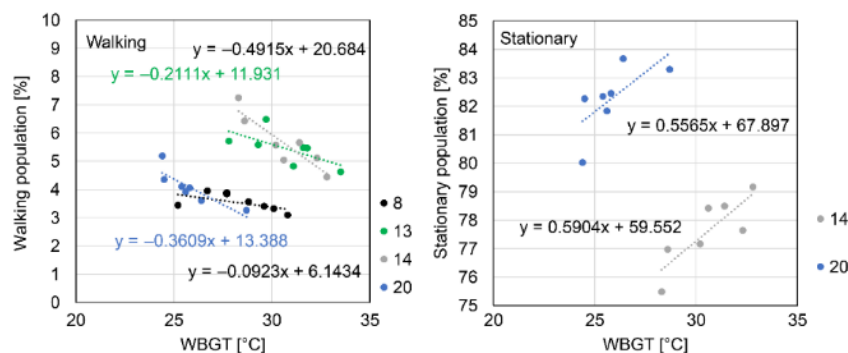


図 0-4 (図 1-12) 歩行者と滞在者の割合と暑さ指数 (WBGT) の関係 (休日)

建物の人工排熱については、環境省・国土交通省により人工排熱調査が行われており、人工排熱原単位として広く使用されている。本調査は公表後20年を経過しており本研究で近況データと比較を試みることにした。比較検討の視点としては冷房設備の稼働時間帯の問題を取りあげた。大都市の場合、建物の稼働時間が全国平均とは異なる可能性が従来から指摘されており、この問いに答えるには個別にアンケート調査を行うか計器を取り付けて測定する必要がある。本研究では、建物周辺の歩行者の人流データを用いて建物への入退場を推定することで、冷房設備の稼働時間帯を効率的に推定する。

建物の冷房需要は次式で表される。歩行者の人流データを時間需要に対する年間冷房需要の割合 $RCo(t)$ の調整に使用する。

$$E_{Co}(t) = Ey_{Co} \cdot R_{Co(t)} / N_d \cdot A \cdot C(A) \cdot Ry \cdot R(temp) \quad \text{式 0-1} \quad \text{(式 1-2)}$$

$E_{Co}(t)$: 冷房需要 (MJ)、 Ey_{Co} : 業種別年間冷房需要 (MJ/m²/年)、 $R_{Co}(t)$: 時間需要に対する年間冷房需要の割合、 N_d : 月別曜日数、 A : 建物の延べ床面積 (m²)、 $C(A)$: 延べ床面積による年間需要補正値、 Ry : 年間需要 (MJ)、 $R(temp)$: 外気温による冷房需要の変動係数

人工排熱の推定におけるもう一つの視点は機器効率の時代的な変化である。主要な熱源機器として RHA、AHP、VRF の電気、ガスのエネルギー消費 $E_{ele,i,t}$ or $E_{gas,i,t}$ は、冷房需要 $Q_{i,t}$ 、定格 $L_{e,i,rated}$ 、各種補正係数 C_p で算定される (式 0-2 (式 1-4))。機器効率の各種補正係数については建築研究所の web プログラムに収録されているパラメータを適用する。

$$E_{ele,i,t} \text{ or } E_{gas,i,t} = \frac{Q_{i,t} \times C_{p,correct}}{L_{e,i,rated} \times C_{p,load,i,t} \times C_{p,cool,i,t} \times C_{p,outlet,i,t}} \quad \text{式 0-2} \quad \text{(式 1-4)}$$

$Q_{i,t}$: 時刻 t における冷房需要 (MJ)、 $E_{ele,i,t}$: 熱源機 i の時刻 t における電力消費量 (MJ)、 $E_{gas,i,t}$: 熱源機 i の時刻 t におけるガス消費量 (MJ)、 $C_{p,correct}$: 熱源機のエネルギー消費量補正係数 (=1.2)、 $L_{e,i,rated}$: 熱源機 i の定格冷房効率 (AHP=3.7、RHA=1.08、VRF=2.67)、 $C_{p,load,i,t}$: 時刻 t における熱源機 i の負荷特性、 $C_{p,cool,i,t}$: 時刻 t における熱源機 i の外気温/冷水温度による入力特性、 $C_{p,outlet,i,t}$: 時刻 t における熱源機 i の冷媒温度特性

冷房需要、エネルギー消費が求めれば、外界への排熱量が決定される。図 0-5 (図 1-8) は各種熱源機器からの人工排熱量の算出フローである。冷却塔の放熱は既往の方法 (足永ら (1999)) に基づいて顕熱と潜熱に分離する。

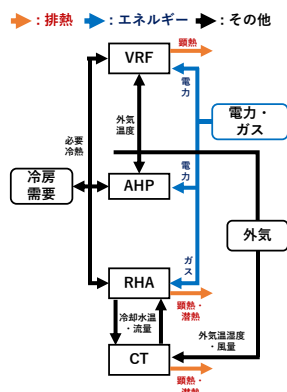


図 0-5 (図 1-8) 冷房による人工排熱の計算フロー

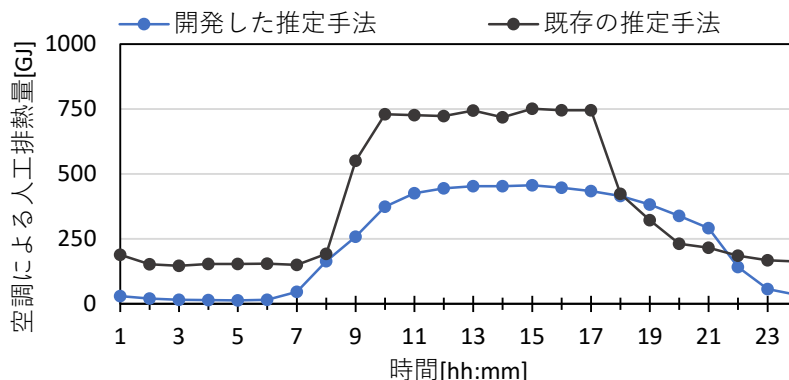


図 0-6 (図 1-20) 今回開発した手法と従来の手法による人為起源熱量の比較

開発した人工排熱推定手法の精度を検証するため、本計算手法による計算値と既存の推定手法（国土交通省、環境省 2004）による推定値との比較を行った。計算値は、8月1日から8月31日までの西新宿2丁目地域の各建物の5分間隔の計算結果を地域全体の1時間毎の値にまとめ、各時刻の月平均値とした。一方、既存の推定手法による推定値は、既存推定手法の開発における8月の時間別空調排熱原単位に、西新宿2丁目地域における各建物のデータを建物用途別・延床面積別に乘じ、総面積で足し合わせた値である。

図0-6（図1-20）は両者の日変化を比較したものである。日中の人工排熱量においてはオーダーが異なるほど大きな違いは見られなかった。昼間は既存の推定手法に比べ、空調熱源機器の性能向上が小さい理由であり、夜間は残業時間が延長されたため、従来法より大きくなっている。以上より、建物の人工排熱推定手法は適切であると判断し、建物用途ごとの人工排熱原単位を更新することにした。道路交通の排熱については、人流から推定するのは精度的に問題があると判断し、道路交通センサスの資料を活用する従来の方に基づいて排熱原単位を更新した。最終的には、サブテーマ2の検討地区における建物および道路交通の人工排熱データベースを作成、提供したものである。

次に、脆弱性について述べる。脆弱性に関しては、同じ条件で熱中症の発生しやすいエリアを特定することが重要である。東京23区の熱中症搬送者データ（2010年～2018年の7月、8月）を活用し、救急出場先の町丁目データをGISに統合した。熱中症搬送者データ（2010年～2018年の7月、8月）は、東京消防庁より提供いただいた。ベースとなる地域の人口については、NTTドコモのモバイル空間統計データを用い、統計人口と称する。平日における500mメッシュ毎の熱中症搬送者発生率 P [年/10000人]は、式0-3（式（1-1））で表される。

$$P = \sum_{t=1}^{24} \frac{M_{t,g}}{N_{t,g}} \quad \text{式（0-3）} \quad \begin{array}{l} M: 1\text{メッシュ当たりの7月・8月の熱中症搬送者数[人]、} \\ N: 1\text{メッシュ10000人当たりの統計人口[人]、} \\ t: \text{時刻[h]、} g: \text{年代・性別（20代～80代を10歳刻み・男女別）} \end{array}$$

（式（1-1））

熱中症搬送者発生率の分布を図0-7（図1-5）に示す。住宅系も道路等屋外系も西側の区で発生率が高く、都心3区での発生率が低い傾向にある。これは、都心3区では平日に人口が集中するため、搬送者に対し統計人口が非常に大きくなることや、住宅の割合が少ないことから、統計人口当たりの発生率が小さくなるためである。住宅系で発生した場所は、道路等屋外系で発生した場所に比べて、発生率が高い場所の広がりが大きく、発生場所によって、影響する都市の構造や地域性が異なることが予想される。交通手段別の総人口を検討した高輪地区（図中の四角で囲った領域）では熱中症搬送者発生率が高くなっている場所が局所的に存在しており、脆弱性の面から注意を要する。

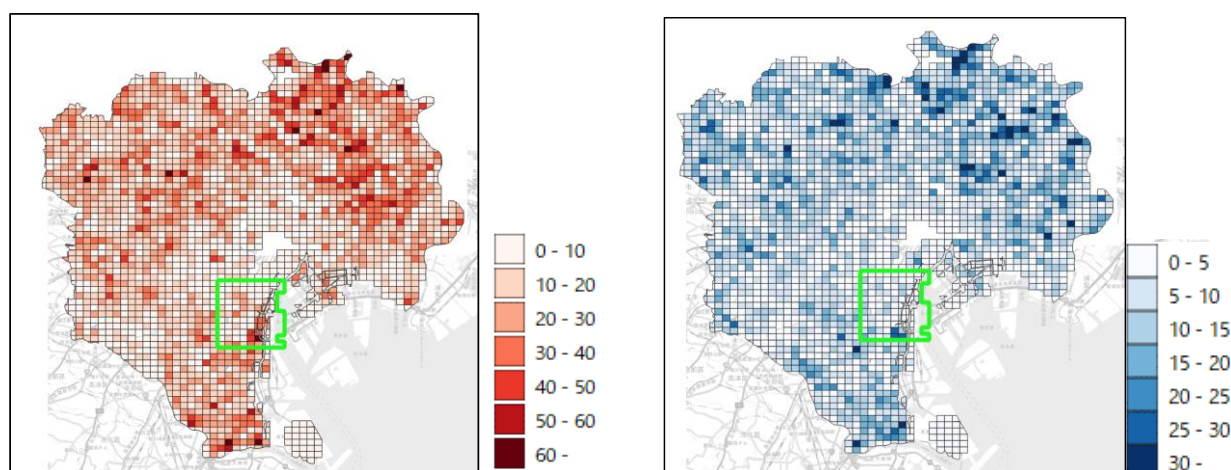


図0-7（図1-5） 熱中症搬送者発生率（左：住宅系、右：道路等屋外系）
高輪地区：四角で囲った領域

熱中症搬送者発生率を従属変数とし、高齢者や低所得者の割合などの各種統計データを説明変数とする重回帰分析を行った。VIF (Variance Inflation Factor) により共線性を排除している。その結果、住宅系の熱中症搬送者発生率の場合、「戸建て住宅の延べ床面積」、「年収300万円未満世帯数の割合」、「70-80代の日合計滞留人口の割合」が正の相関があることが解った。道路等屋外系の熱中症搬送者発生率については、住宅系とはデータ項目が異なり、「道路面積」、「空地面積」、「建築面積」に正の相関、「緑被率」、「延床面積」に負の相関があり、全体の決定係数は0.242となった。住宅系の分析結果を表0-1（表1-3）、道路等屋外系の分析結果を表0-2（表1-4）に示す。

表0-1（表1-3） 住宅系で発生する熱中症搬送者の重回帰分析の結果

説明変数	非標準化係数	標準化係数ベータ	有意確率 P	共線性の統計量VIF
70-80代の日合計滞留人口の割合[-]	1.357	0.161	<0.001	2.487
年収300万円未満世帯数の割合[-]	1.321	0.186	<0.001	3.238
年収1500万円以上世帯数の割合[-]	-1.242	-0.073	0.011	2.701
1980年以前の住宅数の割合[-]	0.649	0.075	0.004	2.161
戸建て住宅の延べ床面積[m ²]	4.280E-06	0.321	<0.001	1.601
マンションの延べ床面積[m ²]	1.284E-06	0.241	<0.001	1.324
RC住宅棟数の割合[-]	-0.220	-0.087	<0.001	1.816

F値：145.737、有意確率：<0.001、調整済みR2乗：0.313

表0-2（表1-4） 道路等屋外系で発生する熱中症搬送者の重回帰分析の結果

説明変数	非標準化係数	標準化係数ベータ	有意確率 P	共線性の統計量VIF
道路面積[m ²]	7.054E-06	0.252	<0.001	1.903
空地面積[m ²]	3.268E-06	0.251	<0.001	1.490
緑被率[-]	-0.219	-0.058	0.002	1.138
建築面積[m ²]	9.465E-06	0.543	<0.001	2.521
延べ床面積[m ²]	-6.767E-07	-0.264	<0.001	1.886

F値：160.259、有意確率：<0.001、調整済みR2乗：0.242

サブテーマ2では、都市街区内の温湿度、放射、風速を超高解像度で予測する温熱シミュレータを開発する。人体の温熱影響を数値予測するに当たり、都市空間の気流、温湿度に加え、日射や長波放射の情報を人体側に受け渡す必要がある。本研究では、地盤や建物壁などの地物表面を面素に分割して都市空間の幾何形状や伝熱現象を再現する。図0-8（図2-1）にCFD格子と面素の関係を示す。面素は熱収支（対流、蒸発、放射、伝導）に対応した表面温度、表面湿度を形成する。各面素は、CFD格子内で任意の向き、大きさ、個数で存在し、従来の階段状の表面分割方法に比較して建物、土地利用の形状を忠実に再現することができる。人体を想定して評価点を都市空間内に設置し、各時刻の日向日陰の状況に応じて、評価点における直達光や各面素からの反射日射、長波放射などを積算して、平均放射温度（MRT）を算出する。都市空間の伝熱過程は、多数の建築物が存在する街区を想定し、各面素の多重反射を考慮し、建物壁は窓を有する多層構造とし、室内気候を連成する。また、CFDモデルには樹木モデルを新たに組み込むことで樹陰や蒸散冷却の効果を取り入れることにする。

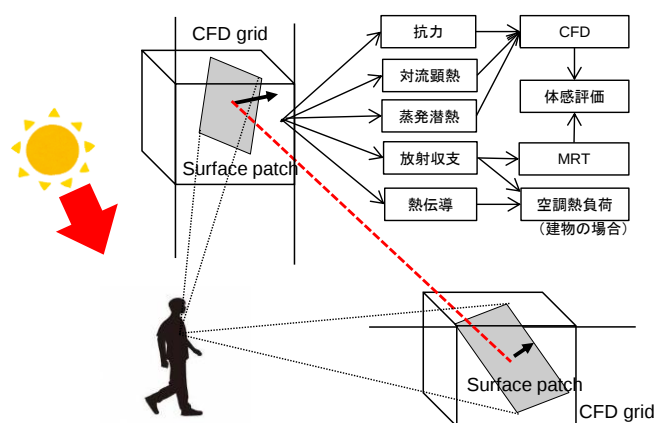


図0-8（図2-1） CFD格子と面素の組合せによる体感温度の評価

温熱シミュレータの汎用性を高めるため、気象庁MSMデータを温熱シミュレータの境界条件に取り入れる方法を検討した。図0-9（図2-8）は、その概要を示したものであり、MSM地上データから日射データ、MSM気圧面データおよびMSM地上データからCFD解析領域の境界条件データを作成した。MSM地上データの温湿度は図中の地上10m以下の領域に使用している。気圧面データの最下層のMSM気圧面データの最下層（地上高さ約100m）から地表付近まではThornthwaite-Holzmanの式で鉛直方向に補完した。

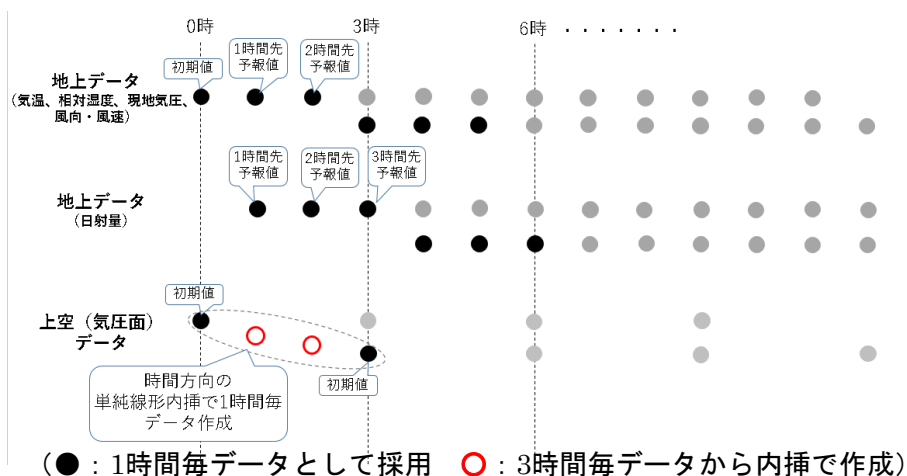
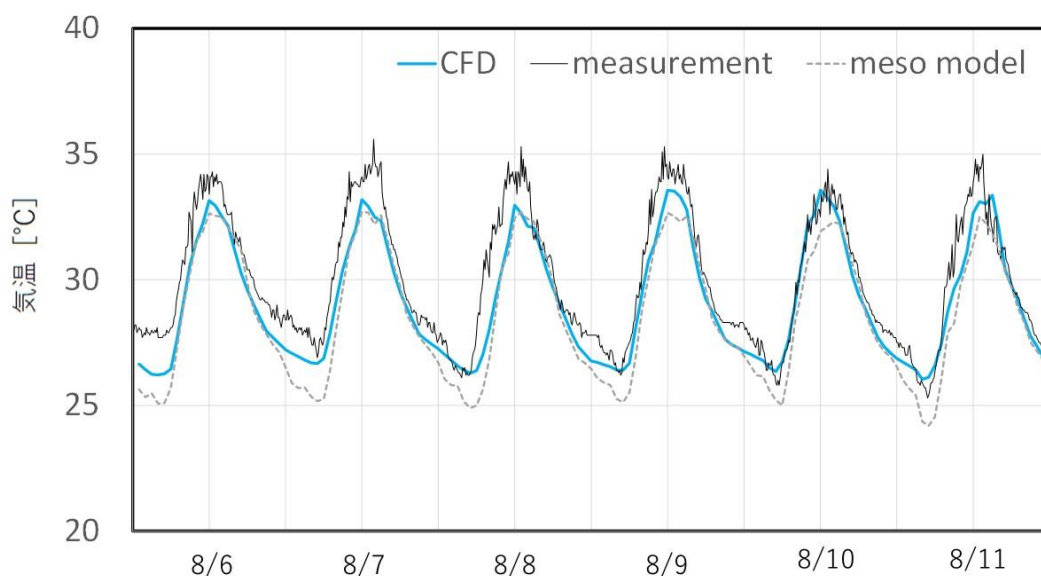


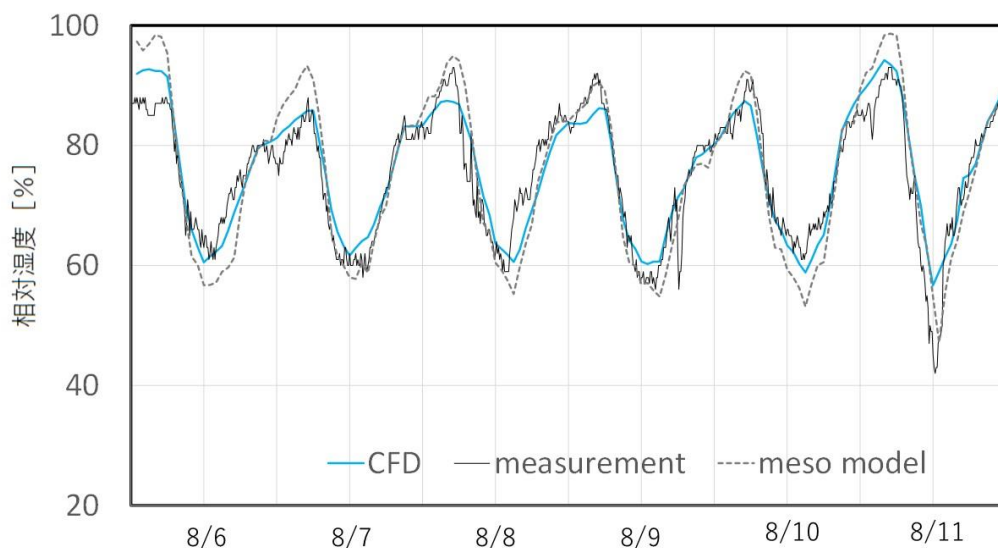
図0-9 (図2-8) 気象庁MSMデータの活用

北の丸公園地区を対象とし、温熱シミュレータの検証結果を図0-10 (図2-10) に示す。図中のCFDは温熱シミュレータの計算結果、measurementはアメダス観測値 (10分ピッチ)、meso modelは、MSS地上データである。図0-10 (a) (図2-10 (a)) 気温については、日中にCFD、メソモデルとともに観測値に対して過小評価となっているが、夜間においてはCFDが観測と照合が良いことが解る。夜間に一致する理由は、温熱シミュレータにおいては地物の形態係数を精緻に再現しており、放射冷却の効果を適切に熱収支に反映しているためと考えられる。図0-10 (b) (図2-10 (b)) 相対湿度は、CFD、メソモデルは両者ともに観測値に合致している。(図0-10 (c) 図2-10 (c)) 風速は、CFDが観測値とほぼ合致し、メソモデル (constant flux layer10m高さ) は小さめの値となるが挙動は観測を良く追随する。CFDの場合、都市空間内に3次元のメッシュ格子を設定しているため、任意の場所の風速を抽出することが出来、今回の場合は、アメダスで観測された屋上高さに相当する計算メッシュの風速値を検証に用いたものである。

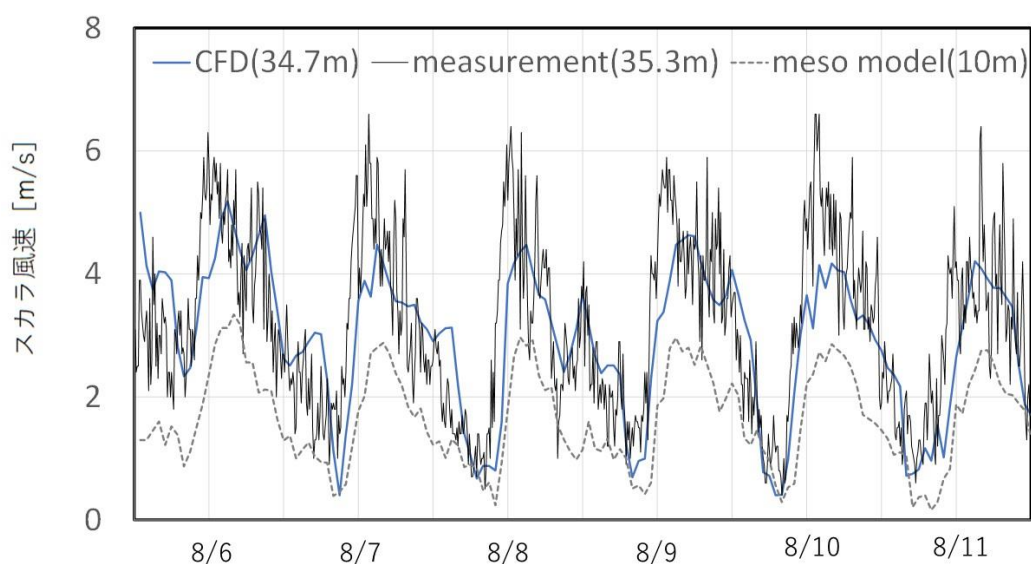
暑熱ハザードは、基本的に暑さ指数 (WBGT) で評価する。暑さ指数 (WBGT) の計算は湿球温度を使用する。一方、ISO7243が規定するWBGTでは自然湿球温度 (周囲の放射、風に曝された湿球の温度) を計算式に用いることを提唱しており、自然湿球温度の換算式を提示している。そこで、温熱シミュレータではISO7243に準拠したWBGTも出力できるようにしている。



(a) 気温



(b) 相対湿度



(c) スカラ風速

図0-10 (図2-10) 検証結果 (2019年8月6日～8月11日)

温熱シミュレータを実際の街区に適用する。検討対象は、サブテーマ1と同じ都内の高輪地区である。数値計算には、スーパーコンピュータ「富岳」(理化学研究所計算科学研究センター)を用いた。各種計算条件を以下に示す。

- ・規模：6km四方@2mグリッド、東西3000 x 南北3000x鉛直100=9億メッシュ
- ・並列数：60 x 60領域 (=3600領域)
- ・期間：2019年8月6日～8月11日 (表面温度)

2019年8月9日14時 (CFD)

都市空間モデルによる表面温度の計算結果を地区全域で図0-11 (図2-12) に示す。水面 (東京湾、目黒川、運河など)、緑地 (公園、教育園、寺院など) の表面温度が低いことが解る。図中○で囲った左下のエリアは住宅地であり、高温化した屋根面が密に存在している。図の中央部分は、現在JRの新駅となっているが、開発前の状況として操車場の敷地としている。

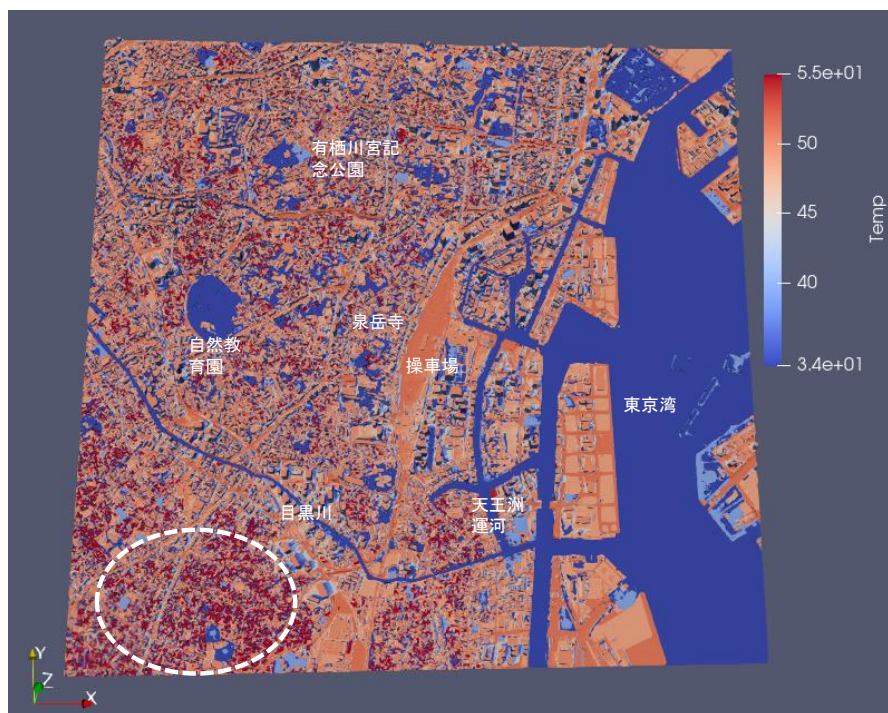


図 0-11 (図 2-12) 富岳による表面温度の計算結果 (地区全域、2019年8月9日14時)

CFDモデルによる気温分布を地区全域で表したのが図 0-12 (図 2-13) である。海からの冷風が徐々に暖まっている様子が解る。同図には、都ガイドラインが規定する「品川駅・田町駅周辺地域」および「主な風の道」も表示している。「主な風の道」については、都が風シミュレーションにより風速が相対的に高い地域を抽出し、矢印のエリアを定義したものである。都ガイドラインには「都市空間の暑熱対策など人々の主要な活動面である地表レベルでの環境改善を実施するとともに、上空での風の流れに配慮し、都市に風を取り込むことで、本地域のみならず内陸の后背地に風を導く」と明記されているが、当時の検討では気温の評価には至っていなかった。温熱シミュレータの解析により風の道に沿って低温域が形成されていることが判明し、環境資源としての風の道の価値があらためて示されたと言える。

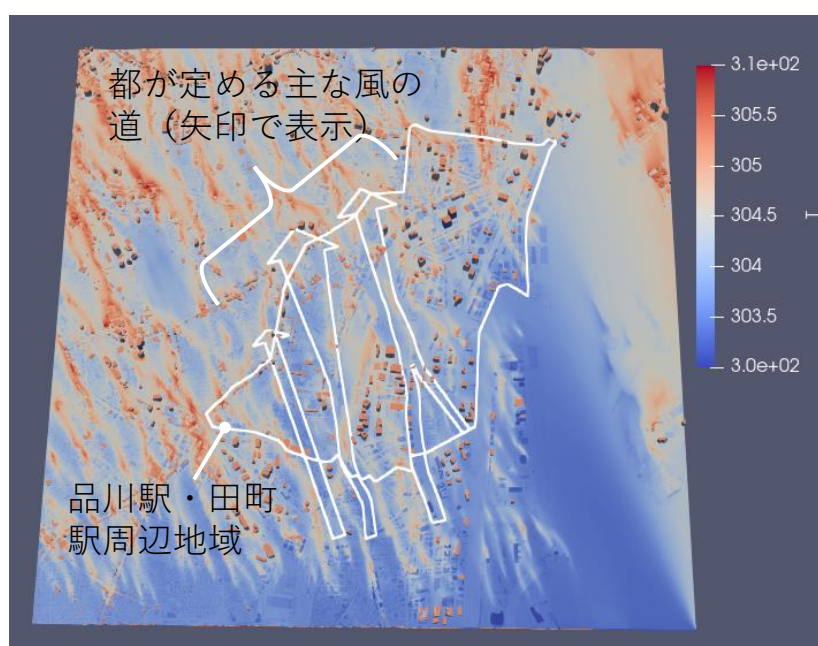


図 0-12 (図 2-13) 富岳による地上50mの気温の計算結果 (地区全域、2019年8月9日14時)

中心エリアにおける歩行者数と暑さ指数（WBGT）の分布を図0-13（図2-14）に示す。歩行者数は、第一京浜、桜田通り、麻布通りに沿って密に存在することが解る。暑さ指数（WBGT）は、温熱シミュレータ解析によりリアリティが高い結果が得られており、場所により2～3℃程度の違いがある。この温度差はかなり大きく、暑さ指数（WBGT）が高いエリアに人の流れが集中すると熱中症の発生率に影響する可能性があるため、形成要因を検討する必要がある。また、適応策の観点からは、暑さ指数（WBGT）が低いエリアに人の流れを誘導することで地域全体の温熱リスクの低減可能性が指摘される。これまでWBGTの将来予測は、北米や東アジアなど大陸レベルの検討が行われてきた。人と熱の流れを街路単位の高解像度で両方再現する取り組みはこれまでほとんど見られず、本研究の独自性を強く示唆するものである。

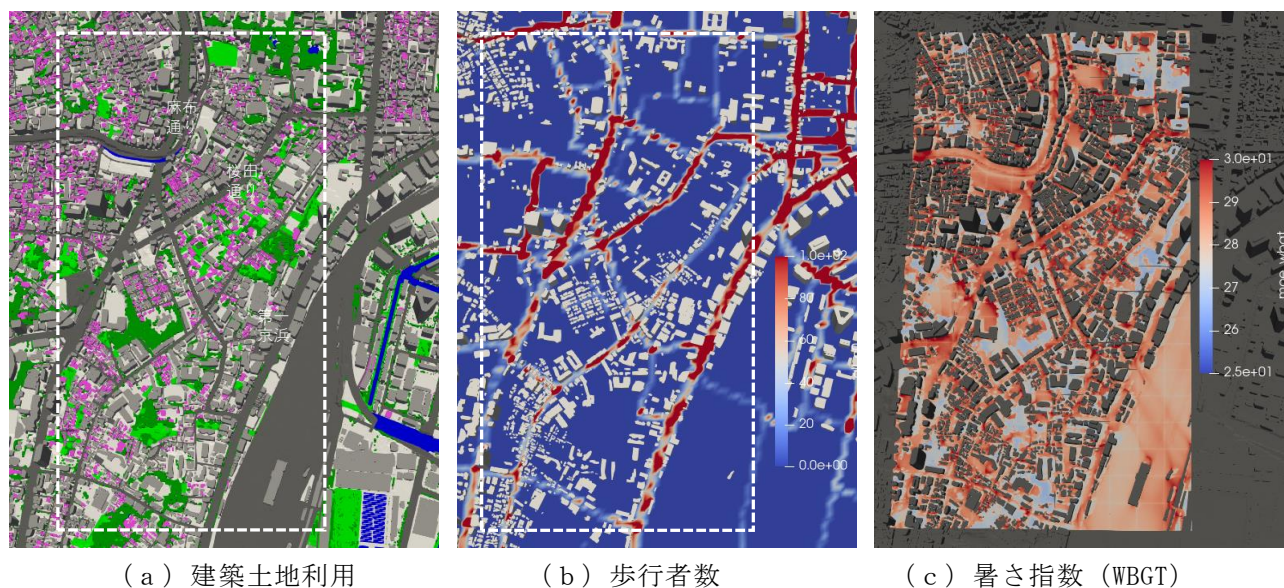


図0-13（図2-14） 歩行者数と暑さ指数（WBGT）の分布
（中心エリア、2019年8月9日14時）

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> 3. 目標どおりの成果をあげた

「人口流動データと温熱シミュレータによる都市におけるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」

全体目標	全体の達成状況
都市街区内の温湿度、放射、風速を超高解像度で予測する温熱シミュレータを開発し、それを用いて実際の都市を対象にして暑熱ハザードを定量化するとともに、人口流動データを用いて暑熱暴露、熱的脆弱性に関する分析を実施し、地域総体の暑熱リスクの低減方策について取りまとめ、その結果を、東京都等の地域気候変動適応計画等における暑熱対策推進のための科学的エビデンスとして提供する。	研究計画の内容の達成に加え、当初予定にはなかったスーパーコンピュータ富岳の活用により、都市の人と熱の状況を広域かつ精緻に把握することに成功した。また、本研究の開発技術を使って都の暑さ対策事業の定量的な評価を行っており、環境施策にも貢献できた。

<【サブテーマ1】達成状況> 3. 目標どおりの成果をあげた

「人口流動データによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
-----------	--------------

サブテーマ1では、人口流動データを用いて、暑熱暴露、熱的脆弱性に関する分析および各種統計資料の統合化を行い、得られた情報をサブテーマ2に提供する。具体的な目標は次の二つである。 (1) 人口流動データを用いて、対象地域における人の流入、流出と地域内の移動に関わる人の挙動を追跡し、屋外における滞在人数の密度や移動時間、移動手段等に分類し、暑熱暴露の実態を定量的に評価する。 (2) 人口流動データに加え、高齢者や低所得者の割合などの関連情報を様々なソースから抽出し、各種統計資料を統合化するロジックを構築することにより、都市の暑熱リスク評価において熱的脆弱性を適切に反映する。	人口流動データを取得し、人々の暑熱暴露の実態や、それらに起因する建物からの人工排熱等について各種分析を行い、得られた情報をサブテーマ2へ提供した。具体的には以下の通りである。 (1) 都心の開発地域を対象に、携帯電話の位置情報から取得された人口流動データを用いて、人々の移動の挙動を、鉄道、自動車、徒歩、滞留在に分類し、暑さ指数との関係を分析することで、暑熱暴露の実態を定量的に評価し、休日に比べ平日の歩行者の方が暑熱に曝露しやすいこと等を明らかにした。 (2) 東京23区全域を対象に、500mメッシュ毎の熱中症搬送者の実績データを従属変数とし、世帯所得、居住者属性、都市の構造や地域性の特徴を表す各種統計データを説明変数とする重回帰分析を行い、都市の暑熱リスクを評価する回帰式を作成し、住宅内と屋外等、搬送される場合により説明変数が異なることを明らかにした。 なお、いずれの分析も、新型コロナウイルス感染症拡大による人々の行動変化の影響を避けるため2019年夏のデータを使用した。
---	--

<【サブテーマ2】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「温熱シミュレータによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
サブテーマ2では、都市街区内の温湿度、放射、風速を超高解像度で予測する温熱シミュレータを開発し、それを用いて実際の都市を対象にして暑熱ハザードを定量化する。さらに、サブテーマ1から提供される情報と合わせて、地域総体の暑熱リスクの低減方策について取りまとめ、その結果を、東京都等の地域気候変動適応計画等における暑熱対策推進のための科学的エビデンスとして提供する。そのために、温熱シミュレータは下記の性能を有することとする。 (1) 数値シミュレーションにおいては、各種数理モデルを適切に選択、組み合わせた先進性を有し、暑熱ハザードの時空間分布の再現性、計算精度を確保している。 (2) シミュレーション及び解析システムは、建物や道路の配置を判別可能な超高分解能メッシュを使用可能であるように適切に構築され、自治体等の環境行政にとって実効性を伴う研究情報を提供できる。	都市空間における暑さ指数を分析可能な温熱シミュレータの開発に取り組み、サブテーマ1の情報と合わせて暑熱対策推進のための科学的エビデンスとして提供した。 1) 暑さ指数の評価に当たっては、放射の適切な取り扱いが重要であった。そこで、街区内の建物の立体形状を詳細な面素に分割し、面素同士の角関係を紐づけることで短波、長波の放射熱を正確に算定することができるようになった。対策面では樹陰の効果を評価する必要がある、これについては葉群の放射減衰モデル、植物の生理モデルをCFDモデルの中に組み込むことで、樹木の日陰効果、蒸散作用や冷氣拡散の物理的特徴を解析結果に反映している。開発モデルについては、個別モデル、全体モデルをそれぞれ検証し、いずれも良好な計算精度を得られることを確認している。したがって、数値シミュレーションにおいては、各種数理モデルを適切に選択、組み合わせた先進性を有し、暑熱ハザードの時空間分布の再現性、計算精度を確保している。 2) 温熱シミュレータの境界条件については気象庁のMSSデータを活用することで、国内の任意の場所、期間に温熱シミュレータによる計算を実行可能とした。また、高分解能の解析を実現するため、スーパーコンピュータ富岳上に計算システムを構築することで、温熱シミュレータの計算時間の大幅な短縮を実現した。その結果、6km四方の領域を2m解像度で3次元解析を行えるような

り、都市空間の暑さ指数を詳細に把握できるようになった。また、温熱シミュレータの入出力様式や操作方法を技術マニュアルにとりまとめ、希望する自治体にはツールの提供が可能である。したがって、シミュレーション及び解析システムは、建物や道路の配置を判別可能な超高分解能メッシュを使用可能であるように適切に構築され、自治体等の環境行政にとって実効性を伴う研究情報を提供できる。

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

本研究は、ビッグデータ（携帯電話の信号）とスーパーコンピュータを駆使して都市における人と熱の流れを科学的に解明し、都市の暑さ対策に資する新たな学術テーマに挑んだものである。

サブテーマ1では、ビッグデータ（携帯電話の信号）を暑熱問題に適用を図り、都市において熱に曝される人数を街路単位で把握する拡大推計手法を開発すると共に、建物周辺の人の所在データから建物設備の稼働時間と排熱影響を分析したものである。これまで人の流れや建物の稼働状況はアンケート調査などで個別に行われていたが、本研究の手法により面的データを効率的に取得することが可能になり、先進性に優れている。

サブテーマ2の温熱シミュレータの研究は、都市空間の暑さ指数を詳細な解像度でとらえ、対策効果を定量的に把握することを可能とするものである。これまで暑さ指数はアメダス観測値などから経験式で予測することが多かったが、本研究ではスーパーコンピュータ富岳の活用によりクールスポットをメートル単位で判定可能となり、適応策の効果的な推進に役立つものである。このような暑熱ハザードの時空間分布の再現性、計算精度を確保した研究は世界的に見ても稀であり、画期的な成果である。

<行政等に既に貢献した成果>

都の暑さ対策事業の評価に本研究の開発技術を適用し、技術資料を提供した。図0-14（図2-17）に温熱シミュレータによる東京都暑さ対策事業の評価概要を示す。東京都は暑さ対策事業として、平成29年度～令和元年度に都内各所で日除け、冷却ミスト等を設置している。事業全体のうち、代表的なものを8ケース抽出し、温熱シミュレータによる検討を行ったものである。その結果、各事業における暑さ指数の低減効果をそれぞれ定量化することが出来た。図中右のケースでは、日除けと冷却ミストの組み合わせ技術について、温熱シミュレータを適用し、両者の相乗効果が示されている。暑さ対策事業の抽出と評価検討に際しては東京都環境局の協力を得て実施した。

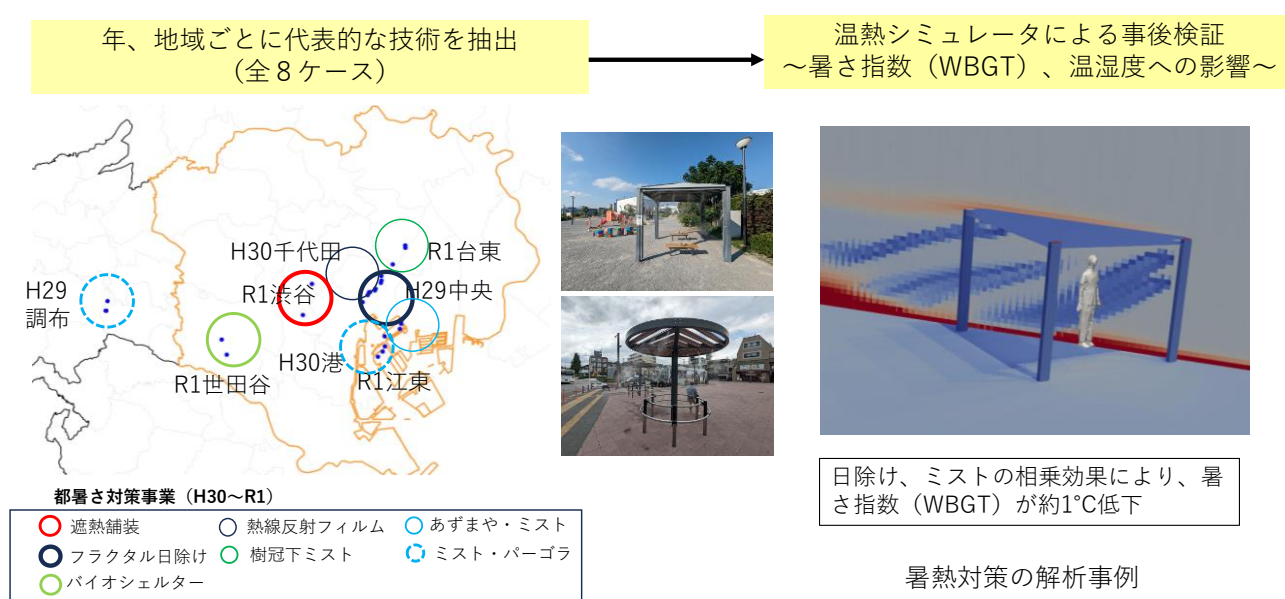


図0-14（図2-17） 温熱シミュレータによる東京都暑さ対策事業の評価概要

＜行政等に貢献することが見込まれる成果＞

本研究では、暑さ指数と滞在・歩行者数を基に、地域の暑熱リスクを評価する方法を提唱している。一方、東京都では、暑さ対策事業が展開されており、都内各地に日除け空間や冷却ミスト設備の導入が進められるとともに、都市の風の道確保と温熱アメニティ向上の両立を目指して環境配慮型都市計画の策定が検討されているところである。これらの環境施策に本研究の開発評価技術を適用することにより、各種事業の有効性を暑熱リスクの面から科学的に解明することが可能になる。暑さ対策効果のエビデンスは、各ステークホルダー（行政、地域住民、開発事業者）にとって有用な情報であり、環境施策の推進に資するものである。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	2
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	1
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	3
口頭発表（学会等・査読なし）：	3
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	5
マスコミ等への公表・報道等：	0
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	7

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Ueno, T., Kumakura, E., Ashie, Y., (2023). Estimation of regional anthropogenic heat from air conditioning systems and related devices in metropolitan commercial districts of Japan. City and Built Environment, 1(9), https://doi.org/10.1007/s44213-023-00009-w
2	足永靖信：自然湿球温度の屋外観測データを活用したWBGTの計算式の検討、空気調和・衛生工学会論文集、Vol. 49、No.327、pp.31-35、2024.6
3	Kumakura, E., Y. Ashie, T. Ueno: Impact of summer heat on the movement of people in Tokyo based on mobile phone location data, Building and Environment http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4757224
4	Kumakura, E., Y. Ashie, T. Ueno: Investigation of the Effect of Heat on People's Movement in Tokyo During 1 Summer Using Mobile Phone Location Data, 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, RMIT University, 2023.12
5	Ueno, T., E. Kumakura, Y. Ashie: The effect of district heating and cooling on anthropogenic heat mitigation in the Tokyo metropolitan area, 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, RMIT University, 2023.12

6	Ashie, Y., E. Kumakura, T. Ueno: Development of the urban thermal simulator and its validation, 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, RMIT University, 2023.12
---	---

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

＜相手機関・国・地域名＞

機関名	国・地域名（本部所在地等）
特に記載すべき事項はない。	

8. 研究者略歴

＜研究代表者略歴＞

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
足永靖信	北海道大学工学研究科修了 工学博士 国土交通省国土技術政策総合研究所室長を経て、 現在、国立研究開発法人建築研究所研究専門役 専門は都市建築環境、研究テーマはヒートアイランド対策技術

＜研究分担者（サブテーマリーダー）略歴＞

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
熊倉永子	東京工業大学総合理工学研究科修了 博士（工学） 首都大学東京助教、国土交通省国土技術政策総合研究所主任 研究官等を経て、 現在、国立研究開発法人建築研究所 主任研究員 主に住宅の省エネや都市の熱環境について研究	2021年度 ～ 2023年度

Ⅱ． 成果の詳細

Ⅱ－１ サブテーマ１「人口流動データによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」

[サブテーマ１ 要旨]

サブテーマ１では、暑熱リスク評価を行うために必要な、①人々の暑熱曝露や脆弱性、②人の移動に起因する建物及び自動車からの人工排熱について、人口流動データ等を用いて算出する方法を検討し、その実態を分析すると共に、サブテーマ２の入力条件や暑熱リスク評価のためのデータ構築を行った。①では、人口流動データから人々の移動手段を推計する手法を提案し、暑さ指数との関係を分析することで、人々の暑熱曝露の実態を明らかにした。また、屋内外の熱中症搬送者の実績データを活用し、都市生活者や地域性に関わる統計資料から、熱的脆弱性に影響する要素が、搬送場所によって異なることを示した。②では、建物用途ごとにエネルギー消費を推計する手法を開発した上で、各建物の営業時間等を人口流動データに基づき設定し、建物内のエネルギー消費を冷暖房等のエネルギー用途別に分解することで、建物からの人工排熱量を算出する方法を提案した。また、交通排熱量は、対象地域における各道路の車種別走行量と車種別燃料消費原単位から推定した。

１． サブテーマ１ 研究開発目的

サブテーマ１では、近年様々な分野での活用が進む人口流動データに着目し、都内における人口流動データから人々の移動の挙動について、天候や曜日等の日変動、用途地域や建物用途別の特性等、人口の時空間構造を明らかにする。それらのデータを活用し、以下の２つの視点から都市の暑熱リスク評価や、それに必要なデータ構築を行うものである。

１つ目は、高齢者や低所得者層などの熱的脆弱性に関するデータを各種統計データから抽出し、人口流動データに統合化し、地域内における熱的脆弱性について分析した上で、暑熱リスク評価方法を提案する。また、特定の都市開発地域を対象として、都市開発前後で暑熱に曝露する歩行者の変化を推計し、その結果をサブテーマ２へ提供する。

２つ目は、各種統計資料より、建物および交通の地域構成やエネルギー消費量を調べ、それぞれの活動によるエネルギー消費原単位を作成し、人口流動によって誘発されるエネルギー消費との関係を考察し、人口流動データからオフィスビルや商業施設といった建物用途ごとに、人の滞在によるエネルギー消費を推計する手法を開発する。その上で、建物内のエネルギー消費を冷房、暖房といったエネルギー用途別に分解することで、建物外への人工排熱に変換し、サブテーマ２の温熱シミュレータの入力データを作成する。

２． サブテーマ１ 研究目標

サブテーマ１	「人口流動データによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」
サブテーマ１ 実施機関	国土技術政策総合研究所、早稲田大学
サブテーマ１ 目標	サブテーマ１では、人口流動データを用いて、暑熱曝露、熱的脆弱性に関する分析および各種統計資料の統合化を行い、得られた情報をサブテーマ２に提供する。具体的な目標は次の二つである。 （１）人口流動データを用いて、対象地域における人の流入、流出と地域内の移動に関わる人の挙動を追跡し、屋外における滞在人数の密度や移動時間、移動手段等に分類し、暑熱曝露の実態を定量的に評価する。 （２）人口流動データに加え、高齢者や低所得者の割合などの関連情報を様々なソースから抽出し、各種統計資料を統合化するロジックを構築することにより、都市の暑熱リスク評価において熱的脆弱性を適切に反映する。

3. サブテーマ1 研究開発内容

サブテーマ1では、以下の3点について実施した。いずれも、新型コロナウイルス感染症拡大による生活様式の変化等の影響を受ける前の暑い時期のデータとして、2019年8月のデータを対象とした。

3-1) 人口流動データを用いた人々の移動の推定と暑さ指数との関係

スマートフォン等のアプリからGPSの位置情報が取得される「ポイント型人流データ（Agoop）」を用いて、サブテーマ2の計算対象地である品川・田町駅周辺の5 km圏を対象に、人々の移動を鉄道、自動車、徒歩、滞在に分類し、天候や曜日による移動の傾向について分析した。図1-1に対象エリア、図1-2に「ポイント型人流データ」の分布（原データ）を示す。



図1-1 対象エリア

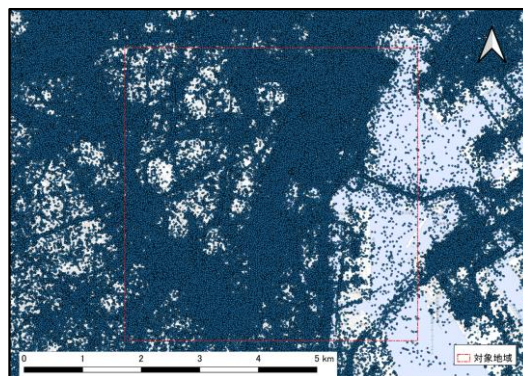


図2 ポイント型人流データ（原データ）

「ポイント型人流データ」は、1人の移動の軌跡を数分間隔で取得することができるため、データの移動距離や時間間隔から、移動手段を推定することができる。取得されるデータはGPSで測位しやすい場所に限られるため、屋外活動者の相対的な比較に適したデータと考える。しかし、携帯基地局との通信をもとに取得される「メッシュ型人流データ（NTTドコモ）」に比べるとユーザー数が少ないため、移動を推定し分類した上で、「メッシュ型人流データ」と合うように拡大係数を設定し、当該エリアにおける交通量を推計した。

本研究で使用した対象敷地内で測位されたデータは、1日1ユーザーあたりの平均測位回数が52回、中央値が28回であった。GPSの位置誤差の最頻値は14m、平均値は約18mであった。なお、道路位置を特定するため、位置誤差が50mを超えるデータは除外した。測位の時間間隔は、1日1ユーザーあたり平均15分、中央値6分であった。これらの各ユーザーのポイントデータから移動手段を推定した。20分以内に直線距離で100m以上移動した場合を「移動」、半径250mに20分以上存在した場合は「滞在」とした。「移動」に分離されたデータは、既往研究等の閾値を参考に、更に、鉄道軌道から距離が近く、ピーク速度が10km/h以上は「鉄道」、鉄道軌道から離れピーク速度が10km/h以上または平均速度が6km/h以上は「自動車等」、平均速度が6km/h以下は「徒歩」に分類した。

拡大係数の推計は、「メッシュ型人流データ」を真値として人数を拡大した。「ポイント型人流データ」は、「メッシュ型人流データ」の1.87%（平日）、1.21%（休日）であった。拡大方法は、①「ポイント型人流データ」の各ユーザーが最も長い時間滞在した100mメッシュを特定し、その100mメッシュ毎にユーザーグループを設定し、②メッシュ数×2（平日・休日）×24（時間）の条件ごとに「メッシュ型人流データ」との比率を各ユーザーグループの拡大率とした。最後に③②の拡大率で重み付けした値を各ユーザーグループの拡大係数として算出した。推計した値と「メッシュ型人流データ」の決定係数は0.94（平日）、0.90（休日）であった（図1-3）。各ユーザーグループの拡大係数は、ほとんどのユーザーで50～250の範囲におさまった。

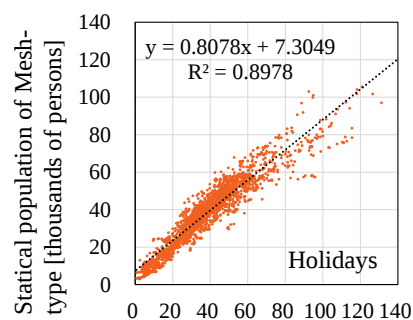
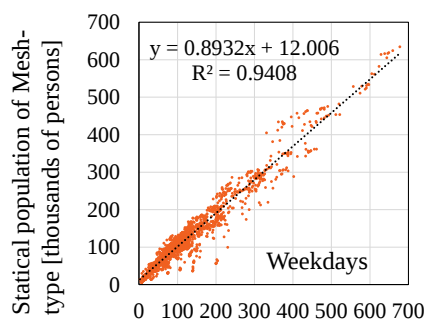


図1-3 休日・平日別のメッシュ型データと推計したポイント型データの相関

次に、交通ネットワーク図を作成し、1時間ごとに「鉄道」「徒歩」「自動車」の交通量を計算した。「徒歩」と「自動車」の交通ネットワークは、全国デジタル道路地図データベースを元に実測値とオンライン地図から作成した。歩行者ネットワークは、幅員5.5m以上の道路を対象とした。鉄道ネットワークは、デジタル国土情報に基づいて作成したが、新幹線は通過時間が速いため除外した。人口流動データの各ポイントについて、作成した交通ネットワークの最寄りのノードとリンクから最短経路を探索した。推計した各交通手段別人口について、公的データと比較をした（図1-4）。「自動車」は、平日1330リンクを対象に、2015年道路交通センサスデータと比較した。特に交通量の多い道路や対象地の外周部では、交通量が過小評価されていた。これは、位置情報の取得間隔に対して、車の移動速度が速いため、対象地点通過したにも関わらず、多くの利用者の位置情報が取得できていないことが要因と考えられる。また、センサスデータは車の台数であるのに対し、推計値は人の数であることも、誤差が大きい理由である。「鉄道」は、平日53リンクを対象に、第12回首都圏交通センサスと比較した。推計値はセンサスよりも低い傾向であった。これは、走行速度が速いために位置情報が得られないこと、GPSが利用しにくい地下鉄駅では位置情報が得にくいことなどが原因と考えられる。「滞在」は、夜間在宅していると考えられる1時～4時の平均人口を、2020年国勢調査の人口と比較した。人口流動データは、利用者のプライバシーに配慮し、推定された自宅とその周辺情報が削除されているため、国勢調査の人口よりも低くなる傾向が見られた。一方で、平日の推計人口が多い地点もあり、これらの地域は、昼間人口が夜間人口の7倍以上と非常に多い場所であった。これは、拡大係数を計算する際、昼間人口の影響が強く、夜間人口が過大に見積もられたためである。「徒歩」は、公式な統計データがないため比較しなかった。以上のように推計した移動手段別の人口について、暑さ指数との関係について分析した。なお、自動車による移動による交通量は、推計精度が低かったため、3-3)で算出予定であった自動車からの排熱量については、人口流動データは用いず、対象地域における各道路の車種別走行量と車種別燃料消費原単位から求めることに変更した。

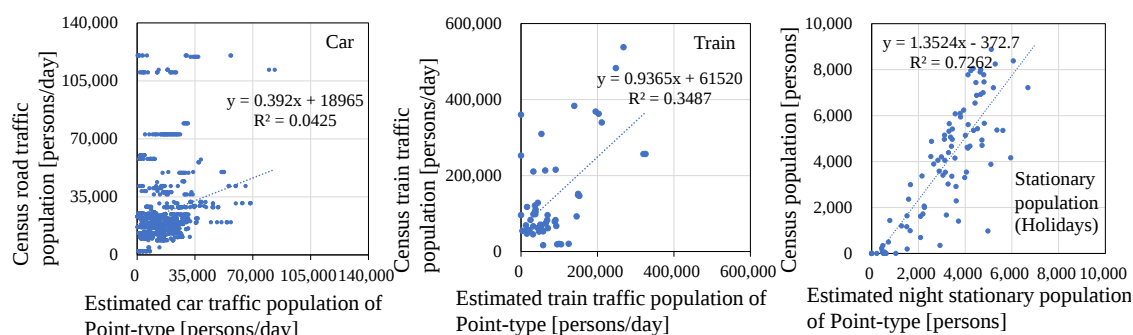


図1-4 公的データと推計したデータの比較（各平日、左から自動車・鉄道・滞在）

次に、対象敷地における開発後の将来交通量を、以下の方法で推計した。まず、開発による発生集中交通量の推計をするため、開発中の建物に関する用途別床面積等の各種データから、「大規模開発地区関連交通計画マニュアル改訂版」に準拠し、生成交通量を原単位法で推定（平日・休日別）した。次に、推定した生成交通量についてエリア別・交通手段別に配分推計をした。具体的には、対象敷地の周辺をゾーン分割し、パーソントリップ調査データを元に、交通手段別ODデータの比率を用いて、発生した交通量を、対象敷地の5km圏内（町丁目単位）と遠方（4方面）に配分した。交通手段分担率は、開発地域が属するパーソントリップ調査の小ゾーンにおける発着施設別の値を採用した。また、将来の交通ネットワークについては、公開されている都市開発プランの平面図等で確認できる計画道路を追加し、既存の交通ネットワークに接続した。詳細が不明な再開発地デッキ上の歩行者専用通路は、拠点間（計画区域の各棟と駅や周辺道路等）を結ぶ経路を、最短距離で接続したものを仮定して追加した。最後に、配分推計した人数を、再構築した交通ネットワークに対して経路配分計算を行い、再開発に伴い増加する人を交通手段別に分配した。時刻別の配分は、人口流動データから取得された現状の時刻別人数の比率を用いて推計した。従前の人口流動データに加え、これらの結果についても、サブテーマ2へ受け渡し、暑熱リスクの算出に使用した。

3-2) 人口流動データと熱中症搬送者の実績データを用いた熱的脆弱性に関する検討

東京23区全域を対象に、住宅内及び屋外における熱中症搬送者の実績データと携帯電話と携帯基地局の通信履歴から取得されるメッシュ型人口流動データを用いて、500mメッシュ毎の熱中症搬送者発生率を算出し、熱中症搬送者発生率と各種統計データを用いた熱的脆弱性について検討した。

東京都消防庁から提供を受けた熱中症搬送者データの中から、2010年から2018年の7月、8月のデータを用いた。搬送者データには、救急出場先の町丁目、覚知時刻、発生場所、搬送者の年代、性別等が含まれている。全体の発生場所のうち、最も多い住宅系は41.0%、次に多い道路等屋外系は25.6%であっ

た。そこで本研究では、住宅系と道路等屋外系で発生する熱中症の搬送者に着目し、分析に使用した。本研究で抽出した住宅系と道路等屋外系の発生場所の主な施設の内訳を表1-1に示す。発生場所は、あくまでも救急要請時の発生場所であり、搬送者の搬送前の行動履歴によっては、必ずしも発生場所自体が熱中症となった要因とは限らないが、本研究では、発生場所の違いと都市の地域性との関係を相対的に比較するため、発生場所を熱中症救急搬送者が発生する要因として取り扱った。救急出場先の町丁目データは、2分の1地域メッシュ（4次メッシュ）の人口統計データで除すため、面積割合で4次メッシュへ案分して使用した。本研究では、より多くの搬送実績が必要であると考え、全ての症例（軽症、中等症、重症、重篤等）の搬送者を対象とした。

表1-1 住宅系および道路等屋外系の発生場所の内訳

発生場所	施設の主な内訳
住宅系	住宅（専用・共同・寮・寄宿舍）、自助施設・グループホーム等、老人施設（特養以外）、特別養護老人ホーム
道路等屋外系	一般道路（公道・私道・施設内道路）、公園・キャンプ場・ピクニックガーデン、駐車場・駐輪施設、河川・水路、その他公園・遊園地等、その他自然環境・土地 等

人口流動データは、東京23区のNTTドコモのモバイル空間統計データ（以下、メッシュ型人口統計データ）の2019年7月、8月、休日・平日別の月別平均値を用いた。4次メッシュデータで、各メッシュに性別、年代別（20～80代）の1時間毎の統計人口が含まれている。人口統計データは1年分であり、かつ熱中症搬送に関する取得データの年数と異なっているが、集計単位が4次メッシュと範囲が広いことや、休日・平日別に平均化したデータであることから、夏季の平均的な人の動きであり、年度による違いが小さいと仮定して使用した。

熱中症搬送者発生率については、住宅系と道路等屋外系のそれぞれで算出した。発生した熱中症搬送者のデータと人口統計データを用いて、1メッシュ毎に熱中症搬送者発生率 P [年/10000人]を、式(1-1)より算出した。平日と休日とは、人々の滞留傾向が異なること、平日に比べて休日の日数が少ないことから、本研究では平日のみを対象とした。

$$P = \sum_{t=1}^{24} \frac{M_{t,g}}{N_{t,g}} \quad \text{式(1-1)}$$

M : 1メッシュ当たりの7月・8月の熱中症搬送者数[人]、
 N : 1メッシュ10000人当たりの統計人口[人]、
 t : 時刻[h]、 g : 年代・性別（20代～80代を10歳刻み・男女別）

算出した熱中症搬送者発生率を図1-5に示す。住宅系も道路等屋外系も西側の区で発生率が高く、都心3区での発生率が低い傾向にある。これは、都心3区では平日に人口が集中するため、搬送者に対し統計人口が非常に大きくなることや、住宅の割合が少ないことから、統計人口当たりの発生率が小さくなるためである。住宅系で発生した場所は、道路等屋外系で発生した場所に比べて、発生率が高い場所の広がりが大きく、発生場所によって、影響する都市の構造や地域性が異なることが予想される。

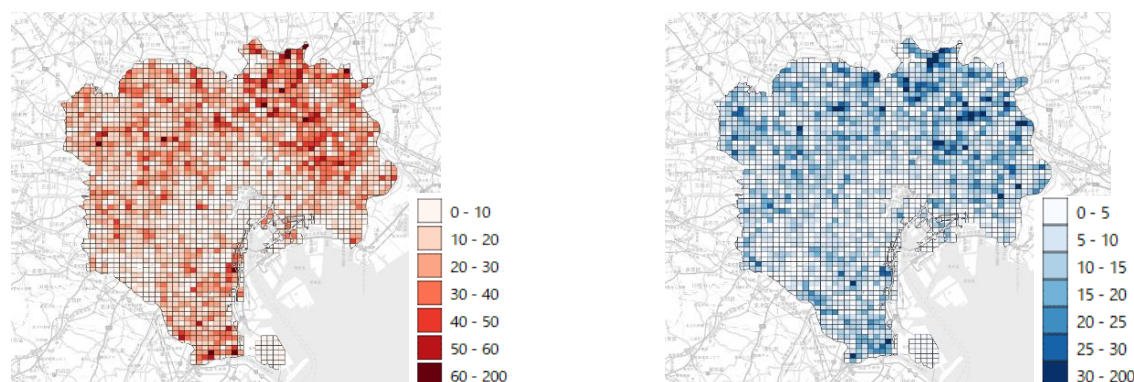


図1-5 熱中症搬送者発生率（左：住宅系、右：道路等屋外系）

次に、熱中症搬送者発生率が高い場所と地域性との関係を明らかにするため、都市の構造や地域性の特徴を表す各種統計データについて検討した。東京都監察医務院で扱った熱中症での死亡者の特徴・所見より、単身高齢者に多く、エアコン使用のない高温の屋内で発見されていることから、高齢者が多く高温化しやすい住環境として、住宅の断熱性能が悪い住宅、風通しが悪いと思われる建物が密集した地域、エアコンの使用が十分でない可能性として所得が低い世帯、という観点で、都市の構造や地域性の特徴を表す統計データを表1-2に示すパラメータとして選定した。高齢者の分布状況を把握するために選定した「年代別日合計滞留人口」は、7、8月の平日で平均したNTTドコモのモバイル空間統計を用いて算出した。所得が低い、または住宅の断熱性能が悪い住宅地を把握するために選定した「年収別世帯数」は、年収階級別世帯数推計メッシュデータ2018より算出した。断熱性能が悪い住宅の分布を把

握するために選定した「築年数別の住宅数」は、築年数データ2018年版を用いて算出した。住宅の性能及び密集状況を把握するために選定した「住宅の種類別の延べ床面積」は、2019年8月前後に調査されたデータを元にした建物ポイントデータで分類された住宅の種類を元に、住宅数の影響を考慮するため、延べ床面積で集計した値を用いた。同様の理由で選定した「住宅の構造別の棟数」は、東京都の平成28年度区部土地利用現況調査データで分類された建物構造の種類別に、それぞれの棟数を算出した。いずれも4次メッシュ当たりで算出した値を用いた。それぞれのデータ項目について、23区全体で集計したグラフや分布については、紙面の都合上、省略する。この中から、共線性が発生せず、各項目の中で、熱中症の発生に影響があると考えられる特徴的なものを抽出した（表1－2下線部）。これらを説明変数として、熱中症搬送者発生率を従属変数とする重回帰分析を行った。

表1－2 都市の構造や地域性の特徴を表す統計データ

データ項目		区分
人 口	年代別日合計滞在人口の割合	30-40代、50-60代、 <u>70-80代</u>
	年収別世帯数の割合	<u>年収300万円未満</u> 、 <u>年収300-500万円未満</u> 、 <u>年収500-700万円未満</u> 、 <u>年収700-1000万円未満</u> 、 <u>年収1000-1500万円未満</u> 、 <u>年収1500万円以上</u>
住 宅	築年数別の住宅数の割合	<u>1980年以前</u> 、1981-2000年、2001-2015年、2016-2018年
	住宅の種類別延べ床面積	<u>戸建て</u> 、 <u>マンション</u> 、 <u>アパート・団地</u> 、その他
	住宅の構造別棟数の割合	<u>耐火構造</u> 、木構造

3－3）人工排熱推定手法の開発

周辺建物からの人工的人為発熱を暑熱リスク評価に組み込んだ。まず対象地域の建物からの人工排熱の大部分を占める冷房による空調熱排出量の推定手法を開発した。地理情報、人流、気象データを用いて、各建物の5分間隔の人為発熱量を求める手法を開発した。この手法は、既存の推定手法（国土交通省、環境省，2004）を基に、研究課題の対象年としてCOVID-19パンデミック前である2019年の空調熱源設備の効率、負荷特性、気象データ等を更新したものである。図1－6に、開発した推定手法の計算フローを示す。人工排熱の推定は、空調熱源設備の構成、冷房需要サブモデルによる各建物の冷房需要の推定、空調設備サブモデルによる冷房によるエネルギー消費と人口排熱の計算の3つのステップで行われる。

空調熱源設備の構成では、2019年版GISデータの延床面積と建物用途に基づき、各建物の空調熱源機構成を設定する。この設定には建物用途ごとの単位延床面積あたりの熱源設備の冷房能力を求める曲線を用いた。対象の熱源設備は吸収式冷凍機（RHA）、空冷式電気ヒートポンプ（AHP）、個別分散型パッケージ空調機（VRF）と定義した。冷房用熱源機器の建物用途別構成比は、過去の調査データ（国土交通省、環境省，2004）から取得した。

また各建物用途に設定した基本開始・終了時刻を基に、人口流動データを用いて各歩道を時間帯別に通過する通勤者数を集計し、GISソフトを用いて各建物と最寄りの歩道を紐付け、対象時間帯に各建物を1日に通勤目的で通過する人数を算出し、非住宅建物の開始・終了時刻を設定した。次に、街区内の非住宅建物を病院、ホテル、オフィス、店舗、学校、レストラン、その他の7つの建物タイプに分類し、以下の式1－2を用いて各建物の5分間隔冷房需要を計算した。

空調設備サブモデルによる冷房によるエネルギー消費の計算では、建築物省エネ法の空調熱源機モデルに基づき、調査地域の各建物の時間別エネルギー消費量を算出するモデルを構築し、用いた。空調熱源機モデルは、

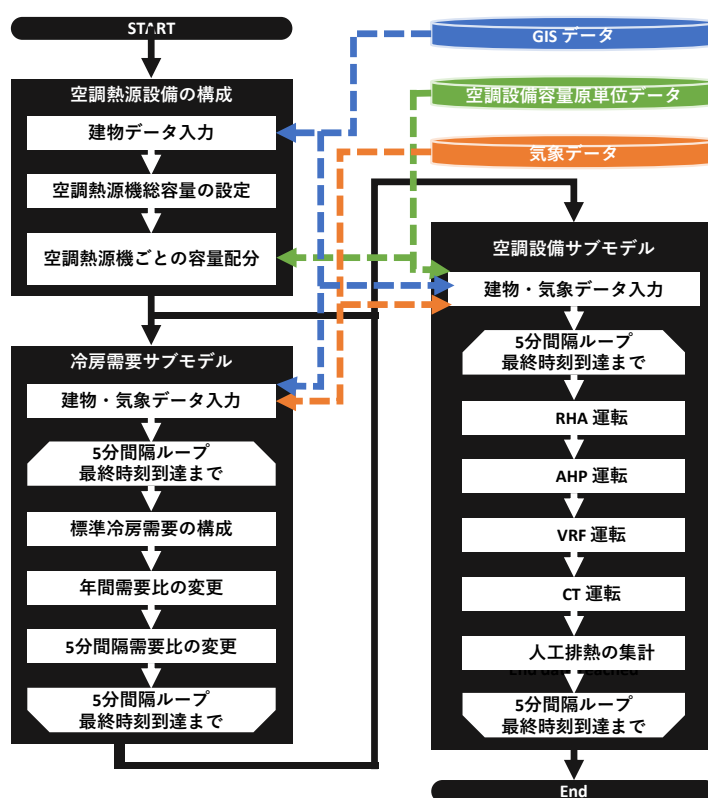


図1－6 冷房による人工排熱の計算フロー

まず式1-3を用いて、5分間隔の冷房需要に基づく各空調熱源機の負荷率を計算する。機器の運転時の定格能力は、冷却水温や外気温度によって増減するため、本計算モデルでは各熱源機種別の定格能力を刻々と変化させる特性として二次関数式を設定した。次に、熱源機種ごとに設定した負荷特性式に負荷率を入力し、計算結果に定格消費電力量を乗じることで、時間経過に伴う消費電力量を算出した(式1-4)。最後に、消費電力量を一次エネルギー消費量に換算し、ガス消費量と加算する(式1-5)。よってシステム一次エネルギーCOPも定格能力同様、冷却水温、給水温度、外気温度により増減する(式1-6)。

$$E_{Co(t)} = Ey_{Co} \cdot R_{Co(t)} / N_d \cdot A \cdot C(A) \cdot Ry \cdot R(temp) \quad (式1-2)$$

$E_{Co(t)}$: 冷房需要 (MJ)、 Ey_{Co} : 業種別年間冷房需要 (MJ/m²/年)、 $R_{Co(t)}$: 時間需要に対する年間冷房需要の割合、 N_d : 月別曜日数、 A : 建物の延べ床面積 (m²)、 $C(A)$: 延べ床面積による年間需要補正值、 Ry : 年間需要 (MJ)、 $R(temp)$: 外気温による冷房需要の変動係数

$$L_{l,i,t} = \frac{Q_{i,t}}{q_{i,rated} \times C_{q,correct} \times C_{q,cool,i,t}} \quad (式1-3)$$

$$E_{ele,i,t} \text{ or } E_{gas,i,t} = \frac{Q_{i,t} \times C_{p,correct}}{L_{e,i,rated} \times C_{p,load,i,t} \times C_{p,cool,i,t} \times C_{p,outlet,i,t}} \quad (式1-4)$$

$$E_{prim,t} = C_{prim} \times \sum_i E_{ele,i,t} + \sum_i E_{gas,i,t} \quad (式1-5)$$

$$COP_t = \frac{\sum_i Q_{i,t}}{E_{prim,t}} \quad (式1-6)$$

$L_{l,i,t}$: 時刻tにおける熱源機iの負荷率、 $Q_{i,t}$: 時刻tにおける冷房需要 (MJ)、 $q_{i,rated}$: 熱源機iの定格冷房能力 (MJ)、 $C_{q,correct}$: 熱源機の能力補正係数 (=0.95)、 $C_{q,cool,i,t}$: 熱源機iの時刻tにおける外気温度/冷水温度による能力特性、 $E_{ele,i,t}$: 熱源機iの時刻tにおける電力消費量 (MJ)、 $E_{gas,i,t}$: 熱源機iの時刻tにおけるガス消費量 (MJ)、 $C_{p,correct}$: 熱源機のエネルギー消費量補正係数 (=1.2)、 $L_{e,i,rated}$: 熱源機iの定格冷房効率 (AHP=3.7、RHA=1.08、VRF=2.67)、 $C_{p,load,i,t}$: 時刻tにおける熱源機iの負荷特性、 $C_{p,cool,i,t}$: 時刻tにおける熱源機iの外気温度/冷水温度による入力特性、 $C_{p,outlet,i,t}$: 時刻tにおける熱源機iの冷媒温度特性、 $E_{prim,t}$: 時刻tにおける一次エネルギー消費量 (MJ)、 C_{prim} : 一次エネルギー変換係数 (=2.71) [-]、 COP_t : 時刻tにおけるシステム一次エネルギーCOP [-]

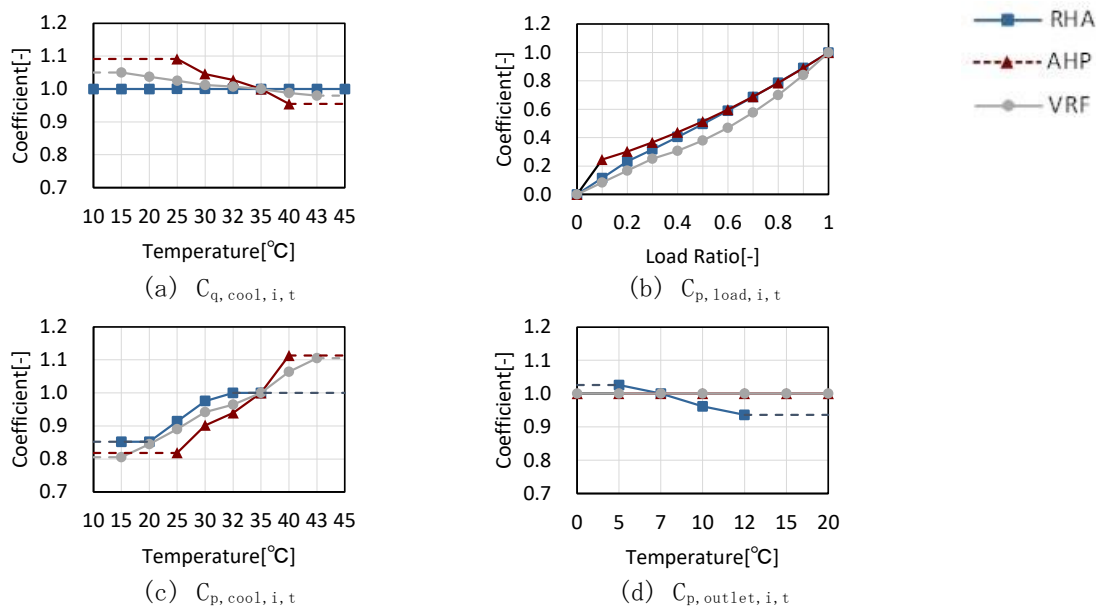


図1-7 各熱源機的能力特性式

図1-7 (a) に外気温度または冷水温度による熱源機的能力特性を示す。定格容量、入力、冷媒温度特性式には幅があり、各図に破線で示すように、範囲外の値は範囲端で一定となる。定格容量係数は温度が高くなるにつれて小さくなっている。図1-7 (b) に負荷特性を示す。負荷率が低下するにつれて、消費電力量の割合も低下しているが、熱源機器によって低下傾向が異なる。図1-7 (c) は、外気温または冷水温度による入力特性である。温度上昇に伴い、定格入力特性も上昇している。図1-7 (d) に熱源機の冷媒温度特性を示す。RHAは冷媒温度を下げることで特性が向上する一方でAHPとVRFは冷媒温度が変化しても特性は一定である。計算では、冷媒温度は建築物省エネ法に従い7°Cとした。システム一次エネルギー性能係数 (COP) は、建物全体の冷房需要を冷媒温度で割ったものである。

空調によって建物外部に排出される人工排熱量は、各建物の空調エネルギー消費量から顕熱と潜熱に分けて計算した。図1-8に空調熱源の熱輸送フローを示す。計算では、AHPとVRFの排熱は入力電力と冷房需要から得られるため、顕熱として計算した(式1-7)。RHAについては、排ガスからの熱量をボイラーの燃焼効率から推定し、顕熱と潜熱に分けた(式1-8、1-9)。RHAから冷却塔への移動熱は、過去の研究(足永ら、1999)に基づく冷却塔モデルを用いて顕熱と潜熱に分けて計算した。本研究課題における冷却塔はすべて開放型の向流冷却塔であり、冷却塔の出入口水温は、冷却負荷の変化に対応した循環水量、空気流量、大気条件に基づいて計算した。循環水量は空調熱源機の能力に応じて各建物に設定し、冷却塔の風量も循環水量と水空比に基づいて各建物に設定した。各建物の冷却塔特性は、日本工業規格に準拠したチェビシェフの式に基づく計算結果を用いて設定した。冷却塔からの熱損失を定量化するため、冷却水の入口と出口の温度差と出口空気の比エンタルピーを式1-10から求めた。さらに、 $T \cdot h$ 線図上に運転線を引き、式1-11を用いて U/N 値を算出した。その後、 U/N 値に基づいて反復計算を行い、設計値を達成する冷却水の入口/出口温度の組み合わせを求めた。顕熱と潜熱の内訳は、式1-12と式1-13から求めた。

また地域冷暖房における人工排熱量の緩和効果も計算可能にするため、熱供給配管モデル(図1-9)地域熱供給時における熱供給配管からの熱損失を計算モデルに組み込んだ。以下の式より管内の流体から外部への熱損失量 Q を算出した。なお、配管内側の表面熱伝達率はヌッセルト数、レイノルズ数の公式およびディタス・ベルターの式(式1-14～式1-18)を用いて求めた。

$$Q_{s,i,t} = Q_{i,t} + E_{ele,i,t} \quad (式1-7)$$

$$Q_{s,i,t} = \delta \times (1 - \zeta) \times E_{gas,i,t} \quad (式1-8)$$

$$Q_{l,i,t} = (1 - \delta) \times (1 - \zeta) \times E_{gas,i,t} \quad (式1-9)$$

$$(Q_{i,t} + \zeta \times E_{gas,i,t}) = G(h_{G,out,t} - h_{G,in,t}) = C_l L(T_{l,in,t} - T_{l,out,t}) \quad (式1-10)$$

$$U/N = \int_{T_{l,out,t}}^{T_{l,in,t}} \frac{C_l dT}{h_s - h_l} \quad (式1-11)$$

$$Q_{s,i,t} = G(C_{G,out,t}T_{G,out,t} - C_{G,in,t}T_{G,in,t}) \quad (式1-12)$$

$$Q_{l,i,t} = (Q_{i,t} + \zeta \times E_{gas,i,t}) - Q_{s,i,t} \quad (式1-13)$$

$Q_{s,i,t}$: 時刻 t における熱源機 i の負荷率[-]、 $Q_{i,t}$: 時刻 t における冷房需要[MJ]、 $E_{ele,i,t}$: 時刻 t における熱源機 i の電力消費量[MJ]、 $Q_{l,i,t}$: 時刻 t における熱源機 i の負荷率[-]、 ζ : 冷却塔負荷率(=0.83) [-]、 δ : 燃焼排ガス中の顕熱割合(=0.54) [-]、 $E_{gas,i,t}$: 時刻 t における熱源機器 i のガス消費量[MJ]、 G : 冷却塔風量[kg/h]、 $h_{G,out,t}$: 時刻 t における冷却塔出口空気の比エンタルピー[kJ/kg(DA)]、 $h_{G,in,t}$: 時刻 t における冷却塔入口空気の比エンタルピー[kJ/kg(DA)]、 C_l : 水の比熱(=4.217) [kJ/kg・K]、 L : 冷却塔水量[kg/h]、 $T_{l,in,t}$: 時刻 t における冷却塔入口水の温度[°C]、 $T_{l,out,t}$: 時刻 t における冷却塔出口水の温度[°C]である、 U/N : トランスファーユニット数[-]、 h_s : 運転ラインの比エンタルピー[kJ/kg(DA)]、 h_l : 飽和比エンタルピー[kJ/kg(DA)]、 $C_{G,out,t}$: 時刻 t における冷却塔出口の湿り空気の比熱[kJ/kg・K]、 $T_{G,out,t}$: 時刻 t における冷却塔出口空気の温度[°C]、 $C_{G,in,t}$: 時刻 t における冷却塔入口の湿り空気の比熱[kJ/kg・K]、 $T_{G,in,t}$: 時刻 t における冷却塔入口空気の温度[°C]

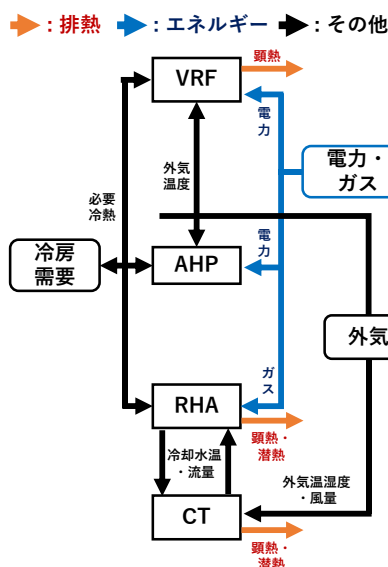


図1-8 冷房による人工排熱の計算フロー

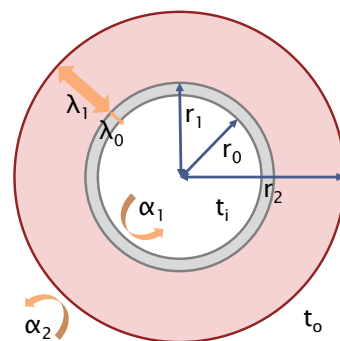


図1-9 熱供給配管モデル

$$Q = \frac{t_i - t_o}{R} \quad (\text{式 1 - 1 4})$$

$$R = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r_0 \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_0} \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) + \frac{1}{\lambda_1} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{r_2 \alpha_2} \right\} \quad (\text{式 1 - 1 5})$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot k}{d} \quad (\text{式 1 - 1 6})$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (\text{式 1 - 1 7})$$

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (\text{式 1 - 1 8})$$

r_0 : 円管の内半径[m], r_1 : 円管の外半径[m], r_2 : 保温材の外半径[m], λ_0 : 円管の熱伝導率[W/mK], λ_1 : 保温材の熱伝導率[W/mK], α_1 : 配管内側の表面熱伝達率[W/m²K], α_2 : 配管外側の表面熱伝達率[W/m²K], t_i : 配管内温度[°C], t_o : 周囲温度[°C], R : 配管の貫流熱抵抗[mK/W], Q : 単位長さ当たりの配管からの熱負荷[W/m], Nu : ヌッセルト数[-], k : 熱伝導率[W/mK], d : 円管の直径(=水力直径)[m], Re : レイノルズ数[-], Pr : プラントル数[-], n : ディタス・ペルターの数におけるプラントル数の乗数[-], V : 流速 [m/s], ν : 動粘性係数 [m²/s]

対象地域における交通による人工排熱量も推定した。道路からの交通排熱量を推定するため、対象地域の幹線道路と非幹線道路を集計し、2019年8月における交通排熱量を推定した。道路交通調査の対象道路を幹線道路とし、それ以外はすべて非幹線道路とした。まず交通量の推定は道路交通調査から各地域の幹線道路走行量を求め、非幹線道路は東京都調査から走行量を求めた。排熱量の推定は走行量に燃料原単位を乗じて燃料消費量を求め、燃料別発熱原単位から顕熱潜熱に熱量換算した。

4. サブテーマ1 結果及び考察

サブテーマ1 では研究開発内容 3-1) ~ 3-3) に対応し、以下の結果及び考察を得た。

4-1) 人口流動データを用いた人々の移動の推定と暑さ指数との関係

推計した移動手段別の人口を図 1-10 に示す。休日は、平日よりも就労者が少ないため、対象エリアの主に駅周辺における人口の集中が少なかった。しかし、住宅地や観光地の商店街では、休日でも歩行者数は減少しなかった。「自動車」の分布では、平日も休日と同じ幹線道路で交通量が多く、「鉄道」の分布では、品川-田町間、大崎-五反田間で平日、休日ともに交通量が多かった。図 1-11 を見ると、平日の通勤時間帯は、「鉄道」「徒歩」「自動車」のピークが8時と17時であり、「徒歩」は昼休みの12時にピークがみられた。「滞留」にはピークは見られず、昼間に向けて徐々に増加する傾向であった。休日は「鉄道」「徒歩」「自動車」とも昼間に向けて増加し、12時頃と17時頃に緩やかなピークが見られた。「滞留」の日中の増加は、休日よりも平日の方が小さい傾向であった。

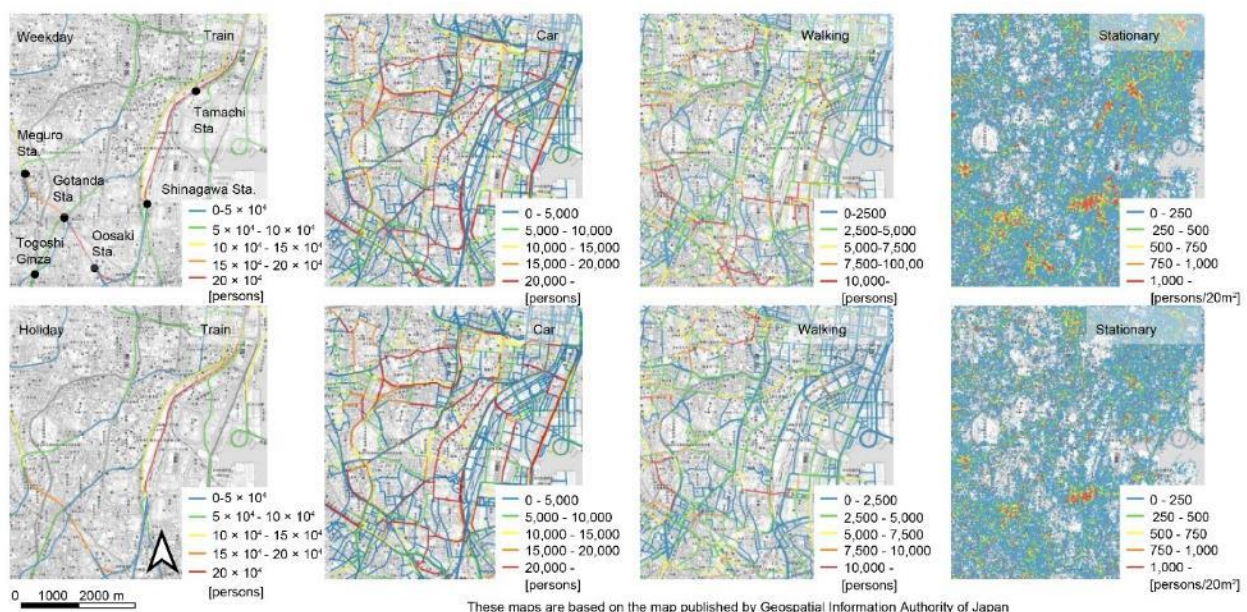


図 1-10 平日と休日の交通手段別の総人口分布（月平均の1日の総数）

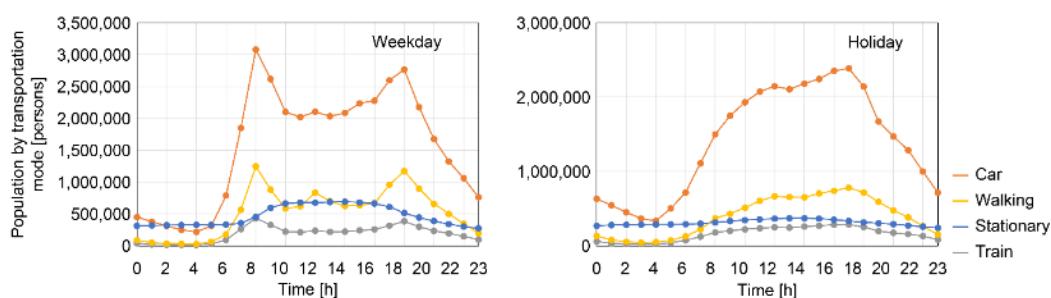


図 1-1-1 平日と休日の交通手段別人口の日変化（月平均）

以上のような特徴の交通手段別人口の動きについて、環境省と気象庁がデータを提供している東京都の代表的な地点における暑さ指数（WBGT）の実測値との関係を分析した。6時～21時に1mm以上の降雨があった日は除外した。また、平日・休日とも同じ時間帯に同じ行動をすると仮定して分析したため、夏季休暇取得者が多い8月11日～16日は除外した。ここでは、各移動手段とも1時間滞在を1人、30分滞在を0.5人というように、対象メッシュに存する連続時間に応じて人数に重みづけをして集計した値を用いた。各交通手段の1時間あたりの人口を、敷地全体の1時間あたりの総人口で割り、0から100までの比率で比較することで、各日時のデータを平準化した。交通手段別人口の比率とWBGTとの相関は、平日と休日それぞれにおいて、スピアマンの相関係数を用いて1時間ごとに求めた。

休日の結果では、「鉄道」と「自動車」の人口はどの時間帯でも有意な相関は見られなかったが、徒歩と滞在は特定の時間帯で有意な相関が見られた。平日の結果では、どの交通手段とも有意な相関はほぼ見られなかった。この平日と休日の違いは、多くの先行研究が示しているように、休日の余暇活動が平日よりも天候の影響を受けやすいことを示している。休日の電車と自動車の人口に相関がないのは、本研究で使用した携帯電話の位置情報データセットが、対象地域を短時間で高速に移動する人の動きを捉えることができず、精度が低かったことが影響していると考えられる。したがって、本研究では休日の「徒歩」と「滞在」の人々のみに着目した。

有意な相関が認められた時間帯における、暑さ指数（WBGT）と「徒歩」「滞在」の割合との関係を図1-1-2に示す。「徒歩」はすべての時間帯で暑さ指数（WBGT）と負の相関を示したが、「滞在」は正の相関を示した。WBGTが同じレベルでも、「徒歩」だけに注目すると、20時は8時の3倍以上、14時は13時の2倍以上の傾きであった。天候が人々の活動に与える影響は、地域特性や天候の種類によって異なるが（Böckerら、2019）、東京都心部の暑い夏における日本人を対象とした本研究の結果は、次のことを示唆している。WBGT暑さ指数（WBGT）が高くなると、人々は歩くのをやめ滞留する傾向がある。同じWBGTレベルであっても、暑さが歩行者数の減少に及ぼす影響は、朝よりも夜の方が大きい。これは、昼間の暑さの記憶と実際の体内蓄熱が、夜間の外出行動に影響している可能性を示している。また、昼間が暑い日は外出者が減るため、夜間に帰宅する人も減る結果、より夜間の歩行者が減少する要因となる。これらの結果は、既往研究（Melnikovら、2022）が示すように、人は外部からの熱の刺激に対し、それを避けるように行動パターンを変化させることが、人口流動データでも観測されたとと言える。

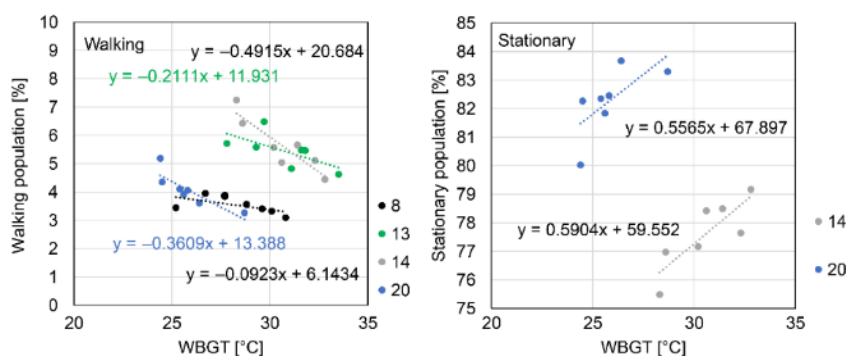


図 1-1-2 歩行者と滞在者の割合と暑さ指数（WBGT）の関係（休日）

次に、対象地域の中で、特にどのようなエリアで人々の暑熱に対する適応行動がとられやすいのかを調べるため、図1-1-2の時間帯（休日）を対象に、100mメッシュ単位の土地利用別（全18種別）の人数とWBGTとの関係をみた。「徒歩」「滞在」の割合が0.5未満のエリアは除外した。

「滞在」について、14時では「高層建物」と「公園・緑地」で、滞在者の割合とWBGTに有意な確率で相関がみられた。「高層建物」では0.857の正の相関があり、「公園・緑地」では-0.714の負の相関であり、WBGTが高いほど高層ビル街で滞留する人が増え、公園や緑地では滞留人口が減少する傾向がみられた。20時には土地利用ごとの特徴はみられなかった。

「徒歩」の結果（図1-13）では、時間帯によって有意な相関がみられた地域が異なったが、いずれも負の相関であった。8時と20時で相関があった「高層建物」は、住宅地や市街地であり、商業ビル、業務ビル、住宅が密集し、4階建て以上の建物で構成されている。そのため、観光など休日の外出者が主に減少した可能性がある。20時台のみで相関がみられた「低層建物」は、3階建て以下の住宅が密集して分布している地域である。このことは、夜間の外出だけでなく、住宅地へ帰宅する人も減ることを示しており、図1-12で示したように、暑さ指数（WBGT）に対する歩行者数の減少感度が朝より夜間の方が高くなることを裏付けていると言える。13時と14時に相関を示した「低層建物（住宅地）」は、3階建て以下の住宅が密集している地域である。したがって、WBGTが高い日中は、人が住宅から出なくなることを示している。14時では「道路」でも相関が見られたが、13時では見られなかった。このことは、図1-12で示したように、暑さ指数（WBGT）に対する歩行者数の減少感度が13時より14時の方が高い結果と合わせると、13時は、昼食をとるなどの目的があれば、歩行者数は暑さの影響を受けにくく、14時の方が暑さを避ける適応行動が見られやすいと言える。また、WBGTの上昇による外出控えの影響が顕著であった「低層建物（密集地）」では、建物が低層であるため建物による日陰がなく、歩行空間が日射にさらされやすい。したがって、住宅の性能や設備による暑熱対策が不十分な場合は、クーリングシェルター等への避難も促進されているが、Lindbergら（2016）等が示すように、日陰がまばらな地域では、涼しい場所への移動経路やその経路への暑熱対策も重要な課題と言える。

以上の人口流動データの分析から得た暑熱曝露の実態を通じて、以下のような暑さ対策が重要と考える。平日は暑くても徒歩で通勤する人が多いため、就労者が最も利用しやすい場所や時間帯に、日陰やミストを設置することで、暑熱対策の効果を多くの人々が受けられる。休日は暑さに適応した行動をとりやすい。したがって、ウォーカブルな都市という観点からは、観光客が朝晩に暑くても外出しやすい経路を増やすこと、熱中症予防の観点からは、住宅で暑熱対策が不十分な場合、クーリングシェルターまでの経路や時間帯も合わせて情報提供する等、より具体的な現地の暑熱環境に合わせて対策を検討する必要がある。

4-2）人口流動データと熱中症搬送者の実績データを用いた熱的脆弱性に関する検討

東京23区において、500mメッシュごとに算出した熱中症搬送者発生率を従属変数とし、世帯所得、居住者属性、都市の構造や地域性の特徴を表す各種統計データを説明変数とする重回帰分析を行い、熱中症搬送者発生率へ影響する都市の構造や地域性の特徴を比較した。重回帰分析は、SPSS Statistics 28.0を使用した。熱中症搬送者発生率は、多くのメッシュで0であるため、正規化するために対数へ変換した値を使用した。住宅系の熱中症搬送者発生率の結果を表1-3に示す。いずれの説明変数も有意確率はほぼ1%以下であった。説明変数の熱中症搬送者発生率への寄与度を比較するため、標準化係数ベータの値をみると、「戸建て住宅の延べ床面積」が最も影響している。「年収300万円未満世帯数の割合」や「70-80代の日合計滞留人口の割合」も発生率に対して正の影響がある。「年収1500万円以上世帯数の割合」と「耐火構造（RC造）住宅棟数の割合」は、他のパラメータに比べるとわずかではあるが負の影響がある。住宅の種類で比較すると、マンションに比べると戸建て住宅の方が寄与率が高い。年収別の世帯数では、金額が低いほど寄与率が高い。以上から、住宅系の熱中症搬送者発生率は、戸建て住宅が密集し、70-80代の高齢者が多く、世帯収入が低く、住宅の築年数が古い地域では、熱中症搬送者発生率が増加し、世帯年収が高くRC住宅棟数の割合が多い地域では減少すると言え、東京都監察医務院の所見にある、高齢者がエアコン使用のない高温の屋内で発見される環境にも説明が合う。

次に、道路等屋外系の熱中症搬送者発生率についても同様のパラメータを説明変数として重回帰分析を行ったが、住宅系の結果に比べると、調整済みR2乗の値が0.313から0.110と減少した。また、複数のパラメータで有意性も認められず、道路等屋外系は、高齢者の分布や住宅の性能では説明ができず、

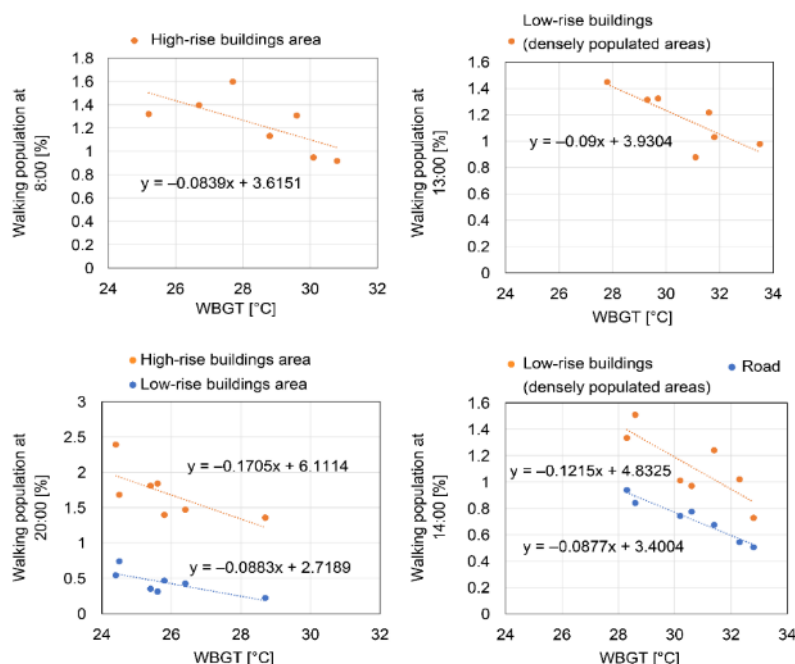


図1-13 土地利用別の「徒歩」の割合と暑さ指数（WBGT）の関係

別の要因も影響していると考えられる。そこで、道路等屋外系における熱中症搬送者発生率については、搬送者の活動状況も大きく影響するが、住宅系に比べて気象の影響を直接受けやすいと考え、地上付近における日当たりや風通し等の地域の微気候に影響を与える要素として、土地被覆と建築物の密度に影響するパラメータを選定し、重回帰分析を行った（表1-4）。その結果、調整済みR2乗は0.242へ上昇した。「建築面積」が最も寄与し「延べ床面積」は負の寄与をしたことから、低層の建物が密集する地域において、「道路面積」や「自然被覆面積」が多く占める開けた場所で、搬送者の発生率が増加すると言える。また寄与率は小さいが「緑被率」が高いほど屋外での発生率は減少した。「延べ床面積」が負に寄与することについては、容積率が大きな建物は、建物周辺で建物の影になりやすいことや、商業施設等も多く、室内で休憩できる場所がある等から、屋外での発生率が減少することが考えられる。その他、建築物の用途が与える影響についても検討した結果、調整済みR2乗の値が更に上昇した。大規模な商業施設の件数が多い地域ほど、発生率は減少したが、その他の住宅以外の建物用途においては、いずれもわずかではあるが、正の寄与をしていることから、外出機会が多い地域ほど発生率が増加する可能性がある。

以上、東京23区全域を対象に、500mメッシュ毎の熱中症搬送者の実績データを従属変数とし、都市の暑熱リスクを評価する回帰式を作成し、住宅内と屋外とでは、脆弱となる項目が異なるため、それぞれに対応した対策が必要であることを示した。

表1-3 住宅系で発生する熱中症搬送者の重回帰分析の結果

説明変数	非標準化係数	標準化係数ベータ	有意確率 P	共線性の統計量VIF
70-80代の日合計滞留人口の割合[-]	1.357	0.161	<0.001	2.487
年収300万円未満世帯数の割合[-]	1.321	0.186	<0.001	3.238
年収1500万円以上世帯数の割合[-]	-1.242	-0.073	0.011	2.701
1980年以前の住宅数の割合[-]	0.649	0.075	0.004	2.161
戸建て住宅の延べ床面積[m ²]	4.280E-06	0.321	<0.001	1.601
マンションの延べ床面積[m ²]	1.284E-06	0.241	<0.001	1.324
RC住宅棟数の割合[-]	-0.220	-0.087	<0.001	1.816

F値：145.737、有意確率：<0.001、調整済みR2乗：0.313

表1-4 道路等屋外系で発生する熱中症搬送者の重回帰分析の結果

説明変数		非標準化係数	標準化係数ベータ	有意確率 P	共線性の統計量VIF
土地被覆	道路面積[m2]	7.054E-06	0.252	<0.001	1.903
	空地面積[m2]	3.268E-06	0.251	<0.001	1.490
	緑被率[-]	-0.219	-0.058	0.002	1.138
建築物の密度	建築面積[m2]	9.465E-06	0.543	<0.001	2.521
	延べ床面積[m2]	-6.767E-07	-0.264	<0.001	1.886

F値：160.259、有意確率：<0.001、調整済みR2乗：0.242

4-3) 人工排熱の推定および分析

対象地域における対象年である2019年夏期の人工排熱量を推定しサブテーマ2へ渡した。ここでは、3大副都心に含まれる高密度商業地域のため空調排熱等が大きいと考えられる西新宿地域の人口排熱推定結果を記述する。まず建物の空調による人工排熱に関して、表1-5に西新宿2丁目地域の概要を、図1-14に建物用途別延床面積を示す。オフィス、店舗、ホテルが中心の商業地域であるため、住宅の割合が少ない。図1-15は調査地域の地図であり、大規模な建物が多い。

各建物の空調熱源機器構成を設定することで、西新宿2丁目地域では、RHAやAHPなどの中央熱源機器の能力が地域全体の約90%であることが確認された(図1-16)。地域全体の熱源冷房能力の合計は133MW (=479GJ/h)であった。

表 1 - 5 地域概要

人口	62 人
世帯数	36世帯
地域面積	338,255 m ²
総延床面積	1485,593 m ²
容積率	439.19%

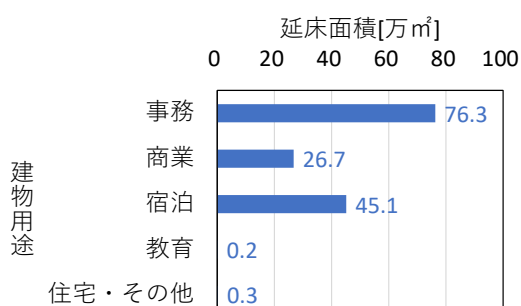


図 1 - 1 4 建物用途別の延床面積

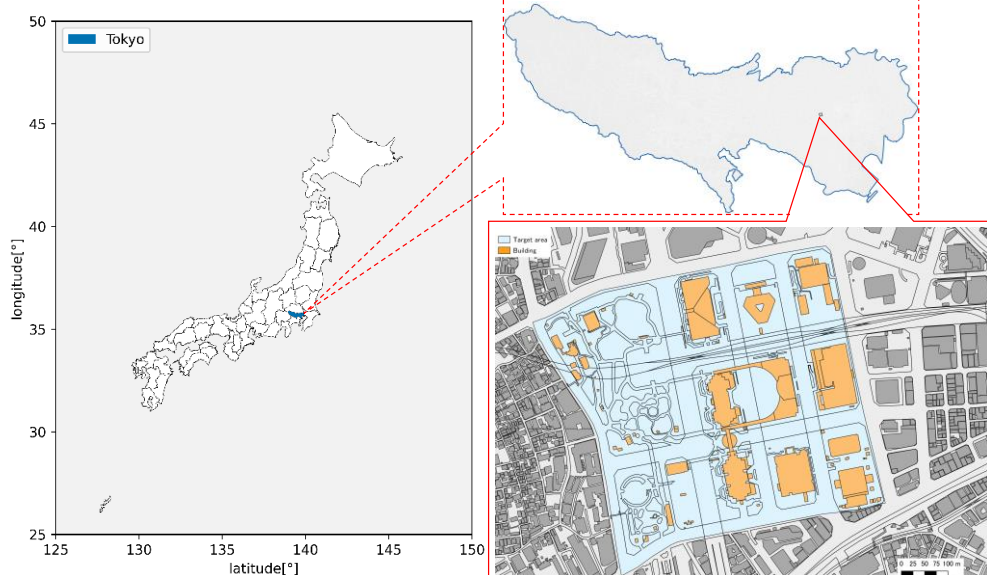


図 1 - 1 5 対象敷地の地図

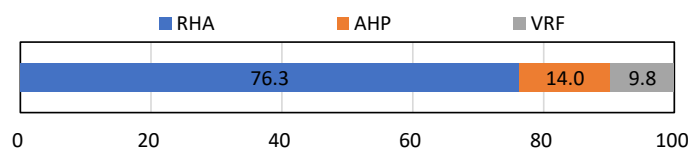


図 1 - 1 6 西新宿2丁目地区の冷房熱源機器の構成

人流データに基づき、対象地域内の各建物の開始・終了時刻を設定した結果、開始・終了時刻が基本時刻より1～2時間程度前後する非住宅建築物が存在することを確認した。図 1 - 1 7 は、地域全体における5分当たりの冷房需要の推定結果である。平日と休日、昼間と夜間で大きな差があることが確認された。図 1 - 1 8 に一次エネルギー消費量の推定結果を同様に示す。平日と休日、日中と夜間で大きな差があることが確認された。平均一次エネルギー消費量は5.7 TJ/日であった。一次エネルギーCOPは全計算期間で0.79であった。図 1 - 1 9 に顕熱と潜熱の時間変化を5分当たりで同様に示す。夏の日中は79 GJ/hの顕熱が発生した。平日の1日の顕熱の合計は11 TJ/日であった。空調熱源機および関連機器から発生する潜熱は、日中が355 GJ/hであり、日中の総排熱量の約82%を占めている。

開発した空調による人工排熱推定手法の精度を検証するため、本計算手法による計算値と既存の推定手法（国土交通省、環境省 2004）による推定値との比較を行った。計算値は、8月1日から8月31日までの西新宿2丁目地域の各建物の5分間隔の計算結果を地域全体の1時間毎の値にまとめ、各時刻の月平均値とした。一方、既存の推定手法による推定値は、既存推定手法の開発における8月の時間別空調排熱原単位に、西新宿2丁目地域における各建物のデータを建物用途別・延床面積別に乘じ、総面積で足し合わせた値である。図 1 - 2 0 にそれぞれの人工排熱の推定結果の比較を示す。図からは日中の人工排熱量においてはオーダーが異なるほど大きな違いは見られなかった。昼間は既存の推定手法に比べ、空調熱源機器の性能向上が小さい理由であり、夜間は残業時間が延長されたため、従来法より大きい。

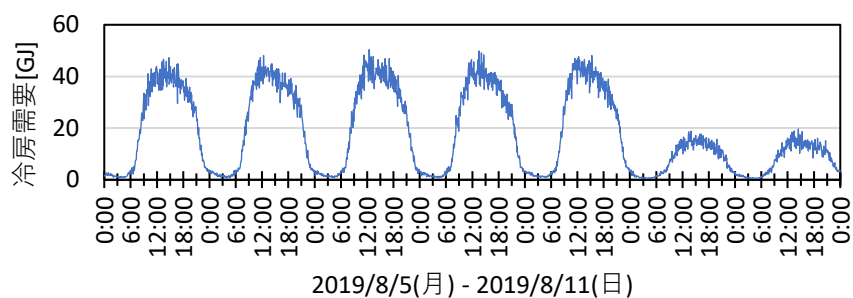


図 1 - 1 7 代表的な週の5分間隔の冷房需要

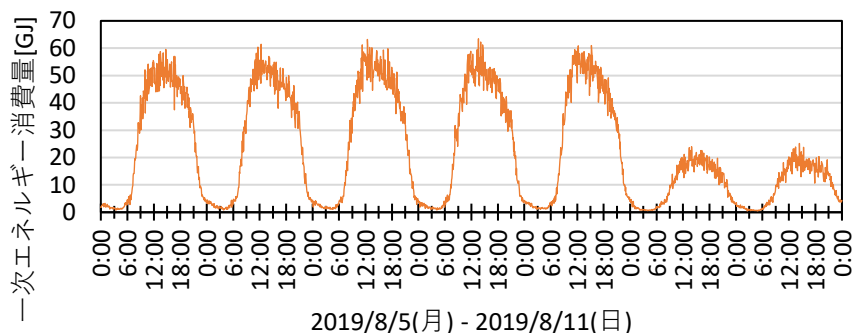


図 1 - 1 8 代表的な週の5分間隔の空調一次エネルギー消費量

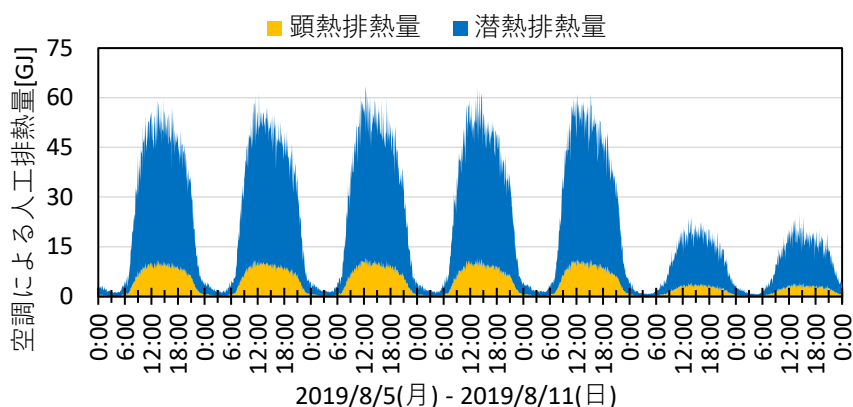


図 1 - 1 9 代表的な1週間における5分間隔の人為的熱量

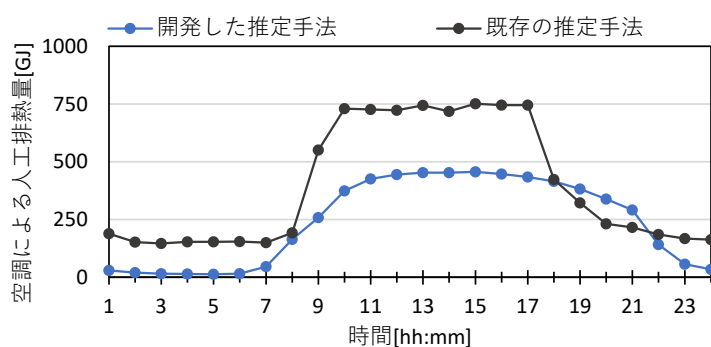


図 1 - 2 0 今回開発した手法と従来の手法による人為起源熱量の比較

人為的熱利用における建物利用の内訳を示すため、西新宿二丁目地域の各建物の8月1日から8月31日までの5分間区間計算値を月平均5分間区間値に平均し、建物利用ごとに加算した。図 1 - 2 1 にビル用途の時間変化を5分当たりの地域総量として示す。昼間は、オフィスの排熱量が約122GJ/hと最も多く、21時25分から22時15分までは商業ビルの排熱量が最も多く、22時20分以降はホテルの排熱量が多い。午前0時から午後6時までは、人為起源の熱はほとんどホテルからのみ発生し、1日の値の3%を占めた。このように、最も排熱を発生する建物用途は時間帯によって異なる。

次に、交通による人工排熱に関して、西新宿2丁目の交通排熱量を推定した。図 1 - 2 2 に対象地域に

おける時刻別交通排熱量を5分当たりで示す。西新宿2丁目地域では非幹線道路の交通排熱量が大きい。これは西新宿地域の道路割合(幹線道路:9万㎡、非幹線道路:150万㎡)の差が要因と判断した。

西新宿2丁目の地域を対象に、交通による推定排熱量とこれまでに作成した手法で推定した空調排熱量との8月の平均時刻別排熱量(GJ/時)を比較した。朝6時～8時台は交通による排熱量が空調を上回るが、それ以外の時間帯は空調による排熱量が交通を上回ることを確認した。日合計排熱量は空調が約9.4TJ/日と交通の約4.9TJ/日の1.8倍発生していることを確認した(図1-23)。

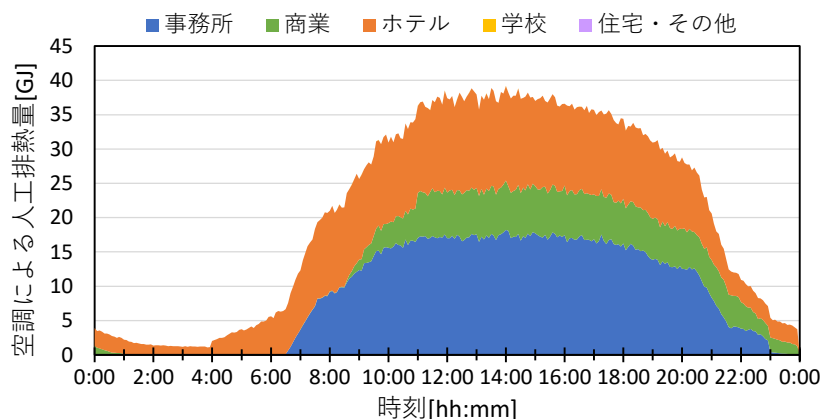


図1-21 月平均5分間隔の空調人工排熱における建物使用の内訳

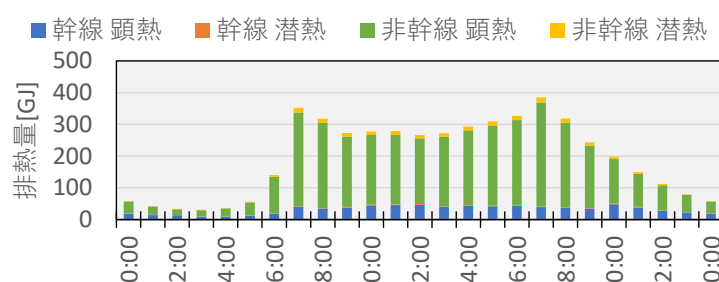


図1-22 月平均5分間隔の交通人工排熱における内訳

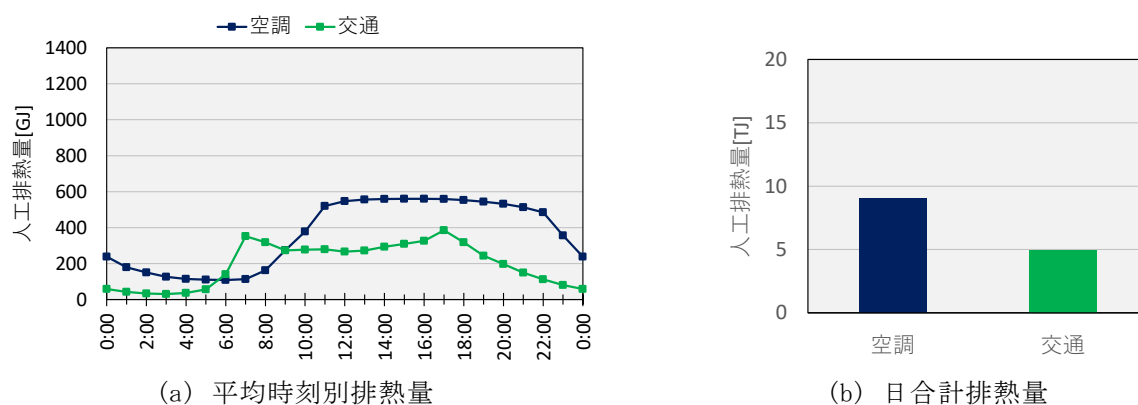


図1-23 8月の平均時刻別排熱量の比較

さらに地域冷暖房設備導入による空調排熱の抑制効果を推定した。本課題の対象地域と実際の地熱供給地域が一致している御茶ノ水地域(神田駿河台地域)の空調排熱削減効果を推定した。需要家建物は12棟(総延床面積:23.1万㎡)である。地域冷暖房の熱源構成を表1-6に示す。

需要家建物に対して各建物で冷房した場合(個別建物ケース)と地冷で冷房した場合(地域冷暖房ケース)の8月代表日における時刻別人工排熱量を比較した(図1-24)。ピーク時刻(13:00)の排熱量については、地域冷暖房ケースが34.7GJと個別建物ケースの40.0GJより約14%削減している。地域冷暖房ケースの日合計としては全熱が個別建物ケースより約14%削減した。顕熱が個別建物ケースより約53%削減、潜熱は個別建物ケースより約60%増加した。これらから、需要集約による冷房効率の向上効果が配管熱損失を上回ったと判断した。

表 1－6 地域冷暖房の熱源構成

熱源設備	冷却能力 台数	
	[MJ/h]	[台]
第1プラント	水ヒートポンプ（熱回収型）	1,320 2
	空気熱源ヒートポンプ	1,710 8
	電動ターボ冷凍機	6,329 4
第2プラント	空気熱源ヒートポンプ	1,542 8

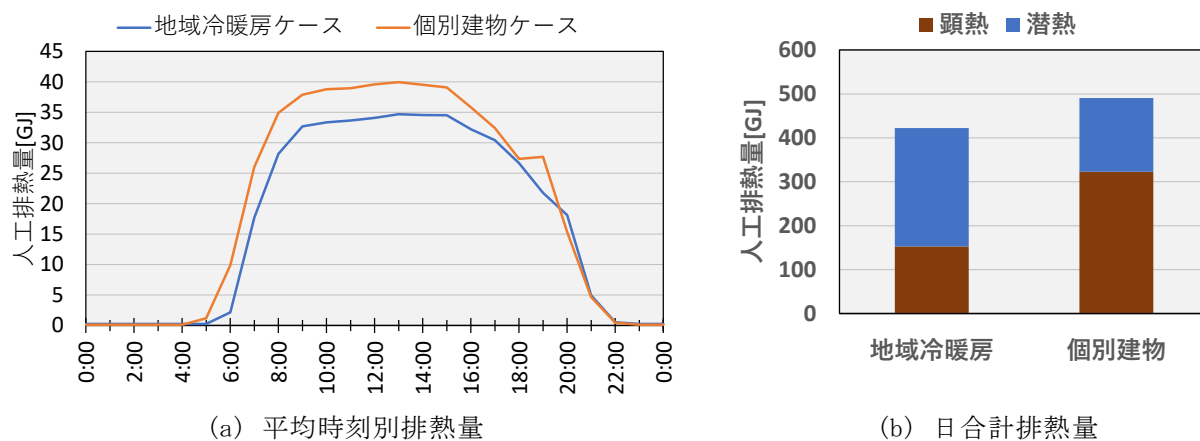


図 1－2 4 地域冷暖房の導入効果の推定

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

サブテーマ1の目標は、人口流動データを用いて、暑熱暴露、熱的脆弱性に関する分析および各種統計資料の統合化を行い、得られた情報をサブテーマ2に提供することであった。具体的な目標は次の二つであり、（1）人口流動データを用いて、対象地域における人の流入、流出と地域内の移動に関わる人の挙動を追跡し、屋外における滞在人数の密度や移動時間、移動手段等に分類し、暑熱暴露の実態を定量的に評価すること。（2）人口流動データに加え、高齢者や低所得者の割合などの関連情報を様々なソースから抽出し、各種統計資料を統合化するロジックを構築することにより、都市の暑熱リスク評価において熱的脆弱性を適切に反映することであった。

これらの目標に対し目標どおりの成果をあげた。人口流動データを取得し、人々の暑熱暴露の実態や、それらに起因する人工排熱等について各種分析を行い、得られた情報をサブテーマ2へ提供した。具体的には以下の通りである。

目標（1）に対しては、都心の開発地域を対象に、携帯電話の位置情報から取得された人口流動データを用いて、人々の移動の挙動を、鉄道、自動車、徒歩、滞在に分類し、暑さ指数との関係を分析することで、暑熱暴露の実態を定量的に評価し、休日に比べ平日の歩行者の方が暑熱に曝露しやすいことを明らかにした。目標（2）に対しては、東京23区全域を対象に、500mメッシュ毎の熱中症搬送者の実績データを従属変数とし、世帯所得、居住者属性、都市の構造や地域性の特徴を表す各種統計データを説明変数とする重回帰分析を行い、都市の暑熱リスクを評価する回帰式を作成し、住宅内と屋外等、搬送される場合により説明変数が異なることを明らかにした。

Ⅱ－２ サブテーマ２「温熱シミュレータによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」

〔サブテーマ２要旨〕

サブテーマ２では街区の伝熱や風の流れ、樹木効果などを数理モデルで統合し、暑さ指数（WBGT）の状況を数値予測する「温熱シミュレータ」を開発した。アメダス観測値や風洞実験データなどを使ってモデル検証を行い良好な結果を得た。さらに、温熱シミュレータを実際の都市街区に適用し、都市街区内の温湿度、放射、風速を超高解像度で予測することにより、暑さ指数（WBGT）の実態解明を行い、サブテーマ１の情報と合わせて暑熱リスクの評価に取り組んだものである。

１． サブテーマ２研究開発目的

サブテーマ２では、暑熱ハザードとして街なかの暑さ指数（WBGT）を数値予測する温熱シミュレータの開発を行い、サブテーマ１の暴露、脆弱性の情報と合わせて暑熱リスクを評価する手法を開発することを研究開発目的とする。

２． サブテーマ２研究目標

サブテーマ２	「温熱シミュレータによるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究」
サブテーマ２実施機関	建築研究所、東京都環境科学研究所
サブテーマ２目標	サブテーマ２では、都市街区内の温湿度、放射、風速を超高解像度で予測する温熱シミュレータを開発し、それを用いて実際の都市を対象にして暑熱ハザードを定量化する。さらに、サブテーマ１から提供される情報と合わせて、地域総体の暑熱リスクの低減方策について取りまとめ、その結果を、東京都等の地域気候変動適応計画等における暑熱対策推進のための科学的エビデンスとして提供する。そのために、温熱シミュレータは下記の性能を有することとする。 （１）数値シミュレーションにおいては、各種数理モデルを適切に選択、組み合わせた先進性を有し、暑熱ハザードの時空間分布の再現性、計算精度を確保している。 （２）シミュレーション及び解析システムは、建物や道路の配置を判別可能な超高分解能メッシュを使用可能であるように適切に構築され、自治体等の環境行政にとって実効性を伴う研究情報を提供できる。

３． サブテーマ２研究開発内容

サブテーマ２の研究開発内容は主に以下の３点である。

（１） 温熱シミュレータの基本設計

CFD（数値流体力学）のRANSモデル（乱流エネルギーと乱流散逸率の２つの特性方程式を扱う工学モデル）をベースに、放射モデル、建物伝熱モデル、樹木モデルを完全連成し、１日の非定常計算により都市街区内の温湿度、放射、風速を超高解像度で予測する温熱シミュレータの基本設計を行う。

（２） 温熱シミュレータのモデル検証

都市街区内の温湿度、放射、風速を、暑さ指数に変換するため、ISO7243で提唱される自然湿球の熱収支モデルを新たに導入するとともに、温熱シミュレータのシステム構築及びテスト計算（建築学会CFDベンチマーク、国際エネルギー機関建物熱負荷ベンチマーク等）を実施する。

（３） 温熱シミュレータの適用

実際の都市開発を対象にして、温熱シミュレータにより都市の風の道確保、暑熱対策効果の暑熱ハザードを定量化する。さらに、サブテーマ１から提供される暑熱暴露、脆弱性と合わせ、地域総体の暑熱リスクの低減についてとりまとめる。また、その結果を、東京都等の地域気候変動適応計画やまちづくりガイドラインにおける暑熱対策推進のための科学的エビデンスとして、行政に提供する。

4. サブテーマ2 結果及び考察

(1) 温熱シミュレータの基本設計

街なかの熱環境を温熱シミュレータで数値予測するに当たり、温熱シミュレータの基本構成⁸⁾を説明することとする。体感温度をシミュレートするには都市空間の気流、温湿度に加え、日射や長波放射の情報を人体側に受け渡す必要がある。本研究では、地盤や建物壁などの地物表面を面素に分割して都市空間の幾何形状や伝熱現象を再現する。図2-1にCFD格子と面素の関係を示す。面素は熱収支（対流、蒸発、放射、伝導）に対応した表面温度、表面湿度を形成する。各面素は、CFD格子内で任意の向き、大きさ、個数で存在し、従来の階段状の表面分割方法に比較して建物、土地利用の形状を忠実に再現することができる。人体を想定して評価点を都市空間内に設置し、各時刻の日向日陰の状況に応じて、評価点における直達光や各面素からの反射日射、長波放射などを積算して、平均放射温度（MRT）を算出する。

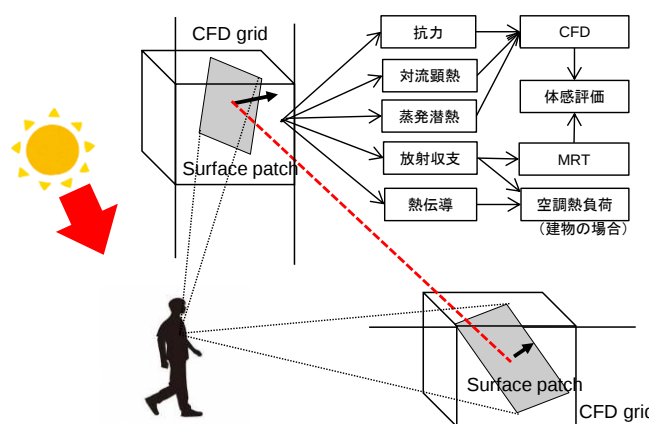


図2-1 CFD格子と面素の組合せによる体感温度の評価

都市空間の気流、温湿度場の予測にはCFD（数値流体力学）を活用する。CFDのモデル概要を表2-1に示す。工学分野で広く用いられているRANSモデル（乱流エネルギーと乱流散逸率の2つの特性方程式を扱う工学モデル）を採用した。熱、運動量等の各種輸送方程式を解く際に、都市特有の要素を計算に反映しており、例えば、樹木の抗力や蒸散の効果、建物の空調システムや道路交通から発生する人工排熱などがあげられる。

表2-1 CFDのモデル概要

項 目	内 容
乱流モデル	・ 標準 $k-\varepsilon$ モデル
基礎方程式系	・ 質量保存方程式 ・ 運動量輸送方程式 (浮力、樹木抗力を考慮。) ・ エネルギー輸送方程式 (壁面、葉面等からの顕熱放散を考慮。) ・ 水蒸気の輸送方程式 (壁面、葉面等からの潜熱放散を考慮。) ・ 乱流エネルギーの輸送方程式 (浮力、湿気、樹木による乱れの生成を考慮。) ・ 乱流エネルギー散逸率の輸送方程式 (浮力、湿気、樹木による乱れの散逸を考慮。)

都市空間の伝熱モデルを図2-2に示す。都市空間には多数の建築物が存在するため、日陰や多重反射の影響を考慮しなくてはならない。本研究では、ヘミキューブ法により面素間の形態係数を算出し、放射伝熱解析には射度法を適用している。建物ごとに壁の多層構造と熱容量を考慮して、室内の流入熱

量を計算することにより、室温や空調負荷を予測することが出来る。

樹木モデルの概要を図2-3に示す。樹木の樹冠は中空に位置しており、放射・蒸散は、葉面積密度（体積当たりの葉面片面の総面積）で特長付けられる。樹冠に入射した太陽光は、樹冠内の進行距離が進むと減衰し、一部は多方向に反射、葉面に吸収される。この放射過程はLambert則に基づいて計算される。葉面の熱収支を解くことで、葉面温度が決定されるが、蒸散に関しては植物生理モデルを適用し、環境により気孔の開閉状態が変化する関数(Jarvis, 1976)を導入している。

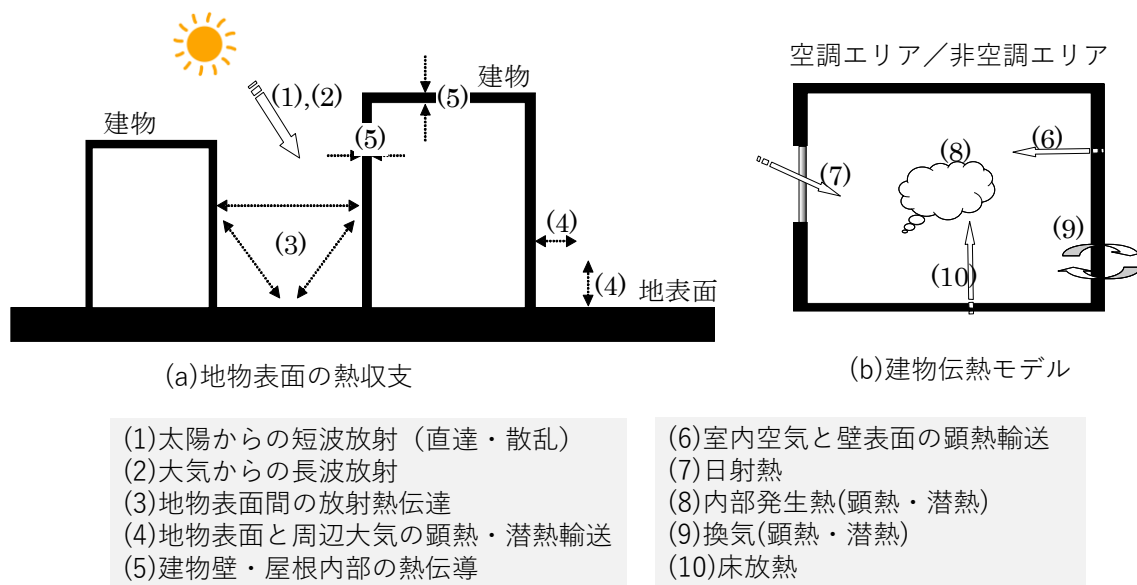


図2-2 都市空間伝熱モデル

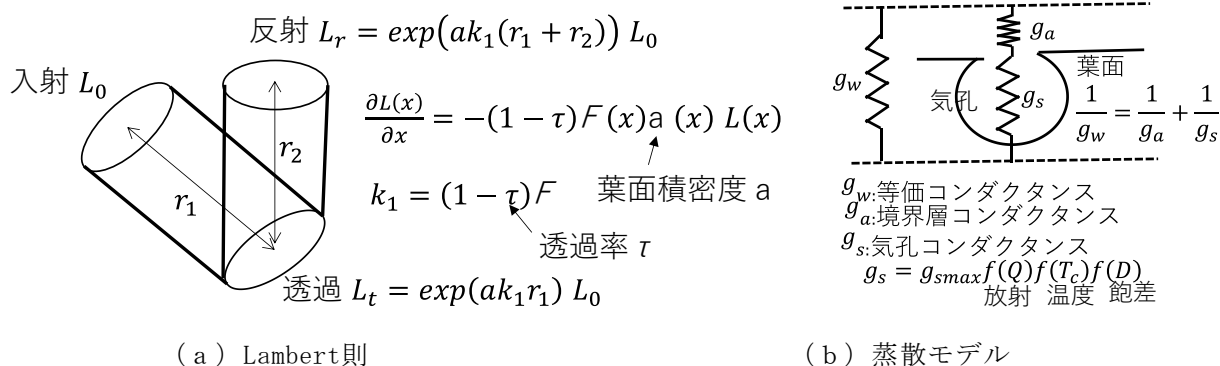


図2-3 樹木モデル

(2) 温熱シミュレータのモデル検証

温熱シミュレータは、(1)で示した通りいくつかの数値モデルから構成されており、伝熱、CFDの個別モデルの検証、伝熱とCFDを連成した全体モデルの検証が考えられる¹¹⁾。

まず、伝熱モデルについて検証する。検証には、国際エネルギー機関のベンチマークテストBESTEST (R. Judoff and J. Neymark, 1995)を利用し、単独建物の冷暖房負荷の計算結果を調べた。表2-2は、BESTESTの設定項目の一覧である。BESTESTには室温の設定（間欠空調）、建材の多層構造、放射物性値、換気、窓など熱負荷計算における一般的な項目がまとめられており、主要なツールの計算結果が収録されている。この場合、建築物の外界の温湿度は時間ごとの与条件であり、室温や空調負荷の計算結果が比較対象となる。温熱シミュレータによりBESTESTの年間計算事例を再現したのが図2-4である。図中右側のBRIが温熱シミュレータの結果である。冷房負荷、暖房負荷ともにTRANSYSなどの既往のツールと同様の結果を示しており、建築物の伝熱過程は、温熱シミュレータにおいて適切に処理されていると考えられる。

なお、熱負荷計算では、応答係数法の理論解を基に、室内外の温度と熱流を伝熱回路の外部端子に見立てて壁内各層の伝熱過程を効率よく求める方法が一般化している。しかし、放射の4乗則や蒸発などの非線形現象にはこの方法は直接適用できず線形化が必須となる。また、理論解は1次元に限定されている。温熱シミュレータでは、非線形要素が強い屋外の問題に対応するため、後退差分法による計算手法を導入する。建物壁を詳細に分割することにより、面的温度分布についてもある程度詳細な再現が可能である。

表 2 - 2 BESTESTの各種設定

Item	Setting
Airconditioning temperature	20°C and 27°C
Thermal capacity	Small (multi-layer)
Internal heat	200 W/m ² (constant)
Ventilation frequency	0.5
Indoor emissivity	0.9
Outdoor emissivity	0.9
Indoor solar absorptance	0.6
Outdoor solar absorptance	0.6
Window area	12 m ²
Window orientation	South
Sunshade	N/A

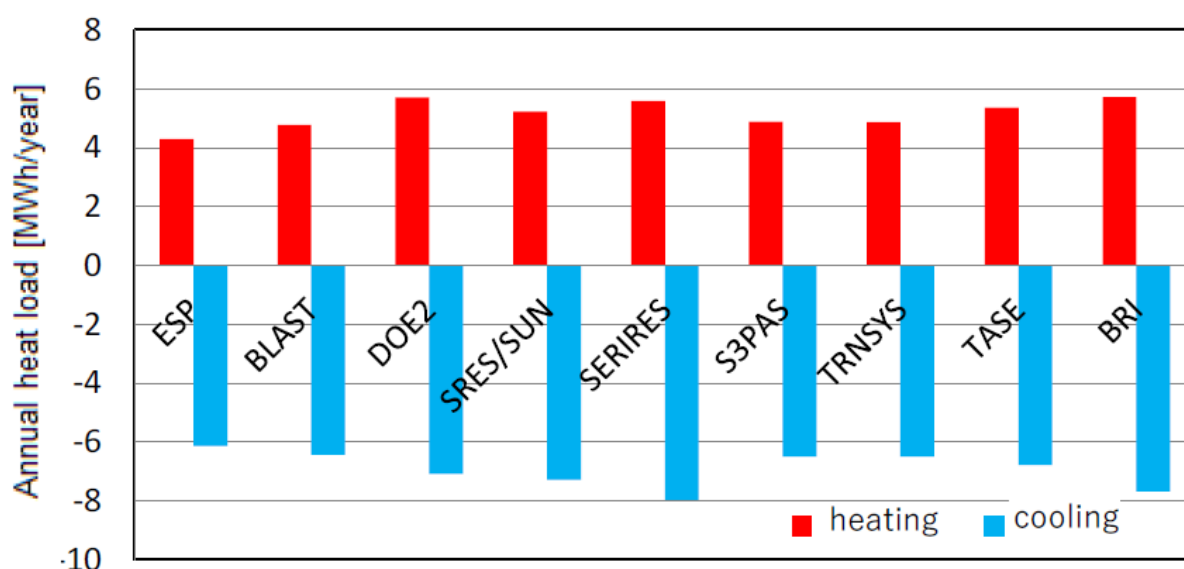


図 2 - 4 BESTEST (No. 600) による検証

次に、CFDモデルの検証を行う。日本建築学会では、CFDのベンチマークテストとして、風環境データベース(日本建築学会、2020)を公開している。風環境データベースには、CFDの検証に必要な風洞実験の仕様(建物配置、流入境界条件)、検証用データ(模型周辺の風速等)が収録されている。本研究では図 2 - 5に示される均一な模型配置のケース(風環境データベースでは、「CaseC: 単純建物群モデル」と称される。)を検討対象とし、ガイドラインに明記されている流入境界のプロファイルを設定した。建物中心高さのスカラ風速について、風環境データベースの風洞実験データと温熱シミュレータの数値計算結果を比較したのが図 2 - 6である。ここで、スカラ風速の評価式は、風速3成分を用いる式(1)(補正無)、風速3成分に乱流エネルギーの効果を追加する式(2)(補正有)の2通りがある。

補正無：
$$vel = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (1)$$

補正有：

$$vel = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2 + 2k} \quad (2)$$

ここで、vel：スカラ風速[m/s]、u, v, w：風速3成分[m/s]、k：乱流エネルギー[m²/s²]である。当然、式(1)による風速スカラ≦式(2)による風速スカラとなる。数値計算と風洞実験の相関係数は、補正有0.88、補正無0.82であり、風速全般としては概ね対応していることが解る。ただし、低風速域においては式(1)同士だと誤差が拡大する場合が見られる（図中○で囲った部分など）。風洞実験データを式(2)（補正有）で処理すると低風速域においても計算結果との照合が改善する傾向がある。この他のCFDモデルの検証については、ここでは示さないが、風環境データベースのCaseA：角柱周辺流れ、CaseG：樹木周辺の流れについても実施した。

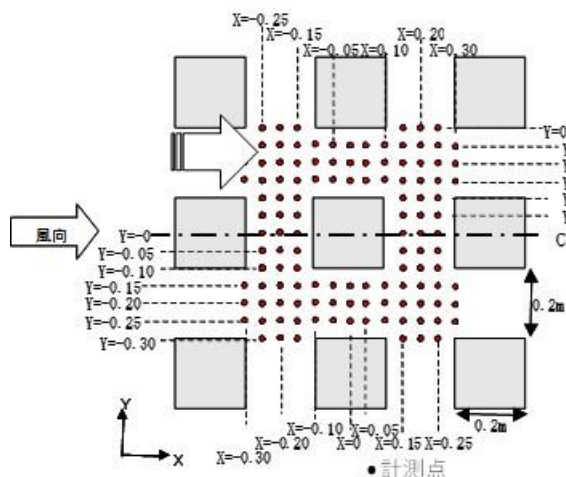


図 2-5 風洞実験の模型配置

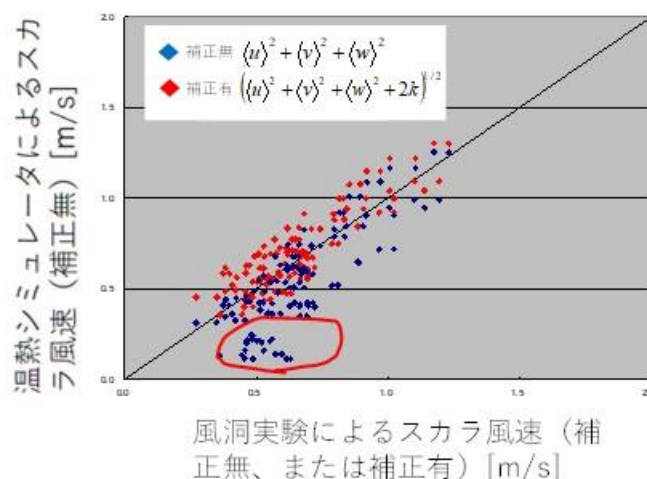


図 2-6 CFDの検証結果

個別モデルの検討に引き続き、実際の地区を対象として温熱シミュレータの精度検証を進めることにする。温熱シミュレータが対象とする地区は、図 2-7 に示す北の丸公園地区（600m四方）、計算期間は、2019年8月6日～11日の6日間である。同地区には気象官署（アメダス）が配置されており、観測値を温熱シミュレータの検証に活用する。

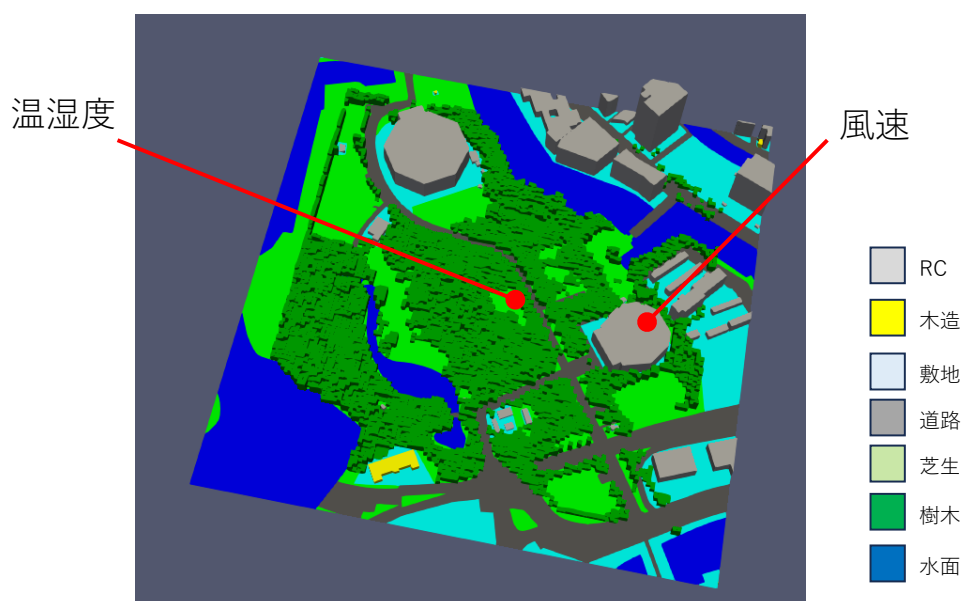


図 2-7 北の丸公園地区

気象庁メソ数値予報モデルGPV（MSM）データは次のような仕様となっている。

- ・配信領域：北緯 22.4度～47.6度、東経 120度～150度
- ・等緯度等経度：MSM地上データ：0.05度×0.0625度（格子数 505(緯度)×481(経度)）
MSM気圧面データ：0.1度×0.125度（格子数 253(緯度)×241(経度)）

そこで、京都大学・生存圏データベースから気象庁MSMデータをダウンロードし、温熱シミュレータの境界条件のデータに加工した。図2-8は、その概要を示したものであり、MSM地上データから日射データ、MSM気圧面データおよびMSM地上データからCFD解析領域の境界条件データを作成した。

MSM気圧面データから作成した境界条件の事例として、温位、風速の鉛直プロファイルを図2-9に示す。CFD解析領域の上面、6つの側面において各面を10×10に分割して、これらの境界条件データを面的に補完した。なお、温熱シミュレータによる北の丸公園地区の地表面熱収支の計算では、CFDによる温湿度の計算結果を時々刻々都市空間の伝熱モデルと連成する。そのため、MSM地上データの温湿度は都市空間の伝熱モデルの計算に直接用いていない。MSM地上データの温湿度は図中の地上10m以下の領域に使用している。気圧面データの最下層のMSM気圧面データの最下層（地上高さ約100m）から地表付近まではThornthwaite-Holzmanの式で鉛直方向に補完した。

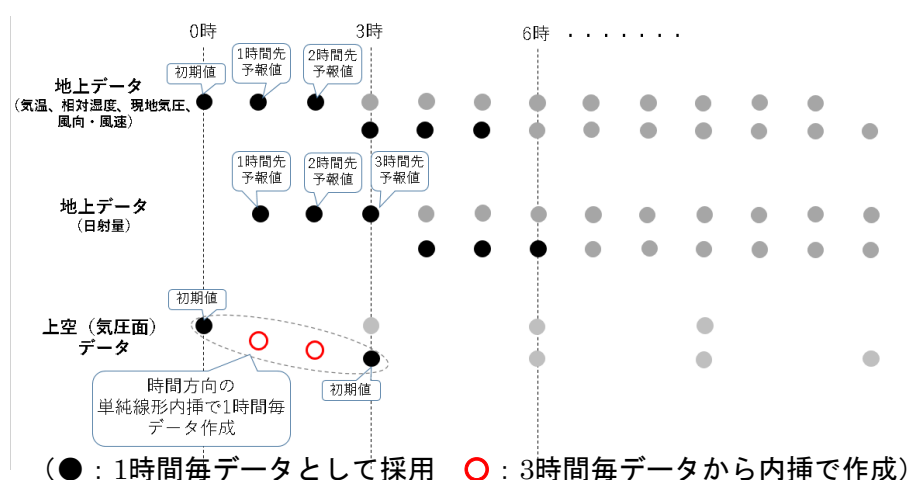


図2-8 気象庁MSMデータの活用

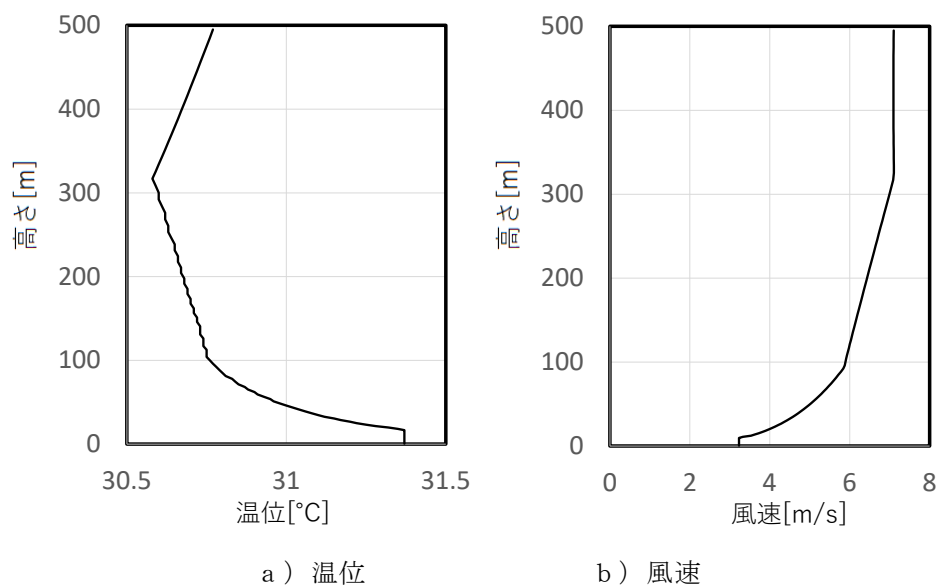


図2-9 境界条件の事例（2019年8月10日14時）

検証結果を図2-10に示す。図中のCFDは温熱シミュレータの計算結果、measurementはアメダス観測値（10分ピッチ）、meso modelは、MSS地上データである。図2-10（a）気温については、日中

にCFD、メソモデルともに観測値に対して過小評価となっているが、夜間においてはCFDが観測と照合が良いことが解る。夜間に一致する理由は、温熱シミュレータにおいては地物の形態係数を精緻に再現しており、放射冷却の効果を適切に熱収支に反映しているためと考えられる。図2-10(b) 相対湿度は、CFD、メソモデルは両者ともに観測値に合致している。図2-10(c) 風速は、CFDが観測値とほぼ合致し、メソモデル (constant flux layer10m高さ) は小さめの値となるが挙動は観測を良く追随する。cfdの場合、都市空間内に3次元のメッシュ格子を設定しているため、任意の場所の風速を抽出することが出来、今回の場合は、アメダスで観測された屋上高さに相当する計算メッシュの風速値を検証に用いたものである。

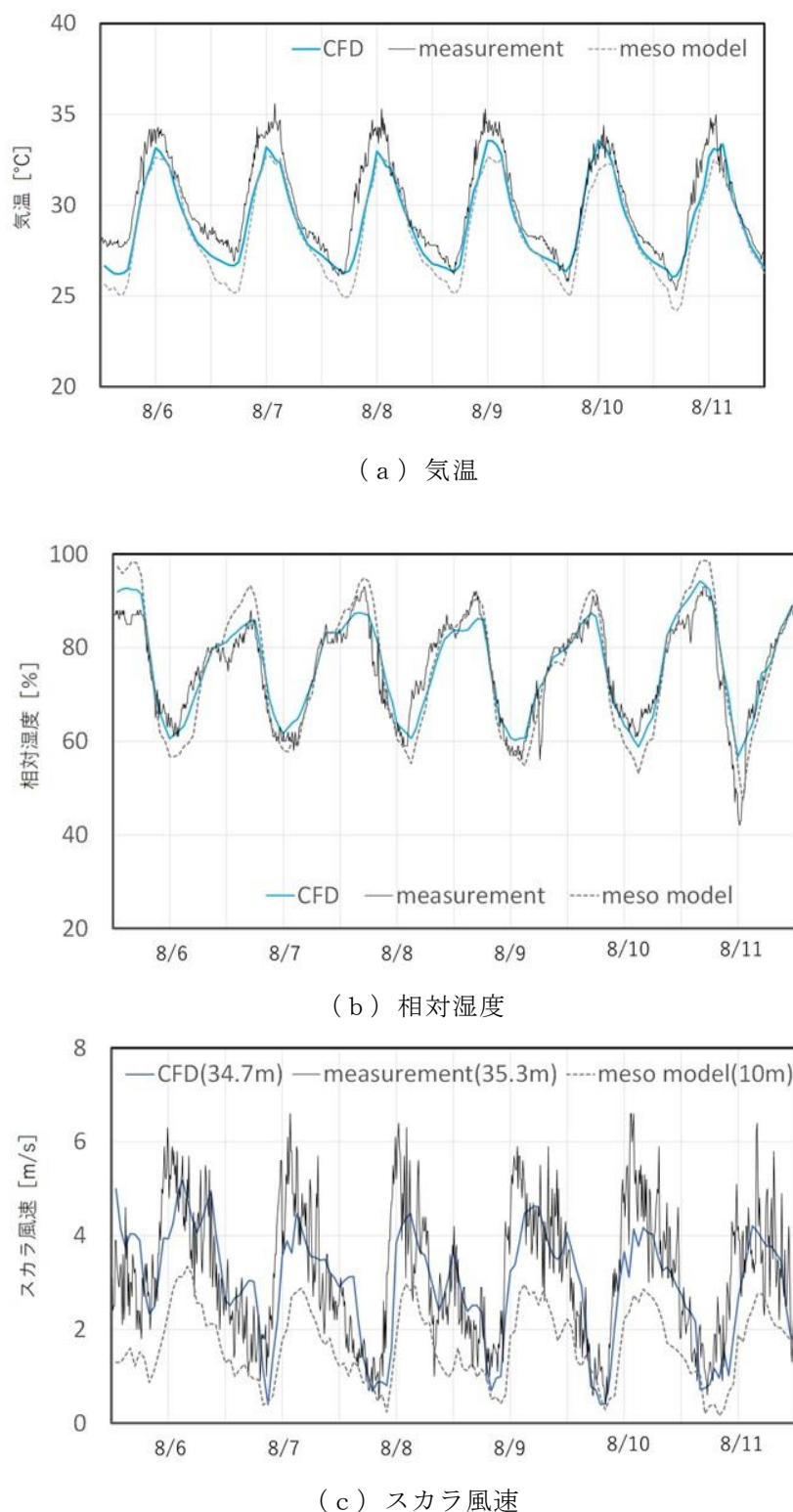


図2-10 検証結果 (2019年8月6日～8月11日)

湿球黒球温度（WBGT: Wet-Bulb Globe Temperature）は、酷暑環境下での行動に伴うリスクの度合を判断するために用いられる指標である。日射がある環境においてWBGTは、自然湿球温度 T_{nw} 、黒球温度 T_g 、気温 T_a の関数として式(3a)で表される（ISO7243など）。

$$WBGT = 0.7T_{nw} + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (3a)$$

自然湿球温度は、ガーゼを巻いて形成したwickを十分に保水した状態で計測した温度であり、wickは放射および周辺の気流に暴露されている必要がある。しかし、wickの保水管理には多大な手間が発生し、自動観測は難しい側面がある。環境省は暑さ指数（WBGT）の計算式に湿球温度 T_w の使用を提唱している。自然湿球温度の代わりに湿球温度をそのまま用いるというものであり、式(3b)で表される。湿球温度は、周囲の放射、風の影響を受けない性質がある。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (3b)$$

一方、ISO7243ではwickの熱収支式をたてて、周囲の放射、風の暴露影響を受ける自然湿球温度を求める方法を提示している。

$$4.18 \cdot v_a^{0.444}(t_a - t_{nw}) + 10^{-8} \cdot [(t_r + 273)^4 - (t_{nw} + 273)^4] - 77.1 \cdot v_a^{0.421} \left[P_{as}(t_{nw}) - \frac{RH}{100} \cdot P_{as}(t_a) \right] = 0 \quad (4)$$

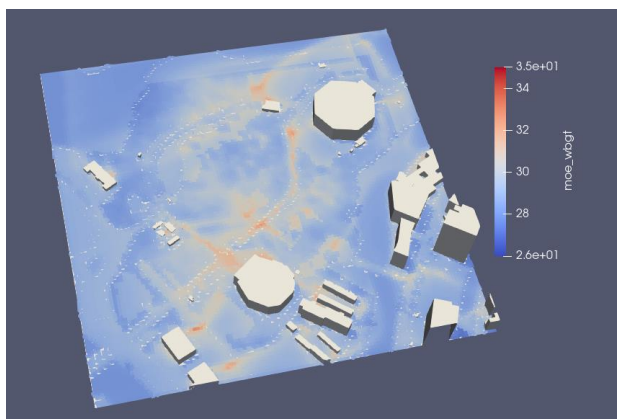
ここで、 P_{as} : 飽和水蒸気圧[kPa]、 RH : 相対湿度[%]、 v_a : 風速[m/s]、 t_a : 気温[°C]、 t_{nw} : 自然湿球温度[°C]、 t_r : 平均放射温度[°C]である。

ISO7243では、平均放射温度 t_r は黒球温度の観測値から求めている。本研究では、街なかのWBGTを数値計算で求めることとし、温熱シミュレータによる面素ごとの放射量を幾何的に集計して平均放射温度を算出し、式(3a)に代入する。湿球温度は、温湿度から簡単に求めることが出来、式(3b)を使用する。

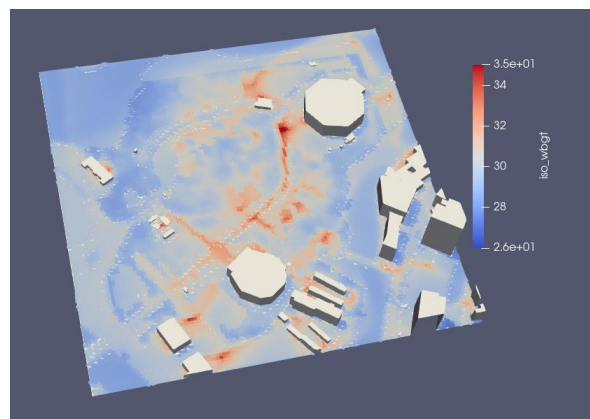
図2-11に北の丸公園地区において2通りのWBGTを描画した事例を示す。樹冠下の状況を見るため、樹木は描画していない。どちらも樹冠下のWBGTが低く、道路部分のWBGTが高くなっており、数値計算により地域のWBGTの状況を詳しく把握できることが解る。

全体的に自然湿球温度で計算したWBGTの値が湿球温度を用いたWBGT（＝環境省の暑さ指数（WBGT））の結果より高く、両者の差は無視できない。そこで、ISO7243の換算方法による自然湿球温度を用いるWBGTを「WBGT_ISO」と表し、暑さ指数（WBGT）と区別することにする。

環境省の暑さ指数の全国配信は、アメダス観測点もしくは5kmグリッドの数値予報に基づいている。本研究で提示した温熱シミュレーションによる方法では、建物配置、樹木の導入や建材の選択、などに応じてメートル単位で詳細に暑さ指数の状況を再現することが出来る。また、自然湿球温度をベースとするWBGTの観測事例を評価可能となるため、例えば海外のWBGTのwarningレベルと日本の熱中症アラートの対応関係を検討しやすくなると考えられる。



(a) 湿球温度を用いたWBGT



(b) 自然湿球温度（ISO換算式）を用いたWBGT

図2-11 WBGTの分布（2019年8月9日14時）

(3) 温熱シミュレータの適用

検討対象は、サブテーマ1と同じ都内の高輪地区（図1-1）である。数値計算には、スーパーコンピュータ「富岳」（理化学研究所計算科学研究センター）を用いた。各種計算条件を以下に示す。

- ・規模：6km四方@2mグリッド、東西3000x南北3000x鉛直100=9億メッシュ
- ・並列数：60x60領域（=3600領域）
- ・期間：2019年8月6日～8月11日（表面温度）

2019年8月9日14時（CFD）

計算方法を以下に示す。

(1) 気象庁MSS地上データを用いて、都市空間伝熱モデルを8月6日～8月11日の6日分実施し、全ての面素の温湿度データをストックする。

(2) 8月9日14時のCFD計算を実行する。このとき、面素の温湿度データをCFDメッシュに引き渡す。人工排熱は、建物、道路交通を考え、サブテーマ1で作成した排熱原単位を用い、3次的にCFD計算メッシュに顕熱、潜熱を与えた。流体境界は気象庁MSS等圧面データを使用した。ただし、風向についてはMSSが西寄りに偏向する傾向が見られたので、品川駅・田町駅周辺まちづくりガイドライン2020「風の道確保等に関するガイドライン」（以降、都ガイドラインと称する。）で設定されている南南東を設定した。CFDの計算時間は5時間（風速5m/sが地区全体を10～20回通り抜ける数値）として、5時間目の結果を用いている。

都市空間モデルによる表面温度の計算結果を地区全域で図2-12に示す。水面（東京湾、目黒川、運河など）、緑地（公園、教育園、寺院など）の表面温度が低いことが解る。図中○で囲った左下のエリアは住宅地であり、高温化した屋根面が密に存在している。図の中央部分には、現在JRの新駅となっているが、開発前の状況として操車場の敷地としている。

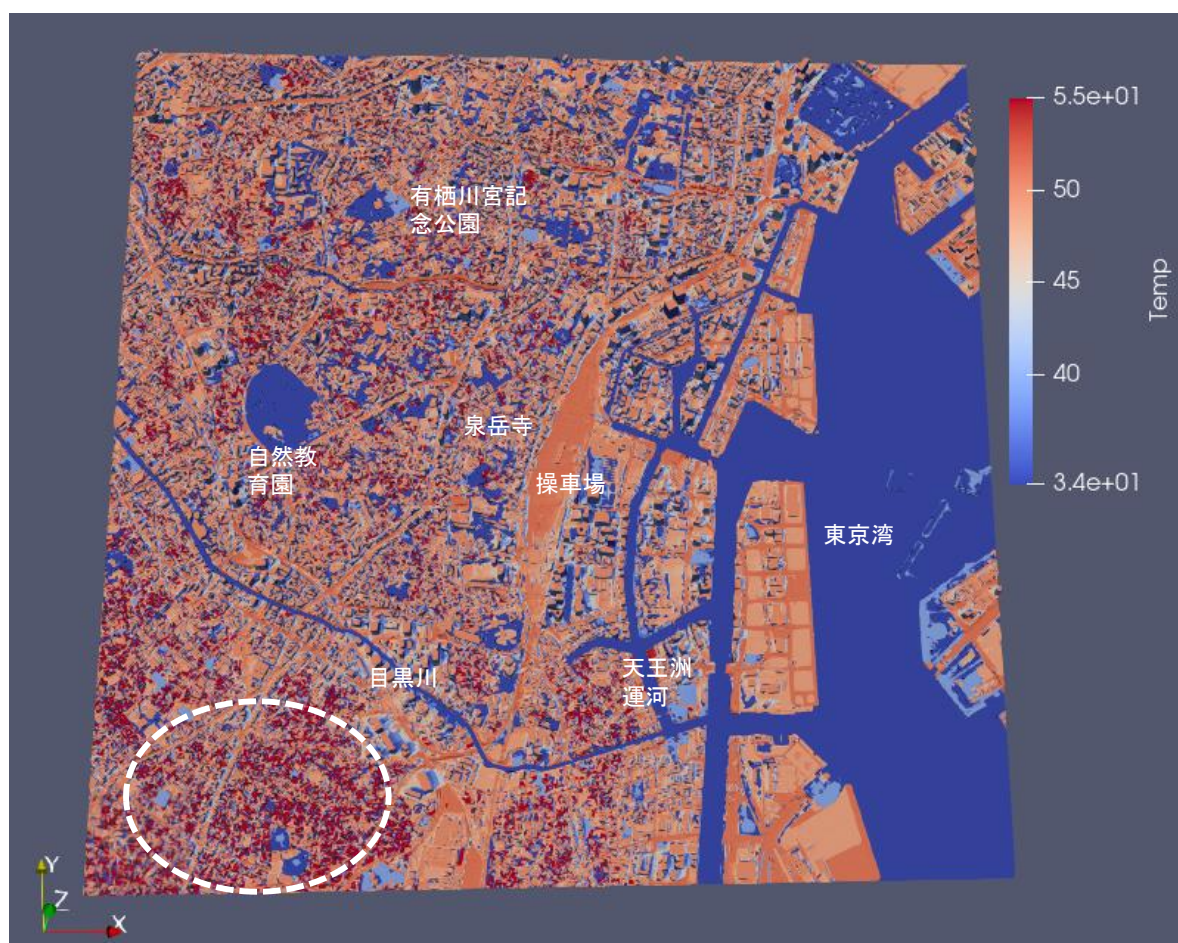


図2-12 富岳による表面温度の計算結果（地区全域、2019年8月9日14時）

CFDモデルによる気温分布を地区全域で表したのが図2-13である。海からの冷風が徐々に暖まっている様子が解る。地上50mでは住宅地の高温化はあまり見られない。これは、建物が低層であるため上空まで熱の混合が及んでいないためである。同図には、都ガイドラインが規定する「品川駅・田町駅周辺地域」および「主な風の道」も表示している。「主な風の道」については、都が風シミュレーションにより風速が相対的に高い地域を抽出し、矢印のエリアを定義したものである。都ガイドラインには「都市空間の暑熱対策など人々の主要な活動面である地表レベルでの環境改善を実施するとともに、上空での風の流れに配慮し、都市に風を取り込むことで、本地域のみならず内陸の後背地に風を導く」と明記されているが、当時の検討では気温の評価には至っていなかった。温熱シミュレータの解析により風の道に沿って低温域が形成されていることが判明し、環境資源としての風の道の価値があらためて示されたと言える。

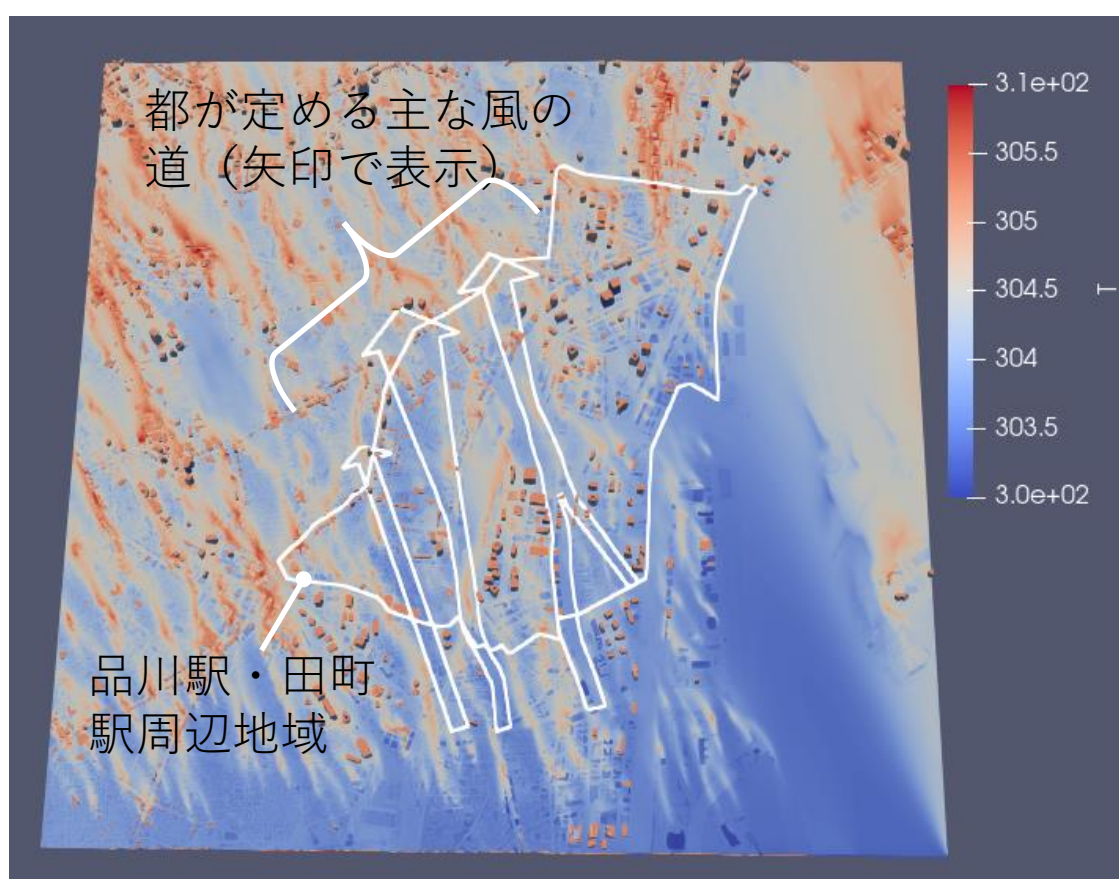


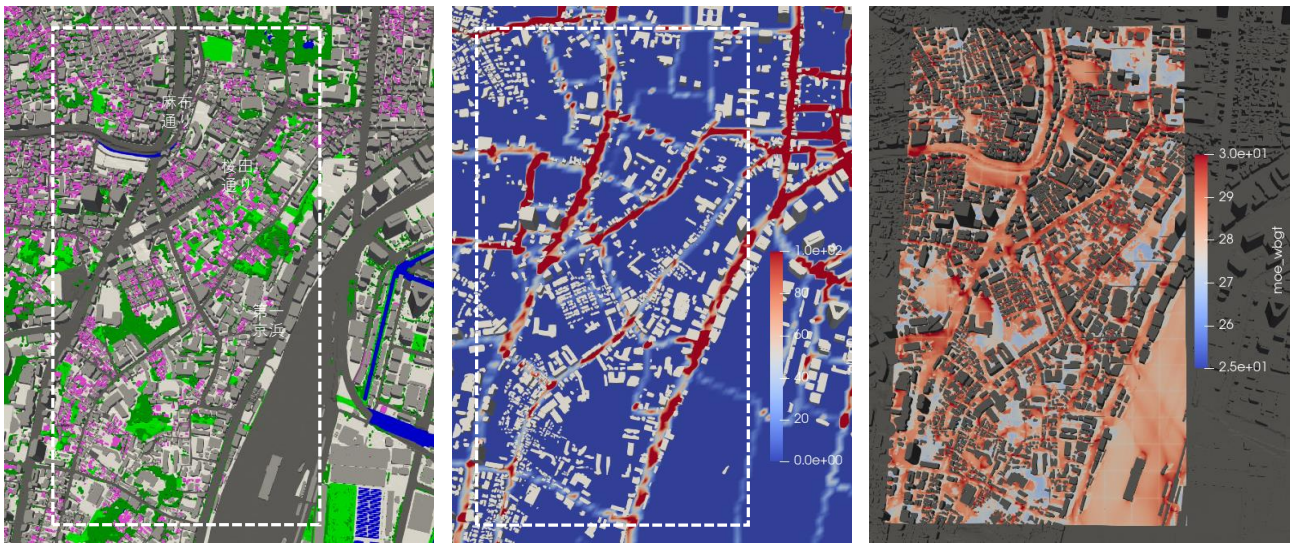
図2-13 富岳による地上50mの気温の計算結果（地区全域、2019年8月9日14時）

次に、歩行者と暑さ指数の関係を考える。サブテーマ1において、同地区の歩行者（歩行速度あり）と屋内外滞留者（歩行速度小）が解っている。屋内外滞留者のうち、道路周辺のポイントデータを抽出することで屋外滞留者数を見積もり、「歩行者数」と定義する。

$$\text{歩行者数} = \text{屋外歩行者数} + \text{屋外滞留者数} \quad (5)$$

中心エリアにおける歩行者数と暑さ指数（WBGT）の分布を図2-14に示す。歩行者数は、第一京浜、桜田通り、麻布通りに沿って密に存在することが解る。暑さ指数（WBGT）は、温熱シミュレータ解析によりリアリティが高い結果が得られており、場所により2～3℃程度の違いがある。この温度差はかなり大きく、暑さ指数（WBGT）が高いエリアに人の流れが集中すると熱中症の発生率に影響する可能性があるため、形成要因を検討する必要がある。また、適応策の観点からは、暑さ指数（WBGT）が低いエリアに人の流れを誘導することで地域全体の温熱リスクの低減可能性が指摘される。これまでWBGTの将

来予測は、北米や東アジアなど大陸レベルの検討が行われてきた。人と熱の流れを街路単位の高解像で両方再現する取り組みはこれまでほとんど見られず、本研究の独自性を強く示唆するものである。



(a) 建築土地利用

(b) 歩行者数

(c) 暑さ指数 (WBGT)

図 2-14 歩行者数と暑さ指数 (WBGT) の分布 (中心エリア、2019年8月9日14時)

実際の都市開発を対象にして、温熱シミュレータを試行する。新駅の周辺に超高層ビルの都市開発が予定されている。開発事業者の公表資料に基づき、開発概要を以下に示す。

【1街区】住宅等、地上45階 (173m)、延べ床面積14.9万 m^2 (地下階含む)

【2街区】文化創造施設等、地上6階 (45m)、延べ床面積3.1万 m^2 (地下階含む)

【3街区】業務、商業等、地上31階 (167m)、延べ床面積21.1万 m^2 (地下階含む)

【4街区】業務、ホテル等、地上3階 (164m)、延べ床面積46万 m^2 (地下階含む)

建物配置を図 2-15 に示す。建物の一部が風の道エリアにかかるため、2街区の建物高さを45mとし、風通しに配慮された配置、形状となっている。同図には都が定める風の道エリアとして3本の矢印を重ねて描画している。



図 2-15 都市開発プランと風の道エリア

温熱シミュレータによる検討対象としたのは、図 2-15 において右側の矢印で示される風の道エリアである。このエリアの複数のブロックに分割し、各ブロックの温熱環境および歩行者数を開発前後で比較する。温熱シミュレータの計算では、開発後の気象条件は、開発前（2019年8月）と同一とする。建物の人工排熱、歩行者数は増床分増加する。開発建物の人工排熱、歩行者数の地域分布については、サブテーマ 1 から提供されたデータを利用した。

図 2-16 は、開発前後の歩行者数、暑さ指数（WBGT）をブロックごとに比較したものである。図 2-16（a）は対象とする風の道エリアのブロック番号、図 2-16（b）、図 2-16（c）は、各ブロックの歩行者数の総和、暑さ指数（WBGT）の平均値である。

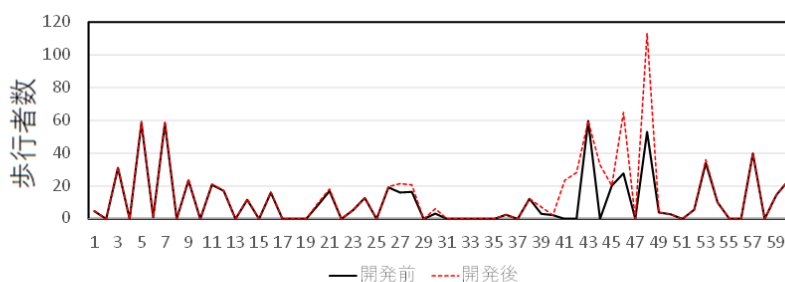
歩行者数は、当然のことながら開発後に増加しており、開発箇所に近いブロック（46番, 48番など）で2倍程度伸びている。開発箇所から離れた箇所のブロック（27～29番）で歩行者数が増加しているのは、線路を横断するバイパス道路が新設されて既存道路に回り込む形で合流した影響である。

暑さ指数（WBGT）について述べる。ブロック 39～42 では開発前後で暑さ指数（WBGT）が $0.2 \sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 低下している。暑さ指数（WBGT）が低下する原因は、建物の日陰による人体への直達光の減少、日陰部分の表面温度低下を起因とする気温低下、都市プランの植樹などが考えられる。一方、ブロック 50 では暑さ指数（WBGT）が約 0.4°C 上昇している。これは開発建物の風下領域で風速が低下したためである。さらにその風下にあたるブロック 53～55 では逆に暑さ指数（WBGT）が低下に転じ、 $0.1 \sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 変化している。これは、開発建物の存在により上下の循環流が形成され、上空の冷気が地上付近に到達したためと考えられる。

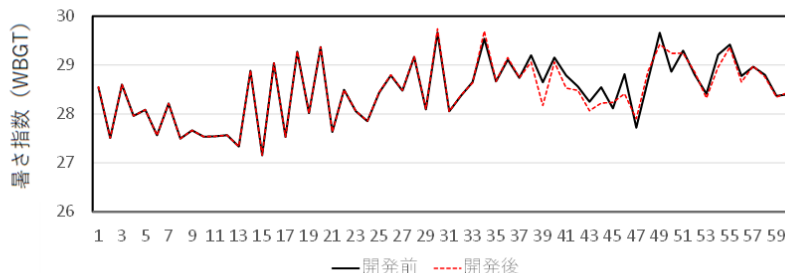
「ヒートアイランド現象緩和に向けた 都市づくりガイドライン」（国土交通省、平成25年12月、13頁）には「地区スケールでは、都市再開発等の都市が変化する機会を捉えるなどして、ヒートアイランド現象の緩和に加えて、空間利用者の快適性の向上といった適応策の観点も考慮して対策を実施することが重要」と明記されており、環境資源である風の道の活用事例の一つであると位置づけられる。



(a) ブロック番号



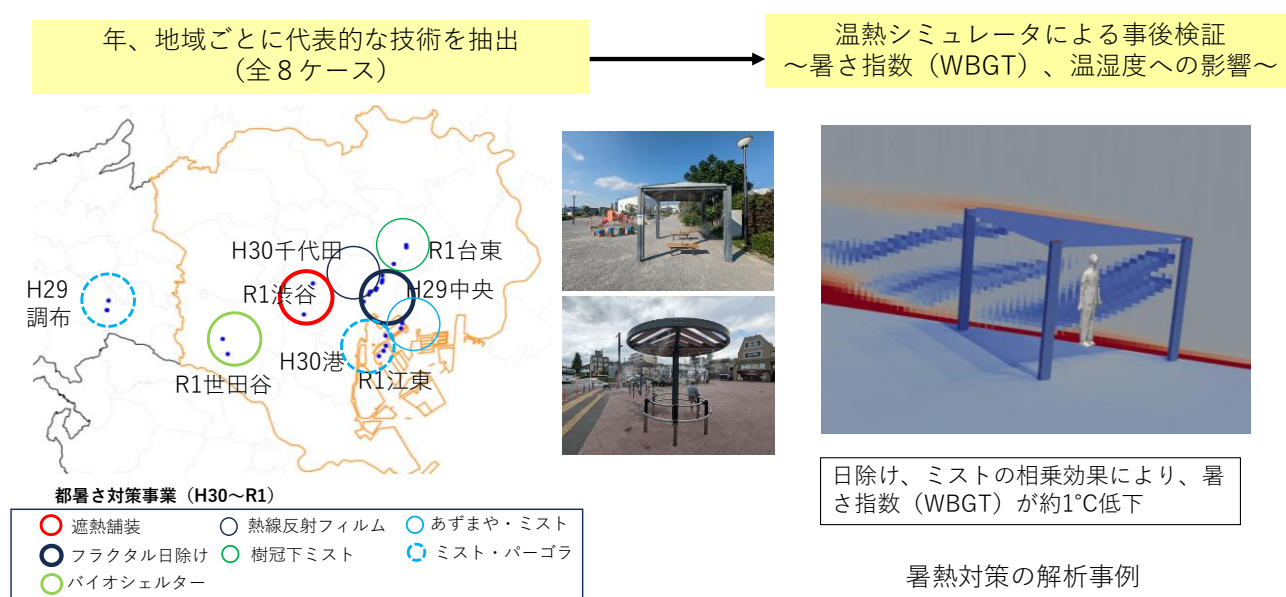
(b) 歩行者数



(c) 暑さ指数 (WBGT)

図 2-16 開発前後の比較

温熱シミュレータを用いて暑さ指数への影響を調べた事例を述べる。図 2-17 に温熱シミュレータによる東京都暑さ対策事業の評価概要を示す。東京都は暑さ対策事業として、平成29年度～令和元年度に都内各地で日除け、冷却ミスト等を設置している。事業全体のうち、代表的なものを8ケース抽出し、温熱シミュレータによる検討を行ったものである。その結果、各事業における暑さ指数の低減効果をそれぞれ定量化することが出来た。図中右のケースでは、日除けと冷却ミストの組み合わせ技術について、温熱シミュレータを適用し、両者の相乗効果が示されている。暑さ対策事業の抽出と評価検討に際しては東京都環境局の協力を得て実施した。



暑熱対策の解析事例

図 2-17 温熱シミュレータによる東京都暑さ対策事業の評価概要

5. サブテーマ 2 研究目標の達成状況

サブテーマ 2 では、都市空間における暑さ指数を分析可能な温熱シミュレータの開発に取り組んだ。

暑さ指数の評価に当たっては、放射の適切な取り扱いが重要であった。そこで、街区内の建物の立体形状を詳細な面素に分割し、面素同士の角関係を紐づけることで短波、長波の放射熱を正確に算定することができるようになった。対策面では樹陰の効果を評価する必要がある、これについては葉群の放射減衰モデル、植物の生理モデルをCFDモデルの中に組み込むことで、樹木の日陰効果、蒸散作用や冷気拡散の物理的特徴を解析結果に反映している。開発モデルについては、個別モデル、全体モデルをそれぞれ検証し、いずれも良好な計算精度を得られることを確認している。したがって、数値シミュレーションにおいては、各種数値モデルを適切に選択、組み合わせた先進性を有し、暑熱ハザードの時空間分布の再現性、計算精度を確保している。

温熱シミュレータの境界条件については気象庁のMSSデータを活用することで、国内の任意の場所、期間に温熱シミュレータによる計算を実行可能とした。また、高分解能の解析を実現するため、スーパーコンピュータ富岳上に計算システムを構築することで、温熱シミュレータの計算時間の大幅な短縮を実現した。その結果、6km四方の領域を2m解像度で3次元解析を行えるようになり、都市空間の暑さ指数を詳細に把握できるようになった。また、温熱シミュレータの入出力様式や操作方法を技術マニュアルにとりまとめ、希望する自治体にはツールの提供が可能である。したがって、シミュレーション及び解析システムは、建物や道路の配置を判別可能な超高分解能メッシュを使用可能であるように適切に構築され、自治体等の環境行政にとって実効性を伴う研究情報を提供できる。

参考文献

参考文献を示す（サブテーマ1、サブテーマ2）。

- ・ 年収階級別世帯数推計メッシュデータ2018, ゼンリンマーケティングソリューションズ
- ・ 築年数データ 2018年版, 技研商事インターナショナル
- ・ 建物ポイントデータ2019, ゼンリン
- ・ 国土交通省、環境省 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 (2004)
- ・ 足永靖信ら, 田中稔, 山本亨, 事務所建物の空調システムの排熱特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集24巻75号 (1999) 89-97.
- ・ 東京都環境保全局(1987), 都市内自動車交通量及び自動車排出ガス量算出調査
- ・ L. Böcker, P.T. Uteng, C. Liu, M. Dijst. Weather and daily mobility in international perspective: A cross-comparison of Dutch, Norwegian and Swedish city regions. *Transport. Res. Part D*, 77 (2019) 491-505. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.07.012>
- ・ V.R. Melnikov, G.I. Christopoulos, V.V. Krzhizhanovskaya, M.H. Lees, P.M.A. Sloot, Behavioural thermal regulation explains pedestrian path choices in hot urban environments, *Sci. Rep.* 12 (2022a) 2441. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06383-5>
- ・ F. Lindberg, S. Thorsson, D. Rayner, K. Lau. The impact of urban planning strategies on heat stress in a climate-change perspective. *Sustain. Cities Soc.* 25 (2016) 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.004>
- ・ Jarvis, P. J., 1976: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in field. *Philos., Trans. R. Soc. Lond. Ser. B.* 273, 593-610.
- ・ Judkoff, R., J. Neymark (1995) International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method, NREL/TP-472-6231
- ・ Architectural Institute of Japan (2020) Guidebook for CFD Predictions of Urban Wind Environment, Architectural Institute of Japan.
- ・ Japan Meteorological Agency, homepage. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html> (in Japanese)
- ・ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, homepage.

<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/> (in Japanese)

- ・ ISO 7243 (2017) Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index.
- ・ C.W. Thornthwaite, B. Holzman, “The determination of evaporation from land and water surfaces,” Monthly Weather Review 67(1): 4-11, 1939.
- ・ 東京都：品川駅・田町駅周辺まちづくりガイドライン2020：付属資料1 風の道確保等に関するガイドライン、2020.3
- ・ 国土交通省 都市局都市計画課：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、2013.12

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	2
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	1
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	3
口頭発表（学会等・査読なし）：	3
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	5
マスコミ等への公表・報道等：	0
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	7

(2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Ueno, T., Kumakura, E., Ashie, Y., (2023). Estimation of regional anthropogenic heat from air conditioning systems and related devices in metropolitan commercial districts of Japan. City and Built Environment, 1(9), https://doi.org/10.1007/s44213-023-00009-w

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
2	足永靖信：自然湿球温度の屋外観測データを活用したWBGTの計算式の検討、空気調和・衛生工学会論文集、Vol. 49、No.327、PP.31-35、2024.6

--	--

<査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）>

成果 番号	【サブテーマ１】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
3	Kumakura, E., Y. Ashie, T. Ueno: Impact of summer heat on the movement of people in Tokyo based on mobile phone location data, SSRN. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4757224

成果 番号	【サブテーマ２】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ１】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ２】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

（３） 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ１】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
4	Kumakura, E., Y. Ashie, T. Ueno: Investigation of the Effect of Heat on People's Movement in Tokyo During 1 Summer Using Mobile Phone Location Data, 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, RMIT University, 2023.12
5	Ueno, T., E. Kumakura, Y. Ashie: The effect of district heating and cooling on anthropogenic heat mitigation in the Tokyo metropolitan area, 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, RMIT University, 2023.12

成果 番号	【サブテーマ２】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
6	Ashie, Y., E. Kumakura, T. Ueno: Development of the urban thermal simulator and its validation, 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, RMIT University, 2023.12

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
7	熊倉永子、足永靖信、上野貴広：都市の温熱リスクに関する研究（その2 人口流動データを用いた暴露人口の時空間構造の検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2125-2126、2022.9
8	上野貴広、足永靖信、熊倉永子：都市の温熱リスクに関する研究（その3 建物の空調排熱の推定）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2127-2128、2022.9

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
9	足永靖信、熊倉永子、上野貴広：都市の温熱リスクに関する研究（その1 気象データアーカイブを利用した温熱シミュレーション）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2123-2124、2022.9

(4) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
	特に記載すべき事項はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ2】の実施状況
10	2021	常松展充：ますます暑くなる東京の夏と暑さ対策、東京都立小松川高校「理数系探求学習講演会」2021.10.14
11	2021	足永靖信：都市の温熱シミュレータの開発、環境研究機関連絡会研究交流セミナー、2021.11.5
12	2021	常松展充：市街地再開発に伴う都市緑化等による暑熱環境改善効果について、公益財団法人都市緑化機構「令和3年度 環境緑化に関する研究者講演会」、2021.11.29
13	2021	足永靖信：都市における暑熱適応策の考え方、令和3年度気候変動適応研修（中級コース）、2022.2.10
14	2022	足永靖信：ドイツBBSRとの適応策会合、2022.6.14

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
15	常松展充、瀬戸芳一：ビッグデータを用いた都内の暑熱リスクに関する研究、東京都環境科学研究所NEWS(Web)、2021.9
16	瀬戸芳一、常松展充、熊倉永子：人口流動データを用いた夏季の東京都内における熱中症救急搬送者数に関する研究、東京都環境科学研究所年報、pp. 62-63、2022.12
17	熊倉永子ら：人流ビッグデータを用いた人々の暑熱への適応に関する実態、国総研レポート、p.112、2023.6

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
18	外部資金導入研究、東京都環境科学研究所ホームページ
19	令和3年度業務実績等報告書、建築研究所、2022.6
20	令和4年度業務実績等報告書、建築研究所、2023.6
21	令和5年度業務実績等報告書、建築研究所、2024.6

[Research Title]

Research on the Heat Risk Related to Urban Heat Islands Using Population Flow Data and a Thermal Simulator

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Yasunobu Ashie
(PI ORCID) :	ORCID0009-0000-1613-065X
Principal Institution :	Building Research Institute Tsukuba City, Ibaraki, JAPAN Tel: +81 29-864-6627 Fax: +81 29-864-6775 E-mail: ashie@kenken.go.jp
Cooperated by :	National Institute for Land and Infrastructure Management, Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection, Waseda University
Keywords :	Heat Countermeasure, WBGT, People Flow, Thermal Simulator, Urban Heat Island

[Abstract]

There are concerns about the various effects associated with climate change, and in recent years, the heat in cities has increased and health hazards such as heat stroke have become more common. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report (AR6/WG2, February 2022) states that "the interaction between changing urban forms and exposures and vulnerabilities can result in risks and losses arising from climate change in cities and settlements." The "Action Plan for Heat Stroke Countermeasures" (approved by the Cabinet on May 30, 2023) sets a goal of halving the number of deaths due to heat stroke by 2030. It is necessary to establish a method for assessing the risk of heat in cities as soon as possible and to reflect this in the heat countermeasures for climate-resilient urban development promoted by national and local governments.

The aim of this study was to determine how many people in cities are exposed to heat. This research consists of two sub-themes. In Sub-Theme 1, a method for estimating the expansion of population flow data using mobile phone signals was developed, and the movement and retention of people on each street was databased. In addition, a calculation method for a database of artificial exhaust heat generated from buildings and road traffic was created to contribute to Sub-Theme 2.

In Sub-Theme 2, we conducted a supercomputer analysis of temperature and humidity, wind, radiation, and heat index using a thermal simulator, and succeeded in reproducing the actual heat index in the city with high resolution. In addition, by creating and aggregating the heat index and the regional distribution of the number of outdoor residents and pedestrians, they were compiled as a method for assessing heat risk in cities.

[References]

- Ueno, T, E. Kumakura, Y. Ashie: Estimation of regional anthropogenic heat from air conditioning systems and related devices in metropolitan commercial districts of Japan, City and Built Environment, 1-9, 2023.6
 Kumakura, E., Y. Ashie, T. Ueno: Impact of summer heat on the movement of people in Tokyo based on mobile phone location data, SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4757224>
 Ashie, Y., E. Kumakura, T. Ueno: Development of the urban thermal simulator and its validation, 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, RMIT University, 2023.12

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

別添

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
都市におけるヒートアイランド暑熱リスクに関する研究を、環境省と国土交通省の研究機関との連携でさらに進展していただくことを期待する。	建築研究所および国土交通省国土技術政策総合研究所の研究体制で暑熱関連の分析、検討を引き続き進めます。
人口流動データをもとに人口の時空間構造を明らかにし、交通手段や建築物エネルギー消費を算出し、都市空間における温熱シミュレータによる試算を示しており、順調に研究が進んでいることを評価する。このモデルの検証や暑さ対策への施策の提言として、具体的に何が暑熱リスクの主要因か示されることを期待する。	都が進めている暑さ対策事業においては、日除けと冷却ミストの導入が積極的に実施されている。これらの方策による暑さ指数の低減効果について温熱シミュレータによる要因分析で明らかにしたい。
中間報告で示された結果は、都内の人口流動の変化やそれに伴う建物の人工排熱量の変化を分析した結果と、それらの情報も加えた温熱シミュレータの開発と試算結果であると思う。ただ、そこまでの結果では、暑熱リスクをどのように評価し、どのように暑熱リスクに対する対策を検討する材料とするのが、明確に示されていないように思う。それらに至る道筋をもう少し明確にして研究成果を説明した方がよいのではないかと感じた。その意味でも、自治体のヒートアイランド問題の対策を実際に考えている現場を巻き込んで研究を進めた方がよいのではないかと感じた。	ご指摘のように、本研究の検討内容は、環境施策への反映を目指したツールの開発や評価手法の整理が主なものになっており、実際の環境施策において自治体と連携した具体的なアクションには至っていない。今後の連携のあり方については、本研究の構成メンバーの東京環境科学研究所および適応センターとの調整を図り、適切な対応を図る所存である。
携帯電話データという一般に流通している人口流動ビッグデータを用いて、都市におけるヒートアイランド温熱リスクを定量的に評価し、地域特性に合わせた適応策を行おうとしている。温熱シミュレータと人口流動解析がそれぞれ個別に進んでおり適応に至るか不明であるため、今後の適応への道筋を示すことを期待する。	ご指摘を踏まえ、温熱シミュレータと人口流動の分析対象を同じ場所に統一して、それぞれの検討内容を、温熱リスクの面から総合的に扱えるよう研究全体の立て付けに配慮しました。
大規模な人流データの利用によるエネルギー消費推定や暑熱リスク評価は興味深いのだが、シミュレーションの検証がいまひとつという印象を持った。現在使われているWBGT 指数の高度化につながるとよいと思う。研究成果の誌上発表状況は物足りない。	ご指摘ありがとうございます。その後、国際会議に各サブテーマの口頭発表を行うとともに、査読誌への投稿を進めております。その中に、シミュレーションの検証やWBGTの高度化の内容を含めました。
暑熱対策の基礎データを提供する研究プログラムであると理解するが、適応策として暑熱リスク低減策に結び付けた研究成果の取りまとめを期待したい。	気候変動適応の調査研究については、国立研究機関等の連携の枠組みが制定されており、その一環として暑さ対策の研究知見を提供する予定です。

サブテーマ1、2とも所定のモデル、解析ツールの作成が順調に進んでおり、いくつかの観測データとの比較もできるようになっている。サブテーマ1の研究計画の変更によって建物側の排熱推定作業が早まった点も効果的であったと思われる。最終年度に向けて広域環境行政に役立つスケールアップ手法を検討して欲しい。今後は論文発表による成果の発信も進めてもらいたい。	その後、富岳を活用した広域CFD解析を実施し、暑さ指数の地域分布の検討を進めております。今後、関係部署とも連携を図りながら、論文の成果発信を進めてまいります。
計画通り進捗していると思われる。本研究では、暑熱リスクの増大に対し、それを低減する対策を提案するだけか。あるいは適応策まで考慮するのか。	適応策を考慮します。暑さ指数、人流がともに高い地域ではどちらかを低減することにより地域の温熱リスクは低減することになります。このような考え方をとりまとめに反映いたします。
開発される温熱シミュレータを用いて、最終段階では東京都が検討しているリスク低減方策のシナリオ解析を実施することが期待される。	世の中のデジタル化が急速に進む中で、スーパーコンピュータの行政利用も具体的に展開する兆しが見られるようになりました。将来的には、温熱シミュレータを用いて都のシナリオ解析に貢献できればと思います。
温熱シミュレータや人口流動データなどを用いることにより、都市のヒートアイランド現象の詳細な分析を可能としている。その結果、暑熱リスク低減につながることを期待される。ただし地域特性に応じた適応策への展開にはまだギャップがあると思われる。	地域の気候特性については、気象庁の5kmグリッド気候データのアーカイブを境界条件とすることで、例えば臨海部の風の特徴など対策に反映できるように工夫しております。地域によって効果の出方を検討して分析データを蓄積していく必要があります。
課題設定の捉え方において、行政推薦課室と研究者との間での認識の共有ができていない印象を持った。両者でのコミュニケーションをとり、活用方法等について改めて議論すべきである。	行政推薦課室には環境施策への成果反映の方針や留意点を提示させていただき、認識を共有するようにいたします。