

# 温熱解析と準リアルタイム混雑データを用いた 熱リスクの評価手法の提案

関 日菜々<sup>1</sup>・Alvin C.G.VARQUEZ<sup>2</sup>・足永 靖信<sup>3</sup>・仲吉 信人<sup>4</sup>・神田 学<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8522 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

E-mail: seki.h.ai@m.titech.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup> 正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (同上)

E-mail: varquez.a.aa@m.titech.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 国立研究開発法人建築研究所 (〒305-0802 茨城県つくば市立原一番地)

E-mail: ashie@kenken.go.jp

<sup>4</sup> 正会員 東京理科大学准教授 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: nakayoshi @rs.tus.ac.jp

<sup>5</sup> 正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒152-8522 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

E-mail: kanda.m.aa @m.titech.ac.jp

気候変動と都市化がもたらす社会及び健康への影響を緩和し適応するために熱リスク評価が必要である。そこで、本研究では、気象数値シミュレーションによって再現された温熱環境と、混雑状況をモニタリングしたビッグデータを融合し、消費者の総熱リスクを評価する新しい手法を提案した。具体的には、(1) 街区の温熱環境(=ハザード)、(2)移動に要する時間(=曝露量)、(3)店舗利用人数(=脆弱性)に基づき、ハザードと曝露量から個人の熱リスクを、脆弱性から人口集積リスクを定義した。さらに、個人の熱リスクと人口集積リスクを用いて消費者の総熱リスクを定義し、温熱環境と人口集積を考慮した熱リスク指標とした。この指標を用いた結果、ATM では、消費者の総熱リスクは個人の熱リスクに依存しやすいことが分かった。

**Key Words:** Numerical Weather Simulation, Heat Risk, Big Data, Google Populartimes, City Planning

## 1. 研究背景と目的

近年、気候変動およびヒートアイランドの進展が世界的に問題視されている。日本では、それに伴う熱中症被害も増加傾向にある<sup>1)</sup>。日本を熱波が襲った2018年7月には、東京だけで4,430人の方が熱中症により救急搬送され<sup>2)</sup>、日本全国では127人の方が熱中症により亡くなっている<sup>3)</sup>。このように、最夏期の高温は、深刻な気象災害とも言える状況であり、いかに気象災害に適応していくかが今後ますます重要な議論となってくるといえる。そのため、現在、適応策として人々の熱ストレスの低減を図ることが求められている<sup>4)</sup>。

そこで、空間的な熱中症発生のリスクを評価することが必要と考えられる。熱中症のリスクを街区レベルで評価するために、三坂ら<sup>5)</sup>は都心部での街路気温を同時多点により観測し、熱中症リスクの地域差を明らかにし

た。観測結果から、場所により気温のばらつきがあることが分かった。また、大手町を基準とした熱中症の予報に比べ、熱中症の危険性が高くなる地域があることが示唆された。さらに、大橋ら<sup>6)</sup>は数値気象モデルによるシミュレーションにより屋外熱中症リスクの評価を行い、熱中症リスク評価手法としての数値気象モデルの有効性を示した。しかしながら、どれもが熱中症を誘発しやすい環境を評価することだけにとどまり、その地域の人口集積との関連は示されていない。すなわち、現時点では、熱中症リスク評価は人口集積とは関連付けられていない。

そこで、本研究では、気象数値シミュレーションによって再現した温熱環境と、近年都市計画分野でも注目されているビッグデータ<sup>7)</sup>を組み合わせることで、人口集積を考慮した消費者の総熱リスクの評価を行うことを目的とした。曝露量・ハザード・脆弱性を組み合わせた新

たなりリスク評価指標を用いることで、従来の温熱環境のみを考慮した屋外の熱中症リスク評価ではなく、人の集積が考慮された、より実社会を反映する熱中症リスクの評価を行うことができると考えている。また、それにより、気候変動に対する適応策としての都市計画を効率的に進めていくための一助になるといえる。なお、本研究で用いている消費者の総熱リスクは、その地域にはどれくらい熱中症患者が出る可能性があるかを表す指標として用いている。すなわち、消費者の総熱リスクが相対的に大きい場合、その地域では他の地域に比べ、熱中症患者が出る可能性が高いことを示している。

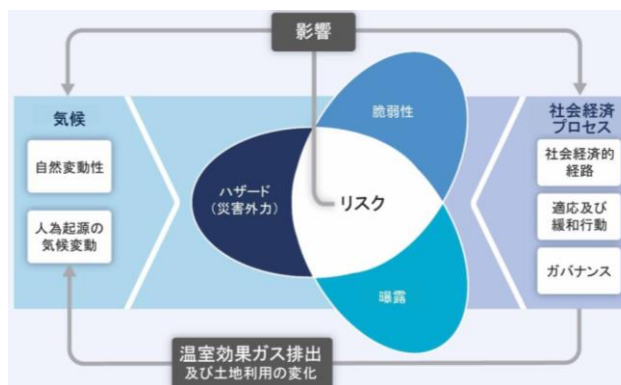


図-1 IPCC 第5次報告書に基づく  
ハザード・曝露量・脆弱性の関数としての気候リスク  
(図は環境省から引用)

## 2. IPCCにおけるリスク評価手法

本研究では、国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の「第5次評価報告書」<sup>8)</sup>に基づき、熱リスクが大きい地域の推定を行う。以下では、IPCCの「1.5°C特別報告書」<sup>9)</sup>に示されているハザード・曝露量・脆弱性及びリスクの定義を示す。

### (1) ハザード

人体、資産や生態系に損失を与える自然的・人為的な物理的事象や傾向。

### (2) 曝露量

悪影響を受ける可能性がある場所や環境に、生物や経済的、社会的、文化的資産が存在すること。

### (3) 脆弱性

悪影響を受ける傾向または要因。脆弱性には、危害に対処する能力や適応能力の欠如など、様々な概念を含んでいる。

### (4) リスクの定義

気候の影響評価の文脈では、リスクという用語は、気

候関連のハザード、適応策や緩和策が及ぼす悪影響を意味している。リスクは、脆弱性と時間の経過に伴う曝露量およびハザードとその発生可能性に起因している。

図-1に環境省によって作成されたリスク評価の模式図を示す。この図が示すように、ハザード・曝露量・脆弱性からリスクを求める。

## 3. 解析手法

本研究の解析フローを図-2に示す。まず、IPCCのリスク評価手法に基づき、ハザード、曝露量、脆弱性を定義する。次に、ハザードと曝露量から個人の熱リスクを、脆弱性から人口集積リスクを定義した。さらに、消費者の総熱リスクは個人の熱リスクと人口集積リスクを用いて定義している。

### (1) 使用したビッグデータ

本研究では、Googleが提供しているGoogle Populartimesを用いた。表-1には、本研究で用いたGoogle Populartimesの項目を記す。このデータは、スマートフォン利用者の

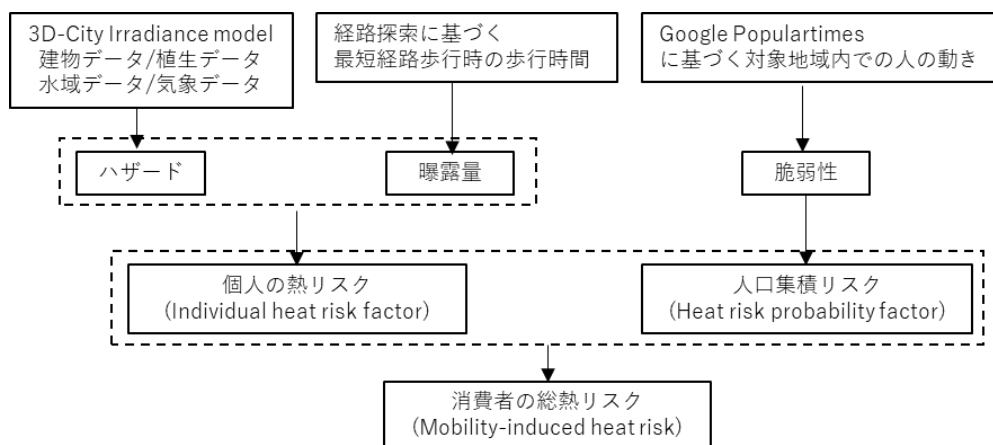


図-2 本研究の解析フロー

表-1 対象とした Google Populartimes のカテゴリー ( )の中はデータ数

評価カテゴリー						データ取得日
美術館(68)	ATM(229)	銀行(171)	本屋(55)	コンビニエンスストア (132)	ドラッグストア (52)	2020年2月18日
ショッピングモール (60)						2020年4月14日

位置情報を匿名化し、各施設の相対的な人口密度を曜日別時間別に集計したものである。例として、月曜日 10 時における本屋の Google Populartimes を図-3 に示す。このように、本屋、市役所やコンビニエンスストアなどの項目別に、どれくらいの人がある場所にいるかの情報を得ることができる。このデータは、誰でも簡単に取得することができ、汎用性が高いと考え使用した。最近では、Yoshida et al.<sup>10)</sup>がエネルギー需要の推定に用いている。

また、今回は、表-1 に示す通り、対象地域内のデータ数が比較的多い7つのカテゴリーのみ扱っている。なお、Google Populartimes は、人の密集度を 0~100 の値で示しており、この値は各カテゴリーだけでなく各店舗で基準となる値が異なる。本研究では、簡単のため、各カテゴリー内では、店舗が異なる場合でも等しい Google Populartimes の値であれば、等しい人数が集積していると仮定している。そのため、考察は各カテゴリーごとに行う。

## (2) 本研究における用語の定義

### a) ハザード

湿球黒球温度 (Wet-Bulb Globe Temperature : WBGT) とし、式(1)で定義した。

$$\text{ハザード}(H) = \text{WBGT}(x_i, y_i) \quad (1)$$

ここで、 $x$ および $y$ はそれぞれ東西方向と南北方向の位置を表しており、 $\text{WBGT}(x_i, y_i)$ はその位置における WBGT の値を表す。そのため、ハザードの単位は WBGT と同じく °C である。

WBGT は気温だけではなく湿度や輻射熱の影響も考慮しており、暑熱環境における運動や生活活動強度の指針になるものである。熱中症の危険を数値化した指標であるため、公的機関でも用いられている。表-2 に WBGT と運動および生活活動の目安<sup>11)</sup>を示す。本研究では、WBGT を求めるにあたり、足永らによって開発された 3D-City Irradiance Model<sup>12)13)</sup>を用いている。このモデルは、都市内の太陽放射や蒸発散のエネルギー収支を 3次元で計算することができる。このモデルを用いて得られた平均放射温度 (Mean Radiant Temperature : MRT) と千代田区内の北の丸公園の气象台で得られた風速、気温、相対湿度をもとに、WBGT を算出した。なお、それらのデータは対象地域全域で等しい値を用いている。

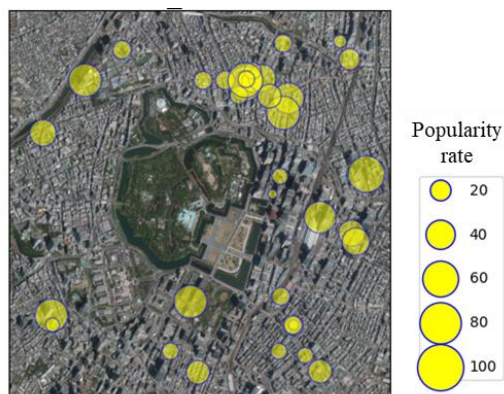


図-3 Google Populartimes (本屋/月曜日/10時)

表-2 WBGT と運動および生活活動の目安

温度基準(WBGT)	レベル (運動時)	レベル (日常生活時)
31°C以上	運動は中止	危険
28°C以上 31°C未満	嚴重警戒	嚴重注意
25°C以上 28°C未満	警戒	警戒
21°C以上 25°C未満	注意	注意
21°C未満	ほぼ安全	

### b) 曝露量

Google Populartimes によって得られたポイントから、最寄り駅の出入り口までの最短経路を探索し、人体が熱放射に晒される時間 (単位: 分) を、曝露量と定義し、以下の式で表す。そのため、曝露量  $E$  の単位も分である。

$$\text{曝露量}(E) = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} / v_{\text{walking}} \quad (2)$$

ここで、経路上をすべて徒歩で移動したと仮定し、その移動速度  $v_{\text{walking}}$  を 80m/分とした。発生場所ごとの熱中症による救急搬送状況<sup>14)</sup>を見てみると、住居や屋内が多く、その内訳は 65 歳以上が最も多くなっている<sup>15)</sup>。しかしながら、本研究の対象地域の大部分を占めている千代田区に流入する人は、観光客や通勤・通学の人が多く、対象地域内で徒歩での移動を伴うことが想定される。そのため、本稿では、徒歩での移動を仮定し曝露量を定義している。

### c) 脆弱性

人々がよく集まる場所では、熱中症などの温熱環境による健康被害が生じやすい。曜日別時間別の対象地域の人の集積度を見積もるために、Google Populartimes から得られるデータを用いた。

### d) 個人の熱リスク ( $HR_{Individual}$ )

個人が受ける熱リスクを示す指標である。ここでは、ハザードと曝露量を用いて、式(3)より算出される。そのため、個人の熱リスク  $HR_{Individual}$  の単位は  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{分}$  である。

$$HR_{Individual} = \sum EH =$$

$$\sum WBGT(x_i, y_i) \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} / v_{walking} \quad (3)$$

### e) 人口集積リスク ( $HR_{Probability}$ )

人がどの場所にどれだけいるかを示す指標である。ここでは、Google Populartimes の値を用いている。なお、本研究では月曜日の Google Populartimes を用いている。

### f) 消費者の総熱リスク

消費者が最寄り駅から店舗まで歩く際に生まれる熱リスクを、以下の式(4)によって定義する。

$$HR_{Mobility} = HR_{Individual} \times HR_{Probability} \quad (4)$$

これにより、人が多く集まり、より温熱環境が厳しい場所を熱リスクが大きい場所として評価できる。

## (3) 研究対象地域

本研究では、皇居を中心とした 3,774m×4,308m の領域を対象地域とした。この地域には、東京駅や新橋駅など観光客のみならず通勤に利用する人が多い地域、神田・秋葉原周辺などの観光客が集まりやすい地域、また飯田橋など学生が多く集まる地域が含まれており、様々な人を対象にした本研究に適していると考えられる。

## (4) モデルの設定

### a) 建物データ

株式会社キャドセンターが商業的に配布している 3 次元建物データ (MAPCUBE) を用いる。これは、水平方向に 1m の解像度があり、各グリッドには建物の正確な高さデータが含まれている。本研究では、2009年に作成された 3次元データを使用している。

### b) 植生データ

Googlemap から取得した地図データを用いて RGB データを作成し、緑の領域だけを取り出し、植生データとしている。なお、植生の高さは一定であると仮定しており、都内に街路樹として多く植えられている木々の高さを参

考に 16m としている。

### c) 水域データ

Google の標高データを用いて、海面高さよりも低いもしくは同じ場所を水域としている。なお、水温は一定であると仮定し、神田川での水温を参考にモデルのデフォルト値の  $26.85^{\circ}\text{C}$  を用いている。

### d) 気象データ

日本を熱波が襲った 2018 年 7 月 23 日の 10 時～16 時を計算対象とした。モデルの入力データは、千代田区北の丸公園内の気象台で観測された気温・相対湿度・気圧・全天日射量および風速を使用している。

## (5) WBGT の算出方法

屋外の WBGT (単位:  $^{\circ}\text{C}$ ) は式(5)で求められる。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_d \quad (5)$$

ここで、 $T_w$  は湿球温度、 $T_g$  は黒球温度、 $T_d$  は乾球温度である。単位はいずれも  $^{\circ}\text{C}$  である。 $T_d$  は気象台で観測された気温を用いている。

また、 $T_g$  は以下の式と  $T_d$ 、風速  $v$  (単位:  $\text{m/s}$ ) および 3D-City Irradiance Model から得られた MRT を用いて求められる。

$$MRT = T_g + 2.37\sqrt{v}(T_g - T_d) \quad (6)$$

さらに、 $T_w$  は  $T_d$ 、相対湿度及び Tetens の式(7)と Sprung の公式 (8)から求められる。

$$e_{sat}(T) = 6.1078 \times 10^{aT(T+b)} \quad (7)$$

ここで、 $e_{sat}$  は気温  $T^{\circ}\text{C}$  の時の飽和水蒸気圧 (単位: hpa)

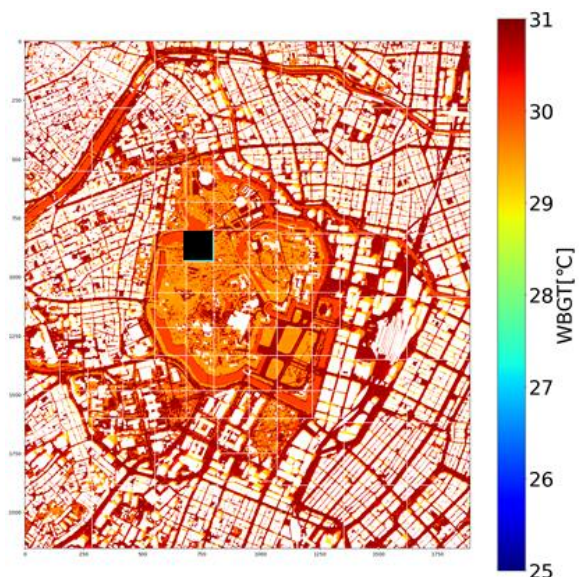


図4 2018年7月23日13時のWBGT分布

であり、 $a$ と $b$ はそれぞれ7.5と237.3の定数としている。

$$e_{sat}(T_w) - e = A \times P(T_d - T_w) \quad (8)$$

ここで、 $e_{sat}$ は湿球温度 $T_w$ °Cの時の飽和水蒸気圧（単位：hpa）、 $e$ は水蒸気圧（単位：hpa）、 $P$ は大気圧で1013hpaであり、 $A$ は0.000662の定数としている。

#### 4. 結果と考察

##### (1) 3D-City Irradiance model による温熱環境の再現

図-4 に日最高気温を観測した13時におけるWBGT分布の算出結果を示す。皇居内において黒く塗りつぶされている1メッシュでは、計算結果が得られていない。なお、これは消費者の総熱リスクの算出には影響していない。皇居内では、植生が多く、WBGTは他の地域と比較して低い値を示している。また、WBGTが28°C以上であると嚴重警戒もしくは嚴重注意であるが、ほぼすべての地域においてWBGTの値が28°Cを超えている様子が見受けられる。幹線道路において、その様子は顕著である。さらに、対象地域内の最高WBGT値および最低WBGT値は、それぞれ10時では29.1°C、27.3°C、13時では30.9°C、28.1°C、16時では29.7°C、28.5°Cとなっており、

熱中症を誘発しやすい環境となっていることが分かる。

##### (2) 消費者の総熱リスク

消費者の総熱リスクにおける個人の熱リスクおよび人口集積リスクの影響を考察する。ここでは、紙幅の関係上、消費者の総熱リスクの地域差が顕著であるATMについてのみ結果を述べる。図-5は、ATMの(a)個人の熱リスク、(b)人口集積リスクおよび(c)消費者の総熱リスクを示している。

東京駅周辺では、個人の熱リスクは比較的小さい値を示している。これは、東京駅周辺に多くの駅出入口があり、駅から目的地までの距離が短いため、ハザードと曝露量の関数である個人の熱リスクも小さくなったと考えられる。また、ATMの人口集積リスクは、個人の熱リスクとは違い、対象地域全体でほぼ同じ値を示している。これは、ATMの人口集積リスクに地域的な偏りが少ないことを示している。よって、東京駅周辺では、個人の熱リスクが小さいことで、個人の熱リスクと人口集積リスクの関数である消費者の総熱リスクも小さくなっていると考えられる。さらに、東京駅周辺以外でも、消費者の総熱リスクが小さいところが所々見受けられ、これも個人の熱リスクが小さいことに起因していると考えられる。

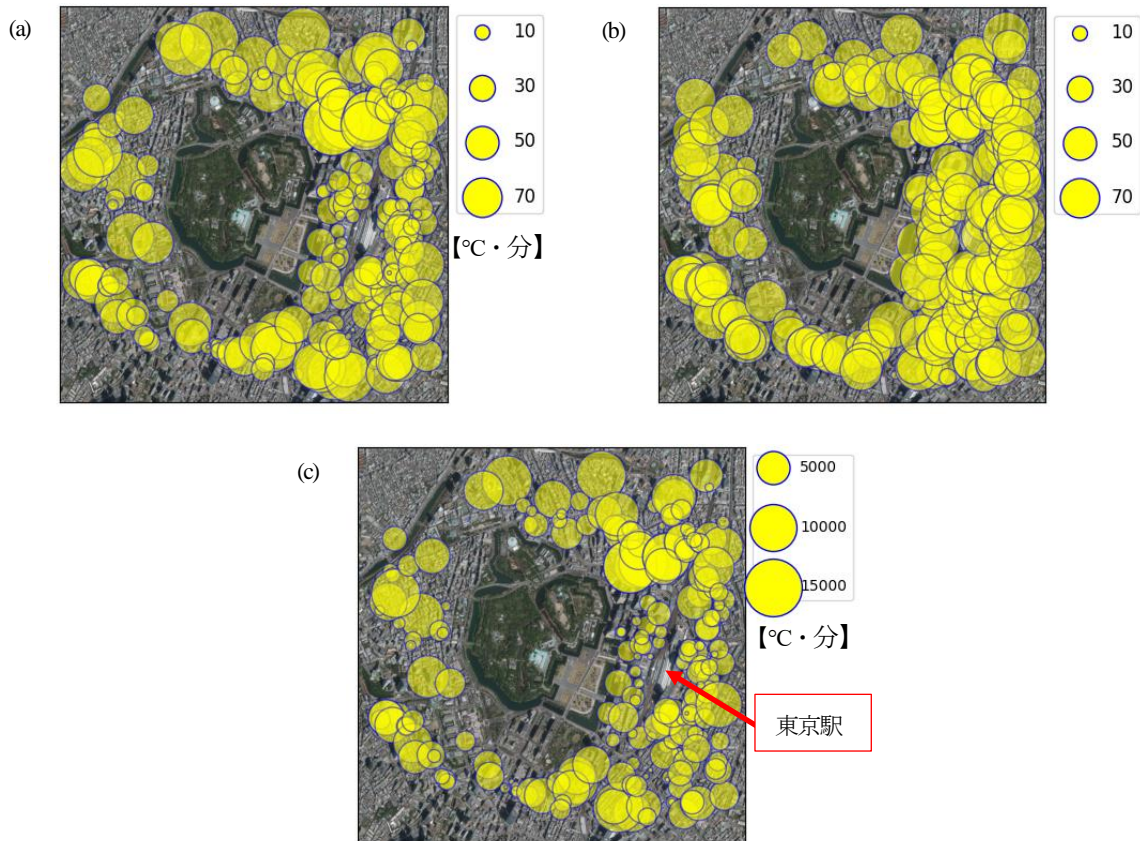


図-5 2018年7月23日13時のATMの  
(a) 個人の熱リスク (b) 人口集積リスク (c) 消費者の総熱リスク

## 5. まとめ

本研究では、気象数値シミュレーションにより再現された温熱環境と、混雑状況をモニタリングしたビッグデータを融合し、消費者の総熱リスクを評価する新しい手法の提案を行った。

ATM に関して、消費者の総熱リスクは個人の熱リスクに依存しやすいことが分かった。そのため、東京駅周辺では、個人の熱リスクが小さいことに起因して、消費者の総熱リスクが小さくなっていることが分かった。今回提案した熱リスク評価手法によって、消費者の総熱リスクの地域差を確認することができた。

しかしながら、Google Populartimes は同じ緯度経度の点において、複数のデータが取得されていることなど、データのエラーが多い。また、その値の取り扱いに関する仮定において、今回は各店舗の基準となる値を等しいとして評価したが、今後仮定の妥当性を検証していく必要がある。

さらに、今後、今回提案した手法の新たな手法としての妥当性の検討も行っていかなければならない。

**謝辞**：本研究は、文部科学省の科学研究費補助金基盤研究 (A) (課題番号：17H01292) による支援を受けた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 藤部文昭：暑熱（熱中症）による国内死者数と夏季気温の長期変動，*天気*，60，pp.371-381，2013.
- 2) 総務省消防庁，2018：都道府県別日別の搬送人員平成30年5-9月。
- 3) 東京都監察医務院，2018：7・8月の最高気温と熱中症死亡者数（平成30年）。
- 4) 環境省：ヒートアイランド対策マニュアル～最新状況と適応策等の対策普及に向けて～，2012.

- 5) 三坂育正，成田健一，：熱中症リスクから見た都心部の街路空間気温特性，*環境情報科学学術研究論文集*，26，pp.231-236，2012.
- 6) 大橋唯太，亀卦川幸浩，井原智彦：数値気象モデルを利用した屋外熱中症リスクの評価手法に関する研究，*環境情報科学論文集*，25，pp.335-340，2011.
- 7) J.Hao, J.Zhu, R.Zhong : The rise of big data on urban studies and planning practices in China : Review and open research issues, *Journal of Urban Management*, 4(2), pp.92-124, 2015.
- 8) 環境省：気候変動 2014 影響、適応及び脆弱性 政策決定者向け要約，2014.
- 9) IPCC : Annex I : glossary, Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Effects to Eradicate Poverty, 2018.
- 10) T.Yoshida, Y.Yamagata, D.Murakami : Energy demand estimation using quasi-real-time people activity data, *Energy Procedia.*, 158, pp.4172-4177, 2019.
- 11) 環境省：熱中症予防情報サイト 暑さ指数 (WBGT) とは？.
- 12) M.Bakkli, A.Inagaki, Y.Ashie, Y.Yoshida, M.Kanda, S.Raasch : Thermal large eddy simulation with sensible heat flux distribution from various 3D building geometries, *J. Jpn. Soc. Civ. Eng. Ser. B1*, 71(4), pp.433-438, 2015.
- 13) Y.Ashie, T.Kono : Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area, *International Journal of Climatology* 31(2), pp.174-188, 2011.
- 14) 消防庁：平成30年度 消防庁における熱中症対策，2018.
- 15) 環境省：熱中症環境保健マニュアル 2018 pp7，2018.

(Received June 30, 2020)

(Accepted August 28, 2020)

## EVALUATION OF MOBILITY-INDUCED HEAT RISK USING NUMERICAL WEATHER SIMULATION AND QUASI-REAL TIME CONGESTION DATA

Hinana SEKI, Alvin C.G.VARQUEZ, Yasunobu ASHIE, Makoto NAKAYOSHI and Manabu KANDA

Heat-risk evaluations are needed by societies for adapting to and mitigating the social/health impacts attributed to climate change and urbanization. Meanwhile, big data and numerical models are advancing.

In this study, we propose an integrated approach to utilize both big data and existing models for estimating heat-related risk. By combining products of a 3D-City irradiance model and Google big data services, a geospatial framework for mapping heat-related risks(Hazard×Exposure×Vulnerability) was developed. Hazard and exposure(individual HR factor) were estimated using thresholds of wetbulb globe temperature(WBGT) and mobility from frequented locations to nearest station exits; Vulnerability(HR probability factor) was estimated using popular times of frequented locations. Through this framework, multiple perspectives for understanding heat risks may be observed at various districts. For example, ATMs were found to have high heat risks mainly because of its high HR probability factor.