

平成 30 年 5 月 13 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04066

研究課題名(和文) 多様な人びとの健康に配慮したまちづくりのための熱環境の人体影響評価と改善提案

研究課題名(英文) Evaluation of impact of thermal environment to human bodies and proposal of its improvement for urban planning considering health of diverse people

研究代表者

花木 啓祐 (HANAKI, Keisuke)

東洋大学・情報連携学部・教授

研究者番号：00134015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,500,000円

研究成果の概要(和文)：街区規模の気象モデルと人体の熱収支モデルを組み合わせ、街区の植生や放射環境の変化および歩行者の属性の相違が健康に与える影響を評価することを可能にした。人びとが感じる主観的暑さを社会調査によって調べ、それは肥満度に依存しない一方、通勤用の服装による増大や、年齢による相違があることがわかった。人体影響-街区熱環境-メソスケール気象モデルを組み合わせた解析を行い、人体の温熱感に与えるさまざまな規模の気象状態や着衣の影響を定量的にモデル化した。救急搬送データに基づき、熱中症の健康影響を障害調整生存年の損失として定量的に評価したところ、比較的低温域での熱中症の健康リスクも大きいことが示された。

研究成果の概要(英文)：District scale meteorological model and human heat balance model were combined to evaluate impact of vegetation and radiative environment of the district and human characteristics on the health of pedestrians. Questionnaire survey on people's thermal sensation with various people showed that thermal sensation did not depend on fatness whereas clothes for commutation raised feeling of hotness, and there is the difference among age groups. Analysis using combination of human heat balance, district scale and mesoscale meteorological models quantitatively showed the impact of meteorological condition with various scale and clothes of the people. Analysis of emergency hospitalization data showed that quantitative evaluation of risk with using DALY is useful to evaluate the health impact at relatively low temperature range.

研究分野：都市環境工学

キーワード：都市環境 ヒートアイランド 熱中症 健康

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、夏季の熱中症が健康リスクとして重要視されており、救急搬送数が増えている。さらに、各地で今後予想される気候変動による気温上昇は状況を悪化させる。一方、まちづくりにおいては人びとの健康が重要項目となり、街区の熱環境は重要な考慮対象事項になっている。

(2) 熱中症の要因である気温、通気、日射、建物や道路からの熱放射などは、街区の影響を受ける。一方、発症可能性は、年齢、性別、体型など、人間側の状況によって異なる。健康に暮らせるまちづくりを実現するためには、熱中症発症のリスクと街区構造の間の関係を、個人差を勘案しながら解析することが必須である。その際、気象モデルと人体熱収支モデルを組み合わせた解析が有効と考えられるが、それぞれのモデルに改善の余地があることもあり、これらを組み合わせた既存のモデル研究は十分ではない。

2. 研究の目的

年齢、性別、体型が異なる多様な人びとが多様な活動状態（服装、歩行、運動、休息）で屋外に滞在する時の健康への熱環境の影響を評価し、まちづくり面からの改善策の効果を評価する。メソスケールおよび街区規模の熱環境モデル、人体熱収支モデルを改良して用いる。各属性の人ごとに問題となる熱環境リスクの場所、状況、滞在時間を標準的に設定し、モデル計算を行う。一方で被験者を用いた実測データに基づき、街区熱環境の空間分布、人体への生理学的な影響とモデルの適合性を確認する。また、熱中症に関する疫学データを解析する。これらに基づきさまざまな人びとへの熱環境影響を明らかにし、健康配慮型まちづくりに資する。

3. 研究の方法

(1) 街区熱環境が与える健康影響のモデル解析

街区の熱環境を表現するモデルとして ENVI-met を使い、一方熱環境に対する人体の応答を表すモデルについては、Gagge の 2-node モデルを、日本人の体型や代謝に合わせてパラメータを修正するなど、改良したものをを用いた。

東京都内の対象地域として①緑が多い都市街区として東大本郷キャンパスの工学部エリア（東大）、②中高層業務・商業街区として神田錦町（神田）、③低層住宅街区として文京区西片二丁目（西片）を対象とした。それぞれの計算領域（タテ×ヨコ×高さ、m）は 240 x 240 x 100, 160 x 160 x 80, 80 x 80 x 25 で、水平解像度はそれぞれ 3, 2, 1 m であった。それぞれの街区の建物形状の情報を Zmap-TOWN II から得て入力した。

本研究開始前の 2014 年夏にこれらの 3 街区を対象に 20 歳代男性（各街区 4 名ずつを

2 回）に対して実施した屋外歩行に対する人体熱生理応答実測実験、年齢と性別を変化させた被験者を対象にして 2015 年 3 月に実施した恒温室における人体熱生理応答実測実験のデータをモデル解析に用いた。

屋外実験を実施した日の観測データに基づき、本郷、神田、西片の風速を、1, 1, 2 m/s、気温を 30.0, 28.0, 30.0℃、雲量を 2/8, 6/8, 1/8 としてモデル計算を行った。

(2) 街区内での各属性の人びとの行動パターン解析

熱中症リスクになり得る屋外暑熱環境における外出行動の実態を捉える事を目的とした社会調査を実施した。

設計した質問項目は表 1 に示したように個人属性（a～f）と外出行動（g～t）に関するものの 2 種類に大別出来る。個人属性は、1 人につき一度のみの回答とし、外出行動に関しては、外出するたび回答する設定とした。

表 1. 調査票における質問項目の設定

a)年齢・性別	d)暑がりの程度
b)居住地	e)未就学児の有無
c)生活活動強度	f)身長・体重
g)5分以上外出の有無	n)外出時の主な状態
h)外出目的	o)服装・靴・足下
i)目的地	p)使用日除け道具
j)外出した時間帯	q)乳幼児同伴の有無
k)屋外滞在総時間	r)日陰の有無
l)主な天気	s)水分補給について
m)風の有無	t)主観的温熱感

調査は東京 23 区に居住する 15 歳～79 歳の男女とし、5 分以上外出をした際に回答するものとした。一般的に熱中症リスクの高いと言われている子どもと高齢者に着目して外出行動を把握するため、家族内に未就学児がいるもの、および 60 歳以上の回答者数を多めに設定した。調査は 2016 年 9 月 14 日（水）から 9 月 17 日（土）の連続した 4 日間に実施した。この間、2 日目と 3 日目は雨が降り、全体的に気温もやや低かったことから、同じ回答者に対して、翌年の 2017 年 8 月 29 日（火）30 日（水）の 2 日間に、各日において最も暑いと感じた外出 1 回について回答を求める調査を追加的に実施した。

表 2 調査時における気象概況（東京）

年	月日	降水量 合計 mm	最高 気温℃	平均 気温℃
2016	9/14	<0.5	26.6	23.1
	9/15	24.0	26.4	24.1
	9/16	3.5	24.4	22.9
	9/17	0.0	29.4	25.3
2017	8/29	0.0	32.2	28.7
	8/30	2.0	32.9	27.7

これらの調査対象日における気象概況を表 2 に示す。

### (3) メソスケール熱環境と街区熱環境の相互関係分析

近年、都市気象モデルは、気象計算のみならず、屋外にて人体表面に生じる放射・熱収支を発汗等の熱生理過程までを加味し計算できる人体熱収支モデル (HBM) との結合がなされつつある。本研究では、その種の数値モデルとして、米国の最新メソスケール気象モデル WRF に独自開発した街区規模の都市キャノピー・建物エネルギー連成モデル (CM-BEM) を組み込み、更に人体熱生理の代表的モデルである Gagge の HBM を結合し、マルチスケールの熱環境モデル (以降 WRF-CM-BEM-HBM) を構築した。この HBM は、温度や風速等が制御された室内実験での検証例は多く存在するが、気象条件が複雑に変化する街区空間での検証例に乏しい。そこで、前述の本郷、神田、西片の 3 街区の実測データを用いて、メソスケールと街区規模の熱環境の相互関係を模擬可能な WRF-CM-BEM-HBM について、熱環境による人体影響評価への適合性の検証を試みた。

### (4) 街区熱環境と生理応答の解析

熱中症は近年急増しているが、気温上昇や高齢化が要因として示唆されている。そこで、東京 23 区と大阪市を対象に、2004–2009 年と 2010–2015 年の 5–9 月における日別の救急搬送率と日最高気温の関係を解析することで、気温上昇の寄与を分析した。なお、救急搬送率は、日別の救急搬送数を推計人口で除算することによって求めた。また、厚生労働省による年齢調整死亡率を参考に、2005–2015 年の年齢調整搬送率を計算し、年次比較と都市間比較をおこなうことで、高齢化の寄与を分析した。年齢調整搬送率は、昭和 60 年モデル人口における年齢区分に基づいて年齢別搬送率を加重平均したものである。

一方、熱中症の解析には、上述の救急搬送数のほか、死亡数も用いられる。救急搬送数と死亡数は、日最高気温などの温熱指標と、それぞれ別個に解析されているため、全体として熱中症リスクがどのようであるかは不明である。そこで、寿命ロスと健康ロスの双方が評価可能である障害調整生存年 (disability-adjusted life year, DALY) で熱中症リスクを表現し、DALY と日最高気温の関係を解析することで、熱中症リスクを包括的に表現した。なお、寿命ロスは、死亡者に死亡者の損失余命 (平均余命 (男性 80 歳、女性 82.5 歳) と死亡時年齢の差分) を乗算することで求めた。健康ロスは、重症度別救急搬送数に、各重症度の重篤度と罹患期間 (年) (軽症 (0.081,  $4.97 \times 10^{-3}$ )、中等症 (0.237,  $1.13 \times 10^{-2}$ )、重症 (0.463,  $1.64 \times 10^{-2}$ )) を乗算することで求めた。

## 4. 研究成果

### (1) 街区熱環境が与える健康影響のモデル解析

#### ① 人体エネルギー収支モデルの改良

屋内および屋外で実施した人体の生理応答に関するデータを用いて、従来のモデルと改良モデルで算出される皮膚温度を比較したところ、二乗平均平方根誤差および相関係数の向上が見られた。これらのことから、人体への熱環境の影響を評価するにあたっては、従来の 30 歳代の西洋人男性のみを想定した計算ではなく対象となる人の特性を反映する必要性が明らかになった。

#### ② 連成モデルによるシミュレーション

街区の熱環境の場を気象モデルで再現し、そこを人間が歩行した場合の人体への生理影響をモデルによって評価した。さらに、その街区に対して熱環境に影響を与える要素を変化させたときの人体への影響をモデルで評価した。

一例として、現状で緑被が多い東大において緑被を取り除いた場合を示すと、その地区の放射温度の変化は図 1 のように上昇、すなわち悪化する。

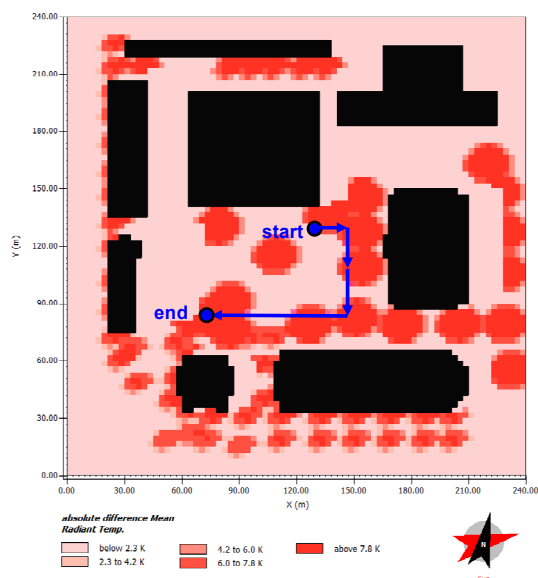


図 1. 緑被が失われた場合の放射温度の上昇の予測

この街区中を図 1 中の青矢印に沿って 60 歳代の女性が歩行した場合の平均皮膚温のシミュレーション結果を図 2 に示す。

BMI (肥満度) の違いによる効果と緑被の有無による効果が同程度であること、発汗量に対しては、緑被の効果よりも BMI の相違の方が大きな影響を与えることが示された。次に高反射性の壁面または道路の効果を業務・商業地区の神田を対象に評価し、これらが屋外の放射環境を悪化させることを示した。特に道路が狭い地域では高反射性壁面による放射温度の上昇が大きく、高齢女性の場合その影響による平均皮膚温度の上昇が大きいことが示された。

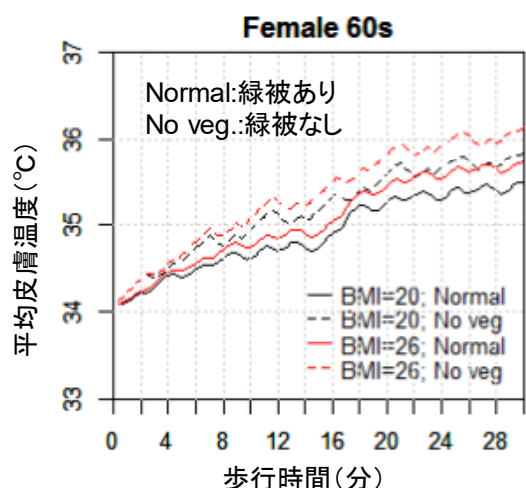


図 2. 対象街区を歩行した場合の皮膚温度の上昇シミュレーション (BMI が 20 と 26 の 60 歳代女性の場合)

これらのことから、熱環境が人体に与える影響を評価する際には、年齢、性別、肥満度などを勘案し、とりわけ影響を受けやすい人びとへの影響を評価することが必要であることがわかった。

(2) 街区内での各属性の人びとの行動パターン解析

調査の対象とした外出時に、回答者が暑く感じたか、という主観的評価（以下主観的温熱感と表現する）については、「とても暑かった」～「全く暑くなかった」の 6 件法により尋ねている。「とても暑かった」を 6 点として各調査日における平均値を求めると表 3 のようになり、各調査時の平均気温と対応が取れている。

表 3 主観的温熱感スコア平均値

年	月日	回答数 (2016 年 は延べ)	主観的 温熱感 スコア平均値
2016	9/14	242	2.69
	9/15	219	2.69
	9/16	209	2.64
	9/17	240	3.44
2017	8/29	239	4.91
	8/30	2.0	4.62

ついで、このような主観的温熱感に影響を与えた因子を特定するために、まずは 2016 年に取得した 4 日間のデータにつき重回帰分析を行った。上述した主観的温熱感スコアを被説明変数とし、生活活動強度、BMI 値、性別年齢、外出目的、外出時間帯、天気（主観的評価）、外出時の主な状態、外出時の服装（上半身）、（足下）を説明変数としてステップワイズ法により分析を行った。表 4 にその結果を示す。

表 4 主観的温熱感への影響因子

	9/14	9/15	9/16	9/17
天気	0.227	0.306		0.511
通勤通学(行き)	0.153			
外食				-0.136
訪問				0.116
屋外ベンチャー			0.185	
長袖	-0.137			
長袖(ジャケット)	0.127			
ストッキング	0.145	0.159		
レギンス/トレカ	0.107			
裸足				-0.158
走り	0.123			
その他の状態		0.117		
5 時台	-0.116			
8-9 時台				0.175
11-12 時台				0.159
13-15 時台				0.111
21-22 時台		-0.116		
男性 10 代	-0.269	-0.220		-0.323
男性 20 代	-0.227	-0.240	-0.169	
男性 30 代				-0.127
男性 40 代			0.321	
女性 10 代				-0.163
女性 20 代	-0.198	-0.217		
女性 30 代	-0.292	-0.261	-0.246	
女性 40 代	-0.240	-0.241		
R <sup>2</sup> 値	0.372	0.314	0.241	0.462

当初は、BMI や対象者が暑がりかどうかによって主観的温熱感に影響を受けるのではないかと推測したが、これらの因子はモデルからは除外され、主観的な温熱感の評価は、これら身体的特徴からの影響を受けないことが明らかとなった。全体として、対象日の天気の影響が大きくなっていた。また、平日(14 日)の場合には、通勤通学でのジャケットやストッキングの着用などが主観的温熱感を高める影響をもたらしていた。性別、年齢の影響も大きく、調査日によりばらつきはあるが、男性の 10 代～30 代、女性の 10 代～40 代で負値の係数となった。男女ともに 50 代～70 代が説明変数から除去されており、これらの年代は暑く感じやすくも感じにくくもないという結果となった。環境省の熱中症環境保健マニュアル(2014)によると、高齢者は皮膚の温度感受性の鈍化が進み、温度調節機能も鈍くなるので、熱中症リスクが高いとされている。50 代～70 代の変数が除去されたことは、この皮膚の温度感受性の鈍化が進んでいる為ということも考えられた。

(3) メソスケール熱環境と街区熱環境の相互関係分析

神田および西片の計測結果より、人体温冷感を左右する温熱 6 要素（気温・平均放射温度・風速・湿度・着衣量・代謝量）の実測値を HBM に入力し、まず HBM 単体での人体熱生理表現の妥当性を検証した。その結果、

HBM は被験者の発汗量と皮膚温度の実測値を概ね再現した。皮膚温度については二乗平均平方根誤差(RMSE)でみて、1°C未満の誤差で再現可能であった。

次に、気温や日射量等の気象・熱環境要素の予測において生じる誤差の影響も加味し、WRF-CM-BEM-HBM による人体温冷感や熱生理表現のモデルシステム全体での精度を解析した。前述の温熱 6 要素の内、人体側要素の着衣量・代謝量は実測のままとし、それ以外の気候 4 要素について実測ではなく WRF-CM-BEM による計算値を採用した場合の HBM による生理要素や温冷感指標の計算結果の妥当性を検証した。その結果、実測と比べた皮膚温度の再現性は RMSE でみて 0.6°C 程度であり良好であった。加えて、体感温度の代表的指標である新標準有効温度 SET\*についても、気候 4 要素を実測でなく計算値で与えた場合の誤差は RMSE で 3°C 未満であった。SET\*は温冷感と快適感を 5°C 刻みで表現する体感温度指標であることから、上述の 3°C 未満の誤差は SET\*を予測する実用モデルとして WRF-CM-BEM-HBM が致命的ではない誤差範囲内の精度を有するモデルである事を示唆した。また、以上の解析では、SET\*の算出値は、気候 4 要素の中で風速とそれに次いで平均放射温度に対し大きな感度を示した。この事から、メソスケールと街区規模の熱環境の相互関係を模擬可能な WRF-CM-BEM-HBM による人体への熱的影響評価の精度改善に向けては、特に風況と放射に関連する気象計算の精度改善が重要である事が示された。

#### (4) 街区熱環境と生理応答の解析

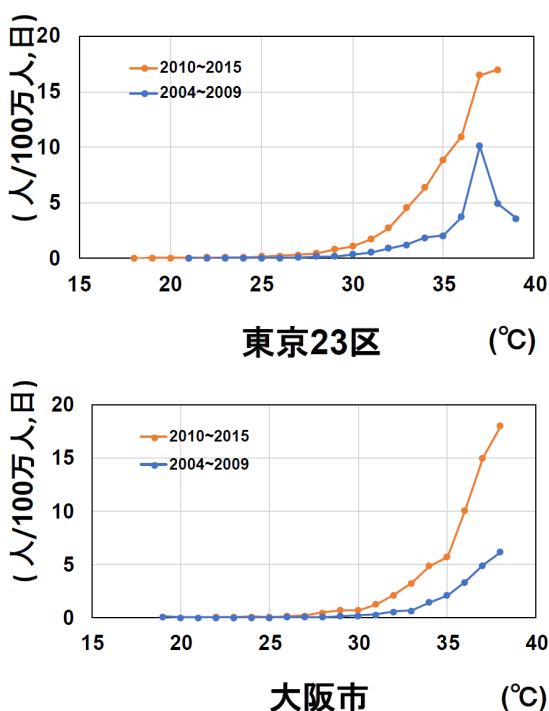


図 3. 2004-2009 年と 2010-2015 年の東京 23 区と大阪市における日最高気温 1°C ごとの平均搬送率

2004-2009 年と 2010-2015 年の東京 23 区と大阪市における日最高気温 1°C ごとの平均搬送率を図 3 に示す。2010 年に熱中症は急増し、この間、東京は気温上昇(猛暑日日数が約 30 日増)したが、大阪の気温上昇量は小さい(同約 10 日増)。両期間の平均搬送率と日最高気温の関係より、日最高気温が上昇すると救急搬送率が増加するが、同じ日最高気温でも近年の方が搬送率が大きかった。

東京 23 区と大阪市の年齢調整搬送率の経年変化を図 4 に示す。高齢者ほど熱中症リスクが高まることは知られているが、人口構成変化の影響を除いても両都市において 2010 年以降の搬送者数の増加は顕著であった。そのことから、近年の急増は気温上昇と高齢化だけでは説明できないことがわかった。

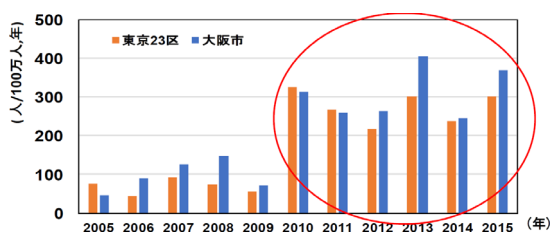


図 4. 2004-2015 年の東京 23 区と大阪市における年齢調整搬送率の推移

日最高気温と熱中症救急搬送数、死亡数、および DALY の平滑化スプライン回帰分析結果を図 5 に示す。DALY は救急搬送数・死亡数に比べ、増加し始める日最高気温が低いことがわかった。日最高気温が 25~30°C では DALY に小さなピークが見られ、30~49 歳の死亡が反映されていた。これらは労作性の熱中症と想定され、DALY は低温域の熱中症リスク評価に有効な指標と示唆された。

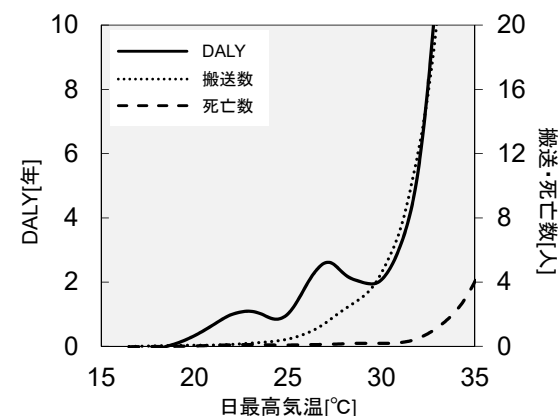


図 5. 東京 23 区における日最高気温と熱中症救急搬送者数、熱中症による死亡数、熱中症の DALY の関係。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Reuben Li, Keisuke Hanaki and Kiyoko Kurisu (2016): Anthropometric and demographic differences in human

thermophysiology under light activity,  
Journal of Human-Environment Systems,  
Vol. 19, No. 1, 13-22.

[学会発表] (計3件)

- ①橋本侑樹, 井原智彦. 熱中症リスク評価指標としての障害調整生存年(DALY)の検討. 日本気象学会2017年度秋季大会講演予稿集, p.567, 2017年10月.
- ② Hashimoto Y, Ihara T. Calculating disability-adjusted life years (DALYs) for heat related illnesses due to urban heat island in Japan. 21th International Congress of Biometeorology (ICB 2017), Durham University (Durham, England), 2017年9月.
- ③小楠智子, 橋本侑樹, 井原智彦. 熱中症による搬送の気象的・社会的要因分析. 日本ヒートアイランド学会第12回全国大会予稿集, pp.136-137, 2017年7月.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

花木 啓祐 (HANAKI, Keisuke)  
東洋大学・情報連携学部・教授  
研究者番号：00134015

### (2) 研究分担者

栗栖 聖 (KURISU, Kiyō)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号：00323519

亀卦川 幸浩 (KIKEGAWA, Yukihiro)  
明星大学・理工学部・教授  
研究者番号：20409519

井原 智彦 (IHARA, Tomohiko)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授  
研究者番号：30392591