都市・建築空間における車いす使用者の主体的行動支援のための体温予測に関する研究

○堀 慎輔^{*1} 土川 忠浩^{*2} 田村 康子^{*1} 藏澄 美仁^{*3}
大和 義昭^{*4} 松原 斎樹^{*5} 堀越 哲美^{*6}

キーワード: 脊髄損傷者,車いす,体温調節モデル,屋外空間,日射受熱量

1. はじめに

車いすに乗車した脊髄損傷者(以下、車いす使用者と する)が生活する社会において、バリアフリーやユニ バーサルデザインの概念は浸透してきたと考えられ、関 連研究も多くみられる。しかし、車いす使用者の体温調 節に関する研究は未だ少ない。車いす使用者の多くは高 齢者や障碍者(特に脊髄損傷者)等のいわゆる環境弱者 であり、温熱感覚や体温調節機能の低下・欠如によって、 無自覚のうちに高温環境ではうつ熱、寒冷環境では低体 温となる可能性がある。本研究では、車いす使用者の生 理反応のシミュレーションを行い、安全な生活を支援す るような可能性について検討することを目的とする。

著者らはこれまでに、車いす使用者の体温調節生理反応の予測が可能な体温調節モデルに関する研究を行なってきた。¹¹²¹³¹体温調節モデルの作成には様々な係数値・物性値が必要であると考えられ、著者らは車いす乗車人体に関する有効放射面積及び形態係数⁴¹、対流・放射熱伝達率⁵¹⁶¹、日射投影面積率⁷¹⁸¹の測定を行なっている。 また、脊髄損傷者を対象とした体温調節反応の測定実験⁹¹を行なっている。

本報では、上記の実験・実測から得られた係数値・物 性値を用いて、体温調節モデルの熱収支式に変更を加 え、モデルの拡張を行ったので報告する。また、拡張し た体温調節モデルによるモデル計算値と被験者実験によ る実測値との結果の比較を行なう。さらに、車いす使 者の外出や社会参加を支援するために開発した体温予測 提示システムについても報告する。

2. 車いす使用者の体温調節モデル

体温調節モデルとは、体内及び体表面における熱産生 や熱交換、体温調節制御を数式によりモデル化したもの である。数式計算により、体温等の生理反応の分布につ いての経時変動を求めることが出来る。提案者により、 各部位の形状、部位分割数、部位内の層分割の仕方は様々 である。本研究では、拡張が比較的容易である Gagge¹⁰⁾ 及び Stolwi jk¹¹⁾ モデルを拡張した車いす使用者の体温 調節モデル¹¹³⁾ について検討を行う。なお、拡張 Gagge モデルは人体を2層(深部層,皮膚層)から成る球体と みなしたモデル、拡張 stolwi jk モデルは人体を左右 13 の部位に分割し(頭部,頸部,胸部,背部,腹部,腰部, 臀部,上腕部,前腕部,手部,大腿部,下腿部,足部) 、それぞれの部位が4層(深部層,筋肉層,脂肪層,皮 膚層)から成るモデルを示す。

2-1. 車いす乗車人体の放射面積率及び形態係数

車いす乗車人体と周辺環境との熱交換に基づく、熱 放射授受算定に必要な係数値である有効放射面積率 A_{eff} および空間構成面との間の形態係数 $\phi_{(s-Fi)}$ において、 放射面積率については土川⁴⁾ ら、形態係数については Fanger¹²⁾の文献を参考にした。なお、車いす乗車人体に 関する放射の研究は少なく、車いす乗車人体の部位によ る特性を考慮した有効放射面積率や、車いす乗車人体と 無限地平面との間の形態係数については検討されていな い。そこで、今回は Gagge モデルの拡張モデルについて のみ熱放射授受の項である天空日射量 J_{sh} および反射日 射量 $J_{r,\theta}$ による受熱量の項 ($Q_{sh}, Q_{r,\theta}$)を熱収支式に組み 込んだ。(式7,式8)

2-2. 車いす乗車人体の日射投影面積率について

屋外空間において車いす乗車人体が受ける直達日射に よる日射受熱量 Q_{dn} の算定に必要な係数値である日射投 影面積率 A_pについては、著者ら⁷⁾⁸⁾の測定した値を使用 した。著者らは、車いす乗車人体に関して、部位を考慮 した投影面積率 A_pを算出しているため、直達日射量に よる受熱量の項 Q_{dn} は Gagge 及び Stolwijk モデルの拡張 モデル¹⁾³⁾の熱収支式に組み込んだ。(式 6)

2-3. 車いす乗車人体の対流・放射伝達率

屋外温熱環境において、人体は皮膚表面および着衣表 面において環境との顕熱交換を行う。顕熱交換量の算定 に必要な対流熱伝達率および放射熱伝達率は皮膚表面及 び着衣表面でそれぞれ値が与えられている。今回は、永 田ら⁶⁰が測定した、実際の人体を対象として風速と風 向の影響を考慮した車いす乗車人体の各部位の対流・放 射熱伝達率の値を用いた。

2-4. モデルに組み込んだ数式

上記に示した、日射による人体の受熱量に関する式を 示す。

 $J_{dn} = J_o \cdot \mathbf{P}^{\frac{1}{\sin(h)}} \tag{1}$

$$J_{dh} = J_{dn} \cdot \sin(h) \tag{2}$$

$$J_{sh} = \frac{1}{2} \cdot J_o \cdot \sin(h) \cdot (1 - P^{\frac{1}{\sin(h)}}) / (1 - 1.4lnP)$$
(3)

$$J_h = Jdh + Jsh \tag{4}$$

$$J_{r\theta} = \varphi_{(S-Fi)} \cdot \rho_G \cdot J_h \tag{5}$$

$$Q_{\rm dn} = J_{dn} \cdot a \cdot A_p \tag{6}$$

$$Q_{sh} = J_{sh} \cdot a \cdot A_{eff} \tag{7}$$

新幹線 食堂 自宅 ①移動 タクシー 2移動 駅待合室 ①ホーム ③移動 ④移動 乗車 (食事) 気温[℃] 24.1 22.3 19.8 17.8 15.8 12 21 14.3 18 20.7 湿度[%rh] 37 35 39 34 37 43 43 28 28 37 日射条件 × х х × х × × × х Ο

表 1.	モデル計算シ	/ミュレーシ	'ヨン設定条件	(ステップ	変動条件)
------	--------	--------	---------	-------	-------

	試合観戦	⑤移動	喫茶店	温かい 飲み物を飲む	⑥移動	切符売場	⑦移動	②ホーム	新幹線 乗車	⑧移動	バス乗車	⑨移動	②自宅
気温[℃]	12.35	11.9	11.5	19.6	23.5	19.4	16.7	17.9	13.6	21.2	20. 2	14.7	15.6
湿度[%rh]	45	46	47	37	30	31	37	34	43	41	30	37	41
日射条件	×	0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

$Q_{r\theta} = J_{r\theta} \cdot a \cdot A_{eff}$	(8)
$Q_{sr} = Q_{dn} + Q_{sh} + Q_{r\theta}$	(9)

【記号】

J_o:太陽定数 [W/ m²], P:大気透過率 [-], h:太陽高度角 [°], J_{dn}: 直達日射量 [W/ m²], J_{dh}:水平面直達日射量 [W/ m²], J_{sh}: 天空日射量 [W/ m²], J_h:水平面全日射量 [W/ m²], J_r_θ:反射 日射量 [W/ m²], φ_(S-Fi):人体 (S) と空間構成面 (Fi) との形態 係数 [-], ρ_G: 地表面の日射反射率 [-], a:人体の日射吸収率 [-], A_p:人体の日射投影面積率 [-], A_{eff}:人体の有効放射面積 率 [-], Q_{dn}: 直達日射による受熱量 [W/ m²], Q_{sh}: 天空日射によ る受熱量 [W/ m²], Q_r_θ: 反射日射による受熱量 [W/ m²], Q_{sr}: 日射による受熱量 [W/ m²]

3. 被験者実験による実測値と体温調節モデルによる計 算値との比較

著者は、定常環境条件での被験者実験による実測値と 体温調節モデルによるモデル計算値の比較について報告 している。既報³⁾では、被験者耳内温の実測値とモデル 計算値の頭部深部温度について行なっている。比較の結 果、高温環境および低温環境にみられる深部温度の上昇 および下降の傾向は概ね予測できていると考察された。

そこで、本報では非定常環境下での被験者実測値と非 定常条件をステップ変動の条件として計算したモデル計 算値の頭部深部温度(実測値は耳内温を比較の対象とす る)との比較を行い、モデル計算値の予測精度について 考察を行なう。被験者実測は、2011年に田村ら⁹⁾が行っ た頸髄損傷者を対象とした、冬季屋外環境における生理 量測定の結果を用い、この実測の条件を参考に、ステッ プ変動のシミュレーション条件を設定した。シミュレー ション設定条件および被験者の概要を表1、表2に示す。 3-1. 結果

被験者実測値(耳内温)とモデル計算値(頭部深部温度)の変動量を図1,2に示す。なお、結果を午前・午後 に分けて示した。モデルは上記に記載した、有効放射面 積率及び形態係数、投影面積率により算出した日射授熱 を考慮した式および対流・放射伝達率の変更を入力した 条件、計6条件のモデルについて計算を行った。体温調 節モデルの条件を表3に示す。なお、Gagge モデルを拡 表 2. 被験者概要

被験者	年齢	身長[cm]	体重[kg]
	42	167	約50
頸損者男性	損傷レベル	麻痺	受賞後経過年数
	C5	完全※	18年

※体温調節モデルでは調節性発汗および血流調節が起こらないものとする

表 3. 体温調節モデル条件
(1) DRM
②DRM(直達日射考慮)
③DRM(直達日射および伝達率考慮※1)
(4)TNM
⑤TNM(日射※2考慮)
⑥TNM(日射※2および伝達率考慮※1)
※1 直達+天空+反射日射による受熱量を入力して計算
※2 永田らの対流・放射熱伝達率を入力して計算

張したモデルを TNM(Two Node Model)、stolwijk モデル を拡張したモデルを DRM(Dermatome Model)と表記する。

3-1-1. 被験者実測値とモデル計算値との比較

測定開始時[①自宅~①ホーム]では、実測値は変 動がほとんどなく安定している。また、TNMの計算値は 実測値といい一致を示しているが、DRMの計算値は最大 2℃程度下降している。これは、被験者が頸部に使い捨 てカイロを貼付しており、常に熱量が供給されていたた め、耳内温が安定しており、モデル計算値との差がみら れたと考えられる。

[新幹線]では、実測値はわずかに上昇しているが、 モデル計算値はいずれも下降している。これは被験者 が、車いすから新幹線の空調(暖房)により温まってい た座席へ移乗したためであると考えられる。

[食堂(食事)]では、実測値は上昇しているが、モ デル計算値はほとんど変動がみられない。これは、食事 に伴う人体の代謝によって、被験者の体温が上昇したた めであると考えられる。

[④移動]では、実測値は2℃程度下降しているが、 モデル計算値は上昇している。これは、被験者が介助走 行により、気流の影響を強く受けたためであると考えら れる。

[試合観戦]では、実測値はほとんど変動がみられず 安定しているが、モデル計算値はいずれも下降してい る。これは、上記に示したように、被験者が使い捨てカ イロを貼付していたためであると考えられる。

[喫茶店]では、実測値が2℃程度上昇しており、モ デル計算値も3℃程度上昇している。これは、喫茶店内



図 2. 被験者実測値(耳内温)とモデル計算値(頭部深部温度)の変動量 (試合観戦から②自宅まで)

において空調(暖房)が効いていたことと、温かい飲料 を摂取したことが、被験者の耳内温が上昇した要因で あると考察される。田村の報告⁹⁾によると、喫茶店入 店時では、気温は 12.2℃から 24.1℃と10℃以上上昇 しており、耳内温は入店時から 30 分で1.6℃上昇して いたとある。また、温かい飲み物をとった後、耳内温は 0.6℃上昇していたが、飲み物をとった後の耳内温は食 堂での食事後と比較して、顕著な上昇はみられなかった と報告されている。モデルの計算条件には、飲食に伴う 代謝や温かい飲料を摂取した場合の熱量を考慮していな いため、差がみられたと考察できる。

最後に[移動⑥~②自宅]では、[新幹線乗車]にお いて実測値はわずかに上昇しているが、ほとんど変動が みられなかった。一方、モデル計算値についてはわずか に下降する傾向がみられた。これも上記に示したよう に、被験者が使い捨てカイロを貼付していたためである と考えられる。

3-1-2. モデル間の比較

日射受熱量を入力した[④移動]、[⑤移動]では、 モデル計算値が上昇する傾向がみられる。また、対流・ 放射熱伝達率を永田ら⁶⁾の測定した値に変更すると、気 温の下降に伴う頭部深部温度の下降が大きくなっている 傾向が確認できた。これは、変更後の対流熱伝達率が気 流速の大きさに比例する式であるため、気流速が大きく なる条件で差がみられたと考察できる。さらに、TNM と DRM の結果を比較すると、TNM の方が日射受熱による体 温の上昇が顕著にみられる。これは、TNM が深部層と皮 膚層の2層から成るのに対し、DRM が深部、筋肉、脂肪、 皮膚層の4層から成ることが要因であると考えられる。 つまり、皮膚層から深部層への伝熱過程の違いから反応 の違いがあることが確認できた。

4. 体温予測提示システム

車いす使用者の主体的行動及び介助者の介助行動の促 進を支援するため、体温調節モデルによる



図 3. 体温予測提示システム(提示パネル部)

反応の予測値を視覚的に提示する体温予測提示システム の開発を行なった。

4-1. 体温予測提示システムの概要

体温予測提示システムは、体温調節モデルの計算によ り予測された体温調節性生理反応を提示するシステムで ある。ある環境に曝露された人体の体温を予測し、提示 パネルに予測結果(計算結果)を提示する(図3)。

予測の設定条件として、人体側条件は身長 [cm]、体 重 [kg]、脊髄の損傷レベル、姿勢(立位、椅座位、車 いす乗車)及び着衣量 [clo]、環境側条件は気温 [℃]、 気流速 [m/s]、相対湿度 [%rh]及び放射温度 [℃](気温 = 放射温度と仮想している)が入力できる。予測結果は、 人体の深部層、筋肉層、脂肪層及び皮膚層毎に提示され、 それぞれの層に対して部位毎(頭部、頸部、胸部、背 部、腹部、腰部、臀部、上腕部、前腕部、手部、大腿部、 下腿部及び足部)の体温 [℃]、標準新有効温度(SET *)[℃]、ふるえ産熱量 [W]及び発汗量 [m1]を提示して いる。

予測された部位毎の温度はグラフ、数値及び 3D モデ ルで提示している。3D モデルは移動、回転及び拡大・ 縮小やあらゆる視点からの表示が可能であり、部位毎の 温度を色付けしてマッピングしているため、暑熱環境及 び寒冷環境における反応が視覚的に提示できるように なっている。一例を図4 に示す。また、提示パネルでは、 温度の変化を時系列で表示しており、グラフ下のスライ ドを動かすことで、任意の時刻の予測体温分布を 3D モ デル及び数値で視覚的に確認できるようになっている。

5. おわりに

本報では、車いす使用者のための体温調節モデルの熱 収支式に日射受熱量の項を与え、被験者実測値と体温調 節モデル計算値との比較を行った。被験者実測におい て、被験者は使い捨てカイロの貼付や食事等により、低 温環境での外出にも関わらず耳内温が比較的安定してい た。そのため、モデル計算値との差がみられたと考察さ れた。また、車いす使用者の主体的行動及び介助者の介 助行動の促進を支援するような体温予測提示システムに ついての報告を行なった。



(設定:損傷レベル,姿勢,着衣,気温)

【参考文献】

- 1) 土川忠浩,坂本英彦,藏登美仁,大和義昭,松原斎樹,堀越哲美: 車、 は乗車人体と環境との熱交換に関する研究ーその7 車、 は乗車人体の 体温調節モデルー,日本建築学会大会講演更既集環竟工学,pp365~366, 2008
- 2) 相馬史宏、土川忠浩,藏登美仁,大和窮沼,松原斎樹,堀越哲美: 車、 対乗車人体と環境との熱交換に関する研究ーその8 stolwijk モデル による脊髄損傷者の体温調節モデルの開発-,日本建築学会近畿支部研究報 告集環境系,pp285~288,2009
- 3) 堀真輔,土川忠浩,永田太陽,藏登美仁,大和義昭,松原斎樹, 堀越 哲美:建築・都市空間における脊髄損傷者の体温調節戸測モデルに関する 研究,日本建築学会大34回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文 集,pp.235-238,2011
- 4) 土川忠浩, 藏登美仁, 大和義昭,坂本英彦,松原斎樹,堀越哲美:車、 す乗車人体の有効防防面積および空間構成面との間の形態係数,日本建築 学会環境系論文集 73(625), pp321-326, 2008
- 5) 坂本英彦,土川忠浩,藏登美仁,大和義昭,松原斎樹,堀越哲美:車 い す乗車人体と環境との熱交換に関する研究: その4 車、 す自走時及び 介助時の青年男性の放射・対流熱伝達率の測定,日本建築学会学術講演便 概集. D-2,環境工学 II, pp401-402, 2007
- 6) 永田太陽、土川忠浩, 堀輿輔, 藏登美仁, 大和義昭, 松原斎樹, 堀越哲美: 車、 マ東車人体に対する屋外温熱環境の影響に関する研究-その6 有風状 態における車、 マ東車人体の放射・対流熱伝達率の測定-, 日本建築学会大 会講演便既集環竟工学, pp107-108, 2011
- 7) 堀真輔,土川忠浩,田村康子,藏登美仁,大和義昭,松原斎樹, 堀越哲美: 屋外温熱環境評価・設計のための人体の日射投景面積の測定,日本建築学 会大会講演便既集環竟工学,pp55-56,2012
- 掘慎輔,土川忠浩,田村康子,服富沿夢:屋外温熱環境下での車、す使 用者の体温維持支援システム構築-日射受熱量算定のための人体投発面
- 積の測定-, 日本語址のまちづくり学会第15回全国大会 in 北九州概要集 ,2012
- 9)田村康子、土川忠浩、堀慎輔、藏登美仁、大和義昭、松原斎樹、堀越哲美: 冬季の屋外移動時における頸髄損傷者の生理・心理反応に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集第52・環境系、pp245-248、2012
- 10) Gagge, A.p., Fobelets, A.P., Bergund, L.G. : A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions, 92, pp. 709-731, 1986
- Stolwijk J.A.J.: A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA-Langley, CR-1855, 1971
- 12) P.O.Fanger:Radiation Data for the Human Body, ASHRAE Transactions 76-II, pp338-373, 1970

【所属・職位・学位】

- *1 兵庫県立大学大学院 環境人間学研究科 博士前期課程
- *2 兵庫県立大学 環境人間学部 教授・博士 (工学)
- *3 椙山女学園大学 生活科学部 生活環境デザイン学科 教授・博士(工学)
- *4 呉工業高等専門学校 建築学科 准教授・博士(学術)
- *5 京都府立大学大学院 生命環境科学研究科 教授·工博
- *6 名古屋工業大学大学院 教授・工博

【付記】

本研究の一部は、科学研究費助成金(平成24年度基盤(C) 課題番号 24560723 代表:土川忠浩)の助成を受けた。