

令和元年6月10日現在

機関番号：24506

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14348

研究課題名（和文）スマート都市・建築時代の温熱環境弱者に対する自立的活動支援マネジメントシステム

研究課題名（英文）Self-supporting activity management system for people with weak thermal environment in smart city age

研究代表者

土川 忠浩（Tsuchikawa, Tadahiro）

兵庫県立大学・環境人間学部・教授

研究者番号：50180005

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：体温調節機能が低下している温熱環境弱者（例えば脊髄損傷者等）にとって、屋外の温熱環境では高体温や低体温の危険性がある。都市の情報環境（IoT）を利用して環境弱者の外出リスクを低減させることが期待されている。本研究はその基礎研究として、屋外で車いすで活動している頸損者の体温測定を行った。日射を受ける脊髄損傷者・下肢欠損者の体温調節シミュレーションモデルを構築した。車いす乗車者の大腿部を日射遮蔽するための装置を開発した。また、市街地での車いすを用いた温熱環境調査を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

いわゆる温熱環境弱者である脊髄損傷者、頸髄損傷者の体温調節に着目した研究は非常に少なく、また、そのような人々に対して都市・建築分野から支援するような研究も少なく学術的に意義がある。また、具体的な対策としてIoT技術による人間-福祉機器-都市・建築連携の支援モデルは非常に期待されており、体温調節の観点からその重要性は高いと考えられる。さらにこれらの視点は環境弱者のみならず、近年盛んになってきている障がい者スポーツや、健常者にも本質的に適応可能で、個人の特性を考慮した都市・建築の温熱環境ユニバーサルデザインに貢献でき、その意義や重要度は高い。

研究成果の概要（英文）：There is a risk of hyperthermia and hypothermia in outdoor thermal environments for people with weak thermal environment (such as persons with spinal cord injury ;SCI ). It is expected to use the information environment (IoT) of the smart city to reduce the risk of going out. In this study, we measured the body temperature of a disabled person who was active outdoors with a wheelchair. The thermoregulation simulation model of SCI in wheel chair and lower limb amputee who receives solar radiation was built. We have developed a device to shield the thighs of a wheelchair user from the sun. We conducted a thermal environment survey using a wheelchair in the urban area.

研究分野：建築環境工学

キーワード：障がい者 脊髄損傷者 頸髄損傷者 温熱環境 体温調節モデル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

体温調節機能の欠如・低下・未発達な障がい者（主に脊髄損傷者・頸髄損傷者等）・高齢者や乳幼児のような、いわゆる温熱環境弱者は、体温調節に対する不安が外出等の主体的な意欲や行動を抑制してしまう傾向にあることが明らかになっている。さらに近年の温暖化やヒートアイランド現象による都市の高温化は、外出先等での体温調節の困難さをさらに加速させるものと考えられる。

こうしたなか、現代は様々な情報や都市・建築空間がネットワーク化（いわゆるIoTやスマートシティ・ハウス）しようとしており、上述のような温熱環境弱者やその介助者・保護者がこのようなネットワークを利用して、より安全・安心で自立的な積極的活動（日常生活での外出やスポーツ等）を支援できる人間-空間マネジメントシステムのハードおよびソフトが必要とされている。

### 2. 研究の目的

本研究では、来るべき都市・建築、および様々な機器との情報ネットワーク化（スマート化）と、体温調節が困難な温熱環境弱者が、このようなネットワークを利用して、より安全・安心で自立的な積極的活動（日常生活での外出やスポーツ等）を支援する人間-空間マネジメントシステム構築の先駆的基礎的検討を行うことを目的とする。具体的には、【1】自立障がい者を対象とした『温熱環境プロフィール』構築のための基礎的実験的検討、【2】携帯型体温予測システムの構築の基礎的機能開発、【3】温熱リカバリ空間の基礎的検討、および【4】温熱リカバリ空間構築のための市街地温熱環境実測、を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### 【1】自立障がい者を対象とした『温熱環境プロフィール』の構築の基礎的実験的検討

本研究では様々な「温熱環境プロフィール」構築のための基礎的検討として、自立的に生活を行っており、活発な社会活動を行っている障がい者（頸髄損傷者等）を対象として実験的手法により次のことを行った。特にスポーツ時の体温変動からの「熱的疲労」の捉え方とそのリカバリ方法に着目して実験を行った。＜研究成果（1）（2）（3）＞

#### 【2】携帯型体温予測システムの構築の基礎的機能開発

人間-空間マネジメントシステムには、人体および温熱環境をモニタリングして、当事者ならびに介助者（あるいは保護者）に提示すること、ならびに人体と環境との熱交換理論に基づいた体温予測が必要となる。そのため携帯型端末を想定した測定装置開発と、障がい者（頸髄損傷者等）の体温予測シミュレーション開発を行った。＜研究成果（4）（5）（6）＞

#### 【3】温熱リカバリ空間の基礎的検討

屋外環境において日射は体温調節に多大な影響を及ぼす。さらに車いす乗車者にとっては、地面からの照り返し等の影響も健常者よりも大きいと考えられる。そのため熱放射測定のための簡易方法、車いす乗車者に対する日射遮蔽ならびに夏季を想定した温熱リカバリブースについて基礎的に検討した。＜研究成果（7）（8）（9）＞

#### 【4】温熱リカバリ空間構築のための市街地温熱環境実測

実際の市街地環境における温熱環境の障がい者（頸髄損傷者）に対する影響について、本研究で開発した環境・体温モニタリング装置を装着した実験、ならびに自作の車いす型の環境測定装置を用いて、夏季の市街地温熱環境を動的に測定することによって、リカバリ空間の位置づけの検討とその評価方法を検討した。＜研究成果（10）（11）＞

### 4. 研究成果

#### （1）屋外環境での車いすテニス練習時における頸髄損傷者の体温変動

＜実測概要＞車いすテニスを行っている頸髄損傷者（以後、頸損者と称する）を対象に、屋外テニスコート（ハードコート）において、体温変動等を測定した。被験者は青年男子1名（24

歳、身長約174cm、体重約65kg）で、障がいの程度は頸損[C6 完全]である。体温調節はできない。車いすは自走式を使用している。測定時の着衣は、普段使用しているスポーツ用の半袖シャツおよび長ズボン（共にポリエステル）である。温熱環境として、温湿度、風速、グローブ温度、コート表面温度を1分毎に測定した。人体側生理量として、耳内温・胸部皮膚温（日機装サーモ製N542・耳栓型プローブ・表面体温用プローブ・分解能0.01℃）を用いて1秒ごとに測定した。心理量として、温熱感・快適感・疲労感の申告により測定した。また、水分補給量、体温を下げ

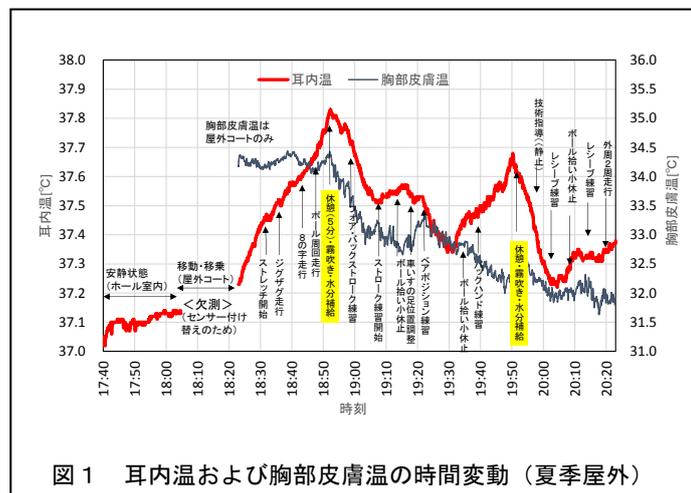


図1 耳内温および胸部皮膚温の時間変動（夏季屋外）

するための噴霧水量を測定した。

測定は2016年8月15日の夕方から夜間に行った。17:30~18:15は室内ホール（冷房）において安静状態を保持し、18:15~20:20はテニスコートに移動し練習を行った。

＜結果および考察＞耳内温と胸部皮膚温の変動を図1に示す。ホールで安静状態では耳内温は37℃程度で安定していたが練習を開始した直後から急激に上昇することが確認された。休憩時に頭部全体を水噴霧（約10cc）した直後から耳内温は急激に下降している。このことから水噴霧は温度上昇を抑制する効果は認められるが、一方で急激に低下しすぎることが身体的な負荷として懸念される。胸部皮膚温も水噴霧で着衣が濡れた影響で急激に下降していた。

### （2）室内空調環境での車いすテニス練習時における頸髄損傷者の体温変動

＜実測概要＞測定は2016年9月2日に、空調された体育館内（福祉施設・約26℃、約50RH）で行った。測定スケジュールとして、14:40~15:00は体育館内において安静状態を保持し、15:00~17:50はコートに移動し練習を行った。

＜結果および考察＞頸損者（前述と同じ）および健常者（青年男子）の耳内温変動を図2に示す。健常者の耳内温は測定中、ほぼ一定の温度となっていた。頸損者の耳内温は練習を始める前に頭部に噴霧したため低下するが、練習を始めると徐々に上昇する。休憩になると急激に上昇し、頭部への噴霧を行った瞬間から急激に降下している。練習時は車いすでコート内を動き回っている状態であり、主に対流によって放熱されていることが推測され、それにより体温上昇も抑制されているものと考えられる。このことから、休憩時も扇風機等による対流放熱による体温上昇抑制をした方が、噴霧による急激な体温降下措置よりも身体的負担が比較的小さいのではないかと考えられ、今後さらに詳細な検討が必要である。

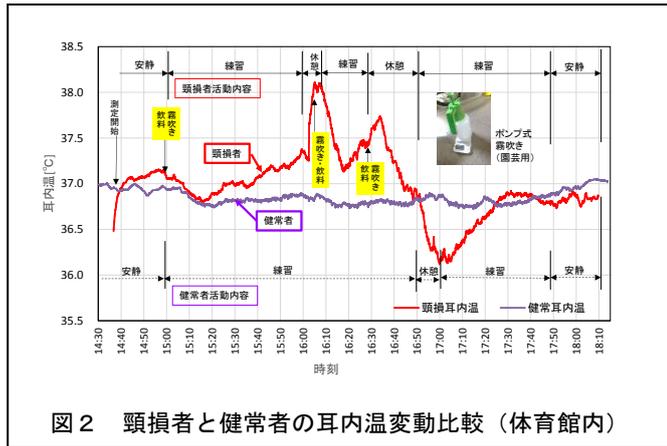


図2 頸損者と健常者の耳内温変動比較（体育館内）

### （3）下肢切断アスリートの非切断側筋疲労の効率的なリカバリ方法に関する調査・実験

下肢切断者の連続ジャンプ後の疲労やリカバリの程度を評価するために、機械的筋収縮特性測定器（TMG、インターリハ）を使用した。TMGは電気刺激を与え、筋収縮を起こし筋収縮速度（Tc）や筋厚の変化量（Dm）、反応時間（Td）弛緩時間（Tr）、収縮時間（Ts）等筋収縮を質的にとらえることができ、筋疲労の評価が可能であるとされている。

＜実測概要＞下肢切断者と健常者の連続ジャンプ後の筋収縮反応の違いを調査し、筋収縮反応の違いを確認する。連続ジャンプは、最大跳躍高の70%に相当する高さまで跳躍高が連続して5回下回った時点までを疲労と判断しテストを終了し、その時の跳躍回数を記録した。

＜結果および考察の概要＞結果の例として下腿切断者を図3に示す。下肢切断者の連続ジャンプ後の非切断側下肢の筋収縮反応を測定し、腓腹筋の収縮反応が健常者より遅延していた。

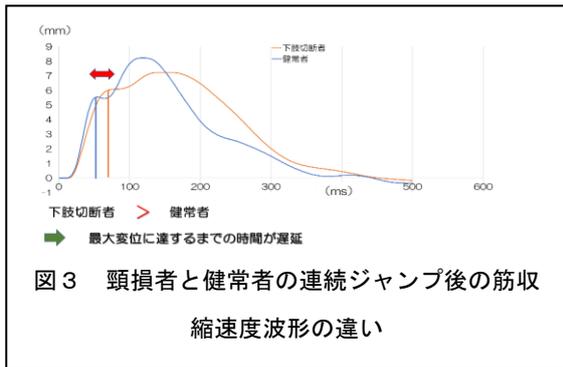


図3 頸損者と健常者の連続ジャンプ後の筋収縮速度波形の違い

### （4）携帯型体温・環境モニタリング装置の基礎的機能開発

本研究で開発するモニタリングシステムは、頸損者・脊損者等の障がい者アスリートから生理データおよび環境データを取得し、体温予測シミュレーションモデルにより体温等を予測計算して、スマートフォン等で提示しようとするものである。

開発したシステムは生理・環境測定部と、画面に表示と予測計算する計算・表示部とに分かれる（図4）。生理・環境測定部では、耳内温・前額温

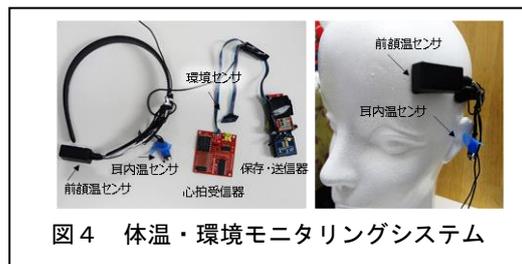


図4 体温・環境モニタリングシステム

度センサ（放射熱センサ）、心拍センサ、温湿度、気圧、日射センサ等をマイコンで制御し、SDカードに保存すると共に、無線（XbeeによるZigBee通信）で送信する。計算・表示部のRaspberry piは、Linuxが動作する小型の計算機であり、科学計算やデータベース等の処理可能である。

(5) 活動量・温熱ストレス定量化のための運動解析装置の開発

運動時の深部温変動の予測やシミュレーションのためには、運動量（活動量）の定量化が必要となる。加速度センサを用いた動作測定装置を新たに開発すると共に、車いすテニスを事例に、動作の特徴を抽出するための解析方法の検討を行った。

＜実測概要＞被測定者は、健常者（青年男子）3名、頸損者（前述）1名で、全員右利きである。動作は車いすに乗車した状態で移動（前進）、ラケットの仕様動作（レシーブ）を各5回行った。加速度及び角速度を同時に測定し、データをmicroSDカードに記録する。

＜結果・考察の概要＞頸損者と健常者のレシーブ時の波形の違いを検討した結果、頸損者では、中央に打球時と思われるスパイク状の波形が出る前に左手にスパイク状の波形がでており、打球後には、右手の加速度角速度でスパイク状の波形が見られた（図5）。これは、レシーブする際の右手のラケット操作、左手のバランス操作、レシーブ後の左回りの回転を抑制であり、健常者との違いが確認された。

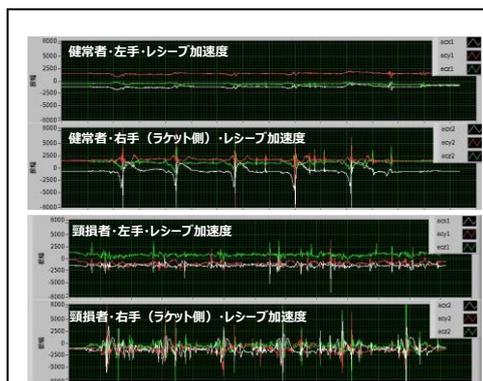


図5 頸損者と健常者の動作解析比較例（レシーブ時の加速度）

(6) 車いす乗車者の体温予測提示システムの開発

＜システム概要＞頸損者・脊損者・下肢欠損者の体温予測シミュレーションモデルとして、GaggeらのTwo Node Modelを拡張した。麻痺部より下位の部位は完全麻痺とし深部層・皮膚層各層に健常部と麻痺部を設け4層に分割した数値モデルを構築した。下肢欠損者の体温予測モデルは、欠損により骨格筋、皮膚の割合は減少するが、車いす駆動に必要な筋肉は上体で鍛えられると仮定した。頸損者、脊損者、健常者、下肢欠損者について、車いす乗車時で日射のある屋外環境下におけるシミュレーション（同一環境に90分間暴露した場合の90分後の値）を行った。日射の条件は最も厳しい条件（太陽高度75°）に設定した。

シミュレーション結果の例として頸損者（C5）と健常者の比較を図6に示す。頸損者の深部温度は、健常者よりも高い値となっている。健常者の場合、深部温度よりも皮膚温度のほうが低い値を示すのに対して、脊損者の場合、皮膚温度のほうが高い。これは皮膚への日射の影響と、発汗調節障害により皮膚温度の調節が妨げられているためだと考えられる。＜体温予測提示システム＞

携帯型体温・環境モニタリングシステムに組み込むための基礎段階としてシミュレーション結果を表示するシステムを作成した。気温、相対湿度、気流速度、日射の有無等の環境側条件、着衣量、頸損・脊損者の場合は損傷部位、下肢欠損者の場合は欠損部位、姿勢等の人体側条件を選択し、計算開始を選択することで、麻痺部・健常部の深部温度を計算し、表示することができる（図7）。

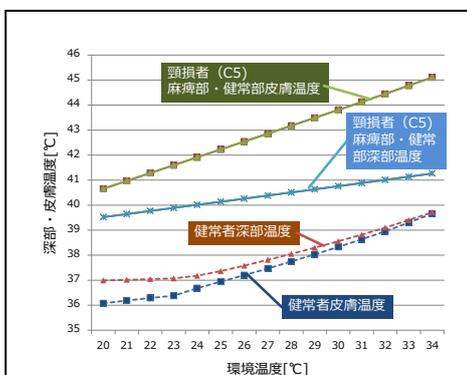


図6 頸損者・健常者の比較

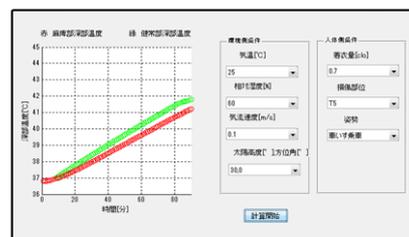


図7 体温予測計算の表示機能（試作）

(7) 屋外における車いす乗車者に対する方向別熱放射の影響評価

車いす乗車者を想定し、照り返しのみならず、方向別の熱放射環境を評価するための簡易方法として、自作立方体簡易放射計を用いた測定、および車いすに平板型の自作簡易放射温度計を取り付けた実測とその評価について検討した（図8）。

黒白平板を用いた自作の面放射温度計から環境ベクトル放射温度を測定し、栗原らの黒色・有色（白色）の環境グローブ温度の原理を平板におきかえ、人体（車いす乗車者）を中心に各方向に向けることによって、方向別の面放射温度の測定を試みた。夏季において、日射が当たっている状態で測定した結果、前後左右上下のそれぞれの面における温度の傾向が把握できた。

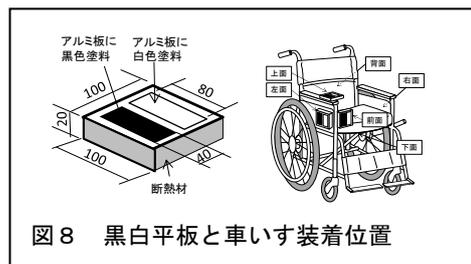
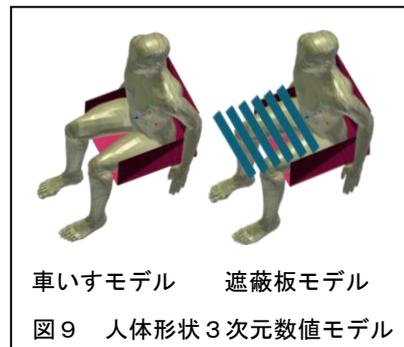


図8 黒白平板と車いす装着位置

夏季において、日射が当たっている状態で測定した結果、前後左右上下のそれぞれの面における温度の傾向が把握できた。

(8) 車いす乗車人体モデルによる日射投影面積および日射遮蔽の検討

太陽高度の高い夏季において、屋外空間で常に座位姿勢でいる車いす利用者は大腿部での受熱が大きくなることが予測される。そこで通風を確保しつつ、車いす使用者の大腿部を覆う日射遮蔽板を提案し、3次元人体形状モデル(図9)を用いて日射投影面積を求め、その遮蔽効果を検討した。その結果、日射遮蔽板により大腿部に対する日射遮蔽の効果が期待できる。



車いすモデル 遮蔽板モデル

図9 人体形状3次元数値モデル

(9) 夏季屋外における温熱リカバリブースに関する基礎的研究

車いす乗用車を想定し、最小の大きさのブースを用いて直達日射と地面からの放射熱の遮蔽について検討を行う(図10)。ブースの大きさは、車いすでの使用を想定して縦120cm×横120cm×高さ150cmとした。車いす使用者に対する地面からの放射熱を測定するため、測定器(長短波放射計等)を車いす使用者の頭部(高さ100cm)と大腿部(高さ50cm)の位置に設置した。上部は日射遮蔽シートで覆い、側面にアルミホイルを利用した熱放射(照り返し)遮蔽板(縦45cm×横120cm)を取り付け、地面からの取り付け高さの違いによる人体位置に対する影響を検討した。さらに、熱放射遮蔽に加え、冷却面をつくるため白い布(ブロード)を水に浸し、滴りがない程度の湿潤状態にした板状のもの(湿潤板)を、遮蔽板と同じ高さ位置に設置して測定を行った。湿潤板の放射熱量が照り返し放射板よりも下まわっており、冷却効果が期待できることが示唆された。

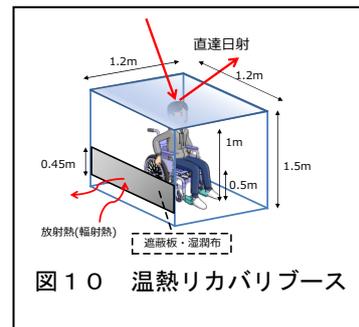


図10 温熱リカバリブース

(10) 冬季における頸損者外出時における携帯型体温・環境モニタリング装置の検証実測

【実測概要】頸損者の外出時における熱的反応の把握と、前述の携帯型体温・環境モニタリングシステムの実用性を検討するために、冬季屋外環境での実測を行った。開発したシステムとの比較のため、耳栓型の耳内温計(日機装サーモ製・前出)との比較を行った。測定は2016年12月18日に、被測定者(40歳代男性・頸損者[C5]・自立)のスポーツ観戦に同行して行った。被測定者の自宅(姫路)から半屋内競技場(神戸市)でのスポーツ観戦を経て、帰宅するまでほぼ連続的に測定を行った。車いすは自走式である。

【結果・考察の概要】耳内温と前額皮膚温の変動を図11に示す。耳内温は環境温の影響を顕著に受けていることがわかる。開発システムの耳内温と前額皮膚温がほぼ同様に変動しておりシステムの改良によっては前額温から耳内温(深部温)の推定される可能性が示唆された。モニタリングシステムの耳内温値は市販の耳内温計とほぼ同様な変動傾向であるが、約2°C高い結果を示している。これはセンサ方式や取り付け方式の違いと考えられ、実用化のためにより詳細な検討が必要である。

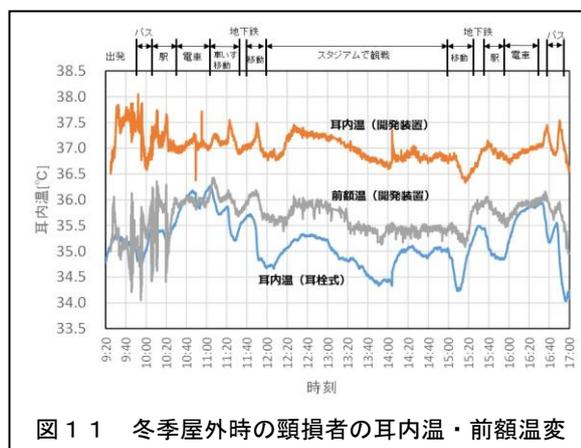


図11 冬季屋外時の頸損者の耳内温・前額温変

(11) 車いす乗車者に対する市街地温熱環境の動的測定・評価方法の検討

【実測概要】市街地における温熱リカバリ空間の基礎的検討のため、熱放射を中心とした温熱環境を車いす移動の観点から動的に測定し、その評価方法についての基礎的検討を行った。測定機器を車いすに装着した(図12)。測定項目は、面放射温度、グローブ温度、自作Halfグローブ温度、日射量、地表面温度、風速、気温および湿度である。この装置を用いて、夏季の日中(2017年8月24日)に日射があたる芝生広場と大通り、アーケード商店街、地下街を含む市街地を移動し、元の広場に戻る周回ルートを測定した。測定は芝生広場を起点に9時出発測定、12時出発測定、15時出発測定の3回で、1周約1時間40分であった。ルートの途中に温熱環境が異なる測定ポイントを7カ所設定し、それぞれのポイントで5分間静止して測定した。

【実測値提示方法の提案】市街地の温熱環境を車いす視線でわかりやすく表現するために、180°魚眼レンズによる写真と測定デー

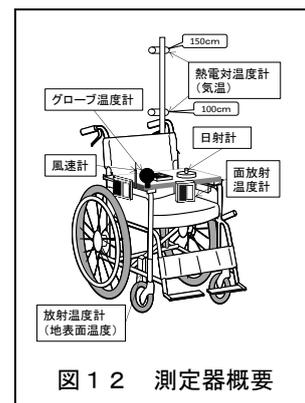


図12 測定器概要

タを用いて表現するデザインとして、サーマルリング（仮称）を作成した（図13）。表示項目は黒色面温度、環境ベクトル放射温度、気温、湿度、ピクトグラムである。これにより車いす乗車者の周囲の温熱環境を一目で把握できると考える。また、地点ごとの温熱環境を比較することもできると考える。



図13 サーマルリングのデザイン提案

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計6件）

- 1) 土川忠浩, 梁瀬美佳, 近藤恵美: 屋外における車いす乗車者に対する方向別熱放射の影響評価に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集（環境系）, 第57号, pp. 133-136, 2017年
- 2) 土川忠浩, 梁瀬美佳, 障がい者スポーツを支援する建築温熱環境に関する基礎的研究—車いすテニス練習時における頸損者の体温変動について—, 日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）, 環境工学Ⅱ, pp. 364-365, 2017
- 3) 土川忠浩, 近藤恵美: 車いす乗車人体モデルによる日射投影面積および日射遮蔽に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集（環境系）, 第58号 pp.217-220, 2018.
- 4) 土川忠浩, 近藤恵美: 都市・建築空間における車いす乗車人体に対する日射遮蔽に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）, 環境工学Ⅱ, pp.389-390, 2018

ほか

〔学会発表〕（計11件）

- 1) 梁瀬美佳, 土川忠浩: 屋外空間における車いす使用者の体温予測提示システムに関する研究—TwoNodeModelによる脊髄損傷者・下肢欠損者に対する検討—, 日本建築学会近畿支部研究報告会, 2016年6月
- 2) 梁瀬美佳, 土川忠浩, 下肢欠損者の体温予測に関する研究—欠損による熱生産の減少を考慮した深部温・皮膚温の検討—, 日本建築学会大会学術講演会（九州）, 2016年8月
- 3) 藤下裕文, 渡辺幸夫, 前田慶明, 木村彰浩: 障がい者スポーツに関わる大学生に対する調査報告, 第26回日本障がい者スポーツ学会 in 大分, 2017年1月
- 4) 土川忠浩, 服部託夢, 藤下裕文: 頸損者の障がい者スポーツ時における温熱環境対策に関する基礎的研究, 日本福祉のまちづくり学会第20回全国大会（東海大会）, 2017年8月
- 5) 土川忠浩, 服部託夢: 夏季屋外における温熱リカバリ空間に関する基礎的研究, 日本福祉のまちづくり学会第21回全国大会（関西）, 2018年8月
- 6) 土川忠浩, 近藤恵美, 藏澄美仁: 車いす乗車者に対する都市の温熱環境影響・評価方法に関する研究, 第42回人間—生活環境系シンポジウム, 2018年12月

ほか

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 前田 慶明

ローマ字氏名: Maeda Noriaki

所属研究機関名: 広島大学大学院

部局名: 医歯薬保健学研究科

職名: 講師

研究者番号 (8桁): 10536783

研究分担者氏名: 服部 託夢

ローマ字氏名: Hattori Takumu

所属研究機関名: 北陸大学

部局名: 医療保健学部

職名: 講師

研究者番号 (8桁): 80549220

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。