

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820279

研究課題名(和文)屋外生活者の温熱生理特性と機能・空間心理特性に基づく環境設計手法の開発

研究課題名(英文)Development of environmental design method considering a thermoregulation and a functional property for pedestrians

研究代表者

吉田 伸治 (Yoshida, Shinji)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50343190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、建築計画学的快適性(機能(動線、空間配置)、空間心理)と環境工学的快適性(温熱生理・心理、周辺微気象の影響)の相互影響を考慮した屋外歩行空間の計画・設計手法の開発に取り組んだ。本研究期間では、夏季屋外空間における歩行者の熱環境と歩行経路選択の関係を実測調査し、この関係を既存の機能的な行動選択モデルに組み込むことにより、機能的快適性と温熱生理的快適性を考慮した環境評価手法の基本モデルを作成した。このモデルの評価・分析結果を活用することにより、屋外空間の総合的快適感に配慮した計画・設計が可能となると考えられる。

研究成果の概要(英文)：A new method to design and planning of outdoor space for pedestrians was proposed in this study. This method is based on an outdoor CFD analysis model coupled with radiant computation, a human thermoregulation model, and an adapting model for activities of a pedestrian. At the beginning of this study, we carried out a field observation in order to obtain a relationship between a thermal environment and adapting walking route or activity for a pedestrian in outdoor space in summer season. A prototype model was developed by incorporating the knowledge from the measurement results into an existing model for adapting activities with functional comfort. The proposed method enables us to consider both a functional or psychological comfort and a thermal or physiological comfort for a pedestrian.

研究分野：工学

キーワード：屋外温熱環境 歩行者 温熱生理 空間心理特性 歩行経路選択モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 機能・空間心理と温熱生理の双方の特性を考慮した環境設計の必要性

従来、都市・建築空間の計画・設計では、①機能的視点（動線・空間接続等）、②空間心理的視点（対人距離（PS）等）が重視されてきた。環境工学的視点（熱、空気等）については、旧来この分野が「建築計画原論」と呼ばれた経緯からも、その配慮は当然必要であったが、不十分な精度、研究領域の細分化・複雑化に従い、設計者の経験、直感等の曖昧かつ定性的配慮に止められてきた。しかし、実際の空間利用は、①空間の温熱快適性が利用空間の選択欲求に影響する場合（例えば、日影を好んで歩きたい）、②①の欲求を空間心理（適切な PS の確保）が抑制する場合、等の相互作用により形成されるはずである。特に環境条件の厳しい屋外ではその傾向がより強まると考えられ、相互影響を考慮した環境設計手法が必要であるが、そのための知見・手法は未だ存在しない。

(2) 近年のコンピュータ性能の向上：詳細・複雑な問題解決を可能とする環境が整備

周知の通り、近年のコンピュータ性能・技術の向上は目覚ましく、学問全般にわたり、旧来定性的評価・分析に止められてきた知見の定量化が可能となりつつある。これは、建築設計者の曖昧な定性的視点に基づく空間計画・設計行為にコンピュータ技術に基づく定量的尺度に基づく評価を組み込み、より合理的な設計案を生み出すことが実現可能であることを表している。

2. 研究の目的

本研究では、都市・建築設計者の設計案を建築計画的快適性（機能（動線、空間配置）、空間心理（パーソナルスペース、以下 PS））と環境工学的快適性（温熱生理・心理、周辺微気象の影響）の相互影響に基づき、定量的な評価・分析・修正案を提示するためのツールを開発する。

3. 研究の方法

本研究では、温熱環境実測と数値解析を基本的な研究手法としており、以下の様な取り組みを行った。

- ① 歩行者特性モデルの作成
- ② 屋外温熱環境の生活者の温熱生理、空間滞在・移動への影響調査
- ③ 非定常・不均一屋外温熱環境評価技術の改良と人体歩行者特性モデルの組み込み
- ④ 全体のまとめ

4. 研究成果

- ① 歩行者特性モデルの作成

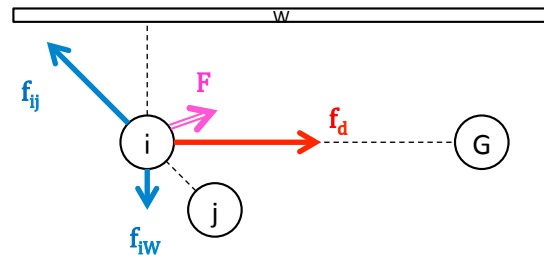


図1 Social Force Modelにおける歩行者 (i, j)、目的地 (G)、障害物 (W) 間に作用する引力、斥力の関係

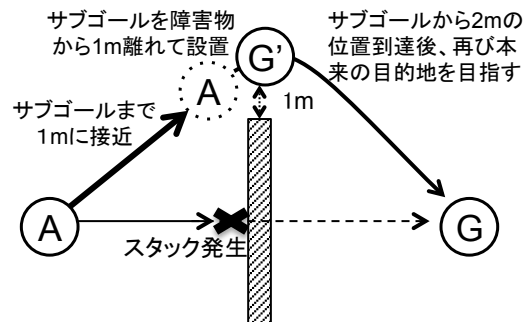


図2 サブゴールモデルの概念図

建築計画学系の研究協力者の知見を参考に、人体歩行者モデルを作成（コード化）した。ここでは将来的なプログラム管理の容易さ、拡張性に配慮し、Java を用いて作成した。本研究では、建築計画分野における歩行者の経路選択モデルのひとつである Social Force Model、並びにサブゴールモデルを合わせたものを基本モデルとした。図1に Social Force Model の概念図を示す。Social Force Model は、歩行者を粒子（質点）として捉え、その行動選択に関わる要素の影響を引力、斥力としてモデル化し、これらの合力に基づき歩行者の移動方向、速度を推定するモデルである。サブゴールモデルは、Social Force Model で生じる可能性の大きいスタック問題への対応するためのサブモデルである（スタックとは、歩行者の目的地までの最短経路上を大きく遮る障害物が存在する場合、目的地からの引力と障害物からの斥力が均衡し目的地に到達できなくなる現象のこと）。図2にサブゴールモデルの概念図を示す。このモデルでは、スタック発生の可能性が生じた場合、これに関わる直近の障害物表面から 1m 離れた地点に仮の目的地（=サブゴール）を設け、歩行者は当面これを目指して移動する事によりスタックを回避しており、本研究でもこのモデルを組み込んだ。

② 屋外温熱環境の生活者の温熱生理、空間滞在・移動への影響調査

夏季の人の往来・滞在の多い屋外空間を対象に、温熱環境実測、被験者を用いた温熱生理状態の計測、動画撮影による空間滞在・移動実態調査を同時に行い、屋外温熱環境条件が生活者の熱的生理状態、空間心理、滞在・移動時間に与える影響を評価分析した。実測

は、2013年8月5日から9日にわたり図3に示す JR 福井駅東口広場を対象に行われ、期間内で最も晴天となった8月9日の結果を用いて空間の温熱環境と歩行者の行動特性の関係を分析した。同日計測期間中の駅前広場中央における温熱環境の推移を図4に示す。特に日射量に着目すると、昼頃、夕方の方々に約 $140\sim 230\text{ W/m}^2$ 、約 $34\sim 130\text{ W/m}^2$ の範囲の値を示す。当然ながら日照の有無による差が大きい。また、夕方の方の経過時間 20分以降より値が急激に低下するのは JR 駅舎の影に入るためである。この日射入射量の大小は体感温度に相当する新標準有効温度 SET*の推移にも大きく影響していることが分かる。

この環境下における歩行者の行動と熱環境条件を関連付けた。ここでは、歩行者の夏季における暑熱を避ける行動の頻度を「避難率（調査時間帯毎の全歩行者のうち、アーケードの影に沿って通過する行動を採る人数の割合）」という言葉で定義した。この避難の考え方を図5にまとめる。実測では、図3の「写①」から JR 福井駅正面を5秒毎に撮影した写真からこれらの推移を推定した。

図6に避難率と通過人数の関係を示す。昼頃、帰宅時共に通過人数の増加に伴い避難率は低下する傾向が見られる。昼頃は、通過人数の増加によりアーケード下を通過する列を避ける行動を採る歩行者が増えるためと考えられる。帰宅時にはこれに加えて空間全体が駅舎の日影となり快適に移動可能な経路選択肢が増えるため、さらに低い値となると考えられる。図7に避難率と温熱環境条件の関係を示す。ここでは、全身の温熱快適性を表す尺度の SET*、人体への日射入射量を熱環境条件を代表する尺度に用いる。また、図中の性別避難増加率とは、男性の避難率に対する女性の避難率の比であり、値が1以上の場合、女性の方がアーケード下を通過する割合が高いことを表す。日射入射量 100 W/m^2 の増加、SET* 1°C の上昇に対し、避難率は各々約 14%、4.2%増加する関係が見られる。若干、日射入射量の方が SET*よりも避難率との相関が高い。性別避難率については熱環境条件に依らず 0.7~1.5 程度の値を示す傾向が見られた。

③ 非定常・不均一屋外温熱環境評価技術の改良と人体歩行特性モデルの組み込み

①で作成・改良した人体歩行経路選択モデルを、研究代表者が開発を手がけてきた多分割人体体温調節モデルと屋外温熱環境 CFD 解析を連成した屋外温熱環境評価技術のサブモデルとして組み込むことにより、新たな屋外環境設計技術を提案した。

解析手法の流れを図8に示す。境界条件は、実測結果から得られた気象データや建物配置を考慮した形状データ、表面被覆条件によって与えられる。風速、気温、放射、湿気の空間分布は、研究代表者らが開発した対流・放射連成 CFD 解析により予測される。屋外温熱環境の非定常・不均一性を考慮した温熱快

適性は、上記の数値解析によって得られた結果を入力条件とした多分割人体体温調節モデルを用いて評価される。ここで、特に不均一性の強い部位毎の放射熱環境条件の設定

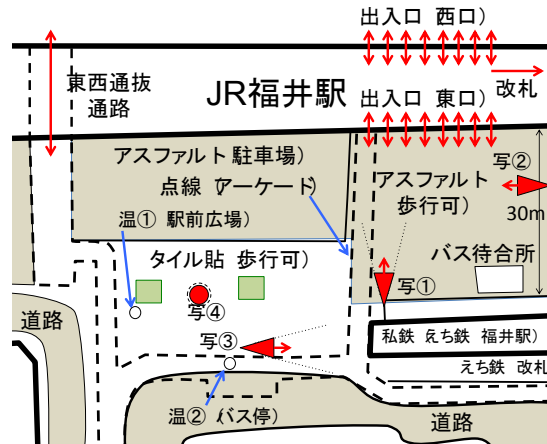


図3 実測対象計測位置
(図中点線はアーケード屋根の水平投影面積を示す)

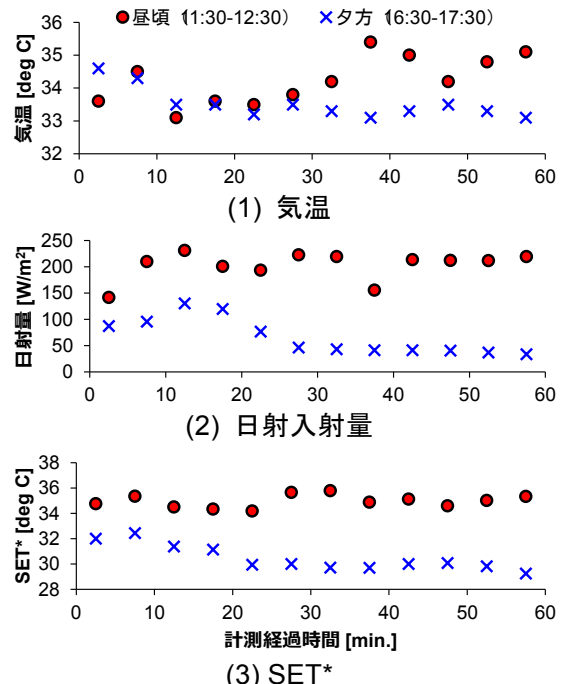


図4 駅東口広場中央の温熱環境の昼頃、夕方の方の時間変化

(2013/08/09, 図中の横軸は各計測開始から終了までの経過時間 [min] を表す)

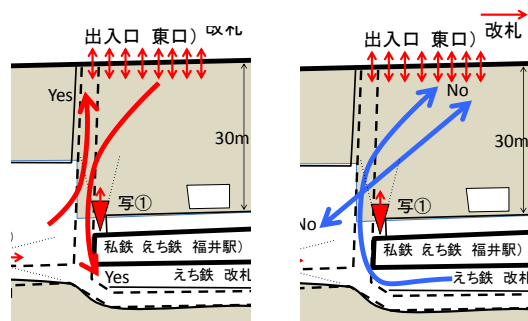


図5 本実測での「避難」の考え方

には研究代表者が提案した人体を覆う仮想球による評価手法を用いる。人体体温調節モデルには、熱的中性を維持するための血管拡張や収縮、シバリング、発汗による熱発生および熱放散をはじめとする温熱生理のメカニズムを考慮した人体の温熱快適性の評価が可能である。本解析では、田辺らによって開発された多分割体温調節モデルの中でも最も新しい JOS-2 を使用する。JOS-2 の部位間の関係を図 9 にまとめる。このモデルには、17 の体の部位 (頭、首、胸、背中、腰、左肩、左腕、左手、右肩、右腕、右手、左大腿、左下腿、左足、右大腿、右下腿、右足) がある。本研究では、体温調節モデルの入力条件となる部位毎の熱環境条件を、歩行者の行動選択においても反映される様なモデル化を行っている。例えば、今回の日射しを避ける行動の関係は②で得られた図 6、図 7 の関係を参考に設定した。図 10 は②の実測に対応する熱環境条件において、JR 福井駅東口をスタート地点、アーケードの私鉄 (えちてつ) 側端部をゴール地点とする単独歩行者の動きを抽出したものである。このうち領域 B からの歩行者のみ軌跡が 2 本示されるのは、避難行動を採る場合と採らない場合の双方があることを示しており、熱環境条件の影響に伴う行動選択の変化を概ねモデル化できていることが確認できる。

④全体のまとめ

以上より、本研究では実測、数値解析により屋外歩行者の機能的・熱的の双方の快適性に基づく行動選択を考慮した新しい空間計画・設計手法について研究した。今後は、本研究で開発された基本解析モデルの更なる改良を図ると共に、実際の歩行空間の環境設計への適用が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- [1] 吉田 伸治, 歩行者の熱環境条件と空間心理特性を考慮した経路選択のための数値モデルに関する研究(その 1) Social Force Model への熱環境影響の組み込み, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 無, 58, 2015, 投稿中
- [2] 佐藤大樹, 大黒雅之, 吉田伸治 吉田伸治, 人体各部の投影面積率を用いた室内空間における人体の放射受熱量評価に関する研究, (第 2 報) 部位別放射受熱量の算出と不均一放射環境の評価への適用, 空気調和・衛生工学会論文集, 有, 2015, 9-17
- [3] 吉田伸治, 佐藤大樹, 大黒雅之, 多分割人体体温調節モデルと連成した CFD 解析に基づく不均一屋外温熱環境評価に関する研究(その 1) 人体を覆う仮想球を用いた屋外空間の不均一放射環境の分析,

日本建築学会環境系論文集, 有, 79, 2014, 967-977

- [4] 吉田伸治, 屋外歩行者の温熱生理特性と機能・空間心理特性を考慮した環境設計手法の開発 (その 1) 夏季屋外温熱環境条件が歩行者の適応行動に与える影響の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 有, D2, 2014, 431-435
- [5] Shinji Yoshida, Taiki Sato, Mayuki Oguro, Study on Evaluation of Effects of Inhomogeneous Radiant Environment for Pedestrian in Summer Season using a Coupled Numerical Simulation based on CFD Analysis, Proceedings of 8th Windsor Conference: Counting the Cost of Comfort in a changing world, 有, 2014, W14064.

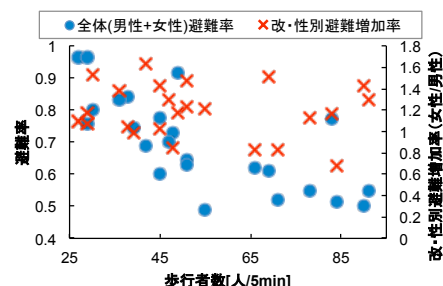
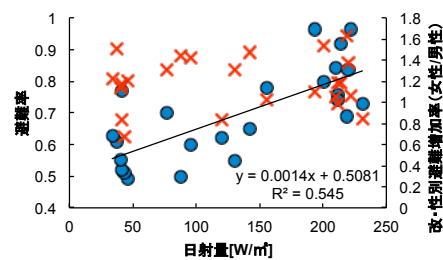
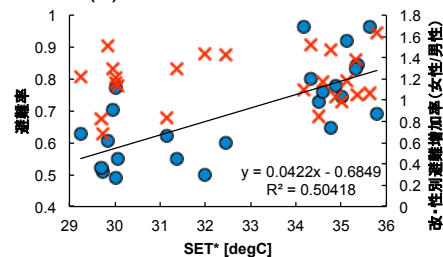


図 6 空間通過者数と避難率の関係

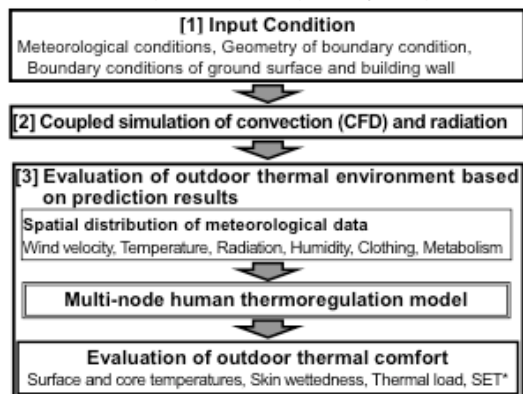


(1) 日射入射量との関係



(2) SET*との関係

図 7 避難率と温熱環境条件の関係
(性別避難率 = 女性避難率 / 全体避難率)



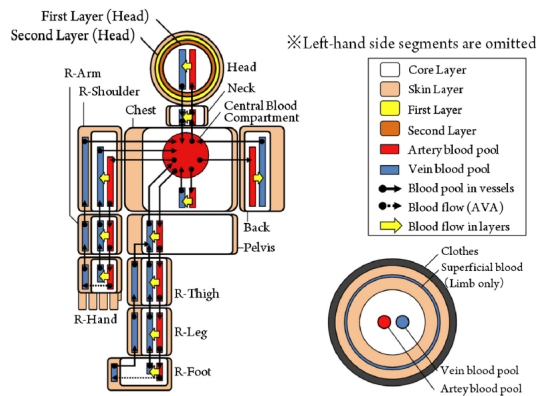


図9 多分割体温調節モデル JOS-2 の概念図
 図8 数値解析手法の流れ

- [6] 佐藤大樹, 大黒雅之, 吉田伸治, 人体各部の投影面積率を用いた室内空間における人体の放射受熱量評価に関する研究, (第1報) 人体形状モデルによる投影面積率算出と至近距離壁面との形態係数評価, 空気調和・衛生工学会論文集, 有, 2014, 1201-1204
- [7] Nobuyuki Yabuki, Takuya Onoue, Tomohiro Fukuda, Shinji Yoshida, A heatstroke prediction and prevention system for outdoor construction workers, Visualization in Engineering, 有, 202, 2013, 1-11.

[学会発表] (計5件)

- [1] 吉田伸治, 歩行者の熱環境条件と空間心理特性を考慮した経路選択のための数値モデルに関する研究(その1) Social Force Model への熱環境影響の組み込み, 日本建築学会北陸支部大会, 2015, 日本, 新潟(長岡造形大学)
- [2] 吉田伸治, 屋外歩行者の温熱生理特性と機能・空間心理特性を考慮した環境設計手法の開発(その1) 夏季屋外温熱環境条件が歩行者の適応行動に与える影響の実測, 日本建築学会大会, 2014, 日本, 兵庫(神戸大学)
- [3] Shinji Yoshida, Taiki Sato, Mayuki Oguro, Study on Evaluation of Effects of Inhomogeneous Radiant Environment for Pedestrian in Summer Season using a Coupled Numerical Simulation based on CFD Analysis, Proceedings of 8th Windsor Conference: Counting the Cost of Comfort in a changing world, 有, 2014, 英国, London (Cumberland Lodge)
- [4] 吉田伸治, 佐藤大樹, 大黒雅之, 連成数値解析による夏季屋外歩行者に対する放射環境の不均一性評価に関する研究(その2) 天候・性別の差異が歩行者の温熱生理的負担に与える影響, 空気調和・衛生工学会大会, 2013, 日本, 長野(信州大学)

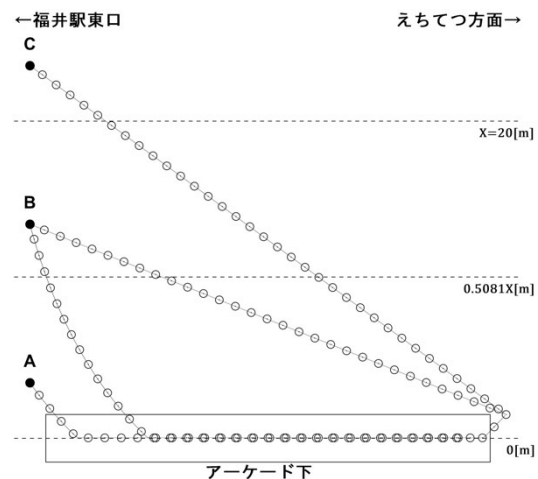


図10 熱環境条件を考慮した行動選択モデルの解析例

- [5] 峠堯大, 吉田伸治, 佐藤大樹, 大黒雅之, 連成数値解析による夏季屋外歩行者に対する放射環境の不均一性評価に関する研究(その1) 太陽高度、天候が放射環境の不均一性に与える影響, 日本建築学会大会, 2013, 日本, 北海道(北海道大学)

[その他]

福井大学・工学部・建築建設工学科・環境計画研究室ホームページ、
<http://www.anc-d.u-fukui.ac.jp/~y-shinji/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 伸治 (YOSHIDA, Shinji)
 福井大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 50343190

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし