

## 奨励研究助成実施報告書

助成実施年度	2020 年度
研究課題（タイトル）	機械学習を用いた非定常不均一な半屋外温熱環境における熱的快適性予測に関する研究
研究者名※	深和 佑太
所属組織※	早稲田大学大学院 創造理工学研究科 田辺新一研究室
研究種別	奨励研究
研究分野	その他
助成金額	80 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

# 大林財団2020年度奨励研究助成実施報告書

所属機関名 早稲田大学  
申請者氏名 深和 佑太

研究課題	機械学習を用いた非定常不均一な半屋外温熱環境における熱的快適性予測に関する研究
<p>(概要) ※最大10行まで</p> <p>都市空間において快適な温熱環境を創出するためには、滞在者がその環境をどのように感じるかを定量的に把握することが重要である。広く用いられているPMVやSET*などの温熱環境指標は定常かつ均一な温熱環境を対象としているため、滞在者の行動を伴う非定常不均一な環境の評価に用いることが難しい。特に、アトリウムやガレリア、テラス、駅舎のコンコースまたはプラットフォームなどの都市と建築をつなぐバッファーとしての役割を持つ半屋外空間の熱的快適性予測には課題が残されている。非定常不均一な半屋外温熱環境においては人間の心理を加味し、滞在者がどのような環境で快・不快を感じるかを分析・予測する必要がある。以上の背景から、本研究では半屋外空間の複雑な温熱環境における熱的快適性を対象に実測を行う。その後、物理環境の計測値と滞在者の温熱環境に対する評価のデータセットを使用し機械学習の基礎として幅広く用いられているベイズの定理を用いた分析を行うことで、非定常不均一な半屋外環境における熱的快適性の予測を目的とする。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>建築の内外をつなぐ半屋外空間は日射や降雨から人間を守る役割を果たし、建築空間の多様化や空調エネルギーの削減に寄与する。近年、都市空間やオフィスにおいて半屋外空間の導入が進んでおり<sup>1-2)</sup>、滞在者の快適性を考慮した計画がより一層重要視されると考えられる。中野ら<sup>3)</sup>は温熱環境の制御レベルを示す環境グレードにおいて、半屋外環境が室内と屋外の間の区分に属すると定義し熱的快適性に関する考察を行った。滞在者の自由な適応行動が前提となっている半屋外環境においては、ある程度の環境的な変動が許容されるため室内環境と比較し熱的な快適範囲が広がることも明らかになっている<sup>4)</sup>。半屋外環境においては空間特性が滞在者の快適性に影響を与える可能性があるため、様々な環境グレードにおいて実測調査を行う必要がある。滞在者の熱的快適性の予測についても、空間特性が与える影響を考慮し、環境グレード別に予測式を導出することが求められる。本研究では、環境グレードが滞在者の熱的快適性に与える影響の把握した上で、非定常不均一な半屋外環境における快不快感の発生状況を予測することを目的とする。半屋外環境における物理環境測定および熱的快適性調査の結果を用いて、気流速度が及ぼす快・不快感への影響を空間別に比較する。紙媒体でのアンケートは数分間隔での申告となるため、気流速度の変動が快適性に与える影響を即時に記録することが難しい。本研究ではその欠点を補足するため、リアルタイム申告を用いることとした。本研究では、気流速度の変動が与える快適性への影響を明らかにすることを目的とし、スマートフォンを用いて快・不快感を実測時間内で継続的に申告させ、申告回数に対する移動平均気流速度の回帰式を求めた。</p>	

## 2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

### 2.1 実測概要および測定項目

図1に調査場所の概要を示す。本研究では比較的、気流速度分布の幅が大きいテラス、中庭およびピロティを対象に分析を行った。気流速度分布の詳細は実測結果において後述する。

図2に実測スケジュールを示す。被験者は約25°Cに空調された前室にて椅座安静の後、直達日射に曝された屋外定点にて10分間滞在した。その後、再度前室にて10分間滞在した後に、直達日射が当たらない非空調の半屋外環境にて30分間椅座安静を保ち測定を行った。なお、本実測は早稲田大学倫理委員会の承認(2021-102)を得ている。また、表1に本報の分析に用いる調査項目を示す。快適感の申告値は快・不快感のリアルタイム申告との相関関係を把握する目的で使用した。実測期間の中で、リアルタイム申告調査を実施し、かつ平均外気温度が28°Cを超えた晴天日の2021年9月13日、15日を分析対象とした。前室や移動等の熱的履歴の影響を排除するため、分析には調査場所に移動してから10分後以降の20分間のデータを用いた。

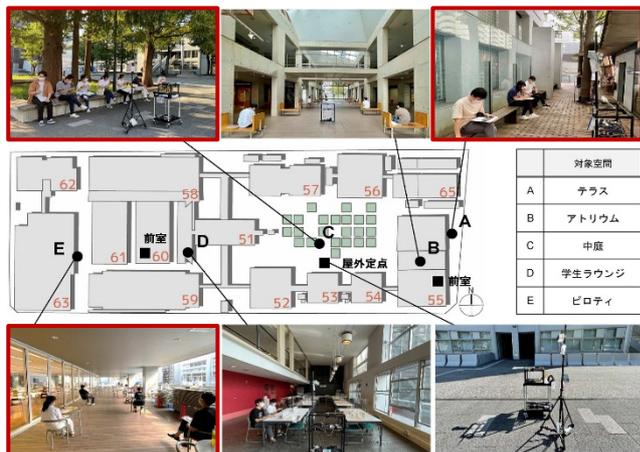


図1 調査場所概要と分析対象空間

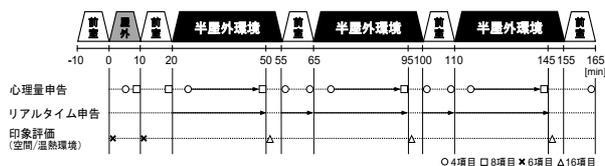


図2 実測スケジュール

表1 調査項目

	測定項目	測定高さ	測定間隔
物理環境 被験者近傍	気流速度 [m/s]	1.1m	10s
	測定項目	尺度	測定間隔
心理量	快適感 [-]	7段階	2.5min
	快・不快感 [-]	-	10s

start\_logging

count\_good

count\_bad

図3 スマートフォンを用いたリアルタイム申告システム

## 2.2 リアルタイム申告の概要

図3に本研究で用いたリアルタイム申告システムを示す。被験者はスマートフォン上で「Good ボタン」または「Bad ボタン」をタップすることで快・不快感を申告する。申告はボタンを連打することで10秒間に複数回申告することが可能であり、被験者は快・不快感の強弱を申告回数で表現することができる。リアルタイム快・不快感申告値 (Real-time Pleasantness Vote : 以下、RPV) は(1)・(2)の算出式を用いて、Good 申告回数と Bad 申告回数の差の30秒間移動平均値を被験者ごとに平均が0、標準偏差が1になるよう標準化し導出した。

$$x = \frac{G(t-20) + G(t-10) + G(t) - (B(t-20) + B(t-10) + B(t))}{3} \quad (1)$$

$$RPV = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (2)$$

$G(t)$  : Good 申告回数 [回]     $B(t)$  : Bad 申告回数 [回]     $t$  : 時間 [秒]     $x$  : Good 申告と Bad 申告の差の30秒間移動平均値 [回]

$\bar{x}$  :  $x$ の被験者ごとの申告回数の平均値[回]

$s$  :  $x$ の被験者ごとの申告回数の標準偏差 [回]

RPV : 移動平均 RPV [-]

## 2.3 階層ベイズモデルを用いたべき乗回帰分析

図4に本研究におけるRPV予測のための統計モデルを示す。統計分析手法としては、階層ベイズモデル (以下、HBM) を用いたべき乗回帰分析を採用した。HBMはデータの個人差や群差を組み込んだ階層的なモデルを形成し、ベイズの定理を用いて不確実性を考慮した回帰パラメータの事後分布を得る手法である。パラメータのベイズ推定には統計的推論のための確率的プログラミング言語である Stan を用いた。RPVは正規分布に従うと仮定し、気流速度のRPVへの影響度の空間毎の群差を組み込んだ(3)の統計モデル式を用いてマルコフ連鎖モンテカルロ法 (以下、MCMC法) によって回帰パラメータを推定した。

$$RPV \sim Normal(a[i] + b[i]V_a^{c[i]}, \sigma) \quad (3)$$

$$a[i] = a_0 + a_{id}, \quad b[i] = b_0 + b_{id}, \quad c[i] = c_0 + c_{id}$$

RPV : 移動平均 RPV [-]     $V_a$  : 移動平均気流速度 [m/s]     $\sigma$  : 誤差 [-]

$a[i], b[i], c[i]$  : 空間  $i$  の回帰パラメータ [-]     $i$  : 調査場所番号 [-]

$a_0, b_0, c_0$  : 回帰パラメータ (共通部分)

$a_{id}, b_{id}, c_{id}$  : 回帰パラメータ (群差部分)

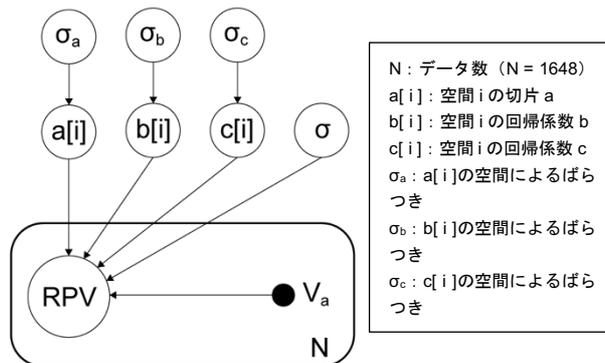


図4 統計モデル (グラフィカルモデル)

### 3.1 実測結果

#### 3.1.1 各環境グレードにおける気流速度分布

図5に各調査場所における気流速度分布を示す。テラス および中庭では気流速度の平均値は0.7 m/s程度となり、ピロティでは0.4 m/s程度であった。アトリウムと学生ラウンジでは気流速度の平均値は0.2 m/s程度であり、四分位範囲も他3つの場所より狭かった。本研究では、気流速度の発生分布が相対的に広いテラス・中庭・ピロティを対象にべき乗回帰分析を行った。

#### 3.1.2 各環境グレードにおける移動平均RPV分布

図6に各調査場所における移動平均RPV分布を示す。移動平均RPVの平均値は「テラス>中庭>アトリウム>ピロティ>学生ラウンジ」の順に高く、気流速度の平均値が0.5m/sより小さいアトリウム、学生ラウンジおよびピロティでは負の値となった。

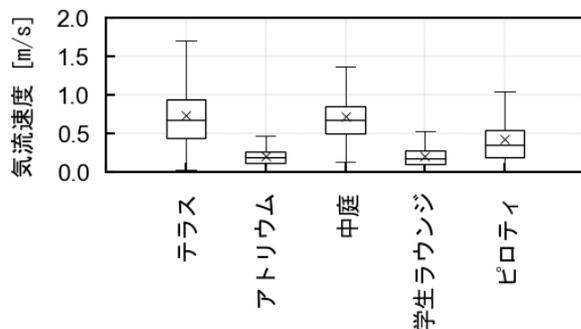


図5 各調査場所における気流速度分布

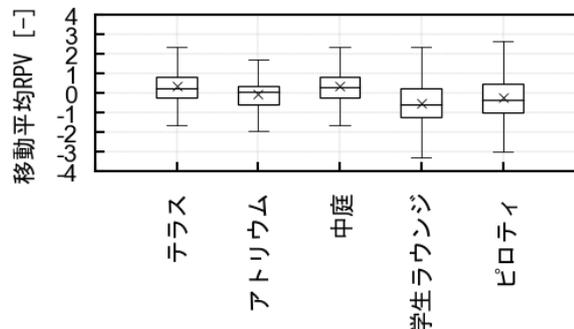


図6 各調査場所における移動平均RPV分布

#### 3.1.3 RPVと快適感申告の相関関係

図7に移動平均RPVとアンケートより取得した快適感申告の相関関係を示す。快適感申告に対するRPVの回帰直線の傾きは0.851、決定係数は0.421であった。これはRPVと快適感には相関関係があることを示唆している。

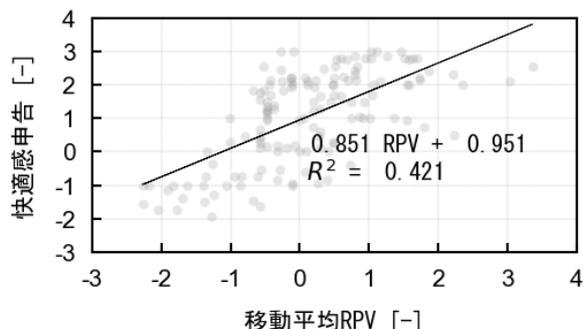


図7 移動平均RPVと快適感の相関関係

## 3.2 階層ベイズモデルによる回帰分析結果

### 3.2.1 回帰パラメータの推定結果

表2にべき乗回帰パラメータの推定結果を示す。各パラメータの事後分布の平均値を回帰係数として用いた。MCMC法の収束判断にはRhatという指標が用いられており、一般的に $Rhat \leq 1.1$ となったときに「収束した」と判断される。本分析では全パラメーター推定で $Rhat \leq 1.1$ となりMCMCサンプリングの収束が確認された。

表2 べき乗回帰パラメーター推定結果

	a		b		c	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
共通部分	-0.11	4.80	1.42	4.08	1.86	1.64
テラス (i=1)	-0.18	0.12	0.71	0.16	1.76	0.38
中庭 (i=2)	-0.71	0.69	1.35	0.70	0.86	0.35
ピロティ (i=3)	-0.82	0.08	1.41	0.13	1.77	0.24

### 3.2.2 気流速度が及ぼす快・不快感への影響の空間別比較

図8に移動平均気流速度と移動平均RPVの散布図および空間別のべき乗回帰曲線を示す。破線はデータ全体の傾向（共通部分）を示す回帰曲線であり、実線は各空間の傾向を示す曲線である。共通部分の回帰曲線において、曲がりの大きさを表す係数cは1.86であった。そのため、全体の傾向は回帰曲線で表され、移動平均気流速度が上昇すると移動平均RPVも指数関数的に増加する傾向にあった。そのため、すべての空間に共通して、気流速度の上昇が熱的快適性の向上に寄与する傾向があることが確認された。

ピロティの回帰式の係数bは1.41、係数cは1.77であり、他の空間の線よりカーブの大きい曲線となった。ピロティにおいては1.0m/s以上の気流速度範囲で他の空間よりRPVが高くなる傾向が表されている。周囲を他の施設に囲まれ上部が天井で覆われているピロティでは、気流に対する期待感が低く、中庭やテラスのような屋外グレードに近い空間と比べ気流速度に対する感度が高くなることが示された。また、ピロティの回帰曲線は1.0m/s未満の範囲で他の空間の曲線を下回っており、気流速度が低い状況では他の空間と比べ不快感の度合いがより強くなる傾向が読み取れる。

テラスと中庭の回帰曲線は係数bに0.64の差、係数cに0.90の差があったが散布図上では概ね同様の傾き・位置関係となっていた。そのため、両空間における気流速度の快・不快感への影響度は同様の傾向にあると推察される。どちらも上部を木に覆われた屋外側の環境グレードであったことがこの原因として考えられる。

以上の分析より、空間に対する視覚的な印象が滞在者の熱的な快・不快感の発生条件に大きな影響を与えていると考えられる。

### 3.3 べき乗回帰式を用いた移動平均RPVの予測

図9～図11に移動平均RPVと移動平均気流速度の変動およびべき乗回帰式によるRPV予測値と95%予測区間を示す。RPV予測値は空間毎の回帰式に移動平均気流速度の実測値を代入することで算出した。テラスとピロティは中庭よりRPVの変動が大きく、気流速度の上昇に合わせてRPVの分布も高くなる傾向にあった。RPV予測値と95%予測区間はRPVの変動に追従しており、気流速度から滞在者の快適性を事前に予測することが可能であると考えられる。

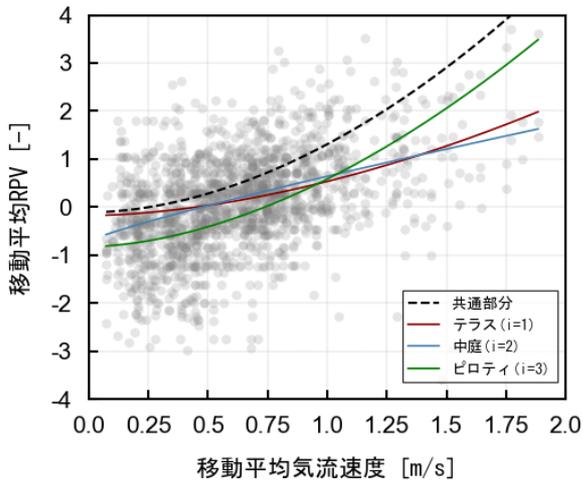


図8 移動平均気流速度と移動平均RPVの相関関係および空間別のべき乗回帰曲線

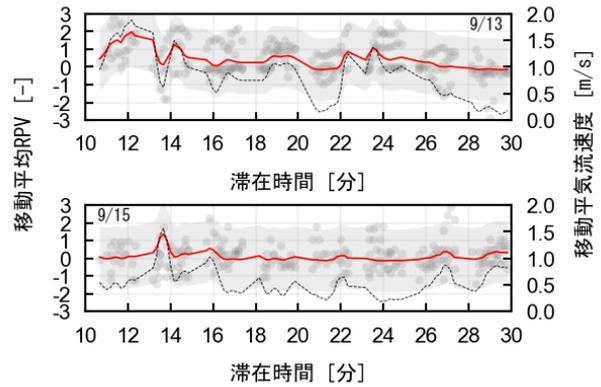


図9 テラスにおける移動平均RPVと移動平均気流速度の変動およびRPV予測値と95%予測区間

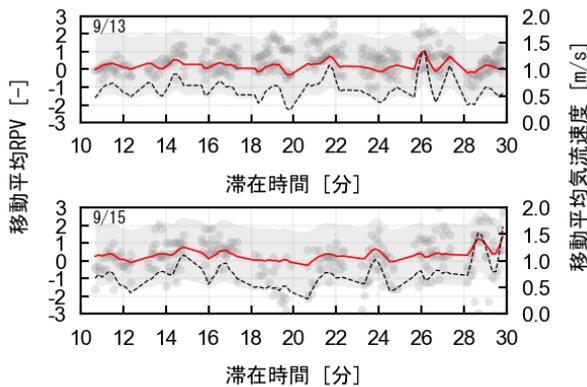


図10 中庭における移動平均RPVと移動平均気流速度の変動およびRPV予測値と95%予測区間

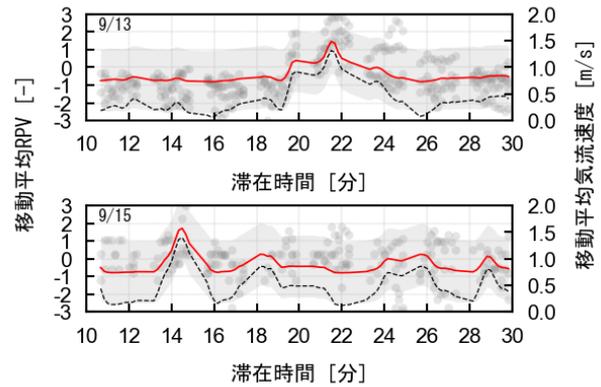


図11 ピロティにおける移動平均RPVと移動平均気流速度の変動およびRPV予測値と95%予測区間

#### 4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、ベイズ回帰分析に使用した実験データを用いて予測に関する評価を行ったため、今後追加の実験を実施し、未知のデータを用いて予測精度の検証を行うことが求められる。また、本研究は夏季における実験であったため、今後中間期や冬期において被験者実験を実施する予定である。実社会には多様な半屋外空間が存在するため、調査対象空間を追加し実験を行うことも検討している。本報では、スマートフォンのブラウザ上での申告のみを分析対象としたが、今後は現在製作中であるウェアラブルセンシングデバイスを用いて滞在者の自由な回遊を想定した実測調査を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省: 都市局街づくり推進官民連携推進室: 官民連携まちづくりの進め方-都市再生特別措置法に基づく制度の活用手引き-, 2020
- 2) 経済産業省: 健康経営オフィスレポート, 2015
- 3) 中野ら, 半屋外環境の熱的快適性に関する考察, 日本建築学会環境系論文集, Vol.79, No.701, pp.597-606, 2014
- 4) Nakano et al, Thermal Adaptation and Comfort Zones in Urban Semi-Outdoor Environments, Frontiers in Built Environment, Vol.6, 2020