

# 都市における動的な熱的快適性に関する研究

## Dynamic Thermal Comfort in Urban

中川 純 早稲田大学創造理工学研究科建築学専攻博士課程 2年

### 1 背景

建築における熱的快適性の評価は、その空間の温熱環境の物理的な条件に対して、人体の熱収支理論をあてはめることによって体系化されてきた歴史がある。特にPMV<sup>1)</sup>は、温冷感を算出するために計算式を「温冷感=人体の熱負荷の関数」と「人体の熱負荷=温熱6要素の関数」の二つに分け、温熱6要素の物理式から導かれた人体の熱負荷と、被験者実験に基づく温冷感を統計処理して人体の熱負荷を結ぶことで熱的快適性を求めている。これは、温熱6要素から快適性を予測するためには有用な手段である。また、室内滞在者が十分に多いこと、室内が均質であること、温熱6要素が一定という条件が仮定されている。従って、長期滞在を目的とした空調された執務空間などの快適性を評価するためには非常に有効な手段である。

一方、de Dear<sup>2)</sup>らは行動的・心理的適応により、自然換気を用いたオフィスの熱的快適条件が空調されたオフィスとは異なることを報告している。厳密な環境制御が行われている実験室において行われた結果に基づくPMVでは、快適温熱環境範囲が比較的狭い範囲になっていると指摘している。本来は自然換気オフィルに対する提案であったが、アダプティブ・モデルは間欠空調やハイブリッド空調が行われている空間にも適用する事例も報告されており、設備容量の縮小や設定温度の緩和の理由とされている。また、オフィスのように長時間滞在するための空間を評価するだけではなく、滞在時間が短い空間、特にエントランスやアトリウムといった移動を前提とした空間に対しても、行動的・心理的適応があることを解明する研究も行われている。

エントランスやアトリウム等の移動空間の省エネに関しては、必ずしも温熱環境を均一に保つ必要はなく、分布を考えることでエネルギー消費量も削減できる。さらに、エネルギーを削減して移動空間を非空調空間としたとき、屋外環境もしくは半屋外空間と同等の環境になる。中野ら<sup>3)</sup>は駅舎のように移動を伴う非空調空間においては厳密な環境制御を行うことができないため、制御点としての熱的中立温度を求めるのではなく、制御範囲としての熱的快適域を求めることが重要であると述べている。また、非空調空間に短時間滞在した時における熱的快適域・受容域を算定することで、非空調空間においても我慢を強くない温熱環境計画の可能性を提示している。

滞在を前提とした空間と移動を伴う空間の温熱環境について述べたが、建築は本来これら二つの空間の総体で

あるので、各空間との連続性と関連性において評価する必要があると考えられる。中村<sup>4)</sup>は「人体を、行動を伴った時間的連続体と捉えたうえで、人体が建築空間の中にあるときの環境の温度」と居住環境温度を定義している。長谷部ら<sup>5)</sup>は屋外環境から屋内環境へ移動する際の温熱感を計測するための移動計測カートを開発し、過渡的環境の評価を試みた。また鶴飼ら<sup>6)</sup>は屋外環境から執務空間に移動した滞在者は空調にインパクトを求めるため、屋外から執務空間に至る移動空間で温熱履歴をリセットするべきであると述べており、空間の連続性と関連性の観点から具体的な提案を行っている。建築計画学の視点では「快適」を「快い状態に適する」行動を伴った概念と捉えており、快・不快の判定には微細な環境の差異から導かれた動的な熱的快適性が重要な概念となると考えられる。屋外から執務空間に至るプロセスにおいて更なる省エネを実現するために、移動空間をあえて不均一環境として、滞在者が執務室に至る温熱履歴を踏まえた上で快適と思える空間を計画・設計するためには、不均一環境における温熱履歴などの物理的な環境条件と多様な心理的・生理的反応を小さな時程数で定量的に把握した上で評価する必要がある。

### 2 目的

近年、建築の設計においてはBIMを用いることが主流になりつつある。設計時に作成したモデルを各種シミュレーションソフトに転用する方法も研究されており、簡単なシミュレーションであれば意匠設計者自らが基本設計の段階で解析を行うことも可能になった。また、ある数値目標を入力するとソフトウェア自身が最適解を導くアルゴリズムを実装したソフトウェア<sup>7)</sup>も実用化されている。意匠設計者が空間と環境の関係性を空間のシークエンスとして捉えるならば、不均一環境を空間に適用することで温熱履歴を空間デザインの要素として取り込むことが可能になるだろう。このとき問題になるのがシミュレーションソフトに入力する数値目標の設定で、意匠設計者が思い描く空間、たとえば洞窟から森林に移動し、森林から川辺に移動した時のような行動を伴った身体感覚と、数値化された温熱環境を橋渡しする具体的な数値情報が不足しており、環境の目標値に入力すべき数値が設計者の意図をうまく反映しないという問題がある。この問題を解決するためには、環境のセンシングを身体感覚を鍛えるツールとして日常のレベルにまで拡張して行う必要がある。

近年、情報通信分野ではウェアラブルなセンシングを

指向する動きがあり、現在ではこの課題を克服する技術が揃いつつある。具体的には、環境情報をセンシングするための手段として「Arduino」をはじめとしたオープンソースのマイコンがある。例えば、ArduinoはProcessing言語を実装しており、基板にはAtmel AVR マイクロコントローラと簡単な入出力端子を具備している。ハードウェア情報は無償で公開されており、多くの互換機が存在している。ArduinoはスタンドアロンもしくはPCと接続することを念頭に設計されていたが、スマートフォンと連携するデバイスの登場により、インターフェイスをスマートフォンに代用することも可能になった。スマートフォンはGPS位置情報、ジャイロセンサ、電子コンパス、加速度センサ、輝度センサ等を実装している。また、API (Application Programming Interface) が公開されているのでマイクやカメラといったデバイスも風圧(圧力)や照度センサに転用することによって、それ自体をウェアラブルなセンシングデバイスとして扱うことも可能になった。これらのデバイスを用いることで情報量が飛躍的に増え、時間精度の高いセンシングが可能になることで、非定常な現象を計測することも可能になった。

本研究は、人間の行動や心理・生理を加味しながら、我々はどうのときに快適・不快と感じるかをライブ状態で計測し、そこから動的な熱的快適性に関する知見を得ることを目的としている。まず(1)人間の行動と心理量・生理量を加味しながら環境を計測するウェアラブルデバイスを開発し、次に(2)このデバイスを用いて熱的快適性に関する評価手法について研究する。そして計測によって得られたデータと評価から(3)動的な熱的快適性を現実空間に適用する手法を開発し、快適性とエネルギーの両面から評価する、というスキームで研究を進める。環境の変化は人間にとって不可視ではあるが、我々の日常生活に無意識のうちに大きな影響を与えている。そして、その変化を実現するために多くのエネルギーを消費していることにも留意すべきであろう。人間の動的な熱的快適性と環境との相関を認識、分析することで、人間と環境とエネルギーを調和する新しいデザインが可能になると考えられる。本稿は(1)のデバイスの開発に関する報告であり、実測の結果も合わせて報告する。

### 3 研究方法

#### 3.1 開発の方針

人間の行動や心理を加味しながら、どのようなときに快適と感じるかを簡易な方法で計測する。そのためには計測という行為が負担になるのではなく、被験者(ユーザー)にとって気持ちよく楽しい体験になるようにデザインする必要がある。また無意識と意識の境界をモニタリングすることも重要だと考えられているので、ひとまず計測するという行為自体を極力減らすことを考えた。そこでセンサ自体を体の一部、たとえばリュックサックや洋

服の襟などに固定できる程度の大きさで制作し、適宜スマートフォンで値を読み取り、アプリケーションを操作している時だけ計測をしている感覚になるようデザインする必要がある。バックグラウンドではソフトウェアを操作していないときも計測を続けているが、この意識的に値を読み取る行為とバックグラウンドでの計測の差異が意識と無意識を区別するトリガーとなる。

気づきや発見がもたらされる仕組みを組み込むことで計測自体が楽しくなり、より継続的に計測できるのではないかと考えたので、センサの値を読み取るだけではなく、被験者がある環境を体験したとき、その感覚を計測データと一緒にアンカーするインターフェイスも一緒に考えた。これらの気づきや発見における一連の操作をヴァルター・ベンヤミンのパッセージ論における「遊歩者(フラヌール)」に準え、本デバイスを「YUHO」と名付けた。

#### 3.2 システム概要

「YUHO」のプロトタイプ基板を図1、回路図を図2に示す。基板にはマイコン、温湿度計、照度計、風速センサ、Bluetooth BLEを組み込んだ。マイコンは「ATSAMD21」を採用した。照度計は「TSL2591」、温湿度計は「SHT25」、風速計は「wind sensor」を採用した。Bluetoothは「Koshian」に搭載されているモジュールを組み込んだ。PMVを求めるため6面放射温度計である「YUHO IR」を開発した。プロトタイプ基板を図3に示す。放射線センサには「TMP007」を用いた。マイコンの速度、および通信速度に余力がないため「YUHO」との連動は叶わなかったが、別途マイコンとリアルタイムクロックを用いてSDカードに6面の放射温度および時刻を記録することで測定データを整合させた。

各種センサはASHRAE及びISO等に準拠するべきであるが、本研究では時程数を優先してデバイスの開発を行うことで既往研究とは異なる解像度のデータが得られるようにした。

次にシステムの概要を示す。「YUHO」とスマートフォンをBluetoothで接続することにより「YUHO」からスマートフォンに送られてきた温湿度、照度、風速の情報を記録しつつ、スマートフォンに内蔵されているGPS位置情報、時刻および活動量を毎秒記録する。またアプリケーションで入力した情報(快・不快の強度)についても合わせて記録する。

図4は計測モードのインターフェイスで、照度、温度、湿度、風速、GPS、活動量、室内位置情報、快・不快の申告を行う。快・不快の申告は1秒間に最大6回程度認識できる仕様になっている。「YUHO」とスマートフォンで取得したデータはCSV形式で書き出すことが可能で、WifiまたはLTE回線経由でサーバへ送りgooglemapsにD3.js(Javascript)を用いて可視化するインターフェイスを開発した。可視化は風速等の環境情報や快・不快の申告の

強さを半透明の円で表現し地図上にプロットした。

### 3.3 キャリブレーション

温湿度センサはデジタルセンサであるためキャリブレーションを行う必要はないが、チップの発熱を拾わないように2秒に1回チップに通電して計測し、データの書き込みは毎秒行う仕様とした。また、照度センサについてもデジタルセンサであるためキャリブレーションを行う必要はない。しかし筐体によっては形態係数が変わるため、ケーシングについては注意が必要である。

風速センサは発熱体とサーミスタによって構成されており、温度と風速の関係を機械学習によって算定した計算式を用いて数値化し、それをアナログデータでマイコンが取得する仕様になっている。9.00Vの電圧をかけた状態では0.01m/sから25.00m/s程度の風速に対応する。ただし給電時の電圧と発熱体およびサーミスタにわずかな個体差があり、これが風速の値に影響を及ぼすため、線形性は担保されているが、風洞試験機でのキャリブレーションは必須になる。チューニングの結果、1次式の補正式でキャリブレーションが可能になったため、2点の風速値を計測することでキャリブレーションが可能になった。

図5はキャリブレーションモードである。

放射温度については、簡易グローブ球、および長短波放射計と比較を行った。「YUHO IR」、簡易グローブ球、および長短波放射計を移動計測カートに設置して日陰、日なた等を移動することでデータを比較した。(図6)

式1~4に上下二方向の長短波放射計から放射温度を算出する式を記す。放射温度は測定した上下面の短波、長波長量から渡邊ら<sup>8)</sup>の手法で算出した。

$$MRT_{2dir} = \left[ \frac{Direct + Diffuse + Longwave}{\epsilon_p \cdot \sigma \cdot f_{eff}} \right]^{0.25} - 273.2 \quad \text{式(1)}$$

$$Direct = a_s \cdot f_p \cdot I^* \quad \text{式(2)}$$

$$Diffuse = a_s \cdot f_{eff} \cdot \frac{(I_{dnt} + S \uparrow)}{2} \quad \text{式(3)}$$

$$Longwave = \frac{\epsilon_p \cdot f_{eff} \cdot (L \uparrow + L \downarrow)}{2} \quad \text{式(4)}$$

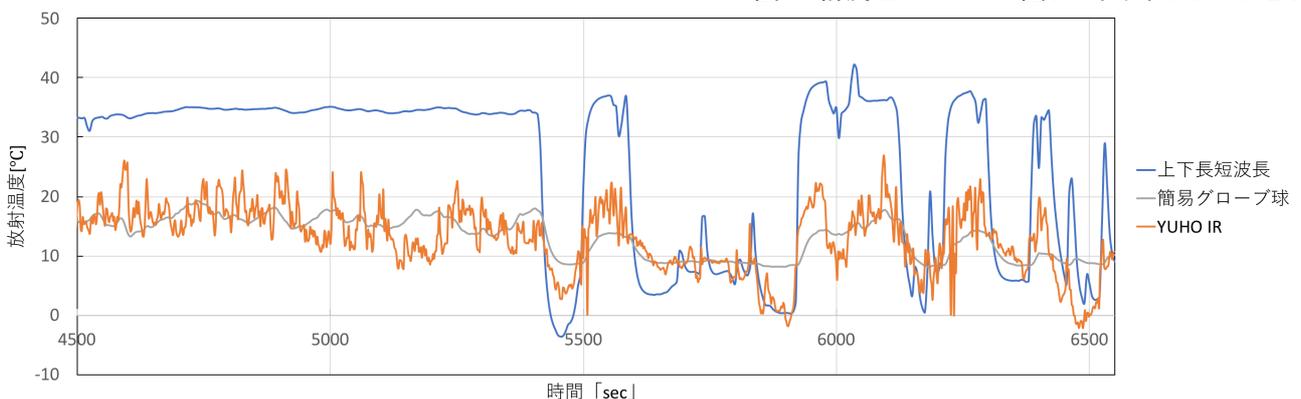


図6 YUHO IR, 簡易グローブ球, 長短波放射計の比較



図1 YUHO

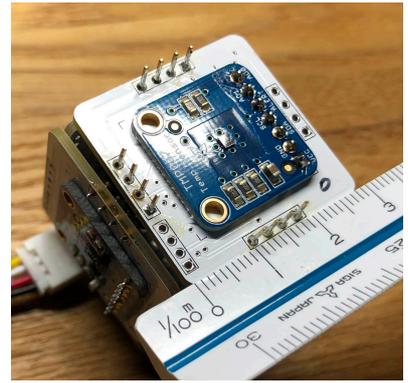


図3 YUHO IR

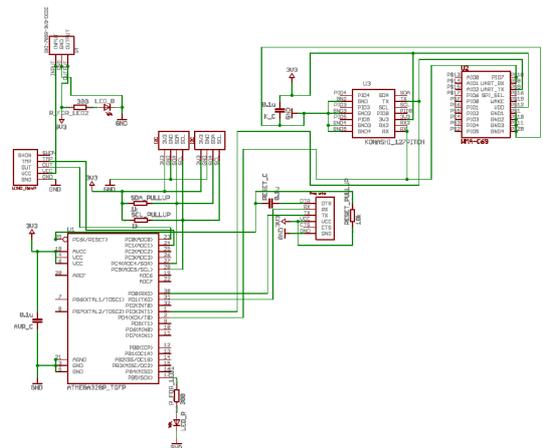


図2 YUHO 回路図

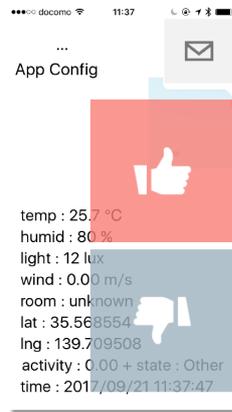


図4 計測モード

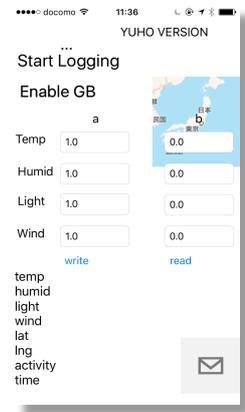


図5 キャリブレーション

簡易グローブ球は熱容量があり日射の有無を正確に表してはいたため、都市の熱的快適性を計測するためには長波と短波を分けて計測する上下長短波放射計が有用である。しかし、大変高価であること、かつ移動計測に難があることから「YUHO IR」を開発した。今回採用したセンサは感度波長帯が6~16 $\mu\text{m}$ の非接触温度センサであることから、日陰では上下長短波放射計と非常に似た特性を表しているが、日射環境においては短波を計測できておらず、日射センサなども追加をする必要があるだろう。しかし、通信の際にI2Cのアドレスが重複することからシステムを大幅に変更する必要があるため現時点での統合は難しい。

#### 4 実測結果と考察

2020年に開催される東京五輪マラソンを想定し、東京駅周辺(ルートA:皇居周辺, ルートB:日本橋周辺)において8月14日から9月9日の10:00から13:00に実測を行った。実測結果を図7, 図8に示す。被験者は健康な学生男女計25名(男性20名, 女性5名)とし、着衣量は約0.5 cloの服装を指定した。測定項目は快不快申告の他、気温、湿度、照度、風速、GPSとした。放射温度については開発の関係で実測項目から除いている。

快不快感の経時変化から、屋内環境から屋外環境への移動等の温熱環境が急変した場合や屋外歩行から屋外滞在をした瞬間に快不快申告が見られた。また、快不快申告は空気温度、相対湿度の絶対量と相関があり、気流速度、照度の絶対量とは相関が見られなかった。気流速度の変化量と快不快申告にはある一定の傾向が見られた。

都市における熱的快適性の計測には日射を加味した放射温度が必要であり、気流速度の変化量等では不十分であった。引き続きセンサを開発しつつ、今後は個人のばらつきと温熱環境の履歴に分類し、全天球カメラを用いた緑化率との関係など、多次元的に解析することで、快適性の観点から都市を評価したい。

#### 5 まとめ

Arduino, bluetooth モジュール, 各種センサとスマートフォンを組み合わせる動的な環境と心理量を計測可能なウェアラブルセンサを開発した。また6面放射温度計「YUHO IR」を開発し、上下長短波放射計と理論式から取得データの比較を行った。扱う情報量が増えたため「YUHO」に統合するためには通信システムについて再考しなければならないことが分かった。

東京駅周辺において実測を行った。気流速度の変化量と快不快申告にはある一定の傾向が見られた。



図7 心理量申告(快適)

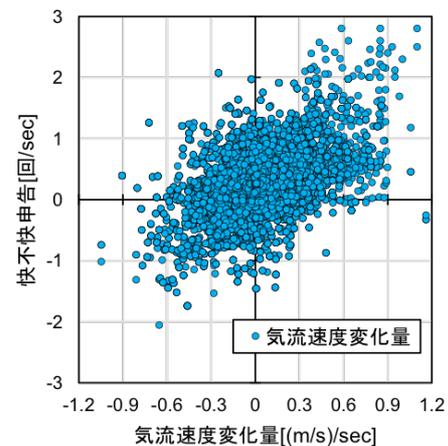


図8 気流変化量と心理量

#### 参考文献

- 1) P.O. Fanger, Thermal Comfort, Danish Technical Press, 1970
- 2) de Dear, R.J., et al., Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, Vol. 104(1), pp. 27-48, 1998
- 3) 中野 淳太, 田辺 新一 “環境適応研究の半屋外温熱環境計画への展開: 鉄道駅舎における熱的快適域と熱的受容域” 学術講演梗概集 2014(環境工学 II), 427-430, 2014-09-12
- 4) 中村 泰人 “生気象学的建築学思想” 日本建築学会計画系論文報告集 (373), 11-20, 1987-03-30
- 5) 長谷部 礼子, 堀川 晋, 田辺 新一, 木村 建一 “屋上から屋内に連続する空間における温熱感の研究” 学術講演梗概集, D-2, 環境工学 II, 1996, 351-352, 1996-07-30
- 6) 鶴飼 真成, 市川 勇太, 野部 達夫 “室内温熱環境の受容度に関する研究” 学術講演梗概集 2014(環境工学 II), 1329-1330, 2014-09-12
- 7) 中川 純, 眞下 茜, 河野 良平, 乾 久美子 “駅舎計画におけるシミュレーションの技術の適用に関する研究” 学術講演梗概集 2013(環境工学 I), 1185-1186, 2013-08-30
- 8) 渡邊 他: 測定に基づいた屋外における平均放射温度の算出方法, 日生氣誌 49(2), 49-59, 2012.

$MRT_{2dir}$  : 上下2 方向の長短波放射量から算出した平均放射温度[°C]

$a_s$  : 短波長に対する吸収率(=0.7)[-]

$a_L$  : 長波長に対する吸収率(=  $\epsilon_p$ =0.97)[-]

$Direct$  : 直達日射による人体受熱量[W/m<sup>2</sup>]

$Diffuse$  : 拡散日射による人体受熱量[W/m<sup>2</sup>]

$Longwave$  : 長波長放射による人体受熱量[W/m<sup>2</sup>]

$S\downarrow$  : 下向き短波長放射量[W/m<sup>2</sup>]

$S\uparrow$  : 上向き短波長放射量[W/m<sup>2</sup>]

$L\downarrow$  : 下向き長波長放射量[W/m<sup>2</sup>]

$L\uparrow$  : 上向き長波長放射量[W/m<sup>2</sup>]

$I^*$  :  $S\downarrow$  から分離した法線面直達日射量[W/m<sup>2</sup>]

$I_{diff}$  :  $S\downarrow$  から分離した水平面拡散日射量[W/m<sup>2</sup>]

$f_p$  : 人体投射面積率[-]

$f_{eff}$  : 人体有効放射面積率(=0.91)[-]