

# 建築における動的快適性に関する基礎的研究

## Dynamic Comfort in Architecture

中川 純

田辺 新一

Jun NAKAGAWA

Shin-ichi TANABE

早稲田大学

Waseda University

E-mail: levi@toki.waseda.jp, tanabe@waseda.jp

### 1. 研究背景

#### 1.1 快適性に関する研究

東日本大震災とそれに伴う福島第一原子力発電所事故を機に、建築と都市における快適性とエネルギーの関係がさかんに議論されるようになった。たとえば夏場において快適性を担保したまま空調機の設定温度をどの程度まで上げることが可能であるか、また照明方式を従来の全般照明方式から多灯分散照明方式に変更し、人が視覚的に感じる明るさを損なわない程度に照明を落とす方法等が研究されており、温度や照度といった単一の指標によって制御するのではなく、人間の生理反応や感覚、価値判断も合わせて評価の対象にする方向にシフトしつつある。

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[1]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[2]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[3]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。

#### 1.2 現状の課題

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[4]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[5]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ドを開発し、過渡的環境の評価を試みた。また鶴飼ら[6]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ることができる。このように考えると快・不快の判定には微細な環境の差異から導かれた動的な快適性が重要な概念とな

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。

### 1.3 新たな動向

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シミュレーションソフトも実用化されている。例えば、CFD を用いて樹木の最適配置や開口部の開口感を算出することも可能[7]になった。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」[8]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、ジャイロセンサー、電子コンパス、加速度センサー、輝度センサー等を実装している。また、API 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や照度センサーに転用することに

表 1 快適性に関するマトリクス

快感・快樂	快適（動的）	快適（静的）
art		Technology
共感		共有
複製不可能		複製可能
interactive		passive

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。

また、スマートフォンのようなカジュアルなモニタリングデバイスの台頭で、日々膨大な量の情報が蓄積されるようになったわけだが、SNS を人間の行動モニタリングとして捕まえるならば、この膨大な量の情報＝ビッグデータにはプライバシーの問題などまだ解決しなければならない問題が多数存在するが、そこから人間の行動に関する知見が「因果関係」からではなく膨大な情報群の「相関関係」から導かれることが分かっている。たとえば SNS の投稿数と小選挙区の得票数には強い相関が観測されており、従来であればその背後に潜む抽象的な概念を基に仮説を立てて予想をしていたものが、相関を探ることによって「DATA が語り出す」状況を作り出すことが可能になった。

## 2 研究の目的

本研究では、人間の行動や心理を加味しながら、我々はそのようなときに快適と感じるかをライブ状態で計測し、そこから動的な快適性に関する知見を得ることを目的としている。従来の静的な快適性と共に快感・快樂といったものも研究の対象とし、そこから動的な快適性を位置づけることを考えた。表 1 にあるように静的な快適性と快感・快樂を連続的な概念として、その中間に動的な快適性が存在するという仮説をたてた。静的な快適性と快感・快樂に技術をあらかず Technology と Art ということばをあてはめると、それぞれ共有可能な技術と共感する技術と言い換えることが出来るだろう。静的な快適性が、たとえばエアコンのように人間にとって受動的で複製可能な技術で達成できるものとするならば、快感・快樂は空間その他の作用により共感を伴った感覚として、人間と空間の相互作用があつて初めて得られる感覚と定義した。そこで、まずは（1）人間の行動や心理を加味しながら環境を計測するデバイスを開発し、次に（2）このデバイスを用いて快適性に関する測定方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から（3）動的な快適性を探る方法を検証する、というスキーム

で研究を進めた。環境の変化(ダイナミクス)は、人間にとって不可視ではあるが、この不可視な環境の変化は、我々の日常生活に無意識のうちに大きな影響を与える。我々の日常生活は多くのエネルギーを消費し営まれている。人間の動的な快適性と環境の相関的な関係を可視化し、分析することで、エネルギー効率の良いライフスタイルへシフトするきっかけを作りたいと考えている。本稿は(1)のデバイスの開発に関する報告である。

### 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と考えられる。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。そこでセンサー自体を体の一部、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した。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、センサーの値を読み取るだけでなく、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・ベンヤミンのパサージュ論における「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、Bluetooth BLE、風速計、給電端子(MicroUSB)、オプションとして表面放射温度計を組み込んだ。マイコンには高性能低消費電力 AVR8 ビットコアのマイコン「ATMEGA328P-AU」を用いた。照度計は「TSL2591」、温湿度計は「HTU21DF」、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。本来であれば採用するセン

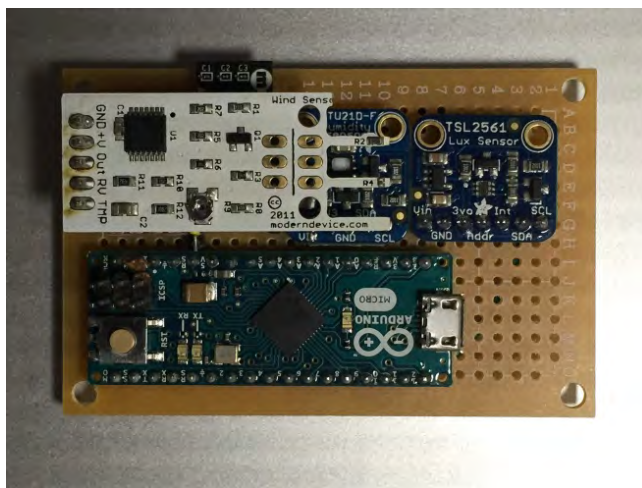


図1 プロトタイプ基板

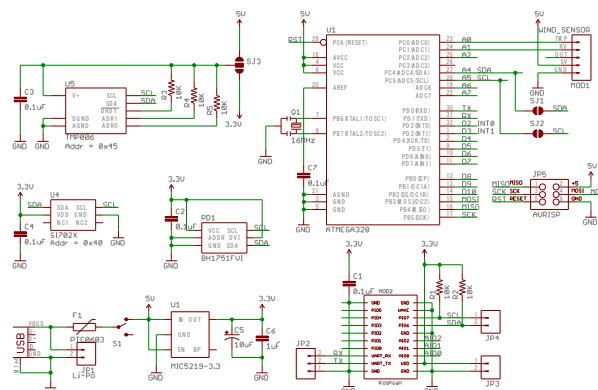


図2 YUHO回路図



図3 計測モード



図4 インタラクティブモード

サーはASHRAE及びISO等に準拠すべきであるが、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ことに期待した。

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 位置情報を毎秒記録する。またアプリケーションを操作するタイミングと、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 3 は計測モードのインターフェイスで、照度、温度、湿度、風速を表示する。図 4 はインタラクティブモードのインターフェイスで、快・不快の申告を行う。快・不快の申告は 1 秒間に 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情報は CSV 形式で書き出すことが可能で、googlemaps に可視化する。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する。システムの開発には Javascript を用いた。

#### 4 実測結果と考察

2015 年 3 月に東京都世田谷区の公園にて実測を行った。図 5 に風速分布を地図にプロットしたものを示す。図 6 は実測開始から 12 分間における風速と快適申告の相関をグラフ化したもので、横軸は時間[s]を表す。実測は視覚情報の影響をできるだけ排除するため、1 回目はダミーの実測を行い被験者の馴化を行った。

快・不快申告は風速の影響が大きいように思えたが、明確な相関は見られなかった。実測結果から環境と心理量に優位な相関は見られなかったため、実測によって得られる豊富なデータから人間一般の快適性を表現しうるメタモデルを生成し、特殊な状況、特定の人間のみ適用可能な個別モデルを、パターン認識と機械学習を用いて解析する必要があると考えられる。

#### 5 まとめ

Arduino、bluetooth モジュール、各種センサーとスマートフォンを組み合わせることで動的な環境を計測できるセンサーを開発した。またこのシステムにより、被験者が良いと思った環境の物理情報を得ることが可能になったため、環境情報と心理量について、行動履歴を含めて可視化することができた。計測したデータを CSV 形式で抽出し googlemaps にプロットした。YUHO の改良点として現段階では下記の 2 点が必要と考えている。

(1) 心拍センサーを追加して周波数解析を行うことで、心理量と生理量を比較する。(2) 位置情報の取得には GPS を利用しているため、屋内における位置情報を取得することができない。BLE を使った Beacon で屋内の位置情報を取得する方法を検討したい。

#### 謝辞

本研究における計測装置の開発には竹中育英会の研究助成を受けた。



図 5 風速分布

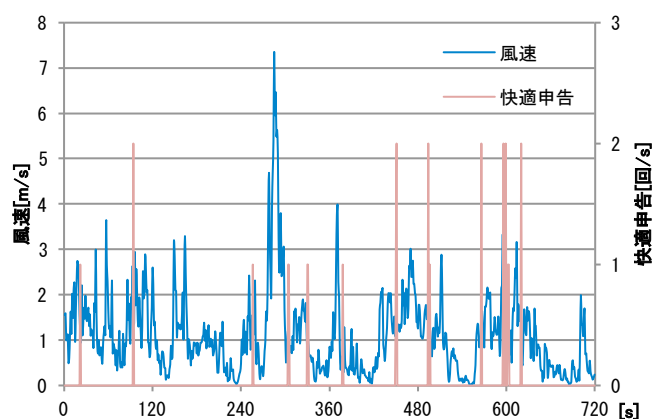


図 6 風速と快適申告

#### 文 献

- [1] P.O.Fanger, Thermal Comfort, Danish Technical Press,1970
- [2] deDear,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”生気象学的建築学の思想” 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、林立也、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：その 1 移動計測カートを用いた空港旅客ターミナルビルでの実測” 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 その 1~5” 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 良坪、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 その 1：逆解析を用いた駅舎周辺樹木の最適配置に関する設計手法の提案” 学術講演梗概集 2013(環境工学 I), 1185-1186, 2013-08-30
- [8] <http://www.arduino.cc/>