主体的快適性に関する基礎的研究

主査　遠田　敦[*1]
委員　富樫　英介[*2]、永井　拓生[*3]、中川　純[*4]

近年の建築環境は、人間の心理や生理反応、感覚、価値判断等も合わせて評価の対象にする方向にシフトしつつある。本研究では、人間の主体的な選択と行動の効果を基礎に置きながら、環境的にゆらぎのある建築空間の可能性を探ろうとするものである。このような検討を行うために必要となるものは、人間の個別性を評価可能な細やかな計測であり、また、これらの詳細な情報を活かすことのできる、柔らかな制御装置群である。そこで本研究では、人間の主体的快適性にもとづく建築計画を行う上で基礎となる、1）建築内部における環境行動計測装置、2）屋外における計測装置、3）計測値と設備を結びつける制御システム、の 3 つを開発し、その利用可能性について検討を行った。

キーワード：1）主体的快適性、2）センサーネットワーク、3）環境調整行動、4）Adoptive Model、5）移動計測、6）動的快適性、7）不均一環境、8）温熱履歴、9）Arduino、10）GPS

FUNDAMENTAL STUDY ON THE VALUE OF HUMAN ACTIVE CHOICE IN THE BUILDING ENVIRONMENT

Ch. Atsushi Enta
Mem.　Eisuke Togashi,　Takuo Nagai,　Jun Nakagawa

In this research, we try to explore the value of the building space where the environment fluctuates, based on human active choice and behavioral effects. Three systems were developed in this research, an indoor environment measurement device, an outdoor environment measurement device, and a control system for facility equipment.

1. 研究背景と目的

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、建築における快適性と省エネ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上げることが可能か、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、視覚的に感じる明るさを損なわない程度に照度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、人間の心理や生理反応、感覚、価値判断等も合わせて評価の対象にする方向にシフトしつつある。

建築の熱的快適性の評価は、建築空間における温熱環境など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た歴史がある。特に PMV [文 1)]は算出するための計算式を「快適性＝人体の熱収支の関数」と「人体の熱収支＝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収支と、快適性に関する統計処理によって導かれた人体の熱収支を結ぶことで熱的快適性を求めているので、快適性と温熱 6 要素の関係を求め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のもとに算定するため、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といえる。

一方、de Dear [文 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で検証された基準では、快適とされる温熱環境が比較的狭い範囲になっていると指摘しており、アダプティブ・モデルが空調機の快適性評価に導入されると、設備容量の縮小や設定温度の緩和などの効果を得ることが期待できる。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、廊下といった移動を前提とした空間に対して、行動的・心理的適応の側面から解明することで、快適性と更なる省エネを両立することも可能になると考えられる。

エントランスやアトリウム等の移動空間の省エネを追求すると、温熱環境を均一に保つことが難しいレベルまでエネルギーを削減する必要がある。さらにエネルギー

[*1] 日本大学 専任講師、[*2] 工学院大学 准教授、[*3] 滋賀県立大学 助教、[*4] Levi 設計室

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[文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いない温熱環境計画の可能性を提示した。

以上、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触れたが、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ると考えられる。中村[文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[文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トを開発し、その評価を試みた。また鵜飼ら[文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、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いるため、快・不快の判定には細か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た時、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定数で定量的に把握した上で評価する必要がある。

本研究は、上記に記したような人間の主体的な選択と行動の効果を基礎に置きながら、環境的にゆらぎのある建築空間の可能性を探ろうとするものである。このような検討を行うために必要となるものは、人間の個別性を評価可能な細やかな計測であり、また、これらの詳細な情報を活かすことのできる柔らかな制御装置群であり、近年の情報化技術はこれらを後押しすると考える。本研究では、1）建築内部における環境行動計測装置の開発、2）屋外における計測装置の開発、3）計測値と設備を結びつける制御システムの開発、の 3 つについて報告する。

2. 屋内環境行動計測装置の開発

2.1. 開発の目的

住空間内で生活者が主体的におこなう環境調整行動が発生するタイミングを、センサーによって観測できるデータのみにより推定する手法について検討をおこなう。また、生活者の行動と住空間の温熱環境の観測とデータの取得については、筆者らがこれまでに開発してきたワイヤレスセンサーネットワークモジュール[文7)]を使用することとし、その性能評価についても合わせて検討する。

2.2. 研究方法

2.2.1. 研究概要

計測対象として選定した住宅にワイヤレスセンサーネットワーク（WSN）を構築した上で、これを用いて温度[℃]、湿度[%RH]、照度[lx]などの環境データを断続的に計測し、これをデータサーバに蓄積する[注1)]。また同様にして、居住者による主体的な環境調整行動の現れのひとつとして、窓の開閉状態を記録する[注2)]。

観測された温熱環境データ、年月日および時刻を説明変数とし、窓の開閉状態を目的変数とする推定モデル（識別器）を構築するため、一定期間観測を継続した後、種々の観測データを教師データとした機械学習をおこなう。識別器の構築にあたっては、説明変数となる温熱環境データなどの変数を組み替え、説明変数の多寡や種類と推定精度との関係に着眼した分析をおこなう。

2.2.2. ワイヤレスセンサーネットワークの概要

観測に用いる WSN の構築には、筆者らがこれまで開発してきた WSN モジュールを用いる（**図 2-1**）。このモジュールは、オープンソースハードウェアの Arduino をベースとして開発され、観測をおこなうセンサーノードと観測データをデータサーバへ送信するハブノード（**図 2-2**）の 2 種類によって構成されている。

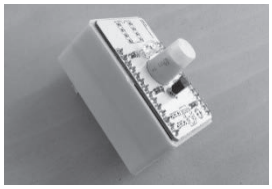

図 2-1　WNS モジュール外観（センサーノード）

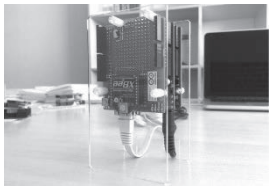

図 2-2　WNS モジュール外観（ハブノード）

2.2.3. 実験場所および日時

観測対象としたのは、夫婦二人暮らしの住宅であり、夫は日中、仕事のため外出し、妻は日中、おおむね在宅しているというライフスタイルである。

観測期間は 2010 年 1 月から 2012 年 9 月末まであるが、センサーノードはその期間中に随時追加、および更新されていったため、すべてのセンサーノードのデータがその期間にわたって存在するわけではない。センサーノード数と観測期間との対応関係を**図 2-3** に示す。

センサーノードの設置時期が統一されていないため、識別器を用いた分析においてはすべてのセンサーノードの観測期間が重複する 2011 年 3 月 18 日から 2012 年 9 月 30 日までのデータを用いることとした[注3)]。周期関数

モデルの構築には、全期間のデータを用いることとした。

2.2.4. 観測方法および分析準備

観測するデータの種類に応じて、センサーノードは 3 種類用意した。主に屋内に設置し、温度[℃]・湿度[%RH]・照度[lx]を観測するものを I 型とする。主に屋外に設置し、温度・湿度・照度・気圧[hPa]・風向[deg]・風速[m/sec]・雨量[mm]を観測するものを O 型とする。居住者の主体的な環境調整行動の現れとして窓の開閉距離[mm]を観測するものを R 型とする。なお、本来は R 型の計測値は距離の数値として記録されるが、本研究では開閉状態の二値（開か閉か）として扱うこととした。センサーノードの型と設置場所との対応を**図 2-4** に示す。

分析をおこなう前の準備として、得られた観測データの整形をおこなう。各センサーノードから得られた観測値は必ずしも時刻が一致しないため、1 日を 5 秒ごとに区切り、その区間に該当する時刻の観測データが存在する場合はその区間の代表値とすることとした。また、観測値が複数ある場合はそれらの平均値を代表値とし、区間に該当する観測値が存在しない場合はこの区間の観測値はデータなしとして扱う。この操作はすべてのセンサーノード、すべての観測データの種類に対して実施し、最終的には全観測期間にわたってすべてのセンサーノードの観測値を統合する。

以降で実施する分析においては、これらのデータを機械学習における教師データおよびテストデータとして扱うとともに、識別器による方法との比較として作成する周期関数モデルを決定するための実測値として扱う。

2.2.5. 分析方法

ここでは得られた観測データを分析する方法について述べる。後述するように、機械学習により得られた識別器を使った推定と、周期関数モデルによる推定との比較を通じて検討をおこなう。いずれの推定においても、モデルが得られた後に得られたモデルによる識別結果と元にしたデータとの対応から識別率を算出し、これを指標としてモデルの妥当性評価をおこなう。

（1）機械学習による識別器の構築

種々の観測データの値によって窓の開閉状態（開と閉の二値）を推定する識別器を得るため、前項で用意したデータを元に、**表 2-1** に示した特徴ベクトルの組み合わせごとの識別器を、ナイーブベイズ法を用いて得る。

センサーノードの数が増えるほど識別に用いることができる特徴ベクトルを増やすことができるため、一般的に考えれば識別器の推定精度は上昇するものと予想することができる。その一方で、センサーノード数が増えると計算のための時間的コストや観測のための機材的コストが膨らむことから、それらのバランスを考える必要が出てくる。特徴ベクトルの組み合わせ数を変えて分析をおこなうのはこの目的のためである。

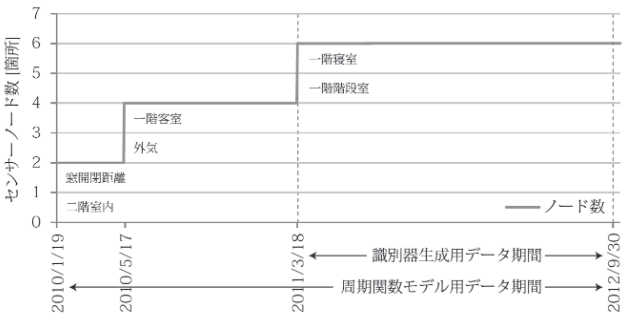

図 2-3　センサーノード数と観測期間との対応関係

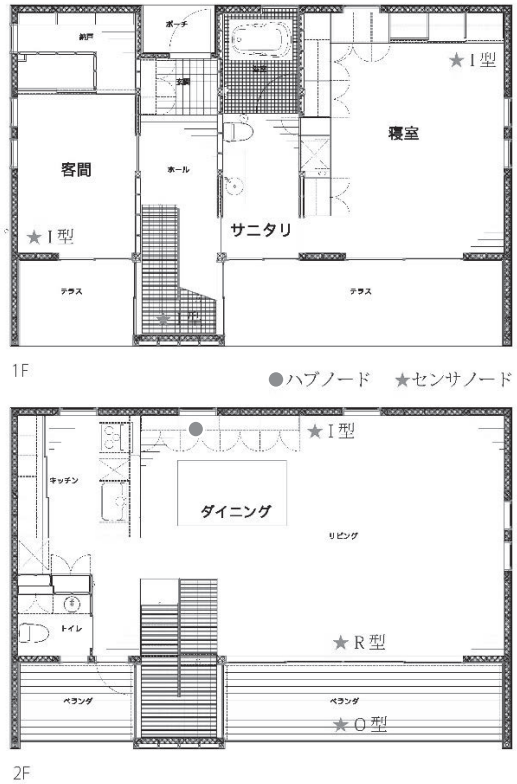

図 2-4　センサーノードの型と設置場所

また、機械学習に関する処理は統計解析用のソフトウェア「R」を用いて実施した。R において、ナイーブベイズ法による学習はライブラリ「e1071」の naiveBayes 関数を用いることで実装することができ、本研究においてもこれを用いることとした。

（2）周期関数モデルの構築

人間の行動にはある種の周期性（習慣性）があることは経験的に明らかであることから、窓を開け閉めするという行為にも周期性があると仮定する。つまり、窓の開閉状態がサインカーブに類する周期的で単純な変動で表現できるものと考える。

この仮定が成立するかについて、得られた観測データから変動の傾向を確認する。データの量が膨大であるため、データを人間が目視して評価することは困難であるため、ここでは開閉の状態を RGB 値に変換して画像として表現することとした。その際、表現の都合上、60 秒

を 1 ピクセルとして扱うこととしたため、元とした開閉の二値データを 60 秒ごとの平均値として再計算した。

画像の横方向1行を1日分のデータとして割り当てる。1 日は 1440 分であることから、横幅は 1440 ピクセルとなり、先の手順で再計算された値（値域は 0 から 1）を用いて、緑（0x00FF00）から赤（0xFF0000）までのグラデーションで RGB 値を割り当てる。画像の縦方向に全計測期間分の結果を同様にして割り当てる。これにより得られた画像を**図 2-5** に示す。**図 2-5** より、横方向の周期（日内変動：朝は閉状態から始まり、昼に開状態を経て晩に再び閉状態に戻る）と縦方向の周期（年内変動：冬場は閉状態が多く、夏場は開状態が多い）とがあることが確認できる。従って、このふたつの変動の和として周期関数をモデル化する。

日内変動については、すべての観測データについて同一時刻区間の平均値を算出し、これにより得られた分布に対して最もよく近似するサイン関数を非線形最小二乗法により得る。同様に、年内変動については各日の平均値をすべての計測期間にわたって算出し、これにより得られた分布に対して最もよく近似するサイン関数を非線形最小二乗法により得る。このふたつの周期関数は月・日・時・分の 4 つの変数により得られる数値が定まり、その和をもって窓の開閉状態の推定値とすることとした。

計測期間と同一の月日時分の値を入力して得た推定値が 0.5 以上の時を開状態とし、0.5 未満の時を閉状態とする。それぞれの月日時分に対応する開閉状態の一致率を指標としてモデルの妥当性評価を実施する。

2.3. 結果および考察

ナイーブベイズ法を用いて識別器を得て推定した場合の結果を**表 2-2** に示す。大まかな傾向としては、特徴ベクトル数が増えるにつれて識別率が高くなる傾向があるが、84[%]程度で頭打ちになっている。モデルに用いる特徴ベクトルが＜二階室内温度＞のみの場合、識別率は 67.95[%]であったものが、他のセンサーの観測値と組み合わせることでよりよい識別率が得られる結果となった。また、単に観測データだけでなく時間帯や季節が行動に影響を及ぼすとも考えられるため、月日時分秒の値を特徴ベクトルに加えて識別器を得ることとした。その結果、加えなかった場合に比べて総じて識別率が高くなっており、今回の分析においては識別に有効な変数であった。一方、周期関数を用いて作成した推定モデルの結果について、観測期間全体の開閉状態推移予測結果は**図 2-6** のようになった。また、日内変動と年内変動のそれぞれの周期関数のパラメータは、**表 2-3** の通りとなった。

これらを用いて実測値との比較を行った際の一致率は 66[%]であり、先に述べたナイーブベイズ法による識別器を用いた場合に比べて劣る結果となった。

表 2-1　特徴ベクトルの組み合わせ

	二階 室内温度	外気 温度	一階 客室温度	一階階段 室温度	一階 寝室温度	月日 時分秒
識別器 1	○					
識別器 2	○					
識別器 3	○	○	○			
識別器 4	○	○	○	○		
識別器 5	○	○	○	○	○	
識別器 6	○					○
識別器 7	○	○				○
識別器 8	○	○	○			○
識別器 9	○	○	○	○		○
識別器 10	○	○	○	○	○	○

図 2-5　実測データの図化

図 2-6　周期関数モデルにより推定された開閉状態

表 2-2　識別器ごとの識別率一覧

時分秒なし	識別率 [%]	時分秒あり	識別率 [%]
識別器 1	67.95	識別器 6	80.45
識別器 2	81.53	識別器 7	84.00
識別器 3	83.64	識別器 8	84.36
識別器 4	83.05	識別器 9	84.06
識別器 5	81.43	識別器 10	82.88

表 2-3　周期関数の係数一覧

$$y - (A_d \sin(\theta + t_d\pi) + b_d) + (A_y \sin(\theta + t_y\pi) + b_y)$$

日内変動	係数	年内変動	係数
振幅 A_d	0.112	振幅 A_y	0.359
位相 t_d	1.652	位相 t_y	1.285
定数項 b_d	0.304	定数項 b_y	0.298

2.4. 屋内環境行動計測装置開発のまとめ

本研究は、ワイヤレスセンサーネットワークによって観測された温熱環境データから人間が行動するタイミングを推定する手法の検討を行ったものである。

周期関数によるモデルと比較して、機械学習を用いた手法は十分な推定結果を得られることが明らかとなった。識別器の作成に用いる特徴ベクトル数は、十分な推定精度を得るためにはいくつかの変数が必要となるが、多すぎても逆に精度を落とす結果となることが示された。

また、低価格なセンサー機器であっても、断続的に環境の変動を捉えることができるものであれば、データ数としてのスケールメリットを活かした手法で有効な識別モデルを得ることができることが示された。

3. 屋外環境行動計測装置の開発

3.1. 研究方法

3.1.1. 開発の目的

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シークエンスを考慮した感覚と、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、身体感覚を鍛えるツールとして環境センシングを日常のレベルにまで拡張して行う必要がある。

また、情報通信分野ではウエ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「Arduino」などのオープンソースのマイコンを使用したセンシングとともに、スマートフォンを用いたセンシングにも注視したい。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、加速度センサー、輝度センサー等を実装している。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や照度センサーに転用することによって、それ自体をウエ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、我々はどのようなときに快適・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。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。

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）にとって気持良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、センサー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。ここでは屋外環境行動計測装置の開発、および実測の結果について報告する。

3.1.2. システムの概要

YUHOのプロトタイプ基板を**図 3-1**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（Micro USB）、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サーは 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 3-2**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 3-3**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、Wi-Fi または LTE 経由でサーバへ送り Google maps 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。

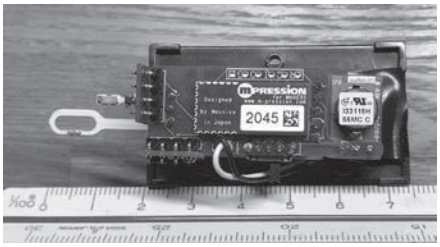

図 3-1　プロトタイプ基板

図 3-2　計測モード

図 3-3　インタラクティブモード

3.1.3.　キャリブレーション

温湿度センサーは本来キャリブレーションの必要はないのだが、毎秒計測するたびに通電することによって、チップ内に流れた電流による発熱が取り除かれる前に電流が流れることで、チップ自体が熱を持つという現象を確認した。そこで温湿度センサーに関しては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に変更した。

風速計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。5.00[V]の電圧をかけた状態では 0.01[m/s]から 10.00[m/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、これが風速の値に大きな影響を及ぼすため、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であった。本デバイスは国立保健医療科学院が所持する風洞試験器を用い KANOMAX のクリモマスター風速計を用いてキャリブレーションを実施した。

3.2.　実測結果と考察

2015年3月に東京都大田区の本門寺境内にて実測を行った[注4)]。図 3-4～図 3-6 は実測開始から 12 分間における照度、温度、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、特定の人間のみに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。

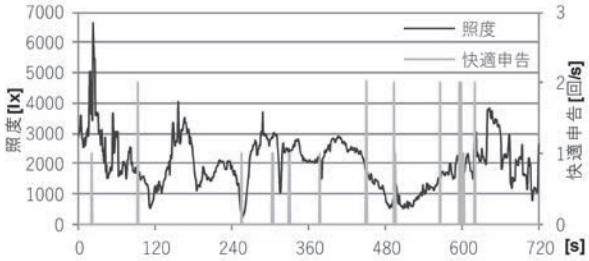

図 3-4　照度と快適申告

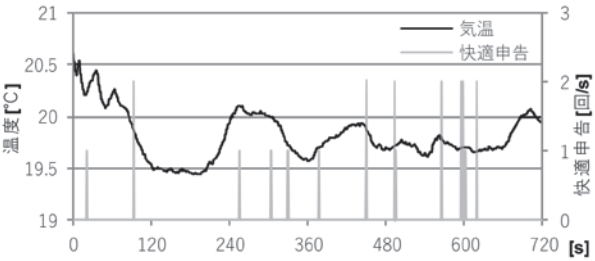

図 3-5　温度と快適申告

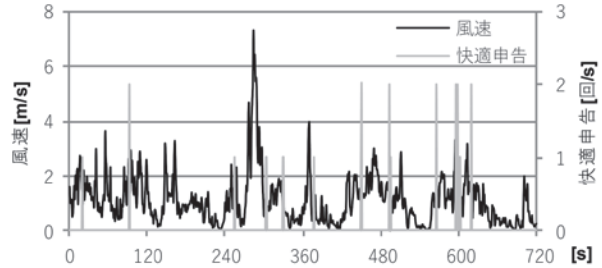

図 3-6　風速と快適申告

3.3.　屋外環境行動計測装置開発のまとめ

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て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 google maps 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 を利用しているので、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。

4. 家電自動制御装置の開発

4.1. 開発の方針

2011 年の東日本大震災以後、省エネや家庭内エネルギー制御の高度化へ向け、HEMS の導入が進められている。経産省が普及に向けた各種施策にもかかわらず、現時点で HEMS そのものが広く普及したとは言えない状態にあり、また機能的にも「見える化」が主体の状況である。今後、電力小売り自由化など周辺状況の進展にも伴い、家庭内エネルギー分析・制御に対するニーズが高まる事が想定される中、HEMS と接続される家電機器については、宅内標準通信プロトコルである ECHONET Lite1）を装備した機器、もしくはアダプタの追加などにより後から対応可能とした機器が広く市販される状況となってきており、市場側は HEMS による機器制御導入に対して“レディ”の状態と言える。しかし、ECHONET Lite では、たとえば家庭用エアコンにおいても、取得できる情報、制御できる内容が異なるケースが多いため、自動制御の実現へ向けて、実際の市販機器における実装内容の把握が必要であると考えられる。

制御対象に関しては、一般家庭におけるエアコンのエネルギー消費量割合は相対的に高く、エアコンの制御手法は重要である。制御の目標を、人の心理や健康性に置くことで、生活の質を高めることも重要だが、近年の真夏日の増加と過剰な省エネ意識から、過酷な温熱環境による熱中症などの健康被害を回避するための制御についても必要性が高まっている。本研究では、近年普及が進ても必要性が高まっている。本研究では、近年普及がむ ECHONET Lite 対応家電機器の実装状況調査、代表的センサーの情報有効性試験を実施すると共に、人体熱モデルを用いて過酷環境における家電機器の自動起動条件の検討を行い、上記を組合せて動作させる試験システムを構築する。

4.2. 研究概要

早稲田大学 EMS 新宿実証センター、および早稲田大学で利用する実験住宅に導入済みの市販 ECHONET Lite 機器について、HEMS-GW との接続により実装プロパティを調査する。次に、人体熱モデル JOS-2 を用いて、暑熱環境、寒冷環境における危険回避に対応したエアコン自動起動の閾値を検討し、上述のセンサーについて情報の利用可否、有効性に関する実験を行った上で、センサー情報を用いて寒冷環境における家電動作閾値判定のアルゴリズムを試作し、ECHONET Lite 実機器を用いて実証実験を行った。

4.3. 市販 ECHONET Lite 機器の実装プロパティ調査

市販品機種を用いて ECHONET Lite 接続可能な製品について、実装プロパティの調査を行った。調査方法は、各機器個別に電源を接続し、実際に動作させた上で HEMS からネットワーク経由で実装プロパティを確認し

表 4-1 機器オブジェクトスーパークラス

No	プロパティ名称	EPC	プロパティ内容	アクセス	必須	実装有無							
						A	B	C	D	E	F	G	H
1	動作状態	0x80	装置の ON/OFF	Set/Get	Get○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	設置場所	0x81	設置場所	Set/Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	規格 Version 情報	0x82	APENDIX リリース番号	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	識別番号	0x83	下位層 ID+メーカ規定	Get						○		○	○
5	瞬時消費電力計測値	0x84	瞬時消費電力(W)	Get				○	○	○	○	○	○
6	積算消費電力計測値	0x85	積算消費電力(Wh)	Get		○		○	○	○	○	○	○
7	メーカ異常コード	0x86	メーカ毎規定	Get			○	○	○		○		
8	電流制限設定	0x87	電流制限設定(%)	Set/Get			○						
9	異常発生状態	0x88	異常発生の有/無	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	異常内容	0x89	（規格参照）	Get		○	○	○	○	○	○	○	○
11	メーカコード	0x8A	コンソーシアム規定	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12	事業場コード	0x8B	メーカ毎規定	Get		○	○	○	○		○	○	
13	商品コード	0x8C	メーカ毎規定	Get		○	○	○	○		○	○	
14	製造番号	0x8D	メーカ毎規定	Get		○						○	
15	製造年月日	0x8E	YYMD 形式	Get		○	○	○	○				
16	節電動作設定	0x8F	節電動作の状態	Set/Get				○	○		○	○	
17	遠隔操作設定	0x93	公衆回線経由有/無	Set/Get					○				
18	現在時刻設定	0x97	HHMM 形式	Set/Get								○	
19	現在年月日設定	0x98	YYYYMMDD 形式	Set/Get								○	
20	電力制限設定	0x99	制限設置値（W）	Set/Get				○	○				
21	積算運転時間	0x9A	（規格参照）	Get			○	○	○				
22	SetM プロパティマップ	0x9B	（規格参照）	Get	○	注	注	注	注	注	注	注	注
23	GetM プロパティマップ	0x9C	（規格参照）	Get	○	注	注	注	注	注	注	注	注
24	状変アナウンスプロパティマップ	0x9D	（規格参照）	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25	Set プロパティマップ	0x9E	（規格参照）	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
26	Get プロパティマップ	0x9F	（規格参照）	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注）0x9B、 0x9C は、ECHONET Lite では非対応の為、非実装で問題ない。

た。ECHONET Lite では、規格上多くのプロパティが定義されているが、実装が義務づけられているものは少なく、多くはメーカ判断での実装となっている。しかし、これまでメーカ間の実装状態の差は明らかになっていないため、保有機種（エアコン、HP 給湯器、洗濯乾燥機、空気清浄器、冷凍冷蔵庫、分電盤）について、実装プロパティの調査を行った。エアコン 8 機種における実装プロパティ一覧について、一例として、機器オブジェクトスーパークラスを**表** 4-1 に示した。

4.4. 家電動作閾値判定のアルゴリズム

過酷温熱環境が人体の健康に与えるリスクを判断する際、体温と体水分量は重要な因子である。本研究では、過酷温熱環境による人体への影響を最小限に抑える制御ロジックを、JOS-2 を用いて検討する。

4.4.1. 暑熱環境における空調起動の目安時間

体水分量が 1[%]減少するとのどの渇きを感じ、水分補給を行う。高齢者は加齢による口渇中枢の機能低下により、のどの渇きを感じにくく、脱水症状を自覚しにくい。加えて、高齢者は腎機能の低下による水分・電解質の再吸収量の減少、食事量の低下による摂取水分量の減少、トイレの回数を減らすことなど諸要因により水分を摂らない傾向があり、脱水症状に陥りやすい。このような背景より、高齢者の熱中症リスクを低減させるためには、自覚症状が出る前に空調起動や水分補給を促す必要性がある。温熱環境の条件別に体水分量が 1[%]減少するまでの時間について JOS-2 を用いて試算した。その結果、35[℃]条件で 180 分間、30℃条件で 330 分間の暴露により、体水分量の 1[%]を失う結果となった。高齢に伴う体温調節機能の低下を考慮して、人体熱モデルの試算値よりも時間を短縮し、35[℃]条件で 150 分間、30[℃]条件で 300 分間暴露し続けた状態を目安とした。

4.4.2. 寒冷環境における空調起動の目安時間

寒冷環境暴露時の深部体温の変動について、JOS-2 を用いて予測し、空調起動条件の目安を検討した。温熱環境の条件を 10[℃]として暴露しつづけた状態で試算した結果、寒冷曝露開始後 70 分間の体温低下幅が大きく、温度、ふるえ産熱能力によらず同様の傾向が示された。また、70 分以降は緩やかに減少し定常状態に至るため、体温が冷え切る前に温める必要があるといえる。そのため、寒冷環境側の空調起動の目安は体温の低下量・低下の勾配を指標とした。本研究においては 10[℃]以下が 70 分続いた場合を空調起動の目安とした。

4.4.3. 体温回復に要する時間の検討

暑熱環境・寒冷環境に暴露された後に実際に体温が回復するまでにかかる時間を人体熱モデルで検討した。暑熱環境では 90 分までが回復量が大きく、その後徐々に定常に至ることが示された。また、寒冷環境では 250 分までが回復量が大きく、どの後徐々に定常に至ることが示された。そのため、本研究では暑熱環境では危険域となる時間に加え 90 分、寒冷環境では 250 分までを積算する時間とし、より安全側の評価を行うこととした。**図** 4-1 に寒冷環境における体温変動の経時変化を示す。

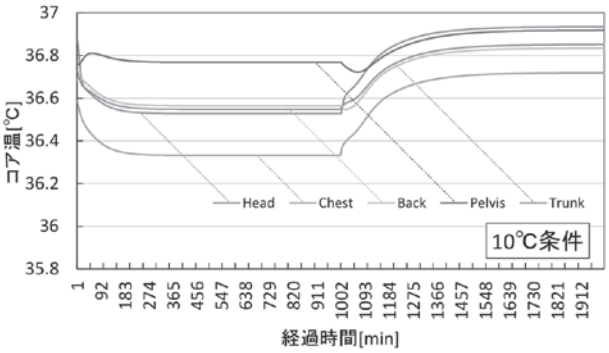

図 4-1　寒冷環境における体温変動の経時変化

4.4.4. 制御ロジック

室温変動の中で 30[℃]を超えた時間とその時の温度による絶対量を積算し、空調起動の判定を行う。積算値が規定を超えた段階で空調を強制的に起動する制御とした。

4.4.5. 各温度帯別の生理的負担を考慮した閾値の補正

各温度帯別に生理的負担の閾値は異なるため、生理負担の変化に合わせて積算する値を補正する必要がある。本研究では閾値を一点に定める補正係数を掛け合わせることで、リスク評価の絶対量を算出し、温度帯によって閾値が異なるため、閾値を一点に定めるように重み付けを行った。気象庁は一日の最高気温が 30[℃]以上の日を真夏日と定義しているため、本研究では 30[℃]の場合の閾値を基準とした。空気温度が 30[℃]の場合 300 分で閾値に達するため、閾値絶対量は 30[℃]×300 分=9000 とした。寒冷側も同様に積算を行い閾値絶対量を 9000 とした。まず、代表 3 点（30[℃] : 300 分、35[℃] : 150 分、40[℃] : 60 分）における温度と空調起動時間を JOS-2 より決定した。次に代表 3 点（30[℃] : 9000、35[℃] : 5250、40[℃] : 2400）における起動に至るまでの絶対量を算出した。30[℃]における絶対量 9000 と等しくなるよう各温度別の係数（30[℃] : 1。00、35[℃] : 1。71、40[℃] : 3。75）を決定し、3 点の係数よりもっとも相関の高い近似式を算出した。**表** 4-2 に補正係数試算条件を、**図** 4-2 に空気温度毎の補正係数を示す。

表 4-2　補正係数試算条件

寒冷		暑熱	
閾値絶対量	1,800	閾値絶対量	9,000
絶対量 Q_{cold}	$Q_{cold}=T\times A\times min$	絶対量 Q_{warm}	$Q_{warm}=T\times B\times min$
補正項 A	$A=1243.6T^{-2.648}$	補正項 B	$B=0.0182e^{0.1322T}$

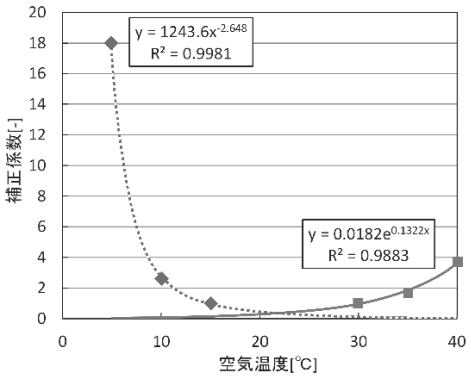

図 4-2　空気温度毎の補正係数

4.5.　検証用アプリケーションの構成

検証用アプリケーションは**図 4-3** に記すように、ECHONET Lite 対応エアコン（制御対象）、ホームゲートウェイ、アプリケーションサーバ、PC・スマホ等のブラウザより構成した。ホームゲートウェイはエアコンと ECHONET Lite 通信を行い、アプリケーションサーバの情報取得・動作指令に関する通信を仲介する。アプリケーションサーバはホームゲートウェイを介してエアコンより取得した室内温度情報を元に先に示した絶対量計算を行い、閾値を超えた場合にエアコンへ動作指令を送信する。一方で、それら情報を Web ブラウザへ送信し、Web アプリケーションがそれら情報を用いて UI を構築する。検証用アプリケーションの Web UI では、過去室温の履歴、絶対量、危険度（現在絶対量 / 絶対量閾値）、現在のエアコン動作状態を確認できるようにした。

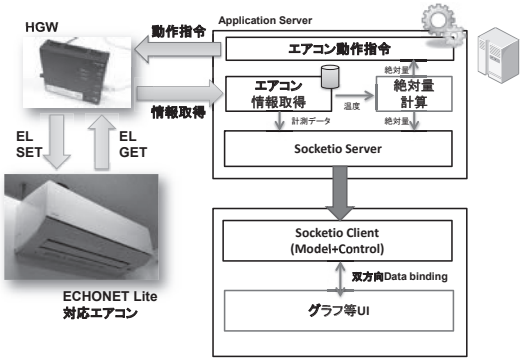

図 4-3　検証用アプリケーションのアーキテクチャ

4.6.　検証用アプリケーションによる評価試験

4.6.1.　センサー評価試験

市販エアコンのセンサー情報の妥当性を検証するために、エアコンが停止している状態、および動作させた状態等、複数パターンの試験を実施し、エアコン自身のセンサー値と外部センサーの値を比較することで、妥当性の検証を行った。**図 4-4**、**図 4-5** はエアコン A、B におけるエアコン設定温度、内部温度センサーおよび外部温度センサーの値（上・下）を表す。

エアコン B に関して、概ね外部センサーと同様の計測が可能なものの、エアコン始動時、温度変更時に外部センサーに比べて、急速に温度変化が起こるケースがある。また、エアコン停止時に一時的にセンサー値が上昇する特徴がある。原因詳細は不明だが、エアコンの温度値を計測しているセンサーの内部取り付け位置が関与していることが推測される。一方、エアコン A はエアコン動作時も含め、概ね外部センサーと同様の計測が出来ている。このように状況によっては、エアコン動作中（過渡状況）のエアコンのセンサー値は不正確な場合があることがわかった。しかし、エアコン停止時のセンサー値は安定計測出来ているため、本研究における絶対量計算・閾値逸脱判定に関してはエアコンセンサー値を使用可能であると判断した。

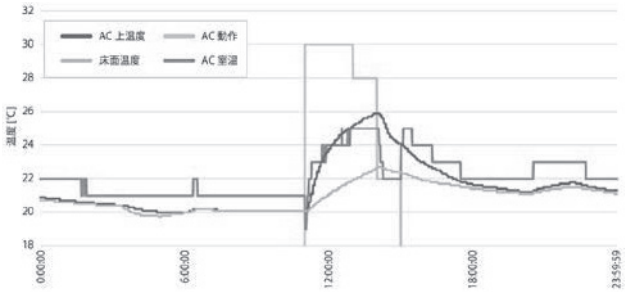

図 4-4　エアコン A センサー評価試験

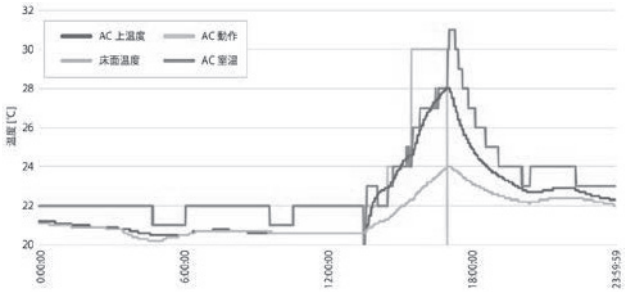

図 4-5　エアコン B センサー評価試験

4.6.2.　システム評価試験

センサー評価試験の結果をうけて、エアコン自身のセンサー値を用いたシステム評価試験を異なるメーカの市販エアコンに対して実施した。試験時期が冬季であるため、寒冷環境におけるシステム評価とした。また、動作検証のためにエアコン温度センサー測定値を一定値シフトさせて演算を行った。

図 4-6 およびエアコン B の挙動から、絶対量の上昇・下降に従い、寒冷環境の閾値である 1800 を境にエアコンの動作・停止が正常に動作していることを確認した。本システム評価試験における、動作ソフトウェアは完全に同一であるため、異メーカエアコンにおいても、本システムが機能することを確認することが出来た。

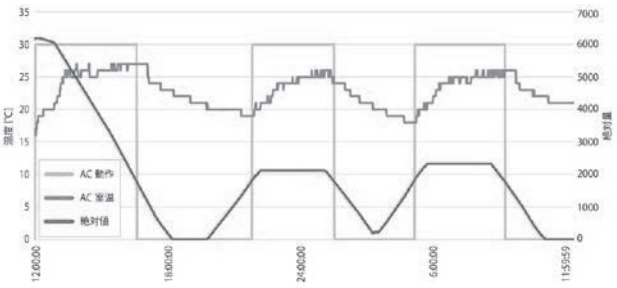

図 4-6　エアコン A システム評価試験

4.7.　家電自動制御装置の開発のまとめ

一般家庭への ECHONET Lite 対応家電機器の導入が進んでいるが、現状まではリモコン代替の操作機能の活用がメインであり、内蔵センサーの活用事例は少ない。本研究では、ECHONET Lite 機器内蔵センサーの室内環境自動制御への適用に着眼し、以下を実施した。

(1) 市販 ECHONET Lite 機器について、保有する複数機種・複数機器に関して、実際に HEMS と通信させた上で、実装されているプロパティを調査し、まとめた。当初想定以上に、センサー情報など、室内環境自動制御へ利用できる可能性のある情報が公開されている事が判明した。

(2) 室内環境自動制御の指標として、過酷環境の検出について、検討を行い、指針を提案した。

(3) 市販エアコンのセンサー値について、近傍に設置した別センサーの計測値と比較する事で、制御への使用可能性などの検討を行った。特定メーカの機器では、機器動作中の挙動に特徴のあることが判明したが、機器停止中のデータは比較的安定している事が判った。

(4) (3)のデータを使用し、(2)で提案した指針を計算、機器を自動制御する仕組みを試実装し、動作の検証を行い、良好な結果を得た。

5.　まとめ

本研究では、人間の主体的な選択と行動の効果を基礎に置きながら、環境的にゆらぎのある建築空間の可能性を探ることを目的に、人間の個別性を評価可能な細やかな計測と柔らかな制御装置群について検討を行い、具体的に以下の装置の開発を行った。

1）建築内部における環境行動計測装置の開発

2）屋外における計測装置の開発

3）計測値と設備を結びつける制御システムの開発

研究 1）で得られた 1 つの大きな成果は、質的に劣る低廉なセンサー機器であっても、機械学習を用いることでスケールメリットにより質を補える可能性が示唆された点にある。空間的な大量配置や時間的な連続測定により、質を損なうこと無く、安価に環境情報が取得できる可能性が見出された。このため、研究 2）において開発した計測装置では、100 円足らずで調達が可能なマイクロチップである ATMega328 を中心に据え、環境情報と心理量を連続的に計測できる構成とした。このように計測された環境情報と生理量に対して、住宅設備側からのアクティブな対応を可能とするハードウェアの開発を試行した研究が 3）であり、一例として、人体モデルを基礎にしたエアコンの制御について検討を行った。本研究はいずれもやや技術開発に重きを置いたが、今後は、収集された環境情報や心理量を、具体的にどのような理論にもとづいて制御に結びつけるべきかについての実験や調査が必要である。

参考文献

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）鵜飼 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）Atsushi Enta, Kousuke Kikuchi, Hitoshi Watanabe, Study of Low-cost Architectural Monitoring Infrastructure based on Open Source Hardware, UIA2011, 2011-9

注

注 1) 研究 1 で実施した実測については、他の一般的な観測機器による方法で取得された種々の環境データとの照合を実施しなかった。使用したセンサーモジュールは非常に安価なものであるだけでなく、AD 変換の分解能が 10bit であることから、精度は望むべくもないことは明らかであった。しかしながら、本稿の結果によれば、その数値的な挙動そのものだけでそれに対応づけられた人間行動が予測できることが示されたといえる。

注 2) 注 1 と同様の理由で、窓の開閉距離も高精度にはとらえられないため、開と閉の二値としてとらえることとした。

注 3) 本研究課題と研究 1 との関係は、機器の改良及び再設計と、旧式の機器により取得されたデータに対する分析にある。

注 4) 研究 2 の内容は、本来であれば実験住宅で生活する居住者に対して実施する予定であったが、不測の事態により実験住宅そのものが竣工されなかった。そのため、予備実験として実施していた内容を本稿の内容に合わせて分析し直したものを掲載した。