

PMV を指標とした室内温熱環境制御に関する研究

多点計測とサーキュレータの影響の検討

Research on Indoor Thermal Environmental Control System using Predicted Mean Vote as an index Examination of the effects of multipoint measurement and circulators

○澤井 玲二^{*1}, 山邊 友一郎^{*2}, 谷 明勲^{*3}

Reiji Sawai^{*1}, Yuichiro Yamabe^{*2} and Akinori Tani^{*3}

*1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

Graduate Student, Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University.

*2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授 博士(工学)

Associate Professor, Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr.Eng.

*3 神戸大学名誉教授 博士(工学)

Professor Emeritus, Kobe University, Dr. Eng.

Summary:

In Japan, about half of all energy consumed is electric energy, and about 30% of that electric energy is consumed by air conditioning heating and cooling operations. And work efficiency may be significantly reduced due to the comfort of the thermal environment. In this study, we created three types of control systems that change the air conditioner settings according to the measured PMV, and compared whether each control method can be used to maintain comfort and reduce power consumption. And we also compared it with the case of using a circulator together and examined its effectiveness.

キーワード: 温熱環境; PMV; OSHW; センサ

Keywords: Thermal environment; Predicted Mean Vote; OSHW; Sensors.

1. はじめに

「エネルギー白書 2021」^[1]によると、2019 年の日本における一次エネルギーの自給率は 12.1%で、他の先進国と比べると低い水準にあるため、「省エネ」への取り組みを重要視する必要がある。さらに、ライフスタイルの変化や、高度情報化社会の発展から、家庭部門全体の消費エネルギーの中で電気エネルギーの割合は 2019 年には半分近くの 49.8%となっており^[1]、その全電気エネルギーのうち 27.4%を家電機器の冷暖房運転が占めている^[1]。

室内の温熱環境の快適性により、知的生産性や作業効率、睡眠効率が著しく低下する可能性があることが既往の研究^{[2][3]}によって示されている。また、現在各所で行われている電力需給対策としての節電により、夏季における温熱環境の快適性が低下する問題が浮上している。

以上より、夏季における室内の快適性の向上と電力消費量の削減は共に重要な課題である。しかし、これらはトレードオフの関係にあるため、両者を改善するための解決策として、ここではセンシング技術を活用した温熱環境の把握と制御のアルゴリズムについて検討する。

本研究では、漆原らの研究^[4]で用いていた不快指数の代わりに、より人間の温冷感に近い温熱指標である PMV(予測平均温冷感申告)^[5]を用いて室内の温熱環境を

評価する手法を導入する。先行研究としての松浦らの研究^[6]や遠藤らの研究^[7]では、PMV を指標として空調機の制御を行っており、三枝の研究^[8]では実験室に加えて居住空間においても制御を行っている。しかし、室内空気攪拌により温湿度を均質にする効果が見込め、消費電力も低いサーキュレータと併用した場合を考慮した PMV 制御の研究は行われていない。本研究では、居住者の感覚により近づけるために、室内で居住者がいる場所に制御システムを設置し、計測した PMV の値に応じて空調機の運転設定を変更する事で、消費電力量の削減と室の快適性の維持の両立が可能か否かの比較・検証を行った。また、今回構築した制御システムは対象とした部屋にのみ適用できるものとなっており、その中で PMV の計測を多点で行う事で、計測位置による快適性の違いについての検証も行った。

2. PMV 制御システム

2.1 PMV の計算方法

ISO-7730 で標準化されている PMV は空気温度、相対湿度、平均放射温度、風速の 4 つの物理的要素と、在室者の着衣量、代謝量の 2 つの人間側の要素から求めることができる。そして、不快と感じる人の割合が 10%以内

となる $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ が快適域として推奨されている。本研究では代謝量 1.0met、着衣量 0.57clo^[8]とし、各センサで計測した値を用いて式(1)で PMV を算出した。

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times (M - W - Ed - Es - Ere - Cre - R - C) \quad (1)$$

(M:代謝量 W:機械的仕事量 Ed:不感蒸泄量 Es:皮膚面よりの蒸発熱損失量 Ere:呼吸による潜熱損失量 Cre:呼吸による顕熱損失量 R:放射熱損失量 C:対流熱損失量)

2.2 制御システムの概要

本研究では、前報^[9]で用いた計測システムに風速センサと赤外線センサを追加し、風速の計測と、算出した PMV の値に応じて赤外線によりエアコンの運転設定を変更する機能を加えた。温度と風速の計測精度に関しては、校正用の各機器と各センサの計測値を比較する事で検討した結果、部屋内の計測では温度は 0.5℃、風速は 0.1m/s 程度の差が見られた。制御システムの写真を図 1 に、表 1 に各機器の、表 2 に各^{[10][11][12]}センサの仕様を、表 3 に計測高さを示す。結果は SD カードに記録される。

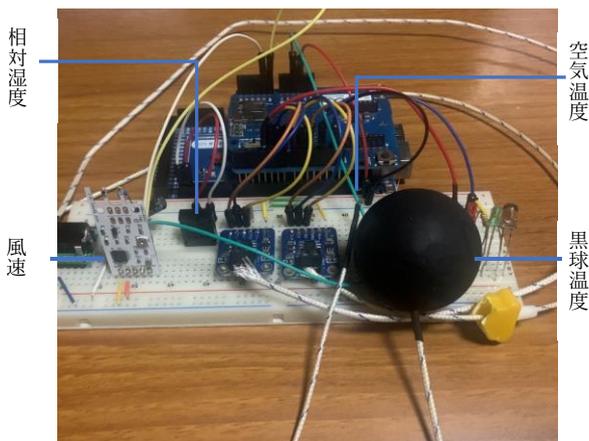


図 1 制御システム

表 1 校正用の各機器の仕様

	測定範囲	測定精度
風速計	0~30(m/s)	±5(%)±0.1(dgt)
温度計	0~50(℃)	±0.6(℃)

表 2 センサの仕様

	電源電圧(V)	測定範囲	精度
温度センサ	3.3~5	-200~700(℃)	±2(℃)
湿度センサ	3.1~5	0~99.9(%RH)	±3(%RH)
風速センサ	4~5	0~60(mph)	—

表 3 各種計測センサの配置高さ

空気温度	床上 1.2m(空中)
黒球温度	床上 1.2m(空中)
湿度	床上 1.0m(机上)
風速	床上 1.0m(机上)

2.3 制御アルゴリズムの概要

本研究では、前報の結果^[9]を元に、空調機の制御システムとして PMV=0 付近を維持する制御、 $0 \leq PMV \leq 0.5$ 、 $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ の範囲内を上下する制御の計 3 種類の制御方法を用いた。順に、維持制御、上下制御①、上下制御②と呼称し、各制御内容を図 2 に示す。維持制御は設定温度 24℃で運転を開始し、PMV>0.5 になると設定温度を 22℃に変更し、PMV<0 になると設定温度を 24℃に戻す(図 2 左の赤四角部)。また、PMV<0.5 になると設定温度を 26℃に変更し、PMV>0 になると設定温度を 24℃に戻す(図 2 左の青四角部)。上下制御①は PMV<-0.5 になるまで設定温度 22℃で運転し、PMV<-0.5 になった時に PMV>0 になるまで設定温度 26℃で運転することを繰り返す。上下制御①のディファレンシャルが $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ の範囲となったものが上下制御②となる。過去の計測において風量と消費電力量の差の関連は無かった為^[9]、各制御において風量は最大の 4 としている。

3.制御運転

3.1 実験概要

本研究では制御システムを用いて、図 3 に示す木造住宅の 1 室で 6 月下旬から 7 月上旬の間に実験を実施した。本実験では PMV の値を快適域の範囲に納める事を目標とする。図 3 に実験を行った居室の平面図、計測機器の設置場所を示す。また、空調機とサーキュレータの風向を図中の矢印で示す。制御システムは机の前とベッドの上に設置するが、本実験では机側の制御システムの値を元に制御を行った。前報^[9]の実験では計測システムを机側の制御システムの位置に配置した際のデータを用いている。本実験で用いた家電機器の仕様を表 4 に示す。制御システムは日射と各空調機器の風が直接当たらない位置に設置し、計測中は過去の計測と同様に西側の窓のカーテンのみ閉めている。なお、実験に用いた部屋は築 44 年の住宅の一室で、対象室の断熱性能や遮熱性能等是不明であるため、構築する制御システムを用いて得られる制御効果は対象室のみに適用可能で、異なる部屋で用いるためにはその都度、制御効果の確認を行う必要がある。

表 4 家電機器の仕様

	電源(V)	消費電力(kW)	冷房能力(kW)
空調機	100	0.555(0.17~0.8)	2.2(0.9~2.7)
サーキュレータ	100	33/31000	—

3.3 長時間運転時の実験結果

2.3 節で示した制御方法で空調機を 5 時間(300 分)運転し、机側とベッド側の制御システムで計測する事で、PMV がどのように変化するかを検証を行った。また、

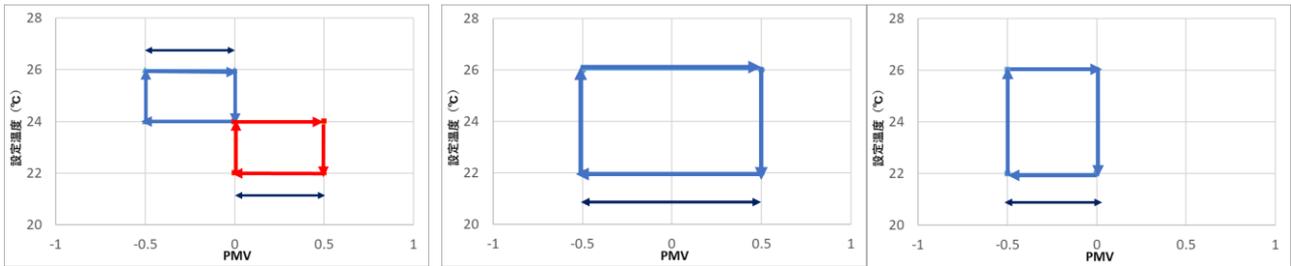


図2 制御方法（左：維持制御，中央：上下制御1①，右：上下制御② ←→：ディファレンシャル）

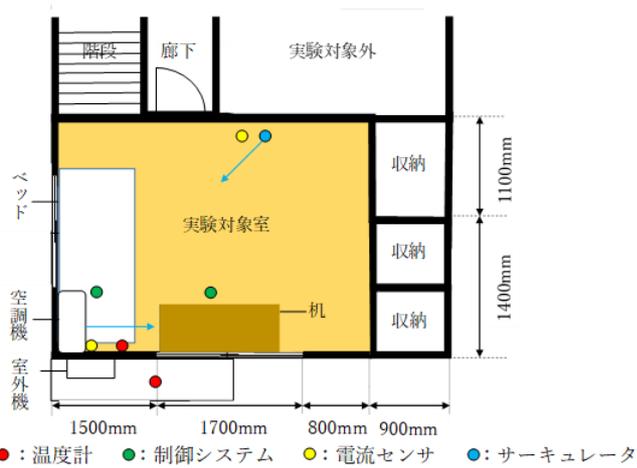


図3 実験を行った居室の間取りと各計測機器の配置

PMV以外の値の変化として維持制御の結果を示す。計測開始時の日程と外気温、制御システムと配置、消費電力量を表5に、各制御システムにおけるPMVの変化を図4~6に、空気温度、平均放射温度、湿度の変化を図7~9に、消費電力の変化を図10に示す。周辺の温熱環境によって同じ設定でも運転の仕方は異なると想定される為、計測開始時のPMVが近い結果同士で比較している。

表5 長時間運転の実験結果

ケース（日程，外気温[°C]）	制御システム	配置	消費電力量[kWh]
1 (7/5, 28.3)	維持制御	机	2.85
2 (7/5, 28.3)		ベッド	
3 (6/24, 30.8)	上下制御①	机	3.05
4 (6/24, 30.8)		ベッド	
5 (6/30, 29.3)	上下制御②	机	3.06
6 (6/30, 29.3)		ベッド	

維持制御で長時間運転した場合には、図4より、PMVがやや-0.5寄りであり0から-0.5の間を上下していた。また、計測開始後210分以降にPMVが-0.5にまで下がりやすくなる傾向があった。これは、計測開始後約210分の時点で部屋全体の空気が冷えた為と考えられる。

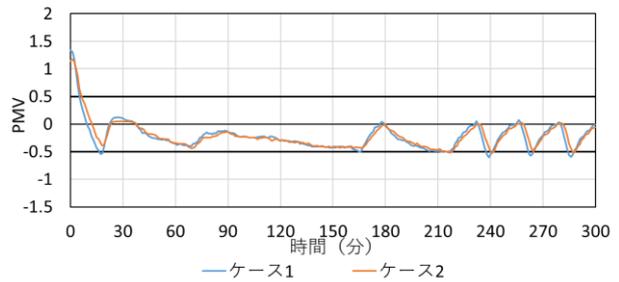


図4 維持制御時のPMVの変化

図5より、上下制御①で長時間運転した場合には、運転開始後約60分間はPMVが0から-0.5の間で変化し、その後運転開始後約180分まではPMVが0から0.5の間で変化していたが、PMVが-0.5まで下がる事は無かった為、約60分経過した時点から部屋全体の空気の温度がある程度低下し、空調機のインバータ制御のみの運転となっていたと考えられる。

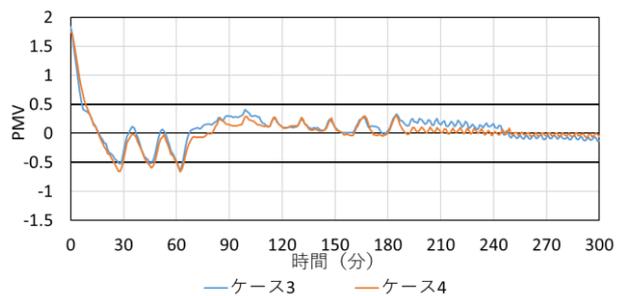


図5 上下制御①時のPMVの変化

図6より、上下制御②で長時間運転した場合では、計測開始後約180分間はPMVが-0.5から0.5の間で変化し、その後は0と0.5の間で変化する結果となった。上下制御①と比較すると途中での設定変更回数が多く、周辺の空気の温度が下がり、空調機のインバータ制御のみで運転出来るようになるまでの時間も長くなっていた。図7より、維持制御時の空気温度はPMVの変化と同様に、途中までは緩やかに上下に変化し、計測開始約210分経過後は小刻みに上下変化する結果となった。また、計測結果のシステム設置位置による違いとしては、全体的にベッド側の方が机側より温度は高くなっていた。

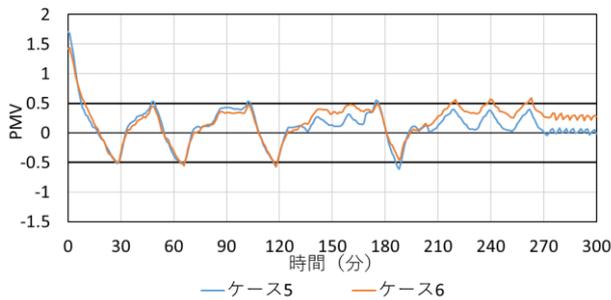


図 6 上下制御②時の PMV の変化

図 8 より、維持制御時の平均放射温度の変化は空気温度の変化とほぼ同様の性状を示したが、この場合は机側の方がベッド側より全体的に高くなる結果となった。

図 9 より、維持制御時の湿度が上下に変化するタイミングは PMV とほぼ同様となったが、風量最大で風向は西側にしていた為、冷たい乾燥した風は机側の方に流れると考え、机側の方が湿度は低くなると予測していたが、計測開始後約 30 分以降からベッド側の方が約 10% 高くなっていた。

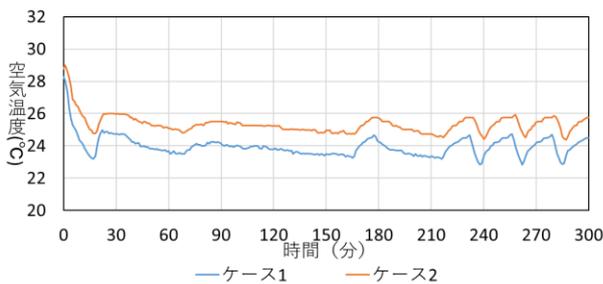


図 7 維持制御時の空気温度の変化

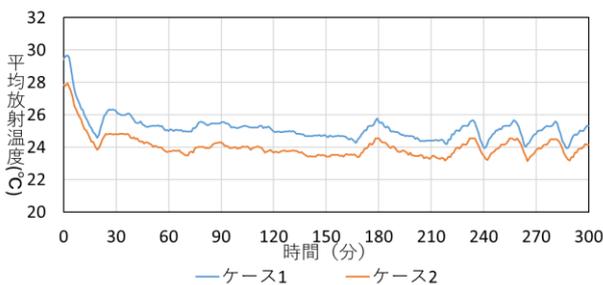


図 8 維持制御時の平均放射温度の変化

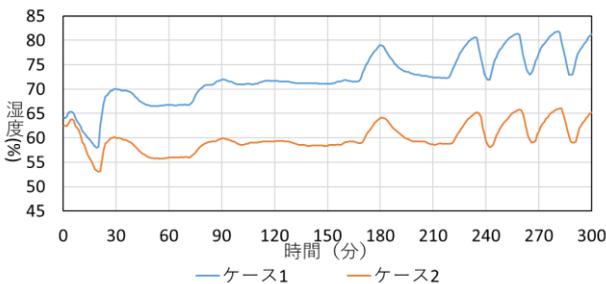


図 9 維持制御時の湿度の変化

図 10 の制御方法の違いによる消費電力の比較から、計測開始後約 240 分以降ではいずれの制御方法も同様の変化を示した為、消費電力に差が生じるのは運転開始約 240 分までの間にあると考えられる。

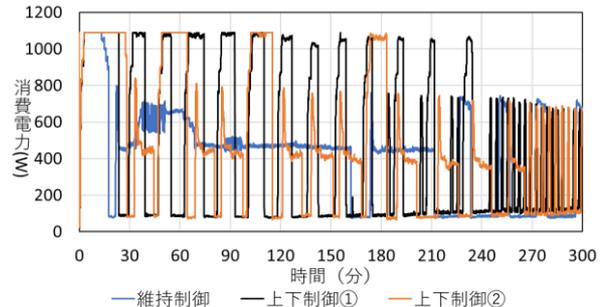


図 10 制御方法の違いによる消費電力の変化

3.3 サーキュレータの有無の比較実験結果

各制御方法で空調機とサーキュレータを併用した場合と、空調機のみ運転した場合に机側とベッド側の制御システムで計測する事で、設置位置による計測結果の変化を検証する実験を行った。計測時間は 120 分で、計測開始時の外気温と制御システムと設置場所、サーキュレータの有無と消費電力量を表 6 に、各制御システムにおける PMV の変化を図 11~16 に示す。ここでも計測開始時の PMV の値が近い場合で比較を行うが、天候の都合により上下制御①は計測開始時の PMV の差が大きい場合の比較となっている。

表 6 サーキュレータの有無による比較実験結果

ケース(日程, 外気温[°C])	制御システム	配置	サーキュレータ	消費電力量[kWh]
7(7/3,28.7)	維持制御	机	有	2.22
8(7/5,28.3)			無	1.72
9(7/3,28.7)		ベッド	有	2.22
10(7/5,28.3)			無	1.72
11(6/23,29.0)	上下制御①	机	有	2.07
12(6/20,28.0)		無	1.38	
13(6/23,29.0)	上下制御②	机	有	1.91
14(6/20,28.0)		無	1.38	
15(7/4,28.8)	上下制御②	机	有	1.91
16(6/30,29.3)			無	1.99
17(7/4,28.8)		ベッド	有	1.91
18(6/30,29.3)			無	1.99

維持制御の場合は図 11 より、机側ではサーキュレータを併用しない場合の方が PMV の低下する速度が速くなっており、PMV の値は全体的に低い傾向がみられた。しかし、PMV の値が 0 に近い値を示していたのはサーキュレータを併用した場合となった。

図 12 より、ベッド側では PMV は机側と同様の動きを

していたが、机側と異なり PMV の低下する速度はサーキュレータの使用の有無によらずほぼ同様の性状となることから、サーキュレータの使用によってベッド側にも冷気が届いていた事が分かった。また、消費電力量はサーキュレータを使用した場合の方が大きくなった。

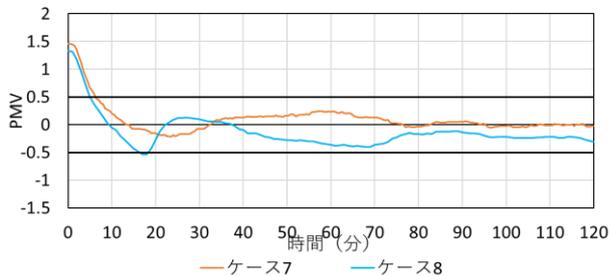


図 11 維持制御の場合の PMV 変化 (机側)

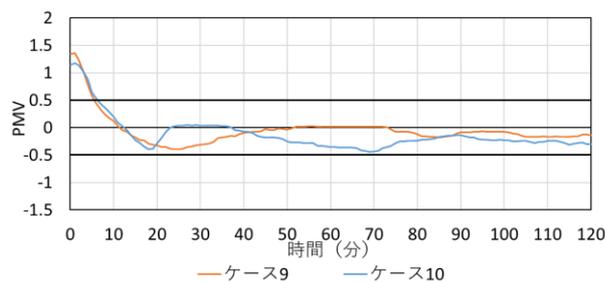


図 12 維持制御の場合の PMV 変化 (ベッド側)

図 13 より上下制御①では、机側ではサーキュレータを使用しない場合の方が PMV の低下する速度が速くなっており、PMV の値が上下に変動する回数も使用しない場合の方が使用する場合より多かった。また、PMV の値が 0 手前で減少することが多く、その場合は空調機の設定が変わらない為、消費電力量も少なくなっている。

図 14 より、ベッド側においても併用しない場合の方が低下する速度が速くなっていった。また、消費電力量はサーキュレータを併用した場合の方が大きくなった。

図 15 より上下制御②では、机側は PMV が上下に変動するタイミングは複数回見られたが、その速度はいずれの場合もサーキュレータを使用した場合の方が速かった。

図 16 より、ベッド側は机側と同様に PMV が上下する速度はサーキュレータを使用した場合の方が早かった。また、消費電力量はサーキュレータを併用した場合の方が少なくなった。

4. 考察

4.1 長時間運転

ある程度の時間が経過すると、空調機の設定温度に関係なくインバータ制御のみで運転して PMV の値が安定するようになる為、最終的な空調機の設定温度よりも途中の設定温度の方が重要と考えられる。

いずれの制御においても消費電力の最大値は同じであ

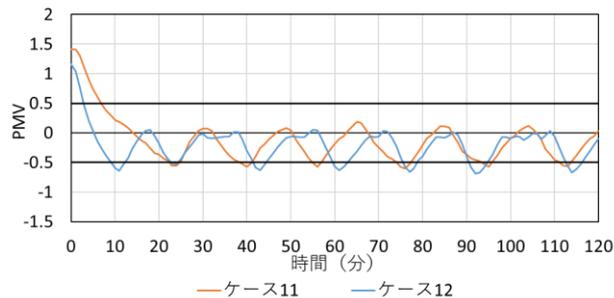


図 13 上下制御①の場合(机側)

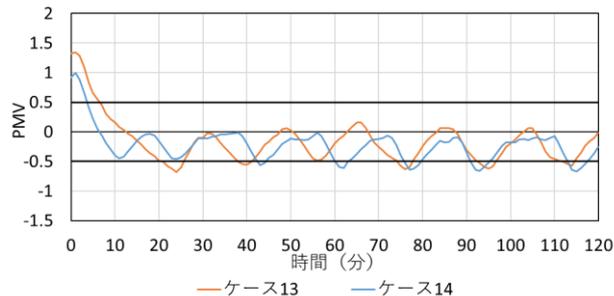


図 14 上下制御①の場合(ベッド側)

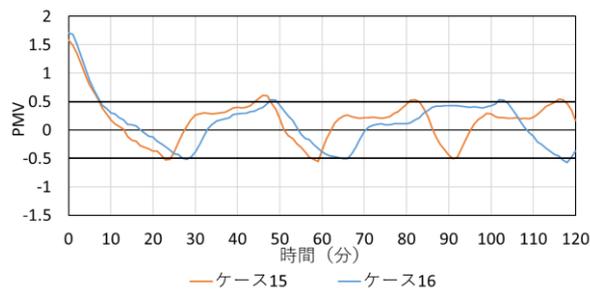


図 15 上下制御②の場合(机側)

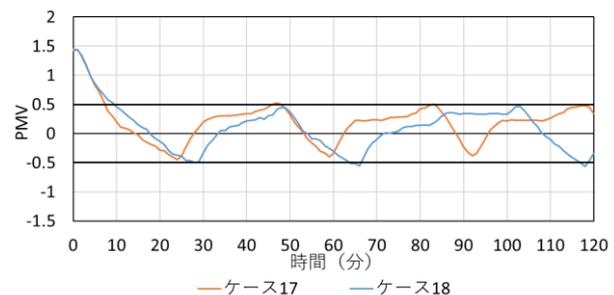


図 16 上下制御②の場合(ベッド側)

った事から、冷房運転時に PMV を低下させる設定温度は 22℃よりも低くしても良いと考えられる。上下制御②の結果より、PMV を低下させる場合は維持制御よりも消費電力が高くなっているが、PMV を上昇させる場合は消費電力が低くなっていた事から、短時間で PMV を低下し、長時間で PMV を上昇させる事が出来れば消費電力量が小さくなると考えられる。

空気温度に関してベッド側の方の温度が高かったのは、ベッドの配置がエアコンの冷気が最も遠ざかる位置になっていたことが原因と考えられる。また、平均放射温度に関して机側の方の温度が高かったのは、南側にある窓からの日射の影響と考えられる。このように PMV 以外の値に関しては違いが表れたものの、PMV の違いとしてはあまり見られなかった。これは計測位置が近かった事や、高さが同じであった事、エアコンから直線状に並んでいた事に原因があると予想されるので、以降の多点計測ではその点に考慮して計測位置を考える必要がある。

4.2 サーキュレータの併用の有効性

空調機の風向は一定にしていたが、サーキュレータを使用しなかった場合は使用した場合に比べて PMV が低下する速度が速い場合と遅い場合が見られた。いずれの制御でも、サーキュレータを使用した場合は PMV の値が計測開始後 20~30 分の間に最も低くなっていることから、サーキュレータを使用した事により日によって異なる部屋の状況に左右されずに部屋全体に冷気が行き渡っていると考えられる。また、維持制御では運転中の設定を変更する回数が少なく、サーキュレータを使用した場合の消費電力量は大きくなっていった。一方で、上下制御②では運転中の設定を変更する回数が多く、サーキュレータを使用しなかった場合の方が消費電力量は大きくなった。このことから、設定を変更する回数が多い場合はサーキュレータを使用した方が消費電力量は少なくなると考えられる。しかし上下制御①の結果から、計測開始時の周辺の温熱環境が暑い場合に空調機とサーキュレータを併用しても、計測開始時の PMV が低い場合に空調機を併用した場合に消費電力量が少なくなる事はなかった。

5. まとめ

本研究では、6月下旬から7月上旬の期間に構築したシステムを用いて、温熱環境の計測と PMV の算定を行い、提案するアルゴリズムに従って、空調機の運転設定を変更する実験を実施した。その結果、以下の点を明らかにした。

- 消費電力の観点からみると、空調機を長時間運転していると、空調機の設定温度が異なっても計測開始後約 240 分で消費電力の動きに差がみられなくなった。
- 本実験では机上とベッド上で多点計測を行い、比較した結果、空気温度、平均放射温度、湿度の配置による傾向が分かった。
- 空調機とサーキュレータを併用することにより、局所的な温度の低下を防ぐ効果と、上下制御②に関しては空調機単体で動かす場合よりも消費電力量の削減が望めた。
- 本研究では、3 種類の制御アルゴリズムを提案した。

その際に PMV は快適域とされている $-0.5 \sim 0.5$ を元に構築したが、著者の体感では、 -0.5 では寒く感じ、 0.5 では暑く感じる結果となった。その為、個人差は当然想定されるが、制御アルゴリズムの設計では、快適域の範囲を調整する必要がある。

今後は、サーキュレータを併用せずに上下制御①で計測と併用した場合との比較を行い、サーキュレータの有効性を確認する必要がある。また、計測位置の調整と制御アルゴリズムの中で PMV を低下させる場合の設定温度を調整して計測を行い、空調機の設定を変更しない場合との比較を行い、有効性の確認も行う必要がある。今後は、本報で行った計測を外気条件が異なる夏の時期に、今回の設定より長時間計測するとともに、提案するエアコン制御の省エネルギー効果に関する検討も併せて行う必要があると考える。

【参考文献】

- [1]経済産業省資源エネルギー庁(2021)「令和 2 年度エネルギーに関する年次報告」(2021/9/30 閲覧) URL:<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/>
- [2]平野葵、倉渕隆、飯野由香利：小学校における教室環境が学習効率に与える影響に関する基礎的研究、平成 28 年度大会(鹿児島) 学術講演論文集第 8 巻性能検証・実態調査編(論文)、pp.397-400、2017.11.
- [3]Yuichi Akiyama, Emika Miyake, Riho Matsuzaki, Masayuki Ogata, Kazuyo Tsuzuki, Shin-ichi Tanabe : Effect of thermal environment on sleep quality in actual bedroom in summer by sleep stages analysis, Japan Architectural Review Volume 4 Issue 1, pp.211-221, 2021.1.
- [4]漆原健太、谷明勲、山邊友一郎：OSHW を用いた住環境モニタリングシステム—夏季と冬季における空調機運転モードと室内空気環境・電力消費量の検討—、第 39 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(論文)、pp.7-12、2016.12
- [5]松浦大介、鍋島佑基、木村竜士、都築和代：熱的中立性をパラメータとした空調機器制御システムの構築に関する研究、平成 30 年度大会(名古屋) 学術講演論文集第 3 巻空調システム編、pp.169-172、2018.9.
- [6]遠藤崇光、広瀬拓哉、高口洋人：シミュレーションを用いた住宅における空調の PMV 制御に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.749-752、2009.8
- [7]三枝隆治：快適度センサを用いた空調制御システム、J-SICE Vol.33 No.12、pp.1046-1053、1994.→.12
- [8]空気調和・衛生工学会、快適な温熱環境の仕組みと実践、丸善出版、2019.4、pp.95.→.pp.120.
- [9]澤井玲二、谷明勲、山邊友一郎：PMV を指標とした室内環境制御に関する研究—空調機等の運転設定と PMV・消費電力の計測—、第 43 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(論文)、pp.472-477、2020.12.
- [10]秋月電子通商：製品情報 MAX31855 使用 K 型熱電対アンプモジュール(2021/9/30 閲覧) URL:<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-08218/>
- [11]秋月電子通商：製品情報 温湿度センサ モジュール AM 2320(2021/9/30 閲覧) URL:<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-08663/>
- [12]Modern Device:Wind Sensor Rev.C (2021/9/30 閲覧) URL:<https://moderndevice.com/product/wind-sensor/>