

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

Research on Air Conditioner Control as an Index of Predicted Mean Vote

Air Conditioner Operation Settings and Measurement of Predicted Mean Vote and Power Consumption

○澤井 玲二^{*1}, 谷 明勲^{*2}, 山邊 友一郎^{*3}

Reiji Sawai^{*1}, Akinori Tani^{*2} and Yuichiro Yamabe^{*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 教授 博士(工学)

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

*3 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.

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 research, we conducted basic research to construct a system that uses both various sensors to reduce the power consumption of air conditioner and achieve a comfortable thermal environment. At that time, I used Predicted Mean Vote as an index of comfort. As a result, the relationship between air conditioner settings and thermal environment was found.

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

「平成 30 年度エネルギーに関する年次報告」^[1]によると、2017 年の日本における一次エネルギーの自給率は 9.5%で、他の先進国と比較すると低い水準にある。そのため、エネルギーを有効に使う「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 2017 年には半分近くの 49.5%となっており^[1]、その全電気エネルギーのうち 28.1%を家電機器の冷暖房運転が占めている^[1]。

周辺の温熱環境の快適性により、知的生産性や作業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]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、冬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、冬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、通常、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、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^[3]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)を用いて室内の温熱環境を評価する手法を導入する。また、松浦らの研究^[4]や遠藤らの研究^[5]では同様に PMV を指標として空調機の制御を行っており、三枝の研究^[6]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、消費電力の低いサーキュレータと併用した場合を考慮した PMV 制御を行っているものは見られなかった。そこで、本研究では、より実際に生活する居住者の感覚に近づけるために、居室内で居住者がいる場所に計測システムを配置し、サーキュレータと空調機を併用した場合に計測を行った。電力の消費量削減と室内の快適性向上を両立する空調機の制御システムを構築するための基礎的検討として、本研究では、オープンソースハードウェアである Arduino と市販の各種センサを用いて、PMV の値を計測し、空調機の運転設定、サーキュレータの有無、消費電力の変化との関係性について考察・検討することを目的とする。

2. PMV 計測システム

2.1 PMV の計算方法

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つの人間側の要素の、計6つの要素から求めることができる。事前に PMV 計測器と同じ位置で風速センサを用いた計測を行ったが、計測値が常に 0m/s であったことから、本研究では風速の値は 0m/s と見做した。また、人間側の要素に関しては代謝量を 1.0met、暖房運転の計測では着衣量は 1.09clo、冷房運転の計測では着衣量は 0.56clo を用いた⁷⁾。ISO-7730 では、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。本研究では計測した値と式(1)から PMV を算出した。 $PMV=(0.303e^{-0.036M}+0.028) \times (M-W-Ed-Es-Ere-Cre-R-C)$ (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 PMV 計測システムの概要

本研究では Arduino と温度センサ、湿度センサを用いて、室内の空気温度、黒球温度、相対湿度を計測し、その値から PMV の値を計測する装置を構築した。システムの温度、湿度の計測精度に関しては市販のデータロガーと各種センサで同時に計測し計測誤差を検討した結果温度は殆ど差が無く、湿度は 2~3%RH 低い結果となった。データロガーのサンプリング周波数は 0.5Hz だった。計測システムの写真を図 1 に、表 1 にデータロガーの仕様を、表 2 に温度⁸⁾、湿度⁹⁾センサの仕様をそれぞれ示す。また、各種センサの計測高さを表 3 に示す。なお、計測結果は全て SD カードに記録される。

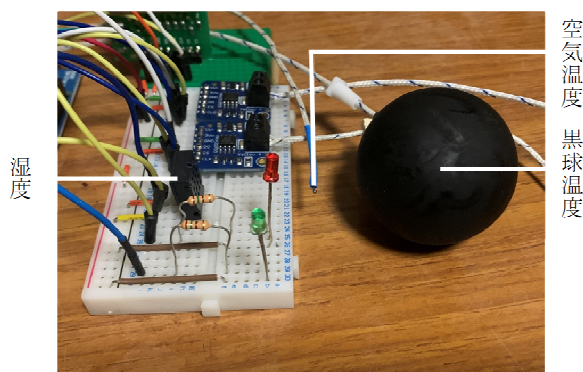


図 1 計測装置

表 1 データロガーの仕様

	空気温度 (°C)	黒球温度 (°C)	湿度 (%RH)
測定範囲	0~50	0~80	10~95
測定精度	±0.6	±0.6	±5

表 2 温度、湿度センサの仕様

	電源電圧(V)	測定範囲	精度
温度センサ	3.3~5	-200~700(°C)	±2(°C)
湿度センサ	3.1~5	0~99.9(%RH)	±3(%RH)

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)

3. 基礎実験

3.1 実験概要

本研究では計測システムを用いて、晴れの日の午前 9 時から午後 3 時の間に図 2 に示す断熱性能の低い木造住宅の 1 室で行った。本実験では PMV の値を $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ の範囲に納める事を目標とする。図 2 に実験を行った居室の平面図と各計測機器の設置場所とサーキュレータの風向を矢印で示す。計測時間は 60 分とした。本実験で用いた空調機とサーキュレータの仕様を表 4 に示す。なお、PMV 計測器は日射と各空調機器の風が直接当たらない位置に配置している。

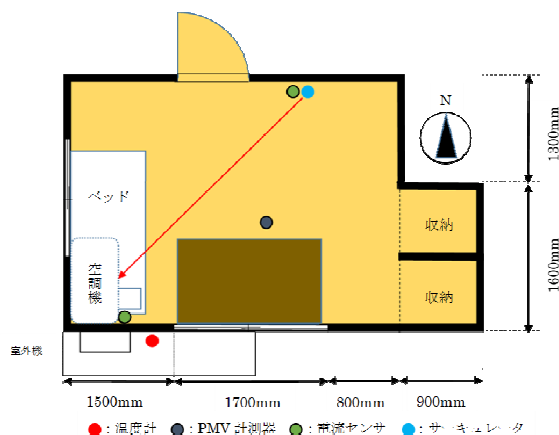


図 2 実験を行った居室の間取りと各計測機器の配置

表 4 家電機器の仕様

	電源 (V)	消費電力 (kW)	目安畳数 (畳)
空調機	100	0.465	5~6
サーキュレータ	100	33/31	8

3.2. 空調機の実験結果

まずは空調機の実験結果のために、暖房運転と冷房運転それぞれで、同じ空調設定で初期 PMV の値が異なる(気温、湿度が異なる)実験(暖房運転は初期 PMV=-0.98、-1.43、-1.89 冷房運転は初期 PMV=0.6、1.26、1.74)を

それぞれ行った。空調機の設定と積算電力を表5に、冷房運転の消費電力の変化を図3に、暖房運転の消費電力の変化を図4に示す。

表5 空調機の実験結果

日程	設定温度[°C]	風量	PMV	積算電力[W/h]
1/7	22	1	-0.98	485
1/8	22	1	-1.43	571
1/12	22	1	-1.89	688
6/25	26	1	0.6	176
6/6	26	1	1.26	302
6/26	26	1	1.74	327

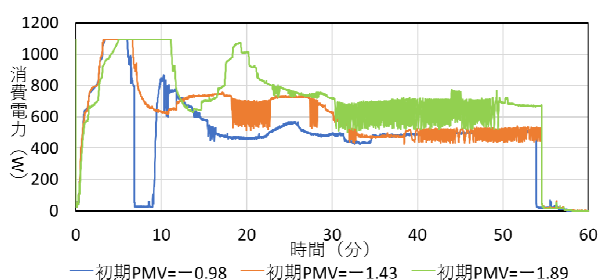


図3 初期PMVの違いによる消費電力の変化(冷房)

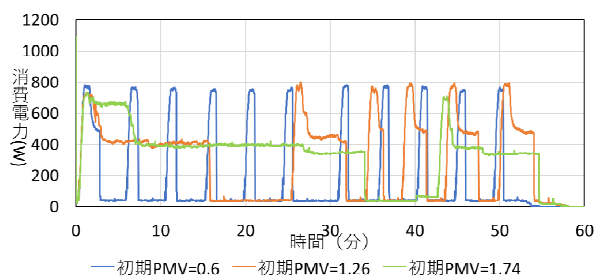


図4 初期PMVの違いによる消費電力の変化(暖房)

表5より、暖房運転と冷房運転どちらの場合でも、空調機の運転設定が同じ場合には、初期PMVの値が0から遠ざかる程に消費電力も大きくなるのが分かった。

図3より、暖房運転の場合はいずれの場合も運転開始時の消費電力の変化に大きな違いはないが、消費電力が最大の約1100Wを要する時間は、初期PMVの値が小さい方が長くなることも分かった。初期PMVの値が-1.89の場合では、消費電力が最大値から低下したのちに再度大きくなる現象が見られ、最終的にほぼ一定となる時の消費電力は、初期PMVの値が-0.98、-1.43の場合より大きくなった。

図4より、冷房運転の場合はいずれの場合も途中で消費電力が0W付近となる時間が見られ、消費電力が上下する回数は初期PMVの値が小さい方が大きくなっていった。消費電力の最大値は800W付近であり、暖房運転の

場合よりも低い値を示していた。また、暖房運転の場合と異なり、途中で消費電力が一定となる場合が初期PMVの値が1.74の場合のみにしか見られなかった。

4. 暖房運転の実験結果

暖房運転において、計測開始時のPMVの値がほぼ等しい状態で、空調機の温度と風量の設定値及び、サーキュレータ利用の有無をパラメータとして実験を行い各制御目標に対する室内環境の比較を行った。本実験ではPMVの値が-0.5より小さい時にPMVの値を上昇させる場合と、PMVの値が-0.5を上回った場合に快適域の範囲内に収める場合における空調機の運転設定をPMVの値の変化と消費電力の観点から検討する。空調機の運転設定とサーキュレータ運転の有無に関して得られた積算電力を表6に、空調機の設定温度を22°C、24°C、26°Cとした場合で、空調機の設定風量とサーキュレータの有無が異なる場合のPMVの値の変化をそれぞれ図5~7に、設定風量を1、4とした場合で、設定温度のみが異なる場合のPMVの値の変化をそれぞれ図8~9に示す。表6の積算電力は空調機とサーキュレータの合算電力を示している。

表6 機器の設定と積算電力(暖房運転)

ケース(日程)	設定温度[°C]	風量	サーキュレータ	積算電力[W/h]
1(1/12)	22	1	無	571
2(1/23)	22	1	有	668
3(1/11)	22	4	無	554
4(1/12)	24	1	無	726
5(1/22)	24	1	有	824
6(1/29)	24	4	無	763
7(1/30)	26	1	無	854
8(1/24)	26	1	有	870
9(1/28)	26	4	無	843
10(1/20)	22	1	無	636
11(1/12)	24	1	無	726
12(1/30)	26	1	無	854
13(1/10)	22	4	無	645
14(1/25)	24	4	無	764
15(1/28)	26	4	無	843

(1) 設定風量のみが異なる場合

表6より、設定温度22°Cの場合では風量1の場合が風量4の場合より積算電力が大きく、設定温度24°Cの場合では風量4の場合が風量1の場合より積算電力が大きく、設定温度26°Cの場合では風量1の場合が風量4の場合より積算電力が大きくなった。いずれの設定温度でも、サーキュレータを運転した場合に積算電力が最大になった。

図5より、設定温度 22°C の場合に風量のみを変化させる比較では、いずれの場合も快適域を満たす時間は長かった。サーキュレータ運転による PMV の値への影響は風量の違いによる影響よりも大きいことが分かった。

図6より、設定温度 24°C の場合に風量のみを変更させる比較では、風量 1 とサーキュレータを用いた場合は快適域を満たす時間が長く、風量 4 の場合は快適域の範囲より大きくなっていった。設定温度 22°C の場合と異なり、風量の違いによる PMV の値への影響はサーキュレータ運転の有無による影響よりも大きくなることが分かった。

図7より、設定温度 26°C の場合に風量のみを変更させる比較では、いずれの場合も PMV の値は 0.5 よりも大きくなる傾向があった。設定温度 24°C の場合と同様に、風量の違いによる PMV の値への影響はサーキュレータ運転の有無による影響よりも大きくなることが分かった。

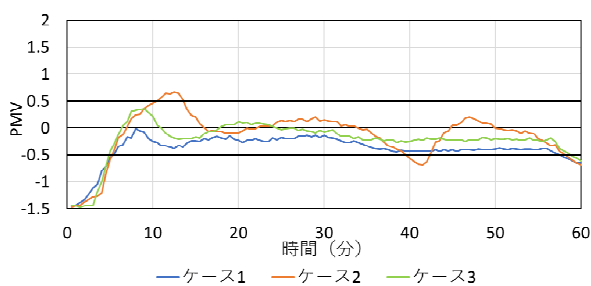


図5 設定温度 22°C の場合

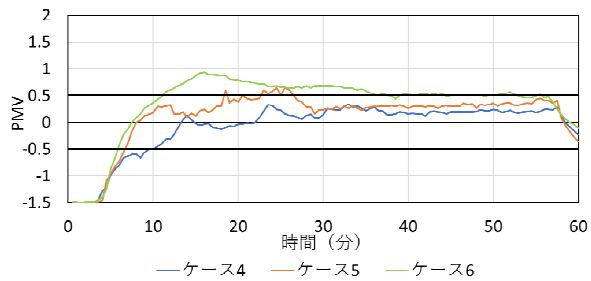


図6 設定温度 24°C の場合

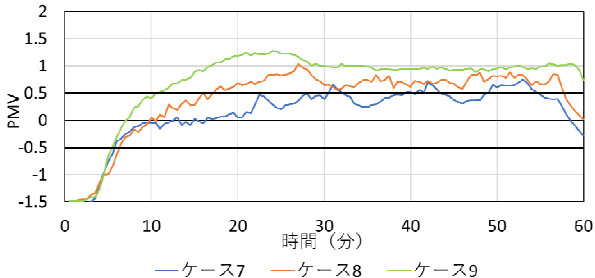


図7 設定温度 26°C の場合

(2) 設定温度のみが異なる場合

表6より、風量 1 の場合も風量 4 の場合も設定温度が高いほど積算電力が大きくなっていった。空調機の積算電力は風量より設定温度の影響が大きいことも分かった。

図8より、風量 1 の場合に設定温度のみを変更する比較では、設定温度 22°C の場合は PMV の値は 0 を超えることはなく、-0.5 付近の値でほぼ一定となっていた。設定温度 24°C の場合では、PMV の値は 0 より少し大きい値でほぼ一定になった。設定温度 26°C の場合では PMV の値は 0 を超え、0.5 付近の値でほぼ一定になった。快適域の範囲内に収まっていたのは設定温度 24°C の場合だった。どの温度設定でも設定温度が高くなるにつれて最終的にはほぼ一定となる PMV の値が大きくなっている。

図9より、風量 4 の場合に設定温度のみを変更する比較では、設定温度 22°C の場合は途中までは PMV の値は 0 付近を示し、以降は -0.5 付近に低下し、PMV の値が 0 を大きく上回ることはなかった。設定温度 24°C の場合は PMV の値が 1 付近まで上昇し、その後 0.5 付近でほぼ一定となった。設定温度約 26°C の場合は、PMV の値が 1 を少し上回った後緩やかに下降し、以降は 1 付近でほぼ一定となった。快適域の範囲内に収まっていたのは設定温度 22°C の場合だった。風量 1 の場合と同様に、いずれの温度設定でも、設定温度が高くなるにつれて最終的にはほぼ一定となる PMV の値が大きくなっている。

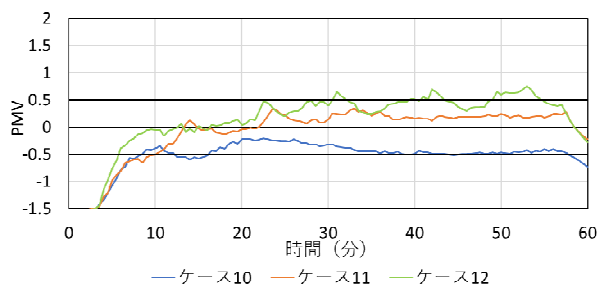


図8 設定風量 1 の場合

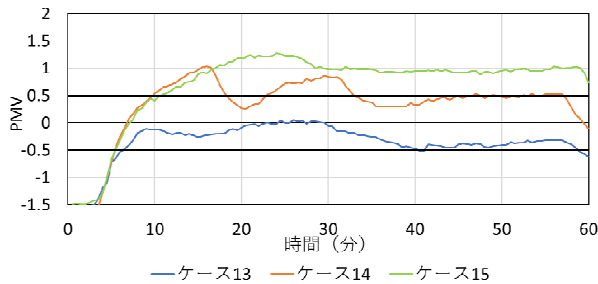


図9 設定風量 4 の場合

5. 冷房運転の実験結果

冷房運転において、計測開始時の PMV の値がほぼ等しい状態で、空調機の設定温度、風量を変化させ、各制御目標に対する室内環境の比較を行った。サーキュレータを併用した実験結果はデータが足りないため本研究では省いて考える。本実験では PMV の値が 0.5 より大きい時に PMV の値を下降させる場合と、PMV の値が 0.5 を下回った場合に快適域の範囲内に収める場合における空

調機の運転設定を PMV の値の変化と消費電力の観点から検討する。空調機の運転設定に関して得られた積算電力を表 7 に、設定温度を 22℃、24℃、26℃とした場合に設定風量が異なる場合の PMV の値の変化をそれぞれ図 10~12 に、設定風量を 1、4 とした場合に設定温度が異なる場合の PMV の値の変化をそれぞれ図 13~14 に示す。

表 7 機器の設定と積算電力(冷房運転)

ケース (日程)	設定温度 [°C]	風量	積算電力 [W/h]
16(6/7)	22	1	655
17(6/15)	22	4	688
18(6/4)	24	1	608
19(6/8)	24	4	488
20(6/14)	26	1	327
21(6/16)	26	4	418
22(6/7)	22	1	655
23(6/9)	24	1	523
24(6/22)	26	1	348
25(6/8)	22	4	747
26(6/25)	24	4	358
27(6/13)	26	4	162

(1) 設定風量のみが異なる場合

表 7 より、設定温度 22℃の場合では風量 4 の場合が風量 1 の場合より積算電力が大きく、設定温度 24℃の場合では風量 1 の場合が風量 4 の場合より積算電力が大きく、設定温度 26℃の場合では風量 4 の場合が風量 1 の場合より積算電力が大きくなった。

図 10 より、設定温度 22℃の場合に風量のみを変更させる比較では、どちらの場合も PMV の値は -0.5 を下回っていた。

図 11 より、設定温度 24℃の場合に風量のみを変更させる比較では、風量による差は殆ど見られず、PMV の値は 0 付近を示しており、どちらの場合も快適域の範囲内に収まっていた。

図 12 より、設定温度 26℃の場合に風量のみを変更させる比較では、どちらの場合も PMV の値は 0.5 付近を上下していた。

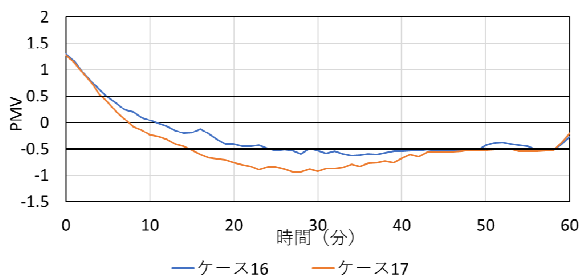


図 10 設定温度 22℃の場合

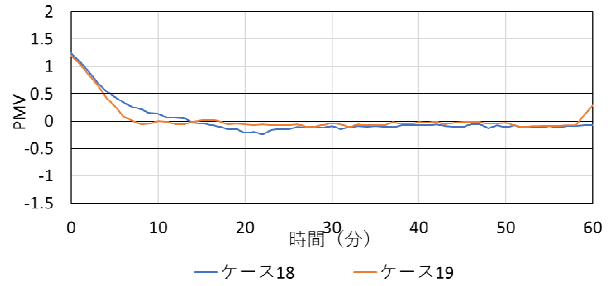


図 11 設定温度 24℃の場合

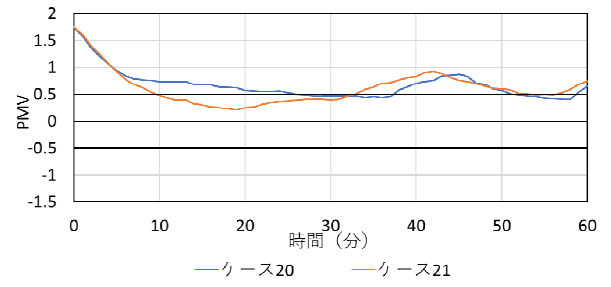


図 12 設定温度 26℃の場合

(2) 設定温度のみが異なる場合

表 7 より、風量 1 の場合も風量 4 の場合も設定温度が低いほど積算電力が大きくなっていった。また、暖房の場合と同様に空調機の積算電力は風量より設定温度の影響が大きいことも分かった。

図 13 より、風量 1 の場合に設定温度のみを変更する比較では、設定温度 22℃の場合では PMV の値は -0.5 付近の値を示していた。設定温度 24℃の場合では PMV の値は 0 より少し小さい値を示していた。設定温度 26℃の場合では PMV の値は 0 と 0.5 の間の値を示していた。また、いずれの温度設定でも、設定温度が低くなるにつれて最終的にほぼ一定となる PMV の値が小さくなっている。

図 14 より、風量 4 の場合に設定温度のみを変更する比較では、設定温度 22℃の場合は PMV の値は -1 付近を示していた。設定温度 24℃の場合は PMV の値は 0 と -0.5 の間を示していた。設定温度約 26℃の場合は、PMV の値は 0.5 付近の値を示していた。風量 1 の場合と同様に、どの温度設定でも、設定温度が低くなるにつれて最終的にほぼ一定となる PMV の値が小さくなっている。

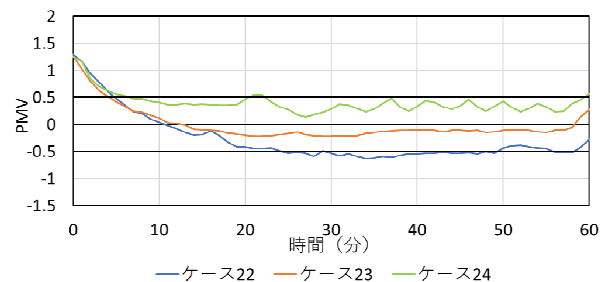


図 13 設定風量 1 の場合

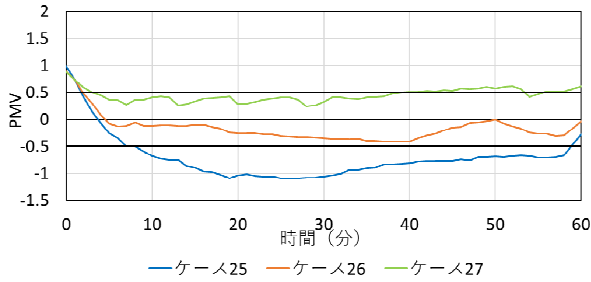


図 14 設定風量 4 の場合

6. 考察

以上より、空調機の運転においてそれぞれの目的に対する推奨の設定値は表 8 のようになった。暖房運転においても冷房運転においても設定温度 24℃ が推奨設定として多い理由としては、PMV を算出する 6 つの値の中で、空気温度の値が及ぼす影響が大きく、空気温度が 24℃ 付近の時に PMV の値が 0 に近くなるからと推測される。

表 8 推奨設定値一覧表

	重視項目	温度 (°C)	風量
暖房	PMV 上昇	24	4
		26	4
	積算電力	24	4
		22	4
冷房	PMV 下降	24	1
		24	4
	積算電力	24	4
		22	4

また、空調機の暖房運転と冷房運転の違いとしていくつか確認することができた。空調機の特長として、暖房運転の場合は同じ設定の場合でも周辺の温熱環境によって運転状態が変化するインバータ制御を行っており、冷房運転では周辺の温熱環境によって電源が自動で変わるオンオフ制御のような運転も行われていることが確認できた。

7. まとめ

本研究では、空調機の消費電力と室内の温湿度のモニタリングを行い、計測から PMV の値を算定した結果、以下の点を明らかにした。

- ・空調機の設定風量を大きくしても積算電力が大きくなるとは限らず、消費電力・積算電力は設定温度の影響

が大きかった。

- ・空調機の暖房運転の場合では、空調機の設定温度が高い場合はサーキュレータを運転するより空調機の設定風量を大きくする方が PMV の値への影響が大きかった。
- ・空調機の冷房運転の場合では、常に設定温度 24℃ 風量 4 を用いるのが適切という結果になったが、本稿で用いた比較結果は 6 月時点における計測であるため、更に気温や室温が高くなると考えられる 7 月、8 月における計測結果では他の空調機の設定が適切となる可能性があると考えられる。また、サーキュレータを併用した場合の計測を行い比較する必要がある。

今後の課題としては、空調機の冷房運転において、計測開始時の PMV が高い場合と、今回データが集まりきらなかったサーキュレータを併用した場合の比較実験を行い、得られた結果を基に冷房運転と暖房運転それぞれの場合の空調機の制御システムを構築し、その有効性の検討を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁(2019)「平成 30 年度エネルギーに関する年次報告」(2020 年 9 月 25 日閲覧)
URL: <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019html/>
- 2) 平野葵、倉淵隆、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)、2017.11
- 3) 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ー夏季と冬季における空調機運転モードと室内空気環境・電力消費量の検討一、第 39 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(論文)、7-12、2016.12
- 4) 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
- 5) 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)2009 年 8 月
- 6) 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 1994 年 12 月
- 7) 株式会社レックス：PMV と PPD 指標(2020 年 7 月 9 日閲覧)
URL: https://www.rex-rental.jp/knowledge/tik/tik_007.html
- 8) 秋月電子通商：製品情報 MAX31855 使用 K 型熱電対アンブジュール(2020 年 7 月 9 日閲覧)
URL: <http://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-08218/>
- 9) 秋月電子通商：製品情報 温湿度センサ モジュール AM2320(2020 年 7 月 9 日閲覧)
URL: <http://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-08663/>