

エネルギー自立型サスティナブル研究施設の計画と実証評価 ー夏期における天井型パーソナル空調機と 放射パネルとの室内環境比較ー※

齋藤雅浩・スレスタミサン・市川侑
木村健太郎・清水昭浩・柴田克彦

Planning and Evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center - Comparison of Indoor Environment between Ceiling Type Personal Air Conditioner and Radiant Panel in Summer -

Masahiro Saito・Mishan Shrestha・Yu Ichikawa
Kentaro Kimura・Akihiro Shimizu・Katsuhiko Sibata

高砂熱学イノベーションセンターの執務室は、外皮や照明などのベース負荷に対しては外調機と放射空調で処理し、個人の行動などで変化する人体負荷に対しては天井型パーソナル空調機（DCFCU）などの個別空調によって処理を行うタスクアンビエント空調システムを採用している。しかしながら、放射空調は既存の空調システムと比較して快適性や省エネ性が高いものの、設置面積の大きさや吸音対策が必要であるなどの課題がある。そこで、放射空調に代わる省エネ空調システムとして、DCFCUを夏期のアンビエント空調として活用し、放射空調との室内環境の比較検証を実施した。その結果、放射空調よりも小さい設置面積と少ない必要水量で快適性が得られることが確認された。

1. はじめに

本施設²⁾の主執務室は、外皮や照明などのベース負荷に対しては外調機と放射空調で処理を行い、個人の好みや行動などで変化する顕熱の不足分に対しては天井型パーソナル空調機（DCFCU）などの個別空調によって処理を行うタスクアンビエント空調システムを採用している³⁾。

本施設での検証で放射空調は既存空調システムと比較して、快適性、省エネ性に優れている結果を得たが⁴⁾、天井の専有面積が大きいことや吸音対策が別途必要になるなどの課題がある。そこで、放射パネルに代わる新たなアンビエント空調システムの提案に向け、一括制御を追加した DCFCU⁵⁾を夏期のアンビエント空調として活用し、放射パネルとの室内環境の比較検証を行った結果を報告する。

2. 機器仕様と設置状況

図1に本施設の主執務室である執務室 2-1 における機器設置状況と、表1に放射パネルと DCFCU の設計仕様を示す。放射パネルは、1set パネル 4 枚の定流量パネルと個別制御が可能な 1set パネル 6 枚の変流量パネルの 2 種類があり、定流量パネルは執務室の南北両端に計 40set、変流量パネルは内側に計 120set 配置している。DCFCU は執務室中央側に計 57 台配置している。

※本論文は、2025 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文¹⁾を加筆修正したものである。

本検証では、DCFCU は稼働エリアと稼働台数の比較を行うため、東西側と中側での 3 分割のゾーン制御を追加した。

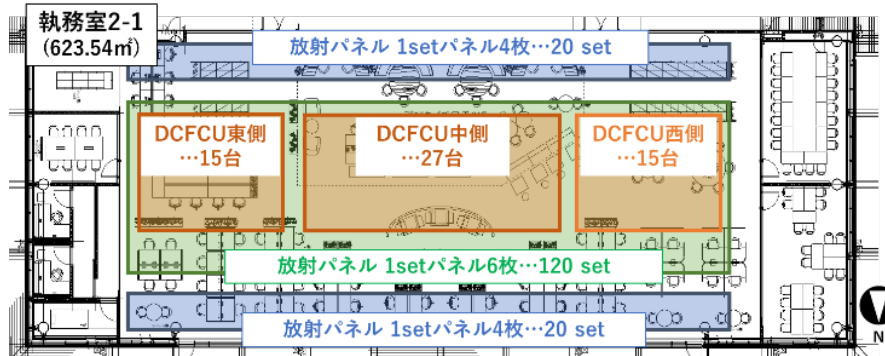


図1 執務室 2-1 の機器設置状況

表1 放射パネルとDCFCU仕様

放射パネル仕様				DCFCU仕様		
サイズ	600 mm × 600 mm (パネル1枚あたり)			吹出フェースサイズ	585 mm × 195 mm	
冷却能力	69 W/m ² (夏期、送水温度18~20℃)			冷却能力	469 W	
流量	1.0 L/min (1set/パネル6枚あたり)			流量	2 L/min	
	0.7 L/min (1set/パネル4枚あたり)			風量	236 m ³ /h	
設置状況 執務室 2-1	set数	総枚数	専有面積	定格電力	3.1 W	
	120set (1set/パネル6枚) 40set (1set/パネル4枚)	880枚	314 m ²	設置状況 執務室2-1	総台数	専有面積
					57台	6.5m ²

3. 実測概要

表2に今回の検証パターンと図2に検証エリア及び実測状況を示す。本検証は、2024年8月5日(月)~8月30日(金)の夏季休業を除く3週間で、検証対象エリアは放射パネルとDCFCUを設置しているオフィス棟2階の執務室2-1とした。

検証条件としては、ケース①放射パネル全台稼働、ケース②DCFCU 東側のみ稼働、ケース③DCFCU 中側のみ稼働、ケース④DCFCU 全台稼働の4パターンを対象とし、DCFCU 西側については、什器の関係上長時間滞在する執務者がいないため今回の検証対象から除外した。また検証期間中、執務室2-1に設置しているパーソナル空調機(天井型、デスク型)の個人での操作は禁止とした。冷水の送水温度については、貯水した地下水を熱源として利用するため、いずれの検証パターンでも19℃に設定し、定流量パネルについては常時稼働とした。外調機の給気風量については、室内のCO₂濃度によって可変するため、比較検証を行うデータは給気風量がほぼ同一となった検証日を対象とした。

表2 検証パターン

ケース	ケース① 放射パネル全台	ケース② DCFCU東側	ケース③ DCFCU中側	ケース④ DCFCU全台
運転時間	6:30~17:30			
送水温度	19℃			
稼働台数	880枚	15台	27台	57台
処理熱量	15.8 W/m ² **	11.3 W/m ²	20.3 W/m ²	42.9 W/m ²
必要水量	148 L/min	30 L/min	54 L/min	114 L/min
定格電力	—	47 W	84 W	177 W
外調機稼働時間	6:00~18:30			
外調機給気温度	12℃			
執務室2-1給気風量	2000 m ³ /h (室内CO ₂ 濃度により可変)			

※放射パネルの処理熱量は既往の実験⁵⁾から、設計仕様に補正をかけて算出

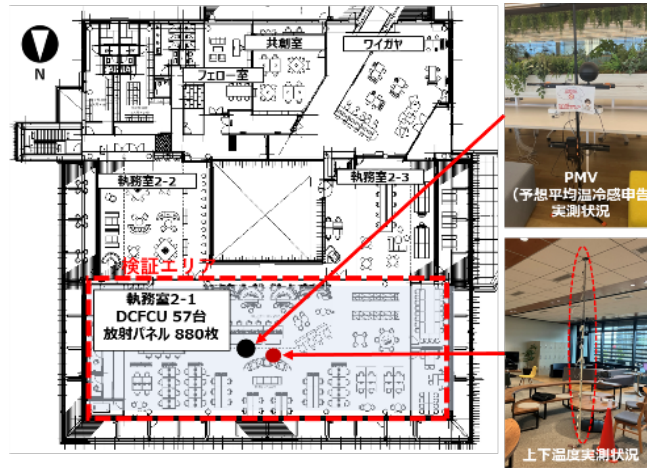


図2 オフィス棟2階平面図と実測状況

4. 温熱環境評価

4.1 外気温湿度

図3にケース別の外気温湿度の経時変化を示す。各ケースの代表日は、それぞれ最高気温が30℃を超え、かつ温湿度ともに各ケースで近い値となる日を選んだ。なお外気温湿度は、本施設の所在地に最も近い茨城県つくば（館野）気象庁のデータを利用した。

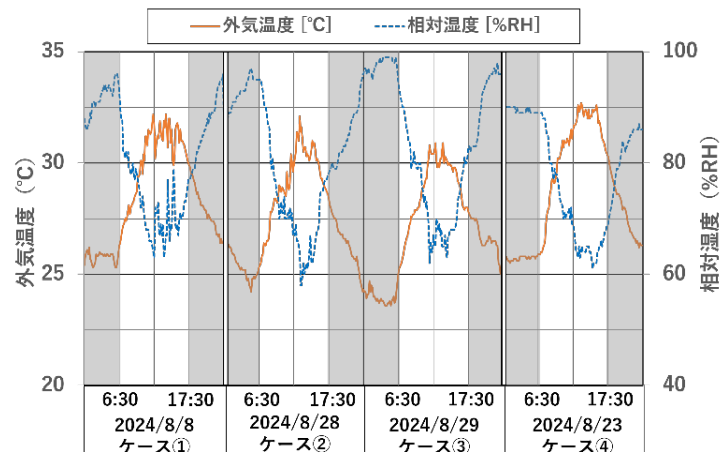


図3 ケース別外気温湿度の経時変化

4.2 室内温度

図4にケース別の室内温度の経時変化を示す。温度はそれぞれ、グローブ温度、放射パネル表面温度、空気温度を比較して示した。なお、グローブ温度と空気温度については、室内代表点（FL+0.6 m）の温度を使用した。ケース①では、グローブ温度と空気温度がほぼ一致する結果となった。これは、外気温度の上昇による天井内および天井表面温度の上昇を抑えられた一方で、北側窓面からの熱放射を受けたためであると考えられる。また、全てのケースにおいて、12時以降には空気温度が26℃以下となることを確認したが、ケース③および④については最終的に24℃以下まで低下しており、DCFCUの稼働台数が多く冷却能力が過大であった可能性が示唆された。

図5にケース別の上下温度分布を比較して示す。なお、各ケースの外気温度が概ね近い温度となった14時頃を比較対象とした。このとき、外気温度は $31.3 \pm 1.0^\circ\text{C}$ であった。また、FL+0 mおよびFL+3 mのデ

ータについては、それぞれ床と天井の表面温度の実測結果である。

全てのケースで FL+0.1m と FL+1.7m の温度差が 0.5 °C 以内となっており、またケース①および②については平均温度が 26°C 前後と快適な範囲にあった。

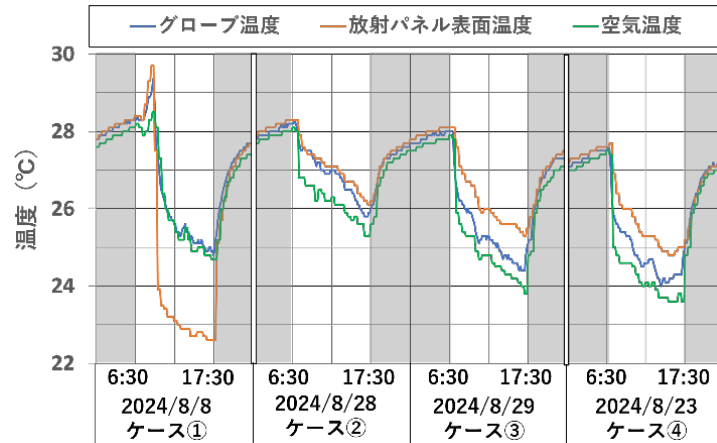


図 4 ケース別室内温度の経時変化

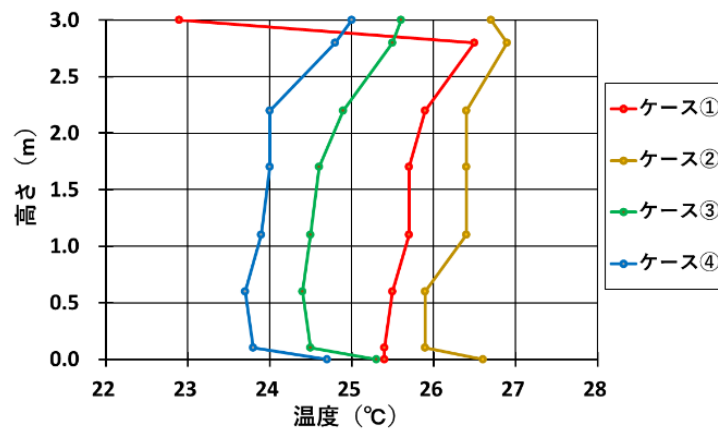


図 5 ケース別上下温度分布

4.3 室下部表面温度分布

図 6 に室下部表面温度分布の一例を、什器位置を含めた平面図と共に示す。室下部表面温度の計測は、天井面に 1.8m 間隔で設置しているサーモパイルによって計測した。このサーモパイルは、赤外線センサによって床面レベルで直径約 2.4m の範囲の温度を計測している。計測温度は、床表面温度だけでなく執務者や PC などの発熱体の影響を受けるため、その部分は周囲に比べて高温となることが確認できる。

図 7 にケース別の 14 時頃における室下部表面温度分布を示す。表面温度は、各エリアの平均値と標準偏差で比較した。全てのケースで、東側での表面温度が中央・西側と比較して高い傾向が見られたが、これは東側に中央監視機器などの PC が集中していることや、執務者が密集しており発熱負荷が高かったことが影響していると考えられる。また、中央側の表面温度が低い傾向が見られるが、これは中央側に執務者が少なかったことが影響していると考えられる。ケース④の DCFCU 全台稼働では冷却能力が過大となり室温が全体的に低下した。一方、ケース②の東側稼働では各エリアの平均温度が東側 26.5°C、中側 26.1°C、西側 26.6°C と均一な環境となり、高負荷側の DCFCU を中心に稼働させることで、ケース①の放射パネル稼働よりも処理熱量が少ないながらも快適な環境を構築できることが確認できた。

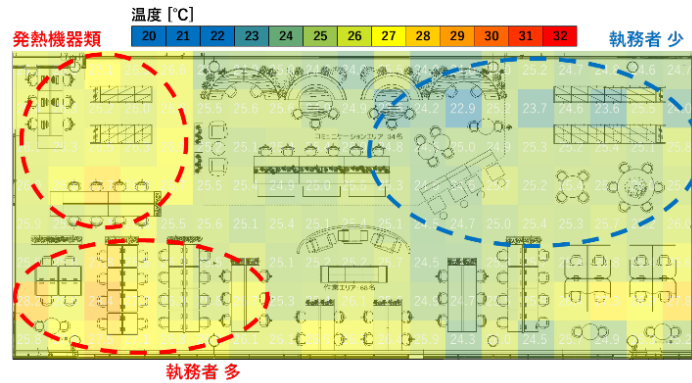


図 6 室下部表面温度分布の例

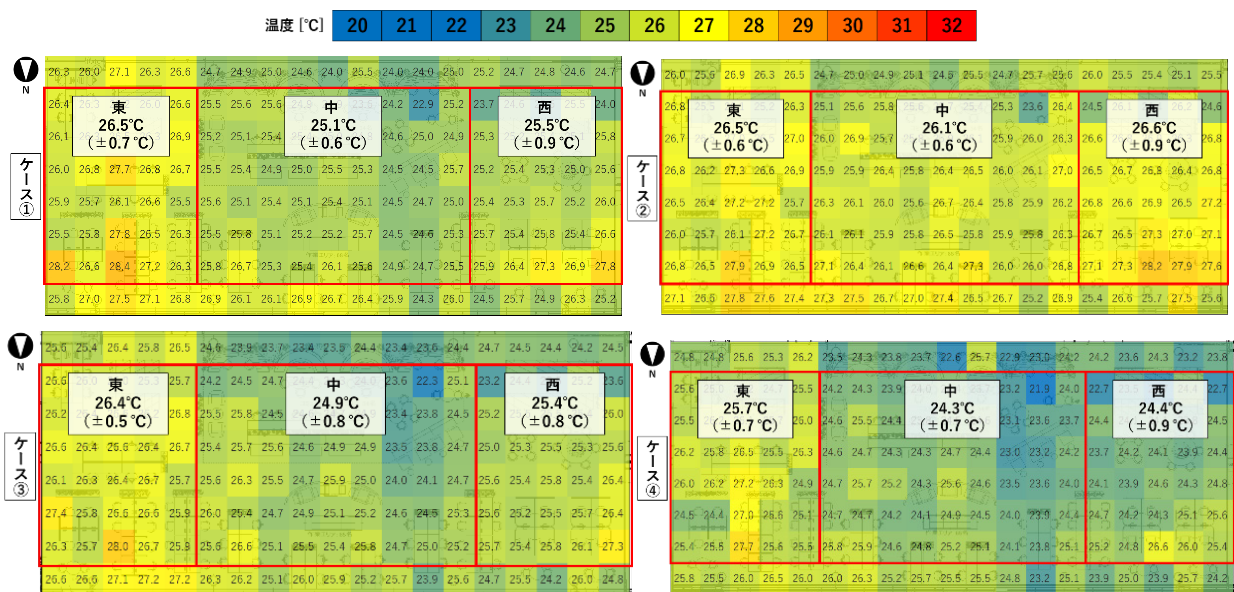


図 7 ケース別の室下部表面温度分布

5. 快適性評価

各ケースにおける室内環境の快適性を比較するため、PMV（予想平均温冷感申告）の測定と、検証エリアの執務者を対象に毎日アンケートを実施した。

5.1 PMV 評価

PMV は testo 社製のマルチ環境計測器を用いて FL +0.6 m の高さで測定を行った。PMV の決定に必要な平均放射温度は、グローブ温度、周囲空気温度、気流速度の測定値から計測器が自動計算を行っている。

図 8 に就業時間中（8:45～17:30）におけるケース別の PMV 測定値を比較して示す。なお PMV 算出にあたり、着衣量は 0.5 clo、代謝量は 1.1 met に設定した。なお着衣量については、別途サーマルマネキンを用いて作業着の clo 値を測定した。

各ケースの PMV 平均値はそれぞれ、ケース①：+0.2、ケース②：+0.5、ケース③：-0.1、ケース④：-0.2 と全てのケースで +0.5～-0.5 の範囲であった。DCFCU によるケース②の東側稼働ではやや暖かい側の PMV となったが、ケース③および④は PMV が 0（中立値）に近い値となり、DCFCU の稼働エリアや運転台数の調整により放射パネルと同等の PMV が得られることを確認した。

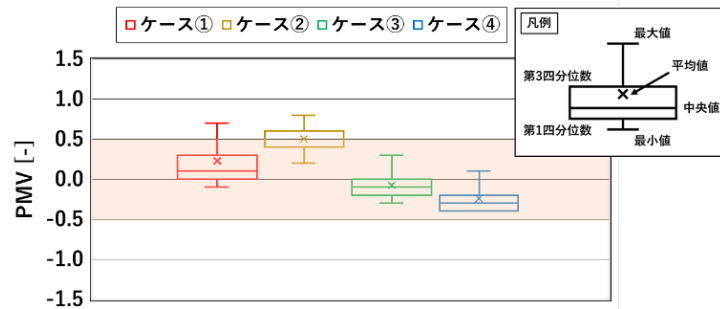


図8 就業時間中(8:45~17:30)におけるPMV測定結果

5.2 執務者アンケート調査

各ケースにおける室内環境の快適性について、毎日アンケートの結果から気流感満足度、温冷感、温熱環境満足度の3点で比較を行った。

図9に気流感に対する満足度アンケート結果を示す。ケース①および②では、「やや満足」～「非常に満足」の満足側の回答が60%得られた。一方で、ケース③では「やや不満」の回答がないが、ケース①および②では一定数みられた。これは、ケース①ではDCFCUの稼働がなく、ケース②ではDCFCUの稼働台数がケース③と比較して少ないことから、気流感を求める執務者が一定数居た可能性が考えられる。また、ケース④では「やや不満」の回答が全てのケースの中で最も多い結果となった。これは、DCFCUの稼働台数が多く不快な気流感となったことが考えられる。

図10に温冷感に対するアンケート結果を示す。ケース①～③では、「やや涼しい」～「やや暖かい」の中立側の回答が80%以上得られた。ケース④では「涼しい」～「寒い」の申告が多く見られた。

図11に温熱環境満足度のアンケート結果を示す。総合的な温熱環境満足度としては、「やや満足」～「非常に満足」の満足側の回答はケース①が最も多く67%となった。また、温冷感のアンケートでは寒い側の申告はあったものの、ケース④でも満足側の回答が50%得られた。ケース②では「やや不満」の回答が全てのケースで最も多くなってしまったが、これは前日までの検証にDCFCU 全台稼働などがあり、執務者が涼しい環境に慣れてしまったため、中立の回答が「やや不満」に寄ってしまった可能性が考えられる。

以上の結果より、ケース①の放射パネル稼働が最も高い温熱環境満足度が得られたが、ケース②～④のDCFCU稼働では、執務室全体の空気温度を低下することができ、同等の満足度が得られることが確認できた。また、本執務室においては、東側に発熱体となる機器類や執務者が集中していることもあり、ケース①、③、④では東側とそれ以外のエリアで温度差が生じてしまったが、負荷の大きい東側を中心に稼働したケース②では温度差が緩和されていたため、DCFCUの稼働台数や稼働エリアを調整することで室内環境を改善できる可能性が示唆された。

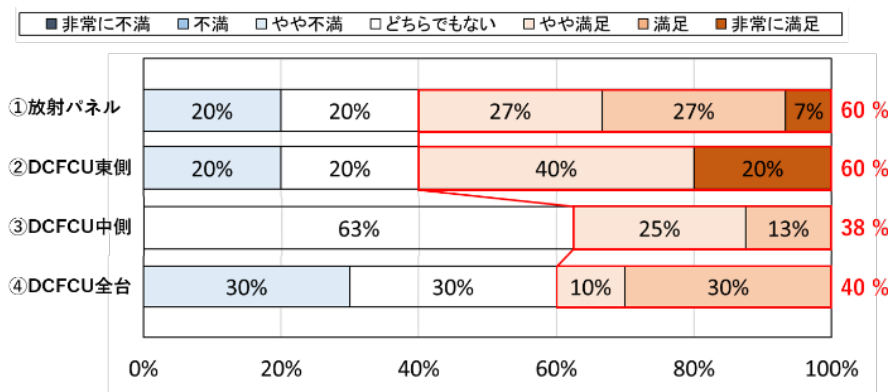


図9 気流感に対する満足度アンケート結果

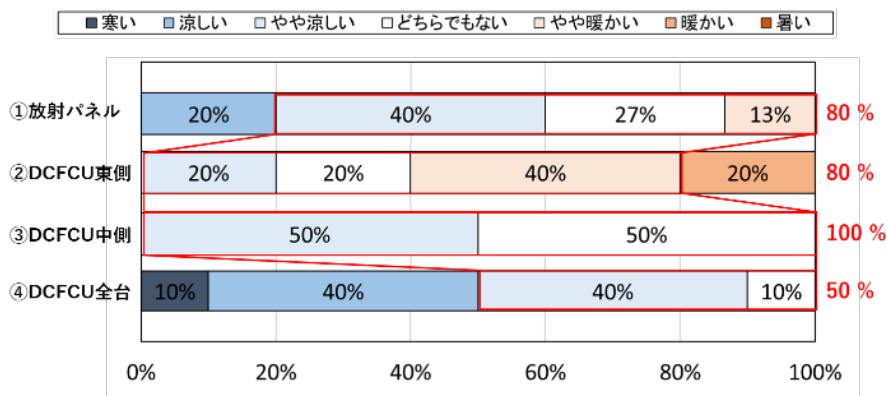


図 10 温冷感に対するアンケート結果

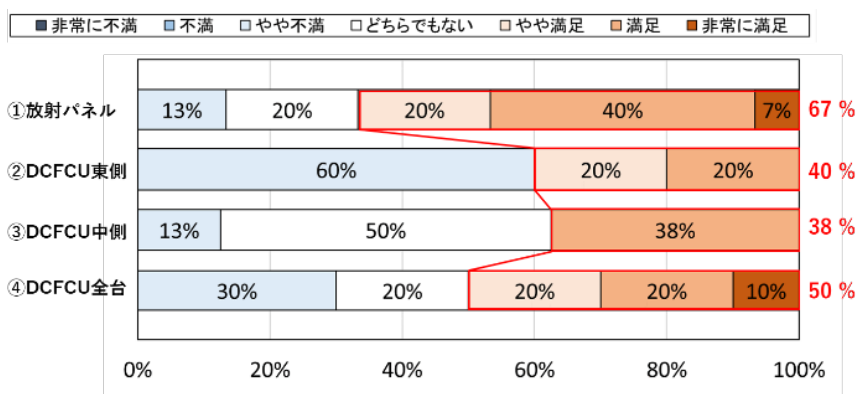


図 11 温熱環境満足度のアンケート結果

6. おわりに

本研究では、DCFCU を夏期のアンビエント空調として活用し、放射パネルとの室内環境の比較検証を行った。その結果、放射パネルよりも設置面積や必要水量が少ない DCFCU で、放射パネルと同程度の温熱環境満足度が得られ、室内を快適な環境に整えることができた。今後は、より最適な DCFCU の運転台数や配置等の運転方式を検証し、更なる環境改善と省エネ化に取り込んでいきたい。

文 献

- 1) 齋藤雅浩, スレスタミサン, 市川侑, 木村健太郎, 清水昭浩, 柴田克彦: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証計画 (第 39 報) 夏期における天井型パーソナル空調機と放射パネルとの室内環境比較, 空気調和・衛生工学会論文集, pp229-32 (2025. 9).
- 2) 武藤友香, 羽鳥大輔, 高西茂彰, 平原美博, 清水昭浩, 木村健太郎, 牧野内絵里, 粕谷文: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証計画 (第 1 報) 全体計画及びコンセプト, 空気調和・衛生工学会論文集, pp185-88 (2019. 9).
- 3) 木村健太郎, 平原美博, 清水昭浩, 柴田克彦, 羽鳥大輔, 武藤友香: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証計画 (第 5 報) 二次側空調機器の開発, 空気調和・衛生工学会論文集, pp161-64 (2020. 9).
- 4) 鈴木美穂, 相澤直樹, 柴田克彦, 清水昭浩, 武藤友香, 竹原大暉: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証計画 (第 23 報) 天井放射パネルの個別制御による省エネルギー性と快適性, 空気調和・衛生工学会論文集, pp215-18 (2022. 9).
- 5) 市川侑, スレスタミサン, 齋藤雅浩, 木村健太郎, 清水昭浩, 柴田克彦: エネルギー自立型サステナブル研究

施設の計画と実証計画（第 34 報）天井型パーソナル空調機のアンビエント空調利用， 空気調和・衛生工学会論文集， pp117-20（2024.9）.

- 6) 柴田克彦， 平原美博， 清水昭浩， 羽鳥大輔， 武藤友香， 田辺新一： エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証計画（第 10 報）潜顕分離空調の夏期性能評価とシステム最適化， 空気調和・衛生工学会論文集， pp197-200（2021.9）.

ABSTRACT

The office areas of our research facility use a task-ambient air conditioning system, where base loads are treated by an outdoor air handling unit and radiant air conditioning, while sensible heat load is treated by personal air conditioning systems, DCFCU. Although radiant air conditioning is more comfortable and energy efficient compared to conventional systems, it has challenges such as requiring a large installation area and the need for sound absorption measures. Therefore, as an energy-efficient alternative to radiant air conditioning, we used the DCFCU for ambient air conditioning during summer and conducted a comparative evaluation of the indoor environment. The results confirmed that comparable comfort could be achieved with less water supply than with radiant air conditioning.
