

空気式低風速放射空調システム

(一財) 建築コスト管理システム研究所・新技術調査検討会

1 はじめに

天井のパネルを温水または冷水によって加熱・冷却することによる、放射を用いた水式放射空調システムは、気流の影響が少なく、温度ムラが少ないことから、比較的湿度が低いヨーロッパで使用されてきた。しかし、夏が高温多湿となる日本で導入する場合は、冷房時のパネル部での結露が課題であった。

これを解決する手法の一つとして、空調機から供給される空気を利用する、「空気式低風速放射空調システム」(以下、「空気式放射空調システム」という)が登場した。

2021年3月、空気式放射空調システムの吹出口が、「新市場創造型標準化制度」¹を活用し、JIS B 8640《空気式低風速放射空調吹出ユニット》(以下、「吹出ユニット」という)として制定された。

本稿では、JISの制定により、導入件数の増加が予想される「空気式放射空調システム」の調査結果を紹介する。

2 放射空調システムの概要

「放射」とは、温度の高い方から低い方へ、熱が遠赤外線で移動する現象のことをいい、**図1**のように、冬期は、高温の天井・壁・床から、低温の身体へ熱が移動することにより温熱感を得られ、夏期は、高温の身体から低温の天井・壁・床

に熱が移動することにより冷熱感が得られる。

空気を温めたり冷やしたりして吹き出す従来の空調システムに対し、放射空調システムでは冷却・加熱された床面、壁面から、居住者の身体に直接作用することで、温感・冷感を得られる。

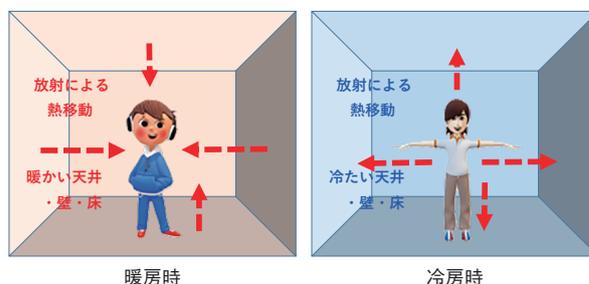


図1 放射の原理

また、従来の空調に比べて送風による対流が少ないため、場所によっては暑すぎ、寒すぎのムラが起こりにくい。

図2は、従来の空調システムと空気式放射空調システムによる暖房時の室内温度分布の断面図を示し、**図3**は、冷房時の室内温度分布の断面図を示している。

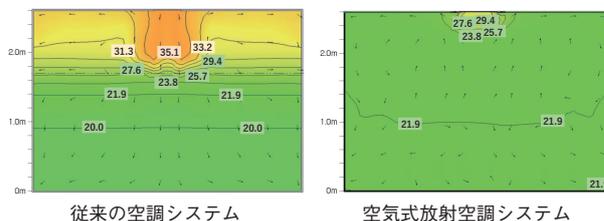


図2 暖房時の温度分布(断面図)

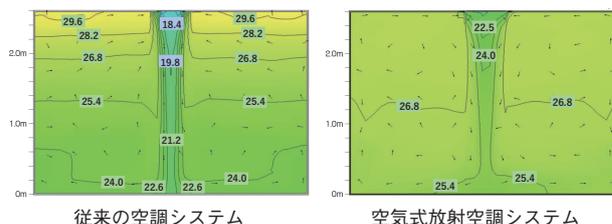


図3 冷房時の温度分布(断面図)

¹ 新市場創造型標準化制度：新市場の創造や産業力の強化に繋がる戦略的な標準化推進のために創設された。既存の業界団体等では対応できない、複数の関係団体に跨る融合技術や特定企業が保有する先端技術に関する、標準化を進めるための経済産業省による制度である。

従来の空調システムは、吹出口の直近の温度が、暖房時は高く、冷房時は低い上、室内全体の上下の温度差も大きくなっている。一方、空気式放射空調システムでは、室内全体に温度ムラが少なくなっている。

3 空気式放射空調システムの概要

空気式放射空調システムには、様々な形態があるが、**図4**にシステムの一例を示す。本例では、空調機からの給気が、吹出ユニットのパネルから低風速で吹き出されることによる、室内の加熱（冷却）効果に加え、給気から伝熱によりパネルが加熱（冷却）され、パネル面からの放射による加熱（冷却）の二つの効果により暖房・冷房を行っている。

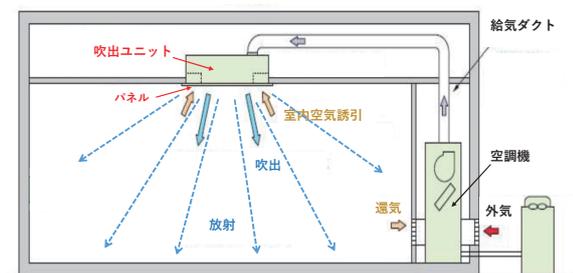


図4 空気式放射空調システム (例)

また、空気式放射空調システムには、次のような特徴がある。

- ①放射によって人体の温感・冷感に作用し、室温の設定を緩和できるため、省エネルギー効果が期待できる。
- ②放射は、距離減衰がないため、天井が高い場合でも有効である。
- ③吹出しが低風速のため、じんあい塵埃などの舞い上がりを抑制できる。
- ④天井部に水配管を必要としないため、水損対策が不要である。
- ⑤室内空気を誘引するタイプでは、結露しにくく、大温度差送風方式に対応可能である。

JIS B 8640では、吹出ユニットについて、「空調機からの供給空気を利用した、パネル面からの低

風速での空気吹き出し及び放射性能を備えた吹出口で、熱源部又は冷却・加熱コイル及び送風機をもたないもの」と定義され、吹出風速は0.5m/s以下と規定されている。また、吹出ユニットを介して室内へ供給される単位時間当たりの熱量のうちの放射による熱量の割合（以下、「放射性能」という）、露付きの試験法などについても規定されている。

3.1 吹出ユニットの概要

吹出ユニットの形状などの特徴は、メーカー毎に違いはあるが、次の例を基に概要について紹介する（**図5・6・7**参照）。

吹出ユニットは、空調機の給気ダクトに接続された吹出口であり、室内天井面に分散配置して使

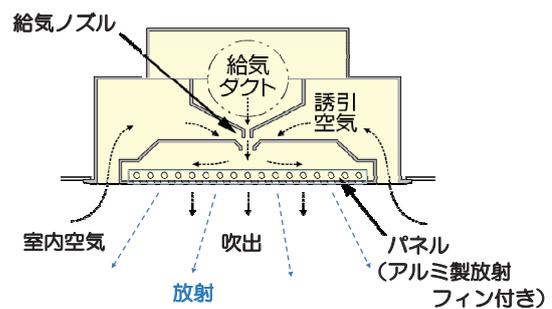


図5 吹出ユニットの構造 (例)

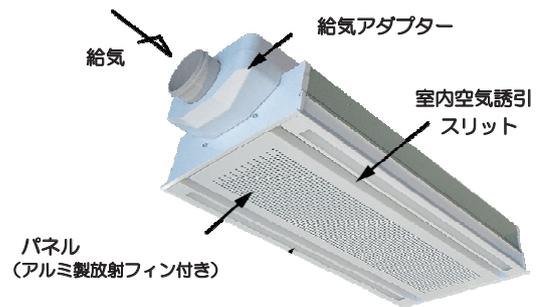


図6 吹出ユニットの外観 (例)

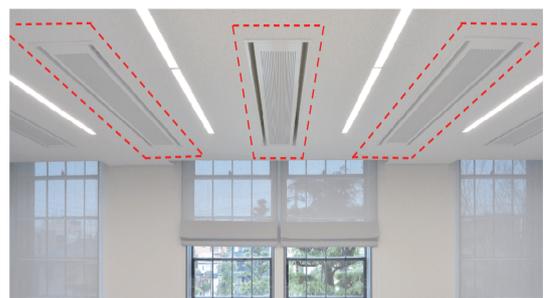


図7 吹出ユニットの設置 (例)

用する。空調機から供給された空気を、吹出ユニット内部の給気ノズルから吹き出し、誘引型の吹出ユニットでは周囲との圧力差を利用して、スリット部より室内空気を誘引し、混合する。

混合した空気は、放射効果を高めるアルミ製放射用フィンを加熱（冷却）して室内に吹き出し、加熱（冷却）されたパネルは、表面より放射する。

吹出ユニットは、室内空気を誘引することによって、吹出空気温度を室温に近づけ、居住者の気流による不快感を抑制し、ムラの少ない良質な室内温度分布が形成されている。

この吹出ユニットの誘引量比は、標準的な処理風量において、給気6：誘引4の割合としている。

例えば、冷房運転時給気温度を大温度差送風時の13℃送風とする場合は、天井付近の室内空気温度を28℃とすると、 $(13℃ \times 0.6) + (28℃ \times 0.4) = 19℃$ と19℃で吹き出すことになる。また、暖房運転時給気温度を35℃、天井付近の室内空気温度を25℃と想定すると、 $(35℃ \times 0.6) + (25℃ \times 0.4) = 31℃$ と31℃程度の吹出温度となる。

この方式では、大温度差送風方式においても室内空気の誘引の効果により、冷房時のパネル表面結露を防止し、送風量を抑え、搬送動力を低減し、省エネルギーが可能となっている。

3.2 吹出ユニットの性能

吹出ユニットの性能を示す項目として、放射性能と耐結露性能がある。

放射性能は、パネルが吹出温度と同等まで冷却・加熱されることで、床、壁などとの間に温度差が生じた場合に、パネルから熱線が電磁波として放射する能力であり、放射熱量は、パネルの表面温度の他、パネルの開口率、形状などによって変化する。

そこで、JIS B 8640では、放射熱量の適用範囲や試験の方法などが基準化され、「熱輻射により黒体から放出されるエネルギーは熱力学温度の4乗に比例する」というシュテファン=ボルツマンの法則を用いた式によって導くこととされた。

耐結露性能とは、吹出ユニットのパネル表面に結露の発生を抑制する能力をいう。

空調機からの給気温度が低いと、吹出ユニットのパネル表面に、結露が発生する可能性がある。このため、JIS B 8640では、耐結露性能の試験条件が冷却時の給気温度として、13℃、15℃、17℃におけるものが規定されている。

吹出ユニットの機種選定にあたっては、耐結露性能をカタログ等にて確認し、システムに適合する機種を選定することが必要である。

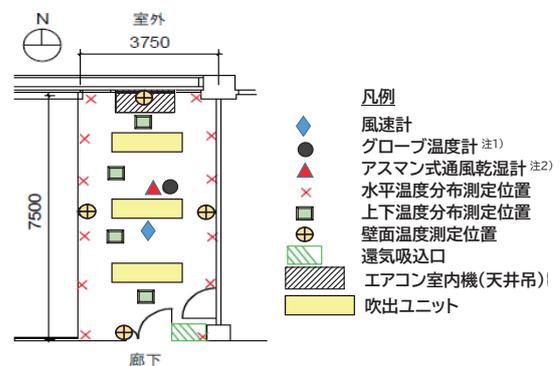
なお、JIS B 8640では、「吹出ユニットのパネル面に露が付着した場合でも滴下（吹出しを含む）してはならない」とされている。

3.3 設計手法

本システムによる、熱源及び空調機の選定にあたって、放射が人体に直接作用し、室内の上下の温度差も少ないことから、設計室内温度を若干緩和することも可能であるが、通常は、従来の空調機の算定に準じて行われる。

4 温度分布の実験

大学の一角を環境実験室とした、吹出ユニットによる、冬期と夏期の空調時の温度分布の実験を紹介する。



注1) グローブ温度計：黒塗りの銅球に温度計を差し込んだ温度計で、この温度は気温及び放射熱と体感の関係を示すのに用いられる。

注2) アスマン式通風乾湿計：乾球と湿球の温度から公式によって、相対湿度を読み取る方式の温度・湿度計。

図8 環境実験室の概要

実験は、**図8**に示す床面積28.1㎡（L7.5m×W3.75m×H2.6m）の北側窓付の環境実験室に、吹出ユニット3台を部屋の各部に設置し、各種計測機器によって、温度分布等を計測している。また、天吊パッケージエアコン（以下、「エアコン」という）も併設してあり、両者の比較を行っている。

4.1 暖房時の温度分布

実験は、外気温度8℃、設定温度を20℃とし、室温が安定した状態で計測を行っている。**図9**は、その際の鉛直温度分布を示し、吹出ユニットの台数を変えての運転や、エアコンとの比較などを行っている。エアコンによる暖房（●印）は、足元まで十分温まらず、居住域における温度差は、部分的に10℃以上となるケースも確認できる。一方、吹出ユニットによる暖房（▲印）は、天井付近での温度はやや高いものの、居住域での温度差は2℃程度に納まっている。

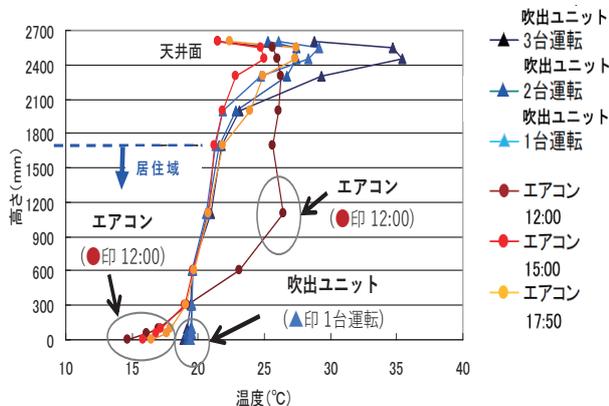


図9 暖房実験による鉛直温度分布

4.2 冷房時の温度分布

実験は、外気温度30℃、設定温度を26℃で、室温が安定した状態で計測を行っている。**図10**は、暖房実験と同様に鉛直温度分布を示す。エアコンによる冷房（△印）は、給気温度や気流の影響により、部分的に温度の低い環境が確認できる。一方、吹出ユニットによる冷房（×印）は、居住域における温度差は、1℃以内に納まっている。

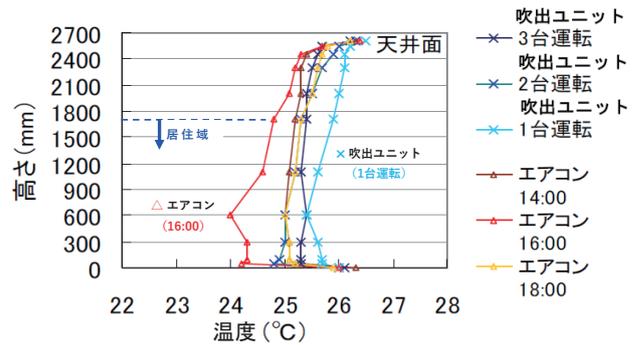


図10 冷房実験による鉛直温度分布

図11は、乾球温度と相対湿度の関係を示す。設定温度が24℃と低い場合では、吹出ユニットの相対湿度は60%ぐらいであり、エアコンは70%以上であるため、夏期では、吹出ユニットの方が湿度を下げやすいと言える。

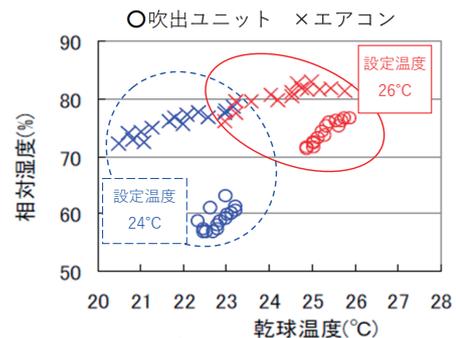


図11 乾球温度と相対湿度の関係

5 温熱環境評価実験

実験室での、寒暑感、快適感、気流感などに関する被験者の評価（以下、「温熱環境申告」という）の実験を、次に示す。

5.1 安定時の温熱環境申告（夏期）

温熱環境申告は、寒暑感・快適感・気流感について各7段階としている。

被験者の女性8人を、2グループに分け、順次実験が行われた。**表1**に、被験者の身長・体重・着衣量²を示す。

² 着衣量 (clo値)：着衣の断熱・保温性を示す指標。1 cloとは、気温21℃、相対湿度50%、気流0.1m/s、着席安静の状態で、暑くも寒くも感じない衣服の断熱状態をいう。

被験者は、控え室で約30分滞在した後、最初の温熱環境申告を行い、実験室へ移動し、実験室内では、60分間椅座安静状態で温熱環境申告を行っている。

表1 夏期被験者の身長・体重・着衣量

身長 (cm)	体重 (kg)	着衣量 (clo)			
		吹出ユニット		エアコン	
		26°C	27.5°C	26°C	28°C
158±5.6	50±5.9	0.34±0.05	0.31±0.05	0.30±0.06	0.33±0.07

表2に、実験条件を示す。図12～図14は、標準新有効温度³(以下、「SET*」と表す)と「寒暑感」、「快適感」、「気流感」の関係を示す。各点は、温熱環境が安定した時点の、温熱環境申告のグループ別平均値を表す。

表2 夏期実験条件

グループ		空調方式	乾球温度
A	B		
◆	◇	吹出ユニット	26.0°C
■	□	吹出ユニット	27.5°C
●	×	エアコン	26.0°C
▲	+	エアコン	28.0°C

図12の寒暑感は、吹出ユニットでは、SET*が23～27.5°Cの範囲において、多数の被験者がほぼ「ちょうど良い」と申告した。一方、エアコンでは、SET*が大幅に低下して20～24°Cの範囲となり、多数の被験者が「寒い」と申告した。

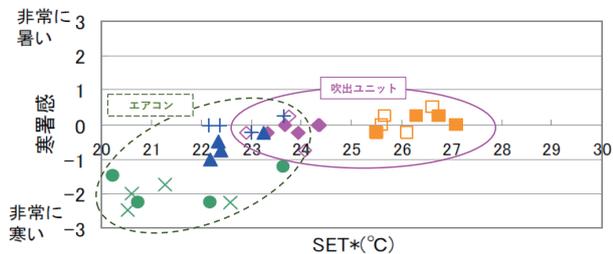


図12 SET*と寒暑感

3 標準新有効温度 (Standard new Effective Temperature): 温熱感覚の比較を可能にするため、相対湿度50%、椅座状態、着衣量0.6clo、気流0.3m/sの状態の温度

図13の快適感は、吹出ユニットのSET*は、エアコンより高くても、同等の快適感を得られた。

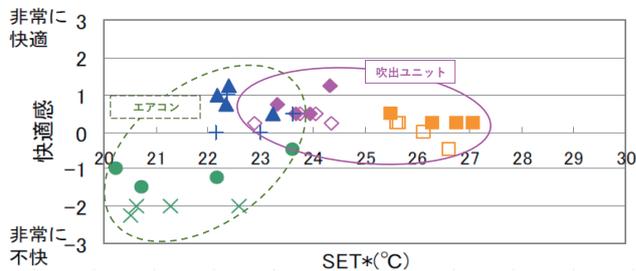


図13 SET*と快適感

図14の気流感は、吹出ユニットでは、「感じない」～「やや感じる」に対し、エアコンでは、「感じる」～「非常に感じる」と申告された。

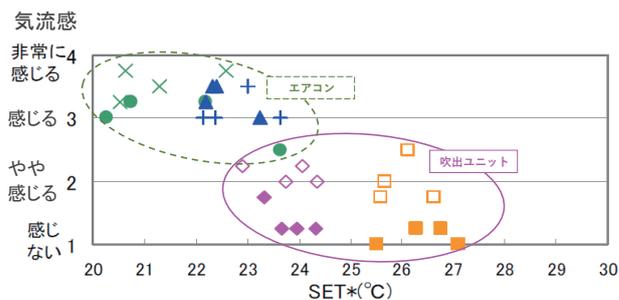
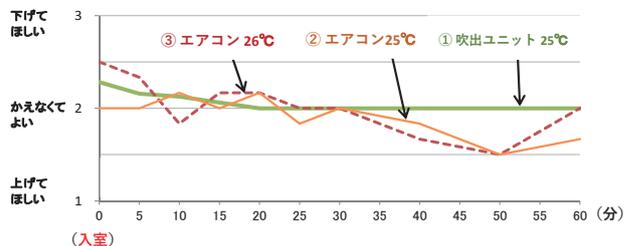


図14 SET*と気流感

5.2 屋外歩行からの室温希望申告(夏期)

図15に屋外歩行からの入室後の、室温希望申告実験を、次に示す。



凡例 ① 吹出ユニット (設定温度25°C)
② エアコン (設定温度25°C)
③ エアコン (設定温度26°C)

図15 室温希望申告の経時変化

被験者は、控え室に40分滞在後、日向を20分間歩行した後、①～③の3条件の実験室に入室し、

60分間の椅座安静状態で、経時変化における室温希望申告の実験を行っている。

エアコンの場合は、時間経過とともに、室温を上げてほしいとの要求が増えている。一方、吹出ユニットの場合は、当初、室温を下げてほしいとの要求が出たが、15分経過以降は、持続的に現状維持を望む申告となっている。

これらの結果から、吹出ユニットによる温熱環境は、軽い運動の後、入室直後は若干物足りなさがあるものの、経時変化では、持続的な快適性が得られやすいことが確認できる。

6 経済性の検討

ランニングコストについては、空気式放射空調システムはエアコンに比べ、放射の効果及び鉛直温度分布が均一なことから、室内の設定温度を暖房・冷房ともに抑制できる。また、冷房時は、結露の可能性が低く、良好な温熱環境を保てることから、空調機からの給気温度を従来よりも2～5℃程度下げることができる。仮に、給気温度16℃に対し、13℃と、3℃低い温度で送風した場合、およそ30%の設計風量低減に繋がり、改修工事で既設ダクトを再使用した場合、送風動力を40%程度削減することが期待される。

イニシャルコストについては、他の空調システムと比較することは、最適な吹出口の配置が異なるため困難であるが、一般に、吹出ユニットの価格は、通常用いられているシーリングディフューザーなどに比べ単価が高いことから、コストアップとなる。一方、給気ダクトが、小口径になることによるコストダウン効果が期待できる。

7 おわりに

ここまで、空気式放射空調システムの特徴及び吹出ユニットの構造を紹介し、吹出ユニットの温度分布のシミュレーション、温熱環境及び心理的効果の調査について報告した。吹出ユニットで

は、均一な室内温度分布を形成し、不快な気流を解消しつつ、快適感を向上させることを確認した。この傾向は、安静での経時変化で持続的な快適性が得られやすいことから、安静状態で過ごすことが多い、病院、学校及び図書館などで、より有効に作用すると思われる。空調システムの選定にあたっては、快適性に加え、経済性、水損対策などを総合的に比較検討することが大切である。

本稿が、温度分布、気流及び湿度に配慮した空調システムの検討の一助になれば幸いである。

最後に、本調査にあたって、資料、データの提供と全般にわたるご指導、ご意見をいただいた木村工機(株)に感謝申し上げます。

(参考文献)

- 1) 日本産業規格 JIS B 8640 : 2021 空気式低風速放射空調吹出ユニット
- 2) 冨 寒月、齋藤輝幸、久野 覚 (名古屋大学) 「全空気式誘引放射空調の評価に関する研究 2012年の暖房実験に関する室内温熱環境の検討」『空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集』 pp.1919-1922, 2012
- 3) 冨 寒月、齋藤輝幸、久野 覚 (名古屋大学) 「夏期における全空気式誘引放射空調の評価に関する研究」『空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集』 第14号, pp.9-20, 2013
- 4) 丸山 茜、齋藤輝幸 (名古屋大学) 「夏期屋外から入室後における全空気式誘引放射空調の熱的快適性評価に関する研究 その1」『日本建築学会大会学術講演梗概集』 近畿 (2014-9)
- 5) 木村工機(株) カタログ「全空気式放射整流ユニット 環境エアビーム」 2020年9月