

中小規模オフィスビルの空調ニーズに応えるセル型空調システムの開発

Cell Air Conditioning System for Small/Medium-Sized Office Buildings

アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー

三枝 隆晴
Takaharu Saegusa

アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー

羽場 照芳
Teruyoshi Haba

アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー

伊藤 卓
Suguru Ito

アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー

長尾 泰司
Hiroshi Nagao

キーワード

セル型空調システム, ネクスフォート, 環境選択権, ダクト/冷凍サイクルシミュレーション, CFD, 気流切替付吹出口

中小規模ビル向けに、従来の部屋やゾーニングより細かい空調エリア単位として「セル」という概念を導入した空調システムを開発した。本システムは、室内への風向を切り換える「体感気流切替機能付き吹出口」、セルごとの風量を変更する「セル風量分配ユニット」、設定器やコントローラなどから構成される。VAV空調やダクトビルマルチなど従来のダクト空調にない新たな機能として、より細かい単位での風量や風向の切替機能を備えている。本開発では、「人の温冷感」と「風量・風向制御」の関係を理論・実験・シミュレーションで分析し、そこで得られた知見をもとに、制御ロジックを考案した。そのロジックにより、人の温冷感申告に応じて、吹出口の風量や風向、室内温度といった個々の制御ループの設定を変えながら、「きめ細かな気流制御」や「気兼ねなく操作しやすい設定」など快適かつ利便な環境制御を提供する。

We have developed a cell air-conditioning system to meet the needs of small and medium-sized buildings. Instead of the conventional air-conditioning zoning method, our design applies smaller cells for more precise air distribution. The system is composed of diffusers whose direction can be changed, air branch units enabling air volume control, user interface units for occupants, and controllers. The system allows control of the air volume and direction to smaller spaces than VAV systems or variable refrigerant flow AC. We analyzed the relationship between thermal comfort and airflow volume/direction, based on theory, experimentation, and simulations, and applied the results to design the system's control logic. Based on the occupants' "votes," the control logic maintains a comfortable environment by adjusting the airflow volume and direction and the temperature in each control loop, providing finely tuned airflow control with a high level of usability that eliminates any user hesitation.

1. はじめに

ダクト空調は、ダクトや吹出口を設けて室内に空調空気を供給する方式で、吹出口の形状や数を設計することで、ビルオーナーや設計者の要望に合わせて、室内気流をデザインできる利点がある。しかし、ダクト空調は、空調機や熱源も含めて、占有スペースやコストがかかるため、中小規模ビルでの採用が減ってきている。

一方、最近の中小規模ビルでは、天井カセットビルマルチに代表される天井設置や床置のダクトレス空調機が主流

の方式として定着している。しかし、ダクトレスの場合では、室内の気流性能が装置固有の性能に左右されるが、風量や風向の制御範囲が限定され、気流や温度に関するクレームが起きやすい実態がある。

本製品の着眼点は、ダクト空調の良さを活かしつつ、個別空調性や省サイズ・省コストを満たすことである。そこで、空調機には、小型・分散化に優れたダクト接続タイプの小型ビルマルチを採用し、吹出口個別に風量や風向の制御機構をもたせている。

このたび紹介するセル型空調システム「ネクスフォート™」

は、中小規模のビル空調におけるクレームをいかにして減らすかに挑戦した空調システムである。その特長を以下に示す。

- (1) 空調クレームの皆無化を目指す手段の1つとして、居住者に設定操作を解放する手法に着目した。そのクレーム減少効果を高めるため、細かい単位で設定操作できる仕組みを構築する。(従来よりも細かい空調ゾーニングとなるため、本システムの設定単位をセルと名付けた。)
- (2) 最も理想的なシステムはパーソナル空調であるが、各居住者に専用の空調機器を提供することは施工上の制約が大きく、レイアウト変更等の運用変化に柔軟に対応しにくい。特に居住者のあらかじめ定まっているテナントビルには適用しにくい。そのため、従来の一般的な空調設備(天井部に吹出口等の空調機器を配するシステム)を前提とし、天井面の空調機器であっても細かいセル単位で環境を調整できる機能を実現する。
- (3) 居住者が設定器を自由に操作すると、極端な設定となり省エネルギーに反してしまうことが危惧される。過剰な空調設定を防ぐ仕組みも提供する。

以降は、2章と3章で製品のコンセプトや概要を、4章で提供機能の詳細解説を、5章と6章で製品を支える技術を紹介していく。

2. システム概要

セル型空調システムの構成を図1に示す。室内機は、天井隠蔽型のビル用マルチエアコンを採用し、標準的なパターンとしておよそ100㎡に1台の室内機を配置することを想定した。

セル型空調システムの風量制御機器として、セル風量分配ユニット、および体感気流切替機能付き吹出口がある。これらの機器を室内機からのダクトルートに組み込むことで、標準パターンでは1台の室内機を4つのセルに分割し、およそ25㎡(3.6m×7.2m)のセル単位で設定操作が可能とした。

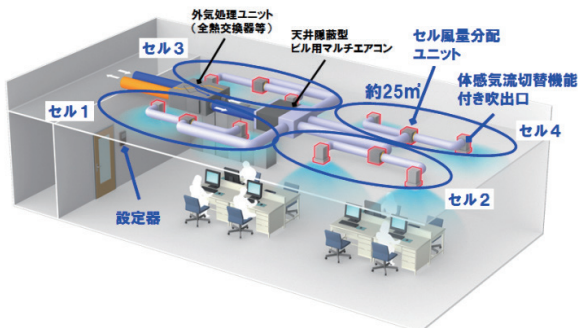


図1 セル型空調システム



図2 セル風量分配ユニット



図3 体感気流切替機能付き吹出口



図4 設定器

3. 細かいセル単位の設定操作の実現

3.1 「環境選択権」の提供

空調への居住者満足感を高める方法の1つは、居住者が自由に設定操作できることである。これは、「環境選択権」と呼ばれる考え方に基づくものであり、クレームを減らす概念として注目されている。例えば、執務の効率と省エネルギーなどを勘案してビル管理者が設定した室内温熱環境下では、執務者は与えられた環境と感じ、クレームを発する。一方、同等の環境でも執務者がリモコン操作し、設定を選択した環境では、クレームが減少するとの知見が報告されている⁽¹⁾。

セル型空調システムでは、この「環境選択権」の考え方に基づき、従来の空調よりも細かいセルと呼ぶ単位で設定操作できる仕組みを構築し、居住者が操作しやすい環境を提供している。その実現のために、「セル風量分配ユニット」と「体感気流切替機能付き吹出口」をダクトに設置し、セル単位での設定操作を実現している。

3.2 気流の活用で「自己効力感」を提供

居住者の満足感を高めるためには、「環境選択権」とともに「自己効力感」という考え方も非常に重要である。「自己効力感」とは、行動した結果を確信する能力と定義される⁽¹⁾。設定を変更してもその効果を確認できなければ却ってクレームに繋がりがかねない。本システムでは、当該セルの居住者に設定変更の効果を感じてもらわなければならないことが必要であり、その実現が、大きな要求仕様の1つであった。

開発仕様の検討を重ねた結果、風量に加えて風向も制御する方法を採用した。従来の空調では、居住者にドラフト感を与えないように、冷気は直接居住域に吹かないのが一般的な考え方である。しかし、その一方で涼を要望する居住者にとっては、冷気は必ずしも不快なものではなく、むしろ「自己効力感」を高める上で非常に有効な手段になり得る。

セル型空調システムはこの居住者の要望に着目し、冷やす方向への設定変更があった場合には、風向を水平から斜めの気流に変更することで、居住者にその効果を体感してもらい仕組みを組み込んだ。また、冷気を直接居住域に届けるため、冷える時間を短縮する効果も期待できる。

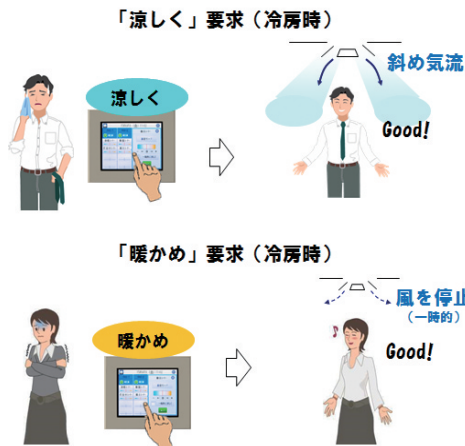


図5 気流活用による「自己効力感」の向上

風向変更のために開発した製品が、「体感気流切替機能付き吹出口」で、拡散(水平)気流と斜め気流の切替が可能となる。図6に、それぞれの風向の気流特性を示す。斜め気流では、居住域の風速が0.4~0.5m/sec以下になるようにし、過度なドラフト感がないように配慮した。また、ビル管法の基準である「気流0.5m/sec以下」の範囲内であり、ソフトで心地よい冷涼感のある気流を実現している。

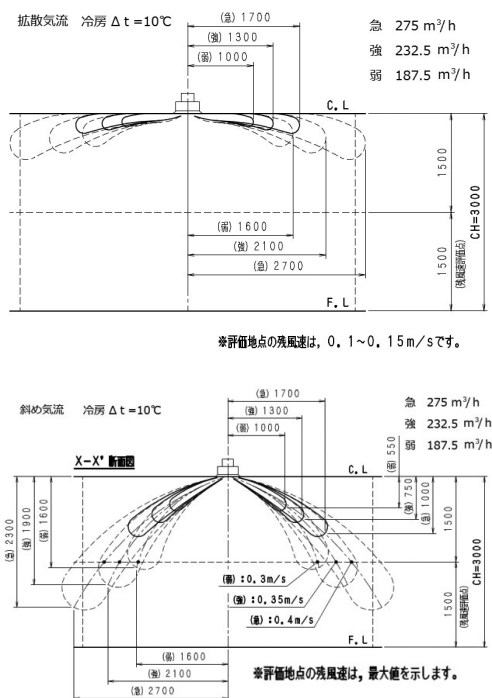


図6 体感気流切替機能付き吹出口 気流特性

4. 温冷感設定による「快適」「省エネ」の両立

前述のように、セル型空調システムは、細かいセル単位での設定操作を特長としている。その結果、居住者には設定操作できることによる満足感(=快適)を提供している。その一方で、過剰な設定値になりにくいという安心感と合わせて省エネルギーを実現する必要がある、そのための温冷感設定方式である。

4.1 気兼ねなく操作しやすい設定方式

ビルで働く人々の本質的な空調要望は、「現状より涼しくしたい」または「現状より暖かくしたい」というものである。暑くも寒くもないときには、特に要望を発することはない。また、暑い(寒い)と感じても我慢し設定変更しない人も少なくない。

こうした空調操作に対する心理的特性を踏まえ、本システムでは温冷感設定という新しい設定方式を考案した。その時の平均的な空調環境(=温冷感設定の中心位置)に比べて涼しめにしたのか、あるいは暖かめにしたのかを直感的に設定する方式である。この設定方式により、自分のセルの温熱環境を「涼しめ」「暖かめ」にすることが可能となる。

また、「一時的に涼しく」する設定も可能である。斜め気流の活用により、当該セルを急速に冷やす機能である。ただし、一定時間後には元の状態に戻るので、涼しい環境が長時間継続することはない。周囲の人達への気兼ねが少なく空調操作できる設定方式である。



図7 温冷感設定方式

4.2 過剰な温度設定値の抑制

セル空調の温冷感設定の概念を図8に示す。涼しめ(または暖かめ)の要求があると、第1段階として、気流(風量と風向)を変更する。温度変化に比べて、気流変化の方が応答が速く、人の温冷感にも即座に影響を与えるので、気流変更を最初に行う。

その後、居住者がその環境に満足しない場合には、さらに第2段階の変更操作が加わる。そこで、室内温度設定を変更する。なお、本システムでは、室内の天井に温度センサを設置しているが、その温度センサで室内温度を計測する。室内温度と設定の偏差に応じて、室内機側の温度設定を増減させる。

居住者は、温冷感設定の変更により、あたかも温度設定値を変更していると感じるであろうが、実際には設定変更の初期段階では気流(風量・風向)の状態だけを変化させ、温度設定値は変化させない。この際には前述した気流による「自己効力感」の向上作用も働かせることにより、設定変更した環境は居住者に受け入れられやすくなる。従来空調と異なり、むやみに設定値が変更されなくなる効果が期待される。

また、居住者の操作により変更される温度設定値を管理者が管理できる仕組みも用意している。1日数回温度設

定値をリセットすることができ、上下限値を定めることが可能である。これらの機能の活用により、管理者は意図する省エネ運用を確実に実行できる。しかも、居住者に設定操作という「環境選択権」を提供しているため、クレームが減少する効果も期待できる。

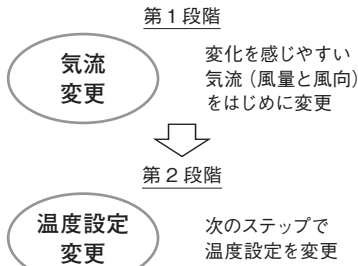


図8 温冷感設定 省エネ概念



図9 設定値の上下限値設定画面

5. 製品の設計・検証環境の構築

ここまでは、開発製品について述べてきた。5、6章では、制御設計や検証で活用した制御技術やシミュレーション技術を紹介する。

5.1 実機実験環境

当社の温熱環境実験室に製品実機を設置し、制御設計と検証を進めた。また、後述のシミュレーションではモデル化を行っている。本実験室では、空調対象室の周囲6面に、温度を制御できるチャンバ空間があり、内壁3面、外壁、天井、床を模擬している。つまり、所定の周囲温度や外部負荷を与えることができるので、再現や比較の実験が可能である。実験室の外形と条件を、図10と表1に示す。

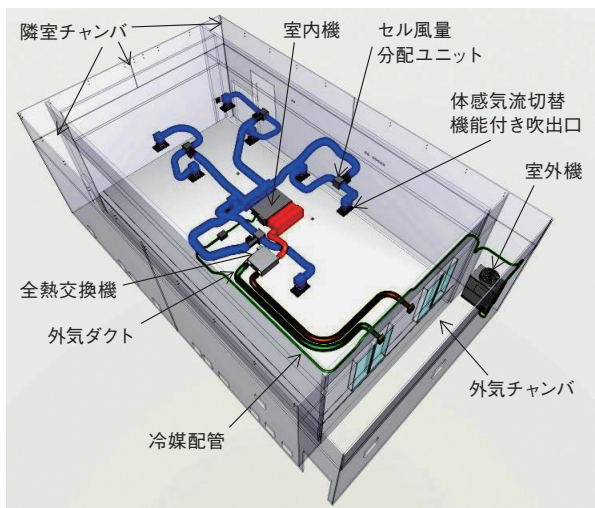


図10 実験環境の鳥瞰

表1 実機環境の条件

実験対象室	縦 8m × 横 15m × 高さ 3m; 床面積 120 m ²
周囲チャンバ	外気チャンバ 1面, 隣室チャンバ 3面 天井チャンバ, 床チャンバ
内部負荷	9kW, 1kW 電気ヒータ 8台, 照明 1kW
空調設備	室内機 14kW, 室外機 22.4kW

5.2 シミュレーション環境構築

当社では空調制御システムの開発のために、空調シミュレーションの研究を積み重ねてきている。本開発向けにシミュレーション環境を構築し、制御設計や効果検証に活用した。

従来のシステムより細かい単位での設定操作を可能としたセル型空調システムを評価するためには、それぞれの空調ゾーンでの温度分布など、温熱環境評価が重要である。その制御検討のためにはビル用マルチエアコンの冷凍サイクルモデリングが必要となった。そこで、冷凍サイクルの挙動から制御動作、室内環境まで動的に計算可能な数値解析シミュレータを研究し構築した。図11に示すように、セル型空調システムの一般的な計装を対象としてモデル化している。室内環境は図12のようにComputational Fluid Dynamics (CFD) ソフト上で空間モデルを作成する。

室内環境とビル用マルチエアコン、制御はそれぞれ別のシミュレータを用いて計算する。室内環境の計算には市販のCFDソフト「Flow Designer」を、ビル用マルチエアコンの計算には、早稲田大学齋藤研究室で開発した「Energy Flow +M」を、制御の計算には「MATLAB/ Simulink」を、それぞれ用いた。シミュレータ間で相互に情報をやりとりしながら計算させることでシステム全体の動的計算を実現している。

構築したシミュレーションを用いることで、室内温熱環境(図13)、ビル用マルチエアコンの冷凍サイクル(図14)、室内温度制御の挙動(図15)などの例のように、システムのあらゆる挙動・特性を把握することが可能である。

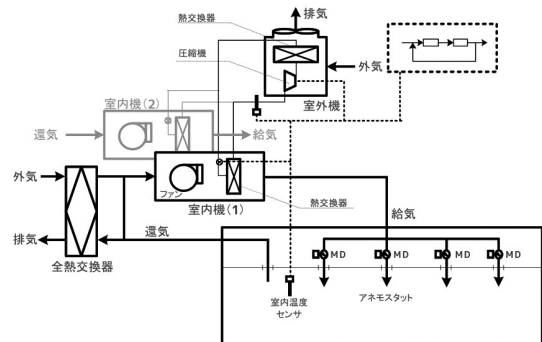


図11 システムのモデル概略

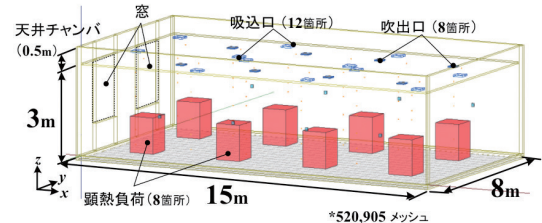


図12 部屋モデル (CFD)

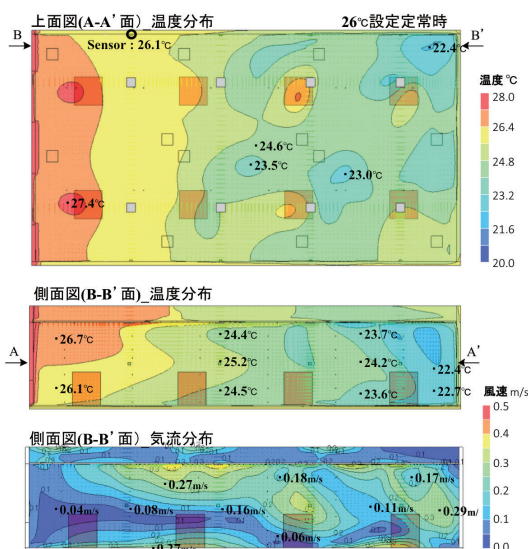


図13 室内環境の計算

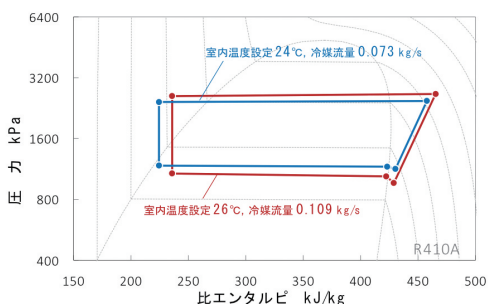


図14 ビル用マルチの状態計算

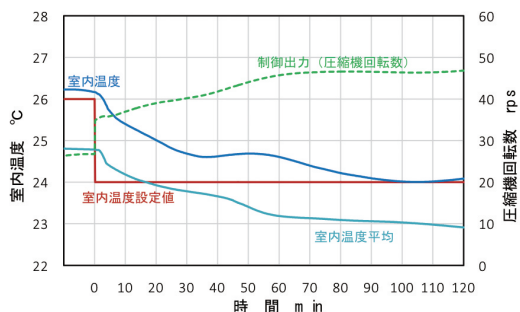


図15 室内温度制御の挙動計算

6. 設計・検証

前述した実験環境やシミュレーション環境を活用し設計や検証を行った。その代表事例として、「ダクト系の制御設計」, 「室内温度分布検証」, 「エコモード制御」を紹介する。

6.1 ダクト系モデリングと制御設計

風量・風向制御に関しては、本製品の標準的なパターンである図16のダクトシステムに対して、前述のシミュレータを用いて制御設計を行い、実機検証を行っている。

(1) シミュレーション

空調機ファンは、急/強/弱の設定のP-Q (圧力-風量) 性能曲線(図17)をそれぞれ多項式化し、ファンへの運転指

令(急/強/弱)に応じて、曲線が切り替わるモデルとした。ファンの運転点は、ファンに接続される系全体のダクト抵抗に応じて決まる。すなわち、ダンパが閉じ気味で系全体の圧力抵抗が高ければ、ファン静圧が増し風量が減少する。逆に、ダンパが開き気味で系全体の圧力抵抗が小さければ、ファン静圧が減り風量が増加する。

吹出口に関しては、このたび開発した実機(図2, 図3)に対して風量と圧力の関係を測定し、斜め吹出/水平吹出のそれぞれの圧力抵抗を求めモデルに設定した(図18)。

系全体の圧力抵抗は、その構成要素である「ダクト抵抗」, 「ダンパ」や「吹出口」の装置抵抗などで決まってくる。ダクトにはフレキシブルダクトを用いていて、その直管や曲り(45°や90°)のダクト抵抗値の仕様値をモデルに設定している(図19)。

ファンP-Q特性と各部の圧力抵抗から、圧力バランス計算を行うことで、各部の風量や圧力が求まる。図20はシミュレーション結果の一例で、8個の吹出口風量のシミュレーション結果が、実測にはほぼ一致していることを確認した。

(2) 制御設計

次に制御設計について解説する。目標とする制御量は各吹出口の「風量」と「風向」であり、図16のように操作量は、①風量制御ダンパ②風向切替ダンパ③ファン運転指令(急/強/弱)となる。また、設定は設定器からの温冷感設定となる。

コントローラに実装されたロジックを図21に示す。コントローラは、設定器からの温冷感設定に応じて、ファン運転指令や開度、気流切替の指定を行っていく。そのための制御テーブルが用意され、温冷感指定に応じて、ファン運転指令や開度、気流切替を指令している。例えば、設定器で「涼しく」という指令があれば、制御テーブルを参照して、ダンパ開度を上げ、ファンを「急」に変更し、「涼しく」という居住者要求に追従させる。

前述のように、実測とシミュレーションでダクト制御系の挙動を明らかにしており、その結果をもとに、制御テーブルを定数化している。

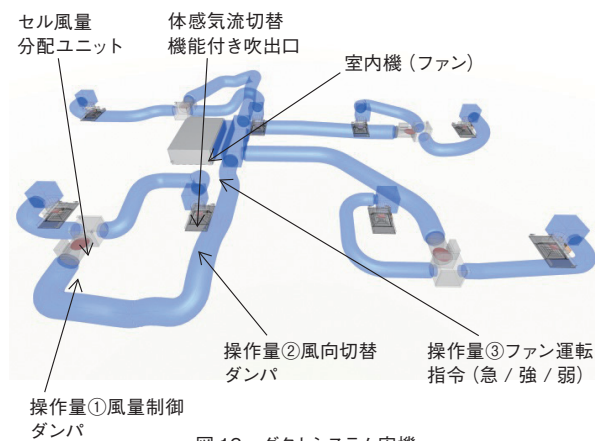


図16 ダクトシステム実機

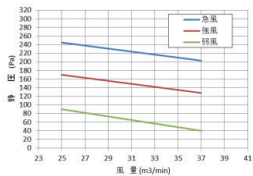


図 17 室内機ファン

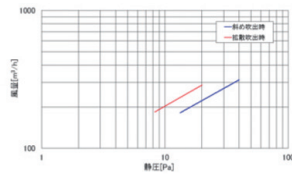


図 18 吹出口の装置抵抗 P-Q 特性

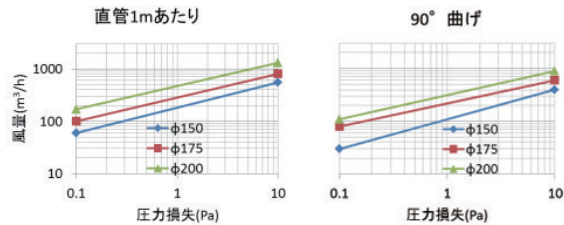


図 19 ダクトの抵抗

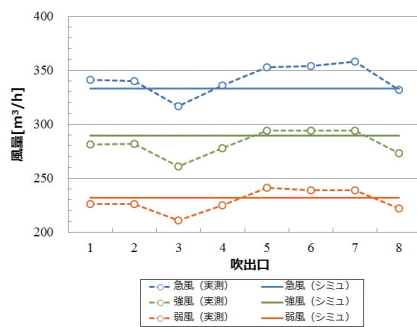


図 20 実測とシミュレーションの比較

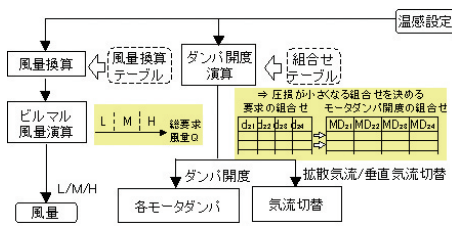


図 21 ファン指令とダンパ開度指令

6.2 室内温度制御とその検証

セル型空調システムは細かなエリアごとに空調操作が可能であることが特長である。ここでは、細かなエリアで風量・風向を操作できることにより、室内環境へどう影響を与えるかをシミュレーションで検証した事例を示す。なお、本シミュレーションは室内環境の評価に特化しているため、CFDソフトのみを用いた。

縦14.4m×横7.2m×高さ2.7mの空間に対し、室内機を1台設置している一般的な天井隠蔽型の空調(従来型)と、同じく室内機を1台設置し、約25.7m²ごとにセル単位を設定したセル型の空調(セル型)を比較する。

夏期の昼間を想定しており、南西の日射負荷が大きい条件とした。吹出口は8つあり、セル型はセルごと2つの吹出口がある。風量や風向、給気温度などのシミュレーション条件を表2に示す。

図22にシミュレーションにより得られた床上高さ1.1mの温度分布を示す。従来型は南西に熱が残ってしまい、29℃程度となっている一方で、北東は24℃以下に冷えており、大きな温度分布がついていることが分かる。一方、セル型

は南西と北東の温度分布の差は小さく、部屋全体がほぼ24℃～27℃に収まっていることが分かる。

このようにセル型空調は、総風量や給気温度は従来と同じでも、空調操作できるゾーンを細かくしたことで、部屋の負荷偏在にあわせてきめ細かい空調が可能となる、部屋全体を均一な環境にすることができる。

表 2 シミュレーションの吹出口条

	従来型	セル型
給気温度	℃	16.0
給気風量合計	m ³ /h	2100.0
吹出口風量	m ³ /h	262.4
吹出口風向	—	水平
		北東：143.0 北西：262.4 南東：262.4 南西：379.9
		北東：水平 北西：水平 南東：水平 南西：斜め

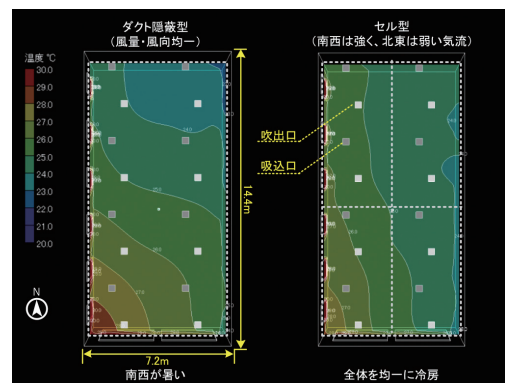


図 22 従来型とセル型の室内環境比較

6.3 エコモードとその検証

セル型空調システムには、当社がセントラル空調の制御技術で培った省エネ制御技術も適用している。その1つがエコモード運転である。利用者は、設定器でエコモードを選択するだけで簡単に快適性を損なわれにくい省エネルギー運転に切り替えることができる。温熱実験室(図10)のセル型空調システム実機にて、エコモードを稼働させ検証・比較を行った。通常モードでは、26℃一定とし、エコモードでは26～28℃設定が周期的に変動してゆく。設定値を周期的に変動させることからゆらぎ制御とも呼んでいる。

エコモードでは、外気温度が室内より高い夏期に、温度設定値を周期的に上下させながら設定値を緩和する独自の省エネ運転を行う。図23に示すとおり、設定値の上下に伴い室内温度も上下する。このときの電力消費の状況が図24である。この図より、大部分の時間帯においてエコモードのほうが通常モードよりも低消費であることが分かる。

一部の時間帯(設定値を下げて1:00～1:30)には、エコモードの電力消費が高くなったが、2時間30分間の電力消費量は、エコモードのほうが約9%省エネルギーであった。

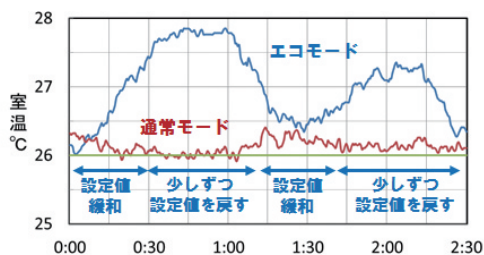


図 23 室内温度の推移

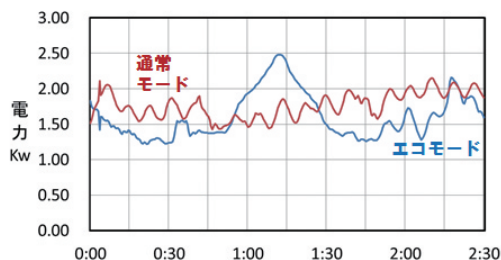


図 24 電力消費の推移

<商標>

- ・ FlowDesignerは株式会社アドバンスドナレッジ研究所の商標です。
- ・ MATLAB及びSimulinkはThe MathWorks, Inc.の商標です。
- ・ ネクスフォートは、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|---|
| 三枝 隆晴 | ビルシステムカンパニー
開発本部開発2部 |
| 羽場 照芳 | ビルシステムカンパニー
開発本部開発2部 |
| 伊藤 卓 | ビルシステムカンパニー
開発本部開発3部 |
| 長尾 泰司 | ビルシステムカンパニー
セキュリティワークスペース本部
ワークスペースソリューション部 |

7. 謝辞

冷凍サイクル制御やシミュレーション技術に関して、早稲田大学基幹理工学部齋藤潔教授に多大なご支援・指導を頂きましたので、御礼を申し上げます。なお、本開発に活用した冷凍サイクルシミュレータ「Energy Flow+M」は、齋藤研究室で研究開発されたものです。

8. おわりに

新たな製品として中小規模オフィスビルの空調ニーズに応えるべく、セル型空調システムを開発した。

空調ゾーンをより細分化し、専用の設定器で温冷感を設定するという機能を提供し、「きめ細かな気流制御」や「気兼ねなく操作しやすい設定」を実現した。

一方で、ダクト施工や天井意匠に関しては、サイズや形状など様々な要求が予想される。また、近年のIoT技術の進歩に伴い、新たな操作端末や通信方式の利用要望も想定される。想定される将来の顧客ニーズに対応するために、さらなる技術開発を進め、将来に新たな製品ラインアップを拡充することも計画している。

<参考文献>

- (1)野部達夫:次世代空調特論「ヒューマンファクターの可能性」, 東京ガス情報誌「Live Energy 102号」pp12-15 (2013.6)
- (2)齋藤, 大野他, 空間-熱源-制御のマルチフィジックス連成シミュレーションに関する研究 -空気熱源ヒートポンプと連成アルゴリズムの構築-, 2014年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 2014.9
- (3)齋藤, 伊藤, 齋数, 三枝他, 空間-熱源-制御のマルチフィジックス連成シミュレーションに関する研究 -第二報 冷凍サイクル/ダクト空調の連成解析-, 2014年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集