

赤外線アレイセンサシステム

人を中心としたスマートビルディング実現の基盤技術

An infrared array sensor system:

Basic technology for achieving human-centered smart buildings

本田 光弘
Mitsuhiro Honda

長嶋 聖
Sei Nagashima

青山 章一郎
Shoichiro Aoyama

キーワード

赤外線アレイセンサ, 人検知, 空調制御, 省エネルギー, スマートビルディング

アズビル株式会社では、空調制御用に開発された赤外線アレイセンサと、その計測データを集約する装置で構成される赤外線アレイセンサシステムの販売を開始した。赤外線アレイセンサシステムは、これまでにない独創的な製品であり、壁や柱に設置された室温センサを用いず、赤外線アレイセンサで得られる広範囲の表面温度を用いてフィードフォワード空調制御を行うことで、快適と省エネルギーに貢献する。また、人検知を行い、その結果を外部出力することで、空調、照明の発停や換気制御等に应用できるスマートビルディング実現の基盤製品として位置づけられる。本稿では、これらの技術を中心に報告する。

Azbil has begun selling an infrared array sensor system that consists of a sensor developed for air-conditioning control and a device that aggregates the data measured by the sensor. This novel product operates without the use of a room temperature sensor installed on a wall or a pillar. It provides comfort and energy efficiency using feed-forward air-conditioning control based on a wide range of surface temperatures obtained by the infrared array sensor. In addition, by detecting human presence and outputting its results, it is a basic product for achieving smart buildings. It can be applied to air conditioning, lighting control, ventilation control, etc. In this paper we report mainly on the technological aspects of the product.

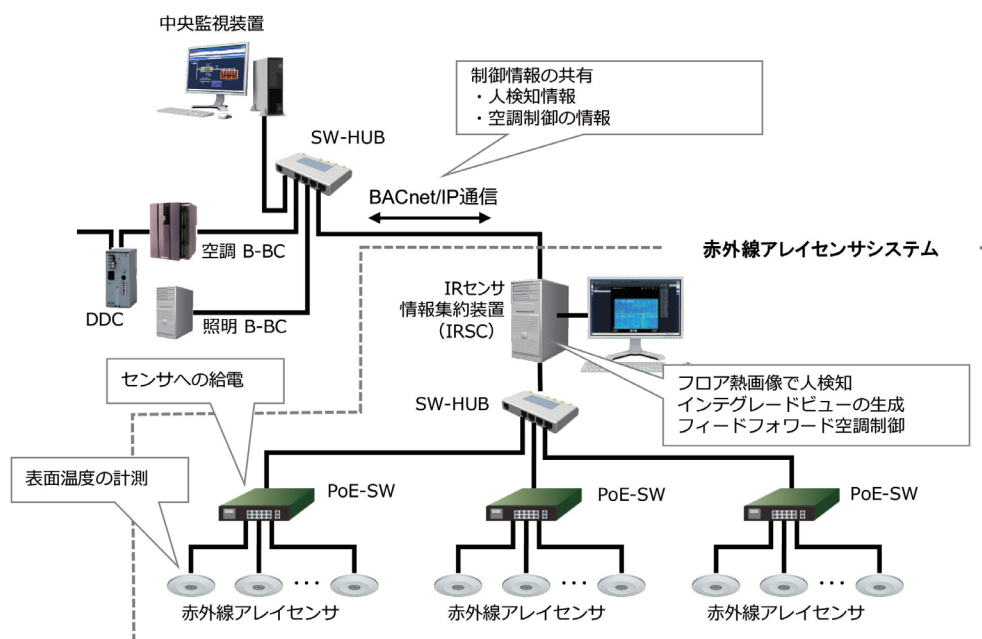
1. はじめに

ビルディングオートメーション（以下、BA）市場において、azbilグループの企業理念である「人を中心としたオートメーション」の下、2015年の国連サミットで採択されたSDGs（持続可能な開発目標）の快適と省エネルギーに貢献するため、当社では、スマートビルディング実現の基盤となる「赤外線アレイセンサシステム」の販売を2019年11月より開始した。赤外線アレイセンサシステムは、建物の室温に大きな影響を与える壁、床、天井などの表面温度を分かりやすく表示することで、熱だまりの発見など空調の管理に新たな気づきを与える。また赤外線アレイセンサの性能に合わせた独自の人検知技術を開発し、これにより人の有無による空調や照明の発停、人数に応じた換気制御などに応用できる。また従来の壁や柱に設置された1点で計測した温度ではなく、広範囲の面で計測された温度を使うことで、即座に給気温度と給気風量を決定し、省エネルギーを達成する空調制御技術を開発した。

2. システム構成

赤外線アレイセンサシステムのシステム構成を図1に示す。赤外線アレイセンサは、建物の室内に設置され、床や天井、壁の表面温度を計測する。赤外線アレイセンサは、PoE（Power over Ethernet）を採用しており、LANケーブルを経由してデータ通信と同時に電力を供給することができるため、施工の手間を軽減できる。

IR（Infrared Ray）センサ情報集約装置（以下、情報集約装置）は、監視室や盤の中に設置され、赤外線アレイセンサおよびBACnet通信対応のシステムとネットワークで接続される。情報集約装置は、赤外線アレイセンサで計測した表面温度から、人検知や空調制御に利用する情報を算出する。これらの処理結果を、BACnet通信を介して当社savic-net™ FX, savic-net G5 やBACnet対応の他社機器へ提供し、BAシステムとしてより高度な空調制御や照明制御を実現する。



3. 赤外線アレイセンサ

物体は表面温度に応じた赤外線を放出しており、赤外線アレイセンサは、その赤外線を検出することで熱画像を取得する。他社の赤外線アレイセンサ、サーモグラフィカメラ^{注1}の中には、計測温度精度を高めるためにシャッター機構を備えるものがあるが、計測が中断することや、メカニカルな構造のため寿命が短いという欠点がある。本製品は、空調用途に性能を限定することで、シャッターレスで高寿命を達成しながら、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の優れた計測温度精度を実現している^{注2}。また、多くの建物に対応できるように7つの豊富なラインナップをもっている。それぞれのセンサが共通したデザインコンセプトをもち、建物の環境に溶け込むことが評価され、2019年度グッドデザイン賞を受賞した。

3.1 オフィス用途

形 TY2000*は、オフィス用に設計された小型の赤外線アレイセンサで、次の3つのラインナップによって、床、壁、天井の表面温度を測定することができる。

3.1.1 形 TY2000A1000 天井設置・角度固定タイプ

形 TY2000A1000は、図2のように天井に設置し、床の表面温度を測定するためのセンサで、熱画像を情報集約装置に送り解析することで人の検知も可能となる。



図2 形 TY2000A1000の外観

3.1.2 形 TY2000A2000 天井設置・角度調整タイプ

形 TY2000A2000は、図3のように天井に設置し、壁の表面温度を測定するためのセンサで、レンズの向きを調整する機構を備えている。



図3 形 TY2000A2000の外観

3.1.3 形 TY2000A3000 壁設置・角度調整タイプ

形 TY2000A3000は、図4のように壁に設置し、天井の表面温度を測定するためのセンサで、形 TY2000A2000と同様、レンズの向きを調整する機構を備えている。こちらのタイプは、執務者が触れられる場所にあるため、取付け時に内側から向きを変えられないようにするロック機構も備えている。



図4 形 TY2000A3000の外観

注1 赤外線アレイセンサとサーモグラフィカメラは同じ原理であるが、カメラほど高解像度ではないために区別している。

注2 条件によって異なる。TY2000*で測定対象物 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$ かつセンサ周囲温度 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$ の全画素平均値で、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の計測精度となる。

3.2 高天井用途

形 TY2001*は、展示会場など天井が高い室内用に設計された赤外線アレイセンサで、次の4つのラインナップによって、床、壁、天井の表面温度を測定することができる。

3.2.1 形 TY2001C2000 形 TY2001B2000

天井設置・角度調整タイプ

形 TY2001C2000は、図5のように天井に設置し、床の表面温度を計測するためのセンサである。レンズの角度を調整し、壁の表面温度を測定することもできる。また、レンズがより広角の形 TY2001B2000もあり、天井高によって使い分けて使用する。



図5 形 TY2001B2000の外観

3.2.2 形 TY2001C4000 形 TY2001B4000 雲台タイプ

形 TY2001C4000は、図6のように雲台に取り付けて、壁や天井の表面温度を計測するためのセンサである。形 TY2001C2000、形 TY2001B2000が天井に埋め込まない場合は、キャットウォークなどに取り付け、床の表面温度を測定することもできる。このタイプもレンズがより広角の形 TY2001B4000がある。

また、形 TY2001*は、18mまでの高さに設置して使用するため、背面のワイヤホールに落下防止ワイヤを取り付けられるようになっており、安全性にも考慮している。



図6 形 TY2001B4000の外観

4. 情報集約装置 形 BH-311J0W0000

情報集約装置は、赤外線アレイセンサで計測した熱画像を取得し、それらを合成して1枚のフロア熱画像を作成する。フロア熱画像に対して、任意の矩形で設定されたエリアの平均表面温度や推定人数などを算出し、画面上で確認したり(図7)、BACnetのポイントとして外部機器へ提供したりできる。VAV (Variable Air Volume)や照明の系統に従ってエリアを決めることで、フロアを任意の矩形で区切った空調制御や照明制御が実現できる。

他社の類似製品の中には、計測した表面温度に対する

各種のデータ処理をセンサ側に埋め込み、その結果だけを外部に出力するものがあるが、複数センサにまたがるデータ処理が難しいなどの課題がある。一方、情報集約装置では、個々の赤外線アレイセンサから取得した熱画像を1枚のフロア熱画像に合成した上で処理するため、センサごとの熱画像に情報がまたがる場合にも、問題なく処理が可能となる。

以降では、情報集約装置の主要機能である、インテグレートドビュー機能(5章)とフィードフォワード空調制御(6章)について説明する。

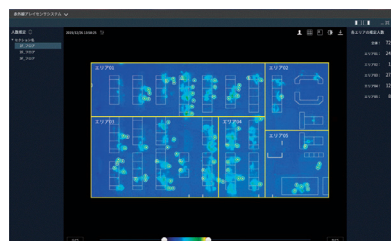


図7 情報集約装置の画面

5. インテグレートドビュー機能

建物のレイアウトに、フロア熱画像、エリア情報、人検知結果を重ね合わせて表示することができ(図8)、室内の表面温度状況や人が移動している／集まっていることなどを直感的に把握することができる。この表示をインテグレートドビューと呼ぶ。1つの情報集約装置で最大で約2,000m²のインテグレートドビューを作ることができる。フロアの分割にも対応しており、最大で10個のフロアに分けて管理ができる。

以下で、インテグレートドビュー機能の主なサブ機能について説明する。

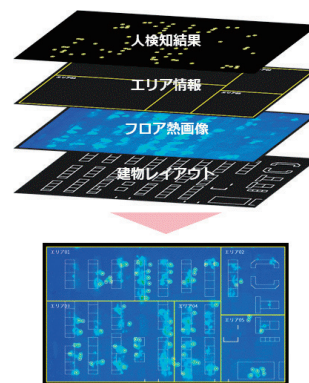


図8 インテグレートドビュー

5.1 熱画像合成機能

インテグレートドビューで表示するフロア全体の熱画像を取得する方法について説明する。図9のように、数十mの奥行があるフロアにおいて、高画素のサーモビューワ1台で真上から床や人などがすべて映るよう撮影することは、天井の高さが3m程度のオフィスでは不可能である。また、図10のようにサーモビューワを隅に設置して斜めから床を撮影し、台形補正など画像処理を行う方法が考えられるが、人

がPCのモニター等に隠れてしまう可能性が高まり、また、材質にもよるが、床との入射角が 50° を超えると赤外線が反射するため、正しい温度計測がほとんど行えなくなる。

結局、真上から視野角 100° 以内のレンズを使用することが望ましく、本製品は、図11のように低画素の赤外線アレイセンサを天井に敷き詰め、それらの出力画像を合成することで、この問題を解決している。これにより、あたかも遙か上空から高解像度のサーモビューワで撮影するような1枚のフロア熱画像をリアルタイムに表示している(図12)。

なお、熱画像の合成に必要な情報は、センサの種類と設置位置のみであり、簡便なエンジニアリングを実現している。

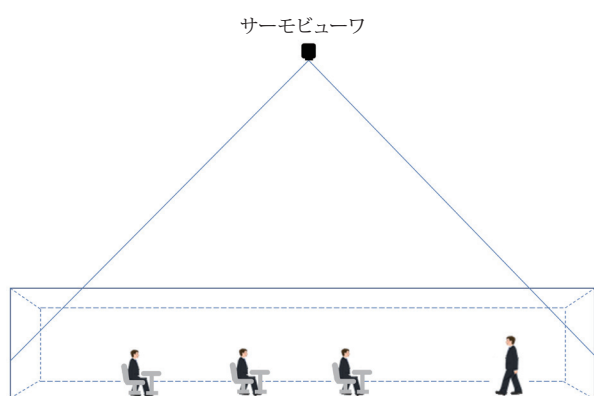


図9 高画素サーモビューワによる真上からの測定

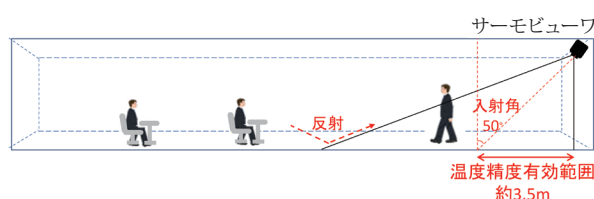


図10 高画素サーモビューワに斜めからの測定



図11 多数の低画素センサによる真上からの測定

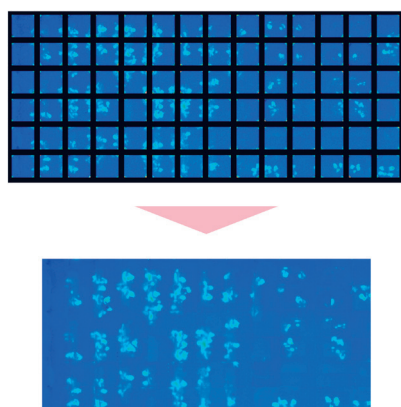


図12 温度データの合成

5.2 人検知機能

人検知機能は、合成されたフロア熱画像を入力とし、床との温度差があり、一定の大きさで移動する(完全に静止している物体と区別がつく)などの条件を満たした発熱体を人として検知する。オフィスで普及している焦電型の人検知センサは、赤外線の変化しか検出できないため静止した人を検知できないが、本製品では、人や床の温度を計測し続けるため、床との温度差などの情報から静止した人でも検知し続けることが可能である。1台の情報集約装置で最大約 $2,000\text{m}^2$ のフロアの人検知をリアルタイムで行える。

インテグレートドビューでは、人と検知された発熱体に丸がついて表示される(図8)。他社の多くの人感センサでは、2つのセンサの境界に人がいる(図13(a))と、両方のセンサで映った人(図13(b))を検知してしまい、ダブルカウントする可能性が高い。これに対し、本製品では、フロア熱画像を生成してから人を検知する。隣り合うセンサ同士で重複する部分を考慮して合成することでダブルカウントを低減している(図13(c))。また、他社の多くの人感センサは数m単位で人の位置を出力するのに対して、本製品は数cm単位で人の位置を出力することが可能である。

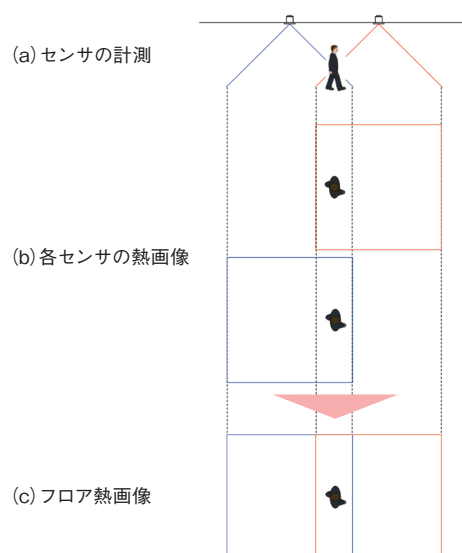


図13 熱画像の合成によるダブルカウントの低減

5.3 その他の機能

情報集約装置では、これまで紹介した機能に利用するデータを10分間隔で最大で1年間蓄積することができる。また、外部機器の警報情報と連動する機能を持ち合わせており、警報を検知した前後10分間だけ10秒間隔とより細かい単位で床面温度を蓄積することができる。これらのデータはインテグレートドビューを利用して閲覧する。

居住スペースの温熱環境の分析では、従来までは特定のエリアを代表する温度のみしか取得できなかったのに対して、フロア全体の床面温度を利用可能となる。例えば、オフィス環境のエネルギー削減を目的として、PCやPCのモニターなどの発熱機器の切り忘れの確認および是正への応用が考えられる。また、警報情報と連動した蓄積データを利用して、異常発生時の状況把握に役立てることができる。

6. フィードフォワード空調制御機能

最初にフィードフォワード空調制御の一般的な概念とそのメリットについて説明する。次に本製品の概念の実現方法と動作検証の結果を説明する。

6.1 室内モデルと表面温度の重要性

室内の温度(室温)は、空調による「給気」と天井、床、壁、人やOA機器などの「表面温度」から予測することができる(図14)。この室温を予測する計算式を「室内モデル」と呼ぶ。なお、給気は、給気温度と給気風量の2つを意味する。

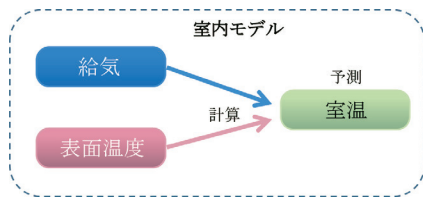


図14 室内モデルの概念

表面温度は、室温を決めるための極めて重要な要素である。空調の熱負荷の多く(貫流熱、内部発熱、日射熱、蓄熱)は、表面温度に反映される。給気が行われない状態では、室温は表面温度からのみ決まり、室温と表面温度が平衡状態になり等しくなる(図15)。

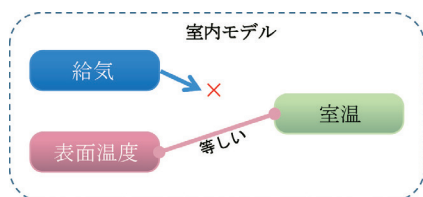


図15 室内モデル (給気がない状態)

通常、表面温度は計測していないため、給気だけでは室温を計算することはできない(図16)。

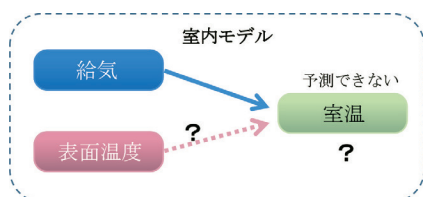


図16 室内モデル (表面温度がわからない状態)

同じ給気であっても、日によって室温に違いが生じる。ある日、給気を16℃にして室温が26℃になっても、違う日には28℃になるかもしれない。これは表面温度の違いと考えられる。空調を停止した連休明けに空調が効きにくいのは、建物全体が蓄熱して表面温度が普段と異なるためである。

6.2 フィードバック制御

室温を設定温度にするための従来の制御を考える。表面温度が分からないため、代わりにセンサで室温を計測する(図17)。これにより給気を変化させ、室温がどうなるか観測し調整すれば、設定温度に近づけられることは明らか

である。このように現実の制御対象を使って繰り返し給気を自動で調節する方法をフィードバック制御という。

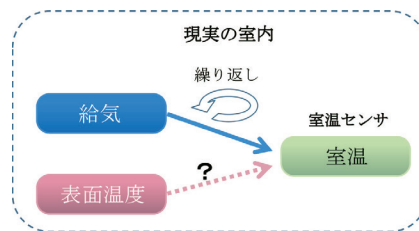


図17 フィードバック制御

6.3 フィードフォワード制御

本製品では、室温センサを使用せず、代わりに赤外線アレイセンサで表面温度を計測する。これにより、室内モデルで、給気によって室温がどうなるか予測できるようになり(図18)、最終的に、現実の室内を使うことなく、室温を設定温度にするための給気を求めることができる。具体的には、モデルの数式の逆関数を求めることや、逆関数が求められない場合は、給気のパターンを入れて、室温に近い解を選択することなどが考えられる。現実の制御対象を使わず、数式の室内モデルを使って給気を求める方法をフィードフォワード制御という。

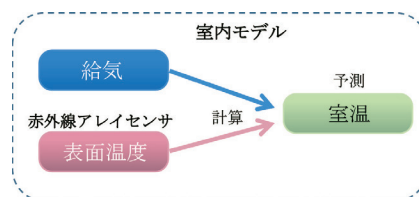


図18 フィードフォワード制御

6.4 メリット

フィードフォワード制御で空調する場合、大きく3つのメリットがある。1つ目のメリットは、給気温度と給気風量を現実の制御対象は使わず、瞬時に決定できることである。これにより無駄が生じず省エネルギーを達成できる。2つ目は、室内の発熱体の変化に対する制御の応答の良さである。例えば、人がPCを起動すれば、赤外線アレイセンサであれば、その熱を即座に計測することができる。一方で壁や天井に設置された室温センサでは、熱が伝わるまで時間がかかってしまう。最後は、2つ目とも関連するが、室温センサは壁や天井に設置されるため、その付近の局所的な発熱体、例えば複写機等の影響を受け、執務者付近の温度と差が生じ、制御に悪影響を与える場合がある。赤外線アレイセンサは広範囲の表面温度を計測するため、予測された室温は、執務者付近の温度に、より近くなる。

6.5 最適化問題

室温を設定温度にコントロールする給気温度と給気風量の組み合わせは複数存在する。組み合わせの中で最も省エネルギーとなるものを選択することは、最適化問題としてとらえることができる。さらに、例えば、室温が設定温度と等しい状態を快適、そこから外れていくことを不快とし、快適性も最大化することを加えた多目的最適化問題として扱

張できる⁽¹⁾。これによりわずかな快適性の向上に大きなエネルギーを使用しないようにするなど様々な視点での制御が可能となる。

6.6 製品への実現方法

ここまで一般的な概念を述べてきた室内モデルと最適化について、製品での具体的な実現方法を述べる。

室内モデルを表現する数式は、1種類ではなく、様々なものが考えられる。本製品に実装されている室内モデルは、表面温度や給気の熱がVAVゾーン単位で一瞬に混合するとみなす集中定数系モデルを採用している。

最適化に関しては、給気風量を下げることが省エネルギーになることが知られているため、設定温度に到達できる給気温度と給気風量の組み合わせの中から、給気風量を最も下げられる給気温度を求めるアルゴリズムを採用している。

6.7 製品動作検証

空調実験室(15m×8m×3m)に赤外線アレイセンサ20台を設置し、室温30℃付近から26℃になるように本製品を用いて空調し、給気風量を最も下げる給気温度との組み合わせとなっているか確認した。

図19は、赤外線アレイセンサで床、天井、壁の表面温度を計測し、その平均の時間変化を示したものである。また、執務者付近ではないため参考ではあるが、壁に設置した室温センサによる室温の変化も示す。空調が行われることによって、徐々に表面温度と室温が26℃に近づいていくのが分かる。図20は要求風量、図21は給気温度設定を示している。省エネルギーになるよう空調開始の瞬間から給気風量が最小にする給気温度(この場合、最低の15℃)が分かるのがフィードフォワード制御の特長である。最初は、表面温度が高いため、風量も多く要求されているが、表面温度が給気によって徐々に下がっていくと、それに合わせて給気温度を維持しながら要求風量が先に下がってバランスをとる。さらに表面温度が低下して、要求風量が最低風量の1,200m³/hに達し、これ以上下げられなくなると、今度は給気温度設定を上げて、給気の熱量のバランスを保っていくことが分かる。

以上により、給気風量を下げる狙いどおりの空調になっていることが確認できた。また、省エネ効果は、検証の条件によって異なるものの、今回は、図22のようにフィードバック制御に比べて、空気搬送エネルギーを30%以上削減できた。

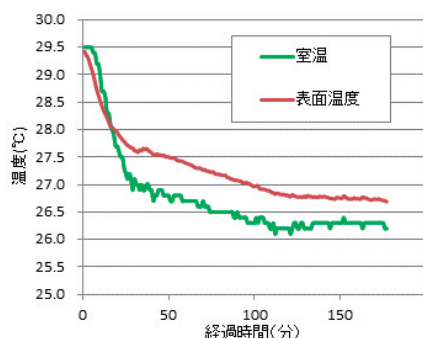


図19 平均表面温度と室温

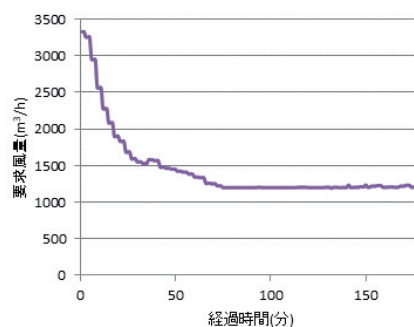


図20 要求風量

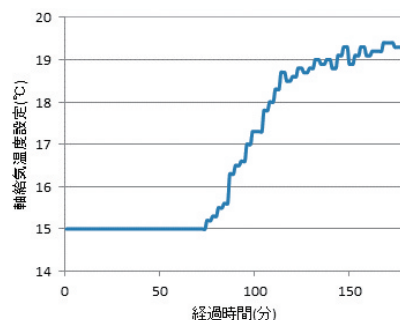


図21 給気温度設定

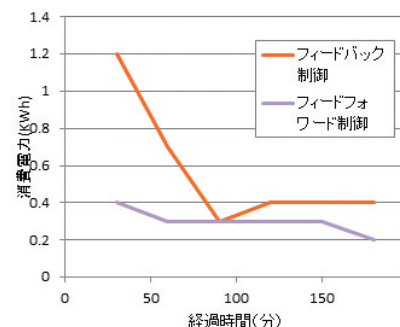


図22 消費電力

7. 今後の展開

本製品の空調制御は、オフィス向けに開発されたものであるため、採用している集中定数系の室内モデルでは、適用できない建物がある。具体的には室内の平均温度と制御したい付近の温度(例えば床から1mの高さの温度)が著しく異なる場合、適応は困難である。オフィスのような空間であれば通常、問題にはならないが、展示会場のような大空間の空調制御への適用は難しくなる。この問題に関しては、他の空間の温度分布を予測できるモデルを用意して選択可能とすることが考えられる。現在、最も計算量が少ないと考えられる集中定数系モデルに対して、空間分布を扱える最も計算量が多い室内モデルがCFD (Computational Fluid Dynamics:数値流体力学) モデルである。複雑なモデルを使用すると、給気の解を求める方法も複雑になり、リアルタイムの空調制御に利用することは現実的でない⁽²⁾。また、CFDモデルが現実と一致しないことも多い。

そこで計算量が比較的少なく、空間の温度分布の推定が可能な中間的な室内モデルを開発し、選択可能とする。そして現場で調整、あるいは学習することでモデルを完成

し制御に使用できるようにする。また、空間の温度分布を予測できることからインテグレートドビューの3D化も行っていきたい。

8. おわりに

製品リリースして間もない赤外線アレイセンサシステムを紹介した。赤外線アレイセンサシステムは、業界をリードする革新的な製品であり、さらなるセンサの高精度化、システムの高機能化によって発展していくことが可能である。今後も「人を中心としたオートメーション」の企業理念に基づき、これまでにないユーザーエクスペリエンスを提供し、スマートビルディングを実現する基盤製品の開発を行っていききたい。

<参考文献>

- (1) 本田光弘, 斎数由香子, 総田長生, 商用ビル向け空調制御への多目的最適化手法の適用, 機械学会最適化シンポジウム講演論文集, 2012.12
- (2) K.Koga, S.Lee, M.Honda, C.Kaseda, A Study of Optimizing Control Methods Using CFD for HVAC System, FLUCOME, 2013.11,
- (3) 太宰龍太, 本田光弘, 松山依乃理, 原山和也, 田村富士雄, 赤外線アレイセンサを用いたオンデマンド環境(空調・照明)制御システムの研究と開発(第1報) サーモパイルアレイセンサの特徴と実験環境の構築・測定, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2016.9
- (4) 松山依乃理, 本田光弘, 海老原克司, 古賀圭, 宇野侑希, データセンタの温熱環境を監視する赤外線画像システムの開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2016.9

<商標>

savic-netは、アズビル株式会社の商標です。
BACnetは、ASHRAEの商標です。
Ethernetは、富士ゼロックス株式会社の商標です。

<著者所属>

本田 光弘 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発2部
長嶋 聖 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発2部
青山 章一郎 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発2部