

# azbil

アズビル株式会社

2012年4月1日、株式会社 山武はアズビル株式会社へ社名を変更しました。

〒100-6419

東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル

<http://www.azbil.com/jp/>



azbilグループは環境に配慮した取組みを推進しています。

azbil Technical Review

2019年4月発行号

# azbil

# Technical Review

2019年4月発行号

azbilグループ技術研究報告書 azbilテクニカルレビュー

特集：「人を中心とした」の発想に基づく快適性の追求

## 表紙について

厳冬期に堆積された伏流水の「流れ」

# 白川氷柱群

長野県の南西部、岐阜県と接する木曾町。町の西側には標高 3067m の木曾御嶽山、東側には中央アルプスの駒ヶ岳がそびえます。総面積の 90% を森林が占める木曾町は、豊かな自然にあふれています。そのため、四季折々に魅力のある名所が、たくさんの人たちを楽しませてくれます。

名所の 1 つに、木曾町の北西部に位置する三岳地区で見られる白川氷柱群があります。三岳地区には、木曾川水系の一級河川である西野川が流れています。厳冬期になると、この西野川の西側に当たる崖に、天然の氷柱が現れます。毎年年末の頃から、崖の岩肌白い牙のような氷柱ができ始め、寒さが増すごとに太く長く成長していきます。

氷柱群のピークとなる 1 月末から 2 月の初め頃には、崖の岩肌が一面凍りつき、美しい氷のカーテンのような神秘的な姿になります。しかも、西野川沿いに 250 m もの長さになたって現れるのです。さらに寒さが厳しい年には、50m ほどの高さにも成長することも。氷柱が織りなす美しい景観を眺めに、毎年たくさんの写真家や観光客が訪れます。

なぜ、氷柱が三岳地区の崖一面にできるのでしょうか。その秘密は崖の内側にありました。この崖には、1 年を通して御嶽山からの伏流水が染み出しています。伏流水とは、地表から染み込んで、地下を流れる水のこと。御嶽山から流れてきた伏流水は、三岳地区の崖から地表に現れ、西野川に流れ込んでいるのです。

三岳地区の崖から西野川に注ぎ込む伏流水の流れは、それほど速いものではありません。そのため、春から秋までの期間は、注意深く観察しないと、崖から水が染み出ていることに気がつかないかもしれません。

しかし、気温が大きく下がる厳冬期になると、崖から染み出した伏流水が氷になることで、水の動きが止められ、崖の岩肌に留まります。つまり、厳しい寒さによって、伏流水の流れが堆積された結果として、壮大で美しい氷柱群が姿を現すのです。

ふだんは気に留まらないほどの小さな流れでも、それが積み重なることにより、大きな変化となって出現する——。白川氷柱群の雄大な姿は、小さなことの継続によって、大きな力が生まれることを私たちに教えてくれているようです。

画像提供：(一社) 木曾おんたけ観光局

長野県木曾郡木曾町三岳、小坂温泉げやきの湯付近で見られる白川氷柱群



白川氷柱群へのアクセスは、JR 中央本線木曾福島駅からタクシーで 30 分、伊那 IC から車で 48km、中津川 IC から 69km。

表紙では、自然界のダイナミックな「流れ」を取り上げ、シリーズでお伝えしてまいります。

# Contents

## 巻頭言：革新的技術への社会の適応 ..... 1

工学院大学教授  
一般社団法人建築設備技術者協会会長  
野部 達夫

## 特集に寄せて：ビルに新たな付加価値をもたらす空調制御を考える ..... 2

アズビル株式会社 取締役執行役員常務  
ビルシステムカンパニー社長  
濱田 和康

### 特集論文

#### 快適 快適空間制御を実現するための3次元温熱環境可視化システムの開発 ..... 3

アズビル株式会社 技術開発本部 齋数 由香子  
アズビル株式会社 AIソリューション推進部 近田 智洋  
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 原山 和也

#### 快適 居住者の温冷感情報を活用する新しい快適性評価技術の開発 一個別単位の環境満足度を評価する ..... 9

アズビル株式会社 技術開発本部 三浦 真由美 上田 悠  
アズビル株式会社 AIソリューション推進部 宇野 侑希  
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 太宰 龍太

#### 快適 高度なエネルギー管理と快適な空間を提供するsavic-net™ G5システムの 統合コントローラ ..... 17

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 深浦 敦

#### 調和 建物ライフサイクルを支えるsavic-net™ G5システムのリモートコントローラ ..... 22

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 古山 香子 石井 直樹

#### 調和 高付加価値を提供するsavic-net™ G5システムの熱源アドバンストコントローラ ..... 26

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 久保田 秀雄 関根 秀太

#### 自在 大口径流量計測制御機能付きバルブの流量計測精度向上技術 ..... 32

アズビル株式会社 バルブ商品開発部 新谷 知紀 松村 剛宏 野間口 謙雄

#### 快適 全館空調VAVシステム用集中リモコンの開発 ..... 38

アズビル株式会社 技術開発本部 羽場 照芳 田中 裕造 奈良 千尋

#### 快適 放電音を防止した電子式エアクリーナの開発 ..... 44

アズビル株式会社 技術開発本部 石川 尚弘 井口 俊丸

### 一般論文

#### 自在 微小液体流量の計測を可能にする熱式液体微小流量計の開発 ..... 48

アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー 小田 康彦

#### 進化 組立作業ミスの予測・通知技術の開発 ..... 53

アズビル株式会社 AIソリューション推進部 近藤 政紀  
アズビル株式会社 ITソリューション本部 北條 達也

5つの戦略技術領域 azbil グループは事業を取巻く環境変化に対応し普遍的な価値を提供すべく、5つの戦略技術領域を定め研究・開発を進めています。

融合 = 人間・機械融合システム技術 進化 = わかる化プロセス情報技術 快適 = 快適空間計測制御技術

自在 = 自在計測制御技術 調和 = 環境調和計測制御技術

**Preface : Society's Adaptation to Revolutionary Technology** ..... 1  
 Professor of Kogakuin University, President of JABMEE Tatsuo Nobe

**Introduction to the Special Issue: An Air Conditioning Control that Adds Value to Building** ... 2  
 Executive Director, Managing Executive Officer, President of Building Systems Company, Azbill Corporation Kazuyasu Hamada

## Articles on Special Issue

**High-Quality Living Space** **A New 3D Thermal Environment Visualization System for Improved Air Conditioning Comfort** ..... 3  
 Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Yukako Saisu  
 AI Solution Department, Azbil Corporation Tomohiro Konda  
 Building Systems Company, Azbil Corporation Kazuya Harayama

**High-Quality Living Space** **Thermal Comfort Evaluation Focused on Occupants' Thermal Preferences: A Thermal Satisfaction Model for a Small Group of Occupants** ..... 9  
 Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Mayumi Miurai Haruka Ueda  
 AI Solution Department, Azbil Corporation Yuki Uno  
 Building Systems Company, Azbil Corporation Ryota Dazai

**High-Quality Living Space** **The savic-net G5 Supervisory Controller for Advanced Energy Management and Comfortable Indoor Spaces** ..... 17  
 Building Systems Company, Azbil Corporation Tsutomu Fukaura

**Harmony with the Environment** **Technical Features of the Newly Developed General Controller and Compact Remote I/O Module for the savic-net G5 Building Management System** ..... 22  
 Building Systems Company, Azbil Corporation Kyoko Furuyama Naoki Ishii

**Harmony with the Environment** **A New Advanced Controller for Building HVAC Central Plants that Provides High Added Value** ... 26  
 Building Systems Company, Azbil Corporation Hideo Kubota Hidetaka Sekine

**Freedom of Time and Place** **Technology for Improving the Accuracy of Flow-Rate Measurement by Large-Bore Valves** ... 32  
 Valve Production Development Department, Azbil Corporation Tomonori Shintani Takahiro Matsumura Yoshio Nomaguchi

**High-Quality Living Space** **A Central Remote Control for Home Central Air-Conditioning VAV Systems** ..... 38  
 Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Teruyoshi Haba Yuzo Tanaka Chihiro Nara

**High-Quality Living Space** **Prevention of Electrical Discharge Noise from Electric Air Cleaners** ..... 44  
 Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Naohiro Ishikawa Toshimaru Iguchi

## Articles on Other Subjects

**Freedom of Time and Place** **Technology and Features of a Thermal Flowmeter for Liquid Microflows** ..... 48  
 Advanced Automation Company, Azbil Corporation Yasuhiko Oda

**Evolution through IT** **Prediction and Alert Technology for Human Error in Assembly Work** ..... 53  
 AI Solution Department, Azbil Corporation Masanori Kondo  
 IT Solutions Headquarters, Azbil Corporation Tatsuya Hojo

**Five Strategic Technology Areas** In response to changes in the business environment, the azbil Group will focus its research and development on five strategic technology areas that have been identified as having the potential for far-reaching value.

- Biomimetic Production** = Machine Systems with Humanlike Abilities
- Evolution through IT** = Advanced Technology that Clarifies Complex Systems
- High-Quality Living Space** = Individualized Environmental Comfort Systems
- Freedom of Time and Place** = Flexible Measurement and Control
- Harmony with the Environment** = Systems Enabling Us to Live in Harmony with Nature

## 革新的技術への社会の適応



野部 達夫  
Tatsuo Nobe

(工学院大学教授, 一般社団法人建築設備技術者協会会長)  
 Professor of Kogakuin University, President of JABMEE

現在は革新的な情報通信技術によって社会のパラダイムが大きく変わる変曲点なのかもしれない。この巻頭言ではそのような変化の渦中において、革新的技術と社会の適応について考察してみる。

先般、東京の国立科学博物館で「日本を変えた千の技術展」という興味深い特別展が開催された。幕末以降の西欧の科学技術の受容および発展の様子を多くの実物展示によって概観するものだった。一般の通念では封建制度の暗黒時代は幕末以降の西欧文化の怒濤によって一変したところだろうが、展示の冒頭で幕末の寺子屋(関東では手習師匠)では既に「窮理」を庶民の子弟に教えていたことが示されていた。窮理とは当時の科学技術を支えた物理学や天文学などを指すが、塚原洪柿園という文学者が残した著書によると、安政年間には既に天体の運動については子供でも知っており、黒船にもさして動転しなかったという。塚原の言葉によると、これは文禄期以来の旺盛な日本語への翻訳意欲と木版による出版技術という下地があったため、一般庶民まで読み書き算盤ができるという厚い文化的中間層が出現していた。このような布石があったために、幕末からの急激な新知識の奔流にも日本の社会は何とか対応できたのではないかと考える。

このようなパラダイムシフトへの適応は、皇国史観から米国民民主主義へと体制が一変した昭和にも見ることができる。正史に現れる価値観は従来とは正反対になったものの、多くの個人にとっては戦前と戦後は決して不連続ではなかったことが様々な記録に描かれている。風土が人を作り人が社会を作るという関係性を考えれば、納得できる。

「技術」という言葉への省察が度々必要になるとハイデッガーは言う。しかし同時に、危機を訴える叫びは次第に沈黙しがちになると言う。ロンドンの科学博物館には、かつてキボキアン氏が製作した自殺補助機「タナトロン」の展示がある。これは殺人か自殺かという法的に大きな差異をテクノロジーによって曖昧にする装置だが、観覧する老若男女は衝撃を受けながらも科学技術の派生形を目の当たりにし、深く考える風情である。再びハイデッガーの箴言であるが、技術を中立なものとするとき我々は盲目的になると。多くの人は、とりわけ技術者は、テクノロジーは明るい未来を導く善なるものと認識するが、理想とする社会の大局観とテクノロジーを制御する自制心がなければ、恐ろしい結果を

もたらす。これは人間の感覚を超えた大規模破壊兵器で人類は学習しているはずだが、今回の情報化社会へのパラダイムシフトはそれ以上のインパクトが予想されるものの、理解がおよんでいない。

交通や物流の高速化や都市の高密度化は「程度の問題」であり、社会の順応は不可能ではなかった。ところが、長年DNAに刷り込まれてきた全てが質量や慣性力を持つ世界から、膨大な情報が飛び交い価値観が瞬時に生成されてしまう世界への一足飛びの変化は、全く未経験である。情報化社会への大きなシフトに対して、果たして現代人はそれに適応する下地を持ち合わせているだろうか。幕末と昭和の大きなギャップを乗り越えてきた日本人は、否、今や日本だけでなく一蓮托生の世界の人々においても、今回のシフトを無事に乗り切る素養の構築を真剣に考える必要がある。

我々が望む未来とは何か。それは人生の喜怒哀楽から喜と楽だけを抽出した平板で欺瞞的な社会であろうはずがない。地球環境よりも人間社会の洞察なくして次のパラダイムをかたちづくるテクノロジーの創造はあり得ない。

### 著者紹介:

1983年早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻修士課程修了。清水建設株式会社入社(～2001)。1989年早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻博士課程修了。2001年工学院大学工学部建築学科環境コース助教に就任。2004年同教授。2010年工学院大学建築学部建築学科教授、現在に至る。  
 専門は次世代空調システムの研究開発、空調設計論、技術評論。  
 一般財団法人日本空調冷凍研究所理事長、一般社団法人建築設備技術者協会会長、ほかを歴任。  
 エンジニアリング功労者賞、公益社団法人空気調和・衛生工学会/学会賞技術賞、リニューアブル賞、学会賞論文賞、功績賞、一般社団法人建築設備技術者協会/カーボンニュートラル賞等を受賞。

# 快適空間制御を実現するための 3次元温熱環境可視化システムの開発

A New 3D Thermal Environment Visualization System for Improved Air Conditioning Comfort

アズビル株式会社  
技術開発本部

アズビル株式会社  
AIソリューション推進部

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

齋数 由香子  
Yukako Saisu

近田 智洋  
Tomohiro Konda

原山 和也  
Kazuya Harayama

キーワード  
環境計測データ, CFD 解析, 可視化, 空調制御

従来は、壁や柱に設置されたセンサで室内を均一な温度分布にする空調制御が一般的であったが、近年、オフィスにおける人や発熱機器の偏在化に応じて、積極的に空間温度分布をつけ、快適性と省エネルギー性を両立する空調制御方式が注目されている。しかし、そのような空調制御実現のためには、壁や柱に設置された温度センサでは十分ではなく、室内の詳細な温熱環境を把握することが必要である。そのために室内の温熱環境を3次元的に可視化することにより室内温熱環境の偏在を詳細に把握するための技術とシステムを開発した。

Conventionally uniform air-temperature profiles have been made using sensors installed on a wall or pillar. But recently, there has been interest in air conditioning methods that provide both comfort and energy savings by dealing with the uneven distribution of people and heat-generating equipment. This kind of advanced air conditioning control requires a detailed understanding of the indoor thermal environment which wall- or pillar-mounted sensors cannot provide. As a solution, we have developed a thermal environment visualization technology and a system for profiling the thermal environment of a room in detail.

## 1. はじめに

従来は、室内を均一な温度分布にする空調制御が一般的であった。しかし、近年オフィスの多様化に伴い人や発熱機器などの空調負荷が偏在していることや、経済産業省が定める「エネルギー基本計画」<sup>(1)</sup>のCO<sub>2</sub>削減目標達成のために、オフィスビルにおける消費エネルギーの40%強を占める空調<sup>(2)</sup>においてこれまで以上の省エネルギーが求められていることから、タスク・アンビエント空調やパーソナル空調のように積極的に空間温度分布をつけて快適性と省エネルギー性を両立する空調制御方式が注目されている<sup>(3)</sup>。そのような空調制御を実現するため、室内の詳細な温度分布を

把握することが求められており、3次元空間温熱情報の活用が期待されている。

そこで、筆者らは図1に示すような、多種多様な環境データ計測部と空間温度分布解析部を組み合わせ得られる3次元空間温熱情報を利用した空調制御技術を考案し、実現性の目途を得た。

第2章で、室内の詳細な空間温度分布を把握することを目的として本研究で構築した3次元温熱環境可視化システムについて述べる。第3章では、そのシステムを自社で保有する空調実験室に適用し、モデル構築に関するエンジニアリング負荷低減の可能性および、その時の解析精度について検証した結果を報告する。

## 特集に寄せて

# ビルに新たな付加価値をもたらす空調制御を考える

アズビル株式会社  
取締役執行役員常務  
ビルシステムカンパニー社長

濱田 和康

最新のオフィス用ビルに対して、テナント企業または自社ビルオーナーの要求として、環境負荷低減はもとより、働き方改革や少子化に伴う労働力不足軽減のために、室内居住者のウェルネスや生産性向上に寄与する性能が求められはじめた。

欧米企業の一部では、すでに環境性能の高いビルがテナント入居の必須条件となりつつある。さらに、魅力ある企業の条件の1つとして快適な執務空間への要求が顕在化しつつある。

一方、こうした社会課題を解決するSociety5.0の実現のために、ビッグデータ・IoT・AIという文字が目には留まらない日がないほどに新技術の実装化が進んでいる。

執務空間の現状に目を向けてみよう。

「暑い」「寒い」といった温冷感居住者の生産性向上に大きな影響を与えると推測される。しかし、従来の一般的な空調制御方式では、概ね100~400㎡ごとの制御単位に1つの温度センサが還気口近傍に設置され、その計測値が室内環境を代表しているものとみなされている。10㎡弱ごとに居住者が1名いると想定した場合、1つの温度センサが40人以上が在席している空間の環境を代表していることになる。温冷感が個人で異なるうえに、OA機器の有無、居住者が置かれている状況も異なる中で全員が満足する環境を提供することは明らかに困難である。

また、室内天井面に設置される吹き出し口には、本来、冷風と温風の到達域の変化への対応が必要となる。冷風は横方向に拡散させないと冷風が直接執務者にあたり、肌寒さを誘発する一方、温風は比重の関係で、より縦方向に噴出させないと床まで届かず、底冷え感が発生する。このため冷風時と温風時で鉛直方向での吹き出し角度を、吹き出し口ごとに手で切り替えることが求められる。実態としてはそのような適切な管理が行われている例は少数であると思われる。

そもそも冬期は1日の間で温風運転と冷風運転が混在する。朝方は温風が必要となり、昼前後からは冷風(外気による冷房)に切り替わるような制御が行われるわけだが、このような場合に、吹き出し方向を環境に合わせて切り替えるというのは非現実的である。

さらには、バブル期に建築された建物の多くに設置されていたOA機器の室内発熱量は非常に大きく、また照明は蛍光灯方式が主流であったために、高級仕様のオフィス用ビルは60W/㎡程度の室内冷房負荷を見込まざるを得なかった。

しかし、現在はオフィスのディスプレイのほとんどが液晶

化され、CPUの消費電力は激減し、照明はLED管となっている。そのため室内の冷房負荷は大きく削減されている。

一方、従来より室内で暖房が要求される時間帯や期間が伸長している。こうした状況の変化に合わせた設備設計・計装設計が行われてきているかと考えると若干の疑問が残る。

空気質(清浄度・空気組成)も居住者の生産性に加え、居住者の健康にも大きな影響を与えると考えられる。

昨今、分散型空調システムが小規模に限らず中規模(延べ床面積20,000㎡程度)の事務所ビルにも設置されるケースが増えてきているが、特に天井カセット型のいわゆる「ビルマル」の場合は、従来のセントラル型空調システムと比較し、新鮮外気の供給量が不足しがちであり、吹き出し口の設置密度が低いために空間均一での換気効率を得ることは難しいと考えられる。

さて、今回の特集テーマである「人を中心とした」の発想に基づく快適性の追求は経済的な実現性も考慮し、最新の技術を取り入れながら、空調技術者が長期にわたり抱えてきたこれらの課題を解決していくための対策そのものであったり、またはきっかけとなる技術の一端を提示するものである。

温度を立体的に可視化することは制御単位ごとに均一な温熱環境を提供するためのスタートとなり、この温熱環境可視化技術は、人や発熱機器の偏在化に対応し、快適性と省エネルギーを両立する空調制御のスタートとなる。

温冷感申告技術との組み合わせにより、居住空間内での計測値に紐づいた正しい「温冷感の可視化」(温度が高くかつ暑い、温度が低いのに暑い等)が可能となる。また空気質の改善へも応用していけるであろうことが容易に想像される。さらに各々の温度制御のエリアを狭くし、細かい単位で風量と風向を変えていくことで居住者の温冷感に合わせたストレスのない環境が実現されると考えている。

新たにリリースされたビルディングオートメーションシステムであるsavic-net G5シリーズの構成機器の拡張は、これらの技術を容易に実現するための強力な武器・インフラになっていくであろう。

本特集は、アズビルの技術が、ビル居住者・テナント企業・ビルオーナーの視点で、よりよい環境と環境負荷低減を実現していく着実な道筋が見える特集となっています。

読者の皆さまには、1つ1つの技術の未来像を想像しながら、詳細部分まで拝読いただき、さらにはフィードバックをいただくことで、さらなる快適なビル空間の実現に寄与してくださることを期待しています。

また、今回考案したシステムの空調制御における実用化のために、CFD (Computational Fluid Dynamics)<sup>注1</sup>解析の所要時間を考慮して決定した室内環境データ計測間隔とCFD解析間隔に基づき、連携解析を連続実行する手法を提案した。実環境にてその手法を用いてシステムを稼働させたので、第4章で一例として報告する。

## 2. 3次元温熱環境可視化システムの構築

室内の詳細な温度分布を把握することを目的としてCFD解析情報を活用した3次元温熱環境可視化システムを構築した。図2に概念図を示す。

これまでのCFD解析は、建物利用時の室温分布を予測することを目的として建物や空調設備の設計などに使われることが一般的であったが、本研究では、空調制御への活用を目指している。そのためには時々刻々変化する室内の状況を、CFD解析結果から推定する必要があるが、実

注1 数値流体力学などと訳され、ソフトウェアを用いて、流体の流れや熱の移動をコンピュータ上でシミュレーションする手法

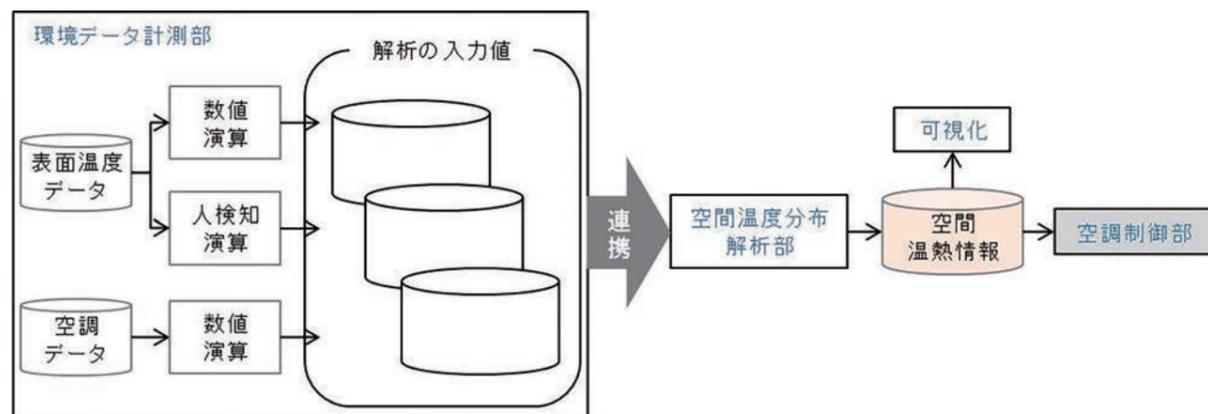


図1 計測と解析を連携させた空調制御の概念図

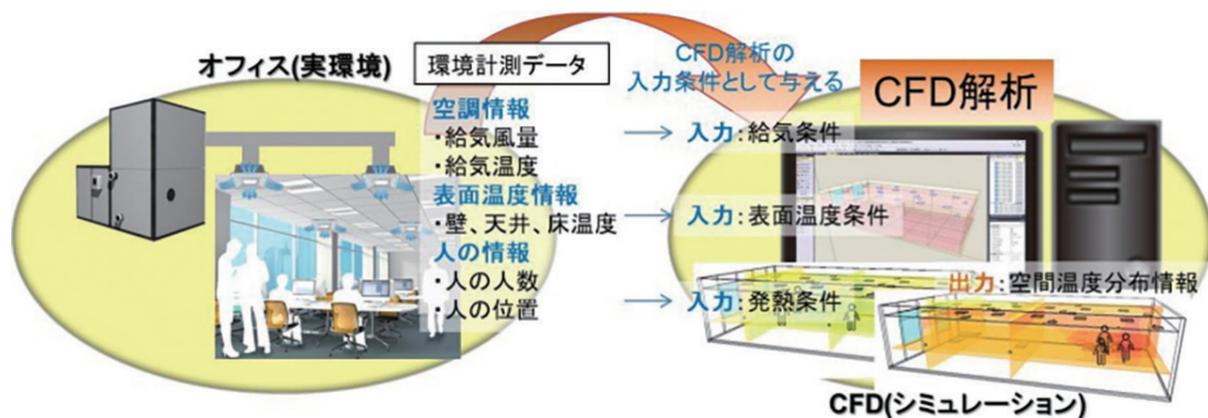


図2 3次元温熱環境可視化システムの概念図

際のオフィスでは室温に影響をおよぼす人やPCなどの発熱体の移動や、機器の発停情報を取得しなければ解析ができず、そのような推定が困難であった。また、より正確な推定を行うためには、解析領域の境界となる壁などの条件設定が重要であり、外気や隣室からの貫流熱を再現するために複雑なパラメータを設定した壁モデルの構築も必要であった。

今回構築したシステムでは、環境計測データとして、空調情報(給気温度、給気風量)に加え、表面温度情報(壁、天井、床の表面温度)、人検知情報(人数、位置)などを実測し、時々刻々変化するそれらの室内環境計測データをCFD解析の境界条件として逐一入力することにより、オフィスの状況変化を反映した空間温度分布などの可視化情報を得ることが可能になった。また、実測データを利用することにより、熱の流れ(貫流熱)を再現するための複雑なパラメータ設定が不要になり、壁モデル構築のエンジニアリング負担低減も実現した。なお、今回は室内環境計測データである表面温度および人検知情報の計測に赤外線アレイセンサを用いた<sup>(4)</sup>。

## 3. 3次元温熱環境可視化システムの適用事例と検証

### 3.1 検証の概要

机や人を配置した部屋にて、執務時間帯の人の移動や空調環境を想定した実験を実施し、本システムの検証で利用する入力条件(給気条件、表面温度条件、発熱条件)と出力結果(空間温度)に相当する室内環境計測データを取得した。入力条件として取得した環境計測データを境界条件としてCFD解析を実施し、3次元温度分布を出力した。解析結果を、前記実験で出力結果に相当するデータとして取得した空間温度と比較することで本システムの精度を検証した。また、環境計測データを直接境界条件に利用する手法の有効性検証を目的とし、詳細なパラメータ設定を行った従来の壁モデルを用いた場合と比較した。

### 3.2 システムの適用対象

構築したシステムを自社で所有するオフィスを模擬した空調実験室(図3)に適用した。

部屋の大きさは、15m×8m×3mで、図4に示すとおり、周辺に外気や隣室を想定したチャンバーが設置されており、各チャンバー温度を調整することで、所望の環境を再現できる。空調はVAV (Variable Air Volume:可変風量) セントラル方式を採用しており、空調機1台、吹出口と吸込口はそれぞれ12個ずつ設置している。空調機は1台であるため、給気温度はすべての吹出口で等しく、また吹出口2個に対し1台のVAVが設置されているため、隣り合う2つの吹出口の風速は等しい。

### 3.3 実験条件

空調実験室において、夏季のオフィス環境での自席作業や会議を想定して人の移動および人の在・不在に合わせた空調制御を行い、環境データを計測した。図5に示した点(A)、(B)、(C)に設置した熱電対を用いて空間温度分布を計測し、CFD解析結果と比較した。

図6に実験スケジュールを示す。出社前の空調立ち上げからの2時間を想定し、スケジュールは、空調立ち上げ30分(ターム1)、出社後自席作業30分(ターム2)、会議エリアでの会議30分(ターム3)、再度自席作業30分(ターム4)とした。なお、設定値は室内温度26℃、外気温度(外気チャンバー温度)30℃、隣室温度(隣室チャンバー温度)26℃とした。



図3 空調実験室

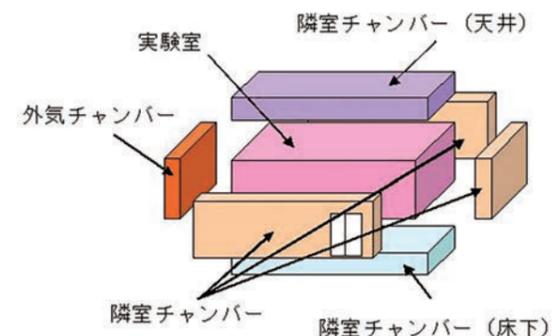


図4 空調実験室の概要

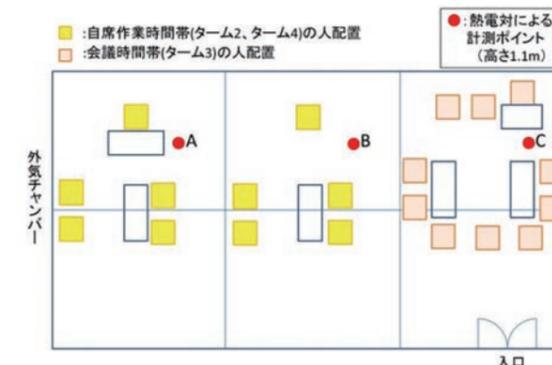


図5 実験時の温度計測点

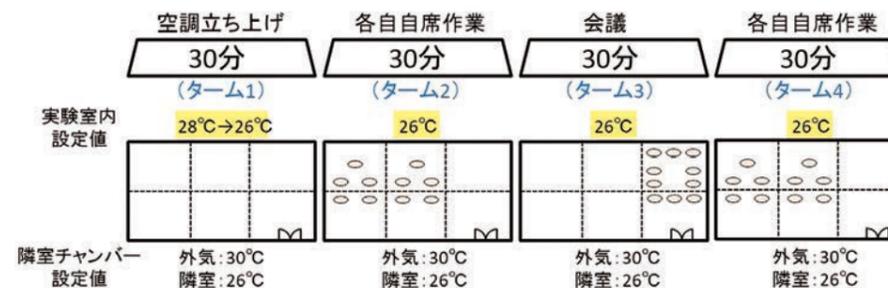


図6 実験スケジュール

### 3.4 CFD解析の条件とケース設定

図7にCFD解析に用いた部屋モデルを示す。また、表1にCFD解析条件を示す。

環境計測データを直接境界条件として与えた場合の有効性検証を目的とし、詳細なパラメータ設定を行った従来の壁モデルと比較するため、部屋モデルは、境界条件となる周囲(壁、天井、床)の表面温度の設定方法が異なる2ケースを準備し、それぞれのケースの解析結果と実測結果を比較した。

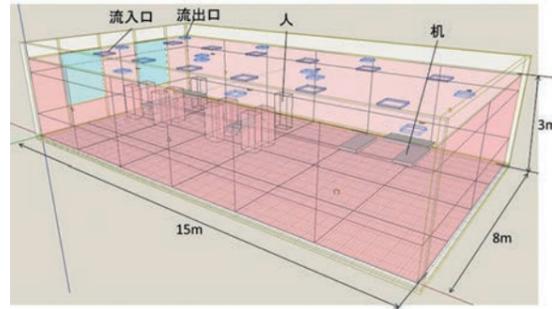


図7 空調実験室のCFDモデル

#### 3.4.1 詳細なパラメータ設定を行った壁モデルのケース (詳細設定ケース)

壁の素材の密度や比熱、熱伝導率、熱伝達率などのパラメータを詳細に設定した従来の壁モデルである。実測結果をもとに、パラメータを調整することで、精度向上を進めてきており、これまで筆者らは、このような手法で構築した比較的高精度な壁モデルを用いて解析を実施していた。外気や隣室の温度を設定することで貫流熱を考慮して室内の表面温度が算出されるので、壁モデルのパラメータ設定に加え、外気や隣室温度の設定も解析結果に影響を与える。

#### 3.4.2 赤外線アレイセンサによる表面温度計測データを利用した壁モデルのケース (計測ケース)

今回新たに構築したものは、赤外線アレイセンサによる計測データで得られた表面温度情報を壁面の表面温度として直接設定する壁モデルである。計測した表面温度を直接設定するため、実態に合った表面温度であることに加え、壁モデル構築のための複雑なパラメータ設定やそのための実測を行う必要がなく、モデル構築を容易にすることができる。

### 3.5 検証結果

2ケースのCFD解析結果から得られた温度分布可視化情報と、CFD解析と実測の比較結果について報告する。

#### 3.5.1 空間温度分布のケース間比較

図8、図9に自席作業時間帯(タム2)の各壁モデルのケース、図10、図11に会議時間帯(タム3)の各壁モデルのケースについて、高さ1.1mにおける温度分布図を示す。なお、各タムが示す時間帯は、「3.3実験条件」に示すとおりである。

両ケースとも自席作業時間帯は全体的に25~26℃を示しているのに対し、会議時間帯は全体的に26~27℃近くまで温度が上昇しており、同様の温度分布や温度変化の傾向を示していることが分かる。このことから、詳細設定ケースを用いた場合に対し、赤外線アレイセンサデータを用いた計測ケースでも温度分布や温度変化の傾向において、同等の結果が得られることが分かった。

#### 3.5.2 室温変化の実測と解析結果の比較

図12~図14に、図5に示す3点(A)、(B)、(C)における温度についてCFD解析と実測結果の比較を示す。いずれの点でも、CFD解析と実測結果の温度変化の傾向は同じであることが分かる。

自席作業時間帯(タム2)では、点(A)におけるCFD解析と実測との最大誤差は詳細設定ケース0.6℃、計測ケース0.2℃、点(B)では、詳細設定ケース0.8℃、計測ケース0.9℃、点(C)では詳細設定ケース0.2℃、計測ケース0.2℃であった。

|       |           | 詳細設定ケース                   | 計測ケース              |
|-------|-----------|---------------------------|--------------------|
| 解析の種類 |           | 非定常解析                     |                    |
| 境界条件  | 流入        | 給気温度および風量の計測値を自動入力        |                    |
|       | 流出        | 自然流出                      |                    |
|       | 壁面表面温度    | 詳細パラメータおよび周辺チャンパー温度を設定し算出 | 赤外線アレイセンサの計測値を自動入力 |
|       | 隣室チャンパー温度 | 計測値から手動入力                 |                    |
| 発熱情報  | 人         | 赤外線アレイセンサの計測値を自動入力        |                    |
| メッシュ数 |           | 約40万                      |                    |

また、会議時間帯(タム3)では、点(A)におけるCFD解析と実測との最大誤差は詳細設定ケース1.1℃、計測ケース0.7℃、点(B)では、詳細設定ケース1.3℃、計測ケース0.8℃、点(C)では詳細設定ケース1.4℃、計測ケース1.1℃であった。いずれの時間帯でも、詳細設定ケースに対し、計測ケースの点(A)、(B)、(C)の温度は、同等もしくはそれ以上の精度であった。よって、本システムにより、ISO7730に示され、温度を含めた6要素(温度、湿度、放射、気流、着衣量、活動量)を用いて計算される快適性評価指標PMV(Predicted Mean Vote:予測平均温冷感申告)の予測も可能となり、快適性を考慮した空調制御への活用を実現できる。

以上より、構築したシステムによって時々刻々変化するオフィスの状況を反映した室内の温度分布を把握できることを確認するとともに、赤外線アレイセンサデータを用いた計測ケースで解析した結果、複雑なパラメータを設定して構築した詳細設定ケースを用いた場合と同等もしくはそれ以上の結果が得られることが分かった。また、赤外線アレイセンサデータを用いることにより、複雑なパラメータ設定やそのための実測を行う必要がなく壁モデル構築のエンジニアリング負荷は大幅に低減されることも確認した。

本システムにより、壁や柱のセンサでは把握しきれない詳細な温熱環境の把握が可能となった。快適性を考慮するためには、湿度や気流、放射などを含めた検討が必要であるが、得られた温熱環境情報を活用することで、人の在・不在や実環境の温熱状況に応じた、快適性と省エネルギー性を両立した空調制御を実現できると考える。

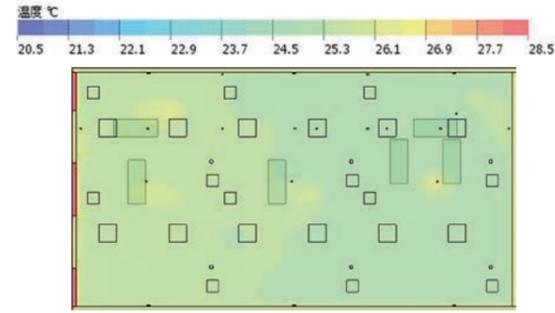


図8 自席時間帯(詳細設定ケース)

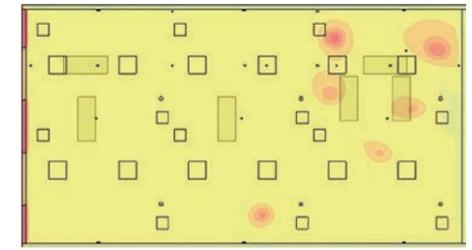


図10 会議時間帯(詳細設定ケース)

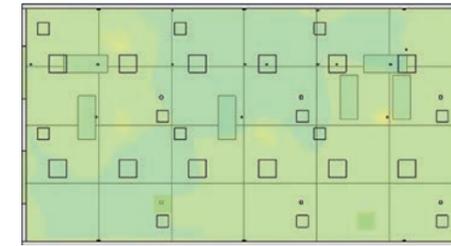


図9 自席時間帯(計測ケース)

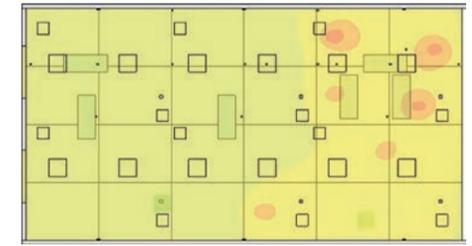


図11 会議時間帯(計測ケース)

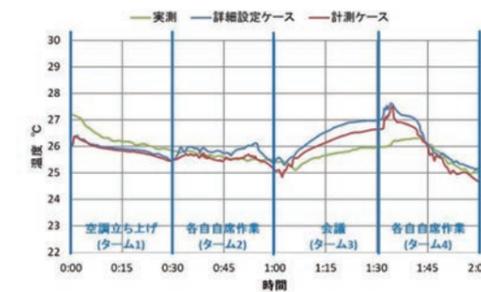


図12 点(A)における実測値とCFD解析結果の比較

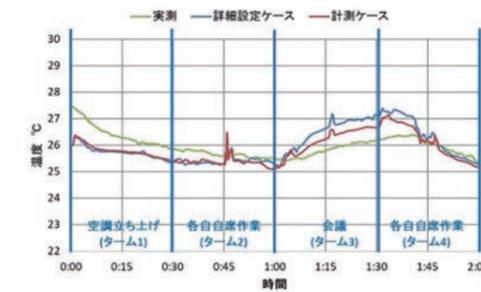


図13 点(B)における実測値とCFD解析結果の比較

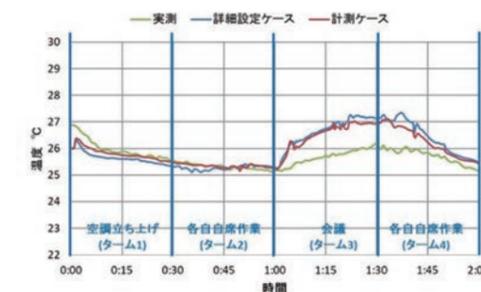


図14 点(C)における実測値とCFD解析結果の比較

## 4. 実環境への適用例

空調制御に活用するためには、空調の制御周期や、室内の温度変化の周期などに応じたタイミングで必要な温熱環境情報を得る必要があるが、CFD解析は計算時間が膨大で結果を取得するまでに時間を要するという課題がある。今回は、そのような課題に対する一考察として、実環境への適用結果について紹介する。

対象は、図15に示すような当社が出展した展示会ブースで、モデルサイズは14m×10m×10m、メッシュ数は約60万である。実際にブース内に設置した赤外線アレイセンサで計測したデータをCFD解析の境界条件として連続的に与えて解析を行った。

図16(a)のようにまとまったある一定期間のデータを計測し解析を行うと、解析結果を得るまでに時間がかかる。そこで、今回は図16(b)のように、計測期間を細かく分割し、一度の解析で対象とする実環境の時間を短くすることで、それに比例して一度の解析の所要時間を短縮した。短時間の計測と解析を連続的に実行することにより、まとまったある一定期間のデータを計測して解析を行うより、一定の短い間隔で連続的に解析結果を表示することを実現した。

現段階では結果表示の試行に留まっているが、今後解析精度や計算時間、表示タイミングについても評価し、空調制御における実用についてさらに検討を進める。

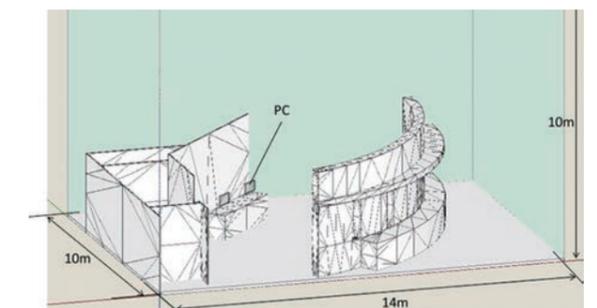


図15 展示会ブースにおけるCFDモデル

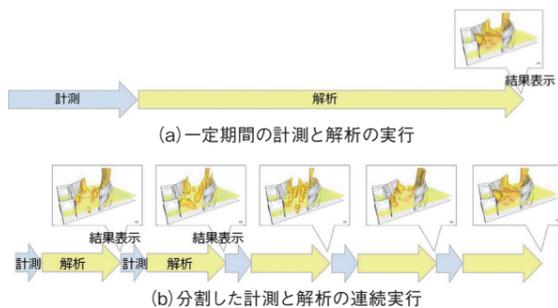


図16 空調制御における実用に向けた一考察

## 5. おわりに

近年注目されている快適性と省エネルギー性を両立した制御へのCFD解析による3次元空間温熱情報の活用を目的とし、室内環境計測データとCFD解析を連携させた3次元温熱環境可視化システムを構築した。システムを空調実験室に適用し、赤外線アレイセンサにより計測した表面温度や人検知情報をCFD解析と連携させた解析を行った結果、赤外線アレイセンサデータを用いることで、計測値を用いた壁モデルでも詳細にパラメータを調整した従来の壁モデルと同等もしくはそれ以上の解析精度を得られるとともに、壁モデル構築のエンジニアリング負荷低減も実現できることを確認した。また、今回構築したシステムの空調制御における実用に向け提案した手法を用いて、実環境においてシステムを稼働させ、一例として報告した。

今後は、今回構築した3次元温熱環境可視化システムで得られた空間温熱環境情報の自動監視や、それらの情報を活用した空調制御の自動化を目指す。

### <参考文献>

- (1) 経済産業省 エネルギー基本計画 平成30年7月
- (2) 財団法人省エネルギーセンター公表ページ  
[https://www.eccj.or.jp/office\\_bldg/01.html](https://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html)  
(アクセス日:2018年11月1日)
- (3) 野部達夫:タスク・アンビエント空調の近年の研究動向, 空気調和・衛生工学会第84巻, 2010.8
- (4) 太宰龍太他: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), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2016.9

### <著者所属>

齋数 由香子 技術開発本部商品開発部  
 近田 智洋 AIソリューション推進部  
 原山 和也 ビルシステムカンパニー  
 マーケティング本部プロダクトマーケティング部

# 居住者の温冷感情報を活用する 新しい快適性評価技術の開発 — 個別単位の環境満足度を評価する

## Thermal Comfort Evaluation Focused on Occupants' Thermal Preferences: A Thermal Satisfaction Model for a Small Group of Occupants

アズビル株式会社  
技術開発本部

三浦 真由美  
Mayumi Miura

アズビル株式会社  
技術開発本部

上田 悠  
Haruka Ueda

アズビル株式会社  
AIソリューション推進部

宇野 侑希  
Yuki Uno

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

太宰 龍太  
Ryota Dazai

### キーワード

快適性, 環境満足度モデル, 温冷感申告, 室内環境, モデリング

国際標準の快適性評価指標は大人数を前提とした平均的指標であり、個々人の温冷感の違いは反映されにくい。よって、空調環境におけるさらなる居住者満足度の向上を目指すには、居住者の実際の感じ方を反映した環境評価が必要となる。本技術は、空調システムに蓄積された居住者の温冷感申告データと室内環境データを活用し、それらの関係性を環境満足度モデルとして構築することにより、居住者の感じ方に基づく環境評価を実現する。実オフィスにおけるモデル生成試行を行った結果を報告するとともに、モデルの活用例について述べる。

The thermal comfort indices contained in international standards are average indices developed by statistical methods using data from a large number of people (e.g., the Predicted Mean Vote index of ISO 7730) which hardly reflect individual differences in thermal sensation. Therefore, in order to improve the thermal satisfaction of building occupants in an air-conditioned environment, an evaluation system that reflects their actual individual feelings is needed. The technology presented here enables evaluation of the environmental satisfaction level of occupants based on their perceptions by constructing data models which describe the relationship between indoor environmental data and occupants' feedback to the air conditioning system concerning their thermal sensations. This paper reports the results of constructed models using real data from an office and presents sample applications of those models.

## 1. はじめに

オフィス空間の快適性や環境満足度は室内環境の質を決定づける要因であり、環境満足度は居住者の知的生産性にも影響をおよぼすことが報告されている<sup>(1)</sup>。また近年、執務環境の改善、知的生産性の向上、優秀な人材確保等の観点から、働く人の健康性や快適性に優れた不動産への注目が国際的に高まっており、これに適合する建築物の認証制度について、国土交通省が検討を進めている<sup>(2)</sup>。働き方改革などの社会動向も加わり、これらは居住者満足度の高い温熱環境へのニーズにつながっている。

一方で、居住者の温冷感(暑い/寒い)の感じ方は人によって異なるため、実際のオフィスには、同じ温熱環境でも暑いと感じる居住者や寒いと感じる居住者が混在している。建物内の快適性評価にはISO7730に示される温熱快適指標PMV (Predicted Mean Vote:予測平均温冷感)が使用されることが多いが、PMVは1300名以上におよぶ被験者実験の結果を統計的に処理した平均的な指標であり、個々人の感じ方の違いは反映されにくい。そこで、実オフィス居住者の環境満足度をより一層向上させるための空調ソリューションとして、実際の居住者が自身の温冷感(暑い/寒い)の感じ方をWEB画面や専用端末を通じて空調制

御ループに逐次フィードバックする温冷感申告空調が提案されている<sup>(3)(4)</sup>。この手法は自身の環境を自ら変更できるといふ環境選択権<sup>(5)</sup>の観点からも居住者の満足度向上が期待できる。

筆者らは、複数の居住者で構成される空調ゾーンなどのグループ単位(個別単位)を対象に、温冷感申告情報と、温冷感が申告された時点の室内環境情報(温度、湿度等)との関係をデータモデル(環境満足度モデル)として構築し、居住者グループごとの温冷感による満足度合いを定量化する快適性評価技術の開発を行った。実オフィスを対象とした環境満足度モデル生成の試行実験も行ったので報告する。

本稿ではまず、2章において標準的温冷感と実際の居住者の温冷感の違いについて述べ、3章において実オフィスの温冷感申告情報を利用する場合の課題と対策・環境満足度モデルの技術コンセプトについて説明する。そして、4章においてモデル生成に必要な訓練データの生成手順を示した後、5章において、実オフィスでのモデル生成試行実験の結果と、生成したモデルを活用した環境評価シミュレーションの事例を提示する。

## 2. 標準的な温熱快適指標と実際の感じ方

### 2.1 温熱快適指標PMV

ISO7730で標準化されている温熱快適指標PMVは、人体と周囲環境の熱平衡状態を人の温冷感に結びつけた指標である。算出方法やプログラムはANSI/ASHRAE Standardでも公開されているので本節ではPMVの概要を説明する。

熱平衡状態を示す人体の熱負荷(体内蓄熱量)Lは、人体からの発熱量である代謝量Mと、人体と周囲環境との対流・放射・蒸散による放熱量(C, R, E)<sup>注1</sup>によって決定される(図1, 式(1))。

$$L = M - (C + R + E) \quad \text{式(1)}$$

ここで、  
L:人体の熱負荷 W/m<sup>2</sup>  
M:代謝量 met ※1.0met=58.2W/m<sup>2</sup>  
C:対流による放熱量 W/m<sup>2</sup>  
R:放射による放熱量 W/m<sup>2</sup>  
E:蒸散による放熱量 W/m<sup>2</sup>

PMVは、式(1)の熱負荷と、これを統計的な温冷感の感じ方に変換する関数G(M)を使用して式(2)で算出される。ここで、C, R, Eは、居住者周辺の空気温度Ta, 湿度RH, 平均放射温度Tr, 風速vの4つの物理環境パラメータと、人側のパラメータである代謝量M, 着衣量Icl(着衣の断熱性を示す)に基づいて算出することができるので、これらの6要素がPMV算出のパラメータとなる。

$$PMV = G(M) \times L = F_{pmv}(Ta, Tr, v, RH, M, Icl) \quad \text{式(2)}$$

注1 C, Eはそれぞれ呼吸による放熱量を含むとする

ここで、  
 $G(M) = 0.303 \times \exp(-0.036M) + 0.028$   
F<sub>pmv</sub>:PMV関数, Ta:空気温度 °C,  
Tr:平均放射温度 °C, v:風速 m/s, RH:湿度 %,  
M:代謝量 met, Icl:着衣量 clo

PMVは無次元の-3 ≤ PMV ≤ +3の範囲で定義され(-3:「非常に寒い」, +3:「非常に暑い」)<sup>(6)</sup>、マイナス側は寒い側、プラス側は暑い側、PMV=0は暑くも寒くもない状態を示し、-0.5 ≤ PMV ≤ +0.5が快適域とされる。また、任意のPMVの環境に対し、不満・不快を感じる人の割合PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied:予測不快者率)は次式で算出される。

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0.03353 \times PMV^4 - 0.2179 \times PMV^2) \quad \text{式(3)}$$



図1 人体と周囲環境

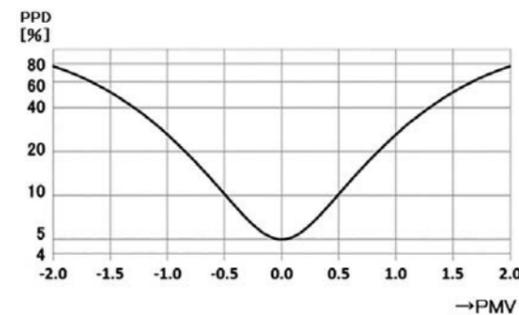


図2 PMVとPPD

### 2.2 居住者の実際の感じ方

前述したPMVやPPDは平均的な感じ方を示す指標であるため、実際のオフィスで働く人々の感じ方が必ずしも一致するとは限らない(図3)。PMVでは「快適」と評価される環境であっても、実際の居住者の「暑い」「寒い」という感じ方は平均的な感じ方と異なるケースも多い。



図3 温冷感の感じ方の違い

## 3. 環境満足度モデル

### 3.1 室内環境と温冷感申告データの活用

居住者の実際の温冷感(TSとする)と標準的な感じ方を示すPMVとの対応関係が分かれば、任意のPMVのときの実際の居住者の温冷感を推定することができる(図4)。温冷感申告空調の導入現場では、居住者自身の温冷感が温冷感申告情報として空調システムにフィードバックされ、この温冷感申告情報に基づき、居住者の快適性を向上させる側に空調制御の目標値が変更される<sup>(4)</sup>。この居住者温冷感申告情報は、空調運用管理のために蓄積されている温湿度などの環境情報とともに、システム側に蓄積することが可能である。もう一方のPMVは環境情報に基づいて算出できるので(代謝量と着衣量は標準的な値や計測値等を適宜採用する)、温冷感申告情報と環境情報とから、どのようなPMVのときに居住者がどのような温冷感であったのかを知ることができる。

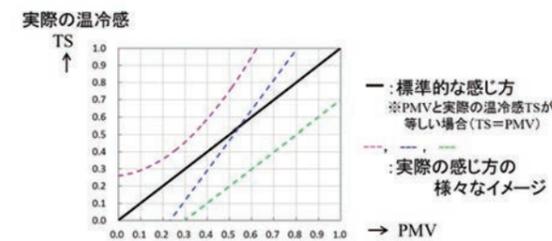


図4 PMVと実際の温冷感の対応

### 3.2 実オフィスの温冷感申告情報の課題

本節では、温冷感申告空調で蓄積される温冷感申告情報を利用する場合の主要な2つの課題について説明する。

#### 3.2.1 情報の質の課題:温冷感申告情報の分解能

図4に示したような対応関係をモデル化する場合、実際の温冷感TS情報(図4の縦軸)は「寒い」「暑い」の強度の情報をより詳細に収集する必要がある<sup>(7)</sup>。しかし、実オフィスで執務を行いながら居住者が行う温冷感申告を、温冷感強度の数値による申告や、細かい段階を設けた申告(ex. 7段階の例:「非常に寒い」「寒い」「やや寒い」「暑くも寒くもない」「やや暑い」「暑い」「非常に暑い」とすると、居住者が自身の感じ方の選択に迷ったり、温冷感申告自体を躊躇することが予想され、現実的とはいえない。一方、段階を設けない通常の温冷感申告情報は「寒い」「暑い」それぞれの申告の有/無という情報であり、関係モデルの構築には十分な分解能が得られない。

#### 3.2.2 情報量の課題:温冷感申告数の確保

居住者が実際に執務を行っているオフィスでは「暑い」「寒い」と感じて、忙しいなどの理由で申告が出ないことが多い。さらに、居住者周囲の環境変動の範囲が温冷感申告の出方に影響することにも注意が必要である。図5は空調ゾーンごとに10分間隔で算出したPMV値の出現頻度(回数)を示した実オフィスのデータ例である(2017年夏季1カ月間、就業日、就業時間)。空調ゾーンによってPMVの

分布形状や上下限値が異なることが分かる。出現頻度が少ないPMV領域では温冷感申告は出にくくなり、上限値を超えて出現頻度が0となれば、暑い環境にも関わらず「暑い」温冷感申告は出ない。例えば、Z3ゾーンのPMV上限値PやZ1ゾーンのPMV上限値Qより暑い領域では、Z3ゾーン、Z1ゾーンの各々で「暑い」温冷感申告のデータは得られないことになる。

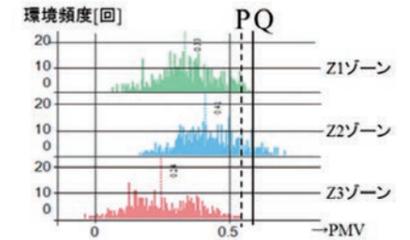


図5 空調ゾーン的环境頻度

### 3.3 個別単位的环境満足度モデルのコンセプト

本節では、3.2で述べた課題対策と環境満足度モデルのコンセプトを説明する。

#### 3.3.1 情報の質の課題対策 一環境満足度モデル

温冷感の違いを反映するデータモデルは非線形関数となる可能性も高く、分解能が粗いとモデル構築はやはり難しい。そこで、複数の居住者を1つのグループ単位(個別単位)とし、温冷感申告を行う居住者の人数が、このグループの周囲環境への満足度合いとみなせる点に着目する。つまり、PMVと温冷感TSとの直接の対応関係ではなく、個別単位を対象として、PMVと、温冷感TSに起因する(温熱的な)環境満足度合いの関係に着目する。対象とする申告者グループの単位(個別単位)は任意に設計可能であるが、空調ゾーンを個別単位として、これらの関係モデルが構築できれば、温冷感による満足度が定量的に把握され、ゾーンごとに快適な空調制御を実現する重要な情報を得たことになる。

さらにここで、「暑い」「寒い」温冷感申告は不快の解消への要望であることから、基本のモデル関数には予測不快者率PPDの関数(式(3), 図2)を用い、PMVとこれに対応する温冷感申告者率(以下、PPV: Predicted Percentage of Votedとする)のデータに基づいてPPD関数を修正する。図6にPMVとPPVのデータで修正したモデルのイメージ図を、式(4)にPPVモデルの基本関数を示す。同じPMVの環境でも「暑い」と感じる申告者率は個別単位ごとに異なり、暑さに敏感な(ex. 暑がりが多い)個別単位では「暑い」申告者率がより高く、暑さに寛容な(ex. 寒がりが多い)個別単位では「暑い」申告者率がより低くなり、個別単位ごとの感じ方の違いをモデルとして表現することが可能となる。

$$PPV = a - b \times \exp(c \times (PMV - e)^4 + d \times (PMV - e)^2) \quad \text{式(4)}$$

ここで、  
a, b, c, d, eは探索パラメータ

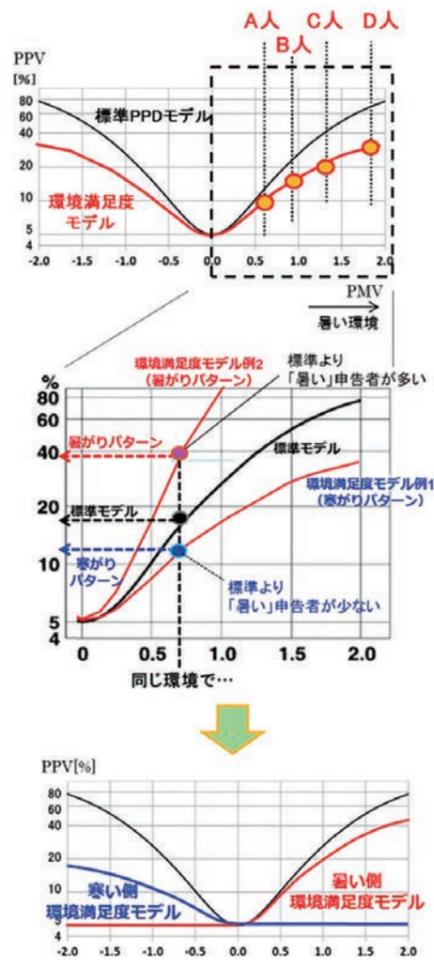
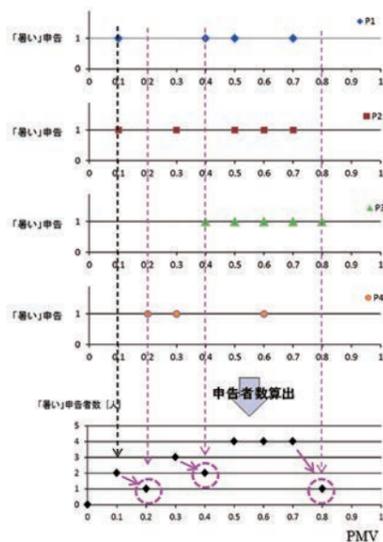
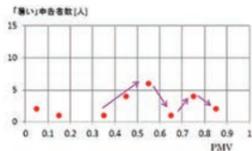


図6 環境満足度モデル



(A) 単純積算例



(A') 単純積算例

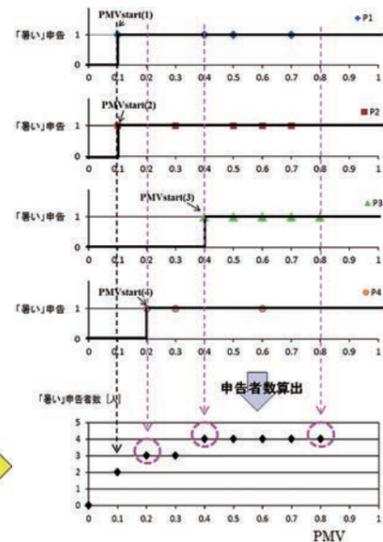
さらに、「暑い」申告情報による「暑い」側のモデルと「寒い」申告情報による「寒い」側のモデルを異なるモデルとする<sup>注2</sup>ことで(図6下図)、「暑い」側と「寒い」側の感じ方が非対称となることも許容する。本技術では「暑い」側と「寒い」側の数式モデルとともに環境満足度モデルとするが、説明を分かりやすくするため、以降の説明や試行実験結果は「暑い」側の環境満足度モデルについてのみ説明する。

### 3.3.2 情報量の課題対策 一 温冷感申告ラッチ法一

実オフィスを想定した居住者の温冷感申告と、申告発生時点のPMVの対応関係を求めて、申告者数を算出するイメージを図7に示す(居住者P1~P4の「暑い」申告の処理例)。3.2.2で述べたように、「暑い」温冷感申告の出方が居住者の忙しさや環境頻度に依存すると、PMVと「暑い」申告者数は単調増加の関係にはならず(図7(A)破線の丸印、図7(A')に実オフィスのデータ例も示す)、2.1で述べたような、人体の熱負荷量と温冷感との温熱生理的な妥当性が確保できない。

そこで、本技術開発では、申告者ごとに温冷感申告を補完する温冷感申告ラッチ法を考案した。この手法による申告者数の算出イメージを図7(B)に示す。申告ラッチ法では、各々の申告者が「暑い」申告を行った最も小さいPMV(図中のPMVstart)よりもPMVが大きい領域(PMV ≥ PMVstart)では、その申告者から実際に温冷感申告がされていなくても、申告が継続して行われているとみなす。これにより、PMVと「暑い」申告者数の単調増加の関係を維持して、温熱生理的な妥当性を確保する。

注2 式(4)に対し、「暑い」側モデルはPMV < eでPPV = a-b、「寒い」側モデルはPMV > eでPPV = a-bとして各々のモデルのa, b, c, d, eを探索する。



(B) ラッチ法適用時

図7 申告者数の算出

## 4. 訓練データの生成

本節では、環境満足度モデルの構築に利用する訓練データ生成手順の概要について説明する。



図8 訓練データ生成フロー

図8は、温冷感申告情報とPMV情報を加工して訓練データを生成する処理フローの一例である。温冷感申告情報は、[申告日時、居住者ID、温冷感申告]の蓄積データであり、居住者が在席する個別単位(空調ゾーンなど)は居住者IDによって特定できるとする。PMV情報は、代謝量・着衣量(対象建物や居住者、季節の代表値)と、蓄積された時系列の環境計測情報(温度、湿度など)を用いて演算した[計測日時、PMV]のデータとする。

訓練データは、モデリング対象とする個別単位における特定の温冷感申告(「暑い」あるいは「寒い」)ごとに生成する(複数の個別単位や温冷感申告に対してモデリングを行う場合は同じ処理を個別単位ごと・温冷感申告ごとに繰り返す)。

対象とする任意の個別単位を空調ゾーンAとし、モデリング対象とする温冷感申告を「暑い」とすると、図8に対応する各手順は以下ようになる。

- ①温冷感申告情報の抽出:温冷感申告情報から空調ゾーンAに在席するすべての居住者IDの「暑い」申告のみを抽出する(図8 データ統合後の情報例 青破線内)。
- ②PMV情報の抽出:PMV情報から空調ゾーンAの情報のみを抽出する
- ③データ統合:①の申告日時に対応する②の計測日時のPMVを統合する(図8 データ統合後の情報例)。
- ④PMVごとの申告者率演算:居住者IDごとに「暑い」申告を行ったPMV値を抽出し、温冷感申告ラッチ法(3.3.2)によりPMVに対する申告者数を求める。この申告者数を空調ゾーンAの居住者人数で除算して申告者率とし、訓練データ(図8 訓練データ例)とする。そして、この訓練データを利用して、汎用の最適化手法で式(4)の探索パラメータを決定し、環境満足度モデルとする。

## 5. モデリング試行実験

温冷感申告空調を運用中の実オフィスを対象に環境満足度モデル生成の試行実験を行った。モデルを生成する個別単位は、室温制御の単位であるVAV (Variable Air Volume)ゾーンとした。以降では、試行実験の概要、対象期間の温熱環境および温冷感申告データの概要、モデリング結果、モデルの活用事例について説明する。

## 5.1 試行実験の概要

### 5.1.1 対象建物

当社藤沢テクノセンターの事務棟5階を対象とした。建物概要を表1に示す。

### 5.1.2 空調制御<sup>(4)(8)</sup>

フロアの執務者227名(男性194名、女性33名)には温冷感申告用のカード型専用端末が配布され、自席の執務中に任意のタイミングで温冷感申告(「暑い」「寒い」「快適」の3モード)を行うことができる。温冷感申告を受信した空調システムは、「寒い」申告に対しては設定値を0.5℃上げ、「暑い」申告に対しては即時対応として10分間2℃下げた後に設定値を1.5℃戻す設定値の変更を行う。

### 5.1.3 空調ゾーニング

対象フロアの空調ゾーニングを図9に示す。東西・南北に2分割した4つの空調機区分(NW, NE, SE, SW)に対し、東・西の外壁からフロア内部に向かって室温制御単位であるVAVゾーン1~3が配置されている(各VAVゾーンを[空調機区分-VAVゾーン番号]と記述する)。各VAVゾーンの居住者人数を表2に示す。男女比率はフロア全体の比率(男性85%、女性15%)とほぼ同等で、ゾーン間のばらつきは小さかった。

表1 建物概要

|      |                      |
|------|----------------------|
| 建物   | A社事務棟<br>(7階建て)      |
| 所在地  | 神奈川県藤沢市              |
| 用途   | 事務所ビル                |
| 建築面積 | 2,810m <sup>2</sup>  |
| 延床面積 | 17,918m <sup>2</sup> |
| 居住者数 | 約1,000人              |
| 空調方式 | VAV式<br>セントラル空調      |

表2 各ゾーンの居住者人数

| VAVゾーン番号 | 居住者人数 | VAVゾーン番号 | 居住者人数 |
|----------|-------|----------|-------|
| NW-1     | 20    | SE-1     | 14    |
| NW-2     | 35    | SE-2     | 19    |
| NE-3     | 21    | SE-3     | 9     |
| NE-1     | 14    | SW-1     | 14    |
| NE-2     | 27    | SW-2     | 26    |
| NE-3     | 25    | SW-3     | 3     |

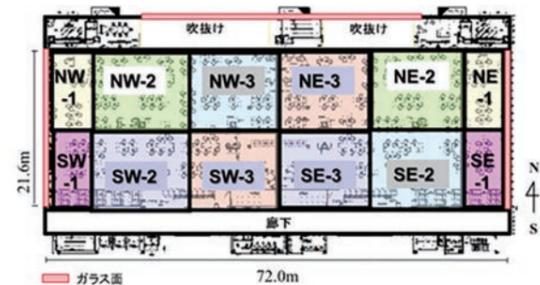


図9 空調のゾーニング

### 5.1.4 室内環境のデータ

空気温度・相対湿度は、BAS (Building Automation System)に収集されている各VAVゾーンの制御用温度センサの計測値、および空調機ごとの還気湿度計測値を使用する。平均放射温度<sup>注3</sup>算出のため、各ゾーン壁面の表面温度を赤外線アレイセンサにて計測した。また、フロア内数点で風速を計測し、0.1m/s以下の静穏環境であることを確認した。

## 5.2 実オフィスの温熱環境と温冷感申告

夏季1カ月間(2017/8/21~9/20, 就業日22日)の就業時間帯(8:00-18:00)における温湿度計測値とPMVの統計値を表3に示す。全VAVゾーンの平均PMV(Predicted Mean Vote)は0.3±0.1と快適域(±0.5以内)であった。ここで、PMVの演算パラメータは、平均風速0.1m/s, 着衣量と代謝量は夏季オフィスを想定した0.5clo, 1.0metとし、各VAVゾーン壁面の表面温度から平均放射温度を算出した<sup>注3</sup>。VAVゾーンごとのPMV統計値と「暑い」申告数を図10に示す。

表3 オフィスの温熱環境 統計値

|      | 平均値<br>±標準偏差 | 最大値   | 最小値   |
|------|--------------|-------|-------|
| 空気温度 | 26.5±0.5℃    | 28.7℃ | 24.9℃ |
| 相対湿度 | 62±5%        | 77%   | 45%   |
| PMV  | 0.3±0.1      | 0.8   | -0.2  |

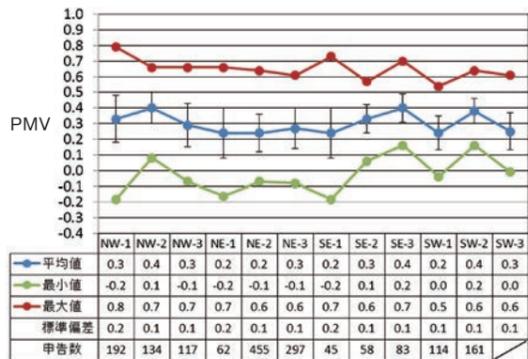


図10 PMV統計値と期間中申告数

## 5.3 実オフィスの環境満足度モデル

### 5.3.1 環境満足度モデルの生成

夏季1カ月間(2017/8/21~9/20, 就業日22日)の「暑い」温冷感申告とPMVデータ<sup>注4</sup>から4章の手順により訓練データを生成し、各VAVゾーンの環境満足度モデルを構築した。また、ゾーン間の比較基準として、フロア全体を1つの個別単位としたフロアモデル(居住者数227名)も生成した。モデルパラメータの同定には最小二乗法に基づく汎用の最適化手法を利用した。なお、モデリング対象のVAVゾーン数は、ゾーン人数が極端に少ないSW-3(居住者人数3名)を除外して11ゾーンとした。

### 5.3.2 空調ゾーンごとの環境満足度モデル

各VAVゾーンの環境満足度モデルを図11に示す。モデリング対象とした11のVAVゾーンすべてと、フロア全体の

注3 平均放射温度は、室内6方位の壁面表面温度と、各ゾーン中心位置の人体と壁面との形態係数から以下の式で算出した。形態係数算出はASHRAE standard 55-2010に準拠するツールを利用した。 $T_r = \sum_{N=1}^6 T_N \cdot F_{p-N}$  ここで、 $T_r$ :平均放射温度℃、 $T_N$ :N面の表面温度℃、 $F_{p-N}$ :N面の形態係数。

注4 PMV演算パラメータは5.2と同様としたが、代謝量は、事業所スケジュールにより居住者の代謝量が出勤や昼食後で増加する時間帯(9:30-12:00、12:00-13:30)のみ1.2metとして算出した<sup>9)</sup>。

モデル(破線、各VAVモデルの図で共通)が生成でき、各VAVゾーンのモデル特性が異なっていることが確認できる。

特性の異なるモデルを重ねて比較してみると、例えば、図11(B)の左図では、形状は類似していても「暑い」申告が発生し出すPMV(図中丸印)や、「暑い」申告者率PPVの飽和値が異なっていることが確認できる。また、図11(B)の中央図では、PMVが遅れて立ち上がったSW-2のPPVが、PMV=0.5付近でSE-2のPPVを追い越している。PMVに対するPPVの傾き(ΔPPV/PMV)は、PMVの増加に伴ってどれだけ「暑い」申告者率が増加するか、つまりは、各ゾーン居住者の「暑い」感じ方の敏感さを示しており、SW-2はこの傾斜が大きい(図中破線はPMV=0.5の各々の傾きを示す接続のイメージ)。さらに、図11(B)右図では、PMV=0.4の環境で3ゾーンのPPVはおおよそ10%、20%、30%と、同じPMVで「暑い」申告者率PPVに差異があることが分かる(図中丸印)。ここで、PMV=0.4は、風速v=0.1m/s, 湿度RH=56%, 着衣量Icl=0.5clo, 代謝量M=1.0met, 放射影響が少ない(平均放射温度Trが空気温度と等しい)とすると室温27.0℃に対応する。

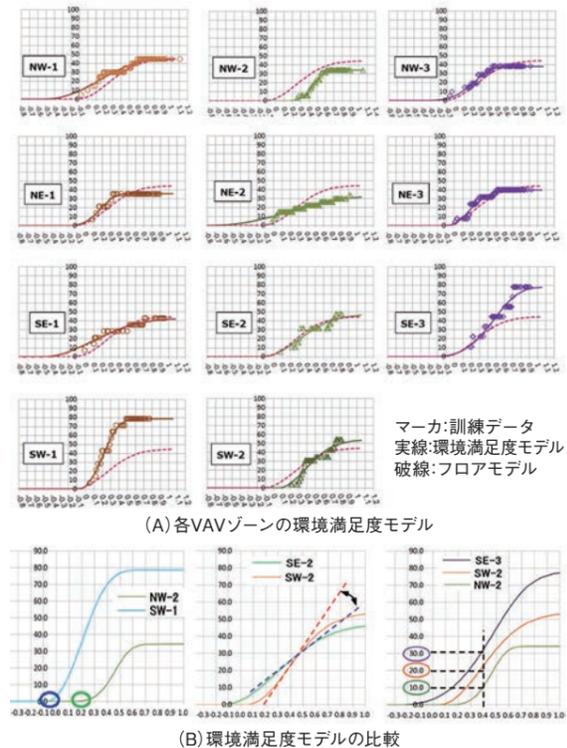


図11 VAVゾーンごとの環境満足度モデル

※すべて横軸:PMV, 縦軸:PPV

## 5.4 環境満足度モデルによるシミュレーション

5.3で生成したVAVゾーンごとの環境満足度モデルは様々な室内環境の検討に利用できる。本節では、いくつかのシミュレーション事例を報告する。

### 5.4.1 環境変化に対する居住者の感じ方の違い

図11(B)右図の解説で示したように、各VAVゾーンを同じPMV環境に空調制御した場合のPPVのシミュレーションが可能である。図12内の表の数値はPMV=0, PMV=0.3

の時の各VAVゾーンのPPV試算値を、グラフはPMVを0から0.3に変化させた場合の各VAVゾーンのPPVの増加量を示している(グラフのPPV値は、表の数値の1の位を四捨五入して、PPV増加傾向をゾーン間で比較しやすくしている)。PMV=0ではPPV=0%あるいは10%、PMV=0.3ではPPV=20%あるいは30%となっているゾーンが多いが、NW-2のようにPPVがほとんど変化せず、居住者負担が少ないまま、より暖かい省エネルギー環境を許容できるゾーンや、SW-1のようにPPVが大幅に増加し、居住者の快適性を大きく損なうゾーンがあることが分かる。

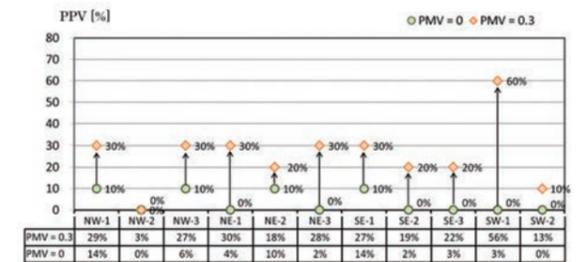


図12 PMV=0, 0.3のPPV

### 5.4.2 PPVを目標値とする室温設定値の検討

「暑い」申告者率であるPPVを任意の同じ値とする室温設定値のシミュレーションも可能である。例えば図13のように、各VAVゾーンのPPVを20%とする環境のPMV(PMV\_20%)を各々の環境満足度モデルから逆算し(図中丸印)、このPMV\_20%に対応する空気温度Ta\_20%を5.3.2(図11(B)右図の説明)で示したように算出すればよい。

各VAVゾーンのPPVを10%とするPMV\_10%を求め、各々のPMV\_10%に対応する室温を推奨室温設定値(0.5℃単位の概数)として試算した結果を図14に示す。室温の試算では、5.2で述べた環境条件と表3の相対湿度平均値を使用してv=0.1m/s, RH=62%, M=1.0met, Icl=0.5cloとし、TrはTaと等しい(放射影響が少ない)とした。図14を見ると、各VAVゾーンのPPVが10%となる室温設定値は、25.5℃が2ゾーン、26.0℃が5ゾーン、26.5℃が3ゾーン、27.0℃が1ゾーンと一律ではなく、最大1.5℃の幅がある。

ここで、PMV\_10%の全ゾーン平均値PMVである0.1(上記試算条件の室温換算値で約26.1℃に相当)に全ゾーンを一律に制御した場合の各ゾーンのPPVを試算してみる(図15)。NW-1やSE-1のゾーン居住者のPPVが20%に近いのに対し、NW-2やSW-2ではPPVは0%付近であり、同じ環境に対するゾーン間の温冷感の違いが大きいことが分かる。図14のようにモデルに応じてゾーン居住者に適した室温設定値を設定することで、環境満足度が極端に低い(「暑い」申告者率が極端に多い)VAVゾーンがないような空調の制御設定値を検討することができる。

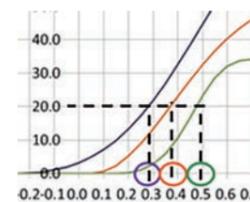


図13 PPV一定時のPMV

※横軸:PMV, 縦軸:PPV

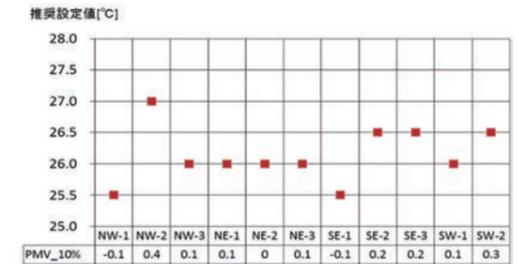


図14 PMV\_10%と推奨室温設定値

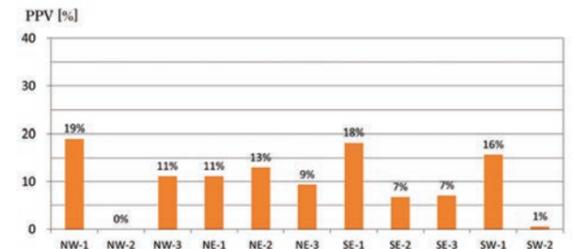


図15 PMV=0.1(室温換算値26.1℃相当)で一律制御した場合のPPV

## 6. まとめ

居住者の実際の温冷感の感じ方を反映する室内環境評価を実現するために環境満足度モデルを開発した。実オフィスの空調システムから収集した温冷感申告と環境情報を利用してVAVゾーンごとの環境満足度モデルを生成し、これを活用したシミュレーションにより、各ゾーン居住者の温冷感に適した制御設定値を設定することで、空調環境を一定の品質(環境満足度)に維持できる可能性を示した。今後は、環境満足度を目標値とする空調制御の検証実験や、省エネルギーと環境満足度との最適制御、居住者負担の少ないデマンドレスポンス方策などへの活用検討を進めていきたい。なお、長期に渡る実オフィス収集データの分析検討により、環境満足度モデルは季節推移とともに変化することが分かっている。モデル更新の適切な周期や自動更新手法について検討を進めている。

### <参考文献>

- (1)川口玄, 西原直枝, 羽田正沖 他:室内環境における知的生産性評価(その8)採涼手法の導入による温熱環境満足度の向上が知的生産性に与える影響, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集Ⅲ:2015-2018, 2008.8
- (2)国土交通省 健康・快適なビルを認証へ ~健康性, 快適性等に関する不動産に係る認証制度のあり方についてのとりまとめ~:<[http://www.mlit.go.jp/report/press/totikensangyo05\\_hh\\_000149.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/totikensangyo05_hh_000149.html)>, 2018/12/10参照

- (3) 立岩一真, 村澤達:次世代空調システムに向けた「8つのトライ」 –クラウドを利用した温冷感申告型空調システムの検討–, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集Ⅲ: 37-40, 2016.9
- (4) 大曲康仁, 太宰龍太, 鈴木晃弘 他:温冷感申告対応空調システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集:41-44, 2016.9
- (5) 空気調和・衛生工学会 温熱環境委員会:我慢をしない省エネへ –夏季オフィスの冷房に関する提言– 報告書, 2014
- (6) 空気調和・衛生工学会編著:新版 快適な温熱環境のメカニズム 豊かな生活空間をめざして 改訂2版, 丸善:2006.3.20
- (7) Joyce Kim, Yuxun Zhou, Stefano Schiavon, et al.: Personal comfort models: Predicting individuals' thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning, Building and Environment 129(2018) 96-106
- (8) 大曲康仁, 水高淳, 太宰龍太 他:居住者に「快適」を提供する温冷感リクエスト型空調の開発, アズビルテクニカルレビュー:25-30, 2018.4
- (9) 三浦真由美:室内環境制御とHuman in the Loop, 第61回自動制御連合講演会:388-392, 2018.11

<著者所属>

- 三浦 真由美 技術開発本部商品開発部
- 上田 悠 技術開発本部商品開発部
- 宇野 侑希 AIソリューション開発部
- 太宰 龍太 ビルシステムカンパニー  
マーケティング本部IBシステム部

# 高度なエネルギー管理と快適な空間を提供する savic-net™ G5システムの統合コントローラ

## The savic-net G5 Supervisory Controller for Advanced Energy Management and Comfortable Indoor Spaces

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

深浦 敦  
Tsutomu Fukaura

キーワード

savic-net G5, エネルギー管理, 省エネルギー, 快適性, 統合制御

地球温暖化防止やエネルギー安定供給の観点で、建物のエネルギー利用では持続的かつ高度なエネルギー管理が求められる。さらに業務用ビルでは、知的生産性に配慮した快適空間の提供が必要である。これらの要求は状況によっては相反することがあり、各種設備機器の個別制御だけでは両立させることができない。両立させるためには、ビル全体の状態を総合的に判断し、複数の機器を最適に制御する統合制御が必要である。その統合制御のアプリケーションを提供していくための様々な先進機能を基盤に備えたsavic-net™ G5の統合コントローラを開発した。

To prevent global warming and ensure a stable energy supply, sustainable and advanced energy utilization management is required in buildings. In addition, offices require a comfortable space to promote intellectual productivity. Since these requirements may be contradictory, it is impossible to satisfy both using only individual controls for various types of equipment. In order to satisfy both requirements, it is necessary to understand the state of the entire building and to exert integrated, optimal control of multiple types of equipment. We have developed a supervisory controller with various advanced functions for savic-net G5 as a foundation for providing integrated control applications.

### 1. はじめに

第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)にて、地球温暖化対策の国際枠組みが採択される(パリ協定)など、温室効果ガス排出量の削減は重要な課題である。ビル業界においても、エネルギーの使用の合理化等に関する法律(省エネ法)や東京都環境確保条例によってCO<sub>2</sub>排出量の報告や省エネルギー対策が必要となっている。また2018年7月には第5次エネルギー基本計画にて再生可能エネルギーの主力電源化が明記され、バーチャルパワープラント(VPP)やダイヤモンドリスポンス(DR)への対応が推進されている。実際に記録的猛暑により電力の需給逼迫でDRでの対応が求められるなど、省エネルギーだけでなく高度なエネルギー管理の重要性が高まっている。

一方で近年は、業務用ビルにおいても知的生産性の向上やストレス軽減の観点で、室内環境の快適性への関心が高くなっている。また多くの企業が働き方改革を推進しており、柔軟な働き方を実現する快適空間が求められている。

これらの要求は状況によっては相反することがあり、各種設備機器の個別制御だけでは両立させることができない。

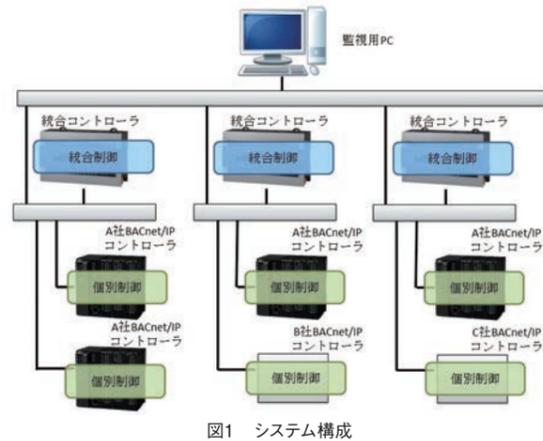
両立させるためには、ビル全体の状態を総合的に判断し、複数の機器を最適に制御する統合制御が必要である。また経済産業省の省エネルギー技術戦略2016において、ビルエネルギーマネジメントシステム(BEMS)による統合制御が重要技術として挙げられている。

新ビルディングオートメーションシステムであるsavic-net G5の統合コントローラは、統合制御を実現することを目的として開発した製品である。統合コントローラによる統合制御を実施するためには、接続されるコントローラのベンダによらずデータを取得でき、高速かつ信頼性が高くなければならない。また、制御対象機器が増えてもエンジニアリングが容易であることが望ましい。統合コントローラは「マルチベンダ対応」「データの高速スキャン・変化蓄積」「統合コントローラ間の情報共有」「統合コントローラの二重化」といった機能を基盤に備え、様々な新しいアプリケーションを継続的に提供可能な製品として開発した。

本稿では、3, 4, 5, 6章で統合制御を実現するために開発した基盤機能について説明し、7章でアプリケーションの例として電力デマンドの概要を説明するとともに、基盤機能の効果について報告する。

## 2. システム構成

savic-net G5のシステム構成について図1に示す。一般的なビルシステムでは空調、照明、電気などの設備ごと、またはフロアごとにサブシステムを構築する。統合コントローラはサブシステムごとに設置され、サブシステム内の複数のコントローラを監視する。監視用PCは、複数の統合コントローラの情報をまとめてシステム全体のユーザーインターフェースを提供する。



## 3. マルチベンダ対応

ビルシステムで監視する対象の設備には、空調、照明、電気などの設備があり、大規模なシステムの場合はそれぞれの設備を異なるベンダが監視することが一般的である。システム全体の統合制御を行うためには、これら複数のベンダと接続し、どの設備に対しても同様に制御ができる必要がある。

複数のベンダを対象とする場合、ベンダによって通信プロトコルが異なることがある。また、ベンダによって機能の違いがあるため、同様の機能を提供するためには差異を吸収する仕組みが必要である。

本章では、複数のベンダと接続して統合制御を行うために開発した仕組みについてその概要を説明する。

### 3.1 複数通信プロトコル

複数の通信プロトコルに対応するための仕組みを、図2に示す。監視対象の機器やセンサのデータ(状態/値)など入出力のそれぞれをポイントという概念で管理する。アプリケーションはポイントにアクセスすることで監視対象の情報の取得や、監視対象の操作を行うことができる。アプリケーションと通信機能は、ポイント機能の層で分離されているため、アプリケーションは通信プロトコルの違いを意識せずに動作することができる。

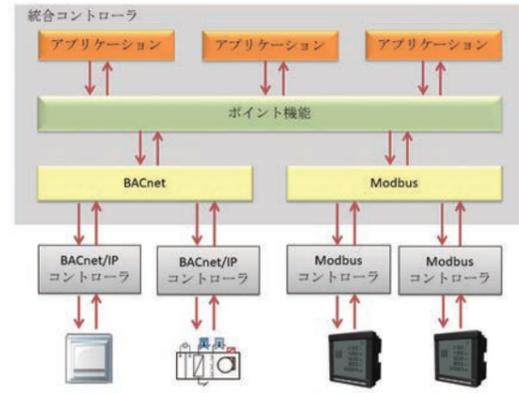


図2 複数通信プロトコルの仕組み

### 3.2 代行機能

複数のベンダと接続する場合、使用する通信プロトコルやコントローラの種類によって、機能に差があることがある。例えば、BACnetのポイントオブジェクトには、ポイントオブジェクトに対する操作に対してプライオリティ管理を行うことができるが、Modbus™にはそのような機能は定義されていない。アプリケーションの入出力となるポイントに機能差があると、制御で実現できることに差が出てしまう。

そこで、コントローラが持っていない機能は統合コントローラで機能の代行を行う。アプリケーションからは、すべてのポイントが同じ機能を持つものとして扱えるので、コントローラの機能差に関係なく制御を行うことができる。

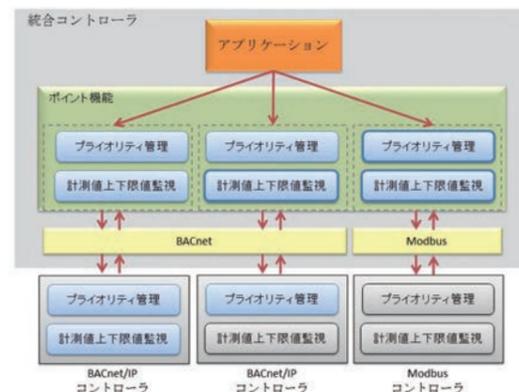


図3 代行機能の仕組み

## 4. データの高速スキャン・変化蓄積

統合コントローラで正しく制御を行うためには、監視対象の機器やセンサのデータ(状態/値)を正確に知る必要がある。室内温度のように変化が少ないものは1分程度の周期で値を確認できれば良いが、電力などの変化が激しいものはより速い周期で確認が必要となる。本章では、監視対象のデータ(状態/値)を正確に管理するための仕組みについてその概要を説明する。

データ・スキャンの仕組みを図4に示す。統合コントローラは、監視対象のコントローラのデータをスキャンすること

で、監視対象の状態を取得している。BACnetやModbusなどの通信機能は、各コントローラに対して並列にデータのスクランを行う。スクランしたデータはポイント機能のキューに積まれる。ポイント機能はキューに積まれたデータを順次ポイントの状態に反映する。このようにポイント機能と通信機能を分離することで、ポイント機能(計測値上下限値監視、プライオリティ管理等)の負荷に影響を受けずに高速にスクランを行うことができる。統合コントローラは、最短1秒周期でデータのスクランを行うことが可能であり、変化が激しいデータを正確に監視することができる。

また、ポイントの状態を更新する際、状態が変化していた場合にその状態と変化を検出したタイムスタンプをセットで蓄積することで、すべての変化を正確に記録することができる。

スクラン周期や変化蓄積の件数はポイントごとに指定できるため、監視対象の用途に応じた適切なスクラン周期と変化蓄積の件数を指定することができる。

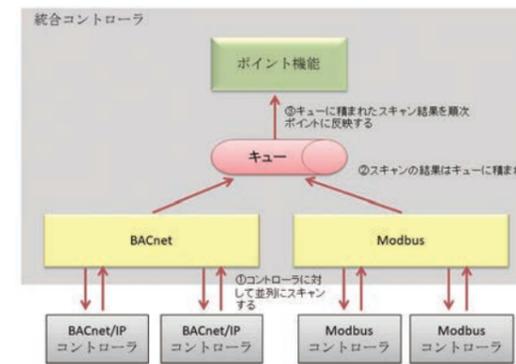


図4 データ・スキャンの仕組み

## 5. 統合コントローラ間の情報共有

サブシステムをまたがるシステム全体の統合制御を統合コントローラで実施するためには、統合コントローラ間の情報共有が必要である。

従来のシステムでは、共有する必要のある情報を個々の統合コントローラに設定することで実現していたが、設定作業をオフラインで行わなければならない場合、エンジニアリング作業によるシステムの無監視状態が発生する。また、共有する情報が大量にある場合はエンジニアリングコストが増大するという課題があった。

本章では、これらの課題を解決して、統合コントローラ間の情報共有を行うための仕組みについてその概要を説明する。

### 5.1 物理構成の隠蔽

統合コントローラ内のすべてのアプリケーションは基盤機能をおしてデータのやりとりを行う。どの統合コントローラにどのポイントが存在するかの物理構成の情報は、基盤機能が管理し、基盤機能が物理構成を意識したデータ送受信を行うため、アプリケーションは、物理構成を意識せ

ずにシステム全体のどのポイントに対してもアクセスすることができる。

また、ポイントの状態/値が変化した場合、アプリケーションは、基盤機能をおして即時変化を取得することができるため、制御の応答性を高めることが可能となった。これにより、アプリケーションの配置に制約がなくなり、システム構築を容易に行うことができる。

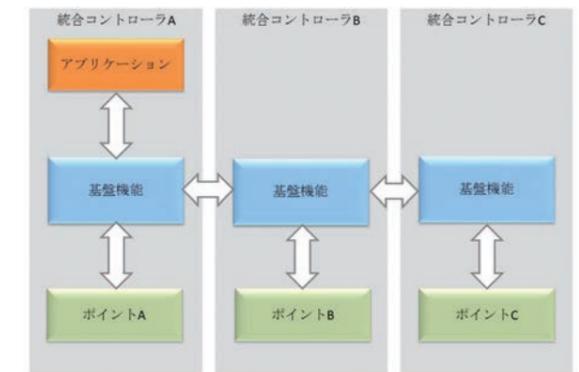


図5 アプリケーションとポイント間のデータのやりとり

### 5.2 構成情報の管理

構成情報を管理する仕組みを図6に示す。統合コントローラの基盤機能は、自分が監視しているコントローラのポイント情報を保持している。アプリケーションから自分が保持していないポイント情報の問い合わせがあった時は、他の統合コントローラに対して問い合わせを行う。ポイント情報を保持している統合コントローラからの応答を、構成情報として保存しておき、次回そのポイントの問い合わせをする際にはこの構成情報をもとにやりとりを行う。構成情報を保存しておくことで、他の統合コントローラに対する問い合わせを省略し、高速にやりとりすることができる。この仕組みにより、エンジニアリングを行わなくとも、複数の統合コントローラ間で情報共有が可能となった。

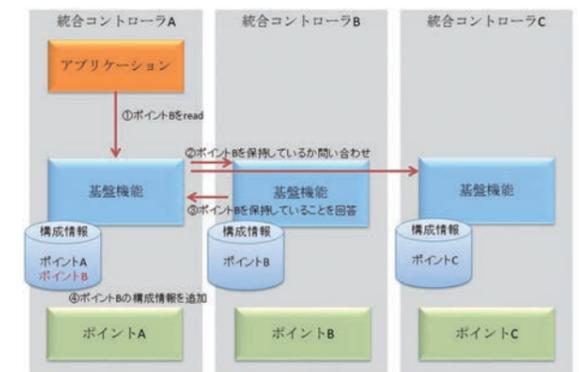


図6 構成情報を管理する仕組み

## 6. 統合コントローラの二重化

DHC (District Heating and Cooling:地域冷暖房)のシステムなどで統合制御を行う場合、統合コントローラには高い信頼性が求められる。信頼性を高めるためにコントローラを二重化するのが一般的であるが、単純に二重化すると、接続する他デバイスは二重化を意識して接続することが必要となる。本章では、他デバイスが二重化を意識せずに接続可能とするための仕組みについてその概要を説明する。

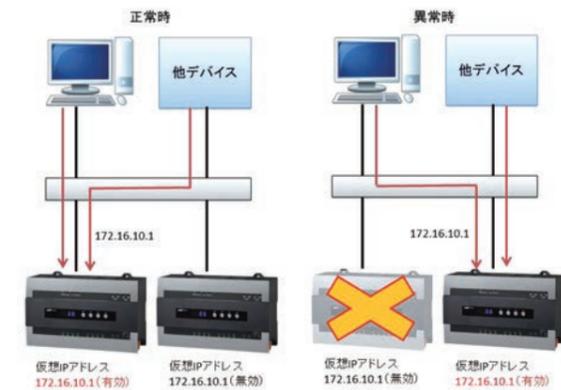


図7 二重化の動作イメージ

二重化の動作イメージを図7に示す。他デバイスから1台のコントローラとして見えるように、2台の統合コントローラが共通の仮想IPアドレスを持つ。一方のみがそのアドレスを有効とし、他方は無効とする。アドレスを有効としているデバイスが異常となった際には、他方がアドレスを無効から有効に切り替えて動作を継続する。この仕組みにより2台の統合コントローラが共通のIPアドレスを使用することができる。他デバイスからは、1台のコントローラとして見えるため、他デバイスは二重化を意識することなく接続することができる。

## 7. 電力デマンド

本章では、savic-net G5の統合制御アプリケーションとして開発した電力デマンドの概要を説明するとともに、基盤機能の効果について報告する。

### 7.1 電力デマンドの概要

電力会社は、取引用電力量計によって電力使用量の計測を行っている。この電力量計は、デマンド時限(30分間)の電力使用量を計測し、平均使用電力を算出する。この平均使用電力がデマンド値と呼ばれ、デマンド値が契約電力を超えると、超過割増料金を請求される場合、または契約電力の引き上げを要求される場合がある。

電力デマンドは、デマンド時限終了時刻におけるデマンド値を予測し、それを予測電力とする。予測電力が目標電力以下になるように、空調の停止・起動、給気温度設定値の調整やユーザーへの警報通知を行う。目標電力に契約電力以下の値を設定することで、契約電力を超過しない範囲で設備の運転を行うことができる。また、目標電力を超

えないように制御することで、ピーク電力を抑制することができる。電力の安定供給に寄与することができる。

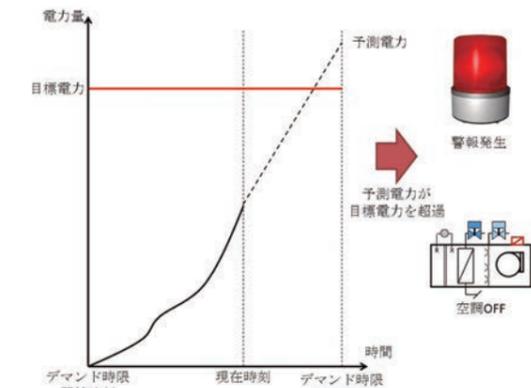


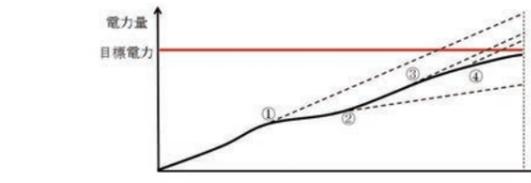
図8 電力デマンドのイメージ

### 7.2 快適性の低下を抑えた電力デマンド

電力デマンドで空調の停止や給気温度設定の調整を行うと、快適性が低下する可能性がある。そこで、制御対象に優先度を指定できるようにすることで、快適性の低下を抑えた制御を行う。また、優先度が同じ制御対象に対してはローテーションをすることで特定のエリアだけで快適性が低下することを防止する。

制御対象とする機器は、最大15グループに分類することができ、グループごとに優先度を指定することができる。予測電力が目標電力を超過する場合、優先度が低いグループから段階的に消費電力の抑制を行う。複数のグループに対して同じ優先度が設定されている場合、優先度が同じグループに対してはローテーションを行う。

電力デマンドの動作例について図9に示す。①の時点で予測電力が目標電力を超過しているため、優先度に従って「共用部」と「事務エリアA」の消費電力を抑制する。②の時点で予測電力が目標電力を下回るため「事務エリアA」の消費電力の抑制を取りやめる。③の時点で再び予測電力が目標電力を超過する。「事務エリアA」と「事務エリアB」は同じ優先度であるため、今度は「事務エリアB」の消費電力の抑制を行う。④の時点で依然として予測電力が目標電力を超過しているため、さらに「事務エリアA」「応接エリア」に対して消費電力の抑制を行う。



|                 | ①       | ②       | ③       | ④       |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| 応接エリア (優先度「高」)  | 温度: 24℃ | 温度: 24℃ | 温度: 24℃ | 温度: 26℃ |
| 事務エリアB (優先度「中」) | 空調: ON  | 空調: ON  | 空調: ON  | 空調: OFF |
| 事務エリアA (優先度「中」) | 空調: ON  | 空調: OFF | 空調: ON  | 空調: OFF |
| 共用部 (優先度「低」)    | 空調: ON  | 空調: OFF | 空調: OFF | 空調: OFF |

グループ設定

図9 電力デマンドの動作例

### 7.3 統合制御

電力デマンドが扱う機器とコントローラの構成を図10に示す。電力デマンドの制御対象は、複数のコントローラにまたがって存在するため、個別のコントローラで制御すると各機器の優先度をシステム全体で管理することができない。

統合コントローラは、特別なエンジニアリングを行わなくても、複数の統合コントローラ間で情報共有が可能なため、電力デマンドのアプリケーションは、サブシステムを横断した複数の機器を制御対象とできる。また、マルチベンダの対応により、異なるベンダのコントローラで監視している機器も同様に制御対象として扱うことができる。

1台の統合コントローラがシステム全体の統合制御を行うことができるため、空調や照明など異なる設備を横断して機器の優先度に応じた制御を行うことができる。

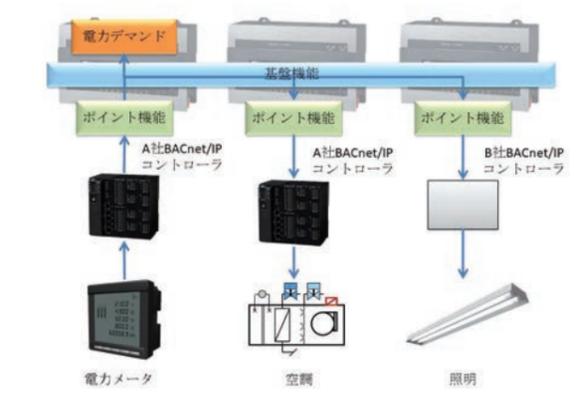


図10 電力デマンドの統合制御

### 7.4 電力予測

電力予測の仕組みを図11に示す。電力予測は、監視対象とする電力量の履歴をもとに予測を行う。予測には現在時刻からサンプリング時間だけの履歴を使用する。この履歴に対して、最小二乗法で線形近似を行うことでデマンド時限終了時刻におけるデマンド値を予測する。

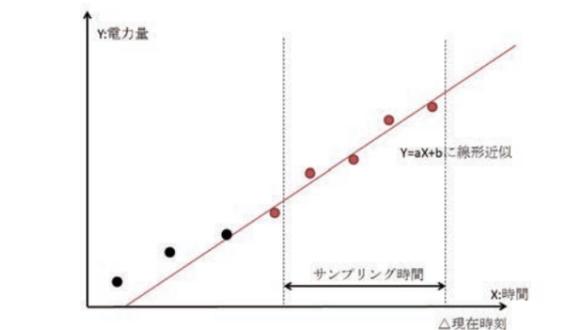


図11 電力予測の仕組み

一般的なビルシステムでは1分程度の周期で履歴を蓄積している。サンプリング時間は通常1、2分であるため、1分程度の周期の履歴では予測の精度が低い。統合コントローラでは、データの高速スキャン・変化蓄積によって、監視対

象の電力量の履歴を正確に記録することができる。また、スキャン周期はポイントごとに指定することができるため、スキャン周期を短く設定することで、リアルタイム性を向上させることができるとともに、予測に使用するデータ数を増やし、予測精度を向上させることができる。

## 8. おわりに

savic-net G5の統合コントローラは、統合制御を行うためのコントローラとして開発した。「マルチベンダ対応」「データの高速スキャン・変化蓄積」「統合コントローラ間の情報共有」「統合コントローラの二重化」といった機能により、効率よく開発を行うことができる。今後も、統合制御によって省エネルギーと快適空間を実現するアプリケーションを拡充していく予定である。

### <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。Modbus is a trademark and the property of Schneider Electric SE, its subsidiaries and affiliated companies.

### <著者所属>

深浦 敦 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1部

# 建物ライフサイクルを支える savic-net™ G5システムのリモートコントローラ

## Technical Features of the Newly Developed General Controller and Compact Remote I/O Module for the savic-net G5 Building Management System

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

古山 香子  
Kyoko Furuyama

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

石井 直樹  
Naoki Ishii

キーワード  
savic-net G5, ジェネラルコントローラ, 小型リモート I/O モジュール

2020年東京オリンピック・パラリンピックを機に進む都心の大規模再開発とともに、既設建物の改修需要も増加しており、2020年以降も継続することが見込まれている。これらの国内の新築建物の建設および既設建物の改修現場の計装工事における労働力不足などの課題解決を目的として、savic-net™ G5システムのラインナップにジェネラルコントローラおよび小型リモートI/Oモジュールを追加したので、それらの技術的特長を述べる。

In addition to large-scale downtown redevelopment of property spurred by the 2020 Tokyo Olympic and Paralympic Games, demand for renovation of existing buildings has also increased and is expected to continue even after 2020. To solve problems such as labor shortage in the construction of new buildings and in the instrumentation of renovations at the site of existing buildings in Japan, a general controller and a compact remote I/O module have been added to the savic-net G5 system product lineup. We describe their technical features.

### 1. はじめに

当社では、グローバル市場でのさらなる市場拡大を目指し、オープンネットワーク対応を強化した新ビルディングオートメーションシステムであるsavic-net G5をリリースし、2016年に海外販売を開始した。

一方国内市場では、東京オリンピック・パラリンピックをはじめとした大規模再開発や、既設建物の改修案件の増加が見込まれている。これらの建物では、地球温暖化防止やエネルギー安定供給の観点で、持続的かつ高度なエネルギー管理とともに、知的生産性に配慮した快適空間の提供が求められている。しかしながら、労働人口の減少や働き方改革の推進に伴い、計装工事においては、現場の労働力不足が課題となっている。

本稿では、省エネルギーや快適空間の提供に貢献するとともに、労働力における課題解決として、現場の作業工数低減を目的の1つとして開発したsavic-net G5システム(図1)

の新ラインナップであるジェネラルコントローラ(以下、WJ-1111)および小型リモートI/Oモジュール(以下、RJ-12)について述べる。

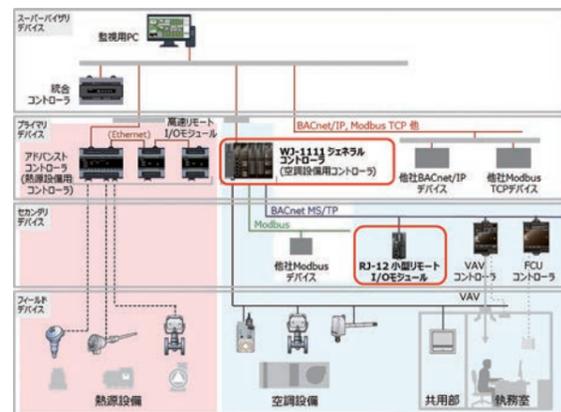


図1 savic-net G5 システム構成

### 2. WJ-1111 および RJ-12 の概要

#### 2.1 WJ-1111

WJ-1111(図2の左手前)は、savic-net G5システムの中で空調機の制御やVAV (Variable Air Volume:変風量)装置などの設備機器の監視、制御を行う汎用コントローラである。入出力信号は、当社の従来製品との互換性を維持した連結型の直結I/Oモジュール(以下、RY51)を19種類用意しており、任意の組合せで最大16台まで接続できる。またBACnet, Modbus™などの国際標準の通信プロトコルに対応し、オープンネットワーク化したことで、自社・他社製品を問わず様々なメーカーの各種設備機器の接続が可能である。

#### 2.2 RJ-12

RJ-12(図2の右手前)は、BACnet通信に対応したリモートI/Oモジュールである。制御盤内などの空きスペースに設置可能な小型サイズであり、建物内の各種設備機器の近くに分散設置することで、省配線が可能となる。入出力信号種別により、5種類のラインナップを用意している。



図2 WJ-1111, RJ-12の外観

以降では、現場での作業工数低減を実現するための本製品の技術的特長として、施工工数の低減手法、エンジニアリングの簡易化に加え、既設建物の改修を考慮した従来製品との互換性について述べる。

### 3. 施工工数の低減手法

#### 3.1 通信接続による配線工数の低減

空調機制御は、コントローラと各種設備機器と様々な信号を取り合うことで監視、制御を行う。コントローラと各機器との接続は、信号線を個別に接続する、いわゆるブロー引き配線で行うことが多い。この場合、コントローラの入出力信号は多数あるため、ケーブルなどの工事部材費に加えて、配線施工の工数も増加する。

工事部材費と配線施工の工数を低減するためには、コントローラと各機器との間のブロー引き配線を減らす必要がある。このため、I/Oモジュールを各機器の近くに分散配置できるリモートI/OモジュールとしてRJ-12を開発した。

RJ-12はWJ-1111とBACnet通信で接続され、これを各機器の近くに分散設置することにより、ブロー引き配線を低減することができる(図3)。

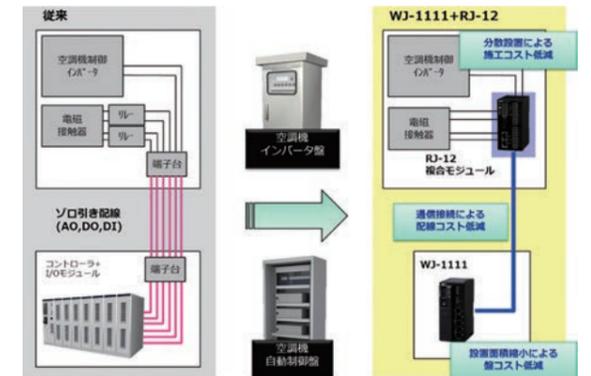


図3 RJ-12の分散配置による省配線

#### 3.2 RJ-12における分散設置に適した設計

以下では、3.1で述べた分散設置を行うことを目的としたRJ-12の設計の特長を述べる。

##### 3.2.1 小型化

RJ-12を分散設置で各機器の近くに置く際に、制御盤内や動力盤などのわずかな空きスペースに設置するため、取付け面積および設置制約が少ない小型の製品であることが求められる。

RJ-12は、配線施工を考慮した端子形状および配列の検討と、寿命への影響を低減した部品配置の熱解析による検証を行うことにより、当社の従来製品よりもスリムな横幅50mmとし、取付け面積比で約30%小型化した(図4)。また従来製品は、製品の左右に各20mm、上下に各50mmの施工・メンテナンス用スペースを設けるという制約があったが、RJ-12は不揮発性メモリによる電池レス設計により製品左右のスペースは不要とし、上下のスペースも端子形状およびその配列の見直しにより35mmに低減した(図4)。

##### 3.2.2 入出力ラインナップの最適化

RJ-12を分散設置で各機器の近くに置く際に、製品を小型化するとともに設備機器側の信号種別に合った入出力信号を持つ製品であることも求められる。

RJ-12のラインナップとして、空調機のインバータ制御アプリケーションに最適化した複合モジュールと、様々な入出力種別にソフトウェア設定のみで変更可能なユニバーサル入出力(UIO)モジュールを開発した。以下では各モジュールについて述べる。

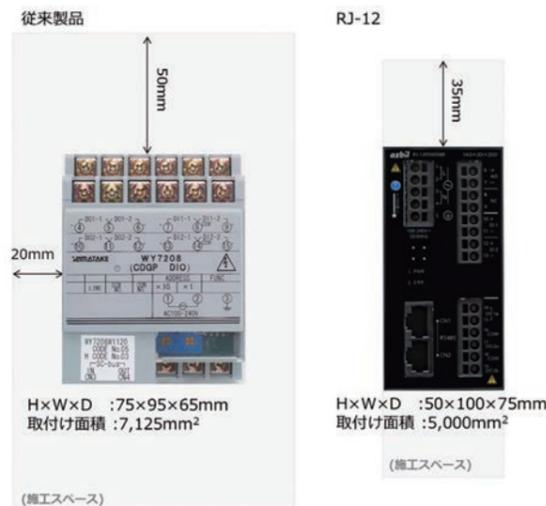


図4 RJ-12と従来製品のサイズ比較

これにより、前述したメンテナンススペースの削減に寄与するほか、配線施工時のねじ締め作業を不要とし、配線作業を効率化するとともに、メンテナンスにおいてもねじ端子の増し締め作業を不要とする。

また、制御盤内では、電源を渡り配線で接続することが多く、従来のねじ式端子台では、端子の共締めによる渡り配線を行っていたが、WJ-1111、RJ-12では、渡り配線専用の端子を設けることで、渡り配線を可能としている。



図5 電源端子台の構成

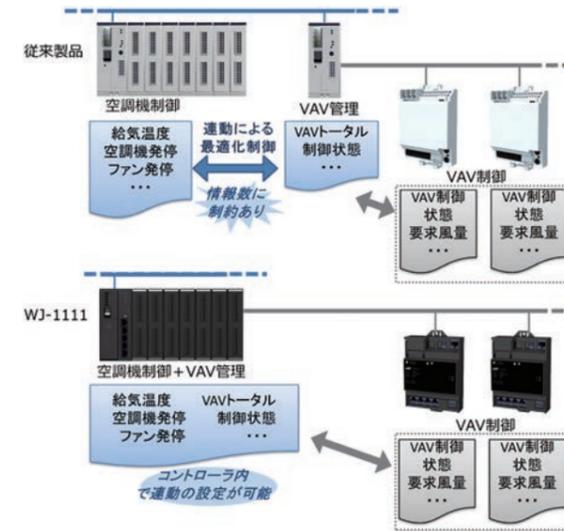


図6 空調機とVAVの連携制御

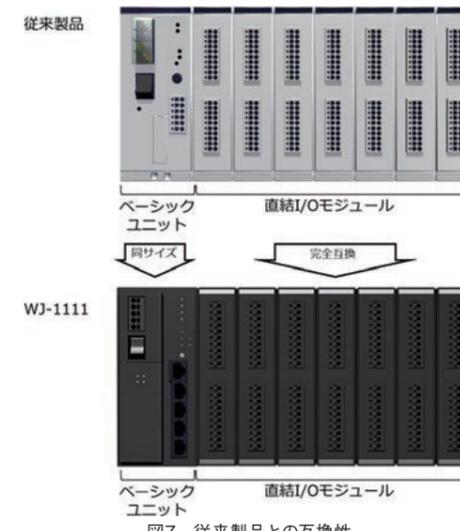


図7 従来製品との互換性

(1) 複合モジュール

これまでの空調機制御用コントローラと設備機器との信号の取り合いの分析では、インバータ周波数設定信号(アナログ出力)とファン発停(デジタル出力)と故障状態(デジタル入力)が多く、これらの信号を1つのモジュールに組み込んだ複合モジュール(アナログ出力+デジタル入出力)を開発した。これにより、複合モジュールを設備機器側の動力盤などに分散設置することによる「通信接続による配線コスト低減」(図3の右下)に加え、設備機器側のリレーや端子台が不要となることによる「分散設置による施工コスト低減」(図3の右上)を可能とした。

(2) UIOモジュール

従来製品は、設置後に入出力種別を変更するには、配線の引き直し作業や製品そのものの変更が必要であった。そのため、設定などにより入出力種別の変更が可能な製品が望まれていたが、これまで、信号種別毎の専用回路が必要になるため回路構成が複雑になり、特に小型の製品への適用が困難であった。

そこで、当社独自のユニバーサル機能を有するUIOチップ<sup>(1)</sup>を使用することで、シンプルな回路構成でユニバーサル入出力機能を実現し、アナログ入力(電圧、電流、測温抵抗体)・デジタル入力およびアナログ出力(電圧、電流)の各種信号に設定可能なUIOモジュールを実現した。

1モジュールに2点の入出力(電圧入力、電流入力の場合は最大4点)を備えており、ソフトウェア設定だけで入出力信号の変更が可能となり、現場作業の負担軽減に貢献できる。

3.3 端子台のねじレス化

従来製品の電源端子はねじ式端子台であったが、WJ-1111、RJ-12ではスプリング端子台を採用し、製品のすべての端子台をスプリング端子台に統一した(図5)。

3.4 その他の施工上の考慮

制御盤全体でのコスト低減や分電盤や動力盤へ容易に追加設置できるようにするため、WJ-1111、RJ-12の電源は、AC100~240Vのワイド入力電圧対応とすることで、外付けのトランスやスイッチング電源などの機器を不要とした。

4. 空調機制御機能とVAV管理機能の一体化によるエンジニアリングの簡易化

オフィスビルの空調では、省エネルギーや快適性の向上を目的として、VAV方式の採用が主流となっている。VAV方式では、空調機とVAVとが連携して、給気温度最適化制御(ロードリセット制御)やファン回転数最適化制御などを実現している。

当社の従来システムでは、VAV管理用コントローラが複数のVAVコントローラの管理を行うとともに、空調機コントローラとの間で情報を受け渡すことで、空調機とVAVの連携制御を実現していた。しかしこの場合、受け渡す情報の数に制約があり、複雑なVAV計装を行う場合には制約をオーバーしてしまい、コントローラを増設する必要があった。また、連携するコントローラそれぞれに正しく設定を行う必要があるため、エンジニアリングをする際の労力が多大となっていた。

この課題解決のため、WJ-1111では空調機制御とVAV管理の両方の機能を一体化し、VAV管理用コントローラを不要にしている。これにより、WJ-1111は、VAVコントローラを直接接続することができ、また、WJ-1111 1台で空調機とVAVの設定を行えるため、コントローラ間の受け渡しの制約を気にせずに連携制御を実現できるようになり、エンジニアリングの労力を低減することが可能となった(図6)。

なお、WJ-1111はオープンネットワークに対応したことにより、他社のBACnet MS/TP対応のVAVコントローラを接続し、空調機との連携制御を行うことも可能である。

5. 既設建物の改修を考慮した設計

2020年の東京オリンピック・パラリンピック後には、バブル期(1990年代)に建築された建物の改修が多数計画されている。5章では、3、4章で述べた現場の作業工数低減に加えて、既設建物の改修を考慮した製品の特長を述べる。

5.1 サイズの互換性

既設建物の改修案件において、従来製品から新製品に置き換える場合に製品サイズが異なると、設置場所である制御盤などに変更が必要となり、新たな設計や施工工数がかかるため、製品サイズは同一であることが望ましい。一方、前述の空調機制御機能とVAV管理機能の一体化を実現するにはCPUやメモリ等の増強が必要であり、従来製品よりも消費電力が増加する。

WJ-1111は、熱解析による、内部発熱分布を考慮した部品配置にすることで、従来製品の複数の機能を一体化しながら、従来製品と同一筐体サイズを実現した。これにより、既設建物の改修案件において、設置スペースを変更することなくコントローラを更新することが可能である。同時に、製品取付け位置を新旧製品で同一としたため、設置場所の新たな加工も不要とした。

5.2 入出力の互換性

WJ-1111は、入出力を担うI/Oモジュール部分RY51を従来製品と完全互換としている。3で述べたとおり、従来製品では入出力信号をゾロ引き配線で行うことが多いため、信号配線の引き直しを行う場合には、多大な施工工数が必要となる。入出力部を現行製品と完全互換としたことにより、接続されている設備機器との配線接続を変更することなくコントローラを更新することが可能である(図7)。

なお、I/Oモジュールが交換周期を迎えていない場合には、ベーシックユニットのみをWJ-1111に変更することができるため、最低限の工数でコントローラを更新することが可能である。

6. おわりに

今回、建物のライフサイクルを支えるsavic-net G5を構成するジェネラルコントローラWJ-1111および小型リモートI/OモジュールRJ-12を開発したが、savic-net G5は現在も開発を継続している。特に、5章で述べた既設建物の改修に対して、旧システム部分と新システム部分を共存させるための各種インターフェース類の開発を行うことで、さらなる工数低減を図ることを計画している。

今後もsavic-net G5のラインナップを拡充し、建物のライフサイクルに応じた空調システムを継続的に提供するとともに、省エネルギーと快適空間の実現に貢献していきたい。

<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。  
Modbus is a trademark and the property of Schneider Electric SE, its subsidiaries and affiliated companies.

<参考文献>

(1)加藤太郎 他, ユニバーサル入出力ICの開発, azbil Technical Review, 2018年4月号, pp.36-40

<著者所属>

古山 香子 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4部  
石井 直樹 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4部

# 高付加価値を提供するsavic-net™ G5システムの熱源アドバンストコントローラ

## A New Advanced Controller for Building HVAC Central Plants that Provides High Added Value

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

久保田 秀雄  
Hideo Kubota

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

関根 秀太  
Hidetaka Sekine

### キーワード

熱源アドバンストコントローラ, DDCプログラム, 熱源計装, エネルギー管理, 省施工, 省エンジニアリング

建物の重要設備である熱源機器の制御用として、当社では30年以上にわたり熱源コントローラPARAMATRIX™を販売し、様々な熱源機器の制御のノウハウを蓄積してきた。東日本大震災以降、熱源設備の構成やその運用方法が変化してきており、さらに働き方改革の観点から省施工・省エンジニアリングが必要となっている。また、世界的にもエネルギーの有効活用は重要な課題であり、従来以上に建物における熱源コントローラの重要性が増している。これらの新たなニーズに応えるために、新ビルディングオートメーションシステムsavic-net™ G5のラインナップとして、国内だけでなくグローバル市場も見据えた熱源アドバンストコントローラを開発したのでここに報告する。

For control of central plant equipment, which is an important part of a building's HVAC facilities, we have sold PARAMATRIX for more than 30 years, during which time we have accumulated know-how on various kinds of controls. In the aftermath of the Great East Japan Earthquake, the configuration and method of operating central plant equipment is changing, and furthermore, in view of the declining population, the need to improve work-life balance, etc., minimization of the labor required in installation and engineering is desirable.

In addition, since the effective utilization of energy is an important issue worldwide, the importance of controllers of central plant equipment for buildings is increasing. To meet these new needs, we have developed the Advanced Controller for building plant systems for global and domestic markets as part of the savic-net G5 new building automation system.

### 1. はじめに

当社では、長年にわたり建物の熱源設備の台数制御、圧力制御を行う熱源設備専用のコントローラであるPARAMATRIXを販売しており、建物における熱源設備の自動運転、省エネルギーに寄与してきた。そのような中、近年のビルディングオートメーション市場においては、特定のメーカーに依存しないオープンシステムが強く求められている。また、熱源設備は、東日本大震災以降、電気だけでなくガスを1次エネルギーとした熱源や蓄熱槽を利用した異種熱源混在システムが多く採用され、季節や時間帯によって運転順序を切り替える運用や、これまで以上の省エネルギー制御をする建物が増えている。さらに、建築業界全体で見ると東京オリンピック・パラリンピック需要により、

建築工事に関わる人手不足が懸念されており、働き方改革による生産性向上が要望されている。

当社はこれらの背景を踏まえ、実績のあるPARAMATRIXの機能をベースに「オープンネットワーク対応」「異種熱源混在システムへの対応」「省エネ制御」「見える化」「施工・エンジニアリング負荷低減」などを実現したsavic-net G5の熱源コントローラである熱源アドバンストコントローラの新規開発を行った。また、本製品は国内市場だけでなく「グローバル市場」への販売も行っていくため、海外特有の熱源計装への対応が可能ないように設計されている。

本稿では、熱源アドバンストコントローラにて提供する新たな機能とその実現技術について述べる。

### 2. システム概要

#### 2.1 システム構成

熱源アドバンストコントローラを使用したsavic-net G5システム構成例を図1に示す。

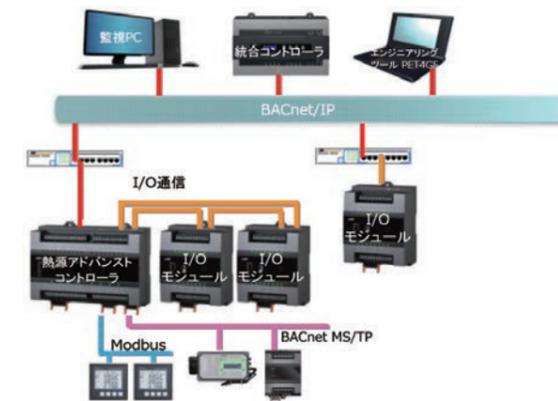


図1 システム構成図

システム構成上、熱源アドバンストコントローラには下記の特長がある。

- ・当社の統合コントローラをはじめ、様々な中央監視システムとオープンネットワークBACnetで接続できる。
- ・コントローラ本体I/Oに加え、通信接続により拡張可能なI/Oモジュールを遠方の盤内に配置することで、遠方機器からのプロ引き配線を不要とし、省配線を実現する。
- ・I/O通信のEthernet幹線をリング接続することにより、断線等の耐障害性を強化する。
- ・コントローラ本体に熱量計や電力量計等をModbus™またはBACnet MS/TPで接続することにより、積算値以外の全計測データについてもポイントとして監視できる。また、Modbus対応の冷凍機の内部情報をModbus経由で収集することにより、運用改善やメンテナンスに利用することも可能である。

#### 2.2 ソフトウェア構成

ソフトウェア構成上、熱源アドバンストコントローラには下記の特長がある。

- ・制御演算を行うDDCプログラムブロックを組み合わせたDDCプログラム(図2)にて送水圧力制御、始動時負荷制御、台数制御といった熱源制御のアプリケーションを構築できる。

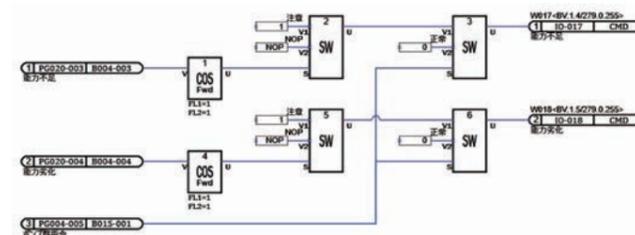


図2 DDCプログラム例

・I/O構成、ポイント構成、DDCプログラム構成を標準形番化した計装コード(表1)を用意しており、これを手配することにより、現場の計装に必要なH/W/S/W構成を入手でき、現場ごとにポイントやアプリケーションの構築が不要となる(現場では、標準形番から異なる現場計装特有部分の追加・変更のみを実施することとなる)。

表1 計装コード

WJ-1102Q①②③④⑤⑥

| ①計装タイプ      | ②機器台数 | ③台数制御方式                  | ④圧力制御/一次ポンプ変流量制御                  | ⑤その他   | ⑥電源仕様       |
|-------------|-------|--------------------------|-----------------------------------|--------|-------------|
| 1 ワンポンプシステム | 2 2台  | 3 流量1系統(熱量演算付)           | 0 なし                              | 0 固定 W | AC100 ~240V |
|             | 4 4台  | 4 流量4系統(熱量演算付, 熱量4系統加算付) | 1 比例バイパス(電流/電圧)                   |        |             |
|             | 8 8台  |                          | 3 一次ポンプ変流量制御インバータ全台+比例バイパス(電流/電圧) |        |             |
| 2 ツーポンプシステム | 2 2台  | 2 流量1系統(熱量演算付)           | 0 なし                              | 0 固定 W | AC100 ~240V |
|             | 4 4台  | 6 流量4系統(熱量演算付, 熱量4系統加算付) | 1 一次ポンプ変流量制御(負荷按分)                |        |             |
|             | 8 8台  |                          |                                   |        |             |

WJ-1102P①②③④⑤⑥

| ①計装タイプ | ②機器台数 | ③台数制御方式                  | ④圧力制御                   | ⑤その他   | ⑥電源仕様       |
|--------|-------|--------------------------|-------------------------|--------|-------------|
| 1 固定   | 2 2台  | 3 流量1系統(熱量演算付)           | 0 なし                    | 0 固定 W | AC100 ~240V |
|        | 4 4台  | 4 流量4系統(熱量演算付, 熱量4系統加算付) | 1 比例バイパス(電流/電圧)         |        |             |
|        | 8 8台  |                          | 3 インバータn台+比例バイパス(電流/電圧) |        |             |
|        |       |                          | 5 インバータ全台+ON/OFFバイパス    |        |             |

・savic-net G5システム用のエンジニアリングツールに全計装コードのコントローラデータを内包しているため、従来製品と異なり、コントローラ納入前からポイント変更・追加やDDCプログラムの追加作業が開始でき、現場調整期間の短縮が期待できる。

・エンジニアリングツールのDDCプログラムエディタ機能により、現場でも容易にDDCプログラムを構築可能である。また、各プログラムブロックの出力をグラフィカルに確認でき、従来製品に比べて制御動作の確認が格段に容易となった。

### 3. 多様な熱源計装への対応

近年見受けられるようになった多様な熱源計装や現場運用ニーズに応えるため、従来製品からの機能拡張や機能追加を行った。

### 3.1 機能拡張

#### 3.1.1 熱源機台数の拡張

東日本大震災以降、熱源設備のリスク分散とピーク電力カットのためターボ冷凍機(電気)、ガス吸収式冷凍機(ガス)、熱交換器(蓄熱槽)といった複数種の熱源設備を時間帯や季節で切替えて運用することが増え、熱源機台数が増加傾向にある。大規模物件の場合にそれが顕著となることから、本製品ではコントローラの容量を拡大することで台数制御可能な熱源機(冷凍機/ポンプ)の台数を拡張した。これにより過去最大規模の物件でも本製品で対応できるようにした。

#### 3.1.2 ポイント数の拡張

従来製品のポイント数は最大99点であり、これは標準形番のアプリケーションを実現する上では問題ない。しかし、複雑な制御アプリケーションをカスタマイズで追加したり、ポイント数の多い形番にカスタマイズ機能を追加する場合にポイントが足りなくなるケースがあり、アプリケーションを実現できなかったり、既存のポイントを削って何とか対処したというケースがあった。また、後述する海外の熱源計装では多数のポイントが必要となる。本製品では従来製品以上の計測・制御性能を確保した状態で、コントローラのポイント点数を300点に拡張した。これにより複雑な制御アプリケーションへも容易に対応できるようにした。

#### 3.2 運転順序切替への対応

従来製品では1日の中での熱源機の運転順序切替として昼/夜による切替のみを想定していた。これは昼間の負荷が大きい時間帯は能力の大きい熱源機を優先して稼働することで負荷への追従性をよくし、負荷が小さい夜間(残業時間)は能力の小さい熱源機を中心に稼働することで省エネルギーを図った機能である。

しかし、1日の中でも時間帯により、熱交換器を優先した運転順序(蓄熱優先)/ガス吸収式冷凍機を中心とした運転順序(ガス優先)/ターボ冷凍機を優先した運転順序(電気優先)というように昼/夜切替のみでは対応できない運用が要求されるようになり、従来製品では対応が難しいケースがあった。

そのため、本製品ではこれらの運用を考慮した運転順序切替機能とした。機能拡張にあたっては、昼/夜切替のみで対応可能なケースも多々あるため、それらのケースでエンジニアリング方法が変わらないように、昼/夜切替機能は既存製品のままとし、それとは別に運転順序を複数パターン(最大8)設定できるようにし、いずれかのパターンを選択することにより昼テーブル内容を目的の運転順序に切り替えられるようにした(表2)。また、運転順序パターン自体はポイントで指定できるようにすることで、中央監視からのユーザーの手動操作/タイムスケジュール/DDCプログラムからの切替を実現した。特にDDCプログラムを利用することにより、切替条件への適用に対して自由度が高く、ユーザーの多種多様な要望に応えることが可能である。切替条件、運転順序パターン数については実際のJOBでのケースに適合した上で妥当性を確認した。

表2 運転順序切替例

(1) 運転順序パターン設定

| パターン No. | ターボ冷凍機1 | ターボ冷凍機2 | ガス吸収式冷凍機1 | ガス吸収式冷凍機2 | 熱交換器 |
|----------|---------|---------|-----------|-----------|------|
| ①        | 2       | 3       | 0         | 0         | 1    |
| ②        | 3       | 0       | 1         | 2         | 0    |
| ③        | 1       | 2       | 0         | 0         | 0    |
| ⋮        |         |         |           |           |      |
| ⑧        |         |         |           |           |      |

(2) 運転順序パターン切替(タイムスケジュールの場合)

| 時間    | 運転パターン  |
|-------|---------|
| 8:00  | 運転パターン① |
| 13:00 | 運転パターン② |
| 16:00 | 運転パターン③ |
| 22:00 |         |

(3) 実際の運転順序

| 時間帯     | 運転パターン  | 運転順序    |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|
|         |         | No.1    | No.2    | No.3    |
| 8時~13時  | ①熱交換器優先 | 熱交換器    | ターボ冷凍機1 | ターボ冷凍機2 |
| 13時~16時 | ②ガス優先   | ガス吸収式1  | ガス吸収式2  | ターボ冷凍機1 |
| 16時~22時 | ③電気優先   | ターボ冷凍機1 | ターボ冷凍機2 |         |

#### 3.3 海外の熱源計装への対応

国内の熱源計装の場合、図3に示すように冷凍機と1次ポンプ・冷却水ポンプが1対1の関係になっており、冷凍機の発停により対応するポンプがシーケンス回路により連動発停する。また、自動制御メーカー(当社)が冷凍機の発停(台数制御)までを行い、ポンプとの連動発停は冷凍機メーカーが担っている。

これに対して、海外の熱源計装(日系企業を除く)の場合、図4に示すように冷凍機と1次ポンプ・冷却水ポンプが1対1ではなく、それぞれの運転機を自由に組み合わせられるようになっている。また、自動制御メーカー(当社)には冷凍機の台数制御以外に、1次ポンプ・冷却水ポンプの台数制御が求められる。

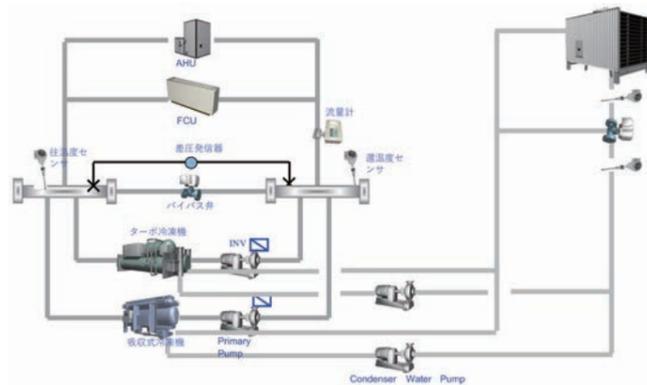


図3 日本の計装(ワンポンプシステム)

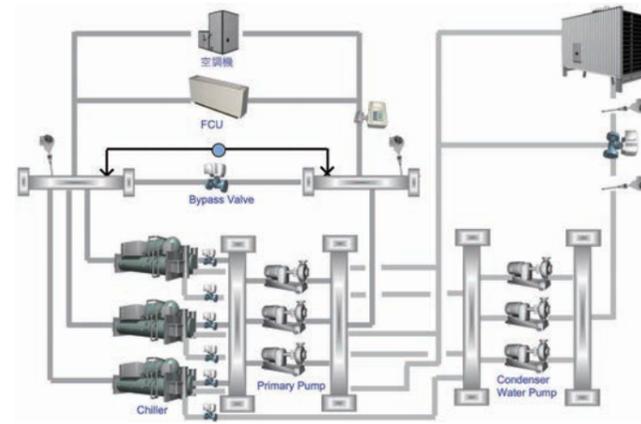


図4 海外の計装(ワンポンプシステム)

従来製品で海外の熱源計装に対応する場合、冷凍機、1次ポンプ、冷却水ポンプ、冷却塔(台数制御の必要がある場合)の台数制御のために最大4台の熱源コントローラが必要であった。また4台でデータの連携をとるために汎用コントローラが1台必要となり多台数かつ複雑な構成となっていた。そのため、本製品では制御容量と処理能力を大幅に向上させることで、従来製品では1つであった台数制御機能を持つDDCプログラムブロックを最大4つまで同時稼働可能とした。これにより熱源アドバンスコントローラ1台のみで4種類の熱源設備を同時に台数制御できるようにした。

### 4. エネルギー管理・省エネ制御への対応

現場のエネルギー管理や省エネルギー要望に応えるため、建物全体の熱源に関する消費エネルギーの見える化や新たな省エネ制御のための機能を搭載した。DDCプログラムブロックとして機能を実装することで、演算単位を熱源機個別や熱源機一括というように現場ごとに自由に組めることに加え、他のアプリケーションで演算結果を利用可能とした。

#### 4.1 冷凍機のCOP見える化

冷凍機のCOP (Coefficient Of Performance:成績係数)は冷凍機の効率を表す指標であり生産熱量÷消費電力により求められる。本製品では、COPを演算するためのDDCプログラムブロック「CPC」を開発した。COP演算の結果1時間当たりのCOPと1日当たりのCOPを出力できるようにしたため、それらを確認することで送水温度設定見直し等の運用改善や、冷凍機内部の凝縮器や蒸発器の汚れによりCOPが悪化してきた場合のメンテナンスが容易となる。

DDCプログラムを利用すれば、COPの悪化が疑われる場合に、確認を促すようにポイント通知するといったアプリケーションを構築することも可能である。

#### 4.2 ポンプ消費エネルギーの見える化

熱源周りのポンプ(1次ポンプ、2次ポンプ、冷却水ポンプ)の消費エネルギーを見える化する場合、今までは計量が必要であった。本製品では、図5に示すようにポンプ特

性を考慮した演算アルゴリズムを開発し、DDCプログラムブロック「PC1」と「PC2」として実装することで、計量することなしにポンプ運転状態から消費電力量を演算できるようにした。これにより低コストでのポンプ消費エネルギーの見える化を実現した。

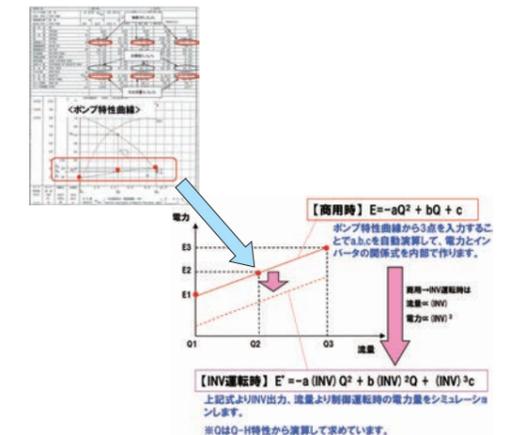


図5 「PC2」の電力量演算方法

「PC1」は1次側ポンプの消費電力量を演算するプログラムブロックであり、1~全台までの任意台数のポンプ合計消費電力量を演算できる構造とすることで、熱源機個別あるいは熱源機一括というように現場のニーズに応じた単位で演算可能である。また全ポンプが定格運転(商用運転)だった場合の消費電力量を演算できるようにすることで、現時点の消費電力量のみならず、インバータによる省エネ効果の見える化を実現した。

「PC2」は主に2次側ポンプの変流量制御(省エネ制御)を実施している場合の消費電力量を演算するプログラムブロックであり、PC1と同様に1~全台までの任意台数のポンプ合計消費電力量を演算できる構造とすることで、熱源機個別あるいは熱源機一括というように現場のニーズに応じた単位で演算可能である。また吐出圧一定だった場合および全ポンプが定格運転(商用運転)だった場合の消費電力量を演算できるようにすることで、現時点の消費電力量のみならず、変流量制御による省エネ効果とインバータによる省エネ効果の見える化を実現した(図6)。

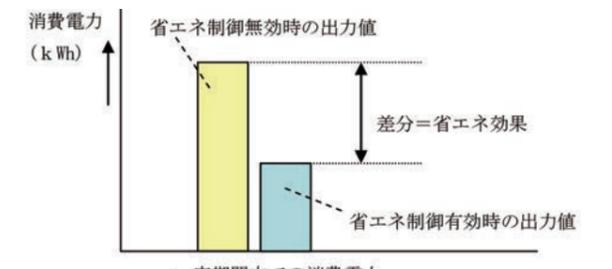


図6 省エネ効果の確認(イメージ)

#### 4.3 冷凍機消費エネルギーの見える化

ポンプと同様に、冷凍機の消費エネルギーを見える化する場合も今までは計量が必要であった。冷凍機の場合、

そのCOPは冷却水温度で大きく変わるため、冷凍機メーカーから供給される冷却水温度条件ごとの冷凍機の負荷率-COP、もしくは負荷率-投入エネルギーの特性データをパラメータ設定しておけば、冷却水と負荷率の状態から消費電力を演算できるアルゴリズムを開発し、DDCプログラムブロック「CPT」として実装することで、計量することなしに冷凍機の消費電力を演算できるようにした(図7)。これにより低コストでの冷凍機消費エネルギーの見える化を実現した。

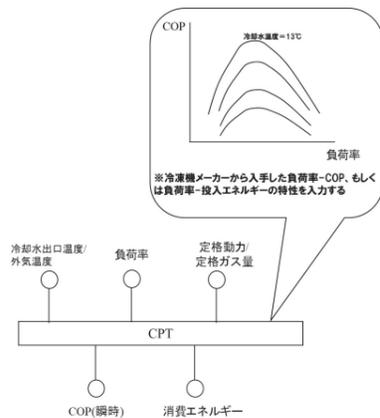


図7 「CPT」のイメージ図

#### 4.4 最適台数制御への応用

通常の台数制御では負荷が1台の冷凍機能力より大きくならない限り2台に増段することはない。しかし、部分負荷効率の高い冷凍機(インバーターボ冷凍機、インバータスクリュー冷凍機)を複数台導入し、ポンプも変流量制御による省エネ制御を行っている熱源設備の場合、図8のように負荷の状態によっては1台運転ではなく2台運転させた方が熱源システムのトータル運転コストが小さくなる場合がある。

熱源アドバンスコントローラでは、前述のDDCプログラムブロック「PC2」と「CPT」を利用して、現在の運転状態での熱源システムの消費エネルギーと、増段したケースでの熱源システムの消費エネルギーをシミュレーションすることにより、増段した方が省エネルギーとなる場合には増段する最適台数制御のアプリケーションを構築できる。最適台数制御を実施することで最適タイミングでの増段となり、通常の台数制御と同様に快適性を維持するとともに、省エネ性を追求できる。

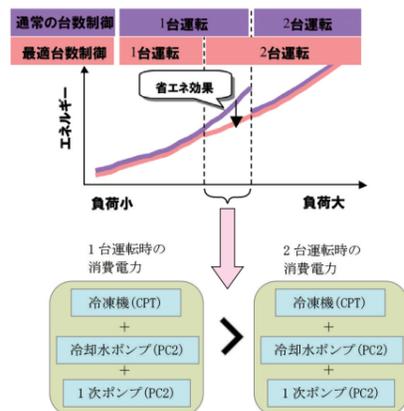


図8 最適台数制御の省エネ効果(イメージ)

### 5. 施工・エンジニアリング負荷低減

現場の施工・エンジニアリング負荷低減の要望に応えるため、省配線化となる機構の採用やオンラインエンジニアリング機能を開発し搭載した。

#### 5.1 施工における負荷低減

従来製品は、コントローラ本体にI/Oモジュールを直接接続する構成であったため、コントローラとやり取りする設備機器が遠方にある場合、複数の配線を設備機器の盤からコントローラの盤まで配線する必要があった。また、配線作業後に配線本数が追加となった場合には、再度配線作業を行う必要があった。

本製品ではコントローラ本体とI/Oモジュールを高速通信可能とするEthernetで接続することで、従来製品以上の計測・制御性能を確保した状態で、I/Oモジュールの分散配置を可能とした。これにより、コントローラ本体とやり取りする設備機器が遠方にある場合でも、I/Oモジュールだけを設備機器の入っている盤に設置することで、従来製品に比べて配線作業を大幅に容易とした(図9)。

また、設備機器増設等によりI/Oモジュール追加が必要となった場合でも、I/Oモジュール間のEthernetに渡り配線を採用することで、新たにHubを増設することなくI/Oモジュール間の配線のみで容易に対応できるようにした。この渡り配線にはリング接続技術を搭載することで、断線に対する耐障害性を強化した。

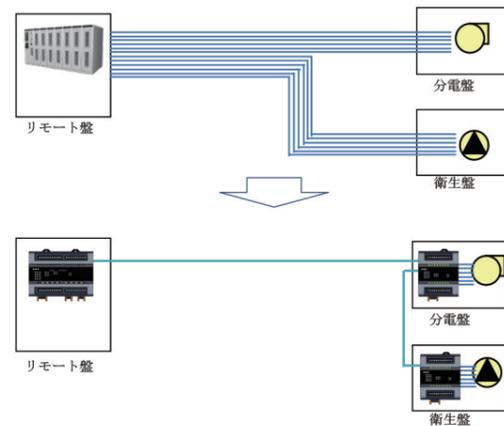


図9 施工における負荷低減(イメージ)

#### 5.2 エンジニアリングにおける負荷低減

従来製品は、コントローラのファイルを修正(ファイルのダウンロード、パラメータの変更)する際、コントローラの制御を停止させる「オフラインモード」にする必要があった。そのため、建物運用後に、コントローラのファイルを修正する場合には、夜間や長期の連休などに行う必要があった。

本製品では図10のようにデータをマスタとワークの二重構造とし、ワーク領域に対するデータ設定後に関連するアプリケーションのみを停止し、そのマスタデータを更新する仕組みとすることにより、コントローラの制御を停止せずにコントローラのファイルを修正することができるようにした。

これにより従来製品で1分以上あったダウンタイムがなくなり、建物運用時のメンテナンス作業を容易に行えるようにした。また、ワーク領域に対するデータ設定後には全設定間の整合性を検証し、複数アプリケーション間に渡る不整合でも検出できるため、本製品では異常設定による誤動作を回避することを可能とした。

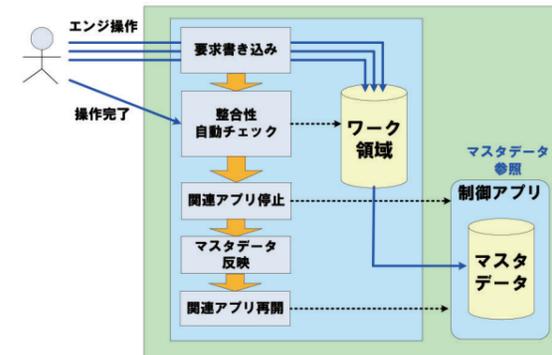


図10 オンラインエンジニアリングの仕組み

### 6. 今後の展開

データセンターやDHC (District Heating and Cooling: 地域冷暖房)の市場では、万一、コントローラが故障した場合にも迅速に代替機に切替え、制御を継続できるような「コントローラの二重化」が求められる。

コントローラの二重化では、図11のようなシステム構成とする。アクティブ系とスタンバイ系のコントローラは相互に状態監視を行い、また上位、下位のネットワークの通信状態を監視する。万一、アクティブ系のコントローラが故障、または通信異常となった場合、スタンバイ系のコントローラがアクティブ状態に切り替わり、制御を継続実行する。

「コントローラの二重化」システムは、今後リリースする予定である。

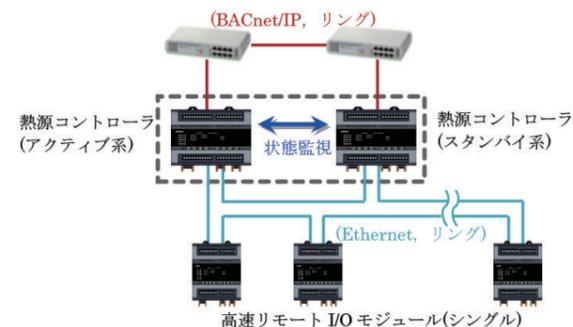


図11 コントローラの二重化(イメージ)

### 7. おわりに

熱源アドバンスコントローラの全体像と、従来製品と比較して新たに現場に提供できる機能について紹介した。今後は先の二重化に加えて、基本機能として蓄熱制御機能の追加を予定している。また統合コントローラ側との連携を強化していくことにより、ビッグデータの活用による制御目

標値の予測やパラメータ更新による運用改善、さらなる省エネ制御機能を提供していきたい。

#### <商標>

savic-net, PARAMATRIX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。  
Modbus is a trademark and the property of Schneider Electric SE, its subsidiaries and affiliated companies.

#### <著者所属>

久保田 秀雄 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  
関根 秀太 アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニーマーケティング本部  
プロダクトマーケティング部

# 大口径流量計測制御機能付きバルブの 流量計測精度向上技術

## Technology for Improving the Accuracy of Flow-Rate Measurement by Large-Bore Valves

アズビル株式会社  
バルブ商品開発部

新谷 知紀  
Tomonori Shintani

アズビル株式会社  
バルブ商品開発部

松村 剛宏  
Takahiro Matsumura

アズビル株式会社  
バルブ商品開発部

野間口 謙雄  
Yoshio Nomaguchi

### キーワード

調節弁, 流量計測, 流量制御, エネルギー管理, 省エネルギー

空調システムの省エネルギーを実現する製品として、アズビルは流量計測制御機能付電動二方弁ACTIVAL+™を販売している。今回、大容量の空調機に対応可能な大口径モデルとして、海外向けに口径100A~150Aの製品を開発した。開発においては、アクティブシリーズのメリットである小型軽量を実現しつつ流量計測精度の仕様値を満足させるために、プラグとステムの締結部構造およびねじれ開度補正の2つの技術開発を行った。本稿ではこれらの技術開発内容について報告する。

ACTIVAL+™, an electric two-way valve with flow measurement control functions, is a product designed to save energy in air conditioning systems. We have now developed models for overseas markets with large 100-150 A diameters, capable of handling large-capacity air conditioners. In order to maintain the ACTIVAL series' merits of small size and light weight while satisfying the specifications for flow rate measurement accuracy, we have developed special technology for the fastening structure of plugs and stems and for shaft twist compensation. In this paper, we report on the details of these technological developments.

### 1. はじめに

現在、地球温暖化への早急な対策が求められている中、ビル・工場などの建物においてもエネルギー管理や省エネルギーの推進はますます重要となってきた。省エネ法ではエネルギーの管理基準を設定し、その状況の定期的な報告と、エネルギー使用に関する合理化目標に関し、その達成のため中長期の計画の作成と提出が義務付けられている<sup>1)</sup>。

空調に関わるエネルギー削減の施策を検討し、施策の実施効果の検証をするには空調機ごとに熱量を計測することが重要となる。しかし、そのためには空調機1台につき流量計や熱量計などの計測機器を設置する必要があり、建物

オーナーにとっては大きな経済的負担となる。

また、空調システムにおいて省エネルギーを実現するためには、熱源の搬送動力の削減が効果的である。そのため、空調機周りの温度制御において、空調機の起動時や運転中の負荷変動があっても空調機に流れる冷温水の流量を一定にすることで、過流量を防止することが重要となる。

これらの問題を解決するため、空調機を流れる冷温水の流量を制御するコントロールバルブに流量計測、熱量計測機能を搭載した製品として、流量計測制御機能付電動二方弁ACTIVAL+ (アクティブ プラス)を開発し、販売してきた。

近年は、特に中国、韓国、東南アジアのオフィスビル、

病院、ショッピングモールなどにおいて、空調機の区画(ゾーニング)が広いために、大容量の空調機が使用される場合が多い。

そこで今回、大容量の空調機に対応可能な流量計測制御機能付電動二方弁ACTIVAL+の大口径モデルとして、海外向けに口径100A~150Aの製品を開発した。



図1 ACTIVAL+ 製品外観

### 2. 製品概要と仕様

#### 2.1 特長

本製品では、従来のコントロールバルブで行っている開度制御ではなく、コントロールバルブ自身が計測した流量を用いて流量制御が可能である。そのため、空調機の過流量を抑制することで、熱源やポンプなどの搬送動力を削減できる。

さらに、従来の開度制御では、配管内の圧力変動により空調機コイルを通過する流量が変化してしまい、室内温度が設定温度に追従しないケースがあったが、本製品の流量制御機能により、配管内の圧力が変動しても常に最適な流量を維持することが可能で、室内の快適性を向上できる。

また、コントロールバルブと温度、圧力、流量、熱量の計測機能を一体化したことにより、これらの計測器を追加することなく本製品だけでエネルギー管理が可能となり、省スペース化、および省施工化に貢献できる。

#### 2.2 製品仕様

本製品の概略仕様を表1~3に示す。

表1 バルブ部 仕様

| 項目               | 仕様  |
|------------------|---|
| 形式               | 二方弁, フランジ接続形  |
| 本体圧力定格           | PN16 (最高使用圧力1.6MPa)   |
| 接続口径             | 15A~150A  |
| 定格Cv値            | 1.0~350   |
| クローズオフ<br>レイティング | 15A~80A :1.0MPa<br>100A, 125A :0.5MPa<br>150A :0.4MPa                                 |
| 主要部材質            | 本体 : 鋳鉄<br>プラグ, ステム : ステンレス鋼<br>シートリング : 強化PTFE<br>グランドパッキン: 無機繊維パッキン<br>ガスケット : 膨張黒鉛 |
| 許容流体温度           | 0~80℃ (流体の凍結はないこと)  |

|          |  |
|----------|--|
| 流量特性     | 15A~80A :イコルバーセンテジ特性<br>100A~150A:修正リニア特性<br>(流量制御は、イコルバーセンテジ特性とリニア特性の選択が可能) |
| レンジアビリティ | 100:1  |
| 弁座漏洩量    | 定格Cv値の0.01%<br>(15Aは漏洩Cv値が0.0006以下)  |
| 適用流体     | 冷温水  |

表2 アクチュエータ部 仕様

| 項目      | 仕様  |
|---------|---|
| 取付場所    | 屋内、または屋外<br>(ただし屋外では屋外カバーを使用する)                   |
| 設置姿勢    | 操作器正立から90度横向きまで任意 <sup>注1</sup><br>(ただし屋外設置は正立のみ) |
| 動作時間    | 63s (50Hz) / 53s (60Hz) ±5s                       |
| 手動操作    | 可(操作器の電源を切り、ジョイントの四角部をスパナなどで回転)                   |
| 開度指示    | 指針 開度0~100%<br>(表示器にて開度、流量指示)                     |
| ケース保護構造 | IP54(防塵・飛まつ保護)                                    |
| 主要部材質   | ケース : アルミダイキャスト<br>カバー : ポリカーボネート<br>ヨーク : 鋼板     |
| 電源電圧    | AC24V±15% 50/60Hz                                 |
| 消費電力    | 8VA   |
| 絶縁抵抗    | 5MΩ以上 DC500Vにおいて                                  |
| 耐電圧     | 500V/1min (電源-ケース間)                               |
| 通信      | Modbus™ RTU                                       |

表3 計測範囲と精度

| 項目                   | 仕様  |
|----------------------|---|
| 最大設定流量               | 10~3500 (L/min)   |
| 流量計測精度 <sup>注2</sup> | 15A (Cv1) : ±10%RD<br>15A (Cv2.5/6) : ±7%RD<br>25A~150A : ±5%RD<br>ただし最大設定流量の10%~100% |
| 圧力計測                 | ±0.5%FS (0~1.6MPa)  |
| 温度計測                 | ±1℃ (0~80℃)   |
| 温度計測                 | ±1℃ (0~80℃)   |

#### 2.3 製品の小型軽量化

表3に示した流量計測精度を満足するためには、流量を調節するプラグの開度をポテンシオメータで精度よく計測することが求められる(プラグ~ポテンシオメータの構成は3.2参照)。プラグを本体の配管接続フランジ側(図2の矢印の方向)から入れてバルブ内でプラグにステムを挿入するサイドエントリー構造とすると、本体を小型・軽量にすることができる。しかし、プラグとステムの接続部には隙間があるため、プラグとステムの間に回転方向のがたつき(バックラッシュ)が発生する。したがって、プラグの開度とポテンシオメータの開度読取り値に差異が生じてしまう。この課題を解決するために、図2のようにプラグとステムをピンで締結

注1 バルブセンサ部が水平よりも下を向く姿勢にしないこと

注2 流体温度7~17℃または45~65℃、配管内圧0.1~1.4MPa、差圧0.03~0.3MPaにおける精度

する構造とした。

一般にプラグとステムの軸中心位置がずれると摺動抵抗の増加や内部漏れ量の増加の要因となるため軸中心は一致していることが望ましい。プラグにピンを圧入したときのプラグの上部における変形量を有限要素法により構造解析した結果を図3に示す。図3に示すとおり、ピンから圧入荷重を受けたプラグの上部には最大42μmの変形が生じており、この変形がステムの傾きを引き起こし、プラグとステムの軸中心がずれることが分かった。

そこで、図4のようにプラグ上部のピン圧入部に逃げ形状を設け、ステムの傾きを防止する構造とした(ピン締結部の構造は特許出願済)。

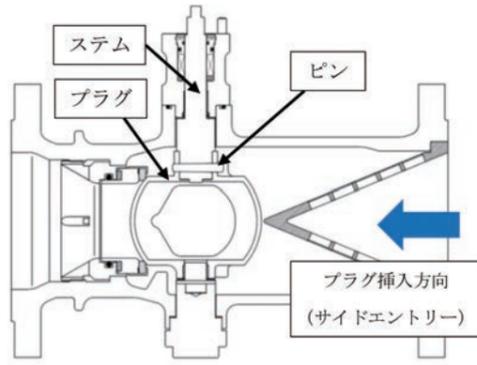


図2 バルブ断面

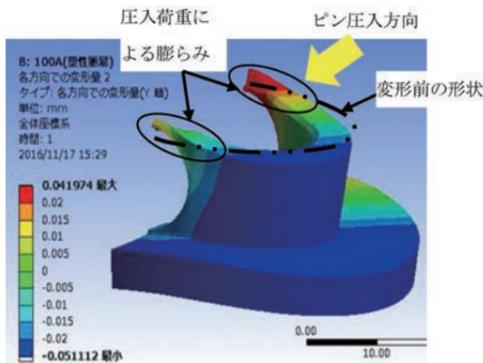


図3 プラグ上部(ハーフモデル)の構造解析結果



図4 ステムの傾きを防止するためのプラグ構造

### 3. 流量計測精度の向上技術

#### 3.1 流量計測原理

配管内を流れる流量を計測する原理の1つに差圧式流量計測がある。この方式は、絞り部の前後差圧と絞り部の抵抗係数から計算で流量を求めるもので、一般に下記計算式に基づいて流量を算出できる<sup>(2)</sup>。

$$Q = \text{定数} \times C_v \times \sqrt{\Delta P} \quad \text{式(1)}$$

Q:流量 C<sub>v</sub>:制御弁の容量係数  
ΔP:絞り部前後の差圧

制御弁本体部に搭載した圧力センサで計測された制御弁のプラグ前後差圧(バルブ絞り部前後差圧)と、電動操作器内のマイコンのメモリに記憶させた制御弁の各開度、差圧ごとのC<sub>v</sub>値から流量を算出している。

バルブ開度はアクチュエータ出力軸の開度計測用ポテンシオメータで計測する。C<sub>v</sub>値は、あらかじめ実験から求めた図6のような差圧ごとのC<sub>v</sub>値テーブルを用いて、任意の差圧とバルブ開度からC<sub>v</sub>値を決定している<sup>(3)</sup>。

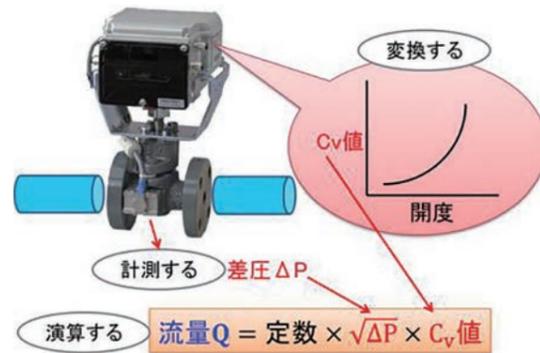


図5 流量計測の原理

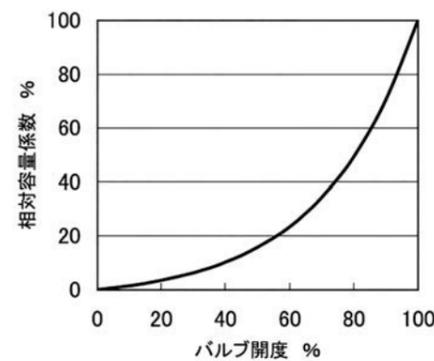


図6 C<sub>v</sub>値テーブル

#### 3.2 シャフトのねじれ

流体を閉止するためのシートリングや軸受とプラグの摩擦抵抗により、プラグを回転動作させる際にシャフトにねじれが生じる。ねじれが生じると、ポテンシオメータで計測した開度と実際のプラグ開度との間に差異が生じ、流量計測精度が悪化する。特に口径が大きいバルブではプラグの径が

大きいため摩擦抵抗が大きくなり流量計測精度の悪化が顕著である。また、ねじれ量を低減するためにシャフト径を大きくすると既存のアクチュエータとの互換性がなくなってしまう。このような課題を解決して表3の流量計測精度仕様を満足させるため、シャフトのねじれ角度を補正するアルゴリズムを考案した。

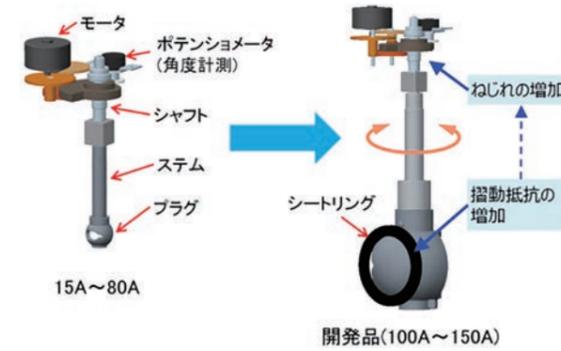


図7 シャフトのねじれ

#### 3.3 ねじれ開度補正

ねじれ開度を補正するアルゴリズムを検討するために、ねじれの角度がどのように決まるのか分析を行った。

アクチュエータからシャフトに操作トルクTが加えられた際のシャフトのねじれ角度θは以下の式で計算できる。

$$\theta = \frac{32TL}{\pi Gd^4} \times 1000 \quad \text{式(2)}$$

θ:ねじれ角度(deg) L:長さ(mm)  
G:横弾性係数(N/mm<sup>2</sup>) d:直径(mm)

T:操作トルク(Nm):バルブを操作するのに必要なトルク

ここで、長さL、横弾性係数G、直径dはシャフトの材質や寸法で決まる定数であり、既知の値である。一方、バルブを操作するのに必要な操作トルクTは製品の使用条件によって変化することは分かっていたが、具体的にどの程度の値となるか詳細は明らかではなかった。操作トルクTは以下の式のように4つの項で表せるため、それぞれの項を分析した。

$$T = T_0 + T_1 + T_{thrust} + T_{flow} \quad \text{式(3)}$$

T<sub>0</sub>:無負荷トルク(Nm):プラグ前後差圧ΔPおよび内圧Pがゼロの場合のプラグと他の部品との間の摺動抵抗によるトルク

T<sub>1</sub>:負荷トルク(Nm):プラグ前後差圧ΔPによってプラグが他の部品に押し付けられることによる摺動抵抗増加分のトルク

T<sub>thrust</sub>:内圧トルク(Nm):バルブ内圧Pによってプラグが他の部品に押し付けられることによる摺動抵抗の増加分のトルク

T<sub>flow</sub>:流体カトルク(Nm):バルブ内の流れによってプラグに作用する回転力

無負荷トルクT<sub>0</sub>は、ステムとグランドパッキン間、プラグとシートリング間の摩擦が主要因であり2~4Nm程度である。

負荷トルクT<sub>1</sub>と内圧トルクT<sub>thrust</sub>は、流体の圧力条件によって変化するトルクであり、差圧ΔPとトルクT<sub>1</sub>、内圧PとトルクT<sub>thrust</sub>の関係は比例となる。実験結果を図8および図9に示す。これらの関係を用いて、製品に搭載した圧力センサで計測した差圧ΔPと内圧Pから、リアルタイムにねじれ量を推定して開度を補正できる(特許出願済)。

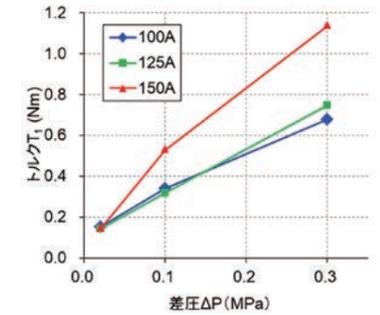


図8 差圧ΔPとトルクT<sub>1</sub>の関係(実験値)

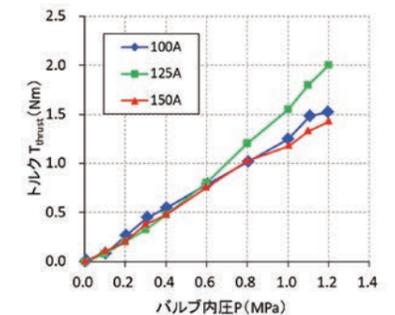


図9 内圧PとトルクT<sub>thrust</sub>の関係(実験値)

次に、バルブ内の流れによってプラグに作用する回転力である流体カトルクT<sub>flow</sub>の大きさを調べるためにCFD解析(Computational Fluid Dynamics:数値流体解析)を行った。

図10に解析に使用した口径150Aの3次元モデルを示す。解析モデルは上流側配管、下流側配管を含めたモデルとした。境界条件は入口側圧力P<sub>1</sub>と出口側圧力P<sub>2</sub>を与え、乱流モデルは標準k-εモデルを使用した。メッシュ数はおよそ400万である。

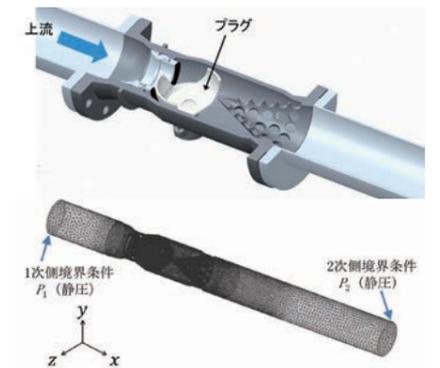


図10 解析モデル(150A, 中間開度)

口径150A, バルブ中間開度(50%), バルブ前後差圧0.3 (MPa)の条件における流速分布と圧力分布を可視化したものを図11に, 下流側から見たプラグ表面の圧力分布を図12に示す。流体が流れることで図11の方向から見て時計回りにプラグを回転させようとする力(流体力トルク $T_{flow}$ )が発生する。これは図11および図12のように, 流体がプラグ絞り部を通過する際にプラグ表面のA部の圧力が他の部分より特に高くなっており, この不平衡な圧力分布がプラグを回転させる力となるためである。

流体力トルク $T_{flow}$ の実験値と流体解析による計算値を図13に示す。計算値は, 流体解析から得られたプラグ表面の圧力を積分することでプラグに作用する流体力トルクとして求めたものである。実験値と流体解析による計算値はよく一致しており, 時計回りにプラグを回転させる力が発生し, その値は開度50%付近で最大となっていることが分かる。

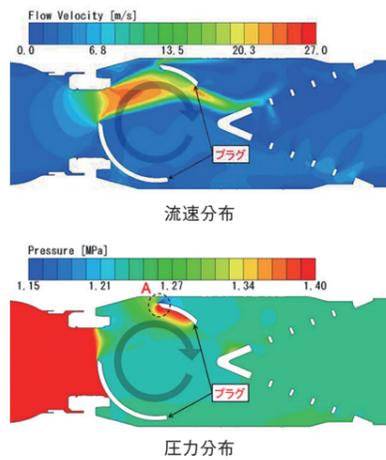


図11 流体力トルク $T_{flow}$ の解析結果(バルブ水平断面, 左側が上流)

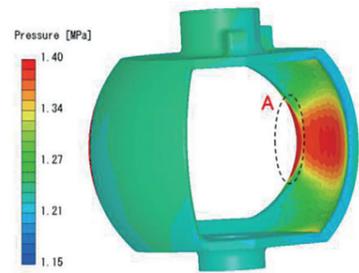


図12 プラグ表面の圧力分布(下流側からの視点)

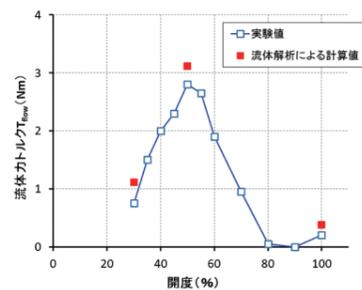


図13 流体力トルク $T_{flow}$  (150A, 差圧 $\Delta P=0.3$ MPa)

以上の解析および実験結果から, 式(2), 式(3)および圧力センサで計測した差圧 $\Delta P$ と内圧 $P$ を用いてねじれ量を推定し, ポテンシオメータで計測した開度を補正することが可能となる。

さらに, 角度補正式の決定にあたっては, 製品の個体差によるトルクのばらつきや使用中の水温変化によるトルクの変化, アクチュエータ内のギアのバックラッシュ分も考慮した。

以上で決定したアルゴリズムによって, ポテンシオメータの角度測定値と角度補正值からねじれ量補正後のプラグ角度を計算し, 流量を演算している(図14)。

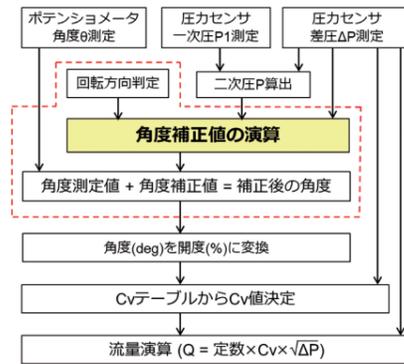


図14 ねじれ開度補正と流量演算のアルゴリズム (点線枠内がねじれ開度補正部)

### 3.4 ねじれ開度補正の効果

アクチュエータにねじれ開度補正のソフトウェアを実装したバルブで, ねじれ開度補正の実証試験を実施した。図15の結果より, ねじれによる流量計測精度への影響が大きくなりやすい低開度領域において特に補正の効果が大きく, 流量計測精度が向上していることが確認できた。

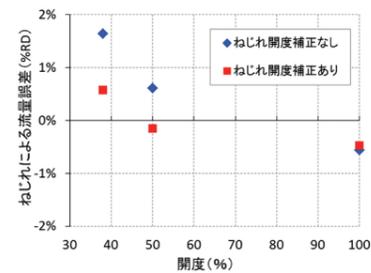


図15 ねじれ開度補正の検証結果(125A実験値)

## 4. おわりに

ACTIVAL+流量計測制御機能付電動二方弁<sup>(4)</sup>は, 2009年より販売を開始し, 国内外のビル空調用冷温水制御に約5万台の採用実績がある。今回, 海外市場の需要に応えられるよう大口径モデルを追加したことにより, ACTIVAL+を採用していただけるシーンが増え, 空調システムにおけるエネルギー管理, 省エネルギー, 快適性に大きく貢献できると考える。

今後も快適性, 信頼性, 安全性の向上を図りながら, 環境負荷低減への取組みを続けていきたい。

### <参考文献>

- (1) エネルギーの使用の合理化に関する法律, 「法第14条」および「法第15条」
- (2) 「工業用プロセス弁-第2部:流れの容量-第3節:試験手順」, JIS B 2005-2-3:2004
- (3) 古谷元洋, 大谷秀雄:流量計測・制御機能付きバルブの開発, Azbil Technical Review, 2009
- (4) 木下良介, 古谷元洋, 野間口謙雄:流量計測制御機能付きバルブの開発, 計測と制御, 第55巻, 第2号, 2016-2, pp.178-181

### <商標>

ACTIVAL+はアズビル株式会社の商標です。Modbus is a trademark and the property of Schneider Electric SE, its subsidiaries and affiliated companies.

### <著者所属>

- 新谷 知紀 バルブ商品開発部
- 松村 剛宏 バルブ商品開発部
- 野間口 謙雄 バルブ商品開発部

# 全館空調VAVシステム用集中リモコンの開発

## A Central Remote Control for Home Central Air-Conditioning VAV Systems

アズビル株式会社  
技術開発本部

羽場 照芳  
Teruyoshi Haba

アズビル株式会社  
技術開発本部

田中 裕造  
Yuzo Tanaka

アズビル株式会社  
技術開発本部

奈良 千尋  
Chihiro Nara

### キーワード

全館空調, きくばり, タブレット, 集中リモコン, 生活パターン, 使いやすさ, 省エネルギー, ユーザビリティテスト

全館空調システム「きくばり<sup>TM</sup>」のVAV (Variable Air Volume:可変風量)システムにおいて、住宅内のどこからでも各部屋の温度、ecoモード、スケジュールの設定ができる市販のAndroidのタブレットのWi-Fi機能を使った「集中リモコン」を開発した。その結果、部屋を移動することなく設定を確認、変更するといったことに加え、外出、就寝などのライフスタイルに合わせて設定を自動的に変更することが可能となった。

画面デザインの開発においては、ユーザビリティテストを実施し、ユーザーが使いやすく、視認性のよいリモコン画面を作ることができた。

For the VAV (variable-air-volume) subsystem of a residential central air-conditioning system, we have developed a centralized remote control using the Wi-Fi function of a commercially available Android tablet. This control can set the temperature of each room, turn eco-mode on or off, and schedule changes in settings from anywhere in the house. As a result, in addition to checking and changing the settings without moving from room to room, it is possible to have the settings change automatically according to activities such as going out or going to sleep. The screen design, which is based on usability testing, is user-friendly with good visibility.

### 1. はじめに

全館空調「きくばり」VAVシステム<sup>(1)</sup>では、部屋ごとの壁に取り付けた個室リモコンでそれぞれ温度設定をする。しかし、ある部屋の温度設定の変更をするためにはその部屋へ行く必要があり、ほかにも各部屋の温度設定を一覧で確認したいといった使い勝手の改善要求があった。

本開発により、ユーザーが1台のタブレット端末「集中リモコン」から各部屋の温度をいつでもどこでも設定、確認できるようになり、ライフスタイルに合わせて、各部屋の温度設定が時間帯ごとに自動で変更できるスケジュールタイマー運転も可能になった。また、各部屋の不在時や就寝時に自動で抑え目に冷暖房することが可能になり、省エネ効果も

期待できる。

開発にあたっては、市販のAndroidタブレットやWi-Fiルータを利用したシステム構成とすることで、開発期間の短縮や低コスト化を実現した。また、画面デザインはユーザビリティテストを行い、ユーザーの使いやすさを追求した。

同時に、施工時に集中リモコンを活用し、VAVシステムの設定内容が一覧で確認でき、必要な設定が視覚的なインターフェースでできるエンジニアリングツールも開発し、施工、サービスの効率化も実現した。

以降、2章でシステム構成と設計コンセプト、3章で集中リモコンの機能を記述する。

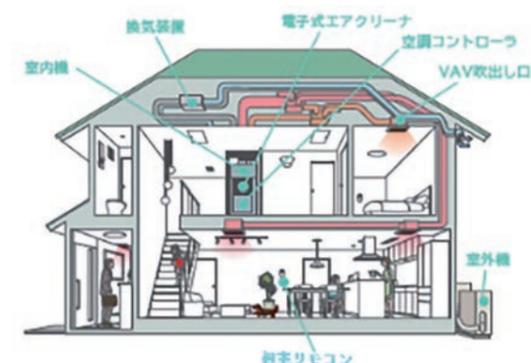


図1 全館空調「きくばり」VAVシステム

## 2. システム構成と設計コンセプト

### 2.1 従来の「きくばり」VAVシステム

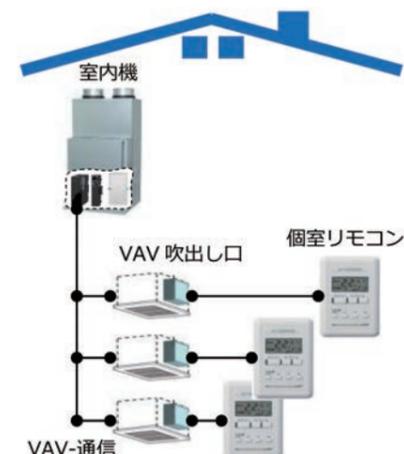


図2 従来の「きくばり」VAVシステム

各部屋の温度を、壁に取り付けた個室リモコンで個別に設定するシステムである。

### 2.2 「きくばり」VAV集中リモコンのシステム

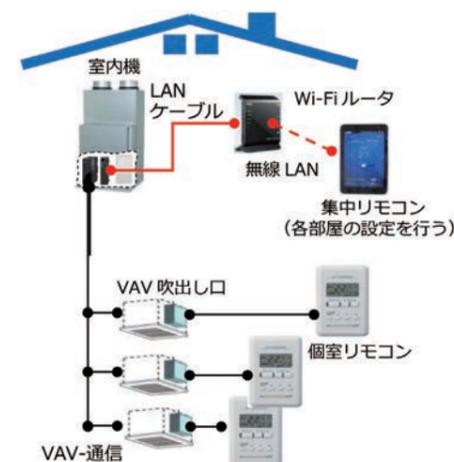


図3 「きくばり」VAV集中リモコンシステム

従来のシステムにWi-Fiルータを追加し、市販のAndroidタブレットを専用化した「集中リモコン」と無線LANを接続する構成とし、各部屋の設定を行うことができる。

複数の室内機に対しては、V-LAN機能を有するスイッチングハブを追加することにより、最大4室内機を操作可能となる。

### 2.3 設計コンセプト

「きくばり」VAVシステムは、普段ユーザーの目に触れることなく静かに動いており、ユーザーの目に触れるのは、リモコンだけである。そのため、集中リモコンは本システムの「顔」として、システムの先進性を示す製品となることを目指し、下記のユーザーメリットを実現することをコンセプトとして設計、開発した。

- (1)集中操作・管理による利便性の向上  
VAVシステムの全機能を各部屋へ行くことなく1カ所で集中的に操作でき、各部屋の設定状況を一目で俯瞰できる。
- (2)多様なライフスタイルへの対応  
各部屋の居住者のライフスタイルに合わせた設定、運転ができる。
- (3)省エネルギー  
不在時や就寝時に自動で抑え目に冷暖房するなど、居住者が意識しなくても省エネルギーが可能になる。
- (4)ユーザビリティの向上  
上記の機能を、説明書を深く読むことなく直感的に操作できる。

## 3. 集中リモコンの機能

### 3.1 集中操作・管理による利便性の向上

ユーザーが、各部屋の温度を一度に設定したい場合の「一括設定」操作と、各部屋の設定をそれぞれ行いたい場合の「個別設定」操作に分け、それぞれにおいて各部屋の設定状況が一目で見てとれ、どこをどう操作すればいいかが簡単に把握できる機能を開発した。

#### 3.1.1 一括設定

ユーザーからは、家族全員で外出する前に、まとめて家じゅうの設定を変更したいという要望があった。その機能＝「一括設定」を備えた画面を、最初の画面として配置した(図4)。

この画面では、一括設定したい温度を中央に表示し、一括設定ボタンを配置し、その周囲に全部屋の温度設定をドットで表示した(これをインジケータと呼ぶ)。

ユーザーが簡単に設定変更できるよう、操作は温度を矢印で変更した後、一括設定(ターゲットボタン)をタップするだけとした。



図4 一括設定画面(暖房)



図6 個別設定画面(冷房)

一括設定で変更されると、散らばって配置されていた各部屋の温度設定のドット(図5-1)が、ターゲットボタンに集まってくる(図5-2)というアニメーションを取り入れ、設定されたことが即座に視認できるようにした。



図5-1 一括設定前

図5-2 一括設定後

以上により、全部屋の設定温度が容易に確認できるので、設定より大きく外れた部屋の再設定により、暖めすぎ冷やしすぎの防止(省エネルギー)や、温熱環境の改善が見込まれる。

### 3.1.2 個別設定

現在の「きくばり」VAVシステムでは、各部屋の居住者が、各部屋の設定温度を個室リモコンで設定している。

この場合、個別の部屋の温度設定がどうなっているかは、その部屋に行かないと分からなかった。そのため、設定温度が過剰であったり、空調が不要な部屋を空調していたりという無駄やムラが把握できなかった。

個別設定画面(図6)では、各部屋の温度設定が一覧画面で確認・操作できるので、家全体の空調管理がしやすくなり、家族がリビングに集まった時などにも、簡単に寝室や子供部屋を省エネ運転に切り替えられる。

画面上の操作としては、部屋名の部分をタップすることで設定部が展開表示され、温度設定上下ボタンにより温度設定値を変更するという分かりやすいインターフェースとしている。

### 3.2 多様なライフスタイルへの対応

毎日の生活では、居住者のライフスタイル(生活パターン、起床・外出・帰宅・就寝などの時間帯)により、適した温度も変化する。その生活パターンに合わせて温度設定を変更するためには、従来のVAVシステムではその都度、ユーザーが行うしかなかった。

そのため、本開発では、あらかじめ設定しておいた時間帯と設定温度にしたがって、自動で空調の温度を設定変更するスケジュール運転機能を持たせた。

スケジュール設定の方法は、起床・外出・帰宅・就寝の4つの生活イベントを設定し、曜日ごとに各イベントの時間帯と温度を設定するというインターフェースとした(図7)。



図7 スケジュール管理画面

このスケジュール機能を使えば、子供が学校に行っている月曜～金曜日の日中は子供部屋の空調を弱く設定しておくなど、ライフスタイルに合った省エネルギーがより簡単にできるようになる。

また、買い物や散歩など、短時間の外出で部屋を不在にする場合に、省エネ性を優先した運転をしたいという要望がある。その際に、1回のボタン操作で設定可能な「ecoモード」(設定温度を冷房時は2°C上げ、暖房時は4°C下げ)を設けた。

帰宅後は、このecoモード運転を解除するだけで、外出前の設定温度に戻すことができるので、簡単に、快適に過ごしながらもエネルギー消費を削減できる。

### 3.3 省エネルギー

前項のスケジュール運転を活用することで、在室時は快適に、不在時や就寝時は省エネ性を優先した運転を自動で行うことができるため、ユーザーが意識して設定温度を1日に何度も変更することなく、快適かつ省エネルギーな運転ができる。

例えば、省エネ法における「住宅事業建築主の判断基準」<sup>(2)</sup>にて定義された「部分間欠運転スケジュール」を、本システムのスケジュールとして設定した場合、図8にあるように、暖房運転時には、ユーザーが特に操作を行わなくても、従来の全館空調システムに比較して、在室時には快適な環境を実現しながら、約33%の省エネルギーが期待できる。

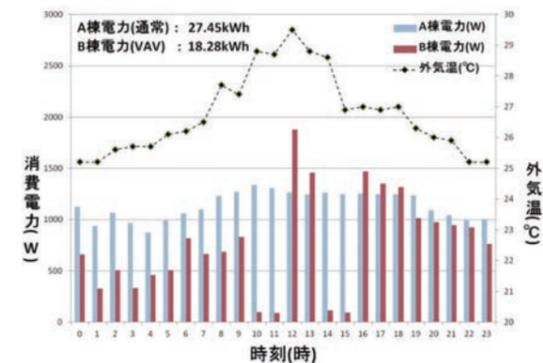


図8 VAV全館空調の省エネ性検証(文献<sup>(1)</sup>図10)

### 3.4 ユーザビリティの向上

設計コンセプトのユーザビリティ向上を実現するため、画面構成案を作った段階で、説明書を深く読むことなく直感的に操作できるかどうかを確認するため、ユーザビリティテストを実施した。

#### 3.4.1 ユーザビリティテスト

30歳代～50歳代までの「きくばり」ユーザーとそうでない男性・女性を対象として、「きくばり」コントローラの使い方をあらかじめ説明していない状態で集中リモコンのプロタイプを渡し、下記5つのタスクを実施してもらった。

それぞれのタスクにおいて検証した内容は以下のとおりである。

- タスク1: ホーム画面の内容が理解できているか。
- タスク2: 家全体の温度設定 / ecoモードおよび全部屋への一括設定を直感的に行えるか。
- タスク3: 部屋個別の温度設定 / 一覧画面の内容が理解できているか。
- タスク4: スケジュール設定を直感的に行えるか。
- タスク5: スケジュール運転の停止を行えるか。

#### 3.4.2 ユーザビリティテストの結果

前述の5つのタスクを実施し、その内容を検証した結果、以下のことを得ることができた。

・非言語によって示唆されるシステムの仕組みを、ほとんどのユーザーが正しく理解できなかった。

- ・学習によって違和感なく認識できるようになるアイコンと、そうでないアイコンがあった。
- ・操作手順やコントロールの表現が一貫していない箇所があり、ユーザーに誤解を与えていた。
- ・システムの仕組みや状況を十分に理解できていなくても、基本的な操作は正しく完了できていた。

#### 3.4.3 画面の改善例

上記のユーザビリティテストの結果を受け、画面の改善を行った。以下にその例を提示する。

##### (a) 改善例①【一括設定画面】



図9 改善前の一括設定画面

当初、図9のとおり、中央の円弧インジケータにより温度設定可能範囲や省エネ範囲を示していたが、ユーザビリティテストの結果、それを認識できたユーザーはあまりいなかった。

そのため、改善策として、個別設定中の部屋を表すドットをその設定温度に応じてインジケータの周囲に配置するようにした(図10)。



図10 改善後の一括設定画面

これにより、一括設定温度を中心として、ドットが右側に配置されるほど設定温度が高く、左側に配置されるほど低いことを示した。

また、中央の大きなドットを押すと、バラバラに配置されていたドットが中央に向かって移動し、ボタンの背後に隠れて消えるというアニメーションを使うことで、各部屋の設定温度が1つの温度(中央に表示されている温度)に一括設定されたことを示し、そのゆっくりした動きで、「暑い(寒い)と感じている家族に設定温度を寄せる」といった優しい管理を促すことができる。

(b) 改善例②【個別設定画面】



図11 改善前の個別設定画面

「VAV方式の空調システムにおける集中管理」に主眼を置く場合、各部屋が個別に設定されているかを素早く確認できることが重要と考えた。

そこで運転状況(スケジュール、エコなど)に代えて個別設定の切り替えスイッチを配置することにした。

非言語によって示唆されるシステムの仕組みは、ほとんどのユーザーが正しく理解できなかつたため、アイコンは廃止し、設定項目などは文字で明示した。



図12 改善後の個別設定画面

3.5 施工性・サービス性の向上

「きくばり」VAVシステムの施工の際に、機器の構成、接続などを設定するエンジニアリング作業が必要となる。これまでは、ユーザー用の個室リモコンを使用していたため、エンジニアリング作業には不向きな点があった。

これを改善するため、エンジニアリング用アプリケーション「エンジニアリングツール」を併せて開発した。



図13 個室リモコン

設定、確認できる内容としては、

- ・結線順序入力(図14)
- ・設計システム構成コード入力
- ・システム構成確認(図15)
- ・システム構成設定
- ・温度/静音優先設定
- ・エラー一覧
- ・FWバージョンアップ
- ・管理コマンド実行
- ・VAVレジスター一覧
- ・設定温度と室温一覧(図16)

である。  
この中のシステム構成確認画面(図15)では、「きくばり」VAVシステム全体の、接続VAV数、接続リモコン数やVAV通信状態、リモコン接続状態などが一覧表で見ることができ、不良箇所や設定ミスなどを容易に見ることができるため、施工時の作業効率が図られている。



図14 結線順序入力画面



図15 システム構成確認画面



図16 設定温度と室温一覧

4. おわりに

今回開発した集中リモコンは、全館空調VAVシステム向けに特化し、ユーザーの住宅内で操作することに限定している。

しかし、最近のネット事情を鑑みると、ユーザーの携帯端末から公衆回線を使い、外出先や勤務先からも操作するだけでなく、ユーザーの位置情報から自動的に操作を行うことも求められる。今後は、インターネット上などからユーザー端末にアプリケーションを提供し、クラウドなどのサービスを展開していくことを計画している。

クラウドサービスの導入により、アズビルが全館空調システムの稼働状況などをリモートで監視し、ユーザーへのメンテナンス提案にも活かせると考えている。

将来的には、日々のユーザーのライフスタイルによる設定値変更のデータやインターネットから得られる気象などのデータと関係させ、最適な温度設定の提案につなげたい。このことにより、全館空調システムの最適運転を実現し、さらなる省エネ性の向上を目指したい。

最後に、今回開発した集中リモコンは、全館空調システム「きくばり」とともに、2018年度のグッドデザイン賞を受賞することができた。

<参考文献>

- (1) 森川, 松浦, 地下, 小貝, 上運天, 田中, azbil Technical Review 2017年4月号, pp.57-63「戸建住宅向け全館空調VAVシステムの開発」
- (2) 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消

費量計算方法の解説, 財団法人 建築環境・省エネルギー機構 (IBEC), 2009, p53

<商標>

「きくばり」はアズビル株式会社の商標です。  
Wi-FiはWi-Fi Allianceの商標です。  
AndroidはGoogle Inc.の商標です。

<著者所属>

羽場 照芳 技術開発本部商品開発部  
田中 裕造 技術開発本部商品開発部  
奈良 千尋 技術開発本部商品開発部

# 放電音を防止した電子式エアクリナーの開発

## Prevention of Electrical Discharge Noise from Electric Air Cleaners

アズビル株式会社  
技術開発本部

石川 尚弘  
Naohiro Ishikawa

アズビル株式会社  
技術開発本部

井口 俊丸  
Toshimaru Iguchi

キーワード

静電フィルタ、放電、監視回路、圧力損失、PM2.5、集塵性能

戸建住宅向け全館空調システム「きくばり<sup>TM</sup>」では、空気清浄のために電子式エアクリナーを採用している。電子式エアクリナーは、粉塵を帯電するイオナイザ部と帯電した粉塵を集塵する集塵部で構成されている。今回、集塵部に永久分極した静電フィルタを採用し、イオナイザ部に監視回路(監視ボード)を追加した電子式エアクリナーの開発を行った。本製品は、お客さまに放電音の不快感なしに安全で清浄な空気環境の提供を行うものである。

Azbil's residential central air conditioning system incorporates an electronic air cleaner for air purification. The air cleaner is composed of an ionizer that gives dust an electrical charge and a collector that collects the charged dust. This paper reports the development of an electronic air cleaner with a monitoring circuit (monitoring board) added to the ionizer which uses permanently polarized electrostatic filters in the dust collector. This product provides a safe and clean air environment without the annoyance of discharge noise.

### 1. はじめに

戸建住宅向け全館空調システム「きくばり」では、24時間空調により温度のバリアフリーを実現し、電子式エアクリナーの採用によりスギ花粉やPM2.5など、空気中に浮遊して身体に悪影響を与える粒子の大半を除去し家の中の空気をきれいに保つことができる。電子式エアクリナーは、高電圧のイオナイザ部で粉塵を帯電させ、電圧を印加した集塵部で帯電した粉塵を集塵する構造となっている。従来の電子式エアクリナーは、集塵部に粉塵が堆積すると放電音を発生することがありユーザーに不快感を与える場合があった。本開発では、集塵部に永久分極した静電フィルタを採用することで集塵部への電圧の印加を不要とし、放電音を防止しユーザーの不快感を取り除くことができた。従来の集塵部は金属製で不燃であったが、本開発の集塵部は可燃素材であるためより高い安全性が求められた。開発にあたっては、監視回路を追加し、従来と同等の安全性を確保した。

以降、2章では従来のエアクリナーの役割、原理と課題について、3章では集塵部における放電音の防止と難燃

性、交換の容易性について、4章では、開発課題であった圧力損失、集塵性能、安全性(監視ボード)について述べる。

### 2. 電子式エアクリナーの役割・原理と課題

従来の電子式エアクリナーの役割・原理と課題について図で示す。

#### 2.1 電子式エアクリナーの役割

全館空調システムの構成を図1に示す。全館空調システムは、冷暖房と送風機能の室内機、空気清浄機能の電子式エアクリナーおよび換気機能で構成されている。全館空調システムは室内の空気を循環させることにより空気清浄しており、電子式エアクリナーの役割は家全体の空気をクリーニングし粉塵を除去したきれいな空気を室内機に供給することである。全館空調システムでは、最大1時間に4~5回クリーニングされたきれいな空気が室内機を通じて各部屋の吹出し口に供給されている。

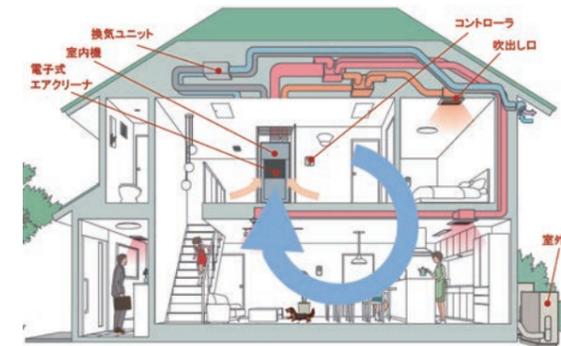


図1 「きくばり」システムの構成

#### 2.2 電子式エアクリナーの原理と課題

従来の電子式エアクリナーの仕組みを図2に示す。

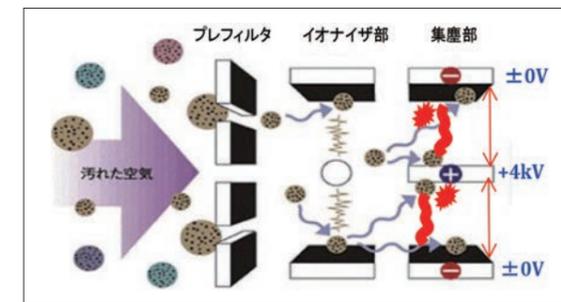


図2 従来の電子式エアクリナーの仕組み

エアクリナーに取り込まれた室内の空気は、プレフィルタで直径約50 $\mu$ mより大きい粒子を除去する。通り抜けた直径約50 $\mu$ m以下の細かい粒子は、イオナイザ部の高電圧線により帯電され、後部にある集塵部の平板電極に吸着させる仕組みである。一般的なフィルタよりも細かい粒子を除去することができ大気微小粒子(PM2.5)を除去する性能がある。一般的なフィルタと電子式エアクリナーが除去できる粒子の大きさを図3に示す。集塵部は、交互に高電圧が印加された極板が電極間距離4mmピッチで配置されており、極板に粉塵が堆積し電極間の空間絶縁距離が短くなると放電音(パチパチ音)が発生し、ユーザーに不快感を与えることがあった。放電音の対策には、専門業者による定期的な集塵部の清掃が必要であった。

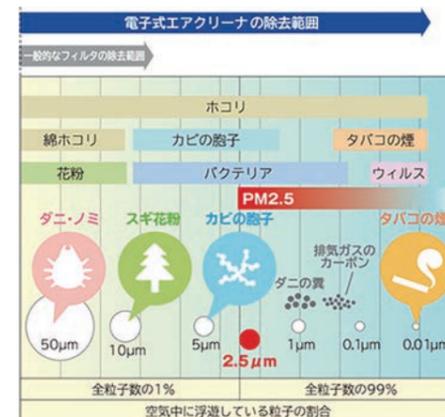


図3 粒子の大きさと除去範囲

### 3. 集塵部の開発

集塵部の検討にあたり、今回の開発に求められた仕様を下記に示す。

- (1)放電音の防止
- (2)難燃性
- (3)容易に交換・廃棄が可能なこと

#### 3.1 放電音の防止

放電音の対策として、集塵部に図4に示す繊維フィルタ・静電ハニカム・静電フィルタの集塵効率と圧力損失を測定し検討した。



図4 検討した集塵部

表1 検討結果

|      | 繊維フィルタ | 静電ハニカム | 静電フィルタ |
|------|--------|--------|--------|
| 集塵効率 | 20%    | 91%    | 82%    |
| 圧力損失 | 32Pa   | 40Pa   | 37Pa   |

表1の結果より、集塵効率が高い静電ハニカムと静電フィルタで検討を行った。静電ハニカムは、ハニカム構造のため集塵した粉塵が風の流れにより再飛散することが判明し、静電フィルタを採用することとした。図5に静電フィルタに使用している静電繊維の集塵の仕組みを示す。静電フィルタは電圧の印加が不要な静電繊維により、表面が分極しているため帯電した粉塵はクーロン力で、非帯電の粉塵は誘電分極されて吸着することができる。これにより、放電音を防止した。開発した電子式エアクリナーの仕組みを図6に示す。

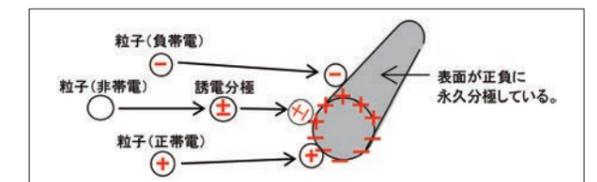


図5 静電繊維の集塵の仕組み

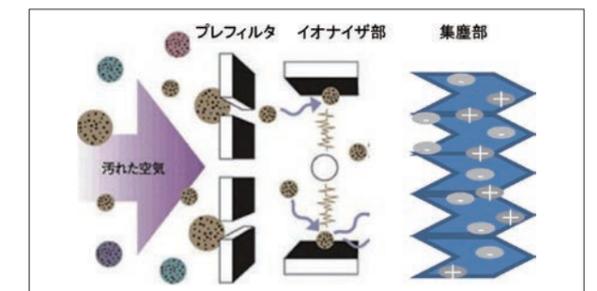


図6 開発した電子式エアクリナーの仕組み

### 3.2 難燃性

集塵部は、不織布である静電フィルタと厚紙枠、接着と固定用のホットメルトの3つの部材で構成されている。難燃性を考慮し各素材を下記のように選定を行った。

- ・不織布:JACANo.11A-2003 クラス3
  - ・厚紙枠:UL94 HBクラスの難燃性
  - ・ホットメルト:JACANo.11A-2003 クラス3
- 採用した静電フィルタを図7に示す。

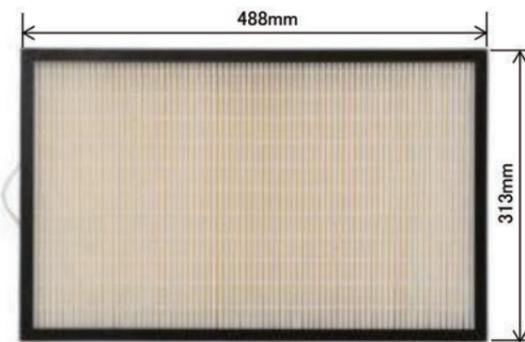


図7 採用した静電フィルタ

### 3.3 容易に交換・廃棄可能なこと

集塵部をイオナイザ部から分離し容易に交換ができる構造とした。静電フィルタの外形も多くの自治体で粗大ごみとはならない長辺が500mm未満とし、家庭でも廃棄しやすい大きさとした。

## 4. 電子式エアクリーナ開発

開発した電子式エアクリーナの仕様を下記に示す。

- (1)性能
  - ・圧力損失:流量30m<sup>3</sup>/minにて40Pa以下
  - ・集塵性能:PM2.5除去性能あり(JEMA規格)
- (2)安全性(監視回路)
  - ・イオナイザ線の断線時の放電対策
  - ・給電部のトラッキング対策

これを基に開発した電子式エアクリーナを図8に示す。



図8 開発した電子式エアクリーナ

### 4.1 性能

エアクリーナの基本性能は、いかに効率よく空気を清浄できるか、すなわち単位時間あたりの空気清浄化能力で測られる。空気清浄能力は、給気・排気間の圧力損失と集塵効率が重要な評価指標となる。

### 4.1.1 圧力損失(風量)

集塵部の静電フィルタは、図9に示すようなプリーツ構造にすることで空気の通過面積が大きくなり、集塵効率が向上し圧力損失を低くすることができる。プリーツ形状の山高とピッチの最適化を行うことで圧力損失の増加を最小限とした。

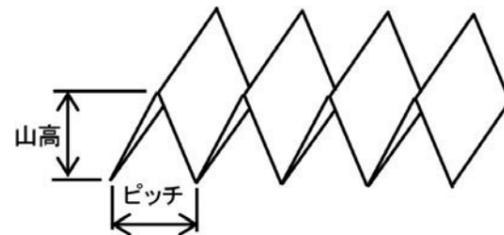


図9 プリーツ構造の静電フィルタの山高とピッチ

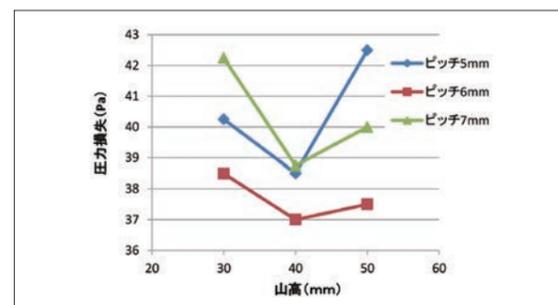


図10 プリーツ形状の最適化(流量40m<sup>3</sup>/min)

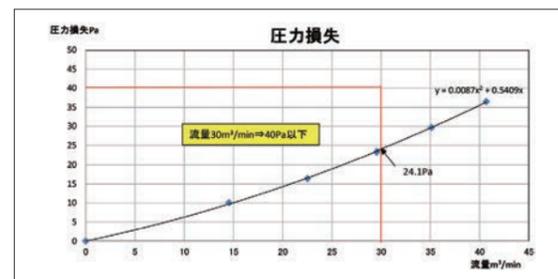


図11 開発した電子式エアクリーナの圧力損失

図10に示す実験の結果、山高40mmピッチ6mmの構造の圧力損失が低くなった。またこのとき、図11で示すように要求仕様である流量30m<sup>3</sup>/minにて圧力損失40Pa以下に対して24.1Paを実現することができた。

### 4.1.2 集塵性能(PM2.5除去性能)

開発したエアクリーナのPM2.5除去性能について、日本電機工業会自主基準(HD-128)「家庭用空気清浄機の微小粒子物質(PM2.5)に対する除去性能試験および算出方法」に基づいた第三者機関による試験を実施した。

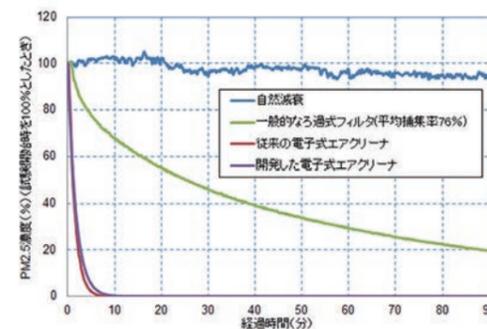


図12 PM2.5濃度の時間変化

試験の結果(図12)、微小粒子物質(PM2.5)に対する一定の除去性能を有し、「0.1μm~2.5μmの粒子を99%除去する」という結果が得られた。また、従来の電子式エアクリーナと比較しても微小粒子物質(PM2.5)の減衰曲線は殆ど変わらない結果となった。

## 4.2 安全性

集塵部に静電フィルタを採用するにあたり安全性についてリスクアセスメントを実施した。検討の結果、イオナイザ線が断線し静電フィルタへ放電が発生したときや給電部のトラッキング発生時の対策が必要であることを確認した。対策としてイオナイザ電圧の正常状態を監視する監視回路(監視ボード)を追加することとした。

追加した監視ボードを図13に示す。



図13 監視ボード

開発した監視回路の主な機能は下記である。

- ・イオナイザ電圧の監視機能
- ・イオナイザ放電の検知機能
- ・検知回路の健全性を常に確認するためのセルフチェック機能

### 4.2.1 イオナイザ電圧の監視機能

イオナイザに供給される電圧を監視し、規定値範囲内であることを監視する機能である。パワーバック(高電圧電源)より供給される電圧をイオナイザ電圧検知回路(図14)にて、電圧の変動が標準値の53%~128%であることを監視し、この範囲以外の値が2秒間継続するとパワーバックの電源をOFFにする。

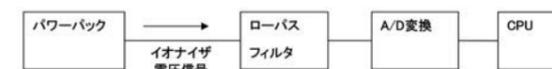


図14 イオナイザ電圧検知回路ブロック図

### 4.2.2 イオナイザ放電の検知機能

イオナイザに供給される電圧をイオナイザ電圧検知回路(図14)とイオナイザ放電検知回路(図15)の2系統でチェックすることにより、放電を検知する。2秒間に放電検知回路で波形エッジを6回検知、または電圧低下(4500V以下)を3回検知した場合、イオナイザ放電と判断しパワーバックの電源をOFFにする。

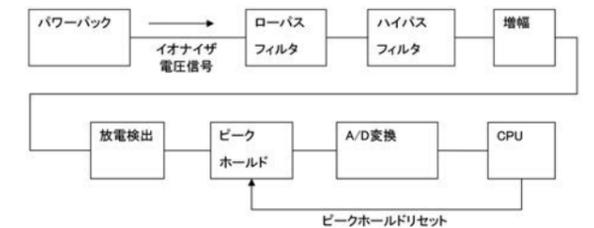


図15 イオナイザ放電検知回路

### 4.2.3 セルフチェック機能

イオナイザ放電検知回路とイオナイザ電圧検知回路に定期的にテスト信号を発生させ、それぞれの回路が正常に機能していることを確認する。セルフチェックは以下のタイミングで実施される。

- ・運転開始10秒後
- ・運転開始後24時間ごと

これにより、経年劣化や偶発故障などに対応し、長期の安全を確保した。また、セルフチェックエラー時は、パワーバックの電源をOFFにし、お知らせランプが点灯する。お知らせランプ点灯時は、当社ホットラインに連絡いただく。

上記の検知回路とセルフチェック機能により異常放電を検知するだけでなく検知回路の健全性を常に確認することで安全性を強化した。

## 5. おわりに

今後、大陸からの偏西風で流れてくるPM2.5や花粉など、屋内の空気環境をよりよくするため空気清浄機の役割はより重要になってくると考えられる。今回、電子式エアクリーナの課題の1つである放電音を防止することができた。今後は、省スペース化やメンテナンス性のさらなる向上などの検討に取り組んでいく予定である。

### <参考文献>

- (1)岩田, azbil Technical Review 2013年4月号, pp.82-86 「暮らしのさらなる安心・安全・快適を目指して ~azbilハウスでの技術融合」

### <商標>

「きくぼり」は、アズビル株式会社の商標です。

### <著者所属>

- 石川 尚弘 技術開発本部商品開発部
- 井口 俊丸 技術開発本部商品開発部

# 微小液体流量の計測を可能にする 熱式液体微小流量計の開発

## Technology and Features of a Thermal Flowmeter for Liquid Microflows

アズビル株式会社

アドバンスオートメーションカンパニー

小田 康彦

Yasuhiko Oda

キーワード

微小流量計測, 熱式, MEMSセンサ, 高精度, 実流評価

近年、製造プロセスの高度化や品質要求の高まりにより、微小な流量の高精度計測が求められている。今回、30mL/min以下の微小流量に対して精度±5%RDでの計測が可能な熱式液体微小流量計、形 F7Mを開発した。形 F7Mは他にも低圧力損失、高信頼性、小型などの特長を備えている。これらの特長を実現するために石英ガラス管とMEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) センサを組み合わせた流量センサモジュール、小型直管流路構造、および微小流量を高精度に計測できる実流計測設備などの技術を開発した。形 F7Mの特長と技術開発内容について報告する。

In recent years, due to advances in manufacturing processes and more stringent quality requirements, highly accurate measurement of microflows has become necessary. We have now developed a thermal flowmeter for liquid microflows, model F7M, capable of measuring with an accuracy of ±5 % of reading for micro flow rates of 30 mL/min and less. Moreover, this device has low pressure drop, high reliability, and a compact size. In order to create a model with these features, we developed several technologies: a flow sensor module using fused quartz glass tubes and a MEMS (microelectromechanical systems) sensor; a small straight pipe flow-path structure, and equipment capable of measuring actual micro flow rates with a high level of accuracy. We discuss the features of the F7M and the technological developments that made it possible.

### 1. はじめに

液体の流量計測は様々な産業の様々な場面で利用されてきた<sup>(1)</sup>。近年では、製造プロセスの高度化や品質要求の高まりから、流量計測を行う対象範囲は拡大し流量計の設置数量も増加の一途をたどっている。

中でも流量計測分野において注目されている領域の1つに微小流量の計測があり<sup>(2)</sup>、例えばリチウムイオンバッテリーの製造工程における電解液の注入、半導体製造におけるフォトレジスト液の塗布、生化学検査などにおける試薬の混合や希釈、特殊な液剤の噴霧、洗浄薬液の混合、といった用途が挙げられる。ここでは30mL/min以下の流量を微小流量と定義する。微小流量の計測方式としては容積式、差圧式、コリオリ式、超音波式などが提案されているが、以下の課題があった。

1. 微小流量に対して高い計測精度を実現できない、あるいは高価である。
2. 計測部の圧力損失が大きい。
3. 可動部があり信頼性に不安がある。
4. 小型化が難しい。

そこでアズビルでは前記課題を解決できる計測器として、熱式液体微小流量計 形 F7Mを開発した。

本稿では形 F7Mの特長と技術的な要点を述べ、流量計測の性能確認結果を報告する。

### 2. 製品の概要

#### 2.1 外観および仕様

形 F7Mの製品外観を図1に、概略仕様を表1に示す。



図1 形 F7M製品外観図

表1 形 F7M概略仕様

|                     |                                      |              |
|---------------------|--------------------------------------|--------------|
| 製品形番                | F7M9010                              | F7M9030      |
| 計測流量範囲<br>(流体が水の場合) | 0.1~10mL/min                         | 0.3~30mL/min |
| 計測精度<br>(流体が水の場合)   | ±5%RD (20%FS以上)<br>±1%FS (20%FS未満)   |              |
| 繰り返し性<br>(流体が水の場合)  | ±1%RD (20%FS以上)<br>±0.2%FS (20%FS未満) |              |
| 製品サイズ               | 幅22mm×高さ60mm×面間122mm                 |              |
| 重量                  | 約85g                                 |              |
| 流体圧力範囲              | 0~500kPa                             |              |
| 流路耐圧                | 700kPa                               |              |
| 保護構造                | IP65                                 |              |

#### 2.2 特長

形 F7Mは以下のような特長がある。

##### (1) 高精度な微小流量計測

形 F7Mは20%FS以上(30mL/minレンジ:6~30mL/min, 10mL/minレンジ:2~10mL/min)の流量に対して±5%RDの高い精度、かつ±1%RDの高い繰り返し性を実現している。これにより従来計測が困難であった微小流量の管理が可能となり、ユーザーのプロセス改善、歩留り向上に貢献できる。

##### (2) 低圧力損失

製品内部ではセンサモジュールと呼ぶセンサチップが外面に貼りつけられている石英ガラス管と、流体の出入接続部であるフッ素樹脂製の継手が同軸上に配置されており、流路内に障害物は存在しない。そのため最大流量時でも圧力損失は1kPa未満となり、実用的に無視できるレベルとなった。これにより流体の送水圧力を小さくでき、設備の簡素化に貢献できる。

##### (3) 高信頼性

可動部がなく高い耐久性を持つ。また、接液材料は石英ガラスとフッ素樹脂だけで構成されており、様々な流体に対して高い耐食性を持つ。これにより、幅広いアプリケーションで安心して使用できる。

##### (4) 小型

電子基板を含めて幅22mm×高さ60mm×面間122mmのコンパクトなサイズである。これにより設置場所の自由度を高くすることが可能となり、ユーザーの設備や装置の小型化に貢献できる。

#### 2.3 計測原理

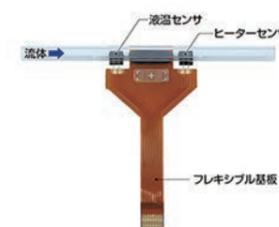


図2 センサモジュール

形 F7Mは熱式流量計に区分され、消費電力方式と呼ばれる方式で流量計測を行っている。図2に示すとおり、流路を構成するガラス管の上流側に流体温度を計測する液温センサ、下流側に自身の温度と消費電力を同時に計測するヒーターセンサが配置されている。液温センサで計測した流体温度に対してヒーターセンサを一定温度高くなるように温度制御する。ガラス管内を流体が流れているときの温度分布を図3に示す。この時、流量が大きいほど流体がヒーターから奪う熱量は大きくなる。従って、液温に対し一定温度差になるようにヒーターを制御した場合、ヒーターで消費される電力は流量に相関を持つ。つまり、ヒーター消費電力を計測することで流量を求めることができる。

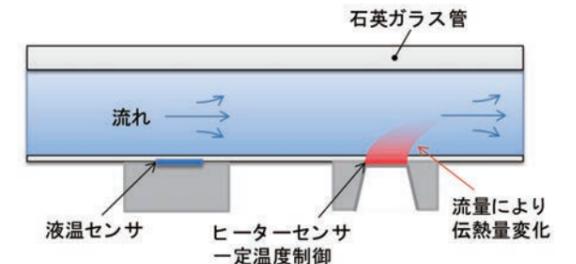


図3 形 F7Mの流量計測原理図

また、熱式流量計はその原理から流体の種類(主に熱伝導率)によってセンサ出力が影響を受ける。そこで形 F7Mでは内部に補正演算機能を持たせ、流体の種類(熱伝導率)に合わせた補正係数を設定することで、流体の種類にかかわらず流量計測が可能である。

### 3. 技術開発

2章で述べた形 F7Mの特長を実現するにあたっての課題と、解決のための技術を以下に述べる。

#### 3.1 高精度流量計測を可能にした熱式流量センサモジュール<sup>(3)</sup>

熱式流量センサは約3mm角のシリコンチップ表面に温度計測抵抗やヒーターを配置したMEMSセンサであり、小型化が容易で、センサの熱容量が小さいため応答性に優れるという利点を持つ。

流量とヒーター消費電力の関係は式(1)で表される。

$$\Delta P = \left( \frac{1}{A/\sqrt{q} + B} \right) (T_1 - T_\infty)$$

$$A \propto \eta \frac{1}{6} \times \lambda_2^2 \times P_2^2 \times C_p^{\frac{1}{2}} \quad B \propto \left( \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_1}{\lambda_1} \right) \dots \text{式(1)}$$

$\Delta P$ :消費電力  $q$ :流量  $\eta$ :流体の粘性率  $\lambda$ :流体の熱伝導率  $\lambda_1$ :ガラスの熱伝導率  $\lambda_2$ :接着剤の熱伝導率  $P$ :流体の密度  $C_p$ :流体比熱  $l_1$ :ガラス管厚さ  $l_2$ :接着剤厚さ  $T_1$ :ヒーター温度  $T_\infty$ :流体温度

実際に今回のセンサで流量 $q$ と消費電力 $\Delta P$ の関係を測定した結果は図4のようになった。製造工程においては、個体ごとに流量 $q$ と消費電力 $\Delta P$ の関係を実測し、相関式

(曲線)を内部に保存する。その相関式を基に流量を演算している。

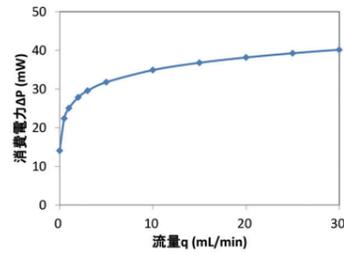


図4 流量と消費電力の関係

高精度な液体流量計測のためにはセンサチップと流体との熱的な結合が重要であり、式(1)における $\lambda_g$ :ガラスの熱伝導率、 $l_g$ :ガラス管厚さ、 $\lambda_a$ :接着剤の熱伝導率、 $l_a$ :接着剤厚さを最適に設計、製造しなければならない。また、ガラス管へのセンサチップ接着では、ガラス管および接着剤の熱変形による応力や機械的な応力でセンサが悪影響を受けることがないように工夫する必要もあった。

そこで、図5のような、石英ガラス管の円周部の一部を平面状に切削するとともに、温度、湿度などの外乱の影響を受けにくい特殊な接着剤を、一定の厚さにコントロールして接着するセンサモジュール製作工法を確立した。

この構造および工法を用いることでセンサチップには応力はかからず、流体とセンサ間で効率よくかつ常に同じ状態で熱伝達することができる。すなわち、流量変化によるヒーター消費電力の変化を高感度に測定でき、かつ外乱に強く再現性の高いセンサモジュールの生産が可能となった。

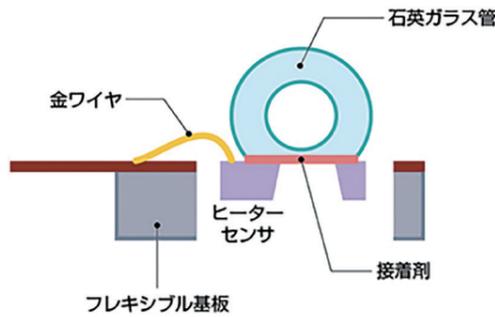


図5 ヒーターセンサ部の断面図

### 3.2 低圧力損失、高信頼性を実現した直管流路構造

センサモジュールの特長を活かした低圧力損失、高信頼性の流路を実現するために、ガラス管と継手を同軸で接続する必要がある。継手には、ガラス管との接続、ユーザー側のチューブとの接続の2つの機能を持たせなければならない。この機能を有するフッ素樹脂継手は市販品として存在するが、本製品に適用するには2つの課題があった。

課題1. ガラス管との接続部を締め付け固定するのに内部スペースが必要で筐体が大型になる。

課題2. ガラス管は熱伝達をよくするために薄肉になっており破損しやすい。継手の締め付け固定時には、手振れなどでガラス管に負荷がかかりやすいので、組立時にガラス管破損を防ぐ工夫が必要となる。

そこでアズビルでは上記2つの課題を解決できる図6のような特殊構造を考案した。

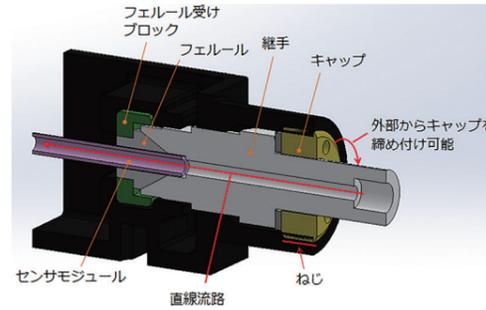


図6 継手部断面図(片側だけ拡大)

継手部分の組立構造はケースとセンサモジュール、フェルルール、フェルルール受けブロック、継手、キャップと呼ばれる部品からなる。組立時にはまずセンサモジュールとフェルルール、フェルルール受けブロックをケース内部で組み立てた後に、外側から継手を挿入し、その継手ごとにキャップをケースにねじ込むことで流路全体を固定する。継手はケースと組み合わせた回り止め構造を持っているため、キャップのねじ込み時にも共回りすることなく、ねじ込み力をフェルルールと継手のテーパ接続面に全て伝えることができる。この力によりフェルルールが中心向きに変形してガラス管全周をくわえこみ、密閉流路が形成される。

この構造によりキャップのねじ込みを筐体の外から行えるようになり、本体の小型化を実現した。

さらに、キャップを締めるまでは簡単な位置決め作業だけで済み、締めるときの力はねじによって軸方向の力だけに変換されるため、ガラス管に余計な負荷がかかることがない。これによりガラス管の破損の心配のない、生産性の高い組立工程も実現した。

筐体の外からキャップを締め付ける構造には別の利点もあり、構成するフッ素樹脂のクリープ(力がかかり続けることによる変形の進行)によるシール面の面圧の低下に対して、キャップを増し締めすることによって容易に押圧力を補充することができる。製造工程ではクリープ対策として、組立てから1日置いた後に増し締めを行っている。これにより、コールドフローが最も大きい初期段階の影響を軽減することができるため信頼性が増す。

この直管流路構造の長期信頼性を確認するために、10年使用相当となる高温負荷を印加した後に、1MPaでの耐圧試験を行った。結果漏れはなく、この構造の高い信頼性が確認できた。

### 3.3 微小流量を高精度に計測できる実流計測設備

高精度な流量計を製作するには、より高精度に流量を計測できる設備が必要である。今回、新たに専用の実流設備を構築した。

図7に設備の概略図を示す。流量精度計測はタンク内に溜めた純水を圧縮空気により押し出し、DUT (Device Under Test:被試験器)をとおして標準器である電子天秤(以下秤)に溜め、その質量変化から求めた流量とDUTが

計測した流量を比較することで行う。恒温槽とチラーを用いて周囲温度、流体温度ともに調節できるようになっており、様々な測定条件で測定が可能である。

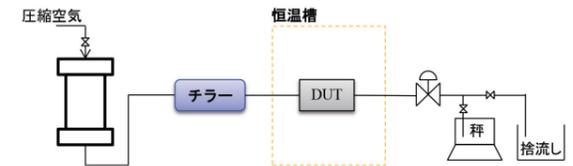


図7 微小流量計測設備概略図

秤に溜めた水の質量を測定するにあたり、微小流量の計測であることに起因する2つの課題がある。

#### 課題1. 測定中の水の蒸発による誤差

測定中に秤量器に溜まった液体は常温環境においてもわずかな量が蒸発してしまう。蒸発量は秤量器タンクの大気開放面積に相関をもち、実験環境では0.1g/30minの蒸発が観測された。これは微小流量の測定においては無視できない誤差要因となる。

#### 課題2. 液滴による誤差

通常、秤量器への排出口は、秤量への影響を避けるために秤量器タンクの液面に接触しないで空中に位置させる。

しかし、微小流量の場合、表面張力により排出口から液滴となって排出される。実測された液滴は1滴あたり約0.5mgであり、この液滴1つが秤量器に排出されたか否かが微小流量の測定においては誤差の要因となる。

これらの課題に対し、以下のような対策を実施した。

#### 対策1. 油による蒸発防止およびサブマリン排出口

図8のように秤量器にあらかじめ水を溜めてその上層に水よりも比重の小さく蒸発しない液体(油)を浮かべておき、流路の先端は水の層に入るようにするサブマリン構造を考案した。

これにより水は油の下に溜まるため油の層によって蒸発が完全に防がれ、かつ、液滴での排出にならない。よって、課題1, 2両者の対策となり、測定精度が向上する。

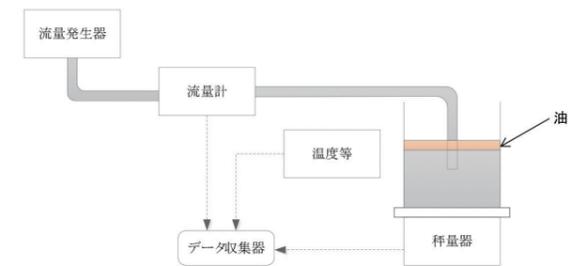


図8 正確な流量測定のためのサブマリン構造図

#### 対策2. 秤量値/時間の同時連続測定

流量が変化したときの過渡応答を誤差要因としないためには一定流量を流した条件での精度試験が必要であるが、対策1で考案したサブマリン構造では転流器などでの流路切り替えができない。そのため、秤量値とその時刻を同時に測定し、かつそのデータ取得を連続して繰り返す方法を考案した。図9に示すとおり、標準流量は多点の秤量器と時刻データから求められた直線の傾きとなる。この方法により、流量計の過渡応答に影響を受けない実流測定を実現できた。

当設備は、拡張不確かさ0.15%RD(弊社見積)を実現でき、±5%RDの製品精度評価をするに十分な性能を有している。

図9に示すとおり、標準流量は多点の秤量器と時刻データから求められた直線の傾きとなる。この方法により、流量計の過渡応答に影響を受けない実流測定を実現できた。

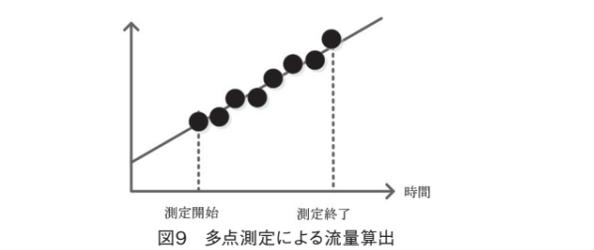


図9 多点測定による流量算出

## 4. 性能確認試験結果

### 4.1 流量測定結果

形F7Mのレンジ10mL/minモデルおよび30mL/minモデル各5台に対してそれぞれ水の流量測定を行った結果を図10に示す。

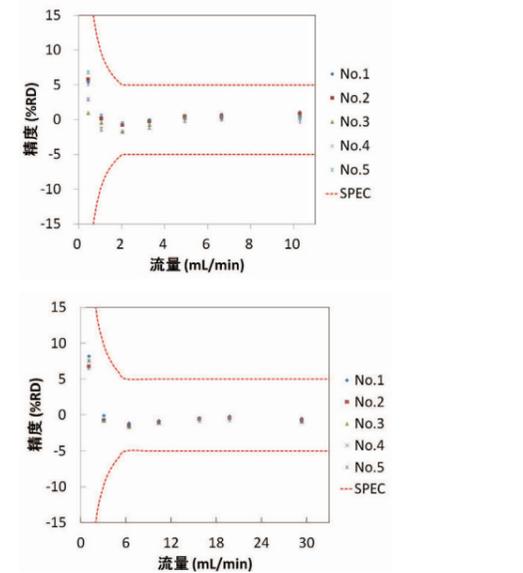


図10 10mL/minモデルの流量測定結果(上)と30mL/minモデルの流量測定結果(下)

どちらのモデルにおいても製品精度仕様±5%RD(20%FS以上の流量)に対して実測値±2%RD以下となり、微小流量の高精度計測が可能となった。

### 4.2 水以外の流体に対する流量測定結果

実際のユーザーの使用条件では、水以外の液体の流量計測が必要とされることが多い。熱式流量計は原理的に流体の物性値の影響を受け、特に式(1)のうち流体の熱伝導率の項の影響を大きく受ける。

形F7Mでは液種補正係数を設定することで水以外の流

体での流量計測にも対応している。

イソプロピルアルコール（以下IPA）100%およびIPAと水との50%混合液に対して実際に流量測定を行い、液種補正を行わない場合の実流量と形 F7Mの流量出力の関係、液種補正係数を設定した場合の実流量と形 F7Mの流量出力の関係を図11に示す。

図11のグラフが示すとおり、液種補正係数を設定することで液体種類に関わらず流量計測ができ、水以外の様々な流体にも適用可能な微小流量計を実現できた。

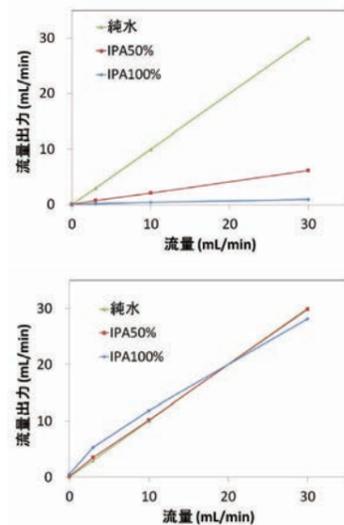


図11 補正係数を入れる前の水とIPAの流量測定結果(上)と補正係数を入れた後の水とIPAの流量測定結果(下)

## 5. おわりに

微小流量に対して高精度で流量計測が可能で、低圧力損失、高信頼性、小型などの特長を備えた熱式液体微小流量計、形 F7Mを開発した。形 F7Mは2017年より販売を開始しており、様々なユーザーより高評価を頂いている。

今後は、流量レンジの拡張、液体補正係数の自動設定機能の追加など、製品ラインナップおよび製品機能の拡張を計画しており、ユーザーへの価値をより高めることができると考えている。

### <参考文献>

- (1) 日本計量機器工業連合会編:流量計の実用ナビ-改訂版(日本計量機器工業連合会, 2012)
- (2) チョン・カー・ウィー:微小液体流量計測の現状と将来展望, 産総研計量標準報告 Vol.8, No.1 (2010) pp.15-43
- (3) 中野正志, 池信一, 他:液体向けMEMS 微小流量センサの開発, 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 31pm3-PS-48

### <著者所属>

小田 康彦 アズビル株式会社  
アドバンスオートメーションカンパニー CP開発部

# 組立作業ミスの予測・通知技術の開発

## Prediction and Alert Technology for Human Error in Assembly Work

アズビル株式会社  
AIソリューション推進部

近藤 政紀  
Masanori Kondo

アズビル株式会社  
ITソリューション本部

北條 達也  
Tatsuya Hojo

### キーワード

ボカミス, ヒューマンエラー, AI (Artificial Intelligence), 機械学習, 予測, 通知

近年のものづくりでは、グローバル競争力の強化のため、IoT (Internet of Things)やAI (Artificial Intelligence)などを活用し、品質の向上や生産性の向上などを目的としたスマート化が重要と考えられており、そのスマート化の目的の1つにボカミス削減が挙げられている<sup>(1)</sup>。本稿では、このヒューマンエラーであるボカミスに着目し、AIの技術である機械学習によって作業者の思い込みによるボカミスを予測し、ミスしそうな注意点を作業の前に通知する技術を開発したので報告する。この技術によりボカミスを抑制することで、製品品質の確保と生産性向上に寄与できると考える。

In recent years, in order to strengthen global competitiveness, it is considered to be important to make equipment intelligent by applying technology such as the IoT (Internet of Things) and AI (artificial intelligence) to improve quality and productivity. One aspect of this improvement is the reduction of careless errors in manual work<sup>(1)</sup>. This paper describes our application of machine learning to predict careless errors caused by workers' preconceptions and to notify workers beforehand regarding points where mistakes are likely to occur. We believe that this technology can contribute to ensuring product quality and improving productivity by curtailing careless error.

## 1. はじめに

近年のものづくり企業では、グローバル競争力の強化のため、第4次産業革命をもたらしつつあるIoTやビッグデータ、AI、ロボットなどの技術を活用し、品質の向上や生産性の向上などを目的としたスマート化が重要と考えられている<sup>(1)</sup>。そのなかで、ものづくりの現場では、現在も「人」が作業する工程があり、この「人」の作業にともなうスマート化の目的の1つにボカミス削減が挙げられている。

そこで、このボカミスにヒューマンエラーととらえ、その要因から考える。ヒューマンエラーの要因は、12分類あると言われている<sup>(2)</sup>。このヒューマンエラー要因の12分類を図1-1のように「経験」「作業環境」「情報不備」「作業者の状態」の4つのグループに分けて考える。

「経験」「作業環境」「情報不備」の要因グループに関しては、現場作業者の訓練や教育、作業環境の改善、MES (Manufacturing Execution System:製造実行システム)などのシステム導入によりヒューマンエラーを減らすことがで

きるが、「作業者の状態」は常に変化し続けるため、これを起因とするヒューマンエラーへの対策は難しいと考える。例えば、単調作業や疲労からの集中力低下、工程進捗による焦りやストレスなどが要因になるヒューマンエラーである。



図1-1 ヒューマンエラー要因の12分類

このような作業者の集中力や注意力が低下した状態では、図1-2のような作業指示(指図)の各項目が都度変わる多品種少量生産の現場環境において、実際の指図とは異なった作業をしてしまうというボカミスが懸念される。

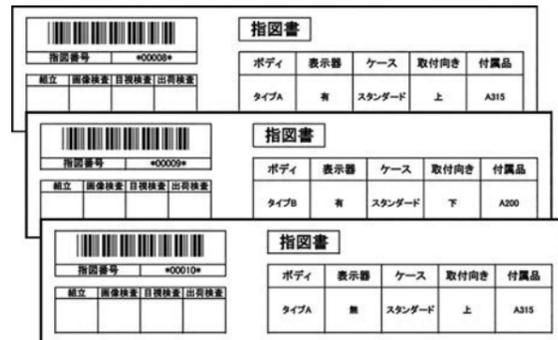


図1-2 指図書イメージ

これは、図1-3のように作業者は作業前に指図を見てはいるものの、直近や過去に多く作業していた指図内容と同じと思い込んで誤認知し、指図内容の違いを見落とししてしまうと考えられる。

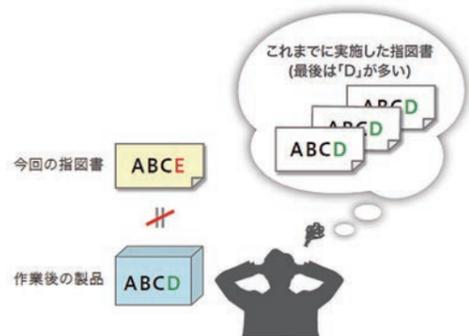


図1-3 思い込みによるボカミスの一例

上記の思い込みによるボカミスは、発生すると工程の手戻りとなり、場合によっては製品の廃棄が必要になることがある。また、後の検査工程で不適合を検出できなければ、お客さまに仕様が異なった製品が流出することにより顧客クレームとなる。

このような生産性や製品品質に影響を与える思い込みによるボカミスを削減するには、作業者が作業後ではなく作業前に自ら注意点を認知し、そもそもボカミスをしないことが最善である。

そこで、筆者らは、AIの技術である機械学習によって作業者の思い込みによるボカミスを予測し、ミスしそうな注意点を作業前に通知する技術(図1-4)を開発した。次章で、この技術に関して説明する。

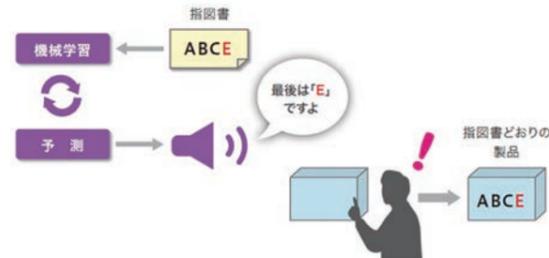


図1-4 作業ミスの予測・通知のイメージ

## 2. 作業ミスの予測・通知技術

### 2.1 入出力と教師データ

まず、作業者の思い込みによりボカミスしやすい箇所を予測するため、作業者の「思い込み」を機械学習のモデル対象として考えた。

与えられた指図をもとに作業する「作業者」を1つのシステムととらえると、図2-1のように、入力には作業者がそれまで過去に実施した指図の情報であり、出力はその作業者の思い込みの内容になる。この出力、つまり作業者の思い込みの内容も指図の情報である。そのため、入力も出力も指図の情報という形をとるモデルとなる。

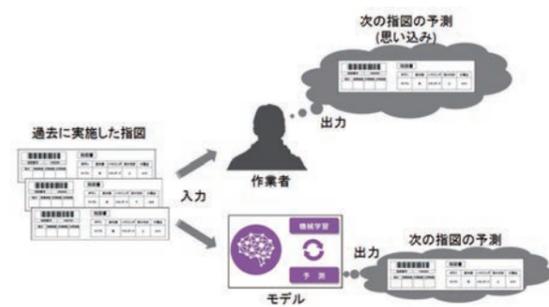


図2-1 入出力

また、このモデルを学習させるための教師データは、作業者の「思い込み」の「学習」と考えれば、作業者が実際に実施した指図情報とすればよい。

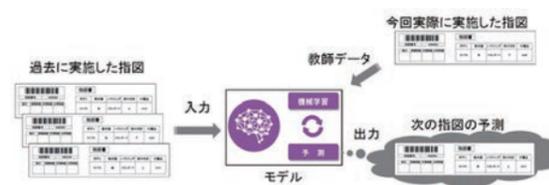


図2-2 教師データと学習

なお、作業後の検査工程でボカミスが見つかった際、その間違えた指図情報が利用できれば、実際にミスした内容で教師データ用の指図情報を作り、学習することで、作業者の「思い込み」のモデルは、さらに精度向上が見込める。

### 2.2 学習モデル

次に、機械学習のモデルについて示す。「思い込み」に関しては、認知と記憶が大きく関係している。それは、認知された情報が記憶となり、その記憶に基づいて判断・行動が行われると考えられるためである。この「記憶」には直近の情報を処理するためのワーキングメモリと呼ばれる短期記憶と、繰り返し経験することで形成される長期記憶があると言われている<sup>(3)</sup>。工場での組立工程に例えると、「赤色の蓋が続いている」といった直近の作業が短期記憶に相当し、「この型番の製品には、この部品が使われることが多い(全てがそうではない)」といった経験に基づく記憶が長期記憶に相当すると考えられる。

この2つの記憶のモデル化に対して、時系列データを学習してモデル化できる再帰型ニューラルネットワークRNN (Recurrent Neural Network)に属するLSTM (Long Short-Term Memory) アルゴリズム<sup>(4)</sup>を適用する。このLSTMアルゴリズムを応用したモデルを適用するのは、時系列のデータを繰り返し学習させることで、「赤色の蓋が続いている」といった時系列のパターン(短期記憶)や、「この型番の製品には、この部品が使われることが多い(全てがそうではない)」といった各々の入力項目の相関関係(長期記憶)を学習できると考えたからである。このモデルは、実際の次の指図情報を正確に予測するモデルではなく、過去に実施した指図から次の指図を予測(思い込み)する作業者のモデルである。

なお、作業者の思い込みは新しい指図の作業を行うたびに変わるため、この「思い込み」のモデルは作業するたびに学習して更新する必要がある。そのため、今回実施した指図情報を教師データとして、モデルを学習により更新する。

ここまでの流れをまとめると、図2-1のように、入力としてそれまでに行った指図情報を順に与えることで、出力である作業者の思い込みの内容を予測する。

次に、図2-3のように、その予測と今回実施すべき指図情報との差(スコア)が大きい項目が「思い込み」によるボカミスしやすい箇所となる。

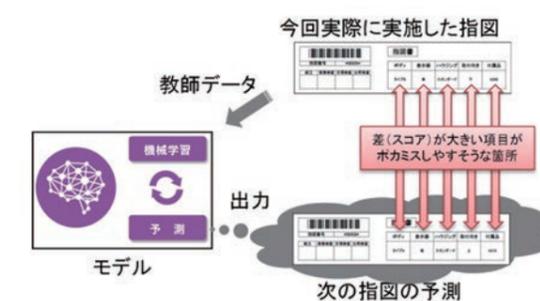


図2-3 ボカミスしやすい箇所

さらに、今回実施した指図情報を新たに教師データとして学習させ、モデルを更新した後、今回実施した指図情報を入力に加えることで、次の思い込みの予測ができるようになる。

### 2.3 作業者への通知方法

作業者に対しての思い込みによるボカミスの注意通知方法は、現場端末の画面とともに、スピーカによる音声でも通知することとした。現場に設置した端末画面での通知のみとすると、従来の「指図を確認して、作業する」といった作業の流れに、「注意点を画面で確認する」という追加の作業が発生する。注意点がない場合にも画面の確認が必要であるとする、常に無駄な意識移動や作業時間のロスが発生する。音声併用ならば、注意点の有無と内容を作業者準備中に聞きながら情報を得ることができ、聞き逃した場合にも画面の表示で確認できるからである。

また、音声で常に注意点が通知されると、その音声で作業者にとっての定常的な刺激となり、その刺激への慣れ(馴化)が発生し、作業者が通知に気付かなくなる可能性がある。そのため、本システムでは、ボカミスしそうなスコアを算出し、閾値によって通知の有無、さらには通知内容を切り替えることで対応した。なお、音声は音声合成の技術を使用している。

### 2.4 処理フロー

ボカミスしそうな項目の予測とモデル更新処理の流れを図2-4に示す。

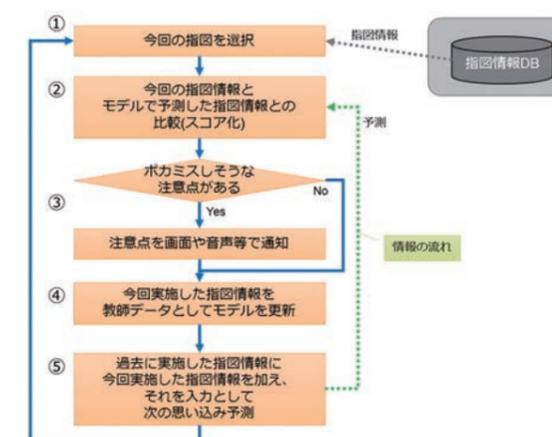


図2-4 処理フロー

- ①作業者が今回実施する指図(情報)を選択する。
- ②本システムは事前に予測していた思い込みの指図情報と今回実施する指図情報を比較して差異をスコア化する。このスコアが大きい項目が、ボカミスしそうな箇所となる。なお、ボカミスしそうな注意点の有無の判定や通知内容を決定するための閾値は、運用に合わせて調整できる。
- ③ボカミスしそうな注意点があれば端末の画面や音声で通知する。
- ④今回実施した指図情報を教師データとしてモデルを更新する。
- ⑤モデルの更新が終わった後、今回実施した指図情報を直近の入力として加えることで、次の思い込みの指図情報(予測)を出力する。

なお、当然であるが「思い込み」は人それぞれに異なるため、この「思い込み」のモデルは作業者ごとに作成する。

## 2.5 システムの有用性

本システムの有用な点は、ポカミスしそうな箇所を1つのみ予測するのではなく、対象とする作業項目全てに対してミスしそうなスコアを算出できる点である。そのため、そのスコア、つまりポカミスしそうな危険度の順に通知することや、図2-5のように電子的な指図の画面などで注意すべき項目を危険度に応じて色分けしてハイライト表示することもできる。

| 指図書  |     |        |      |      |
|------|-----|--------|------|------|
| ボディ  | 表示器 | ケース    | 取付向き | 付属品  |
| タイプB | 有   | スタンダード | 下    | A200 |

図2-5 ハイライト表示のイメージ

上記の特長は、指図情報の単純な変化検出では実現できない優位点である。

また、機械学習を用いたシステムの導入において、課題となるのが事前準備作業である。例えば、学習用の大量のデータの準備や、その教師データのラベリング作業(正解を教える作業)、学習時間やパラメータのチューニングなどである。しかし、本システムでは、過去の指図情報のみで各々の入力項目の相関関係(長期記憶)の事前学習が可能であり、導入後、およそ数十回の使用でその作業者が実施した指図情報の時系列のパターン(短期記憶)の学習ができるため、短期間かつ少ない労力でその作業者のモデルとして使用できるのである。

## 3. システム導入の効果

ご協力いただいた工場の多品種少量製品の組立工程において、ポカミスが多い11の作業項目を対象として、図3-1の構成で実証検証を実施した。

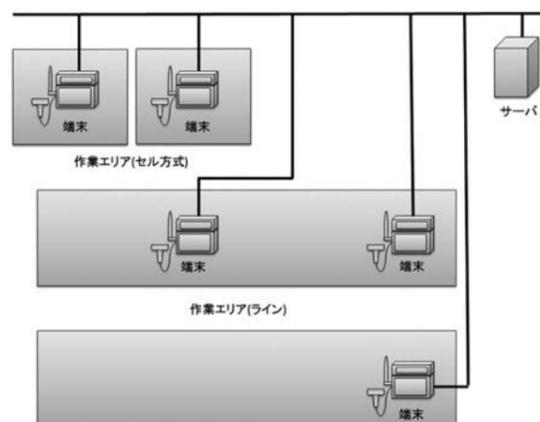


図3-1 設置イメージ

図3-1に示されたサーバは、指図情報を管理するデータベースと指図を学習して作業項目の注意点の予測を行うエンジンを搭載している。作業エリアには作業項目の注意点を通知する端末を設置し、ネットワークで接続した。な

お、事前学習には約1カ月分の過去の指図情報を使用した。作業者の変更やラインの変更などにより定期的な検証データが3カ月分しか収集できなかったが、工程内検査において対象項目の不適合の割合が導入前1年間と比較して約3割抑制された。

また、この間の指図の注意点の通知を記録したログを分析した結果、ある指図においてポカミスしそうな項目の注意点が通知されていたが、その後の工程内検査でその指図の同項目の不適合が検出された。これは、本システムでポカミスを事前に予測・通知できていたが、作業者が聞き逃したことを示している。通知方法を改善することで、さらにポカミス発生を抑制されることが期待できる。

この検査工程での不適合検出件数の減少は、検査工程から組立工程への手戻りが減っていることを示し、同時に作業品質も上がっていることを示している。また、ポカミスが減ることで作業員が検査員からポカミスを指摘される回数も減り、お互いのストレス軽減にもつながっていると考えられる。

なお、本実証検証においては、組立工程の作業員が作業前に指図を特定するバーコードをバーコードリーダーで読み取るだけで、その指図の注意点が端末の画面とスピーカからの音声で通知されるように構成した。これにより、作業員は従来の作業の流れを乱すことなくポカミスに関する要注意情報を得られるとともに、その指図の作業開始をシステムに記録できるようになった。

この作業開始の記録は、いつ、誰が、どこで作業したかの記録であり、「人」が実行する工程の実績データとして工程管理に利用できるだけでなく、さらには、この記録と検査工程での検査記録を結びつけることで工程改善や作業員への教育にも活用することができる。

## 5. おわりに

今回、ヒューマンエラー対策の1つとして作業員の思い込みによるうっかり作業ミス(ポカミス)に焦点を絞り、AIの技術である機械学習を応用した作業ミスの予測・通知技術を開発した。

今後は、ポカミス予測機能の向上と作業員へのより適切な通知方法の検討・改善を行っていきたい。また、本システム導入によってヒューマンエラーがゼロにできるわけではない。ヒューマンエラーにはほかにも多くの要因があり、その要因に合った対策が必要である。それぞれの要因に適合する解決策を検討・実施していきたい。

なお、本システムは当社の新しい製造実行システム(MES)のヒューマンエラー防止機能の1つとして提供することを検討している。これら機能とシームレスに連携できるMESによって、お客さまの品質確保、生産性向上へ貢献したいと考えている。

### <参考文献>

- (1)「第4次産業革命期におけるIoT・ロボット導入促進調査」ものづくりスマート化ロードマップ調査」調査報告書」2017年3月 経済産業省 中部経済産業局

- (2)「安全活動にカツを入れる本」中村秀樹・高木元也・志村満・降籬達生(2007) 労働調査会
- (3)「認知心理学」箱田 裕司, 都築 誉史, 川畑 秀明, 萩原 滋 有斐閣社(2010/6/30)
- (4)「Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM」Felix A. Gers, Jurgen Schmidhuber, Fred Cummins Article in Neural Computation October 2000

### <著者所属>

- 近藤 政紀 AIソリューション推進部  
北條 達也 ITソリューション本部ITソリューション開発部

# Technical Review

---

azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2019年4月発行号

---

発行日 2019年4月1日(通巻60号)  
発行責任者 高橋実加子(アズビル株式会社 経営企画部広報グループ)  
編集委員会 委員長：坂本孝宏  
委員：吉村俊哉、百瀬修、筒井宏明、安藤啓之、小浜孝光  
事務局：小貝正義、菅野裕子  
発行所 アズビル株式会社 経営企画部広報グループ  
〒100-6419 東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル  
TEL.03-6810-1006

本誌掲載の論文は下記サイトでご覧いただけます。  
<http://www.azbil.com/jp/corporate/pr/library/review/>

©2019 Azbil Corporation All Rights Reserved. Printed in Japan  
●本誌から無断転載・複製はご遠慮ください。  
●本誌に掲載した名称の中には、それぞれの各社が商標として使用している場合があります。