

azbil

ISSN 1881-9699

# Technical Review

2008年12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



株式会社 山武

azbil  
グループ

創業1906年 山武の進化  
人を中心としたオートメーション

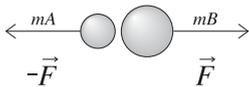
# Technical Review

2008年12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

azbil Technical Reviewは、azbilグループの技術を広くご理解いただくために、毎年発行するazbilグループの技術研究報告書です。

〈作用・反作用の法則〉



表紙について



ヘリコプターのホバーリング

—イカロスは、鳥の羽を集めて、蠟(ろう)でとめた大きな翼を背中につけ空を飛んだ。しかし、太陽に近づきすぎて、蠟(ろう)が溶けてしまい、イカロスは羽を失い、海に落ちて命を落とした—

ギリシャ神話に書かれたように、古代から飛翔は、人の夢であり、なぜ鳥や昆虫が飛べるのかという疑問をもちつけてきました。

イギリス人の物理学者ニュートンは、著書「プリンキピア」(1687年)の中で、万有引力の法則と運動方程式(ニュートン力学)を記しました。

空中で一点に留まるホバーリングを身につけた「ハチドリ」の動きは、ヘリコプターの原理と同様にニュートンの「作用・反作用の法則」によるものです。

りんごが木から落ちるのを見て万有引力を発見したニュートン。物理学者・数学者・天文学者である彼の功績は後の機械工学、自然科学などに多大な恩恵をもたらしてくれました。自然界にある現象は、今も私たちに多くのことを語りかけてくれています。

運動の第三法則(作用反作用の法則)は、全ての作用に対して、等しく、かつ反対向きの反作用が常に存在するというものです。ヘリコプターのローターはそれが回転することにより、常に上向きの揚力を発生します。

ハチドリは、体長10cm、体重2~20gの世界一小さい鳥です。主食である花の蜜をすうために、1秒間に80回も羽ばたき、さらに羽を閉じる時、開くときの両方で揚力を発生させ、空中で停止することができます。

## CONTENTS

<b>巻頭言:2050年の低炭素社会と建築</b>	1
慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科教授	伊香賀俊治
<b>学習/多目的最適化機能を組み込んだ快適性と 省エネを両立する室内環境制御技術の開発</b>	2
株式会社 山武 株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	上田 悠 総田 長生 太宰 龍太 慶應義塾大学 伊香賀 俊治
<b>高度な空気環境制御のための気流解析技術研究</b>	10
株式会社 山武 東京工業大学	斎数 由香子 大曲 康仁 原山 和也 三枝 隆晴 香川 利春
<b>現場保全作業を効率化するセンサ/アクチュエータの開発</b>	18
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	沖田 孝雄 久保田 秀雄 関根 秀太
<b>差圧・圧力発信器の高性能,高機能化技術</b>	24
株式会社 山武	間々田 浩一
<b>人の直感的な判断,暗黙知の引き出し, 形式化を支援する生産情報ポータルの開発</b>	30
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	水上 正 村手 恒夫 菅野 伸明 渡邊 桂
<b>硬脆性材の機械加工の実現と専用加工機の開発</b>	36
株式会社 山武	關 宏治 福辺 卓史
<b>CAEとダイレクト金型によるプラスチック成形技術の開発</b>	40
株式会社 山武	福岡 崇介 増本 新吾 關 宏治

## CONTENTS

---

<b>Preface: Low Carbon Society and Buildings in 2050</b>	<b>1</b>
Toshiharu Ikaga	Professor, Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University
<b>Optimal indoor environmental control of thermal comfort and energy conservation with the HVAC system based on the learning function and optimum multiple objective process</b>	<b>2</b>
Haruka Ueda, Chosei Kaseda	Yamatake Corporation
Ryota Dazai	Building System Company, Yamatake Corporation
Toshiharu Ikaga	Keio University
<b>Air flow analysis technique for advanced indoor environmental control</b>	<b>10</b>
Yukako Saisu, Yasuhito Oomagari	Yamatake Corporation
Kazuya Harayama, Takaharu Saegusa	
Toshiharu Kagawa	Tokyo Institute of Technology
<b>Development of a sensor/actuator that improves the efficiency of the workplace preservation process</b>	<b>18</b>
Takao Okita, Hideo Kubota, Hidetaka Sekine	Building System Company, Yamatake Corporation
<b>Technology for improving the performance and functionality of the differential pressure/pressure transmitter</b>	<b>24</b>
Koichi Mamada	Yamatake Corporation
<b>Development of a production information portal that assists users in making intuitive judgments while eliciting and formalizing their implicit knowledge</b>	<b>30</b>
Tadashi Minakami, Tsuneo Murate, Nobuaki Kanno, Kei Watanabe	Advanced Automation Company, Yamatake Corporation
<b>Development of a machining process for hard, brittle material and a special processing machine</b>	<b>36</b>
Koji Seki, Takashi Fukunabe	Yamatake Corporation
<b>Development of plastic molding technology with CAE and direct mold</b>	<b>40</b>
Takasuke Fukuoka, Shingo Masumoto, Koji Seki	Yamatake Corporation

---

# 巻頭言

## 2050年の低炭素社会と建築

慶應義塾大学理工学部  
システムデザイン工学科教授

伊香賀 俊治



建築物の新築工事、運用、改修工事に伴う建築関連CO<sub>2</sub>排出量は、我が国のCO<sub>2</sub>排出総量の40%を占めており、建築主、設計者、施工者、維持管理者、入居者など、建築に関わる者の責任は重い。そのような背景から、1997年12月の気候変動枠組条約京都会議に呼応して、日本建築学会は、「新築建物でLCCO<sub>2</sub> 30%削減、耐用年数3倍延伸を目指すべき」との学会声明を発表した。これくらい大胆な対策が1998年度からすべての新築建物で実施（改修建物においても耐用年数延伸以外の対策を実施）され、エネルギー転換部門においても最大限の対策が実施されれば、京都議定書の第一約束期間（2008年～2012年）における建築関連CO<sub>2</sub>排出量を、日本全体の温室効果ガス削減目標と同じ1990年比6%を削減でき、さらには、2050年において60%の削減につながるというものがあった<sup>文1</sup>。

2008年7月初めに開催されたG8北海道洞爺湖サミットでは、2050年までに世界の温室効果ガス排出量を現状よりも50%削減する方向で各国が努力することが合意され、2008年7月末に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」では、2050年における我が国の温室効果ガス排出量を現状よりも60%から80%削減することが盛り込まれた。先に述べた学会声明はこのような動きを先取りするものであったが、残念ながら学会声明の数値目標を達成するような新築あるいは改修建築はごく少数に留まったまま、すでに10年が経ってしまった。これから対策に着手するとした場合の新たな数値目標は「LCCO<sub>2</sub> 40～50%削減（エネルギー転換部門のCO<sub>2</sub>原単位削減が経済産業省の超長期エネルギービジョンに示された数値の場合）」であり、そのために要する低炭素化投資を総工費の数%～10数%確保する必要がある。もし今、この先行投資を惜しめば、我が国の建築は、低炭素化が図られないままの不良な建築スト

クとなるとともに、温室効果ガス削減目標未達成分に応じて海外に莫大な資金が流失してしまうということを自覚する必要がある。

たった40年先の2050年の近未来社会は、現在、設計、建設されている建物が大多数を占める社会であり、建築に関わる者の一刻も早い意識改革と行動が何よりも重要である。そのためには、CSRなどの意識の高い大企業での本格的な対策推進と合わせて、中小企業、個人建築主の意識改革を進めることが不可欠である。

筆者は、国土交通省住宅局の支援のもとに、建築物を環境効率で評価し、格付けするための総合環境性能評価システム（CASBEE:キャスピー）の開発にかかわっているが、最新版のCASBEEではLCCO<sub>2</sub>の低減ポテンシャルも同時に評価・表示できるようにしている。戸建住宅から大規模建築物まで、すべての建物が、CASBEEによる環境効率とLCCO<sub>2</sub>低減ポテンシャルで評価・格付けされ、同時に建物単位でのカーボントレーディングが一般化することが、低炭素社会づくりの大きな対策のひとつになるものと期待している。

文献1：伊香賀俊治、村上周三、加藤信介、白石靖幸：我が国の建築関連CO<sub>2</sub>排出量の2050年までの予測、日本建築学会計画系論文集No.535、(2000)、pp.53-58

伊香賀 俊治（いかが としはる）

慶應義塾大学 理工学部システムデザイン工学科 教授

1959年生まれ。早稲田大学大学院修了、㈱日建設計・設備設計主管、東京大学助教授、㈱日建設計・環境計画室長を経て、2006年1月より現職

著書（共著）に、LCA実務入門、地球環境建築のすすめ、建築環境マネジメント、CASBEE入門、日本低炭素社会のシナリオなど

受賞に、山梨県環境科学研究所、明治大学リハビリタワーで環境・省エネルギー建築賞、青山学院大学相模原キャンパス、精原町総合庁舎でサステナブル建築賞など。

# 学習/多目的最適化機能を組み込んだ快適性と省エネを両立する室内環境制御技術の開発

— 地球環境負荷削減と快適性両立のための環境制御への取り組み —

Optimal indoor environmental control of thermal comfort and energy conservation with the HVAC system based on the learning function and the optimum multiple objective process

— Environmental control measures aimed at reducing the burden on the global environment while retaining the functionality —

株式会社 山武

上田 悠  
Haruka Ueda

株式会社 山武

梶田 長生  
Chosei Kaseda

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

太宰 龍太  
Ryota Dazai

慶應義塾大学

伊香賀 俊治  
Toshiharu Ikaga

## キーワード

学習,多目的最適,室内環境制御,省エネ,快適性,トレードオフ,PMV,空調機最適起動

これからの室内環境制御には、建物設計時には考慮していなかった状況変化や、様々な運用目的の変更に追従する機能が必要とされると筆者らは考えている。この目的の実現手段の一つとして、当社の保有技術であるデータメーション技術<sup>注1)</sup>を空調システムに応用することにより、学習/多目的最適化機能を制御システムに組み込み、外部環境変化への対応と快適性/省エネの両立を目指す室内環境制御技術を慶應義塾大学と共同で研究開発している。本稿では、これまでの研究活動で得られた制御技術の汎用的なフレームワークとアプリケーション例を報告する。

Indoor environmental control in buildings requires the ability to adapt to changes in situation not envisaged during the initial design as well as to changes in the purpose of use subsequently required. We have developed, in joint research with Keio University, optimal indoor environmental control of the thermal comfort and energy conservation of the HVAC system based on a learning function and employing a multiple objective optimal method that responds to changes in the environment. This paper describes the general-purpose framework of indoor environmental control constructed through our research to date and offers some application samples.

## 1. はじめに

オフィス等の業務系建物においては、そのライフサイクルにわたる建物性能（環境性能、品質性能）を維持向上させることが今後ますます重要であり、空調制御などの室内環境制御においても居住者の快適性だけでなく、省エネルギー・省CO<sub>2</sub>を達成する様々な方法が模索されている<sup>(1)~(3)</sup>。

しかしながら、設計段階で様々な対策を施しても、建物運用時には設計時には考慮していなかった状況変化や様々な運用目的の変更などが生じることがある。設計者から与えられた情報しか持たない従来の室内環境制御システムでは、このような変化に追従し、快適性や省エネルギー性を同時に達成するという積極的な機能を有していないため、対応するのは難しい。

そこで本研究では、建物の多様な運用目的と状況変化に適

応する汎用性のある室内環境制御技術のフレームワークを立案し、プロトタイプを開発した。ここで取り上げた室内環境制御の対象は、快適性と省エネに密接に関係する温熱環境とした。さらに、開発したシステム上に、温熱快適性制御問題、空調機最適起動問題を例にしてアプリケーションを実装し、実証実験を行った。

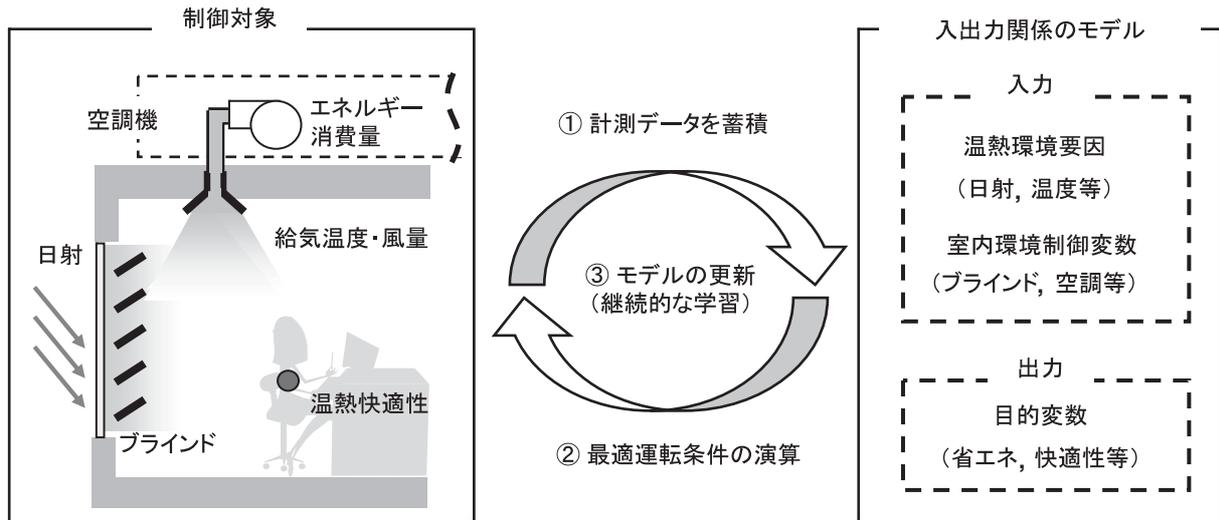


図1 室内環境制御技術のフレームワーク

## 2. 学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御の概要

建物の多様な運用目的と状況変化に適応する、汎用性のある室内環境制御技術のフレームワークを図1に示す。筆者らは、これを実現する手段として学習/多目的最適化機能に着目した。学習機能とは、過去に経験した情報から状況に合わせた最適な判断を行い、これを繰り返すことで経験の無い状況にも巧みに適応する機能である。多目的最適化機能とは、複数の異なる目的に対し、それらの妥協解を探索する機能である。

これらの学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御メカニズムを以下に示す。

ステップ1) 屋内外の温熱環境要因および室内環境制御に関する計測値と目的変数値の入出力関係をモデル化する。

ステップ2) 入力データを逐次計測し、ステップ1)で構築した入出力モデルに基づき、目的変数値が最適になる運転条件をリアルタイムで演算し、自律的に実行する。

ステップ3) ステップ1)と2)を継続的に繰り返し、入出力モデルを更新(学習)する。

これを実建物の運用に適用するためには、①各計測値と目的変数の入出力関係を素早くモデリングし、②多目的最適解を短時間で探索し、③過去の経験(実測値)をモデルに反映・更新する技術が必要である。

これらを実現する技術として、当社の保有技術である事例ベースモデリング手法(TCBM)および多次元スプラインによる応答曲面法(RSM-S)を利用した。以下にこれらを紹介する。

### 2.1 事例に基づく予測・推定手法

事例ベースモデリング手法(TCBM: Topological Case-Based Modeling)<sup>(4)</sup>は、要求するモデル精度に応じて入力空間をメッシュ化して履歴データを埋め込み(量子化)、同一メッシュに属する出力値を平均化(圧縮)して事例ベースを作成する。出力が未知の入力値に対する出力値計算、すなわち予測および推定は、類似事例を検索し、その事例出力を平均化すること

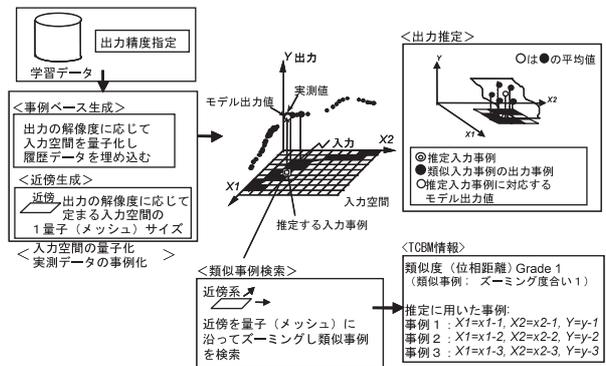


図2 事例ベースモデリング(TCBM)

で行う。このとき入力メッシュ同士の距離の大きさで、出力の誤差が計算される。

本手法は、関数全域を規定するパラメータを同定する必要がなく、局所的な類似事例を用いればよいため、モデリングが容易である。また、事例ベースに存在しないデータが計測された場合には、事例ベースに追加することにより新たな状況変化を素早く学習することができる(適用学習)。したがって、過去に経験した情報から状況に合わせた予測・推定を行い、適用学習によって状況変化に追従する機能を満たすことが可能である。

### 2.2 多目的最適化のための応答曲面法

応答曲面法は、少ない回数で効率よく最適解を求める有効な方法論である。多次元スプラインによる応答曲面法(RSM-S: Response Surface Methodology by Spline)<sup>(5)</sup>は入出力関係が複雑なシステムにおいて、理想的な実験計画データでなくても、実際に計測された離散的データから素早く応答曲面モデルを生成できることを特徴とする(図3)。さらに、理想点との距離を最小化する汎距離関数によって、妥協解探索を行う多目的最適化が可能である。素早く多目的最適化ができることから、リアルタイムな室内環境制御に適用可能と考えられる。

### 2.3 室内環境制御システムの開発

開発した室内環境制御システムは、既存のビル空調システムに容易に統合できる特徴を有している(図4)。RSM-Sを組み込んだ多目的最適化環境制御PCに、TCBMにより作成した事例データベース(入出力モデル)を投入し、最適化演算に必要なデータは通信ネットワークを介して取得し、予め指定した制御変数に対して、目的変数値を最適化する運転条件を出力する仕組みになっている。実運用を考慮し、制御間隔や出力値の変動幅の設定機能なども用意した。また実測データを事例データベースに追加・更新していくことで、外部環境変動に関する学習が可能である。

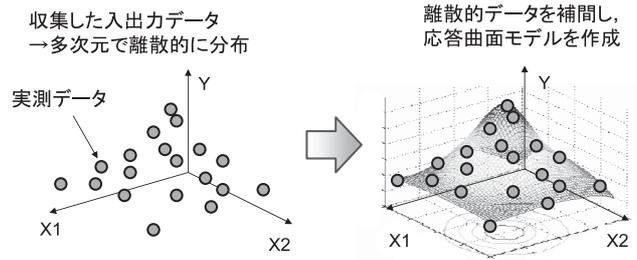


図3 応答曲面モデル

### 3. 実証実験

開発したシステム上に、温熱快適性制御問題、空調機最適起動問題を例にしてアプリケーションを実装し、実証実験を行った。

#### 3.1 温熱快適性制御問題を例とした学習効果の検証

PMV (Predicted Mean Vote: 予測平均温冷感申告) は、室温、平均放射温度、風速、相対湿度、着衣量、代謝量の6要因から求められる総合的な温熱快適性指標であり、現在最も広く用いられている温熱指標の一つである。国際標準ISO7730では標準的温熱指標として採用し、 $PMV = \pm 0.5$  以内を快適範囲としている。PMVを室内環境制御の対象とすることで、室温を一定にする通常の空調制御に比べ、より快適な温熱環境が実現できる。しかし、実建物の運用段階において、PMVに影響する変数のうち、どれを制御すればよいかは建物の特性等により異なる可能性がある。したがって、計測が可能な環境情報とPMVとの入出力関係を特定し、継続的な学習により様々な状況変化に対応できることは、実用上の意義が大きいと言える。

本実験では、居室における実測を通して、PMV予測モデルを構築・検証し、継続的な学習による快適性と省エネを両立する室内環境制御の有効性を検証した。

##### (1) 実験室の概要(図5)

本実験は、神奈川県横浜市に所在する7階建ての大学校舎の6階にある隣接した二つの居室にて行った。2室はおよそ同一の仕様である。また、両室とも南側一面が窓となっており、日射の影響を受け易い。本実験で測定した温熱環境および空調制御に関する項目を表1に示す。実験室の空調は天井吹出し/吸込みの一般的なセントラルVAV(Variable Air Volume: 変風量)方式である。

##### (2) PMV予測モデルの構築

2007年9月7日~22日の測定データを用いて、温熱環境測定点におけるPMV<sup>(注2)</sup>の予測モデルをTCBMにより作成した(以下、PMV予測初期モデルという)。入力変数は、統計的手法により、①還気温度、②窓面放射温度、③給気温度、④VAV風量、⑤給気露点温度、⑥還気湿度の6つを選定した。

PMV予測初期モデルに基づき、快適範囲上限とされるPMV=0.5となるような室内環境制御を行い、継続的な学習を行った。

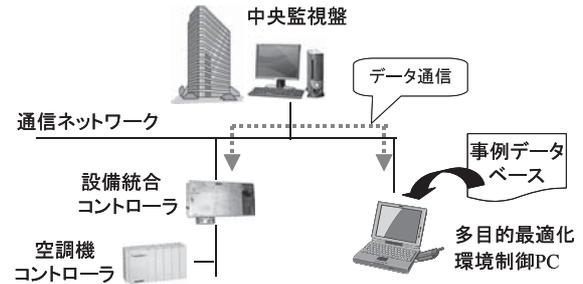


図4 室内環境制御システム概要

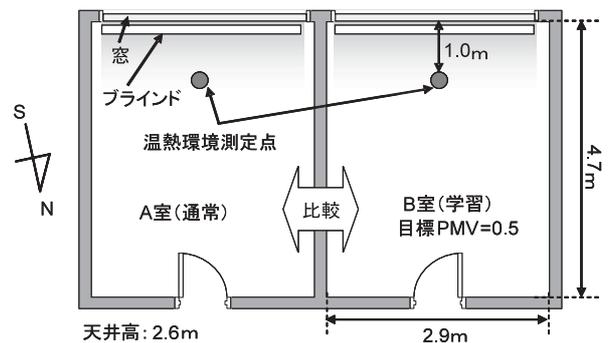


図5 実験室平面図

表1 温熱環境および空調制御に関する測定項目

室内温熱環境の測定項目	屋外温熱環境の測定項目	空調に関する測定項目
気温	外気温度	給気温度
グローブ温度	外気湿度	給気露点温度
風速	窓面放射温度	送風機給気風量
相対湿度	日射量	居室のVAV風量
		還気温度
		還気湿度

(3) 学習効果の検証

本研究における学習の仕組みは、新たに得られた測定データを、PMV予測初期モデルに反映させることで実現される。9月23日～10月7日まで、PMV予測初期モデルを1日ごとに更新した場合の学習効果について、10月4日～7日までを図7に示す。継続的に測定データを学習することにより、平均自乗絶対誤差が0.42から0.17へと小さくなり、精度良くPMV値を予測できることが示された。

(4) 省エネ/快適性の検証

次に、9月7日～10月7日のデータから構築したPMV予測モデル(以下、PMV予測学習モデルという)に基づき、室内環境制御を行った。A室では設定温度23℃の通常温度一定制御を行い、B室ではPMV=0.5となるような最適化制御を行った。

図8に11月8日(晴れ)の9時～17時における2室のPMVの時系列変化を示す。どちらも日中において概ね快適範囲(±0.5以内)におさまっていたが、通常温度一定制御では、13時以降にPMVが負値となり過冷房な状態であった。それに対して、PMV最適化制御では、PMVを0.5付近に保つ傾向が見られ、過冷房状態を回避し、快適性を維持しながら省エネルギー効果が得られることが示唆された。なお、夏の冷房設定推奨温度は28℃だが、実建物においてはクレーム回避のため設定温度が低いことが多く、今回の実験結果のように過冷房状態となることが少ない。

続いて、11月8日～17日の9時～17時における1日当たりの空調エネルギー消費量および平均PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied: 予測不満足者率)を図10に示す。PPDはPMVと図9のような対応関係にあり、快適範囲はPPD=10%以内である。各実験室の空調エネルギー消費量は、空調機のエネルギー消費量<sup>注3)</sup>を総風量に対する各実験室のVAV風量で案分して求めた。

学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御により、温度一定制御に比べて平均PPDが約12%から約11%に改善し、空調エネルギー消費量は約10%削減されており、温熱快適性向上と省エネルギー性の有効性が示唆された。

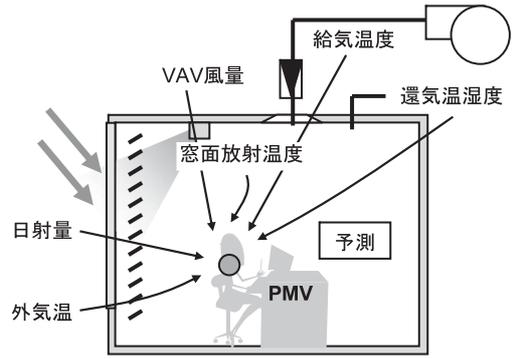
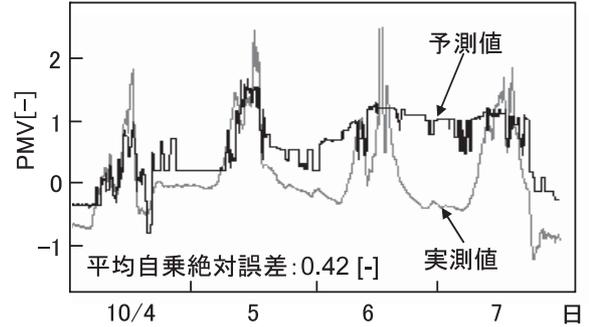
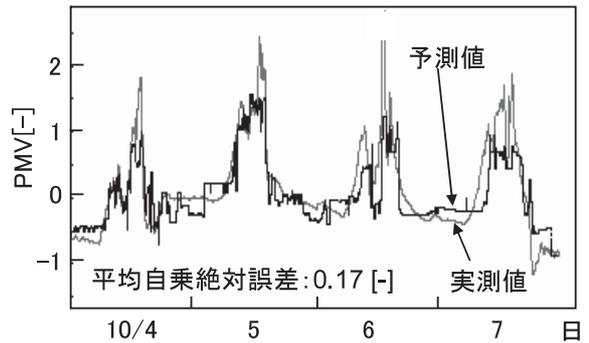


図6 PMV予測モデルのイメージ



(a) 予測モデルを更新しない場合



(b) 1日毎に予測モデルを更新した場合

図7 学習によるPMV予測モデルの精度の向上

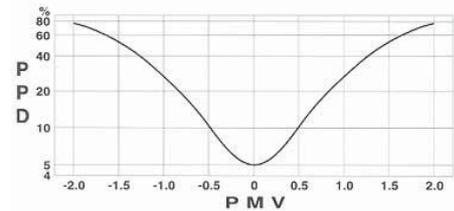


図9 予測平均温冷感申告PMVと予測不満足者率PPDの関係

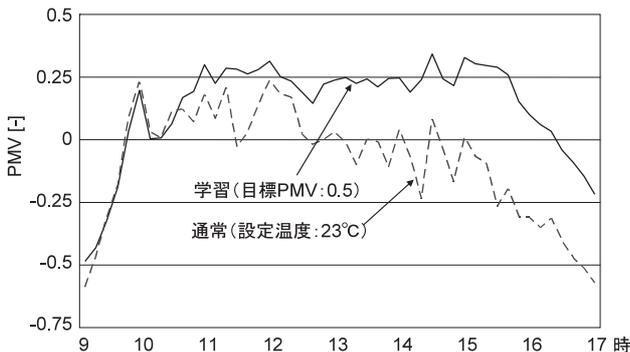


図8 実験日(11月8日)のPMVの時系列変化

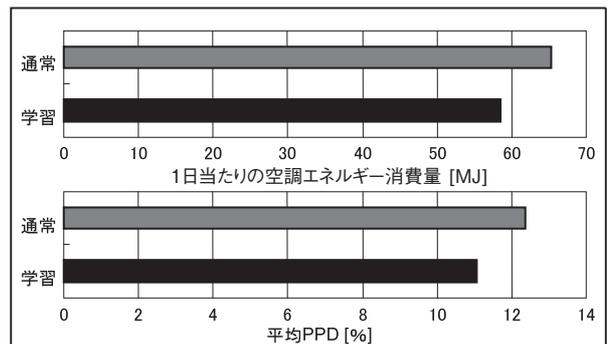


図10 1日当たりの空調エネルギー消費量と平均PPD (11月8日～17日)

### 3.2 空調機最適起動を例とした多目的最適化問題への適用

オフィスビルでは、就業開始時刻に室内を目標の温度にするため、空調機を前倒し運転していることが多い。早めに空調機を起動すれば、部屋の使用時刻に目標の温度環境を満たすことはできるが、起動が早すぎると無駄な運転が多くなる。そのため、空調機の起動時刻を決めるためには、設定に追従するまでの時間を予測する必要がある。現在、主に用いられている空調機の立ち上がり時間（起動してから、温度環境を満たす時間）の演算方法を式(1)に示す。

$$L = \frac{(T_{sp} - T_{pv})}{G} \quad \text{式(1)}$$

- L : 立ち上がり時間 [min]
- $T_{sp}$  : 室内温度設定値 [°C]
- $T_{pv}$  : 起動前の室内温度 [°C]
- G : ゲイン(単位時間当たりの温度変化) [°C/min]

一般的に、冬期の空調機前倒し運転では、空調機の起動時給気温度を高く設定し、室内を暖めるスピードを上げ、その代わりに、空調機起動時刻をなるべく遅くすることで空調時間を削減し、省エネルギーを行っている。しかし、近年のOA機器の増加などによりオフィスビルの冷房負荷が高まるにつれて、従来のように起動時の給気温度を高く設定すると、過剰な暖房を引き起こし、室内環境の悪化や消費エネルギー増加を引き起こすことが多くなっている(表2)。

本実験では、過剰暖房を抑制し、給気温度と立ち上がり時間を最適化することによって省エネルギーを達成する多目的最適化制御の有効性を実証した。

#### (1) 実験対象設備の概要

本実験は、東京都大田区に所在するオフィスビル(3階建)の2階フロアにて行った。実験室の空調は、オフィス用途の床吹き出し方式である(図11)。床吹き出し空調機は、冬期夜間に床下に冷熱が蓄積されるため、暖房運転にも関わらず、空調機起動直後に床下の冷えた空気が室内に吹き出し、室温が急激に低下することがある(図12)。そのため、単位時間当たりの温度変化(ゲイン)から空調機の立ち上がり時間を予測する方式(式(1))が適用できない。

そこで、冬期の起動時給気温度は高め(32°C)に設定し、起動時刻は年間を通して8:00(就業開始時刻の60分前)に固定していた。日によっては過剰暖房な状況が起きており、無駄な運転となっていた。

#### (2) 空調機最適起動モデルの構築

過去3年間の計測データ(2004~2006年度の冬期データ)を用いて、目的変数を“空調機立ち上がり時間”と“室内温度の暖め過ぎ”とし、屋内外の温熱環境および空調制御に関する計測値と目的変数値の因果関係を、TCBMによりモデル化した(以下、過去3年固定モデルという)。入力変数は、統計的手法により、①室内暖房設定温度、②室内温度、③外気温度、④全天日射、⑤起動時給気温度設定、の5つを選択した(図13)。なお、休日明けのデータは、冷熱の躯体蓄熱量が平日の特性と異なってくるため別モデルとし、今回は休日明けを除く平日を検証対象とした。

表2 冬期の空調起動時給気温度の問題点

給気温度 高く設定	良い効果	起動時間の短縮(省エネ)
	悪い効果	過剰暖房 (環境悪化・エネルギーロス)
給気温度 低く設定	良い効果	過剰暖房は起こらない
	悪い効果	起動時間が増加

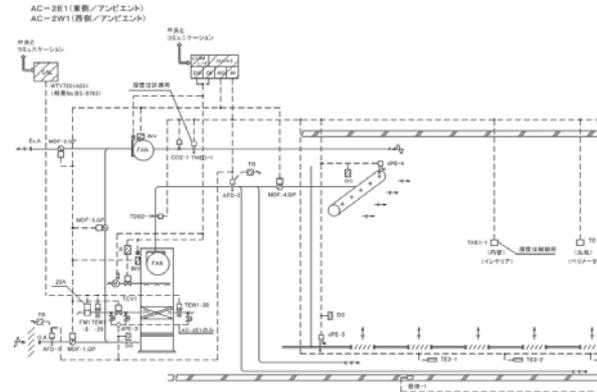


図11 実験対象空調機 計装図

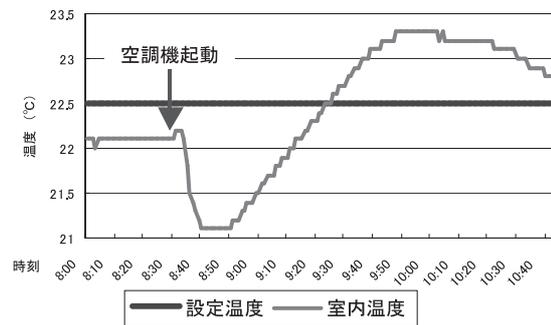


図12 床吹き出し空調機の起動状況

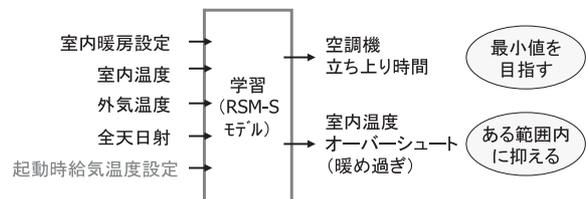
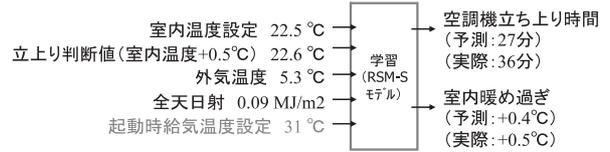


図13 空調機最適起動モデル

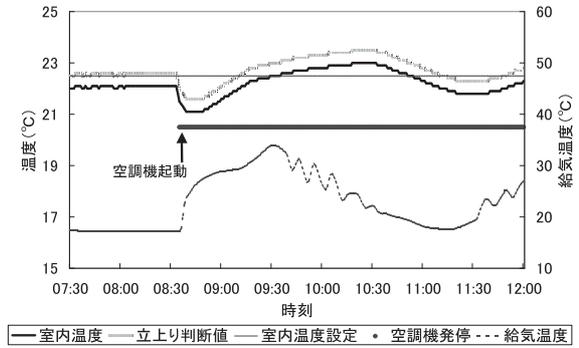
(3) 多目的最適化機能の検証

過去3年固定モデルを用いて、2008年1月10日～3月28日の期間において、立ち上がり時間を最小とし、暖め過ぎを抑制する最適給気温度の妥協解を探索する空調機の最適起動実験を行った<sup>注4)</sup>(休日明けを除く)。演算開始は7:50とした。

実験期間のうち、3月5日、6日、11日の午前7:30～12:00までの空調機起動状況を図14～16に示す。空調機立ち上がり時間が比較的長いと予測される場合は、起動時給気温度を高く設定し、立ち上がり時間が短くなるようにしている(図14)。また、空調機立ち上がり時間が比較的短い、あるいは必要ないと予測される場合は、起動時給気温度を低く設定し、暖め過ぎを抑制するようにしている(図15,図16)。

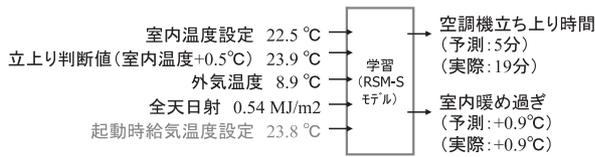


(a) 多目的最適化モデル演算結果

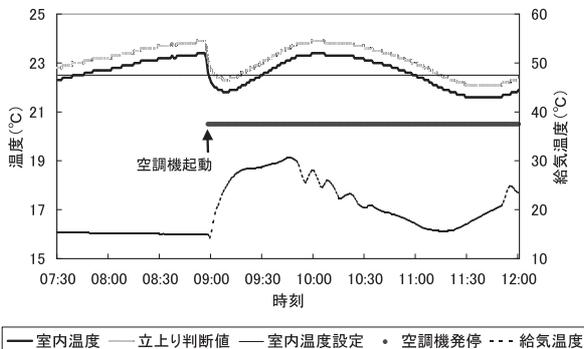


(b) 空調機起動前後のトレンドグラフ

図14 実験日(3月5日)の空調機起動状況

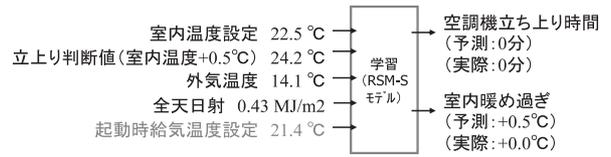


(a) 多目的最適化モデル演算結果

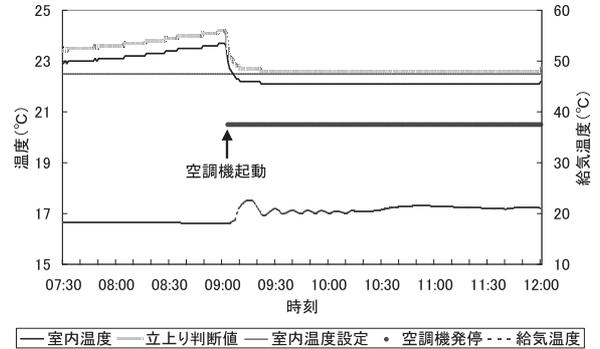


(b) 空調機起動前後のトレンドグラフ

図15 実験日(3月6日)の空調機起動状況



(a) 多目的最適化モデル演算結果



(b) 空調機起動前後のトレンドグラフ

図16 実験日(3月11日)の空調機起動状況

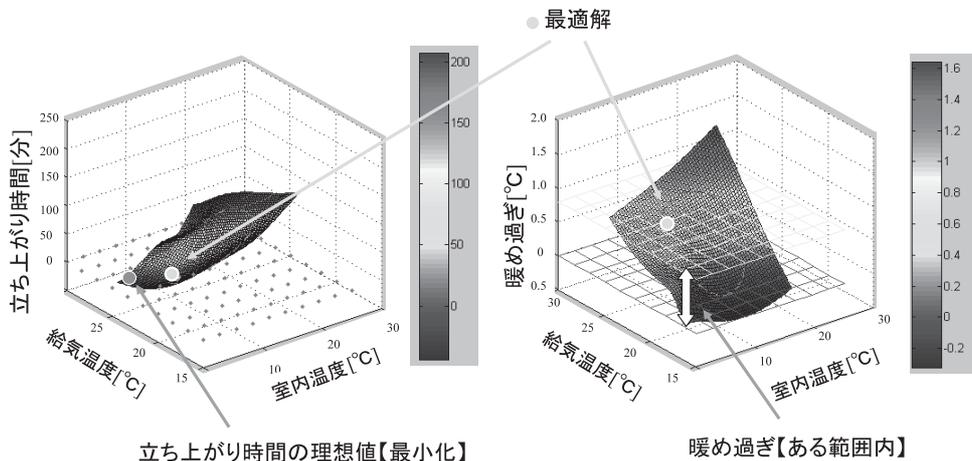


図17 多目的最適化のイメージ

次に、空調機の最適起動実験を行った期間の空調機起動時間を図18に示す。実験対象期間において、最適起動制御では従来の起動時間固定(就業開始時刻の60分前)に比べ、立ち上がり時間が55.8%短縮され、省エネルギー効果のあることが確認された。

また、起動時給気温度設定の頻度分布を図19に示す。その日の状況によって起動時給気温度設定を最適化しており、従来の給気温度固定(32℃固定)に比べ、給気温度を低く抑えて無駄な加熱を抑制することによる省エネルギー効果が示唆された。

以上のことから、学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御により、従来の8:00起動および起動時給気温度32℃固定の起動制御に比べ、過剰暖房を抑制し、給気温度と立ち上がり時間を最適化することによって省エネルギーを達成する多目的最適化制御の有効性が示された。

(4) 予測精度と学習効果の検証

過去3年固定モデルをRSM-Sによって補間した立ち上がり時間の予測値と実績値の散布図および平均誤差と分散を図20に示す。過去3年固定モデルでは、予測値と実績値の平均誤差が17.5±20.5(分)となった。

学習効果を検証するため、2007年12月のみの計測データから空調機最適起動予測モデルを構築し、実験期間中1日ごとに更新(学習)させた結果を図20に示す(以下、07年度継続学習モデルという)。継続的に測定データを学習することにより、予測値と実績値の平均誤差は5.6±17.0(分)へと小さくなり、精度良く空調起動時間を予測できることが示された。

4. おわりに

本論文では、環境変動に追従する、学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御技術の概要と、そのアプリケーション例の実証実験結果を報告した。

立案した室内環境制御技術のフレームワークは、空調制御の各種課題に対し適用可能な汎用的なものであると考えている。今後は本フレームワークを利用し、建物状況変化や運用目的の多様化が生じている空調制御の課題を網羅的に捉え、その課題解決に取り組んでいく所存である。

なお、本研究は国土交通省の平成19年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業「学習機能に基づく省エネ性及快適性の最適化制御技術の開発」の一部として実施した。

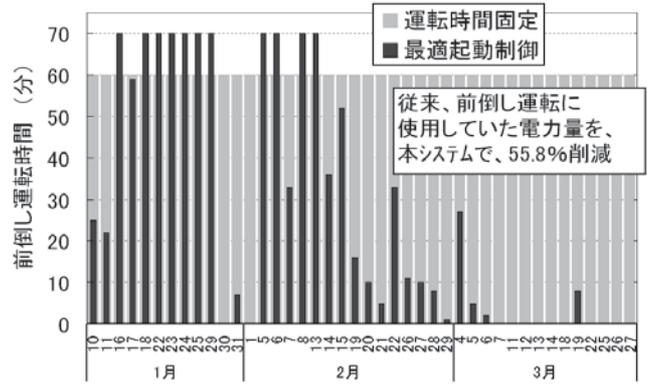


図18 起動時給気温度設定

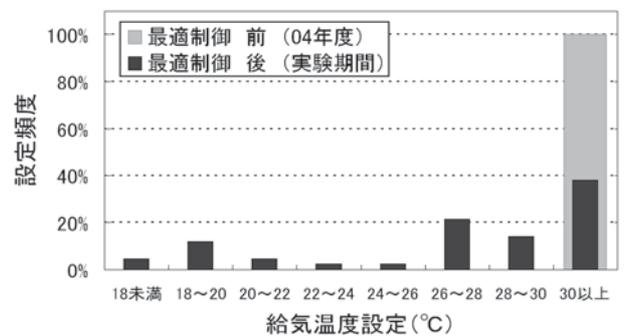
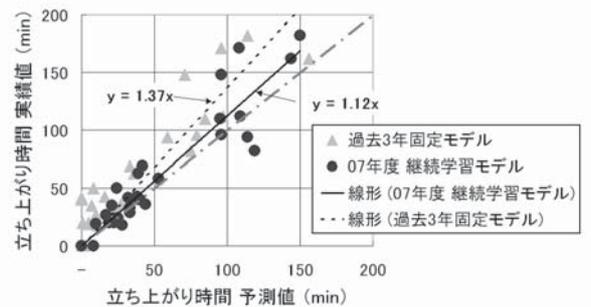
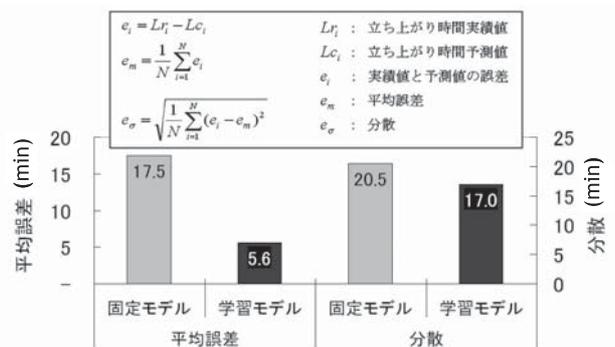


図19 空調機起動時間



(a) 予測モデル精度



(b) 平均誤差と分散

図20 空調機最適起動モデルの予測精度

#### 注釈

- 注1) Data+Automationの造語。データ解析などによって人の能力を代替・拡大する技術を目指す。
- 注2) PMV算出の与条件は着衣量0.5clo,代謝量1.2Metとした。
- 注3) 空調機全体のエネルギー消費量は,熱源消費熱量[MJ]+送風機消費電力[kWh]×9.83(商用電力一次エネルギー換算値)とし,これを各居室のVAV風量で按分することで各居室の空調エネルギー消費量を算出した。
- 注4) 立ち上がり時間と暖めすぎの重み付けは同じ(1:1)とした。

#### 参考文献

- (1) 伊香賀俊治:地球環境負荷軽減の建築,日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会,第25回熱シンポジウム, pp.85~92 (1995)
- (2) 近本智行,村上周三,加藤信介,北村規明,張賢在ほか:冷房時のオフィス空間における自然換気併用ハイブリッド空調方式に関する研究(その1)~(その20),日本建築学会学術講演梗概集ほか,(1997~2002)
- (3) 岡本哲也,村上周三,加藤信介,島崎祐輔,河合浩志:環境共生住宅の多目的最適化(その10)長・短期の気候変動に適應する室内温熱環境の2段階制御手法の開発,日本建築学会学術講演梗概集,pp.949-950 (2007)
- (4) 筒井宏明,西村順二:時系列履歴データからのデータマイニング,計測と制御,第41巻,第5号,pp.345-349 (2002)
- (5) 総田長生:設計業務におけるデータ活用技術~山武オリジナル応答曲面法 RSM-S~,Savemation Review,Vol.21, No.2,pp.32-39 (2003)

#### 商標

TCBMは,株式会社 山武の登録商標です。

#### 著者所属

上田 悠	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
太宰 龍太	ビルシステムカンパニー マーケティング本部
総田 長生	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
伊香賀 俊治	慶應義塾大学 教授 理工学部 システムデザイン工学科

# 高度な空気環境制御のための気流解析技術研究

## Air flow analysis technique for advanced indoor environmental control

株式会社 山武

齋数 由香子

Yukako Saisu

株式会社 山武

三枝 隆晴

Takaharu Saegusa

株式会社 山武

大曲 康仁

Yasuhito Oomagari

東京工業大学

香川 利春

Toshiharu Kagawa

株式会社 山武

原山 和也

Kazuya Harayama

### キーワード

気流解析,CFD,PIV,トレーサガス,ダクト気流,ヒュームフード,動物飼育ケージ

当社は理念である「人を中心としたオートメーション」の実現のために、建物における「環境制御」を目指し、換気や微細気流の制御を含む様々なソリューションを展開している。その対象は、執務室やダクト、産業用装置、製造エリア、ビルアトリウムなど多岐にわたる。とりわけ、特殊な空間や新規な装置では、「気流や温度の分布が分からない」という課題が多く、どのように計測制御すべきかの課題に直面する。その解決手段として気流解析技術に注力し、解析技術ノウハウと豊富なデータを蓄積してきた。さらに、その蓄積を生かしながら、空気の制御に関する商品の開発や性能向上にも取り組んでいる。本稿では、その代表として「ダクト気流」、「ヒュームフード」、「動物飼育ケージ」の解析事例を紹介する。

To achieve human-centered automation, which is featured in our corporate philosophy, we have developed diverse solutions including ventilation and microscopic airflow control systems, for the environmental control in buildings, including computational fluid dynamics (CFD), particle image velocimetry (PIV) and tracer gas, and to analyze targets. Some of the results are then used in product development and client solutions. This paper introduces three results: duct air flow, fume hood and animal cage.

## 1. はじめに

当社は建物や工場内の空気環境制御の商品やソリューションを提供しているが、その対象は執務室やダクト、産業用装置、製造エリア、ビルアトリウムなど多岐にわたる。サイズや形状が多様であり、熱流の様相も複雑である。とりわけ、特殊な空間や新規な装置では、「気流や温度の分布が分からない」や「計測機器が設置できない」といった課題が多く、どのように計測制御すべきかの相談を頂く機会が多い。

その解決手段として気流解析技術に注力し、解析技術ノウハウと豊富なデータを蓄積してきた。更に、その蓄積を生かしながら、空気の制御に関する商品の開発や性能向上にも取り組んでいる。

## 2. 各種解析手法

数値計算や光学技術の発達に伴い、CFD (Computational Fluid Dynamics) や PIV ( Particle Image Velocimetry ), レーザ光源、高速度カメラといった解析技術が手軽になってきている。表1にその特徴を整理した。対象の大きさや形状、流れ状態を事前に観察し、解析精度やコスト、工数を踏まえ、適材適所に各手法を活用している。

表1 各所解析手法の長短

手法	概要	長所	短所
実測	風速計（ピトー管，熱線など）や静圧センサを用いる	・データとして信頼性を得やすい	・多点計測では工数がかかることがある ・微小空間では計測器が流れを乱す
可視化	スモークを注入し，カメラで撮影・可視化を行う	・視覚的/直感的に分かりやすい	・カメラや光源が設置できないことがある ・可視化用のガス流入が必要である ・高速流では，高速カメラや高出力光源が必要である
PIV	可視化の濃淡動画を画像処理し濃淡の特徴抽出から速度ベクトルを求める	・視覚的/直感的に分かりやすい	・ベクトルなど定量化データが取得可能である ・質のよい濃淡動画が必要である
CFD	数値計算（運動方程式，エネルギー則，物性など）で，温度や気流場を求める	・計器を設置できないところでも推定できる ・条件変更での実施が可能である	・実測データとの比較が必要である ・膨大なメッシュや非定常で計算時間が必要である
トレーサガス	トレーサガスを注入し，そのガス濃度より，空気の対流を把握する	・換気回数の計測方法として定評がある	・安全や清浄の面でガスを流すのが無理なことがある

### 3. ダクト風量制御

#### 3.1 狙い

実際の建物施工では，曲がりや障害物が多く，風量計測に適した十分な直管部がないのが実状である。そのため，曲がりや障害物など厳しい条件のダクトであっても，正確に風量を制御できる技術の確立が望まれている。そのための基礎研究として，ダクトや風量制御機構を対象とした気流解析を実施している。

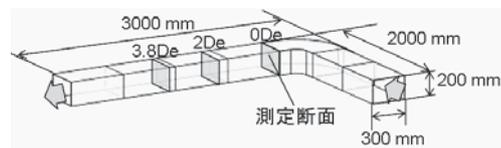


図1 曲がり角ダクトモデル

#### 3.2 ダクト気流

ダクトには様々な形状があり，組み合わせに応じて風量や圧力の分布が異なってくる。その一般化のために，様々なダクト形状に対して，3種類の手法を用いて網羅的な解析を行った。その代表として曲がり角ダクトの例を示す。

##### (1)L型ピトー管による流速分布計測

図1の曲がり角ダクト内にて流速分布を計測した。3つの断面（縦200[mm]×横300[mm]，相当直径De:266[mm]）にて，縦8点，横12点，計96点をL型ピトー管で測定し，各断面の流速分布を調べた。

0Deでは，内周に渦の逆流が発生し，中心から外周にかけて高速となる。その後，2Deや3.8Deと後流になるにつれて分布が平滑化し，流れが発達しつつある様子が観察された。

##### (2)気流の可視化とPIV解析

ダクト内の大まかな流れを把握するため，可視化とPIV解析を行った。ダクト上流側から発生させたスモーク（粒子サイズ:0.25～60[μm]）に，レーザーシート（Nd/YAGレーザ，波長:532[nm]）を照射し，流れの濃淡を高速度カメラで撮影した。

図3のような濃淡画像が撮影されるが，対象範囲にメッシュを区切り，各メッシュの濃淡画像がどのように移動や回転したかを追尾すると，タイムステップ毎の移動ベクトルすなわち速度ベクトルが求まる。

曲がり直後の0.4DeのPIV解析結果を図3に示す。ダクト外周部（図の右側）では直線的なベクトルであるのに対して，ダクト内周（図の左端）で渦が発生しているのが確認された。

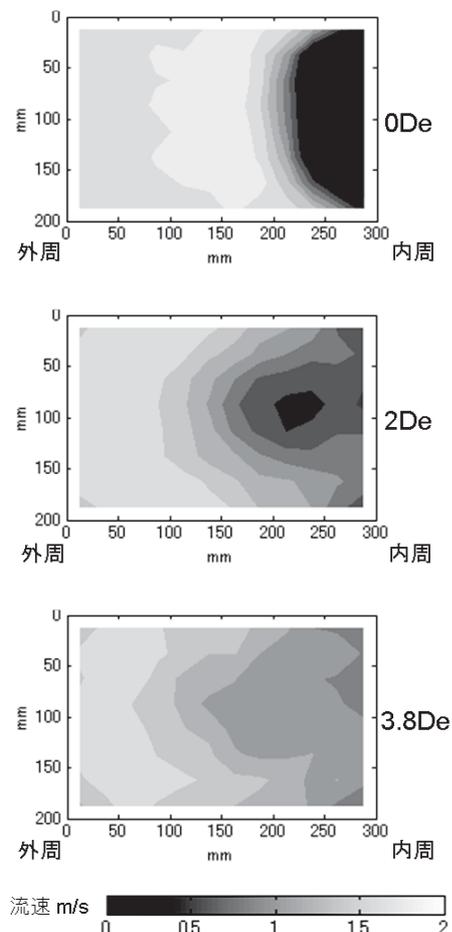


図2 曲がり角ダクト断面の流速分布<実測>（ダクト下流側から見た流速分布）

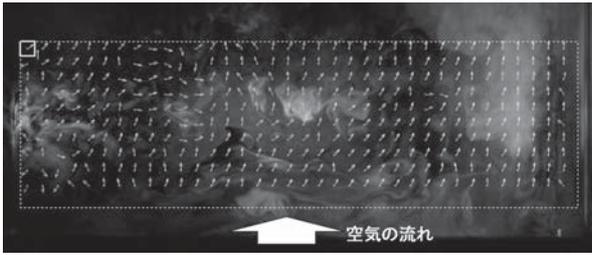


図3 PIV解析結果

(3)CFD解析

解析条件は実測状況を設定し(表2),前出の「L型ビーター管による流速分布計測」や「可視化・PIV解析」の結果と比較した。図4に断面流速分布,図5に流速分布と流線図を示す。

ビーター管の速度分布やPIV解析と同様に,0Deでは,内周に渦の逆流が発生し,中心から外周にかけて高速となる。その後,2Deや3.8Deと後流になるにつれて分布が平滑化し,流れが発達しつつある様子が観察された。このことから,CFDと実測の流速分布傾向が類似していて,CFD解析結果が妥当であると言える。実測データは限られた断面データであるのに対して,CFDでは解析範囲のデータを連続かつ網羅的に分析することができる点で大変に有用である。

表2 解析条件

ソフトウェア		SCRYU/Tetra(CRADLE)	
乱流モデル		標準k-εモデル	
解析の種類		定常解析	
流体の物性		空気(20℃)	
		非圧縮性流体	
境界条件	流入	質量流量	0.098kg/s (1.36m/s)
	流出	表面圧力	0 Pa
	壁面	対数則条件	
メッシュ分割	要素数	約100,000	
	要素形状	非構造格子(四面体, 五面体, 六面体)	

3.3 ダンパ

ダクト風量を制御する機構としてエアバルブやダンパがある。アクチュエータを取り付けて,自動で風量を制御する。ダンパの代表例としてバタフライダンパがある。単翼と多翼に大別され,多翼には,羽根が平行なもの(平行翼)と羽根が対向しているもの(対向翼)がある。

風量制御ダンパは,温度制御や外気量制御,室圧制御といった用途毎に使い分けられていて,要求される応答速度やレンジアビリティが異なる。

ダンパ形状による流量特性や気流性状の違いを検証するため,図6に示す4種類の円形ダクト用のダンパ形状に対してCFD解析を行った。表3に解析条件を示す。

(1)流量特性

CFD解析結果より,指数関数で近似曲線化した流量特性の比較を行った。形状①~④の流量特性を図7と図8に示す。ここでの開度は,全開を100%,全閉を0%として表示している。

形状①や②では,指数特性であるクイックオープニングとなり,開き始めの微小風量の制御に難がある。形状③や④はほぼ線形であり無難な特性であると言える。

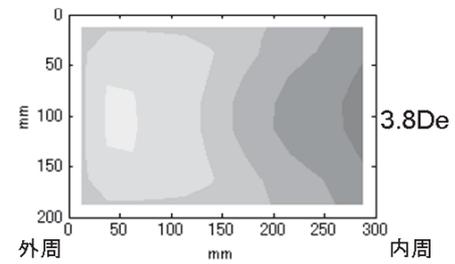
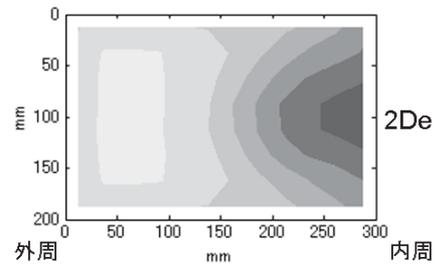
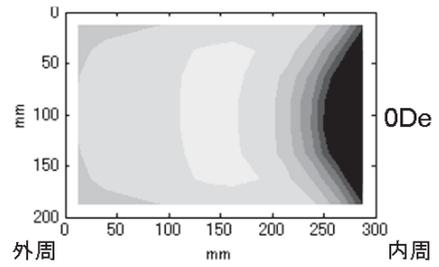


図4 曲がり角ダクト断面の流速分布<CFD解析> (ダクト下流側から見た流速分布)

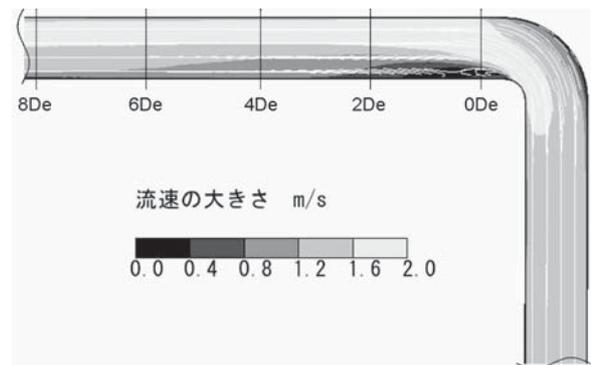


図5 気流性状<CFD解析>

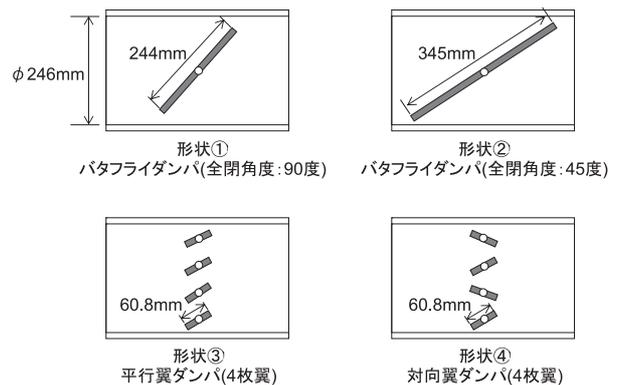


図6 解析対象のダンパ形状

表3 解析条件

ソフトウェア		SCRYU/Tetra(CRADLE)	
乱流モデル		標準k-εモデル	
解析の種類		定常解析	
流体の物性		空気(20℃)	
		非圧縮性流体	
境界条件	流入	表面圧力	500Pa
	流出	表面圧力	0 Pa
	壁面	対数則条件	
メッシュ分割	要素数	約500000	
	要素形状	非構造格子(四面体, 五面体, 六面体)	

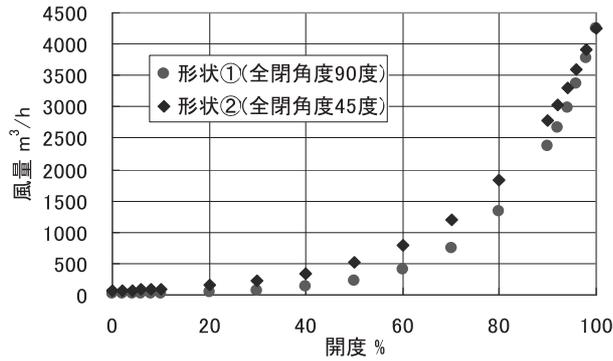


図7 形状①,②の流量特性

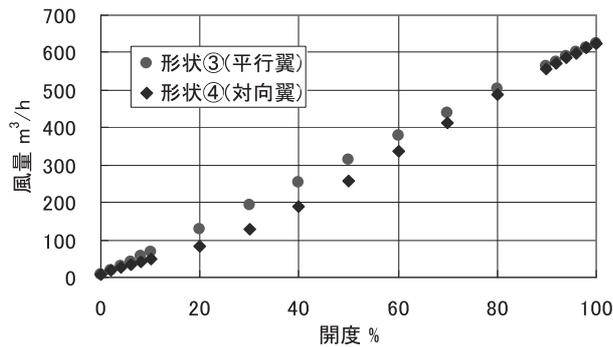


図8 形状③,④の流量特性

(2)気流性状

形状①～④の流速分布および乱流エネルギーを比較したものをそれぞれ図9と図10に示す。図9では流速のコンタプロットと流線を示す白線を同時に表示している。

他3種類のダンパの流速分布と比較して、形状④はダンパ通過後の流れの乱れが少なく、回復が早いことが分かった。

形状①～③は高い乱流エネルギー域が後流まで続いている。とりわけ、形状②と③が顕著である。それに対し、形状④の対向翼ダンパはダンパ周辺でのみ高い乱流エネルギーを示している。

多羽根の対向翼ダンパが全体的な特性としては優れるが、単羽根に比べてコストがかかる。これら解析結果を参考としながら、必要とされる制御性能に応じて、適切なダンパを選定することが大切である。

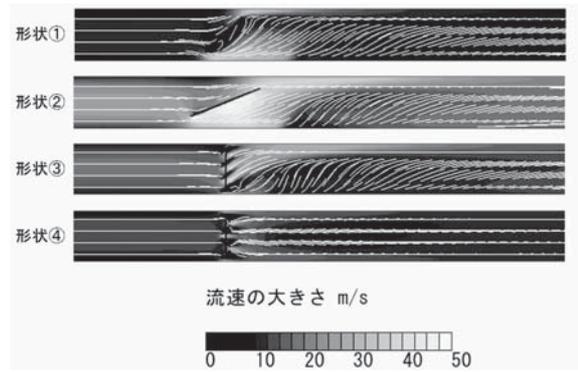


図9 ダンパ形状別の流速分布の比較

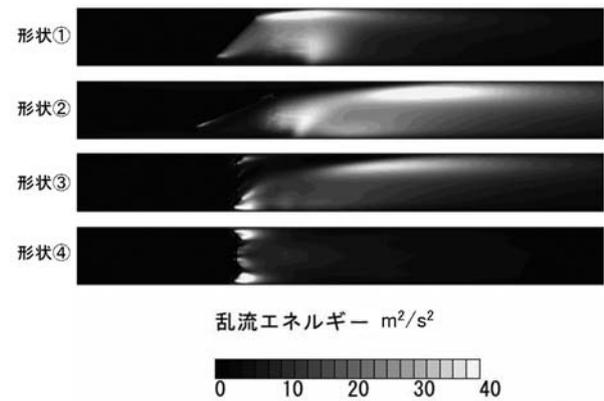


図10 ダンパ形状の別の乱流エネルギーの比較

3.4 まとめ

3章では、ダクトとダンパの気流解析事例を紹介した。その他にも絞りや拡張、ベンチュリ、オリフィスといった様々なダクト形状の解析を行い、データを蓄積してきた。

実際の建物施工では、曲がりや障害物が多く、流れの状態は複雑である。実測とシミュレーションを併用しながら、その複雑な流れのメカニズムを解明しつつある。当社では、風量制御バルブや風量コントローラといった商品を提供しているが、これら解析結果を生かしながら、開発や性能向上に取り組んでいる。

4. ヒュームフード(1)

4.1 狙い

化学や製薬などの研究室では、有害ガスは、ヒュームフード(図11)と呼ばれる局所排気装置に封じ込められ速やかに排気される。

労働安全衛生法特定化学物質等障害予防規則では、フード開口部の面風速を0.5m/s(ガス状の物質に対して)とすることが定められている。サッシ開口部の高さや幅を位置センサで検知し開口面積を求めて、目標面風速0.5m/s相当となるように排気風量(面風速×開口面積)を決定する。フードとしての封じ込め性能は、風量制御装置の応答速度に左右され、より早い応答速度が求められると言われている。

しかし、フード内部の流れの状態や封じ込め性能の実態はあまり知られておらず、そこを明らかにするために解析に取り組んだ。

### 4.2 解析モデル

ここでは、ヒュームフードを対象とした定常と非定常の解析を行い、種々の検討を行った。市販のヒュームフード(幅1.0m,奥行き0.75m,高さ2.3m)のサッシ前面75mmに作業者が立っている(図12)。各解析条件を表4に、結果を4.3項以降に示す。

### 4.3 定常解析

3次元風速計で図13に示す点の風速を計測し、CFD結果と表5に比較した。風速計装置自体が流れを乱したり、流れが不安定であり、実測値の精度も保証できず厳密な検討ができないが、CFDでの解析結果にどの程度の誤差があるかの参考になると考えられる。

また、サッシ開度を50%とした時のフード中心部の流線を図14に示す。作業者の脇を通りぬけてフード内部に流入する。フード内部では反時計周りの渦を形成し、排気されることが観察される。

### 4.4 非定常解析

図15の条件にしたがって、4パターンでの非定常解析を実施した。サッシ移動に関しては、作業者の平均的なサッシ開閉動作をイメージし、速度0.3m/sで25%→100%の位置にサッシを移動させた。その際に、風量制御装置の応答速度を4条件(①1秒応答②3秒応答③6秒応答④風量制御なし)に変更し、その応答速度と封じ込め性能の関係を検証した。

封じ込め性能の判断のために、フード内部で発生するガスにはトレーサガスに広く利用されるSF<sub>6</sub>(分子量136)をガスイジェクタ(図12)より4L/minの流量で発生させた。

0秒以前ではサッシが閉じトレーサガスが高濃度であった。その後、サッシを開くとサッシ前面から風が流入し、フード内のトレーサガス濃度が一気に希釈される。

2.5秒時の解析結果を図16に示す。条件③や④ではサッシ開後の風量制御が遅れ、サッシ下部にガスが滞留している。条件②ではサッシの下部に若干の滞留がある。条件①では渦状の流れがおき、下部の流れ滞留が解消されている。高い封じ込め性能のためには1秒程度の高速な風量制御装置が必要とされると言われるが、そのことを定量的に示す解析結果であると考えられる。

### 4.5 まとめ

これまで把握が難しかった「ヒュームフード内の気流性状」と「風量制御装置の応答速度による封じ込め性能の違い」を解明した。ヒュームフード内では半時計の流れが発生し、速やかに有害ガスを希釈し、排気していることが分かった。また、サッシ開閉時には面風速を一定に保つために、排気風量をコントロールするが、その風量制御には1秒程度の高速応答が必要であることも確認した。



図11 ヒュームフード

表4 CFD解析条件一覧

		定常(全開, 面風速 0.5m/s)	定常(50%開度, 面風速 0.5m/s)	非定常
結果		表5	図14	図16
ソフトウェア		CFD2000		
乱流モデル		標準k-εモデル		
解析の種類		定常解析	定常解析	非定常解析
境界条件	流入	大気圧		
	流出	8.1kg/s (平均面風速 0.5m/s相当)	16.2kg/s (平均面風速 0.5m/s相当)	図16の要求風量に応じた風量
メッシュ分割	要素数	33840		
	要素形状	構造格子(直方体)		

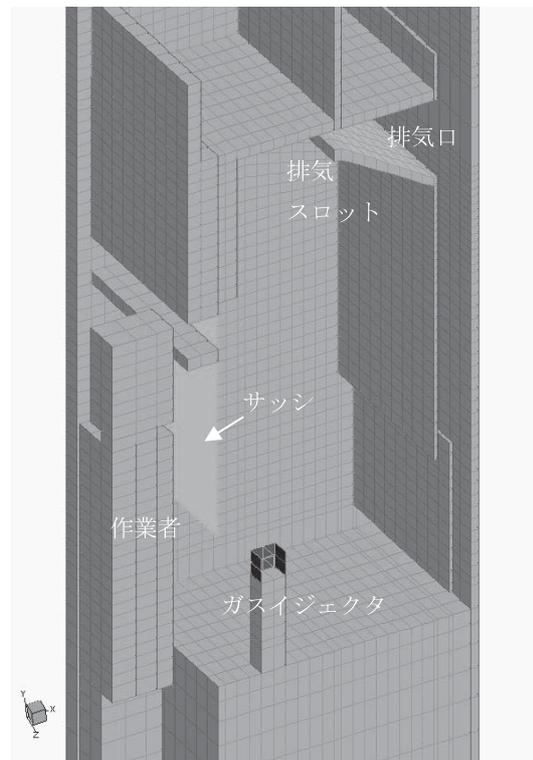


図12 対象モデル

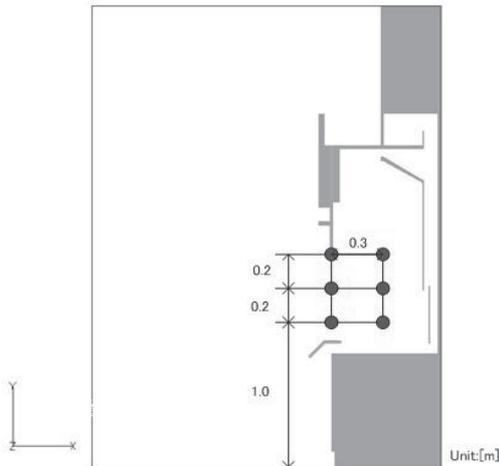


図13 3次元風速の測定点(フード中心部)

表5 実測とCFDの風速比較

	実測	CFD	誤差
左上	(48,-14,-4)	(49,-37,2)	(1,-23,6)
右上	(41,41,-4)	(43,22,0)	(2,-19,4)
左中央	(46,2,-2)	(46,-4,-1)	(0,-6,1)
右中央	(37,7,-5)	(55,7,-7)	(18,0,-2)
左下	(43,2,3)	(45,20,2)	(2,18,-1)
右下	(36,4,-1)	(45,8,8)	(9,4,10)

\*(x,y,z), [cm/s]

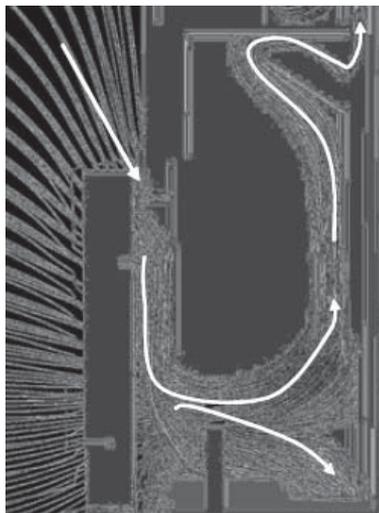


図14 フード内の流線(サッシ開度50%)

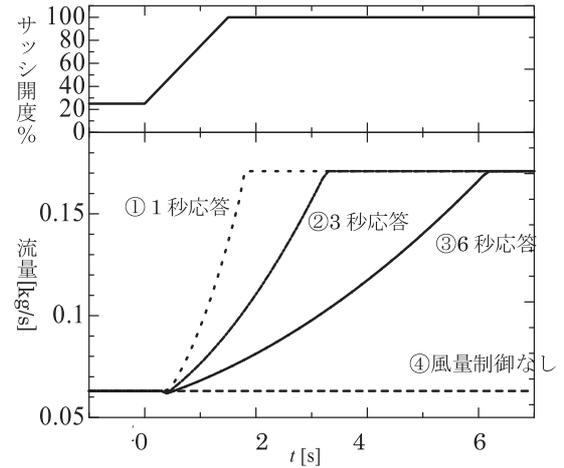


図15 サッシ開度と風量制御装置応答波形

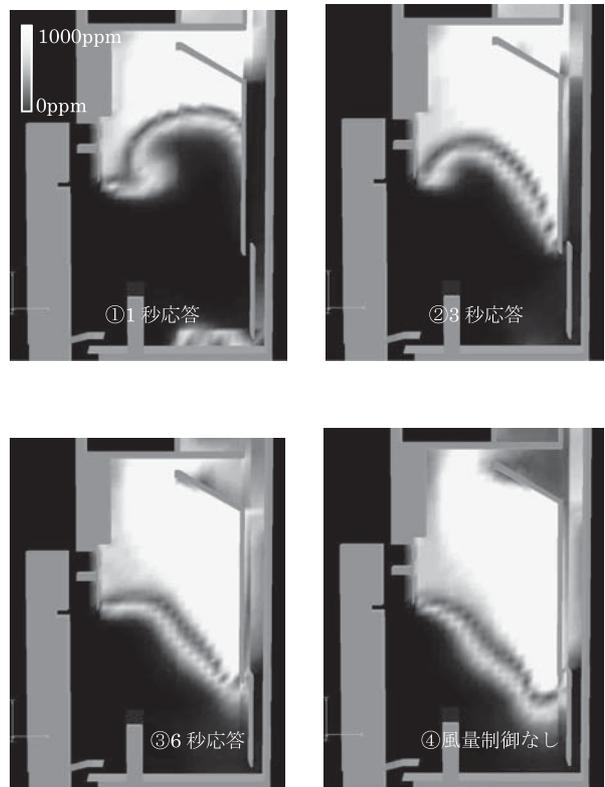


図16 応答速度別の封じ込め性能(2.5s時)

## 5. 動物飼育ケージ<sup>(2)</sup>

### 5.1 狙い

動物飼育室では、マウスなどを飼育するラックが用いられている。直方体のケージが普及しているが、収納効率や着脱の良さを特徴とする図17のような円形状のものが新たに提案されている。しかし、実運用での換気性能が未知であったので、その換気回数測定を行った。

動物や人間の間での感染を防止するために、飼育ケージには清浄度や封じ込め性能が求められる。その性能指標が換気回数である。対象のケージはサイズが小さく、マウスも活動状態になるため、風量の計測は難しく、トレーサガスによる測定を工夫しながら活用した。



図17 円形動物飼育ラック

$$\text{局所換気回数(回/h)} = \frac{1}{A}$$

$$A = \int_{t_0}^{t_e} \frac{C(t) - C(t_e)}{C(t_0) - C(t_e)} dt$$

$A$  :  $t_e$ 時の空気齢(h)  
 $C(t)$  : 時刻 $t$ における $\text{CO}_2$ 濃度(ppm)  
 $t_0$  : 換気開始時  
 $t$  : 換気途中の任意の時間  
 $t_e$  : 換気終了時

数式1 換気回数算出式

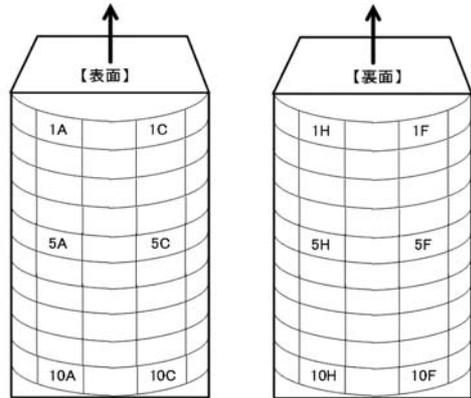


図19 計測ゲージの設置位置

### 5.2 換気回数測定方法

換気回数の測定にはステップダウンと呼ばれる方法を用いた。トレーサガスとして $\text{CO}_2$ を用いた測定原理を図18に解説する。

- ・換気を停止し空間にガスを供給/拡散させる。
- ・ある程度までガス濃度を上昇させた後で、ガス供給を停止する。
- ・換気を開始する。空気が徐々にリフレッシュされ、ガス濃度が減衰してゆく。
- ・減衰の時定数は換気回数で決まる。例えば、減衰の時定数が短ければ、素早くリフレッシュされていて、換気回数は大きいと言える。なお、換気回数は数式1で計算される。

### 5.3 実験方法

実験条件と方法を以下に示す。

- ・対象としたラックは10段×10列の計100個のケージである(図17)。
- ・測定ケージは1/5/10段のA/C/F/H列の計12個である(図19)。

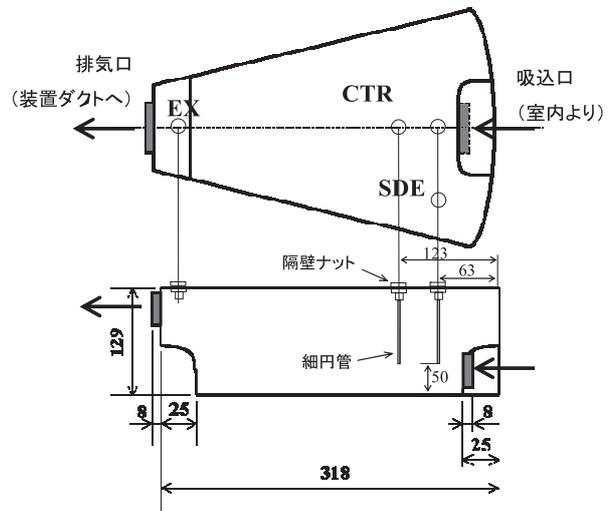


図20 計測対象ケージ

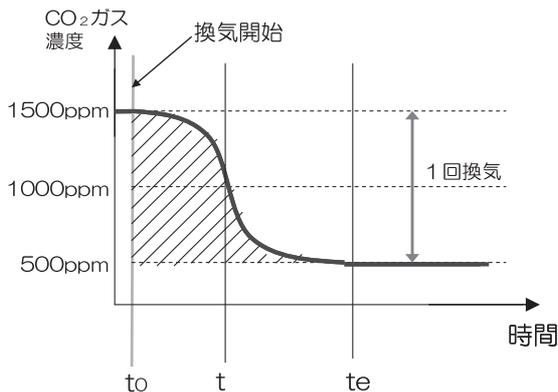


図18 ステップダウン法



図21 計測風景(B6J種)

- ・A/F列に小柄なB6J種の雄が5匹飼育され,C/H列に大柄なICR種の雄が5匹飼育されている。
- ・ケージ外形と換気回数測定点を図20に示す。「中心部(CTR)」、「排気近傍(EX)」、「給気口の横で空気が淀みやすい場所(SDE)」の3点を選定した。測定点にはチューブを挿入し(図21),その後部にCO<sub>2</sub>センサを取り付けた。
- ・換気回数測定には前述のステップダウン法を用いた。なお,CO<sub>2</sub>濃度の上限はマウスや害のない2,000ppm程度までとした。
- ・ラックの上部には排気ダクトが接続されている。排気風量は154m<sup>3</sup>/hで十分な排気量を確保した。

5.4 実験結果と考察

- 各点での換気回数結果を表6に,考察を以下に示す。
- ・ケージの中心部(CTR)は流れの主流となり換気回数が多い。
  - ・吸込口と排気口が正対しショートサーキットや隅の淀みが心配されたが,心配された場所(SDE)でも,150回/h非常の換気回数を確認した。
  - ・排気口に近い1段目で,換気回数が多い傾向にある。
  - ・若干のばらつきがあるものの,ラック/ゲージ位置での極端な偏りはなかった。
  - ・換気回数は排気風量に応じて増減するので,排気風量を適切値に制御することが大切である。

表6 各点での換気回数(回/h)

段	計測点	列			
		A	C	F	H
1	EX	186	166	185	136
	CTR	268	380	232	171
	SDE	188	156	209	167
5	EX	135	123	130	139
	CTR	366	346	259	206
	SDE	167	188	164	155
10	EX	137	132	125	135
	CTR	291	251	228	169
	SDE	150	155	135	163

5.5 まとめ

実運用での換気性能が未知であった「円形飼育ラック」の換気性能をトレーサガス法により明らかにした。その結果,換気回数の分布はあるものの,適当な排気風量を保てば,飼育環境に良好な換気回数に確保できることを検証した。

6. おわりに

「ダクト気流」、「ヒュームフード」、「動物飼育ケージ」の気流解析事例を紹介した。いずれも気流性状は複雑であり,その実状把握が難しい対象であったが,各種解析手法を適材適所に活用することで,これらの気流性状を明らかにすることができた。

さらには,これら解析結果を活用しながら,空気の制御に関する商品の開発や性能向上に取り組んできた。今後も研究開発やお客様の課題解決のために解析活動を充実させてゆく所存である。

参考文献

- (1) 香川,大曲ほか:サッシの移動を考慮に入れたヒュームフードの気流解析,「シミュレーション学会」,2004年
- (2) 日置,荒巻,石原ほか:「回転式微陰圧型個別換気ケージシステムにおけるケージ内環境」,「第54回実験動物学会ポスターセッション」,2007年
- (3) 小林,徐ほか:「グランドロビーの空調最適運転に関する研究 — 自然換気量の計測及び換気性能の評価」,空調和衛生工学会学術講演会2004年

著者所属

- |        |                        |
|--------|------------------------|
| 齋数 由香子 | 研究開発本部<br>コアテクノロジーセンター |
| 大曲 康仁  | 研究開発本部<br>コアテクノロジーセンター |
| 原山 和也  | 研究開発本部<br>コアテクノロジーセンター |
| 三枝 隆晴  | 研究開発本部<br>コアテクノロジーセンター |
| 香川 利春  | 東京工業大学 教授<br>精密工学研究所   |

# 現場保全作業を効率化するセンサ/アクチュエータの開発

## Development of a sensor/actuator that improves the efficiency of the workplace preservation process

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

沖田 孝雄  
Takao Okita

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

久保田 秀雄  
Hideo Kubota

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

関根 秀太  
Hidetaka Sekine

### キーワード

インテリジェントコンポ™, SAnet, センサ, アクチュエータ, 劣化予知, フォルト検知

空調設備の機器データを収集、蓄積することを目的としたインテリジェントコンポ™を開発したので報告する。従来のセンサ / アクチュエータがアナログ信号であったのに対し、インテリジェントコンポ™は SAnet 通信を採用することにより情報量が拡大し、機器データの収集、蓄積が容易となった。収集したデータは、機器台帳作成支援や劣化予知、フォルト検知に利用することができ、保全業務の効率向上を図ることが可能となった。

This paper shows the Intelligent Compo that we have developed for the purpose of collecting and accumulating data on air-conditioning facilities. Unlike conventional sensors/actuators that use analog signals, the new Intelligent Compo uses SAnet, which permits more information to be communicated and makes easier the collection and accumulation of data on the facilities. The collected data can be used to help create machine ledgers, to predict deterioration, and to detect machine faults, all of which in turn improve the efficiency of maintenance operations.

## 1. はじめに

空調設備を高いレベルで快適性、省エネルギー性を実現するためには、空調設備機器の保全作業は不可欠である。しかし現状、保全作業は手作業に頼っていることが多く、効率的に行われているとは言い難い。

そこでセンサやアクチュエータの潜在的機器データの可視化を行う事を目的として「インテリジェントコンポ™」の開発を行った。

インテリジェントコンポ™(自動制御用センサ/アクチュエータは空調設備の部品との意味からコンポーネントと表現される)は自己で機器データを持ち、蓄積することができる。機器データとは、機器固有の形番情報や動作履歴、故障情報などを示す。

このインテリジェントコンポ™をBAシステムに組み入れ、従来不可能だった計測、機器データの収集、蓄積を可能とすることで、空調設備の機器台帳作成支援や劣化予知、フォルト検知診断が容易となる。

## 2. インテリジェントコンポ™の商品ラインナップと特徴

インテリジェントコンポ™の商品ラインナップと特徴を以下に記載する。

### 2.1 商品ラインナップ

- ①室内型センサ (図1)
  - 室内型温度センサ
  - 室内型温湿度センサ
- ②ダクト挿入型センサ (図2)
  - ダクト挿入型温度センサ
  - ダクト挿入型温湿度センサ
  - ダクト挿入型給気露点温度センサ
- ③直結型ダンパ操作器 (図3)
- ④電動弁 (図4)
  - アクティブ電動二方弁
  - アクティブ電動三方弁



図1 室内型センサ

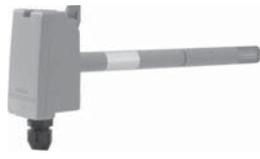


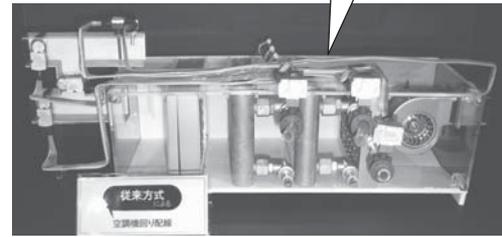
図2 ダクト挿入型センサ



図3 直結型ダンパ操作器

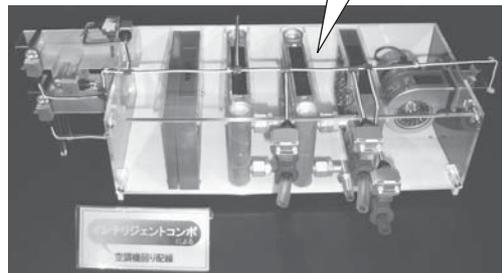


図4 電動弁



個別配線が必要のため、複数配線となる

図6 従来施工—ゾロ引き配線



渡り配線となるため、個別配線が不要となる

図7 インテリジェントコンポ™施工—渡り配線

## 2.2 特徴

### ①演算、蓄積機能

従来のセンサ/アクチュエータと異なり、それぞれ機器内部にマイコンとメモリを搭載し、機器データ、計測機能/演算機能/蓄積機能を持つ。

### ②データ通信機能

大量のデータ伝送を行う必要があるため、センサ/アクチュエータは従来の1-5Vや4-20mA等のアナログ信号に代わり、SAnet(電圧伝送)(図5参照)によるデジタル通信で空調機コントローラに接続される。

### ③配線施工

SAnetの採用でセンサ/アクチュエータ配線施工を従来、ゾロ引き配線(図6)でしか対応できなかった方式を省施工可能な渡り配線方式(図7)にできる。

ゾロ引き配線の場合には計装盤から各機器に対して独立した配線施工が必要となるため、管理費用、労務費用等の人工とケーブル、電線管等の工事部材が多く必要になる。渡り配線により機械室当たり30%の省施工が可能となる。

#### 通信(電圧伝送)

通信距離	: 10~30m(一般計装の場合)
通信速度	: 1200bps
接続台数	: 15台/1ライン
電源電圧	: AC24V±10% 50/60Hz

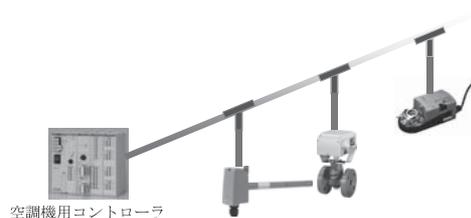


図5 通信仕様

### ④機器データ収集機能

インテリジェントコンポ™の持つ機器データはCSVファイルとして監視パソコンのハードディスク内に自動収集/蓄積される。機器固有の情報は機器台帳を作成するのに使用し、機器の動作履歴や故障情報は、劣化予知、フォルト検知、故障解析に使用する。イメージを図8に記載する。

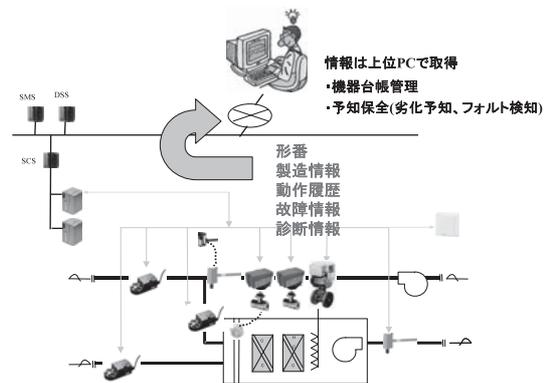


図8 機器データ収集/解析

## 3. 課題解決

### 3.1 低速通信の採用

機器データなどの付加価値情報をセンサ/アクチュエータに持たせるには、マイコン、メモリ、通信回路を搭載する必要がある。トータルコストを変えずにこれらの機能を提供するため、①使用部品コストの抑制②施工コストなどの製品以外のコスト低減が可能な電源+通信からなる3線式の1200bps低速通信SAnetの採用を行った。

1200bpsの低速通信のため、通信回路は特殊な専用ICを必要とせず、安価なオペアンプ、トランジスタと抵抗、コンデンサ等の受動部品から構成されることにより、製品コスト上昇の抑制に寄与している。

また、従来の施工では、電源用、通信用、信号線用に別種類のケーブルを用意し、通信には専用ケーブルやツイストペアのケーブル、また、信号内容に合わせシールド付ケーブルを採用していた。SAnetでは、前述のケーブルよりも安価なCVVやVCT等のケーブルを1種類準備すれば、配線工事は完了するため、施工材料コストの低減となっている。

### 3.2 省施工への対応

2.2の②で述べた渡り配線において、挿入型センサ等はケーブルが1本しか製品に接続できないため、渡り用の入力線、出力線の両方の接続が確保できず、配線用のプルボックスを用いることになる。このプルボックスを取り付けること自体が取付箇所を2箇所（製品とプルボックス）にすることになり、工数アップにつながる。このため、SAnet三又配線ユニット（図9参照）を開発し、製品と渡り配線構造を一体化させることにより、取付箇所が1箇所として、施工コストの低減をはかっている。

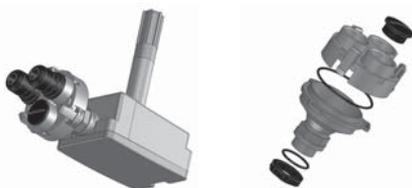


図9 SAnet三又配線ユニット

### 3.3 室内型温度センサの周囲温度影響低減設計

マイコンや通信回路の搭載により、従来製品と比較し、消費電力は上昇する。この上昇は内部発熱という形で現れ、温度センサとしての本来機能を損なう結果となる。この課題を解決するため、本製品では二つのアプローチを行った。一つは内部発熱の影響を受けにくい最適配置を実現すること、もう一つは低消費化を進め、内部発熱を極力減らすことである。

室内型センサのケースは図11に示すように、他のアナログ出力タイプの製品と同様のものを使用している。この中で、測温体をどこに配置するかがキーポイントとなる。周囲の風速とその向き、ケース内基板上的発熱体の位置をパラメータとして、熱解析シミュレーションを行い、内部発熱による温度影響の少ない配置の検討を行った。シミュレーション結果の一例を図10に示す。



図10 温度分布シミュレーション結果

シミュレーション結果の実証確認として、簡易風洞装置を用いて、風速とその向きを変更し、測定を行った。放射温度計で測定した温度分布を図11に示す。

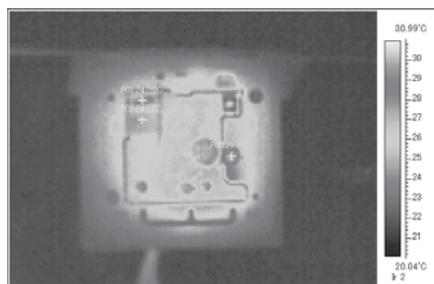
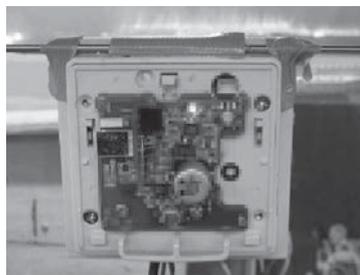


図11 温度分布実測結果

温度の絶対値は必ずしも一致していないが、相対的な傾向は合っていると判断でき、シミュレーションの結果を元に測温体の再配置を実施した。この再配置により、温度は0.8°C低減した。

また、消費電力の低減は回路ブロックから個々の部品までの様々な検討を行っている。例えば、SAnetでは通信回路に20V電源を必要としていたが、耐圧の高い部品を選定することにより、20V電源が不要となり、消費電力の削減が可能となった。また、マイコン等に使用している3.3V用電源ICの再選定により、変換効率が向上し、消費電力の削減につながっている。最終的に、同等機能を持つ他の温度センサと比較して、1/3以下の消費電力となった。

測温体の最適配置と消費電力の低減により、従来製品と同等の性能を実現している。

### 3.4 データ通信の効率化

#### 3.4.1 データ通信機能の課題

コスト低減や通信品質確保のためにSAnetを採用したが、データ通信機能を実装する上では次のような課題があった。第一に、センサ・アクチュエータのインテリジェント化は今後も継続して進化させていくよう計画している。また2.1で紹介した機器以外にも新たな製品ラインアップが予定されている。このような背景から、インテリジェントコンポのデータアクセス用通信には、順次追加される新たな機器データを送受信できるように通信メッセージフォーマットに柔軟性があること、またアクセスする側のアプリケーションもデータ追加に伴い簡単に修正可能であることが求められる。第二に、通信速度が1200bpsと低速である。これは標準的な空調機の給気温度制御を考慮した場合、計測値・制御コマンドに加えて機器データを扱うインテリジェントコンポ™では、かなり効率の良い通信を行うことが求められる。

### 3.4.2 汎用メッセージの採用

機器データ追加や機種追加に柔軟に対応できるように、どのデータに対しても共通の方法でアクセスできることを考慮した。その結果インテリジェントコンポ<sup>TM</sup>が持つ全データ構造をオブジェクトとプロパティで構成した。(図12参照) 例えば挿入型温湿度センサには温度、湿度、1-5V入力の3点の計測点があるが、それぞれをAI(アナログインプット)オブジェクトとし、その中に持つ計測値や正常/トラブル情報等をプロパティとしてとらえた。また機器固有の情報の集合体をデバイスオブジェクトとし、その中の形番やシリアルNo.等をプロパティとしてとらえた。これにより、オブジェクトNo.とプロパティNo.を指定するRead/Writeの2メッセージのみでインテリジェントコンポ<sup>TM</sup>の全データにアクセス可能とした。



図12 オブジェクト・プロパティ構成

### 3.4.3 専用メッセージの採用

オブジェクト・プロパティアクセス方式の採用で拡張性が確保されたため、次に通信の効率化を考える必要がある。インテリジェントコンポ<sup>TM</sup>で扱う計測値・制御コマンドは温度制御に使用するため高速性が要求されるが、機器データは固定データや過去からの蓄積データであるため高速性が要求されない。そのため通信の構成としてはインテリジェントコンポ<sup>TM</sup>の接続台数に関わらず常時、計測値・制御コマンドをやり取りし、計測値収集周期に影響のない範囲で、オブジェクト・プロパティアクセス方式を使って機器データを間欠的に収集するようにした。また温湿度センサやバルブアクチュエータが持っている計測値全点を一回の送受信でやり取りできるように計測値・制御コマンドに関しては専用メッセージを採用した。このメッセージは計測値・制御コマンド専用ではあるが、インテリジェントコンポ<sup>TM</sup>の全計測値・制御コマンドに使用でき、機種追加時にメッセージ追加が発生することはない。これらの対策によりインテリジェントコンポ<sup>TM</sup>は、機器データを収集しながらも、従来製品と同等の計測値収集周期を実現している。

## 4. 機器データを利用したアプリケーション

インテリジェントコンポ<sup>TM</sup>により収集した機器データを利用したアプリケーションの事例を以下に挙げる。

### 4.1 機器台帳作成支援

自動制御設備の保全作業は、機器台帳作成から始まる。機器形番はもちろん、製造年月日等の製造データを収集する必要があるが、フィールドでは設置場所における作業者の目視作業が一般的であり、効率、管理品質上課題があると言わざるを得ない。インテリジェントコンポ<sup>TM</sup>には予め機器形番、製造年月日等のデータが製造時に入力されるため、BAシステム上で自動的な収集、管理作業が可能となる。

### 4.2 予知保全支援

#### 4.2.1 劣化予知

従来、自動制御設備に関して個々の機器稼動状況を効率的に把握する術がなかったため、アクチュエータ等寿命を有する機器に関して、劣化故障後の事後保全対応とせざるを得なかった。インテリジェントコンポ<sup>TM</sup>が接続されたシステムでは、図13の様にアクチュエータが自己カウントする通電時間、動作回数等の機器データから自動推定された寿命に基づいた劣化予知が可能となる。

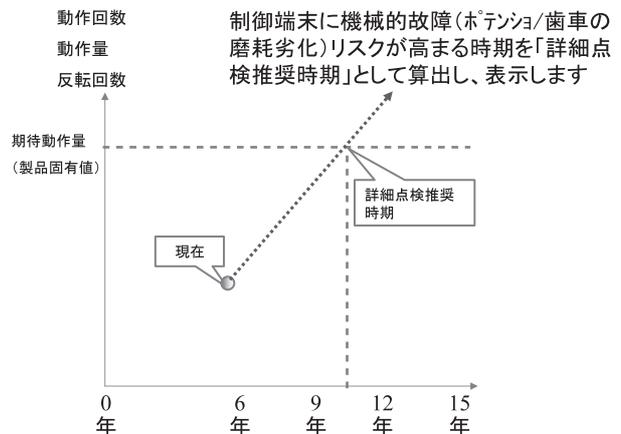


図13 劣化予知

#### 4.2.2 フォルト検知

過剰設定や機器の発停ミスといった、対策が比較的簡単な不具合(フォルト)が発見されず放置され、快適性/省エネルギーに改善余地が残っている建物が多い。

空調設備の運用改善の手法として、「BEMSを設置し」、「室内温湿度、設定値、外気温湿度、消費エネルギーといった計測値を収集し」、「後日問題のあった系統に関して対象期間の全データを理想状態と比較し」、「問題点を検知、診断、改善する」方法が有効であるとされている。しかし解析作業に高度な専門知識と時間が必要であるため、未だほとんどの建物で利用されているとは言い難い。

以下に機器データを利用した簡易フォルト検知手法例を述べる。

室内温湿度／往水温度設定ミス、バルブ固着、手動バルブ調整不良、設備能力不足等、設備運用上何らかのフォルトが発生し設定値に計測値が追従できなくなると、バルブ開度は100%に張り付く。インテリジェントコンポ™バルブアクチュエータには「開度張り付き頻度の自己カウント機能」があり、監視パソコンから簡単にフォルト空調機が検知できる(図14にイメージを示す)。

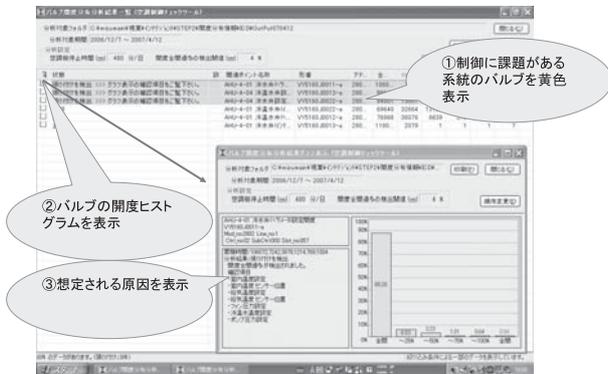


図14 劣化予知

#### 4.3 異常状態回避機能

マイコンと通信の搭載によりインテリジェントコンポ™では各種の異常状態を検出・通知できるようになった。この情報により設備管理者が異常状態への対処を行うわけであるが、インテリジェントコンポ™は自分自身で異常状態からの回避を試みる機能を持っている。

例えばバルブアクチュエータの全閉処理時に配管内の異物を噛み込んで全閉にならないというケースがまれにある。この異物を噛みこんだ状態が継続するとシートリングの破損によるリークや固着につながる可能性がある。そのため、全閉にならない状態をバルブアクチュエータが検出すると、異物が流れていくように一旦開側にある程度開いてから再度全閉処理を実施する。一度で回避できない場合には開側に開く量を増やしながら複数回にわたって本動作を行い、異常状態からの回避を試みる。

なお、本機能の効果については実際の現場にて確認済みである。

### 5. おわりに

本稿では、インテリジェントコンポ™の開発背景と課題対策、およびインテリジェントコンポ™の機器データを利用する手法を紹介した。

今年度、流量計測制御機能付アクティブ™(流量計測機能付きのバルブアクチュエータ)が開発され、インテリジェントコンポ™に新たなラインナップが加わる。流量計測制御機能付アクティブ™は、バルブ前後差圧、開度を自己計測することで実流量を内部演算している。空調制御における操作対象を従来の「バルブ開度」から「バルブ流量」へ変更すれば空調機コイルへ常に最適な流量とし、空調機への過流量が抑制される。過流量抑制により熱源機、搬送ポンプの運転台数を減らす事ができ、建物の省エネルギーに貢献することができる。

今後は、インテリジェントコンポ™の開発を通じて保全作業の効率化だけでなく当社の理念である人を中心としたオートメーションに則り、地球環境に貢献していきたい。

#### 商標

インテリジェントコンポ™は、株式会社 山武の登録商標です。

#### 著者所属

沖田 孝雄	ビルシステムカンパニー 開発本部開発1部
久保田 秀雄	ビルシステムカンパニー 開発本部開発1部
関根 秀太	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



# 差圧・圧力発信器の高性能,高機能化技術

## Technology for improving the performance and functionality of the differential pressure/pressure transmitter

株式会社 山武

間々田 浩一  
Koichi Mamada

### キーワード

差圧・圧力発信器,AT9000,高精度,高速応答,CommPad,機能安全規格

発売以来100万台以上の販売実績を誇るスマート形差圧・圧力発信器を大幅に改良し,様々な市場要求に対応可能な差圧・圧力発信器AT9000を開発したので報告する。本稿では,①世界最高レベルの性能を実現した高精度,高速応答における技術的な取り組み,②ユーザに様々な利点をもたらす使いやすい機能,操作性とデザイン,③機能安全に関する国際規格であるIEC61508適合について紹介する。

Since introducing the smart differential pressure/pressure transmitter, we have registered outstanding sales of more than one million units. Now, we have succeeded in making significant improvements to the unit and completed the AT9000 that is capable of meeting the diverse demands of the market, the details of which are reported below. This paper contains explanations of: (1) The technologies we applied to ensure high accuracy and the high-speed response of the transmitter, which enabled a performance that is among the highest in the world; (2) The user-friendly functions, operability, and design of the advanced transmitter that provide an array of benefits for users, and; (3) AT9000 complies with IEC61508, the international standard for functional safety.

## 1. はじめに

当社では,1983年に世界初となるスマート形差圧・圧力発信器を発売した。以来,全世界に100万台以上が納入され,ユーザから高い評価を頂いている。これまで差圧・圧力発信器(以下,発信器)は,圧力,流量,液位などの計測に使われる汎用性の高い工業計器として,世界中で広く採用されてきた。また,他の工業計器と同様に小型化,高性能化,高機能化の技術進歩を遂げてきた。近年では,発電設備のタービン周りなどに使用する高速応答形や,安全計装システムに対応するために,機能安全に関する国際規格であるIEC61508に適合した製品の要求もますます高まってきている。今回このような市場要求に即して,新形の差圧・圧力発信器AT9000 Advanced Transmitter Model GTX(以下,AT9000)を開発したので,その概要を報告する。本稿では高精度,高速応答における技術的な取り組み,使いやすく,人に優しい機能,操作性とデザイン,機能安全に関する国際規格IEC61508適合について紹介する。



図1 AT9000の外観

## 2. 発信器の概要

発信器の概要を説明する。図2に発信器のブロック線図を示す。発信器の構造は大きく区分すると、差圧の状態量を電気信号に変換する受圧部と、受圧部から出力された信号を処理してアナログ出力信号(4-20mA出力)を発信する発信部の二つから構成されている。導圧管などから送られた差圧は、ダイアフラムから封入液を介して、センサに伝えられる。センサに伝えられた差圧、静圧、温度の状態量は、それぞれのアナログ電気信号に変換される。更にA/D変換部によりデジタル値に変換され、MPUに取り込まれる。MPUでは、内部メモリに格納されている受圧部特性データ(キャラクタリゼーション・データ)を用いて、差圧の真値を計算する。計算された値はデジタル量としてD/A変換部に送られる。D/A変換部でアナログ値に変換され、4-20mA出力として発信される。

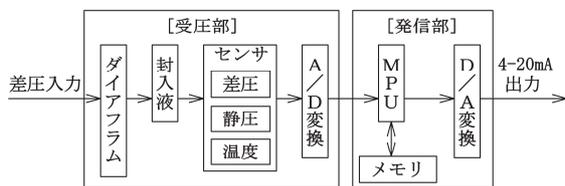


図2 発信器のブロック線図

## 3. 性能の向上

AT9000の開発において、特に注力した項目に高精度、高速応答がある。これらの開発内容について説明する。

### 3.1 高精度の実現

AT9000では、山武独自の補正関数同定手法であるキャラクタリゼーションシステム、A/D変換部およびD/A変換部の新規開発により、世界最高レベルの精度0.04%を実現している。

#### 3.1.1 キャラクタリゼーションシステムの新規開発

AT9000では、センサに長期安定性、再現性、耐久性などに優れた特性を示し、従来から長年にわたり実績のあるSiピエゾ抵抗式圧力センサを採用している。このセンサ性能を最大限に引き出すために、キャラクタリゼーションシステムの新規開発を行った。

まず、キャラクタリゼーションの概要を説明する。キャラクタリゼーションシステムのブロック線図を図3に示す。AT9000のセンサは差圧、静圧、温度センサを一つのチップに内蔵した複合機能センサである。AT9000ではこれらのセンサ出力をA/D変換部でデジタル値に変換して、MPUにデジタル信号を送っている。このうち、差圧センサは計測対象の差圧に対して最も感度が高いが、温度、静圧などの周囲環境によっても値がシフトする特性を持つ。そこで、温度、静圧センサの出力を用いて、これらの周囲環境の影響を除去することで正しい差圧の値を計算する必要がある。ここで、

$$\begin{cases} \text{差圧センサのA/D変換後出力:P} \\ \text{静圧センサのA/D変換後出力:S} \\ \text{温度センサのA/D変換後出力:T} \end{cases} \begin{cases} \text{差圧 :PV} \\ \text{静圧 :SP} \\ \text{温度 :Temp} \end{cases}$$

とすると、

$$\begin{cases} P=f(PV,SP,Temp) \\ S=g(PV,SP,Temp) \\ T=h(PV,SP,Temp) \end{cases} \cdots(a)$$

と表現でき、各々のセンサにおいて、f,g,hの関数が分かれば、(a)式の連立方程式を解くことによって

$$PV=F(P,S,T) \cdots(b)$$

(b)式、つまり真の差圧を表す出力関数が求められる。出荷前の補正工程では、AT9000が使用される周囲温度・静圧環境を再現し、受圧部1台1台について各センサ出力を測定することで、関数f,g,hの同定および出力関数Fの決定を行っている。なお、出力関数Fは複雑な非線形特性をもち演算負荷が膨大になるため、近似多項式を生成することで、製品への実装を可能としている。

次にキャラクタリゼーションシステム新規開発による精度の向上について説明する。キャラクタリゼーションシステムにおいて、出力精度に影響する誤差要因としては、

- ・入出力のデータ測定誤差
- ・出力関数を近似多項式にすることで生じる近似誤差

がある。精度の向上を実現するためには、目標精度に対してこれらの誤差を十分小さくする必要がある。新規にキャラクタリゼーションシステムを立ち上げるにあたり、入出力のデータ測定誤差については、構成する環境試験設備、計測モジュールに独自のチューニングを施し、測定誤差、変換誤差の影響を最小限にして、精度の向上に対応できるシステムとすることに成功した。また、このキャラクタリゼーションシステムに加え、後述するA/D変換部の性能向上によってAT9000の高精度化を実現している。

出力関数の近似誤差については、通常、出力関数を求める際、P,S,Tの各センサ出力を測定するポイントを追加することや、近似多項式自体を高次数化することで、誤差を最小限にすることができる。しかし、測定ポイントを増やすことは生産能力の低下に繋がり、また近似多項式の高次数化は演算量を増やすことになり、応答速度が遅くなってしまふ。そこでAT9000では、測定ポイントの最適化に加え、未測定ポイントのデータ補間をする際に誤差設計が行える技術を開発し、出力関数の高精度化、更には多項式の次数の最適化を行

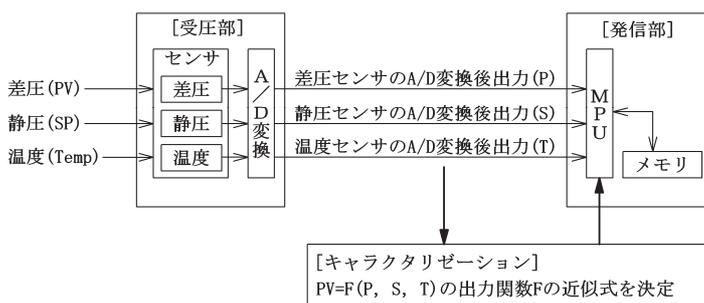


図3 キャラクタリゼーションのブロック線図

った。これにより、高精度を維持しつつ演算量の低減が実現できた。

### 3.1.2 A/D,D/A変換部の改良

精度の誤差要因の一つにA/D変換,D/A変換誤差がある。この誤差を縮小し、前述のキャラクタリゼーションシステムによる測定精度をより高める必要がある。AT9000では、A/D変換部,D/A変換部について、従来から蓄積してきた独自のA/D,D/A変換回路技術をさらに改良し、双方の分解能およびリニアリティーを改善することにより、精度の向上を実現させている。

### 3.1.3 性能確認

AT9000の代表機種であるGTX31Dの精度実測データを図4に示す。それぞれ、精度0.04%の設定レンジである0kPa~100kPa,0kPa~10kPaのデータ,および設定可能最小スパンである0kPa~0.5kPaのデータ(精度0.65%)を測定した。いずれも世界最高レベルの精度を十分に満足する良好な特性を確認できた。

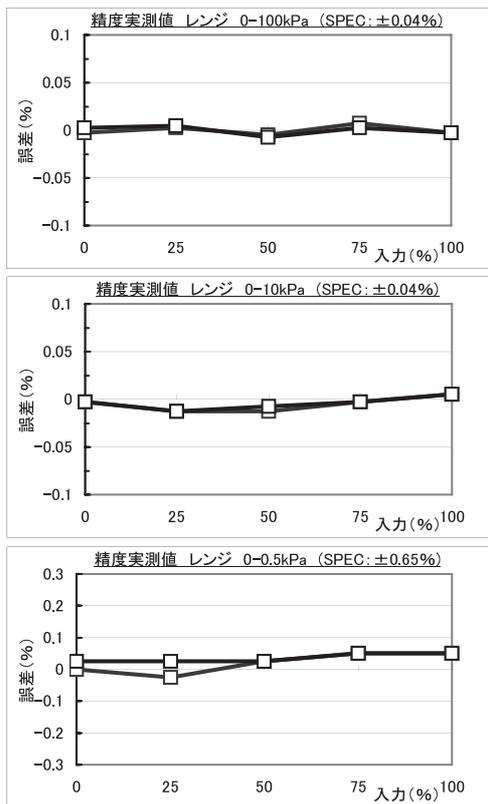


図4 AT9000の精度実測データ

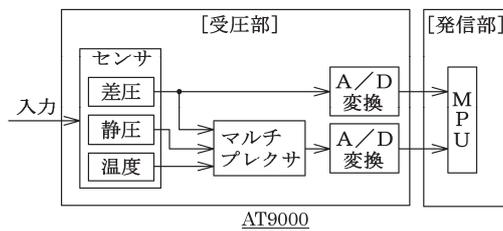
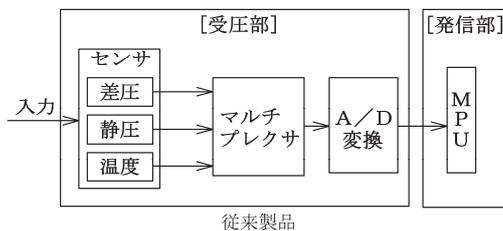


図5 A/D変換部のブロック線図

## 3.2 高速応答

AT9000では、A/D変換回路の改良、低消費電流設計による動作クロックの高速化、演算式の効率化、受圧部機構の改良などにより、スマート形では世界最速となる応答性85msec(実測の平均値,63.2%応答)を実現している。

### 3.2.1 A/D変換回路の改良

応答性を上げるためには、差圧信号のサンプリング周期を速くする必要がある。A/D変換部で取得する信号は、応答性に特に影響する差圧以外にも、補正用を使用している静圧、温度がある。図5にA/D変換部について、従来製品とAT9000のブロック線図を示す。従来製品では、センサからの3つの信号をマルチプレクサにより順番に切り替えて、データを取得していた。AT9000では、A/D変換回路を2個使用して、片方を差圧計測専用とし、もう片方を補正のための静圧、温度計測用,および診断のための差圧計測用とした。また、A/D変換回路も高速タイプのもを採用した。これらにより、従来よりも差圧信号のサンプリング周期を1/5に短縮できた。

### 3.2.2 低消費電流設計による動作クロックの高速化

応答速度を上げる方法の一つに、MPUの動作クロックを上げる方法があるが、同時に消費電流も上昇してしまうというトレードオフがある。一般的に2線式の工業計器は4mA以下の消費電流で回路を動作させる必要があり、単純に動作クロックを上げることはできない。このため、従来製品以上の低消費電流設計が必要となった。AT9000では、MPUや表示器用ICなどにおける低消費電子部品採用や、当社独自で設計したゲートアレイの採用、アナログ/デジタル回路の改良により、低消費電流化を実現している。特にゲートアレイは、内部の駆動電圧のみ低電圧電源を使用して動作させる回路や、機能集約によるゲート数の削減、回路、配線などの集積化などの設計を行った。これらにより、高機能を保持しながら低消費電流化が可能となり、MPUの動作クロックを従来に比べて高速化できた。

### 3.2.3 演算式の効率化

3.1.1項で前述したように、新規開発の補正関数同定手法を用いたキャラクタリゼーションシステムにより、出力関数の近似式を効率化できた。また、F/Wのプログラム全体の見直しも行い、データ処理の効率化を図った。この演算式の効率化および3.2.2項の動作クロックの高速化により、高精度を実現するとともに、演算部の処理時間を従来に比べて1/7に短縮できた。

### 3.2.4 受圧部機構の改良

受圧部は、圧力をダイアフラムで受け、ダイアフラムの変位に

応じて内部の封入液が移動し、センサに圧力を伝える機構になっている。このセンサ伝達の応答を速くするためには、封入液移動速度を上げる必要がある。AT9000では、封入液の通過領域を増やし、且つ過大圧にも耐えうる構造に改良した。これにより従来と比較して受圧部の応答時間を1/5に短縮できた。

### 3.2.5 特性の確認

図6にAT9000の応答性実測データを示す。このデータから78~90msec(平均85msec,63.2%応答)というスマート形では世界最速の応答性を確認できた。

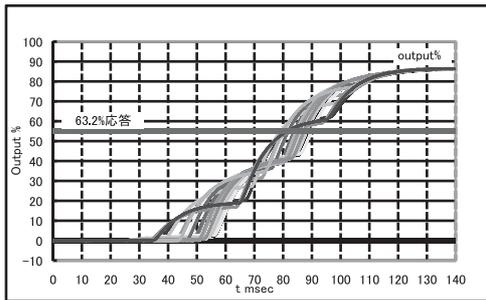


図6 応答性実測データ

## 4. 機能、操作性、デザインの向上

ユーザでは、国際間の企業競争力を高めるため、設置、メンテナンス作業の簡易化、効率化により、作業時間やトータルコストを削減したいという要求がますます強くなってきている。また、計器、計装の異常を未然に、または早急に発見できる機能が望まれている。このような市場要求から、AT9000では、利便性の高い機能を充実させ、使いやすく、人に優しい製品の開発に重点をおいた。

### 4.1 構造

#### 4.1.1 小型・軽量化

発信器の小型、軽量化は設置場所を選ばない、運搬や設置が容易、保管場所が削減可能などのユーザメリットがある。AT9000では電気部品の小型化、電気回路の集積化によりプリント基板を縮小し、プリント基板の組立構成を見直すことで、従来製品より25%軽量化した。また、この軽量化により耐振動性も向上できた。

#### 4.1.2 配線噛み込み防止構造

設置やメンテナンスなどで発信器に配線する際、電線や圧着端子の断線を回避するために、電線を必要な長さより長めに端子部に引き込んでおき結線することはよく行われる。この際、余った配線がカバーのねじに噛み込んでしまう可能性があった。噛み込みは外から見ても分からないため、構造上防止できる設計を検討した。AT9000では、端子部カバーにめねじ構造を採用している。図7に、おねじ構造とめねじ構造の端子部カバー図を示す。おねじ構造の場合、カバーを締める際に、カバーのねじに配線があたり噛み込む恐れがあるが、AT9000で採用しためねじ構造の場合、その心配がないことが分かる。

また、メンテナンス時はカバーを外して作業をすることが多いが、おねじ構造の場合、カバーのねじが外側に向いていて傷が付きやすく、最悪の場合本体に組み付けなくなる可能性がある。AT9000のめねじ構造は、ねじが内側に向いているため傷が付きにくく、このような問題を回避している。更にカバーの横幅が増えたため、手でグリップしやすく、カバー付け外し作業を容易にしている。

#### 4.1.3 環境設計

社会的貢献の観点から、非常に多くの企業が環境活動に積極的になってきている。環境活動の一環として、使用済みになった計器を材料毎に分解し、リサイクル率を上げたいというユーザの要望も増えてきている。AT9000では、部品の組立性を上げると同時に、使用後の廃棄時に行われる分解作業の効率も考慮した設計を行った。図8に、AT9000発信部の部品構成を示す。ねじを多く使用し、樹脂、プリント基板、金属ケースなどの異種材料部品を分解しやすい構造とした。また、従来製品と同様に欧州RoHS指令に対応しており、環境負荷低減に寄与している。

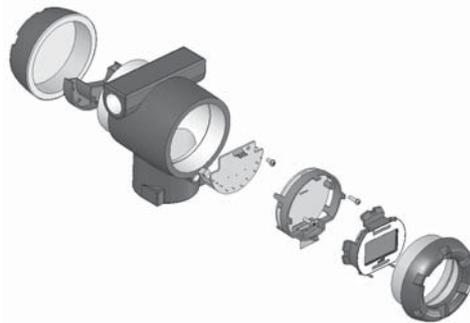


図8 発信部の部品構成

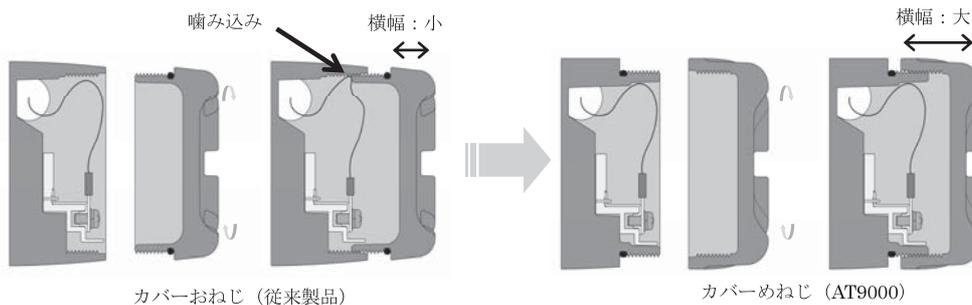


図7 端子部カバー構造

#### 4.2 診断履歴機能の搭載

AT9000では、ゼロ点校正履歴や、過大圧、異常温度などのエラー診断履歴情報を内部メモリ(E<sup>2</sup>PROM)に保存する機能を有している。これらの情報は当社製コミュニケーターCommPadを使用することにより、確認、データ収集することができる。この機能を使用することにより、例えば、過大圧などの過去に発生したエラー情報から、ユーザがその原因と対策を明確にしやすくなった。また、ゼロ点校正値の履歴やそのグラフ表示機能から、ゼロ点の推移を確認できる。これは、発信器の交換周期のタイミングを推測する指針になり、ユーザにおけるメンテナンス性の向上やコスト削減に役立つ。図9にCommPadとその表示例として、ゼロ校正履歴グラフを示す。

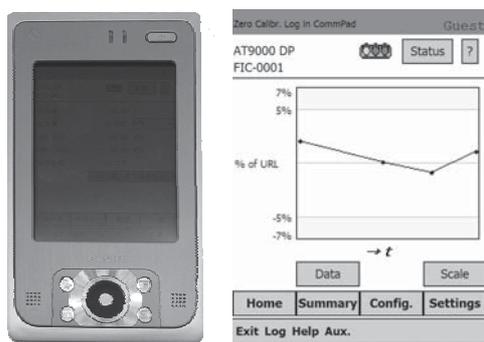


図9 CommPadと表示例

#### 4.3 外部ゼロ/スパン調整

発信器は本体の取付姿勢や、特にリモートシールなどの受圧部の設置位置により、現場でゼロ点の調整を必要とするケースがある。AT9000では、現場でのゼロ調整の作業性を考慮して、内蔵指示計の上下に調整スイッチを設け、指示計を見ながら、窓ガラス越しにゼロ調整、およびスパン調整可能となるようにした。スイッチは従来製品から使用実績のある磁気感应式を採用した。動作方法は、図10のように付属のマグネットスティックをゼロまたはスパンスイッチに近づけることにより行う。また、このような方式の場合、従来のような機械的可動部がないため、部品劣化や操作ミスによる可動部破損も回避できる。



図10 外部ゼロ調整時

#### 4.4 内蔵指示計

内蔵指示計は、ユーザが発信器の出力値、正常、異常状態などの情報を容易に現場で確認できる利便性を有している必要がある。図11にAT9000の内蔵指示計デザインを示す。従来品よりも表示面積を1.5倍、情報量を4倍にして、表示を見やすくした。表示可能な項目は

- ・差圧、圧力の5桁デジタル値
- ・%, 圧力単位 (kPaなど), 任意の単位 (m<sup>3</sup>/hなど)
- ・ゲージ圧 (G), 絶対圧 (abs)
- ・べき数 (×10, ×100, ×1000)
- ・バーグラフ表示 (5%間隔)
- ・ライトプロテクト表示 (鍵マーク)
- ・エラー履歴の有無 (旗マーク)
- ・診断時におけるアルファベット表示
- ・出力開平 (OUT√), 表示開平 (DISP√)

となる。特にアラーム発生時に、内蔵指示計のアルファベット表示により、現場で発信器の状態を的確に把握できるようになった。これは、ユーザにおける設置作業、メンテナンス作業の軽減につながる。図12にアラーム表示の一例として、過大圧印加時の表示を示す。

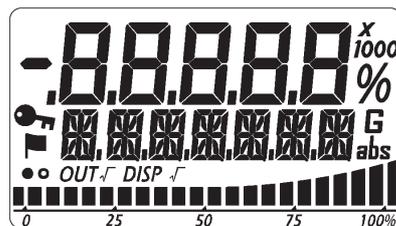


図11 内蔵指示計

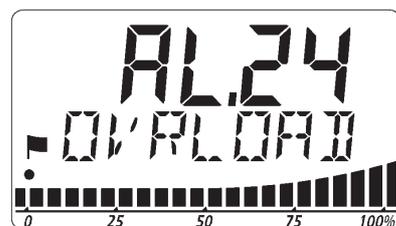


図12 アラーム表示例(過大圧印加時)

#### 4.5 アラーム出力機能

AT9000から新たに追加された機能の一つにアラーム(接点)出力がある。これは、例えばあらかじめ設定した上下限値の範囲を超えた場合、4-20mA出力とは別にオープンコレクタの接点出力から情報を外部に出力することができる。AT9000に採用されている接点回路は、内部回路と外部接続回路がフォトカプラによりアイソレーションされている。そのフォトカプラの駆動にはある程度の電流を流す必要があるが、低消費電流設計のために、他の箇所で使用した電流を再利用する独自の回路によって、新たに電流を必要とすることなく、接点回路を動作させている。

## 5. 機能安全規格IEC61508の適合

AT9000は,安全性を高め,更に今後要求が高まる安全計装システムにも対応するよう,機能安全に関する国際規格であるIEC61508 (JIS C 0508)に適合した開発を行った。IEC61508に適合するためには,次の故障を抑制,回避するよう設計しなければならない。

- ・Systematic Failure (系統的故障)
- ・Random H/W Failure (偶発的故障)

Systematic Failureは原因に対して決定論的に関連する故障で,製品の安全ライフサイクル全体において文書化や開発・生産体制の管理,製品評価,資質などについて規格の要件を満たさなければならない。Random H/W Failureは構成部品などの劣化などにより,時間に関して偶発的に発生する故障で,SFF (Safe Failure Fraction, 安全側故障率)や,PFDF (Probability of Failure on Demand, 要求時に安全機能を実行できない確率)などが具体的な指標になっている。

これらを満足するために,Systematic Failureについては,ソフトウェアの静的解析ツールの使用,徹底した故障挿入試験の実施に加え,全安全ライフサイクルにおける徹底した文書化と,その管理システムの見直しを行った。Random H/W Failureについては,全故障モードについて分析を行い,その結果に基づき自己診断機能の強化,回路の冗長化,低故障率部品の採用などを実施することでSFF,PFDFの要件を満足させ,安全性の向上を行った。詳細例をあげると,アナログ電源,デジタル電源電圧値の診断,D/A出力値のリードバック機能,そして,3.2.1項で前述したA/D変換回路を2個内蔵することによる冗長化などがあり,その他H/W,S/Wにおいても多くの自己診断機能を具備している。

これらの結果,AT9000は認証機関TÜVより,安全度水準SIL2 (Safety Integrity Level 2)の認証を取得している。

## 6. おわりに

AT9000は,本稿にて紹介した技術,設計により,飛躍的に性能,機能を向上させることができた。また規格についても,今回紹介した機能安全規格の他,各国の防爆規格,EMC規格などにも対応しており,幅広いアプリケーションで対応可能な仕様となっている。省エネルギー化が求められる昨今では,プラントなどでの計測機器性能がますます重視されると同時に,その利便性,操作性,メンテナンス性からのトータルコスト削減も注目されている。今後,このようなユーザの要求に応えられるよう,製品開発を進めていきたい。

### 参考文献

- (1) 中川, 溝口:「小型差圧・圧力発信器」, Savemation Review, Vol.14, No.2, pp.2-7, 山武(1996)
- (2) 河内, 阿波, 宮沢:「マイコン内蔵型差圧・圧力発信器」, Savemation Review, Vol.2, No.2, pp.35-40, 山武(1984)
- (3) IEC61508 Part1-7 (1998/2000)

### 商標

CommPadは,株式会社 山武の登録商標です。

### 著者所属

間々田 浩一      アドバンスオートメーションカンパニー  
プロダクト開発部  
開発プロジェクト3グループ

# 人の直感的な判断,暗黙知の引き出し, 形式化を支援する生産情報ポータルの開発

— 一人を中心としたオートメーションの発展に向けて —

Development of a production information portal that assists users in making intuitive judgments while eliciting and formalizing their implicit knowledge

— Toward the development of human-centered automation —

株式会社 山武  
アドバンスオートメーションカンパニー  
水上 正  
Tadashi Minakami

株式会社 山武  
アドバンスオートメーションカンパニー  
菅野 伸明  
Nobuaki Kanno

株式会社 山武  
アドバンスオートメーションカンパニー  
村手 恒夫  
Tsuneo Murate

株式会社 山武  
アドバンスオートメーションカンパニー  
渡邊 桂  
Kei Watanabe

## キーワード

生産情報,ポータル,見える化,可視化,暗黙知,形式知,直感的,製造/品質データ,メタ言語,データ連携

製造業では生産情報システムの導入により自動化は急速に進みつつあるが,これらのシステムは生産の業態の変化に柔軟に対応できていないのが現状である。製造データや生産情報,品質データなど製造に関わる情報に関し,ユーザが必要とする情報をユーザ自身で構築できる環境を提供(情報の見える化)し,データ連携や時刻連携といった機能を用いて,人が直感的に判断することにより,暗黙知を引き出し,形式化を支援する環境を実現した生産情報ポータル「Manufacturing Information Briefing」を開発したので報告する。

The introduction of production information systems has permitted rapid progress in automation in the manufacturing industry. However, those systems are not equipped to respond flexibly to changes in the manufacturing operation. We have developed a production information portal called the “Manufacturing Information Briefing” and provide details below. This portal provides users with an environment in which they can establish access to the information they need—manufacturing information such as production data, production information, and quality data—on their own (information visualization). The environment also permits users to make intuitive judgments by using functions such as data federation and time coordination, thereby improving their implicit knowledge and assisting in the formalization of that knowledge.

## 1. はじめに

製造業では,この何年かにわたるIT化により,様々なシステムやデータベースが導入されてきた。独立して導入されてきたこれらのシステムやデータベースから,製造部門の各ユーザが自分の業務を行うために,必要な情報をタイムリーに入手することはなかなか容易ではないのが現状である。また,オペレータから製造スタッフ,係長,製造課長,部長まで,それぞれのユーザが必要とする情報はその人が意思決定するレベルにより,情報の切り口や視点,必要となる形も異なってくる。つまり,製造に関わるすべての人がそれぞれの業務において,今現在発生している(もしくは近い将来発生しそうな)損失・ロスを極力最小限に留めたり,未然に防いだりするために,その人に必要な形で作業状態を可視化(暗黙知の形式化)する製造情報利用環境が必要なのである。こ

の製造情報利用環境は,ユーザが既に構築し運用している複数のシステムやデータベースにアクセスして実現する必要があり,散在する情報を集約したビューで操作監視するといった視点から,製造向けの情報ポータルとすることができる。今回,“製造情報ポータル”,“ビジネスダッシュボードコンセプト”,“アプリケーション間連携”を実現する製造業向けの情報インフラ・プラットフォームの提供を目的とした情報ポータル“Manufacturing Information Briefing”(以下「MI Briefing」と略す)を開発したので,ここに報告する。

## 2. 設計思想

MI Briefingでは,独自のフレームワーク上で生産に関連する複数のデータベースやシステムとの関係が標準的に行えるような部品を用意し,既存のシステムを有効的に生かしつつ,フレームワーク

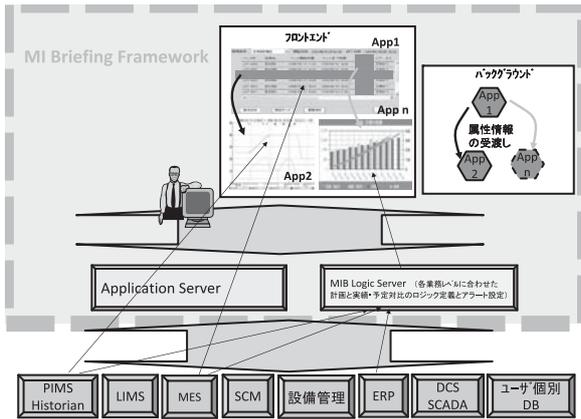


図1 MI Briefingの概念

上で統合する仕組みを提供することを設計思想としている。PIMS (Plant Information Management System) で管理される連続履歴データやMES (Manufacturing Execution System) 情報などをMI Briefingのフレームワークと通信できるようにするため、アプリケーションサーバと呼ばれるコネクタを導入することにより、一つのビュー (フロントエンドの画面上) でこれらのデータや情報を表示できるようにする (ビジネスダッシュボードコンセプト)。

また、フロントエンドの画面上で属性情報の受け渡しを行う仕組みを実現し、各アプリケーションが自律的に互いの属性情報にアクセスしあうことにより、他のアプリケーション情報へ能動的にアクセスできるようにする。この結果、アプリケーションは他のアプリケーションが管理するデータも含め、各種データベースやシステムから取得した情報を有機的に結合し、総合的な情報を表示できるようにする。

これらの仕組みにより、操業状態の可視化を加速し、生産情報の解析や新たな気づきを支援する。

以降、MI Briefingの特徴を詳しく説明していく。

### 3. システム構成およびソフトウェア構成

MI Briefingは、Microsoftの.NET Frameworkアーキテクチャを採用して開発した。サーバ/クライアント間の通信プロトコルはHTTPを使用しており、サーバサイドのインターフェイスはWebサービステクノロジーを使用している。これにより、サーバ/クライアント間はイントラネットのみならず、ファイアウォール越えのインターネット環境でも操作監視が可能な仕組みとなっている。

以下にMI Briefingを構成する機器およびソフトウェアについて説明する。

#### ①管理サーバ

MI Briefing専用のサーバ

以下の情報をデータベースで管理する。

- ・操作監視する画面構成情報
- ・ユーザ情報
- ・接続先のアプリケーションサーバ情報
- ・各種パーツコンポーネント情報

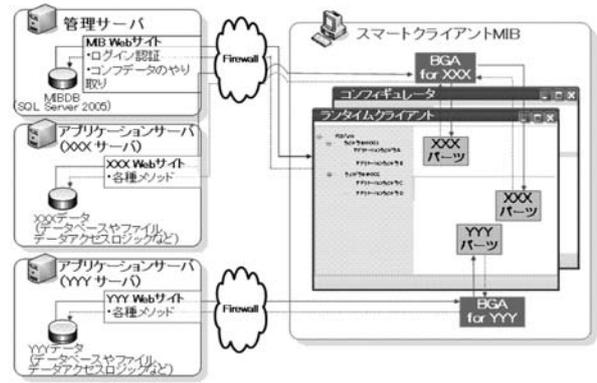


図2 ソフトウェア構成図

#### ②スマートクライアントMIB (MI Briefing)

コンフィギュレータ、ランタイムクライアントなどのクライアントアプリケーションの総称。アプリケーションごとにパーツ/BGA (Back Ground Application) のコンポーネントを用意し、クライアントアプリケーションに組み込んで動作する。

##### (1)コンフィギュレータ

監視操作する画面を作成するアプリケーションである。

##### (2)ランタイムクライアント

コンフィギュレータで作成した画面構成情報を元に、各種アプリケーションサーバから取得したデータをグラフィカルに表示し、監視操作するためのアプリケーションである。

##### (3) パーツ/BGA

各種アプリケーションで管理されているデータをグラフィカルに表示するためのコンポーネントをパーツと呼ぶ。また、パーツがアプリケーションサーバからデータを取得するためのデータアクセスコンポーネントをBGAと呼ぶ。

BGAがアプリケーションサーバへのアクセスを一括して実施し、パーツにデータを転送することでWeb画面では実現不可能だったデータの効率的な収集や高度な部品間連携機能を実現することができる。

#### ③アプリケーションサーバ

各種アプリケーションが保持する様々なデータをスマートクライアントMIBからアクセスするためのコネクタである。

各パーツはBGAを経由して対応するアプリケーションサーバと直接データをやり取りする (図2参照)。この仕組みにより、システム構成としては個々のアプリケーションが疎の関係で存在し、あるアプリケーション機能のメンテナンス中にも他のアプリケーションに影響を与えず監視操作が可能となる。

一方、スマートクライアントMIB上での各種パーツ間においては、クライアント上で独自にデータ連携機能を実現し、アプリケーションデータ間の関係を密にすることでユーザを支援している。

つまり、システム的には疎の関係でシステム構築を容易にし、データの扱いに関しては密の関係でデータ間の隠れた関係を見つけやすくしている。

## 4. MI Briefingの特徴

### 4.1 直感的な画面操作

画面体系として左右に分割された画面構造を持ち、左サイドでは画面階層(メニュー階層)を表示し、右サイドではメニュー階層で選択された画面の内容を表示するファイルエクスプローラスタイルの表示方式を採用している。

右サイドでは複数の分割画面(アプリケーションウインドウ)が表示可能であり、各々の分割画面では異なるアプリケーションを起動できる。

画面操作はマウスを使用し、クリック、ダブルクリック、ドラッグ&ドロップ操作で基本操作ができる。

左サイドのメニューで項目をクリックすると、その内容が右サイドに表示されるが、メニューから項目をドラッグして右サイドの表示領域にドロップすることで、分割画面中の任意の位置に画面を表示させるといったことも可能であり、直観的で自然な操作方法に統一されている。

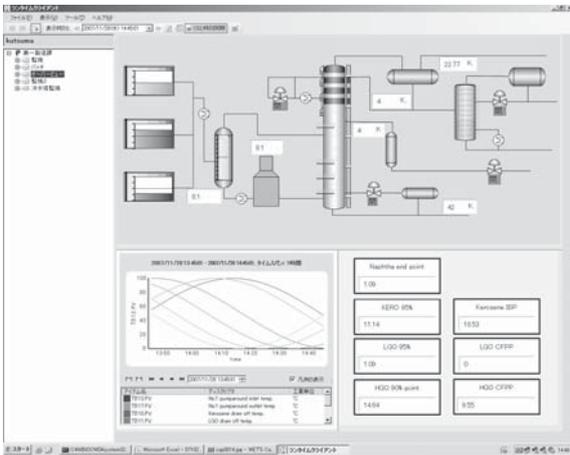
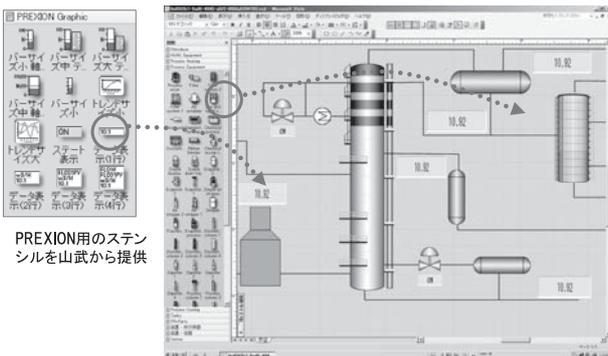


図3 画面体系

### 4.2 グラフィック画面の作成環境

製造データや生産情報、品質データなど製造に関わる情報に関し、ユーザが必要とする情報を表示するための画面構成をユーザ自身で容易に構築できるグラフィック作成環境を開発した(情報の見える化)。画面のレイアウトや描画はMicrosoft Visioを使用し、Visual Basicやスクリプトなどの特別な知識を必要とせずに画面作成できる。また、プロジェクト(画面群)をサーバで



PREXION用のステンシルを山武から提供

図4 グラフィック画面の作成例

管理し、複数ユーザで画面情報を共用できる。

例えば、あるユーザが作成したプロジェクトを複数ユーザに登録し、どのユーザも監視操作に同一プロジェクトを使用することができる。また、あるユーザが作成したいくつかの画面を再利用し、自ユーザ用の別のプロジェクトを簡単に作成することができる。

加えて、MI Briefingのユーザ管理機能に含まれるプロジェクト編集フラグの設定やユーザレベルの設定により、複数ユーザで画面を編集する場合の画面編集権限の制御ができ、また同一プロジェクトにおいても、監視操作時にユーザレベルに応じて画面展開の可否を制御できる。

### 4.3 アプリケーション間の柔軟なデータ連携

ランタイムクライアントは、パーツ間でのドラッグ&ドロップ操作による柔軟なデータ連携機能を持つ。例えばロットをキーに計画、実績、レシピ、トレンド、検査、点検、引き継ぎ、警報、オペレータ操作、指図まで一連の情報を手繰り寄せることができる。

図5にデータ連携操作の一例を示す。ロット実績リストから実績項目をトレンド上にドラッグ&ドロップすることで該当パッチ製造時のトレンドを表示したり、実績項目をグラフィック画面上にドラッグ&ドロップすることでロット開始時や終了時の製造情報を確認することができ、合わせて、これらグラフィックやトレンドの時刻に連動したアラームとイベントジャーナルを表示することができる。

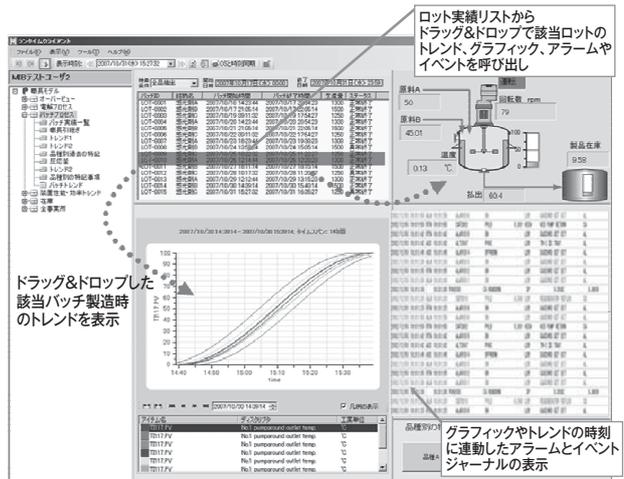


図5 ドラッグ&ドロップによるデータ連携操作

加えて、データ連携機能では以下の特徴を持つ。

- ・同一パーツでもドラッグを開始する位置により連携するデータを変化させることができる
- ・パーツへのドロップ時にコンテキストメニューをユーザが選択することにより、連携時の振る舞いを状況に応じて制御できる
- ・パーツを配置している土台(ウインドウ)上にドロップすることにより、複数パーツと同時にデータ連携することができる

このように、パーツ間でのドラッグ&ドロップといった直感的な操作により暗黙知の形式化を支援し、ユーザが思考に集中できる環境を提供する。

### 4.4 時刻連携機能

シングルウインドウ上の画面をタイル状に自由に分割し、それぞれの画面において独立して表示時刻を管理できる仕組みを持つ。

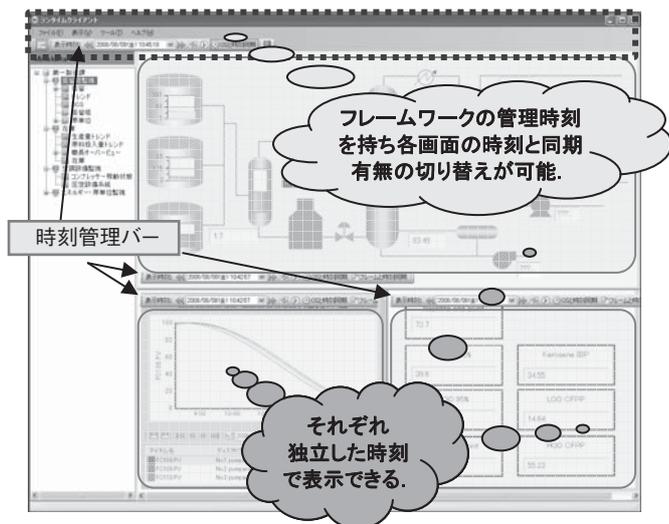


図6 時刻管理範囲の概念図

また、フレームワーク(ランタイムクライアントアプリケーション本体)も時刻を独立して管理する仕組みを持ち、それぞれの画面は個別にフレームワーク時刻との同期有無を切り替えることができる。例えば、各画面に同一監視情報を表示させ、異なる表示時刻を設定することで過去の生産情報との比較が容易にできるため、ゴールデンバッチと任意のバッチの操業情報の比較などへの利用が可能である。

#### 4.5 リプレイ機能

ランタイムクライアントは過去のプロセスの挙動を把握し、問題点などを可視化することを目的としたリプレイ機能を持つ。

リプレイ機能は、過去にさかのぼってビデオのように再生ができる機能であり、加速再生も可能である。リプレイ機能は、同時に関係者間で共有できる仕組みを持っているので、状況の早期確認、障害発生時の要因分析などが短時間でできる。

#### 4.6 アプリケーション・プラグイン

既存システムとの融合などで対応するアプリケーションを増やす場合、既存システムやMI Briefingのフレームワーク(コンフィギュレータやランタイムクライアント)を変更する必要はなく、コンポーネントを追加するのみで完了する。

追加コンポーネントの開発は、提供されるベースコンポーネント(基底コンポーネント)を継承する形式で行い、開発者は開発指針を理解しやすく、また最小のコードで開発できる。

### 5. 既存システムとの融合

MI Briefingを導入する場合、既存のユーザーシステムとMI Briefingを融合する方法として以下の二つの仕組みで対応することが可能である。

#### 5.1 既存Web画面の統合

MI Briefingから既存システムのWeb画面を呼び出すことが可能である。これは、MI Briefingで標準に用意されているWeb表示用のパーツやURLを指定してブラウザを起動するためのパーツを使用する。複数のWeb画面を並べて一つの画面に統

合し、情報の一元管理ができる。この形態の場合、画面の連携は可能であるが、データ連携はできないため、MI Briefingとは疎結合となる。

#### 5.2 アプリケーションコンポーネント開発キット

既存のユーザーシステムからのデータを取得し、MI Briefingのアプリケーションコンポーネントとしてデータを表示可能とするために、SDK(Software Development Kit)を提供する。SDKには、標準コンポーネントのクラスライブラリ(基底となるコンポーネント)、開発ガイド、テンプレートプログラム、テストツール/テストベンチなどが含まれ、ソフトウェア認証システムによりMI Briefingに準拠したかをチェックする仕組みを用意する。SDKを使用しアプリケーション固有の最低限の仕組みを実装することでMI Briefingに準拠したアプリケーションコンポーネントが容易に作成できる。

この形態では、MI Briefingとの密結合が可能であり、MI Briefingが提供するすべての機能を利用できる。

### 6. MI Briefingの開発技術

#### 6.1 ディスプレイビルダの開発

グラフィック画面の作成機能として、ディスプレイビルダを開発した。ディスプレイビルダはコンフィギュレータの一部として機能し、画面の背景やアプリケーションのレイアウトを設定する。アプリケーションごとのプロパティ情報の設定はコンフィギュレータで行う。ディスプレイビルダのアーキテクチャは、Microsoft VisioおよびMicrosoft Visioのラッパーで実現しており、コンフィギュレータとディスプレイビルダはシームレスに動作する。

また、シームレスな編集作業を実現するために、MI Briefing専用のステンシル(Visio画面部品)を作成した。各ステンシルには、アプリケーションオブジェクトと紐づく共通な内部プロパティ(カスタムプロパティ)を用意した。プロパティ情報としては、アプリケーションオブジェクトのクラス名や最小サイズ、GUID(識別ID)などを含む。

#### 6.2 アプリケーション間連携を行うためのデータ構造

アプリケーション間でデータを連携するために、画面を表示するプログラムや送り手/受け手プログラムなどがそのデータ構造を意識せず、プログラムごとの仕様に応じて必要な箇所のみデータを設定/解読し表示できるためのデータ構造をシステムで定めた。そのためのメカニズムとして、メタ言語であるXML(eXtensible Markup Language)を用いた。

メタ言語とは基本構造のみが規定されたものであり、その範囲内で構造を自由に決めることができる。その中でもXMLは従来のCSVファイル等とは異なり、データそのものにデータの意味とその関連性を表すタグが同時に記述されている。つまり、データがそれ自体の意味を表現する自己記述型であることが特長であり、データの内容を参照すれば必要なデータを探しだして取得することが可能である。

XMLのこの特長を生かし、プラグインにより新規アプリケーションを追加した場合も従来機能との連携を可能にしている。

共通タグ名には、時刻、ポイント名、エリア名、設備名、装置名、銘柄名、工程名、ロットID、アイテムIDなどが考えられる。

データ連携時のイメージを以下に示す。

同一画面内に3分割されたアプリケーション・ウインドウで動作する別々のアプリケーション(系統図画面上に追加された蒸留塔の設備監視パーツ、エネルギー使用量を表示できるトレンド画面パーツと保全コスト情報を管理する保全コスト管理パーツが存在しているものとする。



図7 データ連携のデータ構造および仕組み

#### <データ連携:1>

系統図画面の中の蒸留塔の設備監視パーツが持っているデータは、パーツがプロパティとして所有するエリア名、装置名、複数の監視ポイントであり、メタ言語で記述すると以下のようになる。

```

--- メタ言語定義 1 ---
<設備名>
<エリア名> A </エリア名>
<装置名> 蒸留塔 A102 </装置名>
<監視ポイント>
  <ポイント名> A102-FLOW.PV </ポイント名>
  <ポイント名> A102-TEMP1.PV </ポイント名>
  <ポイント名> A102-LEVEL.PV </ポイント名>
  <ポイント名> A102-TEMP2.PV </ポイント名>
</監視ポイント>
</設備名>
        
```

また、エネルギー使用量を表示できるトレンド画面パーツが処理できるデータはメタ言語で定義すると以下のようになる。

```

--- メタ言語定義 2 ---
<エネルギー使用量トレンド>
  <表示ペン>
    <ペン番号/>
    <ポイント名/>
    <ペン色/>
    <上限値/>
    <下限値/>
    <工業単位/>
  </表示ペン>
</エネルギー使用量トレンド>
        
```

この例の場合、系統図画面の蒸留塔の設備監視パーツをマウスで選択し、マウスをドラッグした状態でエネルギー使用量を表示できるトレンド画面パーツにドロップした場合、メタ言語定義1で定義された情報がデータセットとして受け渡される。

トレンド画面パーツはこのデータセットの中で、メタ言語定義2で定義された<ポイント名>を共通タグ定義として理解できるため、トレンドは4つのポイント名をトレンドの表示ペン1から4に自動的に割り付け、現在時刻でのトレンドを表示する。

設備監視パーツから渡されたデータセットのうち、ポイント名以外はトレンド画面パーツでは定義されていないタグであるので、処理には関係しない。

#### <データ連携:2>

別の保全コスト管理パーツでは、保全コスト情報として、装置の保全コスト履歴をプロパティとして定義している。このパーツで処理できるデータはメタ言語で定義すると以下のようになる。

```

--- メタ言語定義 3 ---
<保全情報>
  <設備名>
    <エリア名/>
    <装置名/>
    <保全コスト履歴>
      <メンテナンスコスト/>
      <日次生産量/>
      <月次生産量/>
      <原料使用量/>
    </保全コスト履歴>
  </設備名>
</保全情報>
        
```

この例の場合、系統図画面の蒸留塔の設備監視パーツをマウスで選択し、マウスをドラッグした状態で保全コスト管理パーツにドロップした場合、メタ言語定義1で定義された情報がデータとして受け渡される。

保全コスト管理パーツはこの情報の中で、メタ言語定義3で定義された<エリア名>や<装置名>を共通タグ定義として理解できるため、保全コスト管理パーツはエリア:A、装置名:蒸留塔A102の現在時刻までの保全履歴を表示する。

### 6.3 ドロップ時のフィードバックデータロジック

データ連携の基本動作は,ドラッグ元アプリケーション(送信元)で連携するデータを作成し,ドロップ先アプリケーション(送信先)で連携データを解読し振る舞いを行う。これに加え,ドロップ後にドロップ先アプリケーションでフィードバックデータを作成し,ドラッグ元アプリケーションでフィードバックデータを解読し振る舞いを行う仕組みを実現した。

この機能をアプリケーションのデータ連携機能に実装することで,より高度で柔軟なデータ連携機能が実現できる。

データ間の相関性を,より多角的に検討することが可能になり,様々なデータや情報に隠れた「知」を見える化することで,熟練者の暗黙知を業務として定型化することも可能である。

### 6.4 時刻制御のための仕組み

時刻制御のための内部オブジェクトとして,時刻管理オブジェクトがある。時刻管理オブジェクトは,フレームワーク全体を管理する「フレームワーク管理時刻」オブジェクトと,分割された画面ごとに存在する「画面管理時刻」オブジェクトの2種類がある。また,時刻管理オブジェクトを制御するためのユーザインターフェイスとして,時刻管理バーがそれぞれ存在する。

これら仕組みを利用し,分割された画面ごとに異なる時刻のデータを表示したり,フレームワーク管理時刻と同期させてデータを表示したりすることで,操業データの可視化を強力に支援する。

## 7. おわりに

今回は,製造業向けの情報インフラ・プラットフォームの提供を目的とした情報ポータルMI Briefingのフレームワークについて解説した。

今後は,既存のユーザシステムを含め,サードパーティシステムやデータベースに対応したアプリケーションを増やし,MI Briefingとの融合を進め,暗黙知を引き出し,形式化が図れる環境を充実させることによって,ユーザを支援していきたい。

### 商標

Microsoft Visioは,米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。

Visual Basicは,米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。

Manufacturing Information Briefingは,株式会社 山武の登録商標です。

PREXIONは,株式会社 山武の登録商標です。

### 著者所属

水上 正	アドバンスオートメーションカンパニー ソリューション開発部
村手 恒夫	アドバンスオートメーションカンパニー ソリューション開発部
菅野 伸明	アドバンスオートメーションカンパニー ソリューション開発部
渡邊 桂	アドバンスオートメーションカンパニー ソリューション開発部

# 硬脆性材の機械加工の実現と専用加工機の開発

## Development of a machining process for hard, brittle material and a special processing machine

株式会社 山武

關 宏治

Koji Seki

株式会社 山武

福辺 卓史

Takashi Fukunabe

### キーワード

硬脆性材, シリコン, 超音波加工, 機械加工, 圧力センサ, 生産技術開発

近年, 計測機器や制御機器を取り巻く環境は, 市場のグローバル化や世界規模での生産拠点の変化にともない厳しさを増し, これまで以上に高いコスト競争力と差別化技術が必要不可欠な状況となった。

本稿では硬脆性材の機械加工は, こうした環境を背景に, 製品を構成する最も重要な部品の一つであるシリコンチューブを従来技術の常識に囚われることなく, 新たな工法での開発に挑戦した。その結果コスト課題の解決と品質向上を達成することができたので報告する。

The environment surrounding the market measurement and control equipment has become increasingly challenging, following the internationalization of both the market and the production base in recent years. Products need to be competitively priced and possess a technological edge over competing offerings. Seeking to satisfy these demands, we took part in the development of the silicon tube—one of the key components of the products—using new technology that dispensed with conventional wisdom.

This paper summarizes the new technology, which has enabled significant reductions in cost and improvements in quality.

## 1. はじめに

硬脆性材と呼ばれる石英ガラス, シリコン, フェライトなどでは, アスペクト比の大きな形状の部品加工には, 超音波加工が適用されることが, これまでの常識であり, 機械加工での生産は考えられなかった。特に今回報告するシリコンチューブは, 円柱形状の端面にある鏡面部に $\phi 1.3\text{mm}$ という小径の深穴貫通加工をチップングやマイクロクラックといった欠けの発生を極力抑制した品質が求められるため, 機械加工での量産適用は更に困難とされてきた。

しかしながら, 超音波加工は確かに小径の深穴加工を可能としたが, 加工ツールの交換やメンテナンスに手間がかかり連続加工には不向きであった。更に外形寸法精度も不安定であり, 外周・内周部にチップングやマイクロクラックが多く発生するといった品質課題も解決できなかった。品質, コストの両者が求められる量産工法としては, とても満足できるものではなかった。そこで, 筆者らは従来技術の常識に囚われることなくコスト, 品質の両者を達成する量産工法として機械加工による工法開発に挑戦した。

硬脆性材の機械加工による工法開発では, 機械設備開発だけではなく, シリコン素材の前処理方法の確立, 工具の開発, 加工条件の確立, さらにはシリコンチューブ設計の見直しまで, 総合的な検討と課題解決が必要とされた。

本稿では従来の超音波加工と機械加工の本質的な違いを説明するとともに, 工法開発から量産技術構築まで一貫して行った生産技術開発によってコスト課題の解決と品質向上を達成した専用加工機の開発についても報告する。

## 2. シリコンチューブ

### 2.1 シリコンチューブの内容および特徴

シリコンチューブとは当社製品である差圧/圧力発信器に内蔵される圧力センサパッケージを構成する重要部品の一つである。(図1.図2)

外径 $\phi 3.2\text{mm}$ , 内径 $\phi 1.3\text{mm}$ , 全長 $7\text{mm}$ のチューブ形状で, 片方の端面には鏡面を有している。圧力センサパッケージの構成を簡単に説明すると, 筐体となる金属で製作された金属ヘッダー, 圧力を感知するピエゾ式圧力センサチップ, 圧力センサを

保持し電気的絶縁を確保するガラス台座,そしてシリコンチューブからなる。シリコンチューブは鏡面側を,ガラス台座を介し圧力センサチップと接合された後,金属ヘッダーに接合される。



図1 DSTJ™3000 Ace

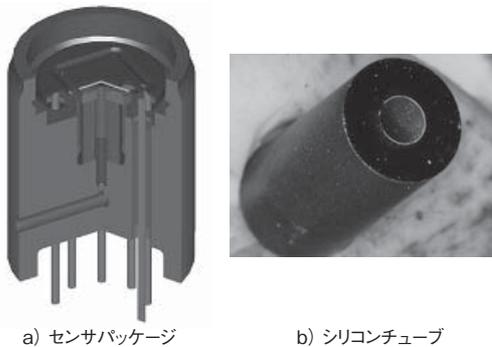


図2 圧力センサパッケージの構成

シリコンチューブの機能は,金属ヘッダーとセンサチップの熱膨張率の違いによる熱ひずみを吸収することと,発信器の受圧部に加わった圧力を,圧力センサチップに伝達させることである。

発信器として使用された場合,シリコンチューブには内面と外面に最大42MPaの圧力差が生じる環境で使用される。このため圧力センサチップを保持するガラス台座との接合には高い信頼性が求められる。シリコンチューブの外周,内周部のチップングやマイクロクラックは接合強度の低下を発生させる原因となるため,これを極力抑制できる量産工法が要求される部品である。

## 2.2 シリコンチューブに求められる仕様

シリコンチューブに求められる機能の一つは,前述のように,圧力センサチップと金属ヘッダーとをガラス台座を介して機密性をもって締結し,圧力を伝達することにある。この機能を達成するためにシリコンチューブに要求される主な仕様は次の4つが挙げられる。

- (1) ヘッダーと圧力センサチップの熱膨張率の差を緩和できる十分な長さがあること
- (2) 外周,内周部のチップングやマイクロクラックがないこと
- (3) 鏡面端面をもち,鏡面部に切粉等の異物が付着していないこと
- (4) 制限されたスペース内に設置できる適正な寸法精度と幾何公差精度をもつこと

## 3. 超音波加工

### 3.1 超音波加工の仕組み

超音波加工とはJIS B 0106では以下のように定義されている。

“超音波振動をする工具と砥粒とを使用して工作物を加工する方法”

超音波加工の具体的な方法を説明する。シリコンカーバイト,ボロンカーバイトなどの砥粒と水とを懸濁液状で超音波振動する工具と被削材との間に注ぎ込みながら,適当な加圧力で工具を押し付ける。工具と被削材の間に入った砥粒粒子は,振動周波数としては15~40kHz,振幅5~40 $\mu$ m程度で超音波振動する工具先端から,大きな衝撃を与えられ,その衝撃力で被削材を少しずつ砕いて加工を行うものである。

超音波加工の特徴としては,石英ガラス,シリコン,フェライト,カーボン,グラファイト,アルミナ等の硬くて脆い,いわゆる硬脆性材料の穴あけ加工,切断加工に適していると言われている。

1回の衝撃で破砕される量はごくわずかだが,前記のように1秒間に15,000~40,000回と繰り返回数が多いので,実用的に使用可能な速さで加工ができ,特にアスペクト比の高いシリコンチューブのような形状の部品は,超音波加工により製造されることが常識とされてきた。

### 3.2 超音波加工の問題点

超音波加工のシリコンチューブ加工への適用にはいくつかの技術的な問題点があった。代表的なものとして次の3つが挙げられる。

#### (1) 連続加工,大量生産に適さない工法

超音波加工では硬質の砥粒を激しく振動させることで,被削体を砕くため,同時に工具の磨耗も当然激しいものとなる。このためシリコンチューブのようなアスペクト比の大きな形状のもので,一つの材料から多数個削りださなければならない量産加工では,工具の磨耗による交換やドレッシングが必要になってしまう。このためすべての工程を完了させるまでに何度も設備を止めなくてはならず,加工のリードタイムが非常に長いものになってしまう。

#### (2) 外周・内周部のチップングやマイクロクラックの発生

前述のようにシリコンチューブでは一端面に鏡面をもち,この面をセンサ台座と接合する。このため,通常の超音波加工では許容される程度の外周部や内周部のチップングやマイクロクラックであっても,接合強度を低下させる致命的な原因になってしまうので,とても許容できない。超音波加工によるシリコンチューブを製品に適用するためには,こうしたチップングやマイクロクラックを厳しく選別する必要があり,結果として加工歩留まりが低いものになってしまう。当然製造コストにも影響を及ぼす。

#### (3) 環境負荷

超音波加工では砥粒を使用して加工をするため,毎加工ごとに廃棄物として切粉だけではなく,大量の研磨剤も排出される。これはコスト的な不利益ばかりではなく,作業環境の悪化や廃棄処理の困難さといった環境負荷が大きい。

これら超音波加工の技術的な問題点と厳しい要求コスト,さら

には高い品質の維持,すべてを兼ね備えた工法として,筆者らは機械加工による工法開発に挑戦することを決定した。

## 4. 機械加工による工法開発

### 4.1 工法開発

工法開発の設備として,チッピング,マイクロクラックの防止を念頭に,脆性材加工に適するとされる高速回転の精密スピンドルをもつ加工機をベースマシンとして採用し,脆性加工に対応させるためにいくつかの改造を施し,導入した。(図3)



図3 工法開発用設備

次に被削材としてのシリコン構造について説明する。(図4)

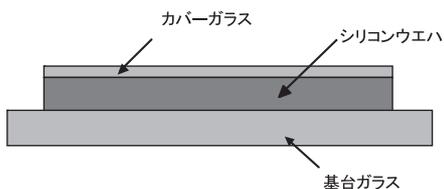


図4 シリコンウエハ加工前構造

一端面をラッピング処理して鏡面をもたせた円形のシリコンウエハを被削材として使用した。鏡面側を上面に配置し,下面を基台ガラスと接着により固定し,基台ガラスを機械的に加工機に固定して機械加工を行う。

鏡面をもつ上面にはカバーガラスを同様に接着している。これは加工時の鏡面部の保護と,チッピング,マイクロクラックの発生抑制が目的であるが,シリコンウエハとガラスでは熱膨張率に差があるため,ガラスには残留応力が発生している。このため硬脆性材ゆえに加工時のわずかな温度変化が,シリコンチューブの鏡面表面にマイクロクラックを発生させる原因となってしまう。接着方法の確立はもちろんのこと,加工機を取り巻く温度管理が工法開発の前提となる。

工法開発で最も困難であったのが,加工ツールの開発である。特に外径を加工するツールは,汎用ツールなどないため専用工具として開発しなければならなかった。

ツールの形状,電着するダイヤモンド砥粒の粒径や密度,さらに加工条件など制御因子とその水準が多く,最適条件を見出すことは容易ではなかった。そこで加工時に発生する加工ツールのスラスト力を特性値として,加工条件を定量的に評価することにより,これを解決することができた。具体的には実験計画法

を用いて,各制御因子の適正値を絞り込んでいった。(表1)

表1 制御因子の割付例

	制御因子	ツール	ダイヤモンド	ダイヤモンド	主轴の回転数	送り速度
		形状	密度	粒径		
水準	水準1	形状A	密	大	高速回転	高速
	水準2	形状B	疎	中	中速回転	中速
	水準3	形状C	—	小	低速回転	低速

このときのデータを図5に示す。右のデータが最適条件でのスラスト力を示している。

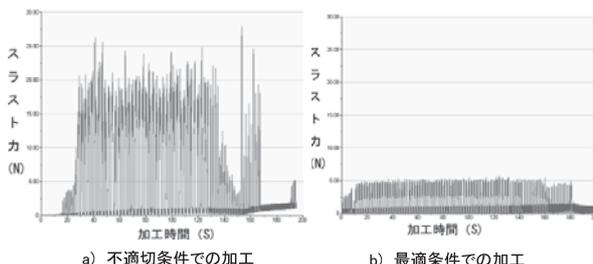


図5 スラスト力の比較

### 4.2 形状の工夫

鏡面状態の確保は,加工工程の施策だけではなく,形状設計まで工夫を施すことで実現することができた。チッピングは特に曲率の小さい内径のエッジ部に多く発生することが分かった。そこで内径円周部にわずかにドラフトを設け,応力の集中する部分であるエッジの角度を鈍らせることで,これを防止することができた。これをシリコンチューブの設計にフィードバックすることにより加工時のチッピングが軽減されるばかりではなく,運搬や加工後の洗浄工程で発生する二次的なチッピングやマイクロクラックも抑制され,鏡面品質を飛躍的に向上させることができた。

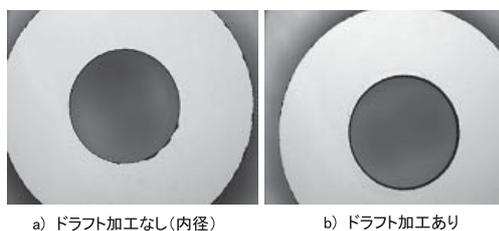


図6 鏡面部分の比較

### 4.3 評価

シリコンチューブの機械加工による工法開発によって,寸法精度としては,外径は $\phi 3.2 \pm 0.05$ ,内径 $\phi 1.3 \pm 0.05$ ,幾何公差として鏡面と外径の垂直度 $1/100\text{mm}$ ,両端面の平行度 $1/10,000\text{mm}$ の仕様を実現することができた。耐圧性能は製品にかかる最大圧力 $42\text{MPa}$ を十分満足する耐圧試験に合格した。鏡面部は要求される表面粗度を満たすと同時にチッピング,マイクロクラックのない良好な状態を確保している。

また市販のマシニングセンターをベースマシンに使用した機械加工により、超音波加工では実現できなかった目標コストでの生産が可能となった。

## 5. シリコン専用加工機の開発

機械加工によるシリコンチューブの工法開発において、筆者らが最も注力した開発活動の一つが、工法開発後の量産への移行期間、いわゆるパイロット生産である。パイロット生産は本格的な量産活動を前に、その準備期間と扱われてしまうことがあるが、これは正しくない。シリコンチューブの機械加工のように、これまでに経験のない新しい工法による生産では、数を作ることで始めて確認できる様々な不具合や技術課題が発生する。その中にはこれまでの生産技術力だけでは対応できない新たな技術課題の要素が含まれることが多いのである。

逆に言えば、このパイロット生産こそが工法技術を量産技術に昇華させる重要なプロセスであり、量産ノウハウを習得できる期間なのである。

実際にパイロット生産移行後、生産数量の増加にとまぬ設備増設が必要になった際も、すでに開発した工法に加え、パイロット生産で構築した量産ノウハウを備えたシリコン専用加工機を開発することができた。その量産ノウハウの一例として切粉対策について説明する。

パイロット生産期間中で最も苦慮したのが、ベースマシンの切粉対策であった。シリコンの機械加工では切粉がサブ $\mu\text{m}$ オーダーまで微粉化する現象がみられる。これは機械加工時に切削液にキャビテーションが発生することで切粉が粉碎され微粉化するとされている。この微粉化した切粉が機械の摺動部に入ること、大きな問題を引き起こしたのである。

通常のマシニングセンターは摺動部にある程度の切削液が付着することを前提で設計されている。しかしシリコンの切粉は硬度の高い砥粒と同じであり、摺動部に入り込んで金属表面を繰り返して研磨することで、ついには摺動部を故障させてしまった。

こうしたパイロット生産での技術課題に直面できたことで、シリコン専用加工機の開発では、設計段階から徹底した切粉対策を施し、設備の耐久性、安定性を向上させる設計を行うことができた。反対にシリコンチューブの性能に寄与しない無駄な機能はすべて排除することができた。シリコン専用加工機の開発と導入により、これまで以上の高い品質を維持したシリコンチューブを、



図7 シリコン専用加工機

しかも安価かつ安定した供給が可能となった。図7に筆者らが開発したシリコン専用加工機を示す。

## 6. おわりに

ここまでシリコンチューブの機械加工による工法開発と、また専用加工機の開発の必要性について、技術的側面、コスト的な側面から説明してきた。

当社では、その上位概念として製品の性能を左右するような重要な部品や加工工程は自前で賅う、生産技術開発の精神がある。

では生産技術開発と従来の生産技術とでは何が違うのか。筆者らは生産技術開発を以下のように定義している。

- (1) 製品を設計するための生産技術であって、製品に獨創性、付加価値を与えるもの
- (2) 製品を安定して生産するための技術であって、新たな技術課題を創出し、それを成し遂げるもの

この生産技術開発の理念に基づく開発によって、シリコンチューブの機械加工による工法開発、量産技術開発は達成できたと考える。

今後もさらに生産技術開発で、お客様に満足いただける製品開発に貢献してまいりたいと考えております。

最後にこの場をお借りして、開発にご協力頂きました関係部署ならびに関係各位にお礼申し上げます。

### 参考文献

- (1) 小川 仁, 升田 雅博, 大山 啓, 鴻上 裕史: 『小径穴あけ加工における油剤のキャビテーション効果 (第1報), — 工作液超音波振動法に関する研究 —』 精密工学会誌, Vol.72, No.5, pp.626-630, 2006年

### 商標

DSTJ™3000 Aceは、株式会社 山武の登録商標です。

### 著者所属

關 宏治	生産技術開発部 工程技術グループ
福辺 卓史	生産技術開発部 試作技術グループ

# CAEとダイレクト金型によるプラスチック成形技術の開発

## Development of plastic molding technology with CAE and direct mold

株式会社 山武

福岡 崇介  
Takasuke Fukuoka

株式会社 山武

増本 新吾  
Shingo Masumoto

株式会社 山武

關 宏治  
Koji Seki

### キーワード

ダイレクト金型,CAE,データベース,プラスチック

プラスチック部品の開発期間短縮のため、筆者らは、ダイレクト金型による早期試作に取り組んでいる。開発を進めるにつれて、ダイレクト金型に特有な構造に起因する課題が、明確になってきた。これを解決するため、CAE(Computer Aided Engineering)による金型構造の事前検討、および解析結果と成形結果のデータベースの導入と活用を行った結果、課題解決とともに、これまで以上の開発工数の削減が可能となった。本稿ではこれらの取り組みの概要と成果、更に今後の展望について報告を行う。

To shorten the development period for plastic components, we have been studying early trial production with direct molds. As development proceeded, a problem arising from the unique structure of direct molds became apparent. To solve this problem, we first studied the mold structure using computer aided engineering (CAE), and introduced and used a database of analysis results and molding outcomes. Consequently, a solution to the problem was identified, and further cuts in development man-hours made. This paper summarizes these initiatives, presents the results, and considers future prospects.

## 1. はじめに

近年、市場のグローバル化に伴い、競合メーカーとの競争は激しさを増し、製品開発期間の短縮と、製品コストの大幅な削減が求められている。当社では、プラスチック部品の多くは外製しており、最近では特に、海外生産の活発化による現地調達が進められている。しかしこれに伴い、以下の問題が顕在化してきた。

- ①仕様を実現するための、外製先との情報のやりとりにより、開発期間が長くなる。
- ②海外生産で品質を維持するための、現地での成形技術や管理技術の指導に、多大な工数がかかる。
- ③成形の不具合情報や、金型、成形プロセスに関するノウハウは、特定の技術者に蓄積されているが、個々のノウハウの共有化は難しい。

このような状況を打開するため、筆者らはアルミなどの快削材

料を用い、部品数が少ない金型である、ダイレクト金型による、プラスチック部品の短納期試作に取り組んでいる。

開発を進めるにつれて、ダイレクト金型特有の構造に起因する、課題が明確になってきた。これを解決するために、射出成形のCAEによる、金型の事前検討、および解析結果と成形結果のデータベースの導入と活用を行った結果、課題解決とともに、これまで以上の開発工数の削減が可能となった。今回はこれらの取り組みの成果、更に今後の展望について報告を行う。

## 2. ダイレクト金型の活用

### 2.1 差別化への取り組み

ダイレクト金型とは、アルミなどの快削材料の入れ子を直彫りして製作し、入れ子の入れ替えにより別の金型として利用できることを特徴とした、部品数の少ない金型である(図1)。上記により、一般的な金型と比べ製作期間の短縮が可能となる。筆者らは、

ダイレクト金型の製作期間をこれまで以上に短縮するため、従来のダイレクト金型に、筆者ら独自の差別化を行っている。その内容を以下に示す。

#### (1)プラスチック部品の内製化

金型設計・製作から射出成形まで、社内で一貫して行うための設備を保有し、内製化に取り組んでいる。

#### (2)金型の標準化

2プレート金型用の共用のダイセットを使用している。更に固定側、可動側用の入れ子、エジェクタピンの仕様は標準化され、ダイセットに組み付けることにより、金型を製作している。

#### (3)製作工程の最適化

アンダーカット、押し切りやピン角などの形状に関しては、全体の製作期間の短縮を重視し、工程を最適化している。例えば、成形後に機械加工することにより、金型部品点数を削減している。

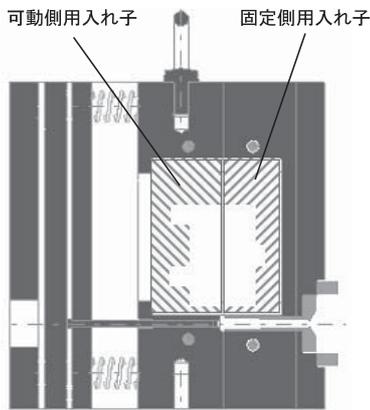


図1 ダイレクト金型の断面図例

## 2.2 ダイレクト金型の課題

差別化されたダイレクト金型の取り組みにより、最初の試射までの短納期化は可能となった。しかし、成形の不具合が発生することもあった。その原因を究明するために、蓄積したデータを整理・分類した結果、最初の試射で成功させるには、下記の項目の事前検討を十分に行う必要があることが分かってきた。

#### (1)ゲートの最適化

ダイレクト金型は2プレート金型に限定されるため、一般的な金型と比較し、ゲート位置とゲート形状に制約がある。これらの設計が不相当である場合、金型内部の圧力のばらつきが大きくなる。その結果、圧力が低い部分にはショートショットが発生し、圧力が高い部分にはバリが発生する。圧力のばらつきが最小となるように設計する必要がある。

#### (2)エアーベントの最適化

成形前の金型内部には空気が存在する。成形中に空気は金型内に閉じ込められる。しかし、ダイレクト金型は部品数が少ないため、一般的な金型に比べ閉じ込められた空気を排気することが困難である(この空気を以後残留エアと呼ぶ)。よって成形時に残留エアがプラスチックの充填の邪魔をするため、充填完了する前に固化し、ショートショットが発生する原因となる。また残留エアが圧縮され高温になり、接触しているプラスチックが変質しガス焼けが発生する場合もある。

残留エアによる成形不良を防ぐため、エアーベントにより残留エアを排気する必要がある。

## 3. CAEの活用

### 3.1 CAEの活用の利点

ダイレクト金型により射出成形で製作されるプラスチック部品は、溶融したプラスチックを金型に流し込み、冷却し固化させた後に、金型から取り出す工程を経て完成する。これらの現象は、CAEにより短時間で解析し、結果を可視化することができる。また、その結果を設計に反映させることにより、ダイレクト金型を作る前に、バーチャルで、成形の不具合の予測とその対策を行うことができる。

### 3.2 CAEによる金型構造の検討

ダイレクト金型の金型修正回数を低減するため、筆者らは、ダイレクト金型に特化した、CAEによる金型構造の事前検討を開始した。図2にCAE導入後のプラスチック部品製作の流れを示す。図に示すように、金型設計開始と同時にCAE検討を開始する。金型設計者はCAE担当者に、3次元データ、プラスチックの材質、またゲート位置の制約などの設計情報を提供する。CAE担当者はCAE検討を行い、金型設計者に解析結果や成形の問題箇所の指摘など、設計の判断材料を提供する。これらをもとに、金型設計者は設計の最適化を行う。これらの作業を何度か繰り返すことにより、成形性が優れた金型が設計できる。

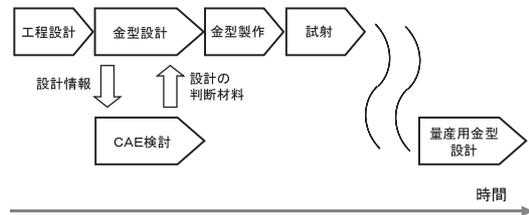


図2 CAE導入後のプラスチック部品製作の流れ

### 3.3 ダイレクト金型への適用事例

CAEによりダイレクト金型で製作するプラスチック部品(投光LEDホルダー)の設計を最適化した事例を紹介する。

#### (1)ゲートの最適化

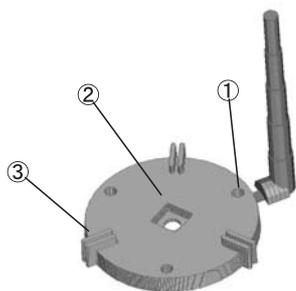
図3(a)は、投光LEDホルダーの外観である。図に示す①、②、③について、金型内部の圧力変化を解析した結果を図3(b)に示す。図より測定箇所の圧力のばらつきが非常に小さいことを確認した。したがって、今回設計したゲートにおいて、適正な成形条件で、ショートショットやバリが発生する可能性が低いことが分かった。

#### (2)エアーベントの最適化

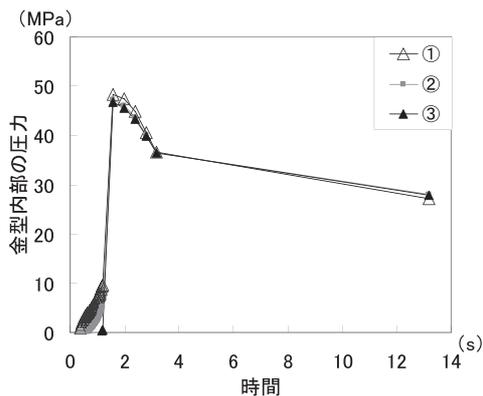
図4に充填時間の解析結果を示す。この結果より最終充填位置を確認し、エアーベントを配置した。図5に、ウェルド発生箇所の解析結果を示す。エジェクタピンとエジェクタピン用穴のすき間は、エアーベントと同様に残留エアの排気効果があるため、ウェルドラインが発生している場所にエジェクタピンを配置した。図6は投光LEDホルダー用に、実際に作成した入れ子である。

図7に、設計完了後にダイレクト金型を製作し、成形した完成品を示す。以上の取り組みにより、CAE検討を行う前と比較し、金型修正回数を平均1回以上削減させている。またCAEによる工数増加を考慮しても、全体としては20%の工数削減を実現させている。

なおCAE検討は、金型設計と同時進行させるため、金型設計のスケジュールの遅れは発生しない。また解析条件を成形条件の指標として利用することにより、条件出しの時間を短縮することができる。



(a) 投光LEDホルダー



(b) 金型内部の圧力と時間の関係

図3 金型内部の圧力変化の解析結果

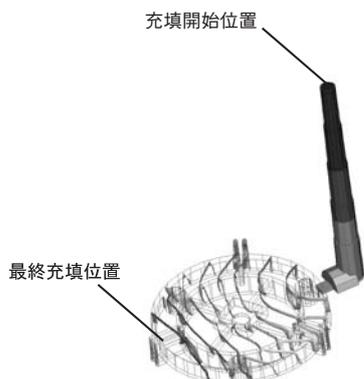


図4 充填時間の解析結果

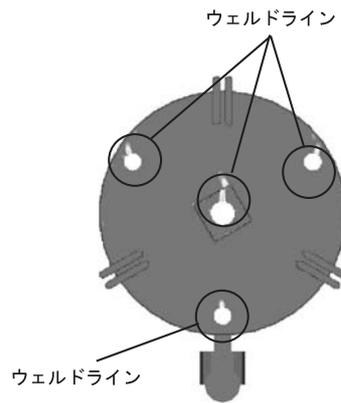


図5 ウェルドライン発生箇所の解析結果

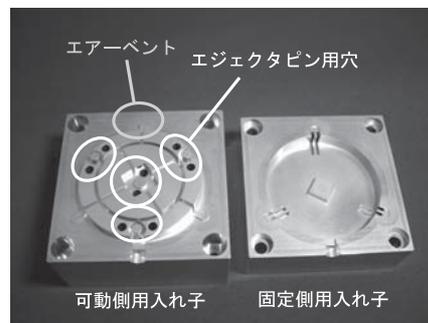


図6 投光LEDホルダー用の入れ子



図7 投光LEDホルダーの完成品

## 4. データベースの活用

### 4.1 CAEの課題

前記の事例により、CAEの効果は理解していただけたと考える。しかし、一般的な特徴として、解析結果と成形結果が異なる場合がある。その理由を以下に示す。

- ① CAEでは、計算時間を短縮するため、理論式を簡素化している。たとえば充填解析では流体力学より導き出した理論式を簡略化した式を用いる。そのため射出成形現象が正確に再現されていない。
- ② CAEでは、外部から受ける力は考慮していない。たとえば離型時に加わるエジェクタピンの突き出しによる力や、プラスチックの金型への食いつきにより加わる力は再現されていない。

### 4.2 データベースによるCAEの補完

前記の理由により、CAE結果をそのまま適用するのではなく、まず解析結果の信頼性を判断する必要がある。筆者らは、過去の解析結果および成形結果のデータを、形状、サイズ、プラスチックの種類などの項目で分類されたデータベースを構築し、解析結果と成形結果の差を小さくする取り組みを行っている。

図8にデータベースを利用した、プラスチック部品開発の流れを示す。新規製作品は、関連する項目を持つ過去のデータを検索し、それらとの照会による、信頼性の判断を行っている。もし解析結果と過去の成形結果に差がある場合、過去の成形結果により解析結果を補完した上で、判断を行う。

なおCAE検討時の解析結果、および成形結果は、随時データベースに登録する。より多くのデータから判断することにより、信頼性の高い判断が可能となる。これらの取り組みにより、CAEの信頼性を実用可能なレベルに高めることが可能となった。

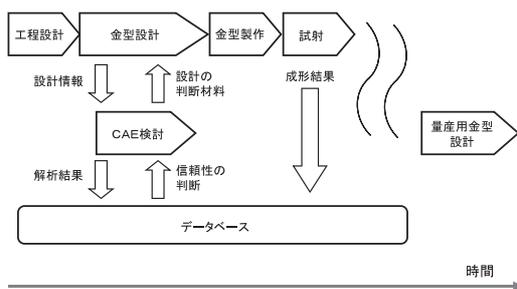


図8 データベース利用と部品製作の流れ

## 5. 今後の展開

図9に筆者らが考える、成形技術開発の将来像を示す。これまで以上にダイレクト金型、CAE、データベースの取り組みを進めることにより、土台となる成形の知識とノウハウを蓄積し、将来は以下の実現をめざす。

### (1) 製品設計期間の短縮

製品設計へ成形技術を提供することにより、プラスチック部品の成形性の検討がスムーズに完了する。

### (2) 試作レス成形の実現

成形の不具合を発生させない技術を保有することにより、試作を不要とする。またダイレクト金型の成形情報を利用することにより、量産準備期間を大幅に短縮する。

またこれらの実現により、製品開発サイクルの短縮が可能となる。

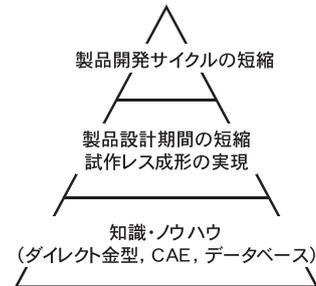


図9 成形技術開発の将来像

## 6. おわりに

当社には“モノづくり”機能であるマシンショップ、3D環境(CAD,CAM,CAE)、成形機等の開発設備をもとに工法開発を行う現場がある(図10)。今後も弊社の環境を活かした技術開発を行っていきたい。

開発にご協力いただきました関係部署、ならびに関係各位にお礼申し上げます。

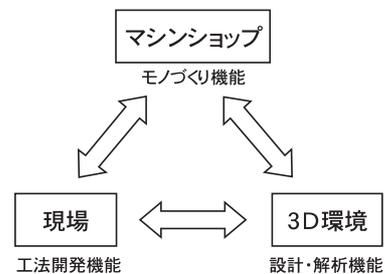


図10 当社の開発環境

## 参考文献

- (1) 東レエンジニアリング株式会社:3D Timon リファレンス マニュアル Extreme Suite 2007, (2007年10月 第1版発行)

## 著者所属

- |       |                     |
|-------|---------------------|
| 福岡 崇介 | 生産技術開発部<br>試作技術グループ |
| 増本 新吾 | 生産技術開発部<br>試作技術グループ |
| 關 宏治  | 生産技術開発部<br>工程技術グループ |

# Technical Review

---

azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2008年12月発行号

---

発行日 2008年12月1日(通巻50号)  
発行責任者 岡訓仁 株式会社 山武 経営企画部広報グループ  
編集委員会 委員長: 川井健司  
委員: 浜野裕之、串田洋司、米田雅之、吉永純一、柏屋弘、大谷秀雄、  
早川勲、北條達也、込堂雅幸、岡山喜彦、斉藤由紀雄、坪井淳一  
事務局: 石川孝志、加藤敦子、菅野裕子  
発行所 株式会社 山武 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

©2008 Yamatake 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
- 本誌に記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

azbilグループ 技術研究報告書  
azbilテクニカルレビュー

# azbil

株式会社 山武  
〒100-6419  
東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル  
URL <http://jp.azbil.com>



VOC(揮発性有機化合物)成分ゼロの環境にやさしい100%植物油型インキを使用しました。

PR-1106J(0812-6K-JBA)  
本誌からの無断転載・複製はご遠慮ください。  
記載内容は、お断りなく変更する場合がありますのでご了承ください。