

azbil

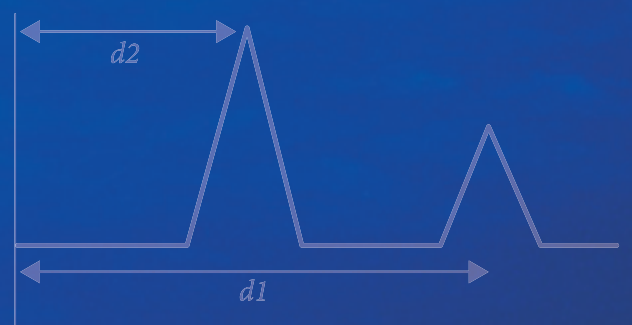
# Technical Review

2013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



$$d = \frac{ct}{2}$$



# Technical Review

2013年4月発行号

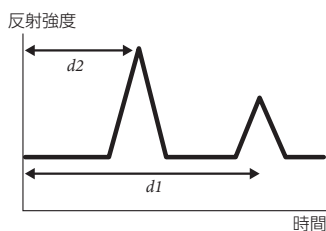
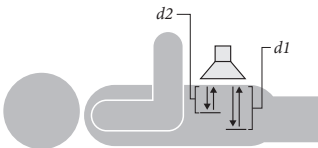
azbil グループ ー技術研究報告書ー  
azbil テクニカルレビュー

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。

## 表紙について



超音波画像



イルカが超音波を日常的に使っていることは誰もが知っていることですが、彼らは鼻先附近からクリック音と呼ばれるパルス状の超音波を出し、その反射音が戻ってくる時間と方向から物体を探知しています。医療における「超音波検査」は、このイルカの性質を応用した技術の一つ。妊娠中の検査に代表される「腹部超音波検査」、心臓、大血管のなどの検査を行う「心臓超音波検査」、頸部の甲状腺、頸動脈などを検査する「頸部超音波検査」などで利用されている。通称「エコー（やまびこ）」とも呼ばれるものです。そもそも超音波は、硬度が違うなど、対象の持つ音響特性により、反射の強弱が異なるという性質があります。超音波診断装置では、その性質を利用し、反射の強弱を輝度変換、つまり2次元にマッピング処理後、ディスプレイに投影し、患部や胎児の様子などを画像として表示します。また、このような方式は「パルス反射法」と呼ばれ、物体までの距離は以下の公式により求められます。

$$d (\text{距離}) = \frac{c (\text{音速}) \times t (\text{時間})}{2}$$

1930年頃から活発に研究されてきた超音波ですが、近年ではその応用技術がとくに医療業界で活躍しています。中でも「超音波検査」は、超音波を対象物に当ててその反響を映像化、その人の健康状態をチェックするもの。超音波は、液体・固体にはよく伝わり、気体は伝わりにくいという点があります。そのため、液状成分や軟体の描出に優れており、内臓系の画像化にはもっとも適していると言えます。

人体の外側から、患部に機械を当てるだけでその内情を画像化することのできる技術。その技術力の応用が、人々の健康を守っているのです。

# Contents

ご挨拶：「人を中心としたオートメーション」の探求	1
アズビル株式会社 代表取締役社長	曾瀬 寛純

人を中心としたオートメーションの技術開発 ～5つの戦略技術領域による顧客価値創造～	2
アズビル株式会社 執行役員常務 技術開発本部長	杉野 芳英

<b>融合</b> 人間の機能を融合した自動化技術の展開 光電センサ生産ライン自動化技術	6
アズビル株式会社 技術開発本部基幹技術開発部	原田 豊

<b>自在</b> 自動感度調整機能が付いた汎用光電センサの開発	12
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	鈴木 慎一郎 橋川 寿明

<b>自在 進化</b> エネルギー需要動向管理システムの開発	20
アズビル金門株式会社 開発部製品開発室	本山 健一 設楽 裕也

<b>自在 進化</b> インテリジェント地震緊急停止システムの開発	28
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	林 功 古川 洋之

<b>進化</b> バッチプロセス制御の新潮流反応温度精密制御のためのモデルベース B2B 制御の開発	34
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	小河 守正 佐々木 亨

<b>進化</b> デシカント空調機のシミュレータの構築	44
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 早稲田大学	大曲 康仁 伊藤 卓 山口 誠一 齋藤 潔

<b>進化</b> 建物空調用調節弁のキャビテーション診断技術の開発	54
アズビル株式会社 パルプ商品開発部	木下 良介 角田 真一

<b>進化 調和</b> 節電・省エネ用クラウドサービスの開発	60
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー アズビル株式会社 技術開発本部基幹技術開発部	小柳 隆 東島 浩史 小野寺 博 近田 智洋 今西 祐

<b>調和</b> 流量計測制御機能付制御弁による空調機エネルギー性能の見える化	68
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー アズビル株式会社 パルプ商品開発部	佐藤 慶大 太宰 龍太 古谷 元洋 木下 良介

<b>調和</b> 往還温度差確保と快適性確保を両立する ファンコイルユニット制御ロジックの開発	74
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	木都 孝洋 田原 淳平 沖 直道

<b>快適</b> 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	82
アズビル株式会社 ホームコンフォート本部事業開発部	岩田 昌之

<b>融合</b> = 人間・機械融合システム技術	<b>調和</b> = 環境調和計測制御技術
<b>自在</b> = 自在計測制御技術	<b>快適</b> = 快適空間計測制御技術
<b>進化</b> = わかる化プロセス情報技術	

# Contents

**Pursuit of Human-Centered Automation** ..... 1  
President and Chief Executive Officer, Azbil Corporation     Sone Hirozumi

**Human-Centered Automation Technology Development:  
Creating Customer Value Based on Five Strategic Technology Areas** ..... 2  
Executive Officer, Member of the Board, Azbil Corporation     Yoshihide Sugino

Biomimetic  
Production

**Report on New Automation Technologies Incorporating Humanlike Abilities,  
with Results of Testing on a Photoelectric Sensor Production Line** ..... 6  
Core Technology Department,  
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation     Yutaka Harada

Freedom of  
Time and Place

**A Photoelectric Sensor with Automatic Sensitivity Adjustment** ..... 12  
Advanced Automation Company, Azbil Corporation     Shinichiro Suzuki     Toshiaki Hashikawa

Freedom of  
Time and Place

Evolution  
through IT

**A Data Collection and Management System for Trends in Energy Demand** .. 20  
Product Development Division, Azbil Kimmon Co., Ltd.     Kenichi Motoyama     Yuya Shidara

Freedom of  
Time and Place

Evolution  
through IT

**An Intelligent Emergency Shutdown System in Case of Earthquake** ..... 28  
Advanced Automation Company, Azbil Corporation     Isao Hayashi     Hiroyuki Furukawa

Evolution  
through IT

**New Trends in Batch Process Control  
Development of a Model-Based B2B (Batch to Batch) Control for Precise  
Reaction Temperature Control** ..... 34  
Advanced Automation Company, Azbil Corporation     Morimasa Ogawa     Tohru Sasaki

Evolution  
through IT

**Construction of a Desiccant System Simulator** ..... 44  
Building Systems Company, Azbil Corporation     Yasuhito Oomagari     Suguru Ito  
Waseda University     Seiichi Yamaguchi     Kiyoshi Saito

Evolution  
through IT

**Diagnostic Techniques for Cavitation in Building Air-Conditioning System  
Control Valves** ..... 54  
Valve Production Development Department, Azbil Corporation     Ryosuke Kinoshita     Shinichi Tsunoda

Evolution  
through IT

Harmony with  
the Environment

**Development of Cloud Services for Electric Power & Energy Savings** ..... 60  
Building Systems Company, Azbil Corporation     Takashi Koyanagi     Koji Higashijima     Hiroshi Onodera  
Core Technology Department,  
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation     Tomohiro Konda     Tasuku Imanishi

Harmony with  
the Environment

**Visualizing the Energy Performance of an Air Handling Unit Using a Control  
Valve That Measures and Controls Flow Rate** ..... 68  
Building Systems Company, Azbil Corporation     Keita Satou     Ryouta Dazai  
Valve Production Development Department, Azbil Corporation     Motohiro Furuya     Ryosuke Kinoshita

Harmony with  
the Environment

**Control Logic That Maintains a Difference in Water Temperature between Fan  
Coil Unit Inflow and Outflow While Keeping Living Areas Comfortable** ..... 74  
Building Systems Company, Azbil Corporation     Takahiro Kido     Junpei Tahara     Naomichi Okii

High-Quality  
Living Space

**Seeking Dependable, Safe, and Comfortable Living: Technical Integration  
Trials in the azbil House** ..... 82  
Business Development Department,  
Home Comfort Headquarters, Azbil Corporation     Masayuki Iwata

Biomimetic  
Production

= Machine Systems with Humanlike Abilities

Harmony with  
the Environment

= Systems Enabling Us to Live in Harmony with Nature

Freedom of  
Time and Place

= Flexible Measurement and Control

High-Quality  
Living Space

= Individualized Environmental Comfort Systems

Evolution  
through IT

= Advanced Technology that Clarifies Complex Systems

# ご挨拶

## 「人を中心としたオートメーション」の探求

アズビル株式会社  
代表取締役社長

曾瀬 寛純



当社は、2012年4月にアズビル株式会社に社名を変更し、またグループ各社社名もアズビルを冠したものに統一いたしました。これは2006年、創業100周年を機に制定した企業理念「人を中心としたオートメーション」についての展開を一層加速し、名実ともに「人を中心としたオートメーション」を推進する企業となることを意思表示するという意味でもあります。

オートメーションは、50～60年前に国内外で本格的に産業化が進み、学問として体系化された技術分野です。オートメーション（計測制御）の原点は生体の均衡の仕組み（サイバネティクス）に大なる影響を受けてスタートしました。産業分野では、技術によって人間を非人間的な作業から解放し、近代的な生産現場を実現するために利用され、産業の成長に大いに貢献しました。1980～90年代にかけては、マイクロプロセッサベースの技術革新が計測と制御の大規模システム化を可能にし、工場・プラント制御の分野ではあらゆる産業で利用され、集約化運転に向かいました。ビルシステムの分野でも同様に集中監視が進められました。一方で、遠隔監視になりオペレーター一人当たりの守備範囲が拡大したことで、現場で起こっていることの全てがシステムを通じて把握できない、多発するアラームへ少人数で対応できないなどの、人とシステムとの調和の課題が拡大しました。

21世紀に入ると、医療や生活の分野への計測制御の応用が拡がり、産業分野においては人とシステムとの調和の課題の認識やその対応の研究も進みました。2010年に計測自動制御学会は50周年誌のなかで、将来に向けて（1）人と機械・システムの協調・協業の重要性、（2）横断的な技術としてのオートメーションの価値・重要性を強調しています。

アズビル株式会社は、創業者山口武彦の「苦役からの解放」という精神のもと、1906年に山武商会として創業しました。以来、当社は「『人』のための『技術』」を探求し、社会に貢献する」というDNAを受け継ぎ、メーカーとして、またコンサルティングからエンジニアリング、施工、サービスまでライフサイクルでソリューションを提供する企業として成長して参りました。

2013年1月には、当社藤沢テクノセンター（神奈川県藤沢市）に、「山武記念館」を設立し、創業者とその精神、ビルディングオートメーション事業、アドバンスオートメーション事業、ライフオートメーション事業分野での技術、製品を中心に、オートメーションの歴史と社会・人とのかかわりを展示しています。社員だけでなく、広くオートメーション技術やその応用に関心のある技術者、地域の皆さまにもご利用いただけますと幸いです。

azbilグループは、建物分野のビルディングオートメーション（BA）、産業分野のアドバンスオートメーション（AA）および生活・生命の分野のライフオートメーション（LA）を3つの事業として位置づけ、「人を中心とした」の発想でオートメーション事業を展開しています。

新生アズビル株式会社としてスタートした2012年度からは、（1）技術や製品を基盤に、ソリューション展開で顧客・社会の長期パートナーへ、（2）地域拡大と質的な転換でグローバルな展開を加速する、（3）環境に適應できる学習する企業体に進化する、を3つの重点施策とし、企業運営を進めています。

具体的には、お客さまからの多様なご要望にお応えするため、エネルギー管理ソリューション（ENEOPT）、品質管理や生産性、安心・安全および快適性に関わる技術とソリューションをBA/AA/LAの3事業を横断して提供するための整備を進めています。

また、中国での環境・エネルギー管理事業の展開、中東におけるサービス・生産の強化を目的に新たなJVの設立、アドバンスオートメーション分野の事業強化とライフサイエンス分野のビジネス領域の開拓、拡大のために、国内外の会社をグループ企業化するなど、azbilグループのグローバル展開を加速しています。

さらに、3つの重点施策を実現できる人材を育てるため、社内教育機関「アズビル・アカデミー」を設立し、お客さまに提供するサービスや技術の強化をグループで総合的に進めています。

どうぞ、azbilグループの新たな挑戦を応援していただき、今後ともお客さまの事業や生活の新たな展開にazbilグループをご活用いただけるよう切にお願いいたします。

# 人を中心としたオートメーションの技術開発

## ～5つの戦略技術領域による顧客価値創造～

### Human-Centered Automation Technology Development: Creating Customer Value Based on Five Strategic Technology Areas

アズビル株式会社  
執行役員常務 技術開発本部長

杉野 芳英  
Yoshihide Sugino

#### キーワード

オートメーション, 技術戦略, 機械の知能化, 自在計測, わかる化, 環境計測制御, 快適空間, 次世代商品

「人を中心としたオートメーション」を技術的に解釈して、顧客価値提供のために解決すべき課題を定義し、将来を見据えた研究・開発の技術テーマを創出するための羅針盤として、5つの戦略技術領域を定めた。この5つの戦略技術領域に基づき開発された技術は、建物、産業や生活を取巻く様々な環境変化に対応する次世代商品を創出できるものと考ええる。

Interpreting “Human-Centered Automation” from a technological point of view, issues that must be resolved in order to provide value to the customer were defined, and five strategic technology areas were established to serve as a compass, pointing the way to R & D themes with future promise. Technology developed on the basis of these five areas can lead to the creation of next-generation products that reflect the various changes that will affect buildings, industry, and daily life.

## 1. はじめに

「オートメーション (automation)」という言葉は、「オートマチック (automatic)」と「オペレーション (operation)」を略して結合した造語であると言う。

この言葉は、1948年にアメリカのフォード自動車会社の副社長ハーダー氏が、新しく設けたエンジン加工に関する自動化を研究する部門に対して、オートメーション部と名づけたのが始まりと言われている。

当社、アズビル株式会社は、1906 (明治39)年に「欧米機械工具直輸入」の山武商会として創業。総合オートメーションメーカーとして本格的に始動したのは、1952年にアメリカ企業のハネウェル社との技術提携を締結したことに始まる。以来、60年以上におよびオートメーションを生業としてきた。

創業の精神である「先進技術によって人間を苦役から解放する」という企業理念は伝統として脈々と引継がれて計測・制御技術を進化・展開させてきた。

2006年に、100周年を迎えるにあたり、当社は新たに、「人を中心としたオートメーション」を企業理念に据えた。ここでは、「人を中心としたオートメーション」とその価値を発展・進化させる「5つの戦略技術領域」、およびその展開としての「次世代商品創造型開発プロセス」について紹介する。

## 2. 人を中心としたオートメーション

オートメーション (自動化システム) は、ICT (Information and Communication Technology) などコンピュータ関連技術の発達に伴う情報処理能力の大幅な向上、ロボット技術など自動化技術の進化に伴い、高度化、複雑化そして大規模化してきている。

こうしたオートメーションの発展は、生産性の大幅な向上をもたらし、我々の生活をますます豊かで便利なものにした。一方で、皮肉なことであるが、オートメーショ

ンの「人との不整合」や「自動化の問題点」がクローズアップされてきている。

高度に自動化された機械は、必ずしも人の思い通りに動いてくれるとは限らず、時には人の理解を超えた反応をする。機械に対する不信や過信はそのような例であると言われている。

あるいは、自動化技術の未熟さ、不完全さが人に与える生理的、心理的な負担および変化への対応不足なども指摘されている。

オートメーションの課題を、いささか乱暴ではあるが、大胆にまとめると以下のような言葉で代表されると考える。

- 人の負担増大（生理的、心理的）
- ヒューマンエラーの誘発
- 想像もできない事故の発生
- ブラックボックス化
- 柔軟性の低下 など

これらの課題を克服するには、「機械装置を制御する」というオートメーションの持つ本来の基本機能に加え、「人の充足感を実現する」という価値をこれからのオートメーションに付加することが必須であると azbil グループは考えている。

このような議論を経て、人々の「安心、快適、達成感」を実現するとともに「地球環境に貢献」し、人々がいきいきと暮らせる社会を実現するオートメーションの姿の象徴として「人を中心としたオートメーション」と名

付け、企業理念とした。

### 3. 技術戦略としての「5つの戦略技術領域」

azbil グループは、建物市場でのビルディングオートメーション（Building Automation）、工場やプラント市場でのアドバンスオートメーション（Advanced Automation）およびライフラインや健康などの生活に密着した市場でのライフオートメーション（Life Automation）を事業の3つの柱として展開している。

オートメーション事業展開を通じて、azbil グループならではの次世代価値をお客さまに提供していくために、「人を中心としたオートメーション」を技術的に理解・解釈し、研究・開発すべき課題・テーマを創出・定義する羅針盤として戦略技術領域を定義した。

すなわち、待ち受ける不確実な事業環境を克服し、中・長期にわたる技術的強みを持つ次世代商品開発を継続的に行うために、この戦略技術領域を研究・開発テーマの取捨選択に際しての規範とした。

将来にわたり、ある程度普遍性を持つ戦略技術領域を定めるにあたって、技術動向、社会・市場動向、業界動向、顧客課題そして azbil グループの強み・弱みと事業環境の機会・脅威などを多岐にわたり議論した。図1に戦略技術領域の絞り込みプロセスを示す。

「人を中心とした」の理念に基づく顧客価値、「安全／

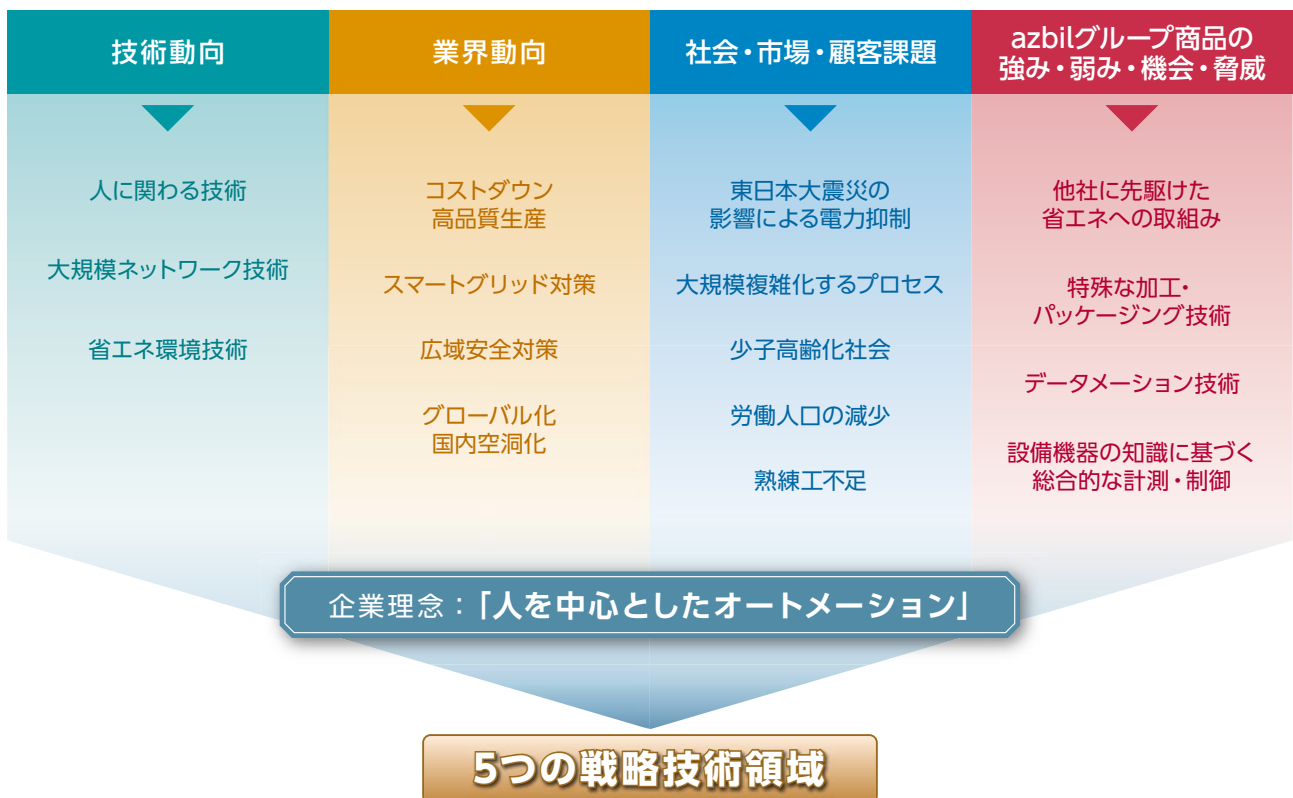


図1. 戦略技術領域の絞り込みプロセス

安心」,「品質/生産性/快適性」,「環境/省エネ」を具体的に実現していくため、将来にわたり必要となる技術の分析、抽出を行った。

最終的に抽出した技術をより広い概念を持つ技術領域として統合し、次の5つの戦略技術領域として絞り込んだ。

**人間・機械融合システム技術**

人と融合し、協働できる知能化システム技術（機械の知能化）で、例えば、人が持つ微妙な感覚や認識能力、永年培われ得られた技能などを「機械」に与え、機械が人と融合、協調して生産あるいは介護支援作業などを行えるようにする技術。

**自在計測制御技術**

広域な生産・居住環境で時間・場所を特定せずに計測・制御する技術で、今まで設置場所や時間、環境の状況により計測が困難で制御できなかった対象を自在に計測・制御する技術。

**わかる化プロセス情報技術**

複雑なプロセスの状態・課題をわかる化し、高度にシステムを制御、進化させる情報技術を言う。すなわち、「見える化」から一歩進んで「わかる化」へ進

化させることで、複雑なプロセスの状況・課題に対し飛躍的かつ高度にシステムを制御・進化させる情報処理技術。

**環境調和計測制御技術**

人の営み（生産・居住環境におけるエネルギー消費）に環境負荷低減を調和させる制御技術で、環境変化を学習して最適なエネルギー供給を行い、環境負荷低減を目指す計測・制御技術が含まれる。

**快適空間計測制御技術**

快適かつ高品質な空間を提供するための技術を言い、人など発熱負荷の所在に応じて空間の温度分布を最適に制御し、快適かつ高品質で安全な空間を提供する技術。

技術領域のそれぞれを、「融合」,「自在」,「進化」,「調和」そして「快適」の象徴的な言葉で代表させ、「人を中心としたオートメーション」の技術軸をより端的に表現し、直感的に理解できるようにした。図2に「5つの戦略技術領域」の全体像を示した。

**戦略技術領域**

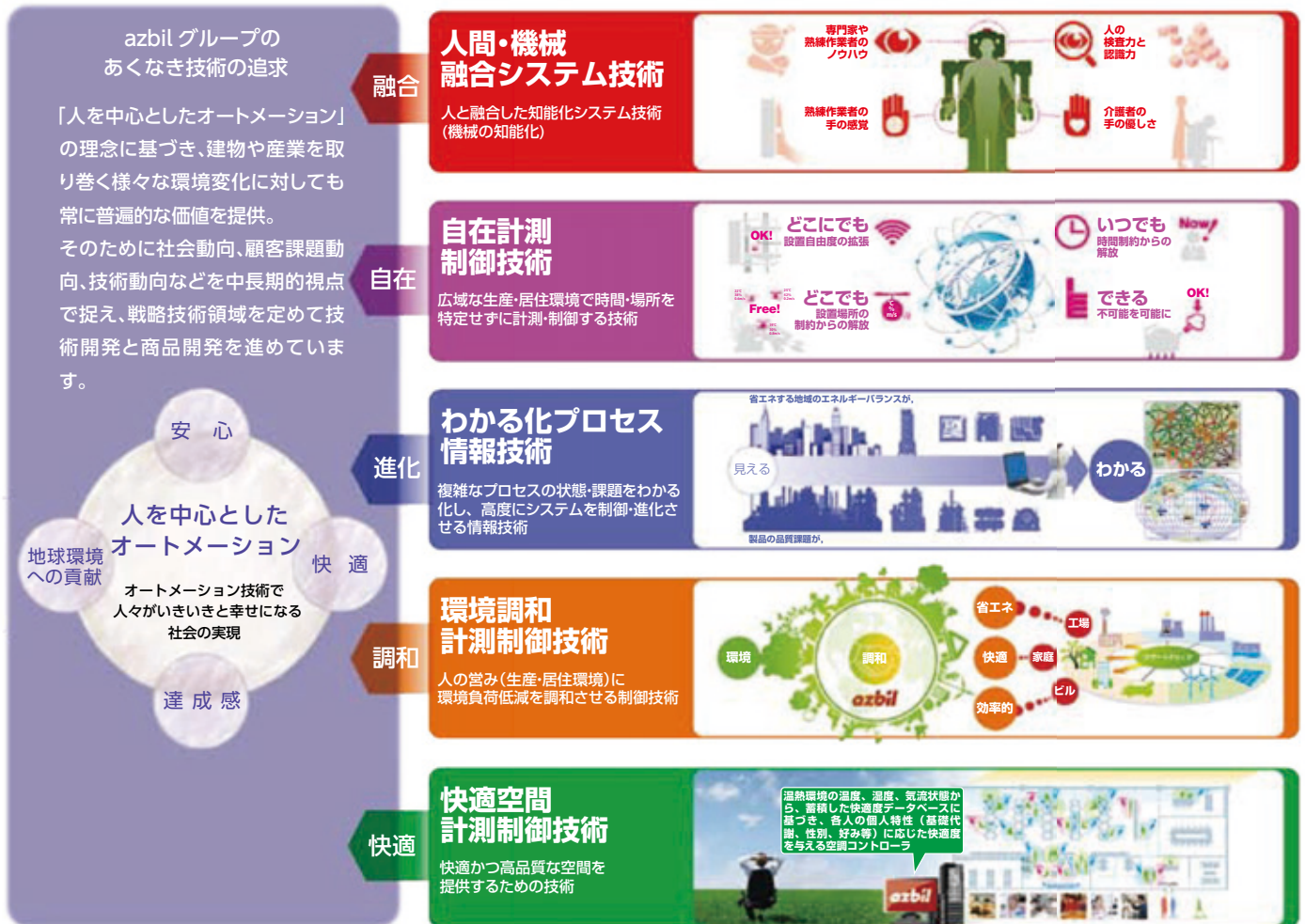


図2. 5つの戦略技術領域



#### 4. 次世代商品創造型開発プロセス

azbil グループは、工業プラント、生産工場、建物、住宅そして社会インフラと幅広いお客さまにオートメーションの価値を提供している。

また、「安全・安心マネジメントソリューション」、「エネルギーマネジメントソリューション」、「次世代工場生産制御」、「次世代環境制御」および「ライフサイエンスエンジニアリング」などを、新たな顧客価値の提供できる重点事業領域として考えている。

重点事業領域での顧客ニーズの把握と5つの戦略技術領域を規範とした新技術に基づき、次世代価値を提供する新商品の企画・開発を推進・展開する。

「人を中心とした」ならではの「新しい顧客価値の創造」と「顧客ニーズの発掘と具現化」を推進する「次世代商品創造型開発プロセス」を図3に示した。

#### 5. おわりに

21世紀に入り、企業を取り巻く環境は不確実な時代に突入し、企業環境は予測不能な混沌とした状況にあると同時に、技術革新とグローバル競争が熾烈化してきて

いると言われている。

当社は、2012年4月に社名をアズビル株式会社（英語名：Azbil Corporation）とした。azbil は、automation zone builder の頭文字からなる造語であり、オートメーションという素晴らしい技術価値を世界の皆さまに提供できる企業になりたいとの強い思いが込められている。

「人を中心とした」を一貫した価値観とし、「5つの戦略技術領域」を規範とした次世代価値創造と環境変化に素早く、柔軟に対応できる企業体質の強化を図り、azbil グループならではのオートメーション製品・サービスをタイムリーに提案・提供していきたい。

#### <参考文献>

- (1) 中山秀太郎, 日本大百科全書「オートメーション」, (小学館)
- (2) 貫 隆夫, 自動化の問題と限界について, 武蔵大学経済学会, 2000年3月
- (3) 稲垣敏之, 「人間中心の自動化」は何を目指すか?, 計測と制御, 第37巻8号, 1998年8月
- (4) ジム・コリンズ, ビジヨナリー・カンパニー④

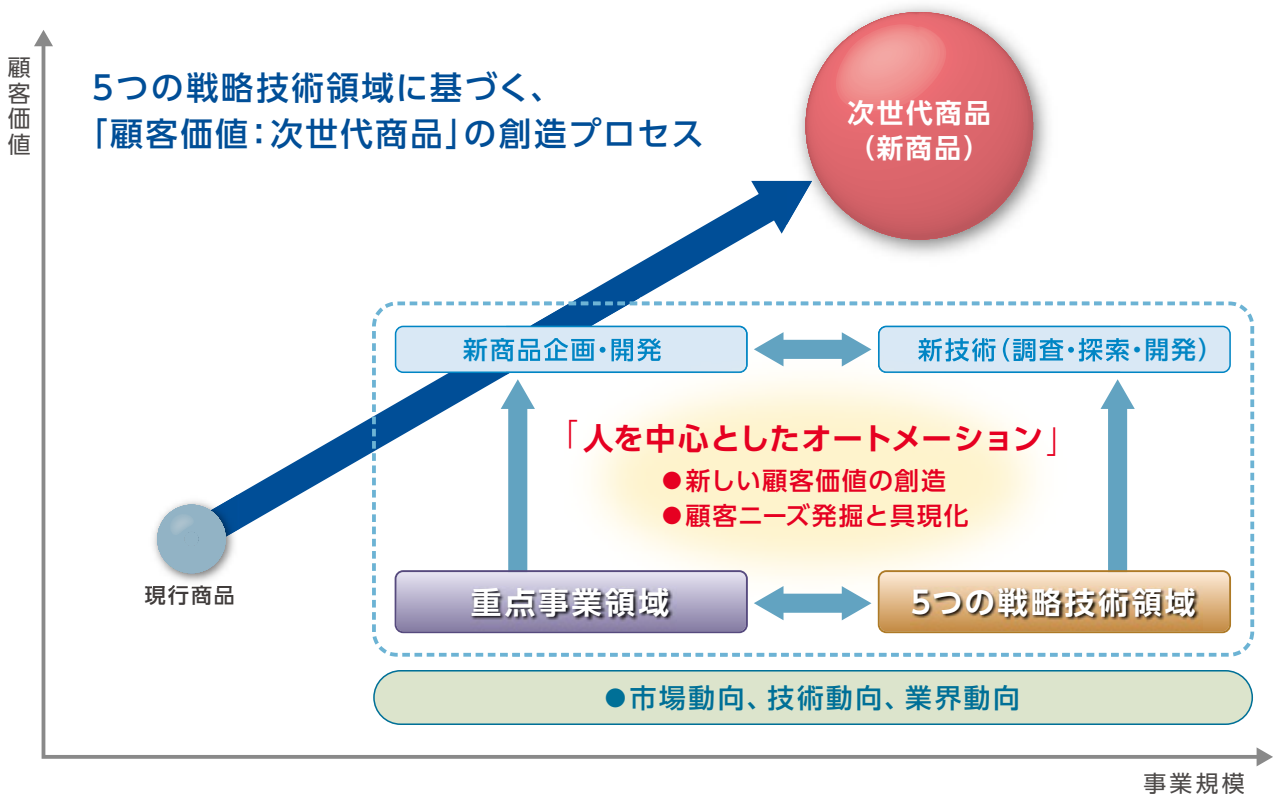


図3. 次世代商品創造型開発プロセス

# 人間の機能を融合した自動化技術の展開 光電センサ生産ライン自動化技術

## Report on New Automation Technologies Incorporating Humanlike Abilities, with Results of Testing on a Photoelectric Sensor Production Line

アズビル株式会社  
技術開発本部基幹技術開発部

原田 豊  
Yutaka Harada

### キーワード

コンプライアンス, ビジョン, 光電センサ, 自動化

人の手の能力を機械化したアクティブコンプライアンスデバイスと人の目の能力を機械化したサーボビジョンシステムを開発した。それを光電センサ HP7 シリーズの生産ライン自動化設備に適用して機械化された能力が従来の自動化設備と比較して品質/コスト/デリバリの点で効果が得られることを実証した。この技術をさらに人の能力に近付けていくことで国内生産の回帰や海外生産での自動化の礎を築いていく。本論文でその技術と実証状況を報告する。

We have developed an active compliance device which mimics some of the abilities of the human hand, and a servo vision system which mimics some of the abilities of the human eye. These technologies were tested as part of automated equipment on the production line of the HP7 photoelectric sensor. In comparison to conventional equipment, the automated equipment was more effective in terms of quality, cost, and delivery. Making these technologies more humanlike may assist in goals such as the recovery of domestic production in Japan and the automation of overseas production. This paper describes the technologies and the results of testing.

## 1. はじめに

人を中心としたオートメーションの探求に向けて、融合/自在/進化/調和/快適の5つの戦略技術を定めている。この中で、融合とは人と機械の融合システム技術で、人の手の器用さや視覚認識能力などを取り入れた知的生産システムを目指している。また経験値に基づく柔軟な対応能力を持つ熟練作業者の知識やノウハウを機械に融合して機械の知能化システムを目指している。これらを実現するために、人の手と目の能力を機械化する技術にフォーカスして開発している。

手の能力として、熟練作業者の手の感覚、柔らかさの認識、やさしいタッチなどがある。また品質の確認を手探りで行うノウハウ的な動作もある。

目の能力として、物の3次元を含む位置の認識の他に、良否の識別、傷や凹みなどの認識、変化の認識などがある。

本論文では手の能力を機械化するアクティブコンプライアンスデバイスと目の能力を機械化するサーボビジョンシステム、そしてそれらを光電センサ生産ラインへ適用した結果について述べる。

## 2. これまでの自動化事例

当社がこれまでに開発した自動化技術の事例を紹介する。

図1は1980年代に開発した自動化ラインである。パー

ツフィーダを用いた部品供給、ロボットによる組み立て、コンベアによる部品搬送で構成された全自動化ラインであった。この頃はロボットや機械要素があまり市販されていなかったため、ロボットを含めて多くの要素を自社開発した。

部品供給はパーツフィーダを用いているため部品形状が変更となると生産を止めて対応する必要があった。



図1. マイクロスイッチ自動化ライン

図2は1990年代の自動化ラインである。個々の設備は自動化されているが設備間の部品搬送は人が行う着々ラインとなっている。多品種少量生産とラインレイアウトの自由性からコンベアを用いていない。技術的には、直交型6軸ロボットと力センサを用いたコンプライアンス制御<sup>(1)</sup>を初めて組み立て作業に適用した。力制御で変形を伴う基板や樹脂部品の組み立てを行うことが可能となったが、減速器やロボットの機械的剛性を制御システムにモデル化することが難しくコンプライアンス制御の精密さに課題があった。



図2. 指示調節計自動化ライン

また、この頃は小型の表面実装チップマウンタやリフロー検査機を内製する上で、テープフィーダから吸着したチップ抵抗などを所定の位置に搭載するための、また

リフロー後の半田検査を自動で行うための画像処理技術を開発した。以降、力センサを用いた力制御技術、画像処理技術を圧力センサパッケージングラインなどに適用<sup>(2)</sup>して技術の向上を進めてきた。

### 3. 生産ラインの環境変化と課題

ところが2000年代になると、組み立てラインの一部は中国に移転された。これは低賃金や人海戦術による設備投資抑制によってコストメリットがあったが、わずか10年で賃金は2倍<sup>(3)</sup>から推定に高騰し、離職率増加による人材流動の激化、最近の日中関係の悪化など中国での生産を取り巻く環境変化によってメリットが薄れてきている。また自動化技術力の停滞と自動化設備の管理能力の低下が懸念されてきている。

今後、国内や海外を問わず安定した生産を実現するには品質・コスト・デリバリのいわゆるQCDに関係する工程は自動化が重要と位置付け、新たな技術開発を進めている。その着眼点が人の手と目の能力の機械化である。人での組み立て作業は部品の変化によらず柔軟に対応することができ、また品質チェックでは細部にわたって行うことができるため不良率を低く抑えることができる。しかし、熟練作業を伴う作業は作業時間のばらつきを生じ、また検査レベルのばらつきも生じる。これを安定させるためトレーニングや2人作業によるダブルチェックといったコストを生じさせている。一方、従来のオープンループ的な自動化技術では部品の変化に対応することが難しく、位置決め制御のみによる組み立ては部品のばらつきに対応することが困難で、検査も行われず組み立て作業が進むため不良をつくり込んでしまう。

そこで、人の手と目の能力を機械化した技術を適用することによって、部品や環境の「変化への対応」を容易にし、また品質をつくり込んだり検査の自動化で不良の流出を防止したりと「不良をつくらない」ができるようになる。さらにこれら技術をプラットフォーム化することで設備への適用を容易にして設備投資の抑制に貢献する。結果、生産の工程能力が安定するため顧客へ滞りなく提供することができる。次章では、この機械化技術について述べる。

### 4. 人の手と目の能力の機械化技術

2章で述べた様に、コンプライアンス制御とビジョン技術の開発を行ってきた。これら技術はそれぞれ手の能力（触覚）と目の能力（視覚）に該当する。しかしそれぞれ下記の課題がある。

#### (1) コンプライアンス：

- ・力センサが高価で、かつ高剛性構造により過負荷に対して破損し易い。

- ・減速器の摩擦やガタ、ロボットの機械剛性によって数N以下レベルの精密なコンプライアンス制御は難しく、また応答性がよくない。

(2) 画像処理：

- ・画像処理アルゴリズムの開発は多くの開発工数を要する。一方、市販のソフトウェアライブラリがあるが、その処理を適切に実行させるプログラミングが必要である。
- ・画像処理のプログラミングは専門化の知識やノウハウが必要である。

以上を鑑み、新たに開発したアクティブコンプライアンスデバイスおよびサーボビジョンシステムについて述べる。

4.1 アクティブコンプライアンスデバイス

人の手の能力（触覚）を実現するデバイスとして開発しているアクティブコンプライアンスデバイス<sup>(4)(5)</sup>は下記の特長がある。

- (1) 力センサを用いず、制御アルゴリズムで作業力を推定する。
- (2) 内蔵する位置センサの出力をフィードバックすることによりコンプライアンスデバイス単体でコンプライアンス、力制御のほか、速度や位置の制御も可能である。
- (3) 位置や速度信号の時系列的変化から組み立て作業の良否を判定することができる。
- (4) 単軸、軽量ダイレクトドライブモータのシンプル構造のため高速応答が可能で、かつ堅牢である。

アクティブを冠している所以は、外力に倣うだけのパッシブコンプライアンスと異なり、柔らか動作のほかに自ら位置を変化させて作業品質や速度を向上させたり、検査のための動作を行ったりすることを目的としているからである。

このアクティブコンプライアンスデバイスを生産設備に導入した結果、組立品質が向上し、かつサイクルタイム短縮化に貢献できた。また減速器を用いない軽量ダイレクトドライブモータと制御アルゴリズムによって1N以下の力制御を実現し、かつ高速に行うことを可能としている。なお制御自由度は1のみであるが、次に挙げる多くの作業に適応可能である。チップ部品搭載、部品ピック&プレース、接合、半田付けコテ接触、シール貼り、ネジ締めなど。このデバイスを3軸に配置すれば3自由度のアクティブコンプライアンスデバイスになる。従来のRCC（リモートセンタコンプライアンス）に代表されるバネやゴムなどを用いたパッシブコンプライアンスデバイスは作業に合わせて柔らかさなどの特性を変更することができない。また従来の力センサを有するロボット（最近では力センサレスもある）は前述レベルの微小力制御や応答性の課題がある。開発したアクティブコンプライアンスデバイスはパッシブコンプライアンスや力センサを用いたコンプライアンス制御ロボットの長所を併せ持ったものとなっている。

図3にアクティブコンプライアンスデバイスの外観を示す（ロボットの手先に付け、エンドエフェクタに電動ハンドを装着している）。図4にはその構造を示す。駆動源にボイスコイルモータを、単軸スライド部はリニアシャフトを用いている。位置センサには当社製スクリーンファイバ HPF-T021Tとアナログ出力光電アンプ HPX-MA を用いた。また図3や図4には無いが制御を行うコントローラとして、当社製計装ネットワークモジュールNXをベースに新たに開発したアクチュエータ制御基板を装着し、リニアアクチュエータ制御アルゴリズムを実装して動作させている。PLC（プログラマブルロジックコントローラ）との通信インターフェースはイーサネット（UDPプロトコル）を用いている。

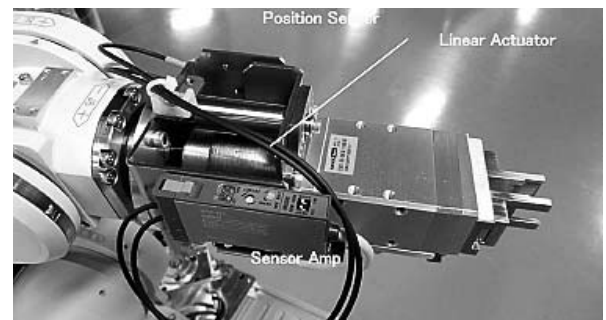


図3. アクティブコンプライアンスデバイスの外観

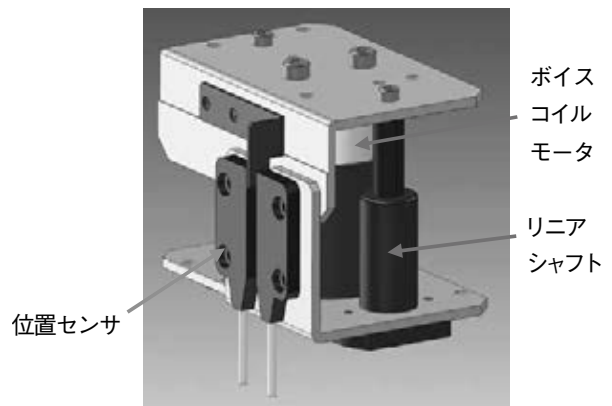


図4. メカ構造図

図5はリニアアクチュエータ制御のブロック図である。この図に示すとおり組み立て時の力は外乱オブザーバーで推定可能であるが、精度と計算負荷の面で課題がある。ここで外乱オブザーバーの入力は駆動電流  $I$  (S) と速度  $V$  (S) であり、推力指令値  $E$  (S) が一定の場合は駆動電流  $I$  (S) も速度  $V$  (S) の影響だけを受けるため、作業中の外乱の変化は速度の変化として表れる。したがって作業中の速度の変化を監視すれば、外乱オブザーバーの計算を行うことなく作業状態を推定できる。これをスナップフィット組み立てのようなパッチンと嵌る組み立て良否判定の一手段として用いている。

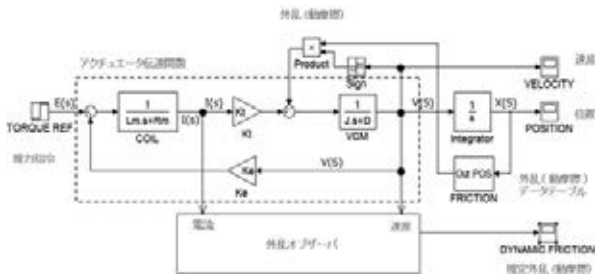


図5. リニアアクチュエータ制御ブロック図

コンプライアンス／速度など各制御モードの細やかな変更，組み立て作業の良否判定機能が「不良をつくらない」に貢献している事例を5章で示す。

#### 4.2 サーボビジョンシステム

人の目の能力（視覚）を実現するためサーボビジョンシステムを開発している。特長を下記に示す。

- (1) 画像処理ライブラリは市販品を利用し，画像処理関数の組み合わせや処理パラメータの演算アルゴリズムは独自に開発している。
- (2) 処理の共通化を行い，アルゴリズムの集約およびパターン化を行い処理の開発を容易にする。
- (3) 画像処理 H/W と画像取得 H/W は切り離せるソフトウェアモジュール構造となっている。

サーボを冠している所以は，画像で捉えた部品などの状況に応じて対応する動作を行わせることを目的としているからである。例えば，半田付けで半田が溶けるのを認識して糸半田供給のタイミングを適切に制御することが実現できる。

人は作業する時に部品の状態，位置，組み立て後の状態を確認している。これを機械化するため使い易いビジョンシステムを開発している。構成は，画像処理 H/W，画像取得 H/W（画像処理 H/W と同居可能），画像処理ライブラリ，そしてライブラリを使用して能力の機械化を実現するアルゴリズムプログラムで構成される。複数の画像取得 H/W が共通の画像処理 H/W を利用できる様にして H/W の投資を抑制している。

PLC はイーサネット（TCP プロトコル）で処理コマンドを送信し，画像処理結果（例えば部品の位置）を受け取ることができる。

部品認識，ピック&プレース，組み立て作業，検査で同じような処理手順が可能な場合は認識処理アルゴリズムを共通化している。ほとんどの処理はパターンマッチング法を用いているため，部品形状や寸法などの「変化への対応」はパターンの再教示のみで対応することができている。部品供給や組み立ては部品の位置，姿勢，表裏や形番情報を用いた部品照合を行い，間違った部品の組み立てを防止している。また検査ではフォトメトリックステレオ法を用いて立体形状で良否判定を行っていて「不良をつくらない」に貢献している。これらの事例を5章で示す。

## 5. 光電センサ生産ラインへの展開

図6は光電センサ生産ラインの外観である。この生産ラインで2012年1月に販売が開始された光電センサHP7（図7:光電センサHP7シリーズ）を生産している。



図6. 光電センサ生産ラインの外観

このセンサは様々な検出ニーズに対応するために豊富なバリエーションがあり，多品種型の製品である。また従来は感度調整用ポリウムで ON/OFF 出力のしきい値調整を行っていたが，これを操作ボタンでできるようになっている。組み立て工程の観点からすると歯車部品の組み立てが削除されたため自動化し易い構造となっている。



図7. 光電センサ HP7 シリーズ

部品は，アンプ部の基板，出力用のケーブル，ゴム製のボタン，取付ねじ部の金属スリーブ，レンズやケースなどの樹脂部品で構成されている。これらを組み立てる工程の自動化に，人の手の能力（触覚）の機能を実現するアクティブコンプライアンスデバイスと人の目の能力（視覚）の機能を実現するサーボビジョンシステムを適用している。本章でいくつかの事例を述べる。

### 5.1 アクティブコンプライアンスデバイスの適用

図7に示されているケースとフレーム部品はスナップフィット組み立てとなっている。人が手で作業した場合、爪が溝の手前の壁を乗り越えるとパッチンという感触や音で組み立てが成功したことが認識できる。これをアクティブコンプライアンスデバイスで行わせると位置や速度の変化は図8の波形の様になる。この変化から組み立て作業の良否判定を行うことが可能である。さらに確実な検査として人が組み立て後に引き抜き作業を行って爪が甘く引っ掛かっているか確認するのと同様に、アクティブコンプライアンスデバイスが能動的な動作によって引き抜き検査を行っている。なお速度制御→接触検出→力制御→組み立て判定→引き抜き動作→最終良否判定までの時間はわずか0.6秒弱である。このアクティブコンプライアンスデバイスの高速応答性を生かしてサイクルタイム短縮にも貢献できている。

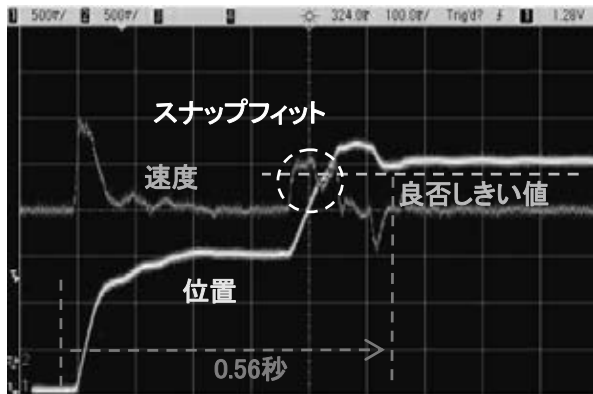


図8. スナップフィット組み立て時の位置と速度

その他、レンズ接着や半田付け工程などでもアクティブコンプライアンスデバイスを用いており、接触速度や位置、作業力を適応的に制御、検知することにより気泡巻込み、半田ボール飛散、部品未接触／過負荷接触、スナップフィット組み立て失敗などの不良を抑制している。

### 5.2 サーボビジョンシステムの適用

部品の多くは樹脂部品であるが、そのほとんどは傷などを避ける理由から図9に示すような部品トレイに並べられた状態で供給される。このトレイに部品を入れるのは人が行っているが、向き／表裏／種類などが間違っている時がある。画像処理を用いることによってこれを認識し、ピック動作に補正を掛けたり無視したりして間違った部品の組み立てを防ぐことができている。

一方、ケースなど一部の部品は袋から取り出し平置きに並べて供給できる部品がある。図10はこの平置きができる部品供給装置である。ビジョンで部品の向きや表裏を認識し、それをロボットがピックする。

他の事例として半田検査を述べる。半田コテを用いた半田付けは、不良モードとして半田濡れ不足、未半田、

ツノがある。濡れ不良や未半田は2次元的な画像処理で判別可能であるが、ツノは出っ張り部を3次元的な測定を行い認識する必要がある。そこでフォトメトリックステレオ手法を用いた画像処理関数から復元された立体データを用いて、出っ張り部をサーチするアルゴリズムを開発した。これによりツノの検査も可能となった。

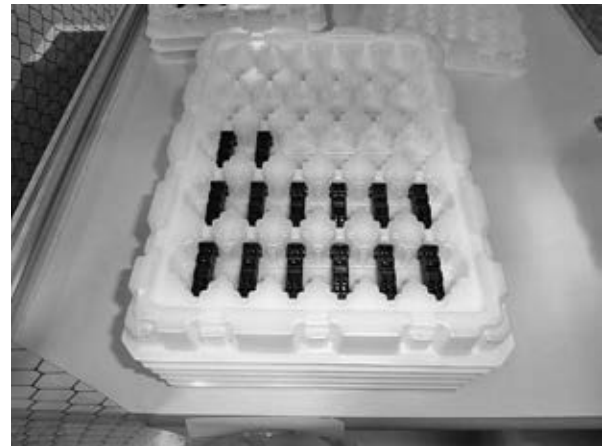


図9. 部品トレイの一例



図10. 平置き部品供給装置

## 6. おわりに

人の手の能力を機械化するコンプライアンス技術が「不良をつくらない」に貢献し、人の目の能力を機械化するビジョン技術が「変化への対応」「不良をつくらない」に貢献することが光電センサラインへの展開で実証することができた。

今後は、アクティブコンプライアンスデバイスの完成度向上、サーボビジョンシステムの使い勝手向上や処理のリアルタイム性の向上等で更なる融合技術の発展を行っていく。

なお、開発したコンプライアンスデバイスはサンプルデモ品の貸し出し評価を企画している。興味がある読者は広報グループを通じて問い合わせ願いたい。

<参考文献>

- (1) 原田豊：Development of Intelligent Automated Assembly Technique, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995年5月
- (2) 原田豊, 樋口数一, 金原圭司, 小黑直輝, 別府永志：7. MEMS 組立装置の開発, azbil Technical Review, 2007年12月発行号, pp.42-47, アズビル株式会社
- (3) 世界の統計, 第12章労働・賃金, 総務省統計局
- (4) 川瀬茂, 津村高志, 小黑直輝：11. アクティブ・コンプライアンスデバイスの開発, azbil Technical Review, 2009年12月発行号, pp.62-67, アズビル株式会社
- (5) 川瀬茂：コンプライアンスデバイスを用いた嵌め合い作業状態推定法と組み立て作業への応用, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012年5月, 日本機械学会

<商標>

イーサネットは、富士ゼロックス株式会社の登録商標です。

<著者所属>

原田 豊 技術開発本部基幹技術開発部

# 自動感度調整機能が付いた 汎用光電センサの開発

## A Photoelectric Sensor with Automatic Sensitivity Adjustment

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

鈴木 慎一郎  
Shinichiro Suzuki

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

橋川 寿明  
Toshiaki Hashikawa

### キーワード

光電センサ, 外乱光, 相互干渉, 一体成形

光電センサを使用するお客さまは、自社の装置 / 設備のコスト競争力アップ、品質向上に取り組んできたが、昨今の社会情勢 / 経済情勢の変化はさらなる進化を余儀なくされている。こうしたお客さまの環境変化に対し、光電センサメーカーとして少しでもお役に立つため、最も汎用的に使用されているセンサ形状で、誰でも簡単に取付け調整ができ、また安心して使用できる性能を保持し、センサの長期使用性、省エネルギーによってお客さまへ貢献する自動感度調整機能付き汎用光電センサを開発したので報告する。

Recent social and economic changes have caused customers of photoelectric sensors to redouble their efforts to make their equipment and facilities more cost competitive and to improve the quality of their products. To assist in these goals, Azbil Corporation has developed a general-purpose photoelectric sensor which has the most commonly used sensor shape; is easy to install and adjust without specialized training, while retaining reliability for worry-free use; has a long service life; is energy-efficient; and is equipped with automatic sensitivity adjustment.

## 1. はじめに

お客さまが光電センサを使用する際のトラブルを抑え、装置の長期的な信頼性に貢献できるように、最も汎用的に使用されているセンサ形状で以下の機能を実現した。

- ・誰でも簡単に取付け調整ができる
- ・安心して使用できる性能を維持
- ・環境にやさしい製品

このため、光電センサを使用するお客さまが必ず実施する行為、すなわち「設置」、「運転」、そして社会的責任である「環境」の3つの項目に着目して、お客さまの作業コスト、運転コストなどのトータルコストの削減を目指した。開発にあたり上記3項目の課題を抽出し、それぞれの課題解決のための技術開発を行い、汎用光電セ

ンサ HP7 シリーズを開発したのでここに紹介する。

## 2. 製品概要

### 2.1 光電センサとは

光電センサとは光を媒体として物体の有無を検出し、電気的なオン / オフ信号を出力するセンサである。光電センサは光を出す投光部と光を受ける受光部で構成され、投光された光が物体により遮光または反射した状態を受光部が検出し信号処理し出力する。光電センサのタイプには投受光分離形の透過形、投受光一体形の反射形、リフレクタ形がある。また、透過形 / リフレクタ形は遮光で検出し、反射形は反射光で検出する (図1)。主に搬送装置、組立機械、加工機械、立体駐車場などの



工業用途で使用される。検出距離と検出体特性で使用するタイプを使い分ける。HP7シリーズの主な仕様を表1に示す。



図1. 光電センサのタイプ

表1. HP7シリーズの主な仕様

項目	透過形	反射形	リフレクタ形
使用温度範囲	-30 ~ +55°C		
電源電圧範囲	DC10.2~26.4V		
出力開閉電流	100mA以下 (抵抗負荷)		
応答時間	1ms以下		
消費電流	25 mA以下	17 mA以下	14 mA以下
検出距離	15m	1m	5m

## 2.2 光電センサ HP7シリーズの特徴

今回開発した光電センサ HP7シリーズの主な特徴は下記の通りである。

(1) 設置：誰でも簡単かつ安心して設置できる。下記の仕様を実現した。

自動感度調整機能、金属取付ねじ、明るい光芒を実現した。

(2) 運転：設置後の環境で安心して運転できる。下記の仕様を実現した。

インバータ蛍光灯やLED照明などの耐外乱光性能向上、透過形相互干渉防止、水/油に対する保護構造の性能の向上を実現した。

(3) 環境：長期使用とCO<sub>2</sub>排出削減できる。

長期使用性では有寿命部品の投光LEDに4元素LEDを採用し、かつ耐環境性能を大幅に向上させた構造を実現した。またCO<sub>2</sub>削減のために光電センサの消費電流を従来品比較で約1/2を実現した。

## 3. 光電センサの課題

光電センサを使用するユーザが必ず実施する行為、すなわち「設置」、「運転」、そして環境負荷低減の「環境」の3つの項目の課題を以下に述べる。それらの課題を考慮し、解決すべきテーマを設定して、新たな機能、新たな構造を開発した。

### 3.1 設置上の課題

光電センサ設置は主に開梱、センサ取付、ケーブル配

線、光軸/光量調整、動作チェックの5工程からなる。この中で「光軸/光量調整」が最も経験を必要とし、重要な工程である。光電センサは設置状況や検出物体によって現場での調整が必要とされる。例えば、半透明体などの検出物体(図2)や背景の反射率が高い環境では、光量調整を行う必要がある。従来の光電センサでは感度調整用のポリウムを小型ドライバで回転させて、検出物体の有無を出力で確認する方法であった。この方法では、①作業者によって調整後の検出安定性のばらつきが出る、②光量調整に時間がかかる、③ポリウム抵抗の調整方法のため、近距離での調整が困難という課題を抱えていた。また「センサ取付」では、従来品はプラスチック製の取付ねじのため、ねじ締付強度が弱い、ねじ山が破損するという課題があった。



図2. 半透明体物体の検出事例

### 3.2 運転上の課題

光電センサを設置後、装置/設備は運転状態となる。この設置環境で光電センサが安定して動作することが求められるが、光電センサの安定した動作を阻害する要因として以下の課題がある。

- ①太陽光やインバータ蛍光灯、LED照明などの外乱光による出力誤動作(4.4.2項)
- ②透過形の並列設置による出力誤動作(4.4.2項)
- ③水、クーラント、洗浄剤などがかかることによるセンサ破損や出力誤動作
- ④静電気(ESD)によるセンサ破損
- ⑤インバータモータからの伝播ノイズによる出力誤動作
- ⑥装置/設備の振動・衝撃による取付ねじの緩みやセンサの破損

### 3.3 環境上の課題

環境負荷低減の設計のポイントは光電センサの用途を考慮し次の長期使用性と省エネルギー性に重点を置いた。

(1) 長期使用性について

従来製品の電気部品/機構部品について負荷条件(温度、ストレスなど)を考慮し、有寿命部品か否かで分類した。その結果、投光LED、調整ポリウム用“Oリング”、フ

フレーム取付ねじ部、ケーブル端の処理に課題があることが明確になった。

(2) 省エネルギー性について

従来製品のライフサイクル影響評価 (LCA) を実施した。この結果、光電センサの製造 / 輸送 / 使用 / 廃棄の段階別 CO<sub>2</sub> 排出量は全段階の CO<sub>2</sub> 排出量を 100% とすると使用段階で約 99% を占めた。また、製品使用時<sup>\*1</sup> の電力消費が環境影響のほとんどを占めていることがわかった。これより光電センサの消費電流の低減が課題として明確になった。

※ 1：製品使用条件は以下の通りとした。

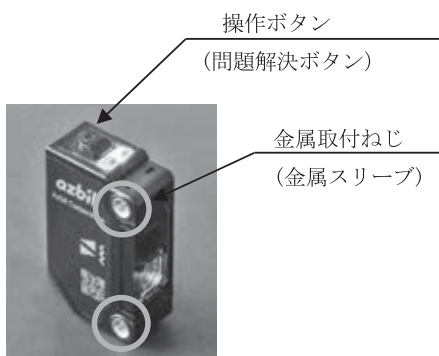
1 日 24 時間使用、使用期間は 10 年

## 4. 光電センサ HP7 シリーズの開発

### 4.1 センサ構造

#### 4.1.1 光電センサの外観

光電センサは最も汎用的に使用される業界標準サイズにて、上記の課題解決を図ることとした。光電センサの外観図を図 3 に示す。従来の感度調整用ポリウムを操作ボタン (問題解決ボタン) に変更した。また従来の光電センサの取付穴はセンサフレームにねじ加工をしたプラスチック製ねじであったが、金属製の取付ねじ (金属スリーブ) に変更した。取付ねじ部は長期間締付によるストレスが加わる箇所では設置環境によって、クラックなどの破損が発生しやすい部分である。ここを金属スリーブにすることでフレームに加わるストレスは大幅に削減できる。



サイズ：32.6mm × 20mm × 10.4mm

図 3. 光電センサ外観

#### 4.1.2 光電センサの構成

光電センサ構成図を図 4 に示す。この構造の特徴はセンサ内部への水・油の侵入を遮断する構造にある。

3.3 (1) で示した従来品の調整用ポリウムタイプに必要とした“Oリング”構造の弱点 (有寿命部品、低温に弱い、組立バラツキ大) は図 4 の表示窓 / 操作ボタンに示すようにインサート成形することで解消した。

また 3.3 (1) で示したケーブル端 (ケーブルシースと

リード線の隙間) からの水・油の浸入は図 4 のケーブルプリ成形部品 (ケーブルのインサート成形) によって解消した。

そして図 4 に示す部品をすべて組付けた後に一体成形を実施し、フレーム / ケース / 表示窓 / カバー / ケーブル Pre 成形を射出成形樹脂で固め、センサ内部への保護構造性能を格段に高めた。当社の保護構造試験で比較すると従来比で約 5 倍の耐久性改善ができた。

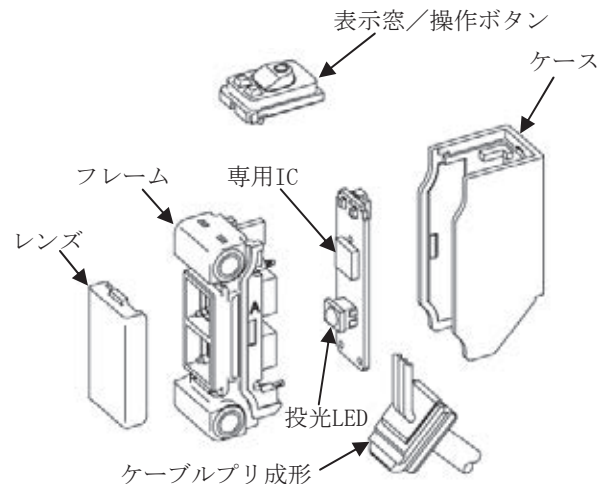


図 4. 光電センサ構成図

### 4.2 システム構成

今回開発した光電センサの全体システム構成を図 5 に示す。左側にセンサ入力要素 (電源、操作、光、電圧) があり、右側にセンサ出力要素 (投光、表示光、センサ出力) がある。従来の感度調整はポリウム抵抗をドライバで回転することで実施していたが、ボタン操作で実施できるようにした。このため、閾値設定などを実施するユーザインタフェース部はマイコンが処理し光電センサの機能実現は光電センサ専用カスタム IC (以下専用 IC) とするシステム構成とした。

マイコンにする利点は以下の通り。

- ① 様々な閾値設定が任意のソフトウェアで実現が可能。
  - ② 生産ラインのカスタム対応が容易。
- 専用 IC を採用する利点は以下の通り。
- ① フォトダイオード (PD) を内蔵するのでノイズの影響を受けにくい。
  - ② 図 5 に示す信号処理回路全体を静電シールドすることで耐ノイズ性が向上できる。
  - ③ 静電容量の影響を受けにくく応答が速い。
  - ④ 価値機能を実現する回路が具現化しやすい。
  - ⑤ 部品の小型化が可能。
  - ⑥ 機能対コストで低コストが可能。

### 4.3 設置上の課題解決

3.1 で示した「センサ取付」課題は 4.1.1 で示した金属

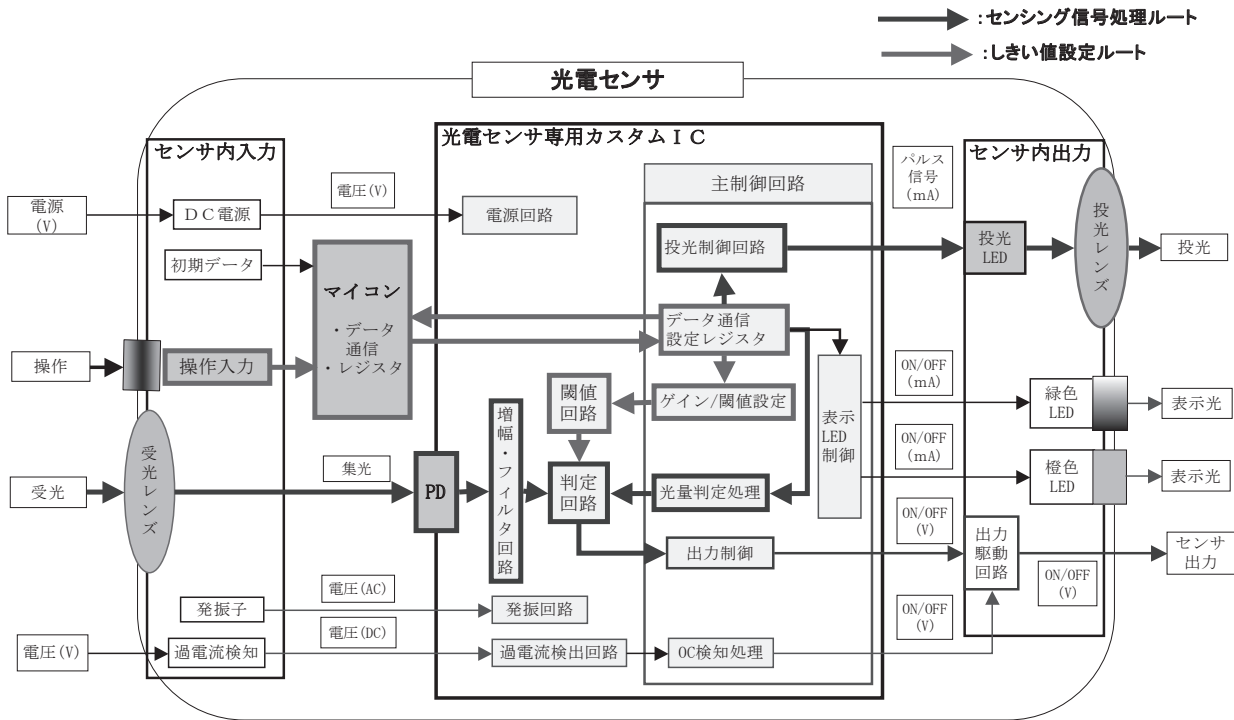


図5. システム構成

スリープで解消したので調整方法について説明する。

(1) 自動感度調整方法

3.1 で示した感度調整用ボリュームで光量調整するときの課題は 4.2 に示したシステム構成と 4.1.1 に示した操作ボタンによる自動感度調整方法を実現することで解消した。ここでは最も利用頻度の高いワークレスチューニングで内容を説明する。

ワークレスチューニングとは、検出体がない状態で安

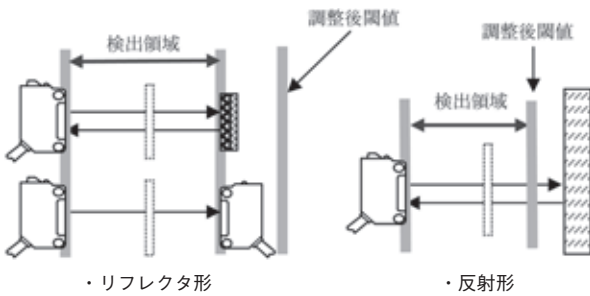


図6. ワークレスチューニングによる閾値設定

表2. ワークレスチューニング後の閾値

形式		調整後閾値
リフレクタ形	光量換算	50%
透過形	距離換算	70%
反射形	光量換算	200%
	距離換算	70%

定した検出ができる閾値を自動で設定する調整方法である。設定する閾値は透過形・リフレクタ形が50%、反射形が200%の光量余裕度に設定される。(図6, 表2)

次に操作方法について説明する。まず、問題解決ボタン(図3)を2回押す(長押し, 一回押し)。その結果は図5の「操作」からの信号として操作情報をマイコンが認識し、ワークレス状態の光量値を専用ICの光量情報から二分法収束より求める。その結果と所定の光量余裕度係数よりワークレス閾値を設定する。正常に設定できた場合は緑LEDの点灯で知らせ、異常の場合は緑・橙LEDの交互点滅で知らせる。他の自動感度調整方法として、2点チューニング, 位置決めチューニングが選択できる。

(2) 自動感度調整の効果

自動感度調整方法では、①作業者にかかわらず調整後の検出安定性が一律、②調整が短時間(10秒以下)、③近距離でも一定割合で調整が可能という結果となった。

光電センサは通常、工場出荷状態では最大感度に設定されている。この状態で検出がうまくいかない場合に、問題解決ボタンを2回押すことにより最適設定値に調整する。例えばリフレクタ形で半透明体を検出の場合に使われる(図2)。仮に1000台を光量調整するとして従来品のボリュームタイプと比較をした結果を表3に示す。調整時間で1/5, 作業費換算で約3.3万円の削減となった。

表3. 光量調整方法の違いによる作業費比較

	ポリウム調整	ワークレスチューニング
調整時間(秒)/台	30	6
総調整時間(時間)	8.3	1.7
総調整作業費(円)	42,667	8,333

条件：調整台数 1000 台， 賃率 5,000 円 / 時間

#### 4.4 運転上の課題解決

3.2 で示した運転上の課題のうち，③水，クーラントによるセンサ破損 ④静電気 (ESD) によるセンサ破損 ⑥振動衝撃による取付ねじの緩みは 4.4.2 のセンサ構造で示した対策で大幅に性能向上した。ESD 試験では 30KV 以上で破壊なしとなり，従来品の 2 倍の耐量となった。締め付けトルクは 0.8Nm となり従来品の 1.6 倍となった。また，⑤インバータモータからの伝播ノイズによる出力誤動作は 4.2 に示した専用 IC の構成とシールド構造によって対応した。

##### 4.4.1 耐 AC 外乱光性能向上

###### (1) 実現方法

光電センサは，図 5 に示す投光 LED から発する投光の光が検出物体によって変化し，その光 (受光) が受光レンズを通しフォトダイオード (PD) で検知し，増幅・フィルタ処理し，信号判定してオン/オフ信号として出力する。外乱光とは自ら発する投光以外の光を総称し，その光で誤ってオン/オフ出力することである。

外乱光の具体例として太陽光や白熱灯などの直流 (DC) 外乱光とインバータ蛍光灯や LED 照明などの AC 外乱光に分類される。DC 外乱光については IEC60947-5-2 (近接スイッチ) に測定方法・評価方法・判定条件が規定されているが AC 外乱光については規定がない。しかし昨今インバータ蛍光灯や LED 照明のようにインバータ回路で駆動する照明が一般に使われる状況となり，それに伴う性能向上が求められるようになった。

このため，AC 外乱光 (特にインバータ蛍光灯や LED 照明) に対する耐性向上を検討した。

光電センサが AC 外乱光によって誤動作するのは自ら発する投光の周期 (パルス変調光) に非常に近い周波数成分を持つため，自らの光と外乱光の区別がつかないために生じる。

このため，インバータ蛍光灯や LED 照明の周波数成分の調査を行い，10 k ~ 180 k Hz 程度の周波数成分であることがわかった。従来の光電センサの投光パルス変調方式 (図 7 従来方式 (■)) では，投光信号の周波数帯域が AC 外乱光 (▲) の周波数帯域と同じ帯域にあるため，フィルタで除去することができなかった。それに対して今回の投光パルス変調方式 (図 7 変調方式 (◆)) では高周波に変調することで，AC 外乱光 (▲) と異なる周波数帯に信号成分を持たせることができた。そして

受光器にその高周波変調と同じ周波数を通過帯域とする狭帯域のバンドパスフィルタ (BPF) (図 7, BPF 特性) を設け，AC 外乱光と受光信号を区別した。これより耐 AC 外乱光の性能を従来比で数倍向上させた。(特許出願中)

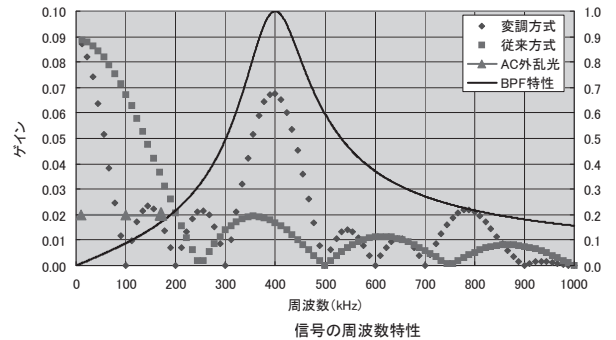


図 7. AC 外乱光耐性向上

###### (2) 効果

AC 外乱光の評価方法はインバータ蛍光灯や LED 照明と光電センサを正対させてセンサが誤動作する距離を測定する (図 8)。誤動作する距離が短いセンサほど AC 外乱光耐性が高いこととなる。透過形光電センサ HP7-T □ と競合 2 社との比較を実施した結果を図 9 に示す。3 社の中で HP7 が最も誤動作距離が短く AC 外乱光耐性が高い結果となった。また，この状態でワークレスチューニングを実施することにより誤動作距離を全くなくすることも可能となった。(図 9 (\*1)) お客さまの運転環境で，照明を後々設置した場合も安心して使用できると考えられる。

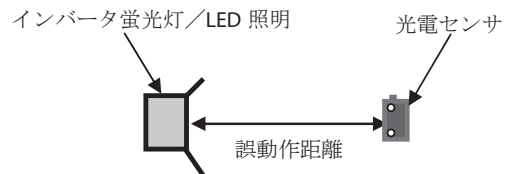


図 8. AC 外乱光測定方法

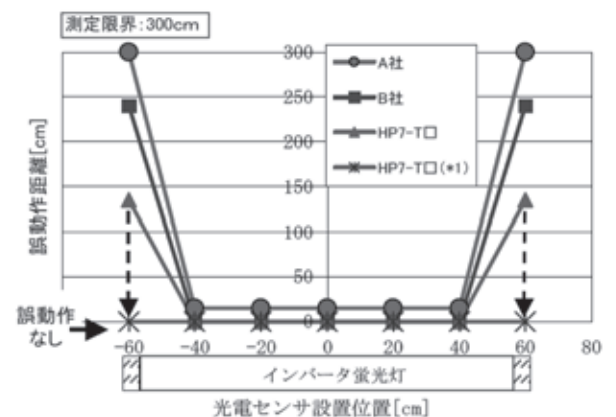


図 9. 透過形光電センサ競合比較

#### 4.4.2 透過形相互干渉防止

##### (1) 実現方法

透過形光電センサを密着して使用したい場合がある。例えば検出物の大きさ / 形状が異なる場合や薄物 / 厚物が混在して流れる場合安定して検出するために並列設置に取り付ける (図 10)。このとき問題になるのが相互干渉である。相互干渉とは並列設置された A 機, B 機において, A 機が発した投光信号と B 機が発した投光信号の区別がつかないために B 機の投光信号で A 機がオン / オフする事象である。従来品ではこれを回避するために透過形光電センサの投受光器を交互に設置するか, または相互干渉防止フィルタを装着する必要があった。しかし前者は配線処理が煩雑になる, 後者は検出距離が最大検出距離 1/2 以下になるという問題があった。

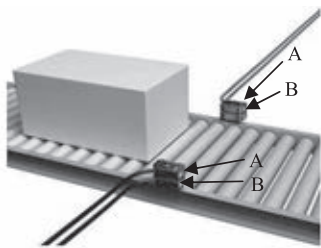


図 10. 透過形相互干渉の事例

A 機, B 機が誤動作するのは自らの光が区別できないことによる, このため A 機, B 機の投受光器がそれぞれ自らの光を識別する必要がある。

識別する情報として投光周期と投光パルス幅に着目した。投光器 A からは投光周期 A と投光パルス幅 A の投光が発せられ, 受光器 A では, A と判定する受光パルス幅を設定し, 受光信号の判別回路を設けた。同様に B 機に対しても投光器 B, 受光器 B の別条件を設定した。これによって, A 機, B 機はそれぞれ自らの光を判別できる状態となった。A 機は標準タイプ, B 機は異周波タイプとして用意した。

(特許出願中)

##### (2) 効果

密着した並列設置でも最大検出距離 (15m) での使用が可能となった。このため倉庫の搬入口などの広い間口の設置にも誤出力の心配なく使用可能となった。

#### 4.5 環境上の課題解決

##### 4.5.1 長期使用性

##### (1) 実現方法

3.3 (1) に示した長期使用性で明確になった課題のうち, 投光 LED 以外はセンサ構造 (4.2) で対応したのでここでは投光 LED について説明する。投光 LED はセンシングするための重要な部品であり, 通常時間経過とともに光量が低下する。この部品は部品選定のための試験方法 (高温高湿通電試験, 低温試験, 温度サイクル試験) を確立し, 判定条件を設定した。その結果より高輝

度 4 元素 LED (InGaAlP) を選定した。従来の 3 元素 LED (GaAlP) に対して, 光量低下は約 4 倍改善され, 10 年相当で 5% 程度の光量低下となる大幅な改善となった。

##### (2) 効果

有寿命部品である投光 LED は 10 年目の距離換算で約 97.8% (2.2% 減) となり, 製品耐用寿命の 10 年を実現することができた。

##### 4.5.2 省エネルギー性

##### (1) 実現方法

3.3 (2) に示した省エネルギー性を実現するため, 光電センサの低消費電流化の検討を実施した。光電センサの電流消費の多い箇所を特定し, 4 つの方策を実施した。①投光電流の削減: 投光 LED に高輝度タイプを選定し, 少ない電流で光量を確保した。②電圧駆動による削減: ベース電流が不要な MOS トランジスタで周辺部品 (表示 LED, 出力トランジスタなど) を駆動できるように専用 IC の駆動回路を変更した。③専用 IC の消費電流削減: BiCMOS (Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスを使用することで消費電流を小さくした。④新バラツキ設計の導入: 消費電流を求める計算式をたて, 構成要素をシミュレーションするモンテカルロ法を用いて, 適切なマージンでの設計とした。この結果, リフレクタ形の消費電流が従来形最大 30mA に対し, 最大 14mA を実現した。

##### (2) 効果

流通センターなどのコンベアラインなどには 1000 台単位で光電センサが使用される。仮に 1000 台使用しているとして従来品のセンサと電力消費量および CO<sub>2</sub> 排出量の比較した結果を表 3 に示す。年間電力消費量で約 2300kWh 削減, CO<sub>2</sub> 排出量で約 1.3 t の削減となった。

また, 波及効果として光電センサを駆動する DC 電源ユニットの駆動容量が半減となり供給電源のコストダウンとなり, またセンサバスなどに接続できるセンサ数を倍増することが可能となり, お客さまのトータルコスト削減にも寄与することが可能となった。

表 4. 消費電力 / CO<sub>2</sub> 排出量比較

	消費電力 (Wh)※1	年間消費 電力 (kWh)※2	CO <sub>2</sub> 排出量 (ton)※3	年間電力費 (円)※4
従来品	720	4320	2.4.2	86,400
HP7-P□□	336	2016	1.13	40,320
削減幅	▲ 384	▲ 2304	▲ 1.29	▲ 46,080

※1: 消費電力 = 消費電流 × 電源 24V × 1000 台

※2: 年間消費電力 = 消費電力 × 20 時間 / 日 × 300 日

※3: CO<sub>2</sub> 排出量 = 年間消費電力 × 0.000559 (t-CO<sub>2</sub>/kWh)

※4: 年間電力費 = 年間消費電力 × 20 円 / kWh

2010 年度の国内電力事業者の平均値 (1)

## 5. おわりに

本製品の開発では、社会情勢、経済情勢の変化とお客さまの課題をとらえて、顧客価値を向上させる製品仕様を作り上げ、それを達成するための手段を開発して進めることができた。この結果、製品開発、生産、営業で一体感が生まれて、顧客への価値提供を可能とし、顧客中心の開発が実現できた。また、自動化設備を開発し、国内生産でも価格対応力のある製品とすることができた。今後も顧客価値を向上のための新たな技術開発を進めたいと思う。

### <参考文献>

- (1) 環境省のサイトより引用  
2010年度の国内電力事業者の平均値  
<http://www.env.go.jp/>
- (2) 計測と制御, 第51巻, 2012年9号,  
アンプ内蔵型光電センサ HP7 シリーズ

### <著者所属>

鈴木 慎一郎	アドバンスオートメーションカンパニー 開発2部
橋川 寿明	アドバンスオートメーションカンパニー マーケティング部



# エネルギー需要動向管理システムの開発

## A Data Collection and Management System for Trends in Energy Demand

アズビル金門株式会社  
開発部製品開発室

本山 健一  
Kenichi Motoyama

アズビル金門株式会社  
開発部製品開発室

設楽 裕也  
Yuya Shidara

### キーワード

ガスメーター, 負荷計測計, 通信 (FOMA/PHS/LAN), 自動検針, エネルギー管理

ガス大口需要家のエネルギー需要動向を把握し、無線通信などを通じてガス需要量の収集・管理を行うセンターシステムを開発した。電池駆動で導入・管理が容易で、小規模な自動検針を可能とする技術について報告する。

We have developed a centralized system to better understand trends in energy demand by major gas consumers. The system can collect and manage data on gas demand through wireless communication or other means. This paper reports on battery-driven technology that is easy to install and manage, making small-scale automatic meter reading possible.

## 1. はじめに

1995年のガス事業法改正から、段階的に規制緩和が進み、2007年には10万立方メートル以上の大口需要家へのエネルギー供給が自由化された。

これにより、エネルギー間競争、さらには新規事業者の参入を含めた事業間競争も激しくなっている。

このためには、単純なコスト競争ではなく、需要家の信頼を得て顧客満足度の向上に努める必要がある。

そのための方法の一つとして、一般社団法人日本ガス協会 地方技術開発テーマとして、エネルギー需要動向管理システムの開発を行った。

このような管理システムは従来であれば、大掛かりなものになり、導入・運用コストが非常に大きくなる傾向があるため、当社では導入・運用コストを抑えるべく、電池駆動で無線通信のシステムを採用した。

本論文ではエネルギー需要動向管理システムの電池駆動で導入・管理が容易で、小規模な自動検針を可能とする技術に関して紹介する。

## 2. エネルギー需要動向管理システム

都市ガス需要量の拡大と共に、大口供給先のエネルギー市場が自由化となり、需要家との継続的な取引のために、新たなツールが必要となっていた。

需要家への情報提供による接点の増加が必要であり、提案営業を行ううえでガス使用量の詳細な把握が必要であった。

それにより、新たな料金プランの検討やガス機器の最適運転の提案などが可能となる。

また、都市ガス負荷量把握により、供給管理の基礎データを把握することで、需要家への安定供給がはかれるものと考え、エネルギー需要動向管理システムを開発した。



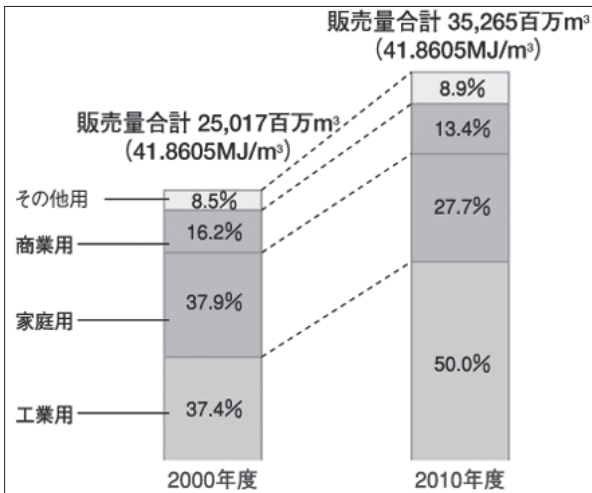


図1. 都市ガス販売量用途別

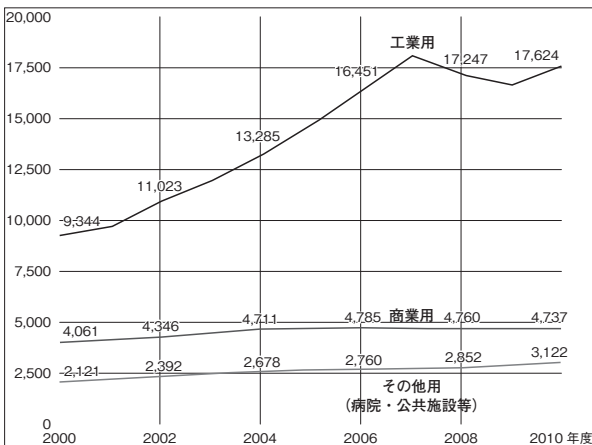


図2. 業務用ガス販売量推移

### 2.1 負荷量調査方法

都市ガスの負荷量調査のために、従来から負荷計測器を使用する。

負荷計測器はパルス発信器付ガスメーターからの流量パルスをデマンド契約により1時間ごとに計算し、時間帯における負荷量の調整・分散や、時間帯によるガス単価の割引を行うために使用する。

また、デマンド契約の計算以外に、ロードサーベイデータとして、1時間ごとの負荷量の計測・記録を行っている。

このロードサーベイデータを利用して都市ガス負荷量を調査する。



図3. パルス発信器付ガスメーターと負荷計測器

### 2.2 デマンド契約とは

主な契約種別には空調契約、業務用時間帯契約など多岐にわたり、契約によってガス使用可能量や料金体系が異なる。

そのため、需要家のガス使用量を詳細に把握し、情報提供により最適なデマンド契約の提案が必要となる。

#### (1) 空調用 A 契約

空調分野におけるガス利用拡大と負荷調整を推進する契約である。

1時間ごとの最大使用量とピーク時間（例：18時～21時）に使用可能なガス量を制限する契約。大口需要家に対して、単位時間当たりの使用量と一般家庭などでガスが多く使用される時間帯でのガス使用量を制限して、他の時間帯でのガス単価を割り引く。そのため、ピーク時間帯にあらかじめ決められた量を超えた場合はペナルティ料金が発生する。

#### (2) 業務用時間帯 B 契約

昼間時間から夜間時間への負荷移行を中心にガス利用の拡大と負荷調整を推進する契約である。

夜間割引契約と1時間ごとの最大使用量を制限する契約。大口需要家に対して、深夜時間帯に使用されるガス単価を割り引く。

### 2.3 ロードサーベイデータについて

負荷計測器は1時間ごとの都市ガス負荷量の計測を行っている。

これをロードサーベイデータとして、40日分の記録領域を持ち、通信により外部出力が可能である。

この通信は通信機能付ガスメーターに準拠し、データ数:8ビット、通信方式:半二重、通信速度:300bps (Bits Per Second) である。

従来はロードサーベイデータを取得するため、専用通信ケーブルとPC (Personal Computer) を使用して、設置場所で通信を行う必要があった。

設置場所での作業となるため、需要家の許可が必要となり、頻繁にデータを取得することができず、一度に40日分のデータを取得するため、通信時間が5分程度かかっていた。

これを解消するために、自動検針が求められた。

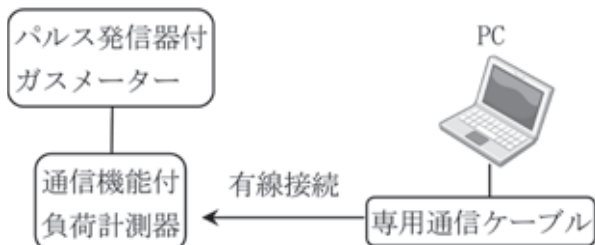


図4. 接続図

### 3. システム要件

一般の自動検針システムでは、一般需要家への導入を前提とした規模で設計されているため、大口需要家を目的とした場合には、1件当たりのセンターの構築コストが高価になる。

よって、センターの構築コストを安価にする必要がある。

有線回線が必要なシステムでは回線借用ができないと、多額の回線工事費が必要になり、電源のない現場では電源工事費も安くない。

そのため、端末の設置工事費を安価にする必要がある。

装置の設置場所により、最適な通信網が異なる場合がある。

これは、装置の設置台数によっても変化するため、通信網の混在、変更を可能にする必要がある。

従来の自動検針システムでは、そのシステムの中で検針や帳票作成などすべての処理が完結するように作成されるが、「需要家のエネルギー需要動向管理」という用途では、データの解析、需要家へのデータ提供など、データの自由な利用が重要になる。

そのためには、データの受け渡しを容易にする必要がある。

### 4. 開発要求と解決策

本システムでは、(1) 導入を容易にすることと、(2) 拡張性を確保することを必須条件として、開発を行った。

- (1) 導入を容易にする
  - ・センターの構築コストを安価にする
  - ・端末の設置工事費を安価にする
- (2) 拡張性を確保する
  - ・通信網の混在、変更を可能にする

- ・データの受け渡しを容易にする
- これらの要求に対し、解決策として、
- ・インターネットプロトコルの採用
  - ・携帯電話の電池駆動への対応
  - ・CSV (Comma Separated Values) 形式ファイルでの保存
- を用いた。

#### 4.1 解決策1 インターネットプロトコルの採用

インターネットプロトコル（以下、IP (Internet Protocol)）というのは、インターネットで利用されている、国際的に標準化された通信手順である。

IPの特徴をあげると、企業から家庭まで広く利用されているため、通信機器が安価で入手が簡単である。

ウィンドウズなどの汎用OS (Operating System) に標準で搭載されており、OS上で動作するアプリケーションは特殊な中間ソフトウェアを用意することなく動作が可能である。

規格が標準化されており、異なるメーカーの製品を相互接続することが一般的なため、メーカー間の接続性が高く保たれている。

プロトコルが階層化されているため、通信インフラへの対応が容易で、通信インフラに依存しないアドレス体系が使用されている。

OSI 7層	FOMA/PHS網	IP網
アプリケーション層	メーター電文	
プレゼンテーション層		
セッション層		
トランスポート層	TCP	
ネットワーク層	IP (IPv4) / ICMP	
データリンク層	PPP	Ethernet
物理層	RS-232C	10BASE-T

図5. OSI階層モデル

このような特徴があるため、本システムはIPを採用することで、各通信網 (FOMA (Freedom Of Mobile multimedia Access) 網, PHS (Personal Handy-phone System) 網, IP網) を経由して、インターネットへの接続が可能となった。

このIP通信を実現するためには、負荷計測器の通信をIP通信へ変換が必要のため、プロトコル変換器の開発が必要となった。

また、設置先の通信状況 (電波状況) に左右されることなく、最適な通信網が選択でき、異なる通信方式の混在も可能である。

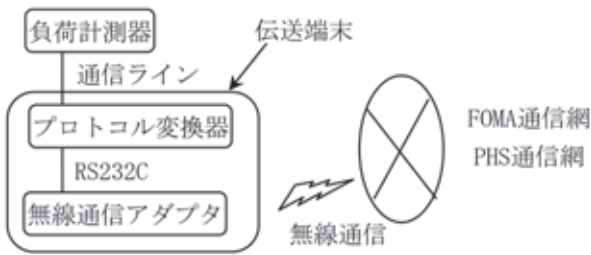


図6. 無線通信網

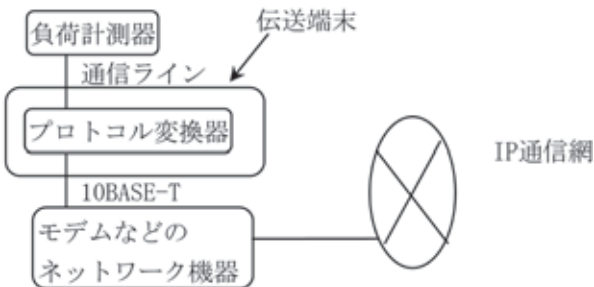


図7. 有線通信網

#### 4.2 解決策2 携帯電話の電池駆動への対応

自動検針に使用する無線インフラとしてはPHSが一般的である。しかし、PHSにはサービスエリアが狭く、特に工場など大口需要家の敷地内では電波の届きにくい事例が多々発生している。

多くの場合、携帯電話を使用すれば解決可能だが、携帯電話は待ち受け時の消費電力が大きく、電池駆動が困難という問題がある。

そこで、本システムでは負荷計測器からの発呼通信を基本としてシステムを構築した。

通信は負荷計測器が持つロードサーベイデータ発呼、定期検針発呼、アラーム発呼の機能で開始され、通信中のみ無線通信アダプタの電源を投入する。

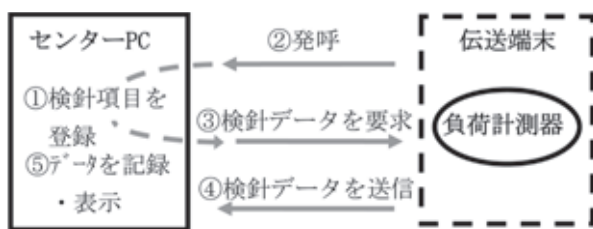


図8. 自動検針方法

自動検針方法は図8のように、①センターに検針項目をあらかじめ登録しておく、②負荷計測器からの発呼受信時に、③登録された検針項目を要求し、④要求された内容に基づき検針データを送信し、⑤データを記録・表示する。

また、負荷計測器に発呼する機能を設定していない場合に備え、伝送端末が周期的に発呼し、センターに登録

された検針項目の自動検針を実施する。

これにより、サービスエリアの広い携帯電話でも電池駆動が可能となり、設置工事費を削減することが可能となった。

#### 4.3 解決策3 CSV形式ファイルでの保存

データ解析、需要家へのデータ提供など、データの自由な利用を実現するためには、特定のソフトウェアに依存しない汎用性の高いファイル形式でデータが保存されている必要がある。

本システムではロードサーベイデータ、定期検針値、最大使用量、超過使用量、アラームデータなどをCSV形式ファイルで保存する。

これにより、Microsoft Excelなどの表計算ソフトや、Microsoft Accessなどのデータベースソフトでのデータ活用が可能となり、データの自由で幅広い利用を実現した。

図9. 月報データ (CSV編集後)

### 5. システム構成

本システムでは伝送端末とセンターソフトウェアの開発を行った。

その構成としては、まず、パルス発信器付ガスメーターと通信機能付負荷計測器を接続する。

この通信機能付負荷計測器を伝送端末に接続し、伝送端末は(株)NTTドコモのFOMA通信網、(株)ウィルコム等のPHS網、ケーブルテレビや光ファイバーで構築されたIP通信網などと接続する。

また、これら各種通信網はルータなどのネットワーク機器を介してセンターPCに接続され、負荷計測器が持つロードサーベイデータ、検針データ、アラームデータ、各種設定値などを取得する。

なお、検針データは事業者固有システムや需要家へのデータ提供を行いやすくするため、CSV形式データとして出力する。

これにより、都市ガスのエネルギー需要動向管理が可能となる。

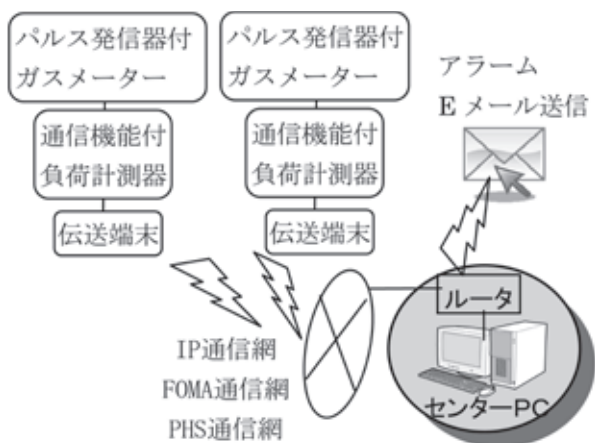


図 10. システム構成図

負荷計測器以外とも接続可能であり、接続可能な機器は、

- ・通信機能付負荷計測器
- ・通信機能付アナログ8ビット変換器
- ・通信機能付ガスメーター

である。

アナログ8ビット変換器は4-20mAのアナログ信号入力を持ち、各種センサーと接続可能である。

それにより、都市ガス負荷量以外にもガス圧、発電量、蒸気などのエネルギー管理を可能とする。

伝送端末と負荷計測器間の接続を無線にすることが可能であり、伝送端末と負荷計測器間の結線工事も不要となる。

この場合、無線親機1台に対して無線子機最大10台まで接続可能となる。



図 11. 無線機 (左:無線親機, 右:無線子機)

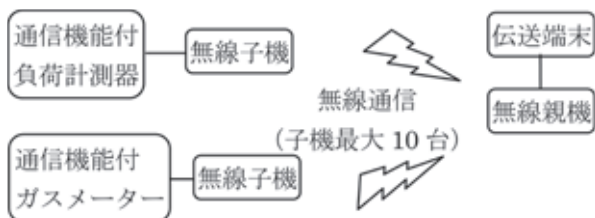


図 12. 無線接続

### 5.1 伝送端末について

伝送端末はデータリンク層相当部分に PPP (Point to

Point Protocol) とイーサネットを搭載し、ソフトウェア、ハードウェアを追加すること無く各種通信網接続端末機に対応できるようにした。

また、プロトコル変換器が共通なので、通信網の変更にも柔軟に対応することができる。

通信ポートを2点備えており、2台までの負荷計測器が接続可能である。

また、通信機能付ガスメーターなどの同一の通信機能を搭載している機器は接続可能である。



図 13. 伝送端末 (外観)

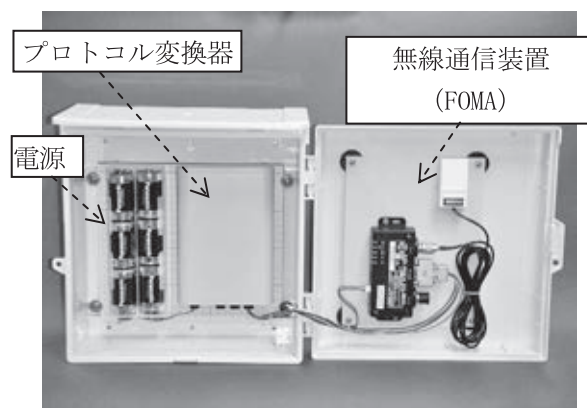


図 14. 伝送端末 (内蔵機器)

電源に関しては、電池駆動と AC (Alternating Current) 電源駆動の2モデルあり、設置現場の状況に応じて選択が可能となる。

プロトコル変換器は負荷計測器の通信と無線通信アダプタの IP 通信の異なる通信プロトコルを変換・中継し、双方向通信を可能とするための機器である。

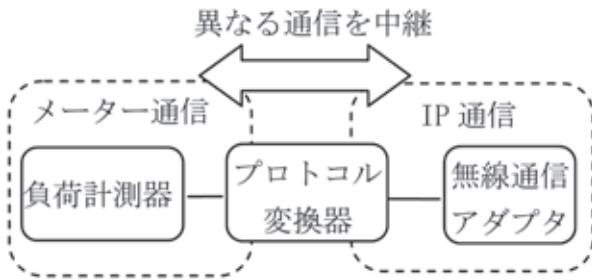


図 15. プロトコル変換

### 5.2 センターソフトウェアについて

PCからの操作により、FOMA通信網、PHS通信網、IP通信網の各種通信網経由で、通信機能付負荷計測器などの各種データの読み取り、アラーム情報の受信、表示を行う。

また、特定省電力無線伝送装置の1:n通信機能に対応し、屋内センサの有線接続困難や、伝送端末ポート数の不足に対応する。

さらに、そのデータをCSV形式のファイルに保存し、他のシステムへの受け渡しをすることができるほか、アラーム発生時に接点出力やメール送信を行う機能を有する。

センターソフトウェアは負荷計測器からの発呼通信を待つ、着呼通信を行う。

その際には、事前に通信予約した検針項目のデータを取得する。

メイン画面に結果を表示し、データ取得が完了した需要家情報が分かる。

図 16. メイン画面

アラームを着呼した際には、ポップアップ画面を表示する。表示内容は、アラーム内容、需要家名称、登録IDを表示し、どの需要家でアラームが発生したかわかる。

また、Eメール送信機能を有し、担当者などのEメールアドレスを登録することで、関係者にアラーム発生を通知することが可能である。



図 17. 通信予約画面



図 18. アラーム画面

取得データはデータベースに保存されて、CSV形式で出力される。

A	B	C	D	E	F	G	H
1	需要家+需要係+ID	検針年月日時分	積算値	使用量	節減分		
2	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 0:00	530000	100	60		
3	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 1:00	530100	105	60		
4	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 2:00	530205	110	60		
5	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 3:00	530315	115	60		
6	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 4:00	530430	120	60		
7	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 5:00	530550	125	60		
8	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 6:00	530675	130	60		
9	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 7:00	530805	135	60		
10	KMC600000000000000000000002	2006/6/27 8:00	530940	140	60		

図 19. ロードサーベイデータのCSVファイル

## 6. おわりに

本論文で紹介した技術により、電池駆動で導入・管理が容易な、都市ガスのエネルギー需要動向管理が実現しました。

本開発は、HEMS (Home Energy Management System), BEMS (Building Energy Management System), FEMS (Factory Energy Management System) などの各種エネルギー管理システムが存在するが、いずれも電力中心のシステムであり、ガスエネルギーを中心として、複数の通信網を相乗り可能としたシステムとしては日本初となります。

今後もさらなる天然ガス需要の拡大，BEMS や HEMS などのエネルギー需要動向管理のニーズの高まりとともに，本システムがガス事業の発展に貢献できるものと考えております。

## 7. 謝辞

本開発に当たり，一般社団法人日本ガス協会様，西部ガス株式会社様，静岡ガス株式会社様，広島ガス株式会社様には，多大なご協力をいただき，厚く御礼申し上げます。

### <商標>

FOMA は，株式会社 NTTドコモの登録商標です。  
Microsoft, Excel, Access は，米国 Microsoft Corporation の米国，日本およびその他の国における登録商標または商標です。

### <著者所属>

本山 健一	アズビル金門株式会社 開発部製品開発室
設楽 裕也	アズビル金門株式会社 開発部製品開発室



# インテリジェント地震緊急停止システムの開発

## An Intelligent Emergency Shutdown System in Case of Earthquake

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

林 功  
Isao Hayashi

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

古川 洋之  
Hiroyuki Furukawa

### キーワード

地震, BCP, 防災, SI 値, 液状化

昨今多発する地震を契機に、製造業における BCP (Business Continuity Plan: 事業継続計画) の動きが加速している。この中で地震対策強化策としては、地震発生時の人命および環境の安全確保や設備装置の保護のため、製造設備をいかに速やかに安全に停止させ復旧させることができるかが課題となっており、地震を検知し製造設備を停止して従業員の安全確保をする仕組みの見直しが行われている。本論文では、このソリューションである、「インテリジェント地震緊急停止システム」を開発したので報告する。また、東京ガス株式会社様に採用されているインテリジェント地震センサの東日本大震災の稼働実績を併せて報告する。

With earthquakes occurring more frequently in recent years, business continuity planning (BCP) has gained momentum in the manufacturing industry. The challenge for BCP in improving earthquake response measures is to suspend and restore manufacturing equipment operation quickly and safely, in order to ensure the safety of human life, the environment, and the equipment. Against the background of this challenge, a system for detecting an earthquake and suspending the operation of manufacturing equipment was a desideratum. This paper reports the development of the "Intelligent Earthquake Emergency Shutdown System" by our company as a BCP solution. It also reports on the performance of an intelligent earthquake sensor used by Tokyo Gas Co., Ltd., during the Great East Japan Earthquake.

## 1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災を教訓に、多くの企業では地震対策を見直している。その中の重要な課題の一つが、大地震発生時における設備装置の自動遮断処理による安全確保である。本論文では、この課題の背景と、課題解決のためのソリューションを技術的変遷や稼働実績も交えて報告する。

## 2. BCP (事業継続計画) としての地震対策

東日本大震災以降、「BCP」という言葉が企業において盛んに使われるようになった。9.11同時多発テロを始め、多数の死者を出した SARS など、現在の BCP 対象

は自然災害だけではなくなっている。しかし「日本において企業の事業継続を脅かす最大の脅威は地震である」<sup>(1)</sup>。

日本はユーラシアプレート、フィリピン海プレート、北米プレート、太平洋プレートの4つのプレートがぶつかり合う所に位置する世界に類例のない複雑な地殻の上に作り上げられている。歴史的に見ても約70年ごとに大地震災害が起きている事実がある。したがって企業としては、「地震は起こるもの」という前提で防災の準備をすることが重要になってくる。

京都大学防災研究所、林教授は日本で使われている「防災」という言葉の意味が変化してきていると指摘している。「防災は、かつては消防と同じ言葉のように使われていた。災害が起きるかどうかは神のみぞ知ること、起きたらそのときに対処するしかないという考えだった。ところが近年は被害を抑止する (Mitigation),



軽減する（Preparedness）という概念が加わり、災害時の脆弱性（Vulnerability）を取り除くという考え方に変わった<sup>2)</sup>。

ここで、顧客から得た情報を下に東日本大震災時に実際に起こった事象をあげてみよう。

- ・地震計の値を、人が見て判断し設備を停止させる仕組みになっていたが、揺れが大きすぎ冷静に判断できなかった（判断しても停止させることができなかった）。
- ・地震計が正常に作動しなかった（不作動、誤作動）。
- ・設備を上手く停止させられなかったのが原因で、再稼働に時間が掛かった。
- ・設備が火災、爆発した。
- ・緊急地震速報が東北地方には来たが、関東地方は来なかった。

大地震発生を想定したBCP策定には、ビジネスインパクト分析により事業継続に大きな影響を及ぼす要素を特定して最悪の被害を想定して対策を計画する必要がある。このBCP策定にあたっては上記に列挙した経験から、ある一定以上の地震が来たときには安全側に作動する信頼性の高い仕組みを作ることが、社員の安全を第一に考え、近隣住民の安全に配慮し、設備を保護する最良の方法であると考えられる。そしてこのことが、林教授が指摘するような「防災」であると考えられる。

### 3. 地震計の技術的変遷<sup>3)</sup>

いわゆる地震計と呼ばれるものには、地震動の波形を記録する「地震計」と、地震動の波形を記録するのではなく、地面が揺れたことを捉える「感震器」とに大別される。現在では、感震機能に特化したものを感震器、地震動の波形記録に感震機能も具備したものを地震計と呼ぶことが多い。

感震器の歴史は古く、少なくとも132年に張衡（ちょうこう、78年～139年、後漢代の政治家、科学者、文学者）が発明したとされる「地動儀」と呼ばれる、玉が落ちて地震を知らせる感震器に遡る。この「落球式」の原理は、現在でも使用されており長い歴史を有する。近代になって機械式地震計が登場した際には、地震計を起動させる装置として用いられた。その後その役割は不要となったが、より精度を上げた感震器が開発され、地震を検知して緊急通知をしたり装置を停止させたりして二次災害を防止するために使用されている。

地震計は、明治の初めに来日した外国の科学者たちが地震を体験して驚き、科学的に地震を捉えようとして地震計を作り出したことに始まり、その後日本人の研究者も出てきて改良を加えていった。

地震を捉えるために各種の試みが行われたが、「振り子」を使うことが現実的であるという結論に至り、振り子を利用した精密な機械仕掛けの地震計が製作された（ユーイング・グレイの円盤式地震計（1880年初頭）、

大森式地震計（1898年ごろ）、ヴィーヘルト式水平動地震計（1904年）、今村式2倍地震計（1911年。1923年の関東大震災を記録している）、石本式加速度計（1931年）など）。機械式地震計は、1880年初頭から1960年代ごろまで普及した。

機械式地震計は、針先や、てこの支点の摩擦に打ち勝って性能を向上するために大型化が図られ、1トンを超えるおもりを使用したものも登場したが取扱いが容易でなく、かつ計測分解能には限界があった。

その欠点を克服するために、振り子の動きを光学的な仕組みで捉えて印画紙に記録する地震計が登場した（ミルン水平振り子地震計（1894年）、ウッド・アンダーソン式地震計（1924年））。しかし、摩擦の問題は解消できたものの、現像する手間がかかる短所があったことと、その後登場する電磁式の利便性が高かったこともあり、1970年代ごろまでは製作されたものの、大きな普及には至らなかった。

電磁式は、同じく機械式地震計の摩擦の問題を克服するために、コイルを磁場の中に置き地震動を電圧の変化に変えることで記録をする方式である（ガリッチン式地震計（1907年）、59型電磁式地震計（1959年））。当初は地震計のコイルの起電力で直に電流計を動かして記録する方法をとっていたが、後のエレクトロニクスの発達により増幅器が使われるようになり、計測分解能が数千倍から数万倍に向上した。また、地震動をいったん電気信号に変えれば、記録データの保存性もよく、かつデジタル化によるデータ処理も容易なことから急速に普及し、現在ではほとんどの地震計が電磁式になっている。

1990年ごろからは、マイクロプロセッサ技術を応用してデジタル回路を組み合わせて記録する地震計が登場してきた。マイクロプロセッサ技術が劇的に向上していく中、小型・高精度・高機能な地震計が実現できるようになった。地震の震度は、揺れに対する人の感覚や地震動の建造物と自然界への影響の大きさを表す尺度であり、従来は体感や被害の程度から人が決めていたが、1995年兵庫県南部地震を契機に、客観性や速報性が一層強く求められるようになり、従来の震度階（旧震度階：8段階）から、震度を機器により計測（計測震度）する方式に対応した新震度階（10段階）に1996年に変更された。このことに対応して1996年に初の計測震度計が登場した。このことは、マイクロプロセッサ技術の向上により、複雑な演算処理が高精度かつ高速で行えるようになったことが大きく貢献している。

2000年前後からは、マイクロプロセッサベースの地震計はさらに発展し、従来の地震計測・観測を中心とした利用法から、制御に応用できる小型・高機能かつ高信頼かつ、取扱いが容易な“センサ”型の地震計（地震センサ）が登場し、従来の少数点在の観測網から多点観測網が実現できるようになり、ガス供給網や鉄道網、道路網などの大規模な社会インフラの管理・制御用として発展している。さらに一般の工場や事務所などの二次災

害防止用としての地震警報装置や自動緊急遮断装置への活用が進んでいる。その最先端の地震センサが、インテリジェント地震センサ SES シリーズである。

#### 4. インテリジェント地震センサ

インテリジェント地震センサ SES シリーズ (SES50, 51, 55, 60) は東京ガス株式会社様と共同開発を行った製品である。インテリジェント地震センサは東京ガス株式会社様開発の最先端の都市ガス供給地震防災システム SUPREME に約 4,000 台が使用されており、1998 年のシステム稼働開始以来 14 年間の稼働実績において、誤遮断を引き起こすようなセンサの誤動作は発生していない。また、他のガス会社、プラント、工場などを合わせると 9,000 台を超える販売実績があり信頼性の裏付けとなっている。

現行モデルのインテリジェント地震センサ SES60 は小型 / 低価格 / 高機能をコンセプトに開発され、高さ 113mm のケースに高精度のサーボ型加速度センサを 3 個搭載している。SES60 は地震被害推定に用いられる加速度、SI 値<sup>(4)</sup> (Spectrum Intensity)、計測震度相当値 (加速度と SI 値を使った計測震度の相関式により算出した値) の演算および液状化判定機能<sup>(5)</sup> を有しており、計測と制御に利用可能である。また、記録時間 2 分間の加速度波形を 10 波形記録することができ地震波形の解析が可能である。写真 1 に SES60 の外観を示し、表 1 に主な仕様を示す。

SES60 の高い信頼性を維持するため内部回路の常時診断を行っており、メモリ (ROM, RAM, EEPROM) 異常、AD コンバータ異常、内部電源電圧異常、感震出力異常、温度異常などの検出が可能である。また、メンテナンスモードに移転することにより加速度検出部を物理的に動かし診断を行う加速度センサの自己診断機能がある。以上の診断結果により異常が検出された場合は重故障状態となり、重故障警報を出力し、各計測および制御出力はシステムを誤動作させないように動作するよう配慮している。

さらには、地震波形とは異なるノイズ波形の特徴を識別し、誤った出力を出さないノイズプロテクト機能を有しており、ノイズプロテクト状態であっても波形記録は有効であるため、波形を解析することでノイズの発生



写真 1. 地震センサ SES60 外観

源を特定し対策に繋げることが可能となる。

表 1. 地震センサ SES60 仕様

項目	内容
加速度測定レンジ	±2000Gal (x,y,z軸)
測定分解能	1Gal (DC加速度計測にて)
計測加速度周波数 (-3dB)	DC-30Hz
加速度サンプリング	10ms
定格電圧	DC12V±10%/DC24V±10%
消費電力	5W以下 (4~20mA出力含む), 400mA以下
感震出力	リレー 1a
液状化出力	NPNオープンコレクタ
重故障出力	NPNオープンコレクタ
軽故障出力	NPNオープンコレクタ
4-20mA出力	2ch, カレントソース SI値, 合成加速度, 計測震度相当値より選択
診断入力	フォトカプラ入力カレントソース
RS-485通信	3線式, 19200bps
波形記録	120s×10波形 (10msサンプリング)
精度保証温度	周囲温度: 0~+50℃ (ただし, 凍結しないこと)
使用温度	周囲温度: -10~+60℃ (ただし, 凍結しないこと)
防爆規格	Exd II BT4 (耐圧防爆構造)
防水・防じん性	IP67 (水中1m, 30min) JIS C0920 防浸形 (金属製ケーブル配管部は除く)
質量	1.8kg
付属品	耐圧バックセット ケーブルグランドセット 六角レンチ 電池: (寿命通電時10年以上, 非通電時6カ月 20℃にて)
別売品	パソコンローダ (SLP-SE6)

#### 5. 東日本大震災での実績<sup>(6)(7)</sup>

東京ガス株式会社様では、約 4,000 箇所、約 0.9km 四方に 1 箇所の地区ガバナ (主に一般家庭向けの供給圧力に整圧するガス供給設備) にインテリジェント地震センサ SES シリーズが設置されており、地震観測およびガスの供給停止制御を行っている。東日本大震災の際には azbil 製のテレメータ DCX350 を使って約 5 分間で全域の地震情報を収集し、地震発生後約 10 分で地域ごとのきめ細かい被害状況を把握できた。このときの SUPREME が観測した SI 値の分布を図 1 に示す。また、図 2 に地区ガバナの制御システムを示す。

さらに約 10 分後には SES60 を使った液状化の発生状況の推定も完了している。SES60 の液状化検知機能は液状化発生の波形パターンを識別し判定を行うものであり、直接水位を計測するセンサのようなボーリング工事が不要であるため、多くのポイントでの計測が実現できた。今回の液状化判定の結果を図 3 に示す。実際の液状化発生と SES60 の液状化判定結果を比較すると表面波による長周期成分の影響による相違は僅かにあったが、約 20 分間で液状化の傾向をとらえることができたのは非常に有益であると考えられる。



図1. SUPREME 観測画面

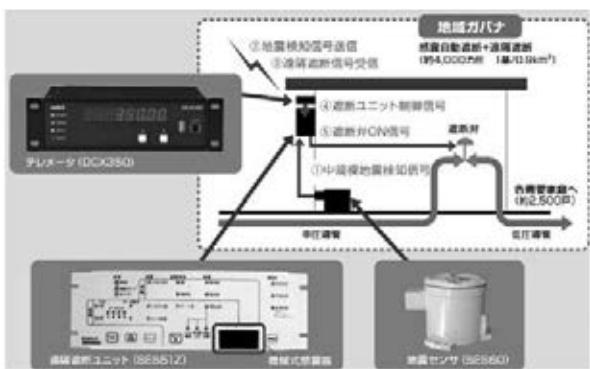


図2. 東京ガス様 地区ガバナ制御システム

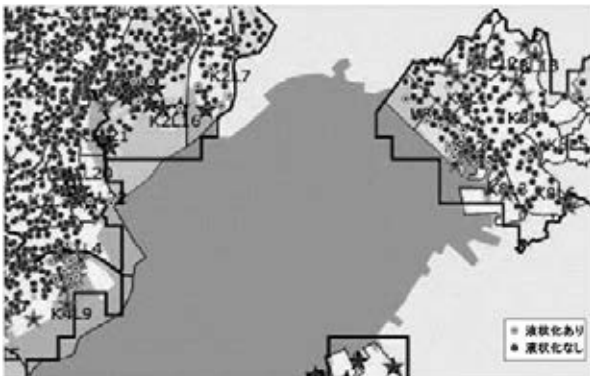


図3. SUPREME 液状化判定結果 (東京湾北部)

また、地区ガバナのうち14基はSI値が40kine (cm/s) または50kineを超えたため、インテリジェント地震センサーと機械式感震器を搭載した遠隔遮断ユニットSES51Zの両方の閾値設定を上まわり冗長性制御により自動遮断を行った(図2)。

このことより、約4,000台の地震センサーが地震の規模に応じて正常に動作し、東京ガス株式会社のガス供給システムの安全性を確保できたことが証明された。

東京ガス株式会社の日立支社構内に設置された地震センサーが記録した東日本大震災の本震の波形を図4に

示す。日立市においては、最大SI値が70kineを記録したため、東京ガス株式会社様が定める保安規程に基づき、日立支社供給区域の全域で供給停止を行い、供給停止戸数は30,008戸を数えた。東京ガス株式会社様ではSUPREME および地区ガバナの制御システムにより、震災時における迅速な対応が実現でき、お客さま(ガス利用者)の安全を確保し、二次災害を引き起こすことは無かった。

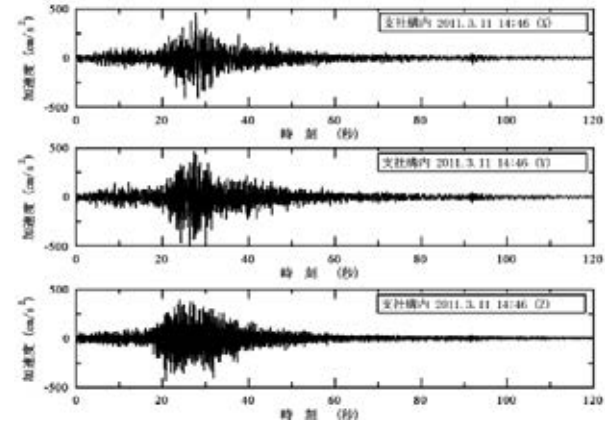


図4. 東日本大震災地震波形(東京ガス株日立支社様)

## 6. インテリジェント地震緊急停止システム

地震発生時に局所的なガス遮断を行うアプリケーションとは異なり、コンビナートの大規模プラント全体を決められた手順で安全・安定に遮断するための地震判定システムにおいては、誤作動(地震が発生していないのに地震と判定してしまうこと)と不作動(地震が発生しているのに地震と判定しないこと)を極力少なくするシステム設計が必要である。

1系統のシステム(非冗長システム)では、一つの誤作動がシステムの誤作動につながり、一つの不作動がシステムの不作動になるため、地震センサーや論理演算回路の冗長化が考えられる。

しかし、2系統だけを用いた「直列システム」や「並列システム」では、たとえば「直列システム」の場合、どちらかの系統が不作動状態となったとき、地震判定が正しく出力されない。また、「並列システム」の場合、どちらかの系統が誤作動したとき、地震判定が誤って出力されてしまう。このためこれらのシステムでは誤作動、不作動の問題を同時に解決することはできない。

これに対して、3系統による多数決(2 out of 3)システムでは、どの系統の判定が正しいかを高い精度で判断することができる。この判定結果を用いることにより、一つの系統が誤作動をしても、不作動をしても、システムの地震判定出力に影響を与えることが極めて少なくなる。

そこで、「インテリジェント地震緊急停止システム」(図5)では、地震センサーから論理演算回路、そしてDO

出力まですべてが2 out of 3 の3重化された構成を採用したシステムとした。さらに、入出力は3重化されたカードをバックアップ冗長できる構成として、活線メンテナンスを可能とした。

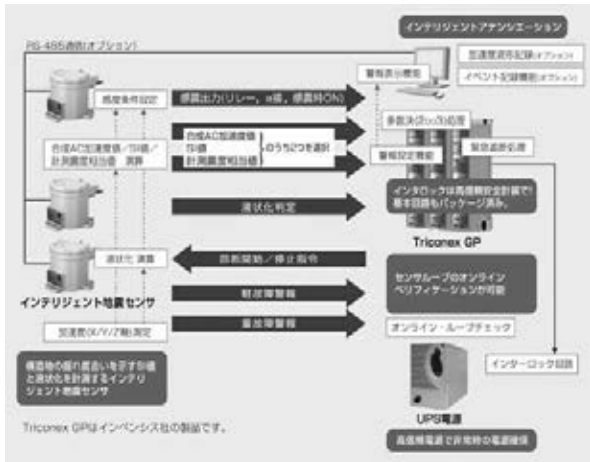


図5. インテリジェント地震緊急停止システム

### 6.1 高信頼コントローラによる地震判定処理

インテリジェント地震緊急停止システムでは、論理回路処理部として、インベンシス社製の3重化高信頼化コントローラ「Triconex GP」（写真2）を採用した。Triconex GP は、ワンクラス上の高信頼運転を実現する安全計装システム用コントローラである。



写真2. Triconex GP 外観

Triconex GP の特長を以下に示す。

- ・誤作動と不作為を最小限に抑える TMR（3重化多数決方式）（図6）
- ・高速論理処理が可能
- ・堅牢なモジュール構造
- ・フィールド配線と入出力端の健全性確認を含む強力な自己診断
- ・プラント稼働中にフィールド配線ははずすことなく故障モジュール交換可能

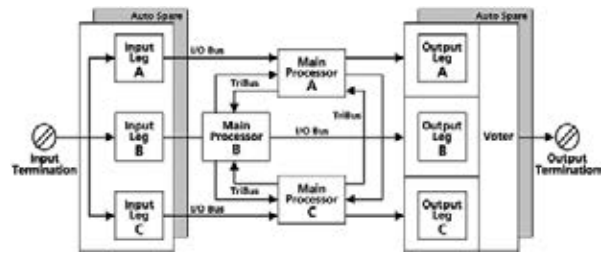


図6. Triconex GP 内部ブロック

### 6.2 地震判定処理の基本回路のパッケージ化

地震センサから送られてくる信号の多数決（2 out of 3）処理や、各種地震センサ測値の警報処理など、地震判定処理の基本回路はパッケージ化されているので、省エンジニアリングで導入できる。

### 6.3 センサループのオンラインチェック

地震センサやコントローラ単体の健全性はもちろん、さらにそれらの接続配線も含めたループ全体が正しく動作するよう保つことが重要である。従来、ループの動作チェックは定期点検時に手動による確認を行っていることが多いが、数カ月～数年ごとの動作チェックでは高信頼性を保つには必ずしも十分とはいえず、かつ手動による動作チェックには手間とヒューマンエラーによる誤動作リスクも生じる。「インテリジェント地震緊急停止システム」では、地震センサの点検とループ配線チェックも自動的に定期点検を行うことにより、システム全体の健全性を常に保つことができる仕組みを備えている。なお、自動点検の際には地震センサ2台の制御に切り換えてシステムとしての地震判定処理は継続しながら、休止した地震センサをメンテナンスモードに移行させ加速度センサの診断も順次実行している。このことでシステムに潜在している不作為状態を検出し、システムの信頼性をさらに向上させている。

「インテリジェント地震緊急停止システム」で、誤作動、不作為に最も強いシステム機能を提供する。

## 7. おわりに

大地震発生時における設備装置の自動遮断処理による安全確保が重要であることが、東日本大震災で再認識された。近代の地震計は明治時代の機械式地震計からマイクロプロセッサベースの地震計に発展してきたが、さらに制御に応用できるセンサ型地震計（地震センサ）が出現し、自動遮断処理を小型・高機能・高信頼でかつ取扱いが容易な「インテリジェント地震センサ」に発展し、多点観測網が実現できるようになった。そして東京ガス株式会社様のガス供給網の地区ガバナ制御システム用として、約4,000台の地震センサが配備され、東日本大震災でも二次被害防止に貢献し、その有効性が確認できた。さらに、その発展形として、大規模プラントの自動

遮断処理を行うための、不作動・誤作動を極力排除した高信頼な「インテリジェント地震緊急停止システム」を開発し導入が進んでいる。今後も地震センサのさらなる機能向上を図っていききたい。また、今回のシステムは大規模プラント向けに最適なソリューションであるが、中小規模製造設備や低リスク設備向けに最適なソリューションも提供していきたい。

## 8. 謝辞

東日本大震災の地震センサの稼働実績においては、東京ガス株式会社 防災・供給部 防災・供給グループの乗藤雄基様に貴重な情報と助言をいただきました。この誌面を借りまして感謝の意を表します。

### <参考文献>

- (1) 内閣府、中央防災会議「民間と市場の力を活かした防災力向上に関する専門調査会」企業評価・業務継続ワーキンググループ：事業継続ガイドライン、第二版、－わが国企業の減災と災害対応の向上のために－、2009年11月
- (2) 「防災からレジリエンスへ」、リスク対策.com、2011年9月
- (3) 「地震計の歴史」、国立科学博物館／日本館
- (4) 古川、田久保、築田、市田、清水、小金丸、中山：インテリジェント地震センサの開発、Savemation Review VOL.17、アズビル株式会社、pp2-11、1999年
- (5) 鈴木崇伸、清水善久、小金丸健一、中山渉：ゼロクロス周期を用いた液状化判定法の適用結果、土木学会第56回年次学術講演会、pp46-47、平成13年10月
- (6) 猪股渉、乗藤雄基：東北地方太平洋沖地震における東京ガスの対応について、日本災害情報学会第13回研究発表大会予稿集、pp103-106、2011
- (7) 乗藤雄基、猪股渉、石田栄介：2011年東日本大震災における液状化地区の推定、日本災害情報学会第13回研究発表大会予稿集、pp185-188、2011

### <商標>

SUPREME は、東京ガス株式会社の商標です。  
TRICONEX は、Invensys plc、関連会社または提携者の商標です。  
SES は、アズビル株式会社の商標です。

### <著者所属>

林 功 アドバンスオートメーションカンパニー  
マーケティング部  
古川 洋之 アドバンスオートメーションカンパニー  
開発3部

# バッチプロセス制御の新潮流 反応温度精密制御のための モデルベース B2B 制御の開発※

## New Trends in Batch Process Control Development of a Model-Based B2B (Batch to Batch) Control for Precise Reaction Temperature Control

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

小河 守正  
Morimasa Ogawa

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

佐々木 亨  
Tohru Sasaki

### キーワード

バッチプロセス制御, バッチ重合プロセス, 反応温度, プロセスモデル, 不安定システム, モデルベース制御, PID 制御, ゲインスケジューリング, フィードフォワード補償, Batch to Batch Control

現場密着型プロセス制御問題解決活動を通して、バッチ重合プロセスの反応温度を精密制御するモデルベース B2B (Batch to Batch) 制御システムを開発した。そのすべての設計ステップにおいて、厳密な重合プロセスモデルが中核になっている。たとえば、バッチ運転実績データを活用したこのモデルの適応調整は重要な設計要素である。この B2B 制御システムは、ゲインスケジューリング I-PD/II<sup>2</sup>-PD 制御、フィードフォワード補償および B2B モデル適応調整から構成される。その応用実績から、従来の制御システムと比較して、格段に優れた制御性能を示すことが実証されている。現在は、本技法の応用拡大を図るとともに、B2B 制御システム設計工具箱の製品化を進めている。

Through activity in the field to resolve actual process control problems, Azbil Corporation has developed a model-based batch-to-batch (B2B) control system for industrial batch polymerization processes. In order to precisely control the reaction temperature, several methods based on a rigorous polymerization process model were used at each design stage of the B2B control system. For example, adaptive adjustment of the model according to actual batch operation results is one of the most important features of the design. The B2B control system consists of gain-scheduled I-PD/II<sup>2</sup>-PD (I-PD with double integral) control, feed-forward compensation, and the B2B model modification mentioned above. In actual batch operations, B2B control provides superior control performance compared to conventional control systems. We are currently working to apply this methodology to a wider variety of systems, and to commercialize a toolbox for B2B control system design.

## 1. はじめに

azbil グループの理念にある「私たちはお客さまとともに現場で価値を創ります」のコア・コンピタンスの一

つとして、われわれは現場密着型プロセス制御問題解決を実践している。これは、プロセス制御に関するあらゆる技法を駆使して、現場の様々な課題を解決していく活動である<sup>(1),(2)</sup>。そこには、課題を一般化して、新たに実用的な解決技法をつくりあげる研究開発の側面もある<sup>(3)</sup>。

その成果の一つが、バッチ重合プロセスの反応温度を

※ 計測自動制御学会論文集 46-3 (2010) に発表したものを編集加筆した

精密に制御する、モデルベース B2B (Batch to Batch) 制御の実用技術開発である<sup>(4)</sup>。これは、一般性と実用性を重視し、厳密な重合プロセスモデルを核にした、PID 制御と B2B 制御による反応温度精密制御システムである。本技法はすでに、複数のバッチ・セミバッチ重合プロセスに適用し、いずれも優れた制御性能を得ている。

本論文では、バッチ重合プロセスの反応温度精密制御のための、モデルベース B2B 制御の枠組みと実現技法について述べる。最初に、バッチ重合プロセス制御の課題と反応温度精密制御の設計要件を明らかにする。次に、プロセスフローと B2B 制御システムの構成を説明する。そして、厳密な重合プロセスモデルと、それを逐次線形化したプロセス動特性モデルを導出する。その上で、プロセス動特性モデルに基づく、I-PD コントローラの PID 設定則と  $\Pi^2$ -PD コントローラ (I-PD コントローラに 2 重積分動作を付加したもの) の  $\Pi^2D$  設定則を与え、その制御実績を簡単に紹介する。最後に、バッチ運転実績データを活用して、重合プロセスモデルを適応調整する B2B 制御の方法を示す。

## 2. バッチ重合プロセス制御の課題と設計要件

バッチ重合プロセスの制御は、原料モノマーなどの定量仕込制御と反応温度制御だけと言ってもよい。反応温度を精密に制御することが要求され、その主目的は処方定められた目標値軌道への追値制御である。さらに、反応量や伝熱特性がバッチ経過時間と共に変化し、これらが持続性のランプ状外乱として作用するので、その補償も重要である。

### 2.1 反応温度精密制御の課題

このような特徴を持つ反応温度精密制御の課題は、次のようにまとめられる。

- (1) 反応温度制御には、PID 制御にフィードフォワード補償などの機能を付加した方式<sup>(5), (6)</sup>が多用されている。その PID パラメータなどは、バッチ運転を積み重ね経験的に調整している。しかし、本質的に非線形プロセスであり、バッチ経過時間と共にプロセス動特性が大きく変化するので、経験則だけで PID パラメータを適切に調整することは難しい。このため、運転担当者による手動調整が常態化している。なかには、PID 制御の性能を厳しく追求することをあきらめ、反応温度の周期変動を許容したオンオフ制御に置き換えることすらある<sup>(7), (8)</sup>。
- (2) 機能性ポリマーなどの新製品では、研究開発段階の試作から直ちに本格生産に入る早期製品化が求められる。特に初回バッチから処方どおりに運転することが望まれる。
- (3) 国内のバッチプロセスシステムに関する研究開発は、JBF (Japan Batch Forum) の活動に見られるように、バッチ管理システムの標準化<sup>(9)</sup>に力点が

置かれてきた。そして、バッチプロセス制御の技術開発には長い間取り組まれていない。このため、反応温度精密制御の標準的な設計技法はいまだに確立されていない。

- (4) プロセス制御の新しい研究成果を活用するには、連続重合プロセスを対象に開発された非線形モデル制御<sup>(10), (11)</sup>を、バッチプロセスに拡張することがまず挙げられる。さらに、一般化予測制御に基づいたセルフチューニング PID 制御設計法<sup>(12)</sup>などの、適応制御を応用する選択肢もある。また、製品品質の制御のために、バッチ運転実績を反復学習する機能を持つモデル予測制御<sup>(13)</sup>も提案されている。これらの研究は、一部を除いて、シミュレーションにより検証されたプロトタイプを与えるもので、実プロセスに適用できる段階には至っていない。

### 2.2 反応温度精密制御の設計要件

これらの課題を解決する制御システムの設計要件は次の 4 項目に集約できる。

- (1) 実用性と一般性を重視し、PID 制御とフィードフォワード補償を基本とする制御システムとする。
- (2) 厳密な重合プロセスモデルを核とする。これは非線形時変モデルなので、プラントテストとシステム同定では対応できず、解析的なモデリングによるしかない。この重合プロセスモデルをバッチ基準軌道に沿って逐次線形化し、PID 制御設計に用いるプロセス動特性モデルを得る。
- (3) PID 制御アルゴリズムは I-PD か PI-D で、プロセス動特性に基づくモデルベース PID 設定則により、ゲインスケジューリングすることが必須である。また、ランプ状外乱による定常偏差を取り除く 2 重積分補償も考慮する。
- (4) バッチ運転実績をフィードバックし、制御条件 (たとえば反応温度目標値軌道や制御パラメータ) を適正化する Batch to Batch Control (Run to Run Control と呼ばれる)<sup>(6), (14)</sup>が有用とされている。この考え方を取り入れた制御システムにする。

## 3. バッチ重合プロセスと B2B 制御システム

### 3.1 バッチ重合プロセス

バッチ重合プロセスのフローを図 1 に示した。攪拌機を備えた完全混合槽型反応器に、原料モノマーと溶媒を定量仕込み反応温度まで昇温する。そこに重合開始剤 (触媒) を定量加えると、数分以内の誘導時間 (induction period) だけ遅れて急激にラジカル重合反応が始まる。反応温度を一定に保つ主反応は数時間である。その後さらに反応温度を昇温し、重合開始剤を追加添加して反応を加速し、数時間で反応終点となる。昇温開始から生成ポリマーの抜き出しを完了するまでのバッチ時間はおおむね十数時間である。

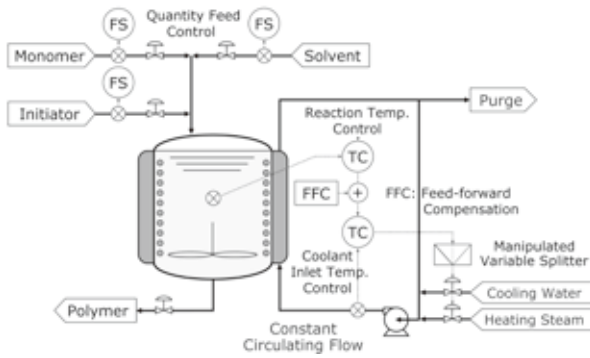


図1. バッチ重合プロセス

重合反応による発熱量は、反応器のコイルとジャケットを一定流量で循環する冷媒により除熱する。循環冷媒の入口温度を冷却水もしくは蒸気の供給量を調節することにより制御する。反応温度制御は冷媒入口温度制御とのカスケード制御による。さらに、バッチ経過時間に対応して冷媒入口温度の目標値を変更する、フィードフォワード補償 (FFC: Feed-Forward Compensation) を付加している。

### 3.2 B2B 制御システム

B2B 制御システムの構成を図2に示した。これは、重合反応の物質収支と熱収支を表す重合プロセスモデルを中核にして、次の四つの機能から成っている。

- (1) 重合反応速度定数を実験データからパラメータ推定する。
- (2) 反応温度を目標値軌道に一致させる冷媒入口温度をシミュレーションにより求める。それをフィードフォワード補償として実行する。
- (3) I-PD(もしくはII<sup>2</sup>-PD)コントローラのPID(PII<sup>2</sup>D)パラメータを、バッチ経過時間に対応して求める。それをゲインスケジューリングしながら、反応温度をフィードバック制御する。

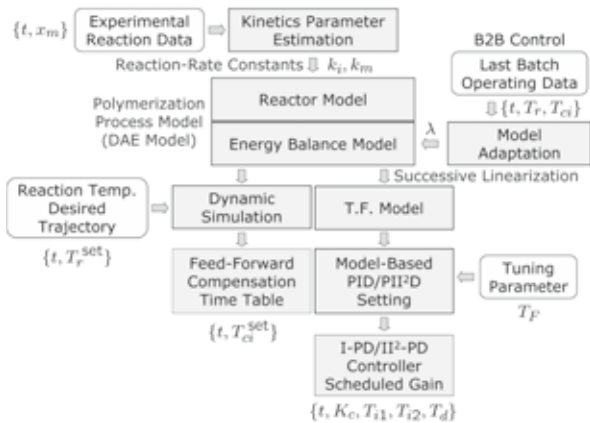


図2. B2B 制御システム

- (4) バッチ運転実績データを用いて、重合プロセスモデルを適応的に調整する。この適応モデルに基づいて、フィードフォワード補償パラメータとPIDパラメータのゲインスケジューリングを更新する。これにより B2B 制御を実現する。

## 4. 重合プロセスモデル

重合プロセスのダイナミクスモデルは、ラジカル重合の反応モデル (重合反応モデル) と熱収支モデルから成る。まず、重合反応モデル<sup>(15), (16)</sup> は、開始剤とモノマーの重量濃度 (残存量の仕込量に対する分率)  $x_i, x_m$  の時間変化を表すもので、それぞれの反応速度定数  $k_i, k_m > 0$  である。そして、反応温度  $T_r$  と冷媒温度  $T_c$  に関する熱収支モデルでは、反応液と冷媒の熱容量  $C_r, C_c$ 、重合反応熱 ( $-\Delta H_r$ )  $> 0$  による発熱量  $Q_r$ 、反応液と冷媒の熱交換による除熱量  $Q_{c1}$ 、循環冷媒による除熱量  $Q_{c2}$  である。このとき、バッチ経過時間  $t$  における重合プロセスモデルは次式のようになる。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} x_i(t) = -k_i x_i(t) \\ \frac{d}{dt} x_m(t) = -k_m \sqrt{x_i(t)} x_m(t) \\ \frac{d}{dt} T_r(t) = \frac{1}{C_r} (Q_r(t) - Q_{c1}(t)) \\ \frac{d}{dt} T_c(t) = \frac{1}{C_c} (Q_{c1}(t) - Q_{c2}(t)) \end{cases} \quad (1)$$

開始剤の反応速度定数は一定とし、モノマーの反応速度定数だけに温度依存性があるとする。このモノマー反応速度をアレニウス式 (Arrhenius rate expression) で表す。ここで、基準状態値  $T_{r0}, k_{m0}$ 、温度依存定数  $b_m$  である。

$$k_m(t) = k_{m0} \exp \left[ -b_m \left( \frac{1}{T_r(t)} - \frac{1}{T_{r0}} \right) \right] \quad (2)$$

重合レート  $R_m$  は、モノマー濃度の変化速度の絶対値にモノマー仕込量  $W_m$  を乗じた次式で与えられる。

$$R_m(t) = k_m(t) \sqrt{x_i(t)} x_m(t) W_m \quad (3)$$

熱収支モデルの発熱量と除熱量は次のようになる。コイルとジャケットを循環する冷媒の出入口温度  $T_{ci}, T_{co}$  の差が小さいので、冷媒温度はその出入口温度の算術平均とし等温とした。ここで、冷媒の比熱  $c_c$ 、循環流量  $f_c$  である。



$$\bar{Q}_r(t) = (-\Delta H_r) \bar{R}_m(t) \quad (4)$$

$$\bar{Q}_{r1}(t) = \bar{U}(t) \cdot A (T_r(t) - T_{r1}(t)) \quad (5)$$

$$\bar{Q}_{r2}(t) = 2c_r f_r (T_r(t) - T_{r1}(t)) \quad (6)$$

コイルとジャケットの伝熱面積  $A_c, A_j$  と総括伝熱係数  $U_c, U_j$ , 全伝熱面積  $A = A_c + A_j$  とする。それぞれの伝熱面積で加重平均した総括伝熱係数  $U(t) = (U_c(t) A_c + U_j(t) A_j) / A$  である。 $U_c, U_j$  はモノマー濃度などから推算できる。

数値例

特定品種について、反応温度を目標値に一致させる冷媒温度を、重合プロセスモデルのシミュレーションにより求め図3に示した。このうち、冷媒入口温度はフィードフォワード補償に用いることになる。

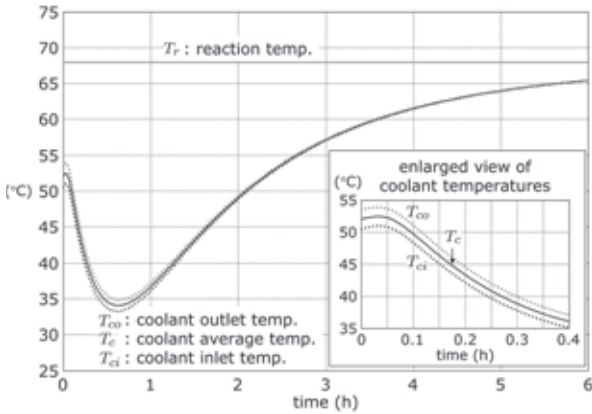


図3. 重合プロセスモデルシミュレーション

5. プロセス動特性モデル

I-PD/PI<sup>2</sup>-PD コントローラによる反応温度制御を設計するには、操作量：冷媒入口温度と制御量：反応温度の関係を表す、線形のプロセス動特性モデルが必要になる。そこで、重合プロセスモデルを逐次線形化し、状態方程式モデルを得る。それを伝達関数モデルに変換し、モデルベース PID/PII<sup>2</sup>D 設定則の導出に用いる。

バッチプロセスの状態変数は常に変化し、連続プロセスでは一般的な定常状態（すべての状態変数が一定の状態）が存在しない。そこで、バッチ経過時間に対応して与えられる反応温度目標値軌道に、反応温度を完全に追値制御できると仮定する。そのときの重合レートを式 (1) の重合反応モデルと式 (2), (3) から定まり、さらに総括伝熱係数も決まる。

そして、反応温度目標値軌道に沿った重合レートのもとで、式 (1) における熱収支モデルの左辺 = 0 となる状態、すなわち反応温度が目標値軌道に常に一致するよ

うに冷媒入口温度が調節されている状態を、仮想的な基準軌道と呼ぶことにする。この基準軌道に沿って熱収支モデルだけを逐次線形化することにより、反応温度のプロセス動特性モデルを得る。

たとえば、バッチ経過時間  $t$  の基準軌道における重合レートを  $\bar{R}_m$  のように表す。このとき、反応温度の微小変化  $\Delta T_r(t)$  による重合レート変化量  $\Delta \bar{R}_m(t)$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{R}_m(t) &= \frac{\partial \bar{R}_m}{\partial h_{ca}} \Delta h_{ca} = \frac{\partial \bar{R}_m}{\partial h_{ca}} \frac{dh_{ca}}{dT_r} \Delta T_r(t) \\ &= \bar{R}_m \frac{l_{ca}}{T_c^2} \Delta T_r(t) \end{aligned}$$

発熱量の変化量  $\Delta Q_r(t)$  は、 $\bar{Q}_r = (-\Delta H_r) \bar{R}_m$  なので、次のようになる。

$$\Delta \bar{Q}_r(t) = (-\Delta H_r) \Delta \bar{R}_m(t) = \frac{l_{ca} \bar{Q}_r}{T_c^2} \Delta T_r(t)$$

5.1 状態方程式モデル

逐次線形化したうえで、基準軌道からの変化量を  $\Delta T_r(t) \rightarrow T_r(t)$  のように書き換えると、状態方程式モデルは次のように表される。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} u(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{c} \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (7)$$

状態量  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ , 操作量  $u(t)$ , 制御量  $\mathbf{y}(t)$  は

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} T_r(t) & T_{r1}(t) \end{bmatrix}^T$$

$$u(t) = T_{r1}(t), \quad \mathbf{y}(t) = T_r(t)$$

であり、 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}, \mathbf{c} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$  はそれぞれ次のようになる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & -a_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_{ca} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = \frac{1}{C_r} \left( \bar{U} \cdot A - \frac{l_{ca} \bar{Q}_r}{T_c^2} \right), \quad a_{12} = \frac{\bar{U} \cdot A}{C_r}$$

$$a_{21} = \frac{\bar{U} \cdot A}{C_r}, \quad a_{22} = \frac{\bar{U} \cdot A + 2c_r f_r}{C_r}$$

$$l_{ca} = \frac{2c_r f_r}{C_r}$$

5.2 伝達関数モデル

状態方程式モデルから、伝達関数モデル  $P(s)$  は

$$P(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = c(sI - A)^{-1}b$$

$$= \frac{n_0}{d_2s^2 + d_1s + 1} \tag{8}$$

であり、 $n_0, d_2, d_1$  は次のようになる。

$$n_0 = \frac{a_{12}t_2}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}$$

$$d_2 = \frac{1}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \quad d_1 = \frac{a_{11} + a_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}$$

式(8) の分母多項式の根の逆数である時定数  $T_{p1}, T_{p2}$  は

$$\{T_{p1}, T_{p2}\} = \frac{a_{11} + a_{22}}{2(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}$$

$$\times \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}{(a_{11} + a_{22})^2}} \right] \tag{9}$$

となり、ゲイン  $K_p$  は次式で表される。

$$K_p = \frac{a_{12}t_2}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \tag{10}$$

動特性を支配する時定数を  $T_{p1}$  ( $|T_{p1}| > T_{p2} > 0$ ) とする。 $T_{p1}$  が負のとき不安定プロセスとなり、その条件は

$$a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} < 0 \tag{11}$$

である。このときは式(10) で表されるゲインも負になる。

重合反応の進行に伴い不安定から安定なシステムに移っていく特性を、伝達関数モデルで因果律を保つように表現するため、ゲインと時定数は絶対値を取り  $|K_p| \rightarrow K_p, |T_{p1}| \rightarrow T_{p1}$  として、正の値<sup>\*1</sup>にする。そして分母分子の負符号を消去する。これにより次式の伝達関数モデルを得る。分母第1項の±符号が、正のとき安定プロセス、負になると不安定プロセスである。プロセスむだ時間は無視する。

$$P(s) = \frac{K_p}{(T_{p1}s \pm 1)(T_{p2}s + 1)} \tag{12}$$

\*1 プロセスのゲインが正であることは、操作量：冷媒入口温度と制御量：反応温度の物理的な因果律から明らかである。

不安定条件を物理的に解釈するために状態方程式モデルに戻ると、 $a_{11} < 0$  のとき不安定プロセスになる。すなわち、

$$\bar{T}_r - \bar{T}_c - \frac{t_{cr} \bar{Q}_r}{\bar{T}_r^2} < 0$$

である。基準軌道  $\bar{Q}_r = \bar{Q}_{cr} = \bar{U}A(\bar{T}_r - \bar{T}_c)$  から  $\bar{U}A = \bar{Q}_r / (\bar{T}_r - \bar{T}_c)$  なので、不安定条件は次の簡単な関係式で与えられる。

$$\bar{T}_r - \bar{T}_c > \frac{\bar{T}_r^2}{t_{cr}} \tag{13}$$

このように、反応速度定数に温度依存性があり、反応温度と冷媒温度の温度差が上式の条件を満たすとき、重合反応プロセスは不安定になる。これは、重合レートが高く発熱量が大きい反応初期において、ポリマーの生成により総括伝熱係数が急激に低下するため、冷媒温度を下げ反応温度との温度差を大きくとり除熱量を確保している状態を意味する。

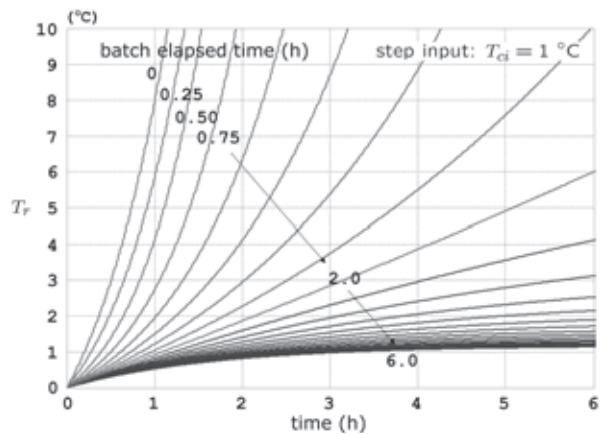


図4. 伝達関数モデルのステップ応答の推移

数値例

伝達関数モデルのステップ応答がバッチ経過時間と共に大きく変化する様子を、特定品種について図4に示した。バッチ経過時間0.25h刻みで、そのときのモデルパラメータを用い、冷媒入口温度を1°C階段状に上げたときの反応温度の時間変化を描いたものである。

重合反応開始後2時間までは不安定プロセス、その後は安定プロセスとなることがわかる。また、モデルパラメータのゲインと応答を支配する時定数は1000倍以上も変化する。しかし、ゲインが大きいときは時定数が長く、逆にゲインが小さいときの時定数は短い。このため、応答初期の立ち上がり速度（ステップ応答の時間15 min までの反応温度変化量）は、重合開始時と6時間後で7.5倍変わるだけで、変化速度の連続性も保たれる。これは、ゲインスケジューリングにより反応温度制御が可能であることを示唆している。

## 6. 反応温度精密制御

反応温度の精密制御システムを図5に示した。反応温度の目標値軌道に対応して冷媒入口温度を調整するフィードフォワード補償と、反応温度と冷媒入口温度のカスケード制御で構成される。

フィードフォワード補償則は、反応温度目標値軌道を与え、重合プロセスモデルによるシミュレーションにより、冷媒入口温度の時間パターンとして定まる。得られた結果を時系列テーブルとして制御システムに設定する。

以降では、I-PD/II<sup>2</sup>-PD コントローラによる反応温度制御のモデルベース PID/PII<sup>2</sup>D 設定則を与え、それによりゲインスケジューリングした制御実績を示す。

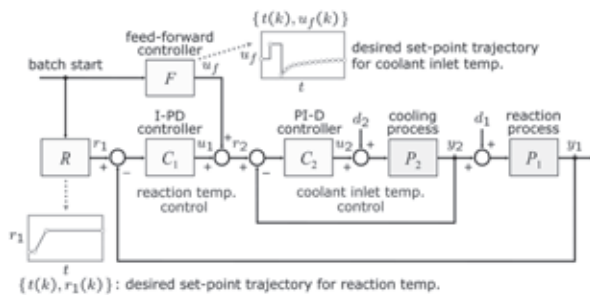


図5. 反応温度精密制御システム

### 6.1 I-PD 制御 PID 設定則

カスケード制御 2 次ループの冷媒入口温度制御は、混合プロセスが制御対象なので、非常に速い応答を示し動特性は無視できる。さらに、式 (12) の伝達関数モデルにおける、冷媒の熱容量による遅れの時定数は  $T_{p2} < 1 \text{min} \ll (T_{p1}/10)$  で無視できる。そして、プロセス動特性を次の 1 次遅れ特性とみなす。

$$F(s) \approx \frac{\tilde{K}_r}{T_{p1}s \pm 1} \quad (14)$$

I-PD コントローラの PID パラメータ  $\{K_c, T_i, T_d\}$ 、微分ゲイン  $1/\gamma$  とする。目標値  $r(s)$ 、制御量  $y(s)$ 、制御偏差  $e(s) = r(s) - y(s)$  とし、操作量  $u(s)$  は次式で表される。

$$u(s) = \tilde{K}_r \left( -y(s) + \frac{1}{T_i s} e(s) - \frac{T_d s}{1 + \gamma T_d s} e(s) \right) \quad (15)$$

その目標値応答特性  $W_c(s) = y(s)/r(s)$  は次のようになる。

$$W_c(s) = \frac{1}{1 + T_i s + T_i T_d s^2 + (T_i \gamma T_d \tilde{K}_r F(s))} \quad (16)$$

望ましい目標値応答特性  $W_d(s)$  を 2 次臨界制動応答とし、応答の速さを規定するチューニングパラメータ  $T_F$  を用いる。

$$W_d(s) = \frac{1}{(1 + T_F s)^2} \quad (17)$$

$W_c(s), W_d(s)$  の分母多項式の係数相等条件から、微分時間がゼロとなる制約のもとで、比例ゲインと積分時間が求まる。微分時間は経験的に  $T_d = T_i/8$  とする。この PID 設定則を表 1 に整理した。ここで、 $q = T_F/T_{p1} < 1$  である。

表 1. I-PD コントローラのモデルベース PID 設定則

	unstable process	stable process
$\tilde{K}_c$	$\frac{1}{\tilde{K}_r} \left( \frac{2}{q} - 1 \right)$	$\frac{1}{\tilde{K}_r} \left( \frac{2}{q} - 1 \right)$
$T_i$	$q(q-2)T_{p1}$	$q(2-q)T_{p1}$
$T_d$	$\frac{T_i}{8}$	$\frac{T_i}{8}$

短い時定数  $T_{p2}$  を無視できない場合は、次の直列補償型 PID アルゴリズムでまず設計し、その結果を並列補償型である I-PD アルゴリズムに等価変換すればよい<sup>(17)</sup>。これを簡単にするため不完全微分項は無視する。

$$\tilde{C}(s) = \tilde{K}_r \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left( 1 + \tilde{T}_d s \right) \quad (18)$$

この微分時間  $\tilde{T}_d = T_{p2}$  に設定すれば、{定常ゲイン 1, 時定数  $T_{p2}$ } の 1 次遅れ特性を、コントローラの微分動作項で極ゼロ相殺できる。

これにより、前述した PI 設定則の結果を  $\tilde{K}_c, \tilde{T}_i$  にそのまま適用する。そして次式により、I-PD アルゴリズムの PID パラメータに等価変換する。

$$\tilde{K}_r = \left( 1 + \frac{\tilde{T}_d}{T_i} \right) \tilde{K}_c$$

$$T_i = \tilde{T}_i + \tilde{T}_d \quad (19)$$

$$T_d = \frac{\tilde{T}_i \tilde{T}_d}{\tilde{T}_i + \tilde{T}_d}$$

### 数値例

伝達関数モデル数値例の特定品種において、チューニングパラメータ  $T_F = 3.0 \text{min}$  とした PID パラメータのゲインスケジューリングを図 6 に示した。高い比例ゲインが特徴で、バッチ経過時間が進むにつれ初期値 8.5 から増大していく。計測ノイズによる操作量の無用な変動を抑えるため、上限値 30 で飽和させる。積分時間は一定とみなしてよく 6.2 min である。微分時間は積分時間の 1/8 で 0.8 min とした。

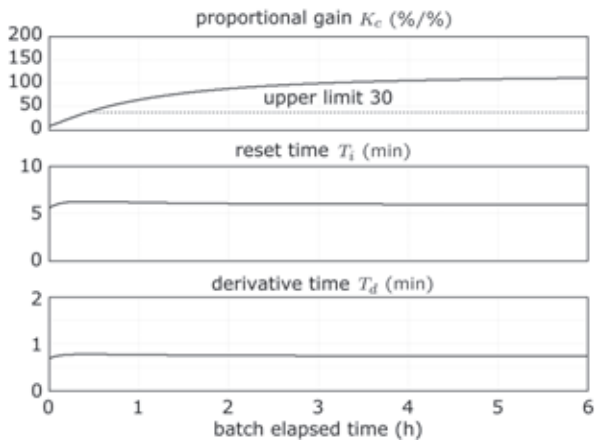


図 6. PID ゲインスケジューリング

**制御実績**

ある品種のゲインスケジューリング I-PD 制御による制御実績を図 7 に示した。フィードバック制御だけでも十分な制御性能が得られる。重合開始直後は、冷媒入口温度の低下が遅れるため反応温度は + 0.50℃ オーバーシュートするが、その後は目標値 ± 0.20℃ 未満の変動に抑えられる。これは、要求性能（目標値 ± 0.50℃ 以内）を十分に満たしている。

冷媒入口温度はいくぶん振動的である。これは、プロセスが不安定状態にあるとき、操作量を揺らし続けて制御量を安定化する動作であろうと推測している。あるいは、流出熱がないために、平衡状態のまわりで冷却と加熱を繰り返す、バッチ重合プロセス特有の現象とも解釈できる。これを抑えるため比例ゲインを小さくすると、外乱抑制性能が低下し、制御量の変動が増大することを確認している。

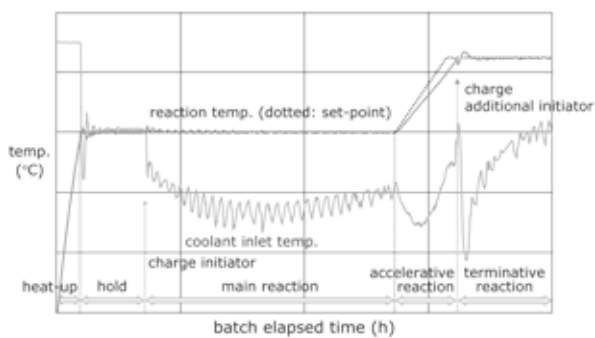


図 7. ゲインスケジューリング I-PD 制御実績

**6.2 II<sup>2</sup>-PD 制御 PII<sup>2</sup>D 設定則**

**II<sup>2</sup>-PD 制御の必要性**

このように、I-PD 制御は良い制御性能を示すが、それを注意深く観察すると、微小な定常偏差が生じていることがわかる。これはバッチ経過時間を通して、ランプ状外乱が作用していることによる。操作量変化を時間軸について上下反転したものが外乱に相当し、重合の進行

に伴う発熱量と伝熱特性の変化に起因する。図 7 の操作量変化を時間区分すると、複数のランプ状外乱の存在が明らかになる。

プロセスの伝達関数が原点に極を持たない場合、フィードバック制御システムがランプ状外乱にオフセットフリーとなるには、内部モデル原理から、コントローラは自身の極に、ランプ状外乱と同じ原点の 2 位極を含まなければならない<sup>(18)</sup>。すなわち、2 重積分動作が必要になる。

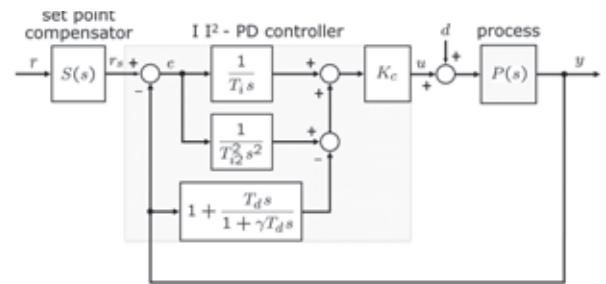


図 8. II<sup>2</sup>-PD 制御システム

II<sup>2</sup>-PD コントローラでプロセス  $P(s)$  をフィードバック制御するシステムを図 8 に示した。2 重積分動作による目標値応答の行き過ぎを抑えるため、目標値  $r(s)$  は目標値補償器  $S(s)$  を通し、その出力  $r_s(s)$  をコントローラに与える。外乱  $d(s)$  は操作量  $u(s)$  に加法的に作用するプロセス入力等価外乱とする。II<sup>2</sup>-PD コントローラは、積分動作と 2 重積分動作が制御偏差  $e(s) = r_s(s) - y(s)$  に作用し、比例動作と微分動作(微分ゲイン  $1/\tau$ )は制御量  $y(s)$  だけに働く。これにより、1 組の PII<sup>2</sup>D パラメータ  $\{K_c, T_i, T_{i2}, T_d\}$  で、目標値追従性と外乱抑制性を同時に満たす 2 自由度制御システムを構成する。

**PII<sup>2</sup>D 設定則**

プロセス伝達関数モデルとして式 (12) を用い、一般性のある PII<sup>2</sup>D 設定則を与える。ランプ状外乱は、持続時間  $t_r$  の間に操作量等価な外乱量  $d_r$  だけ、定速度  $a = d_r/t_r$  で変化する。

$$d(s) = \frac{\alpha}{s^2} \quad (\alpha = d_r/t_r) \tag{20}$$

この外乱に対する制御量の望ましい応答特性  $W_d(s)$  を一般化臨界制動応答とする<sup>(19)</sup>。制御システムの因果律を保つため、プロセス動特性モデルの相対次数  $r^{**2}$  に対して一般化臨界制動の次数  $n = r + 2$  とし、制御量応答をプロセスむだ時間だけ遅らせる。ここには、制御性能を調整する二つのパラメータがある。整定時間を決めるパラメータ  $T_F$  と、制御量の減衰比を規定するパラメータ  $\alpha K_p$  である。

※ 2s に関する分母多項式の次数と分子多項式の次数の差

$$W_d(s) = \frac{b(s)}{d(s)} = \frac{\alpha K_r T_F s^2 / \alpha}{(1 + T_F s)^n} e^{-T_L s} \quad (21)$$

ランプ状外乱に対する望ましい制御量応答を実現する PII<sup>2</sup>D 設定則を導く<sup>(20)</sup>。II<sup>2</sup>-PD 制御に内在する目標値フィルターを目標値入力側（制御偏差演算部の前）に出すと、コントローラを次式の PII<sup>2</sup>D コントローラ  $C_2(s)$  として PII<sup>2</sup>D 設定則を設計できる。

$$C_2(s) = K_r \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{1}{T_{i2}^2 s^2} + \frac{T_d s}{1 + \tau T_d s} \right) \quad (22)$$

外乱応答が望ましい制御量応答に一致する条件から、この PII<sup>2</sup>D コントローラは次のように定まる。

$$C_2(s) = \frac{1}{F(s)} \left( \frac{P(s)}{W_d(s)} - 1 \right) \quad (23)$$

これに、 $n = 4$  とした  $W_d(s)$  と  $P(s)$  を代入し、むだ時間を Maclaurin 展開近似すると、分数多項式表現は次のようになる。 $\alpha$  は無次元で、ランプ状外乱速度  $a$  が時間の逆数の次元  $\text{h}^{-1}$  を持つので、分数多項式の係数の次元はいずれも一致する。

$$C_2(s) = \frac{1 + n_1 s + n_2 s^2 + n_3 s^3 + n_4 s^4}{d_0 s^2 (1 + d_1 s + d_2 s^2 + d_3 s^3 + \dots)} \quad (24)$$

$$n_1 = 4T_F, \quad n_2 = 6T_F^2 \mp \frac{\alpha}{\alpha} T_F$$

$$n_3 = 4T_F^3 - \frac{\alpha}{\alpha} T_F (T_{F1} \pm T_{F2})$$

$$n_4 = T_F^4 - \frac{\alpha}{\alpha} T_F T_{F1} T_{F2}$$

$$d_0 = \frac{\alpha K_r T_F}{\alpha}, \quad d_1 = -T_L, \quad d_2 = \frac{T_L^2}{2}, \quad d_3 = -\frac{T_L^3}{6}$$

式 (22) の PII<sup>2</sup>D アルゴリズムの不完全微分項を無視したものと式 (24) を分母多項式で表し、係数相等条件から PII<sup>2</sup>D 設定則を得る。

$$K_r = \frac{n_2 - (n_1 - d_1) d_1 - d_2}{d_0} \quad (25)$$

$$T_i = \frac{n_2 - (n_1 - d_1) d_1 - d_2}{n_1 - d_1} \quad (26)$$

$$T_{i2} = \sqrt{n_2 - (n_1 - d_1) d_1 - d_2} \quad (27)$$

$$T_d = \frac{n_2 - [n_2 - (n_1 - d_1) d_1 - d_2] d_1}{n_2 - (n_1 - d_1) d_1 - d_2 - (n_1 - d_1) d_2 - d_3} \quad (28)$$

### II<sup>2</sup>-PD 制御シミュレーション

特定品種のバッチ重合開始から 6 時間にわたる、制御シミュレーションの結果を図 9 に示した。

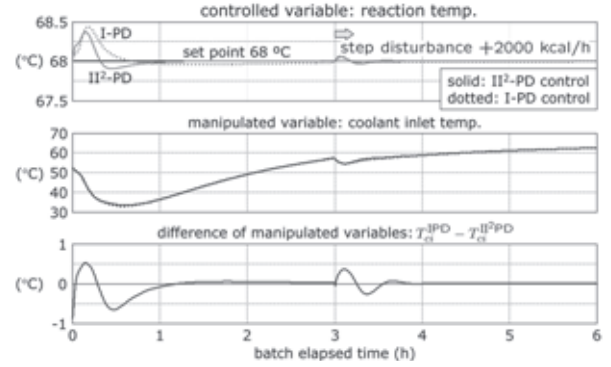


図 9. I-PD/II<sup>2</sup>-PD 制御シミュレーション

上段が制御量である反応温度。中段は操作量である冷媒入口温度制御目標値で、II<sup>2</sup>-PD 制御の操作量を実線、I-PD 制御のそれは破線で表した。下段には I-PD 制御と II<sup>2</sup>-PD 制御の操作量の差を示した。バッチ経過時間 3 h の時点で、そのときの重合反応発熱量の 30% に相当する発熱量増加外乱をステップ状に与えている。I-PD 制御のチューニングパラメータ  $T_F = 3 \text{ min}$  とした。II<sup>2</sup>-PD 制御では、整定時間調整定数  $T_F = 3 \text{ min}$ 、減衰度調整定数  $\alpha K_p$  は  $T_d \approx 0.1 T_i$  となるように数値的に求めた。

シミュレーションでは II<sup>2</sup>-PD 制御が優れた制御性能を示した。I-PD 制御と比較すると次のように言える。今後は実運転でその優位性と実用上の課題を確認していく。

- (1) 重合開始後の急激なランプ状外乱による反応温度の上昇は、I-PD 制御の  $+0.45 \text{ }^\circ\text{C}$  に対し、II<sup>2</sup>-PD 制御では  $+0.35 \text{ }^\circ\text{C}$  に抑えられる。さらに、目標値  $68 \text{ }^\circ\text{C}$  に回復する時間を  $1/2$  に短縮できる。
- (2) その後の緩やかなランプ状外乱に対して、II<sup>2</sup>-PD 制御は定常偏差なく目標値に追従するが、I-PD 制御ではバッチ経過時間  $1 \sim 3 \text{ h}$  の間  $-0.043 \text{ }^\circ\text{C}$  程度の微小な定常偏差が生じる。これは実運転でも観察されており、図 9 下段に示したように、I-PD 制御の操作量が II<sup>2</sup>-PD 制御のそれよりも僅か  $0.043 \text{ }^\circ\text{C}$  程度高いことに起因している。
- (3) ステップ状外乱に対して、II<sup>2</sup>-PD 制御はやや振動的な応答となる。これは、2 重積分動作により操作量がオーバーシュートするためである。

## 7. B2B 制御

ここでいう B2B 制御は、バッチ運転の実績データを用いて重合プロセスモデルを適応的に調整し、その結果をこれまで述べてきたモデルベース制御に反映するものである。同品種の実績データを使うので、重合反応モデルは固定し、熱収支モデルを適応させる。熱収支モデルの主な変動要因は、反応液粘度とコイル・ジャケット総括伝熱係数の推算誤差、さらに伝熱面の汚れによる総括伝熱係数の変化である。

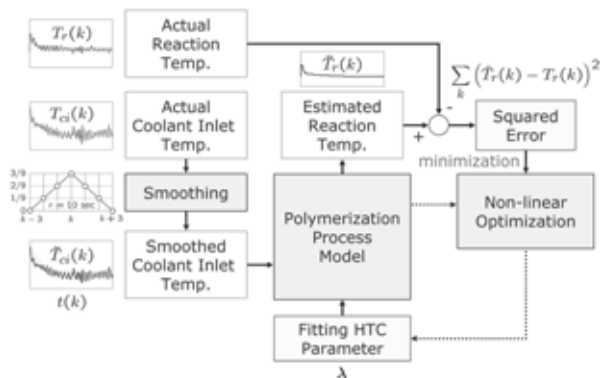


図 10. 重合プロセスモデルの B2B 適応調整機構

実績データとして、バッチ経過時間、冷媒入口温度、反応温度の時系列データ  $\{t(k), T_{ci}(k), T_r(k)\}$  を用いる。ここで、 $k$  はサンプリング周期  $T_s$  の時点を表す。平滑化した冷媒入口温度  $\hat{T}_{ci}(k)$  を重合プロセスモデルの入力とし、その出力である反応温度  $\hat{T}_r(k)$  を得る。その実績値との 2 乗誤差を最小とする非線形最適化問題を数値的に解き、重合プロセスモデルの伝熱特性適応パラメータ  $\lambda$  を得る。この一連の仕組みを図 10 に示した。

$$\min_{\lambda} \sum_k (\hat{T}_r(k) - T_r(k))^2 \quad (29)$$

適応パラメータ  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$  は次の意味を持つ。まず、総括伝熱係数  $U$  は反応液粘度  $\mu$  や攪拌機回転数  $N$  などにより変化する。その推算値  $\hat{U}(t) = h(\mu(t), N, \dots)$  をパラメータ  $\lambda_1$  で調整し、 $U(t) = \lambda_1 \hat{U}(t)$  とする。次に、反応液の粘度はそのモノマー濃度  $x_m$  により変わる。これを、初期粘度  $\mu_0$ 、モノマー濃度依存定数  $\mu_1$ 、 $n$  にパラメータ  $\lambda_2, \lambda_3$  を用いて、 $\mu(t) = \lambda_2 \mu_0 + \mu_1 (1 - x_m(t))^{\lambda_3}$  のように近似する。

実施例を図 11 に示した。上段は初期の重合プロセスモデルのシミュレーションと実績データを対比したもので、下段がパラメータ適応後の同様の比較である。反応温度はもとより冷媒入口温度のシミュレーション結果が、実績データに最小 2 乗の意味で接近していることがわかる。このときの適応パラメータは、総括伝熱係数を 1.3 倍に、反応液の初期粘度を 1/7.5 にするものとなった。

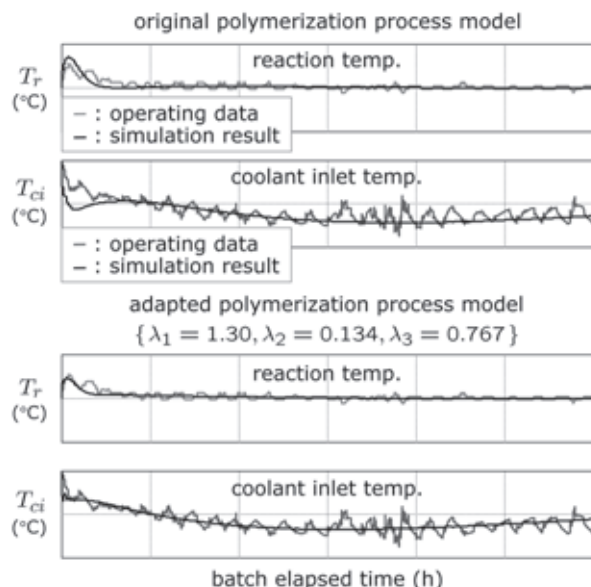


図 11. 重合プロセスモデルの B2B 適応調整結果

## 8. おわりに

本技法は、すでに複数のバッチ・セミバッチ重合プロセスに適用し、その優れた制御性能を実証している。これらのプロジェクトでは、取り扱う物質と反応機構がそれぞれ異なる。このため、重合反応モデル作成が重要な設計要素になっている。

この B2B 制御システムは特許出願を終えており、現在はその設計工具箱の製品化を鋭意進めている。まもなく、2013 年前半には発売できる段階にある。今後は、本技法を広く応用しながら機能増強を図るとともに、工具箱の普及に注力していく。

高機能性ポリマーや医薬品中間原料の製造などでますます重要性の高まるバッチプロセスにふさわしい、一般性のある優れた制御方式の枠組みを確立することが求められている。ここで示した厳密なプロセスモデルをベースにしたアプローチは、そのベンチマークの一つといえよう。

## 9. 謝辞

この制御システムを開発する機会を与えていただいた関係者の皆さまに、心からお礼申し上げます。また、多くの有益なコメントをいただいた、James B. Rawlings 教授（ウィスコンシン大学）、北森俊行名誉教授（東京大学）、片山徹名誉教授（京都大学）、加納学教授（京都大学）に深く感謝します。

### <参考文献>

- (1) 小河, 加納: 化学プロセス制御技術者の実践と挑戦; システム / 制御 / 情報, 52-8, pp.2-9 (2008)
- (2) M.Kano and M.Ogawa: The state of the art in chemical process control in Japan: Good practice and questionnaire survey, *Journal of Process Control*, 20, pp.969-982 (2010)
- (3) 小河, 藤本, 川野, 北村: 現場密着型プロセス制御問題解決; 第 52 回自動制御連合講演会予稿 (2009)
- (4) 小河守正: バッチ重合プロセスのモデルベース B2B 制御; 計測自動制御学会論文集, 46-3, pp.139-148 (2010)
- (5) Lipták, B. G.: Controlling and optimizing chemical reactor, *Chemical Engineering*, May 26, pp.69-81 (1986)
- (6) Seborg, D.E., T.F. Edgar & D.A. Mellichamp: *Process Dynamics and Control Second Edition*, pp.602-610, John Wiley & Sons, Inc. (2004)
- (7) 大塚, 古谷, 松島: ジャケット付き反応器の温度制御, 化学装置, 2000 年 6 月号, pp.66-71 (2000)
- (8) 鈴木秀明: 化学工学エンジニアは何でも屋, それが楽しい, 化学工学, 70-4, p.269 (2006)
- (9) JBF: S88 入門 (2004)
- (10) 関, 大山, 小河: 逐次線形化に基づく非線形モデル予測制御 - 化学反応器への応用, 計測自動制御学会論文集, 38-1, pp.61-66 (2002)
- (11) Bindlish, R. and J.B. Rawlings: Target linearization and model predictive control of polymerization processes, *AIChE Journal*, 49-11, pp.2885-2899 (2003)
- (12) 三浦, 今枝, 橋本, Wood, 服部, 大西: PVC 重合反応器における一般化予測制御法に基づくオートチューニング PID 制御系設計法, 化学工学論文集, 25-2, pp.248-252 (1999)
- (13) Lee, K.S. and J.H. Lee: Iterative learning control-based batch process control technique for integrated control of end product properties and transient profiles of process variables, *Journal of Process Control*, 13, pp.607-621 (2003)

- (14) Clarke-Pringle, T.L. and J.F. MacGregor: Optimization of molecular-weight distribution using batch-to-batch adjustments, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, pp.3660-3669 (1998)
- (15) 橋本健治: 反応工学, pp.17-21, 培風館 (1982)
- (16) Rawlings, J.B. and J.G. Ekerdt: *Chemical Reactor Analysis and Design Fundamentals*, pp.538-543, Nob Hill Publishing (2002)
- (17) 小河, 関: バッチ冷却晶析プロセスのモデルベース晶析温度精密制御 - 第 1 報, 第 55 回自動制御連合講演会予稿集, OS7-3 (2012)
- (18) 片山徹: 新版フィードバック制御の基礎, pp.133-135, 朝倉書店 (2002)
- (19) 荒木光彦: PID 調節計のパラメータ調整則の発展, システム / 制御 / 情報, 50-12, pp.441-446 (2006)
- (20) 北森俊行: 制御の現場と制御理論の整合性, pp.46-61, 計測自動制御学会プロセス制御専門家養成塾補講 (2008)

### <著者所属>

- |       |  |
|-------|--|
| 小河 守正 | アドバンスオートメーションカンパニー<br>エンジニアリング本部アドバンス・ソリューション部 |
| 佐々木 亨 | アドバンスオートメーションカンパニー<br>エンジニアリング本部アドバンス・ソリューション部 |

# デシカント空調機のシミュレータの構築

## Construction of a Desiccant System Simulator

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

大曲 康仁  
Yasuhito Oomagari

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

伊藤 卓  
Suguru Ito

早稲田大学

山口 誠一  
Seiichi Yamaguchi

早稲田大学

齋藤 潔  
Kiyoshi Saito

### キーワード

デシカント空調機, 吸着式除湿, シミュレーション, 見える化, エネルギー, 制御

低露点が求められる製造工場などでは、しばしばデシカント空調機が導入される。夏の高湿度を想定して設計されるが、多くの工場で冬期などでも常に定格運転されており、過度な除湿による無駄なエネルギー消費が発生している。そこで、過度な除湿を省く制御を導入することで、省エネルギーが期待できる。しかし、システムの挙動は複雑で適切な制御の導入は難しい。本研究では、システムの動的挙動やエネルギー特性を把握するため、シミュレータを構築し検討した。その結果、再生風量とロータ回転数を操作することで、動的に安定で、省エネルギーな除湿制御が可能なが分かった。

Desiccant air conditioners are often installed in manufacturing plants where a low dew point is required. They are designed to deal with high humidity load in the summer, and in many plants they are operated at full capacity continuously even during the winter. This often results in wasted energy consumption due to excessive dehumidification. Therefore, we can expect energy savings by introducing a control system to eliminate excessive dehumidification. However, introducing appropriate control is difficult because the behavior of a system is complicated. In this study, we constructed and evaluated a simulator to understand the dynamic behavior and energy characteristics of the system. We found that we can operate a system in a dynamically stable and energy-saving dehumidification mode-by controlling the regeneration air flow rate and the rotor rotary speed.

## 1. はじめに

### 1.1 デシカント空調とは

リチウムイオン電池製造工場・製薬工場・食品加工工場など、様々な分野で低露点環境が必要である。低露点環境を実現する除湿空調方式の一つとして、乾燥剤（デシカント）を用いたデシカント空調が利用されている。

デシカント空調とは、固体のデシカント（シリカゲルやゼオライトなど）に直接水分を吸着させて除湿する、吸着式除湿方式の除湿空調である。

吸着式除湿では一般に、図1のようなデシカントロータと呼ばれる、ダンボールのようにコルゲート状に成型されたデシカントが組み込まれた円筒形のロータを用いる。

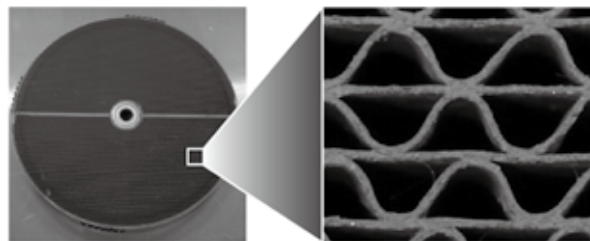


図1. デシカントロータ

デシカントロータに空気を投入することで、デシカントが空気中の水分を吸着し除湿する。水分を吸着したデシカントが連続して除湿を行えるようにするために、高温の空気をデシカントロータに投入し、デシカントを乾



燥させる。この機構を再生機構という。

図2のように、回転するデシカントロータに対し、除湿する空気流路と再生する空気流路が対向に設計され、連続除湿できる仕組みを作り出している。

このように、デシカント空調は、デシカントロータ、給気（処理）と再生の空気流路、再生加熱機構など構成要素が多く複雑である。しかし、一般的なビルに広く採用されている冷却式除湿では実現できないような、低露点の空気を作り出すことができる。

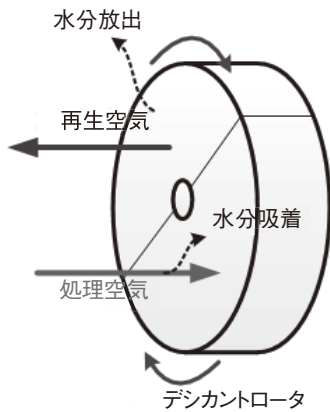


図2. デシカントロータの除湿と再生

### 1.2 目指すところ

低露点環境のためのデシカント空調では、夏の湿度の高い時期を想定した設計がなされつつも、安定して低露点を実現させることに重点をおき、多くの工場で常に定格運転されているのが現状である。しかし、省エネルギーが求められる社会情勢の中で、デシカント空調機でも同様に消費エネルギーの削減が求められている。

デシカント空調機で省エネルギーを達成するための一つの方法として、制御技術の活用が考えられる。すなわち、外気条件などの負荷状況に応じて、適正な操作を施すことで、無駄なエネルギーの発生を抑えつつ、一定の給気あるいは室内条件を維持させるものである（図3）。

このような省エネルギー制御を検討するためには、デシカント空調機のエネルギー特性や、負荷変動や操作量変化に対するデシカント空調機の特性を把握する必要がある。

また、デシカント空調機は、要求される給気風量や露点温度により、空気の流れの設計方法がいくつか存在するため、様々な設計条件に対して系の特性を把握する必要がある。

このような背景から、デシカント空調機に対して、広範囲な設計条件・運転条件のときの系の挙動・特性を再現できるシミュレータが必要であった。複雑なデシカント空調機の特性を見える化でき、かつ制御性やエネルギー特性を評価できる環境が必要である（図4）。

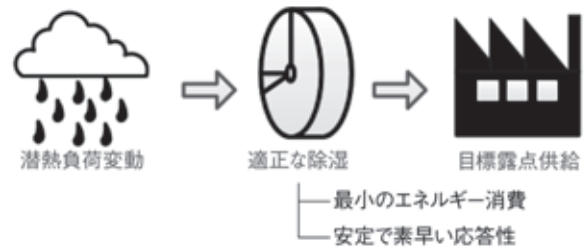


図3. 省エネルギー制御の目指すところ



図4. シミュレーションの位置付け

### 1.3 シミュレーション環境

シミュレーションは米 MathWorks 社の数値解析ソフトウェアである MATLAB/Simulink を用いた。

MATLAB/Simulink は一般に、制御系の演算やデジタル信号処理が得意なことから、従来から制御の検討に積極的に活用してきた。例えば、室圧制御や VAV 空調制御、コンプレッサー台数制御について検討を行ってきており、空調機器や制御演算の計算モジュール群を構築してきた。このような背景から、デシカント空調機の制御検討でも、MATLAB/Simulink を用いることにした。

### 1.4 本論文の構成

本論文では、どのようにシミュレータを構築したのかについて述べたのち、デシカント空調機の制御を考える上での基本的特性となる年間の消費エネルギー試算や、操作量変化に対する系の動的挙動特性についての検討結果を述べる。

それらから導かれるデシカント空調機の制御についての考察を結論としてまとめる。

## 2. シミュレータの構築

### 2.1 対象のデシカント空調機

対象とするデシカント空調機の構成要素およびエアフローを図5に示す。

低露点給気を実現できる一般的な設計条件のデシカント空調機を対象とした。具体的には、再生空気の温度が140℃程度の高温再生タイプのデシカント空調機である。特徴として、処理、再生の流路のほかに、処理空気の一部が分岐するバージと呼ばれる流路が設けられて

いる。ロータのパージセクションで、再生によって暖められたロータを冷やすことで、低湿度の給気を得ることができる。パージセクションを通過した空気は高温であり、その熱を活かすため、再生流路に入るフローとなっている。

対象のデシカント空調機はデシカントロータ、処理給気ファン、再生ファン、外気冷却コイル、給気冷温水コイル、再生加熱コイルで構成している。各種コイルの出口空気温度を、フィードバック制御により冷水、温水あるいは蒸気流量を操作して、目標の温度に制御する。

対象のデシカント空調機の代表的な設計条件を表1に示す。なお、定格のロータ回転数については、構築したシミュレータを用いて、定格負荷条件下でロータ回転数が給気露点温度に与える影響（図6）を調査した上で、

給気露点温度が最も低くなる回転数を算出し、定格の回転数として定めた。

## 2.2 シミュレータの構成

MATLAB/Simulinkのシミュレータの外観を図7に示す。Simulinkでは、機能をもったモジュールを、制御系のブロック線図のように繋ぎあわせてモデルを作成する。

デシカント空調のシミュレータでは、図8に示すように大きな機能として、入力（外気条件・外乱など）、プロセス（操作部・制御対象）、コントローラ（調整器）、出力4つのサブシステムを用意した。上記の4つのサブシステムは、それぞれ機能ごとに細分化されたモジュールを連結して構成している。

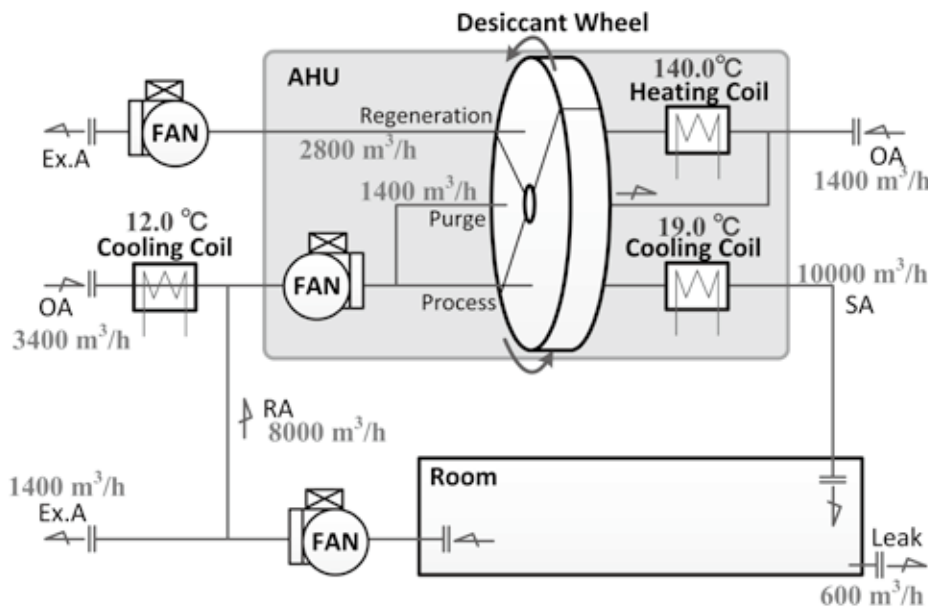


図5. 対象のデシカント空調機

表1. 代表的な設計条件

Module	Parameter	Unit	Value
Desiccant Wheel	Diameter	m	1.6
	Thickness	m	0.2
	Rotary speed	rph	12
	$K_m C_{sv}$	$\text{kW/m}^3\text{K}$	103.45
	$K_h C_{sv}$	$\text{kg/m}^3\text{s}$	103.45
Room	Volume	$\text{m}^3$	270
	Sensible heat load	kW	16.7
	Latent heat load	kW	1.1
Air flow rate	Process air(SA)	$\text{m}^3/\text{h}$	10000
	Purge air	$\text{m}^3/\text{h}$	1400
	Regeneration air	$\text{m}^3/\text{h}$	2800
	Outside air(Pro)	$\text{m}^3/\text{h}$	3400
	Outside air(Reg)	$\text{m}^3/\text{h}$	1400
	Return air	$\text{m}^3/\text{h}$	8000
Control	SA Temp.	deg.C	19.0
	OA cooling Temp.	deg.C	12.0
	RegAir Temp.	deg.C	140.0

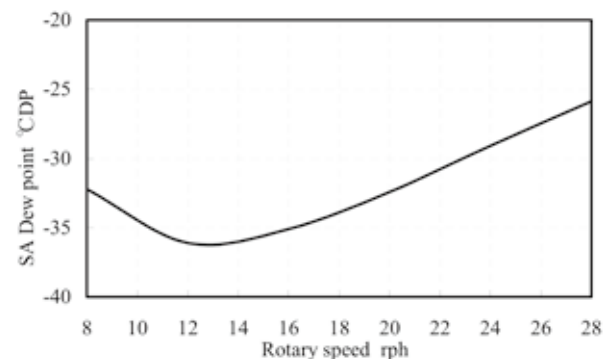


図6. ロータ回転数が給気露点温度に与える影響

例えば図9に示すように、プロセスのサブシステムはデシカント空調機モジュールと部屋モジュールで構成しており、モジュール間は各種データで連結している。コントロールのサブシステムから受けた冷却PID出力などから、空調機で給気状態を計算し、その給気状態にしたがって、部屋モジュールで室内状態を演算するといった具合である。

### 2.3 各種要素のモデル

デシカント空調機の系を構成する要素は、空調機（デシカントロータ、ファン、冷却コイル、加熱コイル）、

部屋、風量・圧力演算など多岐にわたる。ここでは、これらのモデルについて述べる。

#### (a) デシカントロータモデル

デシカント空調機を構成する要素の中で、最も重要かつ挙動が複雑なデシカントロータに関しては、従来よりデシカントの研究を進めてきた早稲田大学齋藤研究室との共同研究でモデルを構築した<sup>(1)</sup>。

図10にモデル図を示す。デシカントロータの動的数値モデルを構築する上での主な仮定事項は以下の通りである。

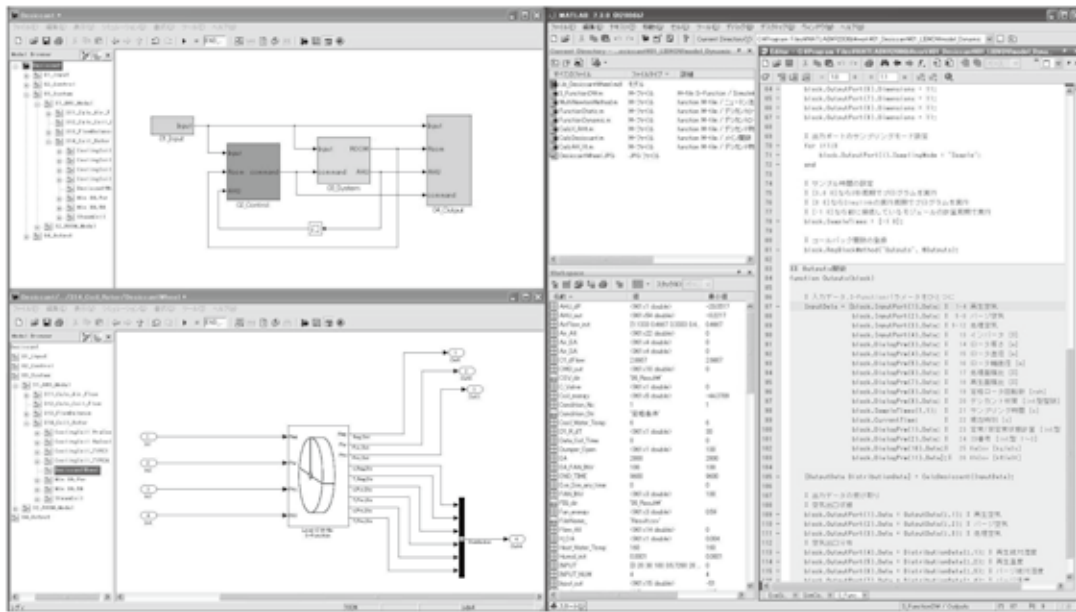


図7. MATLAB/Simulink のシミュレータの外観

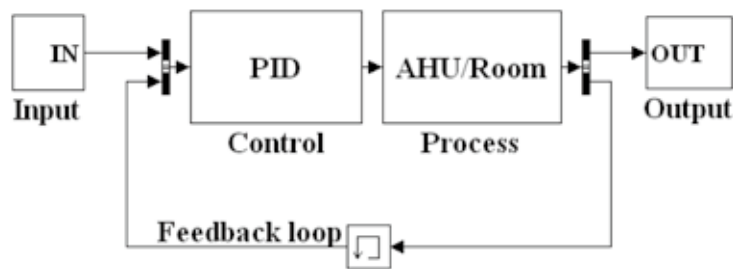


図8. Simulink モデルの全体像

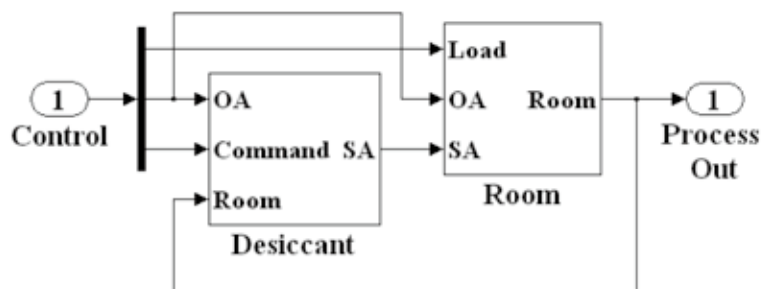


図9. Simulink モデルのプロセス（サブシステム）

- (1) 空気流路内の湿り空気と、吸着材壁との間の熱・物質移動は、両者の温度・濃度差を推進力とし、総括移動係数を用いて表されるものとする。
- (2) 空気流路内の湿り空気、および吸着材壁内部での熱伝導、物質拡散は無視する。
- (3) 空気流路内の湿り空気は、ロータの回転に伴って $\theta$ 方向へも移動するが、空気が空気流路内にとどまる時間は非常に小さく、 $z$ 方向への移動に比べて十分小さいことから、これを無視する。

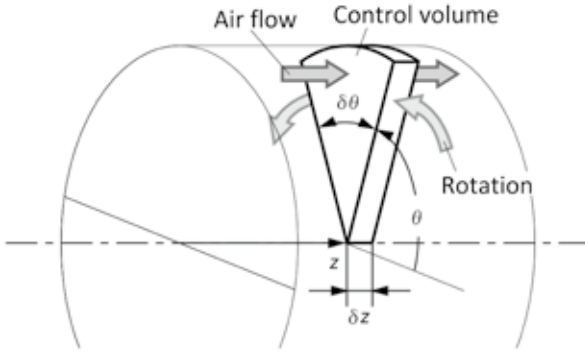


図 10. デシカントロータモデル

以下に、動的数値モデルを示す(記号表は後述)。まず、空気流路内の湿り空気の連続の式は次式のようにになる。

$$\frac{\partial u_a}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

空気流路内の湿り空気中の水蒸気に注目した質量保存式は次式のようにになる。

$$\varepsilon \rho_a \frac{\partial x_a}{\partial t} + \varepsilon \rho_a u_a \frac{\partial x_a}{\partial z} = -C_{sv} j_m \quad (2)$$

空気流路内湿り空気のエネルギー方程式は次式のようにになる。

$$\varepsilon \rho_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial t} + \varepsilon \rho_a u_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial z} = -C_{sv} q_s \quad (3)$$

吸着材壁の連続の式は次式のようにになる。

$$\frac{\partial \omega_d}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

吸着材壁中の水分に注目した質量保存式は次式のようにになる。

$$(1-\varepsilon) \rho_d \frac{\partial X_d}{\partial t} + (1-\varepsilon) \rho_d \omega_d \frac{\partial X_d}{\partial \theta} = C_{sv} j_m \quad (5)$$

吸着材壁のエネルギー方程式は次式のようにになる。

$$(1-\varepsilon) \rho_d c_d \frac{\partial T_d}{\partial t} + (1-\varepsilon) \rho_d \omega_d c_d \frac{\partial T_d}{\partial \theta} = C_{sv} (q_s + j_m h_{ads}) \quad (6)$$

境界条件として、処理空気入口状態および再生空気入口状態は以下のようにになる。

(処理空気入口)

$$0 \leq \theta < \theta_p, z = 0 \\ u_a = u_{a,pi}, x_a = x_{a,pi}, T_a = T_{a,pi} \quad (7)$$

(再生空気入口)

$$\theta_p \leq \theta < 2\pi, z = L \\ u_a = -u_{a,ri}, x_a = x_{a,ri}, T_a = T_{a,ri} \quad (8)$$

ここで、 $j_m$  は、空気流路内の湿り空気から吸着材壁へ移動(吸着)する水分の質量流束であり、両者の絶対湿度差を推進力として、次式のように表される。

$$j_m = K_m (x_a - x_d) \quad (9)$$

なお、この式に含まれる  $x_d$  は、吸着材壁の温度・濃度の状態に平衡する湿り空気の絶対湿度であり、この関係は後述の吸着等温線から直接導出できる。

同様に、 $q_s$  は、空気流路内の湿り空気から吸着材壁へ伝わる顕熱流束であり、両者の温度差を推進力として、次式のように表される。

$$q_s = K_h (T_a - T_d) \quad (10)$$

次に、総括熱・物質移動係数  $K_m, K_h$  の決定方法について述べる。仮定として、空気側の熱・物質移動が支配的であるとする。また、助走区間の影響は無視し、完全層流であるとする。さらに、熱・物質移動に関するアナロジーが成り立つとする。これらの仮定と山口らのこれまでの研究<sup>(2)</sup>により、 $K_m, K_h$  は次のようになる。

$$\frac{K_h d_h}{k_a} = 2.57 \quad (11)$$

$$\frac{K_m d_h}{D_v} = 2.57 \quad (12)$$

物性として、密度、比熱、吸着熱などは一定値とする。また、本論文で対象とするデシカントロータの吸着材壁の吸着等温線は、図 11 に示す通りである。この吸着等温線の近似式がモデルに組み込まれる。

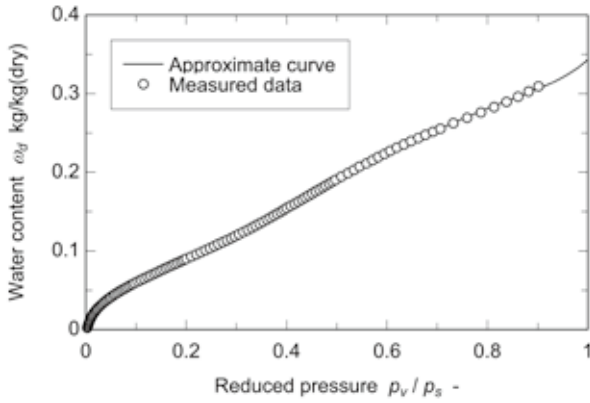


図 11. 吸着等温線

なお、ロータの動的数値モデルは、図 12 に示すように例えば回転数ステップアップ(0→30rph)入力実験で、デシカントロータ出口空気の周期的な特性など、実験結果と解析結果がよく一致することにより妥当性を確認している。

また、ロータの回転方向と軸方向については空気の状態の分布が出力できるモデルとなっている。分布を視覚的に確認できるよう、図 13 に示す可視化のツールを作成し、見える化を行っている。

デシカントロータは回転するため、一般に除湿した空気はロータ回転方向に温度分布や湿度分布を持つ。分布の情報は、実際の機器での計測などでは把握することが困難であるが、このようなシミュレーションと可視化ツールを用いることで、ロータ内部の空気の分布を再現することができる。

ロータ内部の空気の分布情報を把握することにより、デシカントの制御に重要な、ロータ内部の除湿状態や乾燥状態を把握できる。また、ロータ出口の計測位置の検討にも大いに役に立つ。

(b) 部屋モデル

部屋モデルは、簡易的な熱・物質バランスを考慮した 1 次遅れモデルを用いている。具体的には負荷と給気条件から室内温度および湿度を計算している。

(c) その他のモデル

モデルを作成するにあたり、コイルやファンなど一部のモジュールについては、既存の汎用的な空調機計算ツールである HVACSIM+ (J)<sup>(3)</sup> を利用した。HVACSIM+ (J) のモデルは、物理法則に基づいた理論式でモデル化されており、妥当性が検証されている。ただし、HVACSIM+ (J) は空調計算のためのプログラムであるが、MATLAB/Simulink の拡張ではないため、MATLAB 環境に移植して使用している。

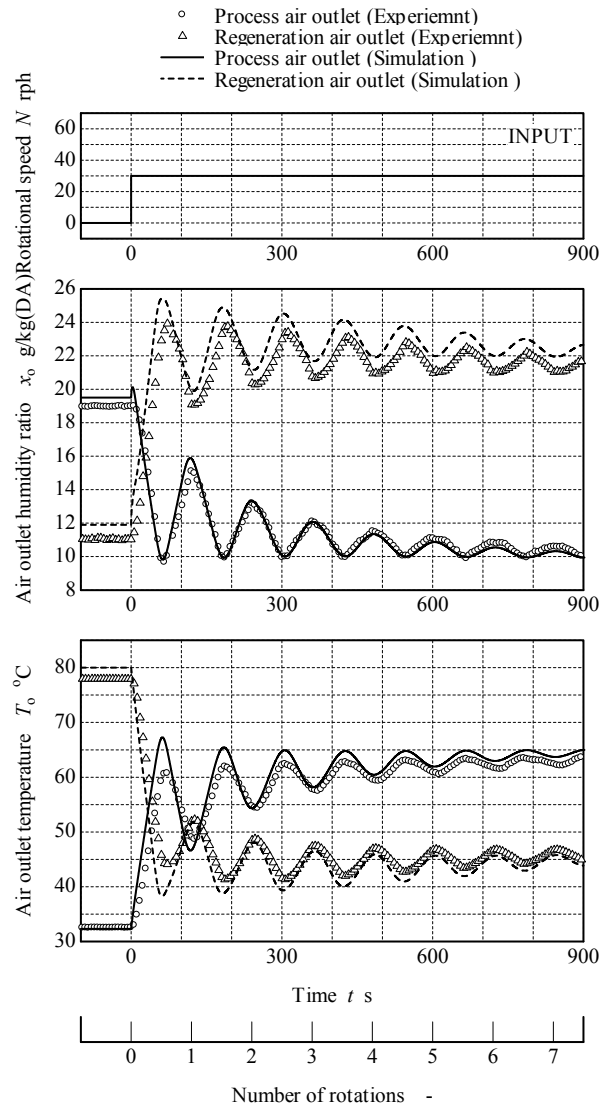


図 12. ロータ単体での解析結果と実験結果

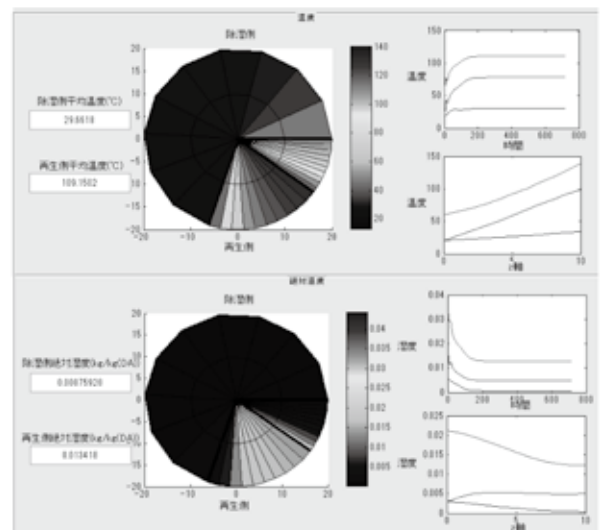


図 13. ロータ内部の空気分布の可視化

HVACSIM+ (J) を利用したモジュールの一覧と、HVACSIM+ (J) のモデルタイプを表2に示す。

なお、Flow Balance モジュールとは、空気の圧力バランスから各地点の風量を決定するモジュールである。

表2. HVACSIM+ (J) を利用したモジュール

Module	HVACSIM+(J) model TYPE
Room (Humidity calculation)	TYPE 402
Flow Balance	TYPE 501, 502
Fan	TYPE 503
Damper	TYPE 506
Cooling Coil	TYPE 602
Heating Coil	TYPE 602

### 3. シミュレータの活用

#### 3.1 エネルギー特性の把握

対象のデシカント空調機のエネルギー特性を把握するために、年間外気条件に対する定格運転条件での空調機の給気露点温度や、エネルギー消費量を把握する。

【シミュレーション条件】

年間外気条件 (表3) は東京の月ごとの温度・湿度の平均値を用いた。

表3. 年間外気条件

Month	Temperature deg.C	Humidity ratio %RH
1	7.0	41.0
2	6.5	60.0
3	9.1	61.0
4	12.4	62.0
5	19.0	60.0
6	23.6	67.0
7	28.0	70.0
8	29.6	67.0
9	25.1	68.0
10	18.9	68.0
11	13.5	56.0
12	9.9	50.0

【シミュレーション結果】

年間外気に対する静的な空調機の給気露点温度を図14に、エネルギー消費量を図15に示す。結果から、空調機の給気露点やエネルギー消費量が外気の温湿度条件に影響を受けることがわかる。具体的には、外気の温度が高いとそれだけ給気露点も高くなり、またエネルギー消費も大きくなることが確認できる。

一般に、夏期の最も厳しい外気条件を想定して定格条件を設計するため、定格運転では冬期に過度に除湿をすることがわかる。制御により、給気露点温度を目標値に制御できれば、冬期などでは無駄な除湿のエネルギーを削減できるため省エネルギーとなることが期待できる。

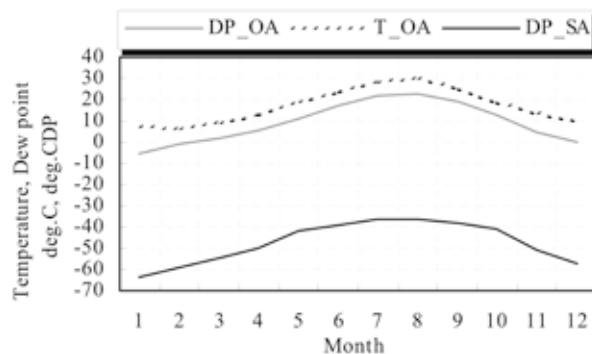


図14. 年間外気に対する給気露点温度の変動

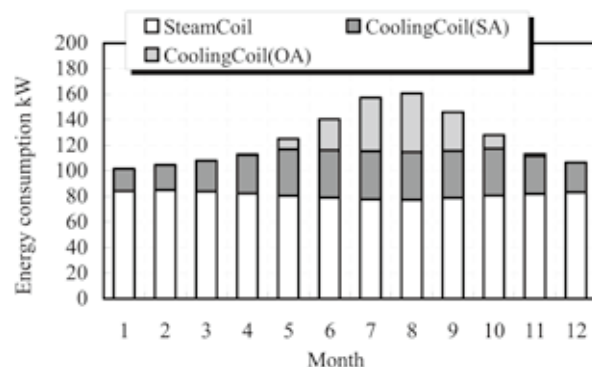


図15. 年間外気に対するエネルギー消費の変動

#### 3.2 操作量の制御性検討

前節では、年間外気条件に対して定格条件で運転した場合、冬期などは目標値よりも低い給気露点温度の空気が供給されていることがわかった。そこで本節では、年間を通じて給気露点温度を目標値に制御することを考える。

代表的な操作量である、再生風量、再生温度、ロータ回転数の操作量としての適性を見極めるために、以下の手順で検討を行った。

- (1) 外気負荷に対する制御量の特性を把握
- (2) 各操作量で給気露点温度制御が可能かを把握
- (3) 操作量変化に対する制御量の応答性を把握

【外気負荷に対する制御量の特性把握】

外気負荷に対する制御量の特性を把握するために、外気絶対湿度に対する給気露点温度の影響を調査する。図16に外気絶対湿度に対する給気露点温度 (定常値) の計算結果を示す。この結果から、外気絶対湿度が下がるほど、給気露点温度が低くなることがわかる。特に外気絶対湿度が8.7 g/kg (DA) 以下では顕著である。

例えば、外気絶対湿度が8.0g/kg (DA) のとき、給気露点温度は -36.2℃ DPである。仮に、給気露点温度を -36.2℃ DPに一定とする制御を考えると、外気絶対湿度が8.0g/kg (DA) 以下では、給気露点温度が -36.2℃ DPより低くなる。そのため、過剰な除湿を防ぎ、給気露点温度を -36.2℃ DPに保つように、何らかの操作

量を制御する必要がある。

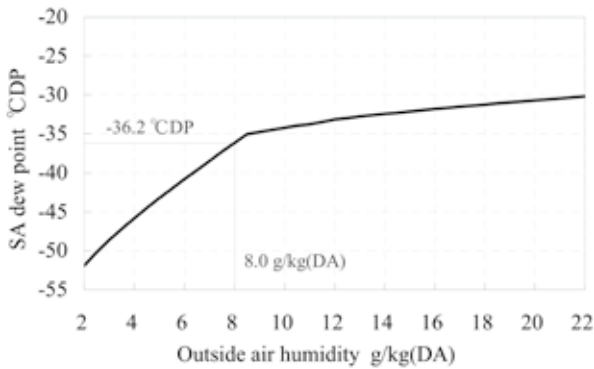


図 16. 外気絶対湿度と給気露点温度の相関関係

【各操作量の給気露点温度制御可否の把握】

次に、デシカント空調機の代表的な操作量で、給気露点温度制御が可能かどうかを把握する。操作量はロータ回転数・再生風量・再生温度とする。

外気絶対湿度が4.0g/kg (DA) のときの、各操作量と給気露点温度の相関関係を調査する。操作量の出力は0-100%で示し、実際の操作量の値と出力の関係は表4に示す。図17にそれぞれの操作量出力に対する給気露点温度(定常値)の計算結果を示す。なお、ある操作量出力に対する給気露点温度を調査するときには、他の操作量出力は100%固定としている。

表 4. 操作量の値と出力の関係

Operation parameter	Operation value	Control output
Rotary speed	0-12 rph	0-100 %
Regeneration air flow rate	0-2800 m <sup>3</sup> /h	0-100 %
Regeneration temperature	70-140 °C	0-100 %

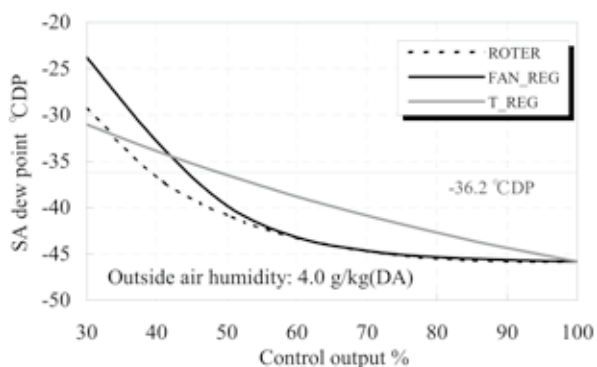


図 17. 操作量と給気露点温度の相関関係

図17から、ロータ回転数・再生風量・再生温度それぞれの操作量で、給気露点温度を-36.2°C DPにする出力があることがわかる。すなわち、外気絶対湿度が4.0 g/kg (DA) のときは、それぞれの操作量を制御することで、給気露点温度を目標値に追従させることができる。

【各操作量変化に対する制御量の応答性を把握】

最後に、それぞれの操作量変化に対する制御量の動的な挙動を調査する。

具体的には、外気絶対湿度が4g/kg (DA) のときに、給気露点温度が-36.2°C DPとなる操作量出力(ロータ回転数:39.2%, 再生風量:44.2%, 再生温度:48.8%)から、100%の操作量出力にしたときの給気露点温度のステップ応答を調査する。0sのタイミングで操作量をステップ変化させたときの給気露点温度の応答を図18に示す。

結果から、それぞれ操作量変化に対する給気露点温度の動的な挙動の違いを確認できる。例えば、再生風量や再生温度を変化させたときに比べ、ロータ回転数を変化させたときは給気露点温度の応答が速い。また、再生風量と再生温度は、どちらを変化させてもほぼ同様の挙動を示す。

以上より、今回対象とした系では、外気湿度変化の外乱に対して素早く給気露点温度を応答させることを考えるとき、ロータ回転数を制御するのがよいことがわかる。

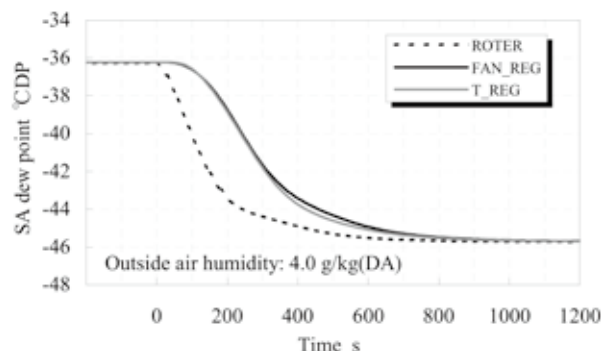


図 18. 操作量変化のステップ応答

3.3 操作量の省エネルギー性検討

前節では、操作量の制御性検討で、応答としてはロータ回転数が優れていることがわかった。

そこで、ここでは、エネルギー消費の観点から操作量を検討する。

シミュレータを用いて、外気絶対湿度が4.0g/kg (DA) のときの、各操作量と消費エネルギー(各コイルの交換熱量の合計)の相関関係を調査する。実際の操作量の値と出力の関係は表4の通りである。図19にそれぞれの操作量出力に対する消費エネルギー(定常値)の計算結果を示す。なお、ある操作量出力に対する給気露点温度を調査するときには、他の操作量出力は100%固定としている。

図19から、各操作量でエネルギー消費量に大きく差が出るのがわかる。再生風量を操作すると、消費エネルギーを大きく削減できる。一方、ロータ回転数を操作する場合、定格回転数から回転数を落とすと、エネルギー消費量は若干増加する。

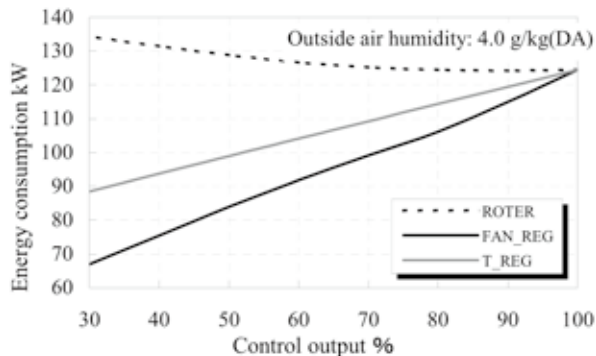


図 19. 操作量と消費エネルギーの相関関係

3つの操作量の省エネルギー性能を比較するために、外気絶対湿度が4g/kg (DA) のときに、給気露点温度が $-45.8^{\circ}\text{C}$  DPとなる定格の操作量出力(100%)から、 $-36.2^{\circ}\text{C}$  DPとなる操作量出力(ロータ回転数: 39.2%, 再生風量: 44.2%, 再生温度: 48.8%)に変えた時のエネルギー削減量を比較検討する。

比較結果を図20に示す。図より明らかなように、定格条件( $-45.8^{\circ}\text{C}$  DP)から、それぞれの操作量を操作して同じ給気露点( $-36.2^{\circ}\text{C}$  DP)に制御することができるが、このときのエネルギー削減量は操作量によって異なり、再生風量が最も多いことがわかる。

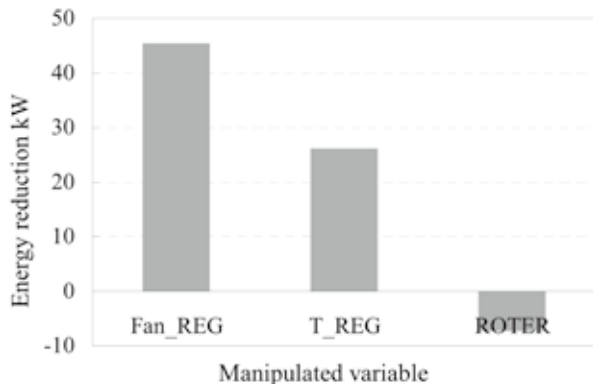


図 20. 操作量の省エネルギー性能の比較

#### 4. デシカント空調の制御検討

前章では、シミュレータを活用して、対象のデシカント空調に対して、省エネルギーの余地や、操作量の制御性・省エネルギー性を検討した。

一般に制御を考えるならば、外乱発生時の操作量変化に対する制御性が重視されるが、省エネルギー制御の場合、操作量変化時のエネルギー消費削減も同様に重要な要素となる。

図18から、応答性はロータ回転数が優れていることがわかった。一方、図20から、省エネルギー性は再生風量が優れていることがわかった。これらから、対象の

デシカント空調の制御は、ロータ回転数と再生風量を操作量として構築すると、応答性・省エネルギー性に優れた制御を実施することができると考えられる。

#### 5. おわりに

デシカント空調を対象に、シミュレータ環境を構築し、代表的な設計のデシカント空調に対して制御を検討することができた。

今後の展望としては、異なるエアフローや設備構成のデシカント空調を対象に、制御手法を整理していくとともに、複数の操作量をどう制御すれば最もエネルギー消費が少なくなるかなどの、エネルギーを最小とする最適運転手法などを検討していく。

シミュレータを活用することで、複雑な挙動を様々な視点から噛み砕いて評価することが容易になり、デシカント空調の制御の検討に大きく貢献することができた。シミュレータの活用はデシカント空調だけでなく、他の分野でも大いに活用し、制御の追求を進めていきたいと考えている。

#### <記号表>

$C_{sv}$	比表面積, $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$
$c_{pa}$	定圧比熱, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$D_v$	湿り空気中の水蒸気の拡散係数, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
$d_h$	空気流路の水力直径, m
$h_{ads}$	吸着熱, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$j_m$	質量流束, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
$K_m$	総括の物質移動係数, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
$K_h$	総括の熱移動係数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
$k$	熱伝導率, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$q_s$	熱流束, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$T$	温度, $^{\circ}\text{C}$
$u$	面速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$X_d$	吸着剤壁の水分含量, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}(\text{DD})^{-1}$
$x$	絶対湿度, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}(\text{DA})^{-1}$
$\varepsilon$	吸着剤壁の空隙率, -
$\rho_a$	空気密度, $\text{kg}(\text{DA})\cdot\text{m}^{-3}$
$\omega_d$	デシカントロータの角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

#### <添字>

a	空気
d	デシカント
pi	処理空気入口
ri	再生空気入口



<参考文献>

- (1) 山口誠一ほか：デシカントロータの非定常振動現象に関する研究，2012年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集，B122.1-4，2012，北海道
- (2) S. Yamaguchi, K. Saito, S. Kawai, Performance Evaluation of Silica gel Desiccant Wheel by Simulation and Experiment, IMPRES2010, 2010, Singapore.
- (3) HVACSIM+(J):[http://www7a.biglobe.ne.jp/~nob\\_naka/jc.htm](http://www7a.biglobe.ne.jp/~nob_naka/jc.htm)

<商標>

MATLAB, Simulink は, The MathWorks, Inc. の登録商標です。

<著者所属>

大曲 康仁	ビルシステムカンパニー 開発本部開発3部
伊藤 卓	ビルシステムカンパニー 開発本部開発3部
山口 誠一	早稲田大学 基幹理工学部 助教
齋藤 潔	早稲田大学 基幹理工学部 教授

# 建物空調用調節弁の キャビテーション診断技術の開発

## Diagnostic Techniques for Cavitation in Building Air-Conditioning System Control Valves

アズビル株式会社  
バルブ商品開発部

木下 良介  
Ryosuke Kinoshita

アズビル株式会社  
バルブ商品開発部

角田 真一  
Shinichi Tsunoda

### キーワード

キャビテーション, 診断, 調節弁, 空調

空調用冷温水配管に設置されている調節弁でキャビテーションが発生すると、気泡の発生・崩壊に伴う騒音や振動が居住空間に悪影響を及ぼす場合がある。さらに調節弁がその状態で継続的に運用されるとキャビテーションエロージョンによる外部漏れといった重大な不具合につながる場合がある。そのため、空調稼働中の調節弁でキャビテーションを診断できることが望ましい。そこで、本研究では調節弁にキャビテーション診断機能を追加するために、調節弁固有のキャビテーションの特性を考慮したキャビテーション診断技術を開発したので報告する。

When cavitation occurs in control valves installed in hot or cold water pipes in air-conditioning systems, noise and vibration caused by the generation and collapse of air bubbles may negatively affect living areas. If control valves are continuously used in this condition, serious malfunction, such as external leaking, may occur due to cavitation erosion. Hence, it is desirable to diagnose cavitation in control valves while the air-conditioning system is in operation. This paper describes our diagnostic technique for cavitation, which focuses on the characteristics of cavitation within control valves in order to supply the valves with a cavitation diagnostic function.

## 1. はじめに

オフィスビルや学校など建物空調用の冷温水配管に設置されている調節弁は、開口面積を変化させることで流量や圧力の制御を行う。その際に調節弁前後の圧力が変化し、飽和蒸気圧以下になるとキャビテーションが発生する。キャビテーションが発生すると、騒音や振動が居住空間に悪影響を及ぼす場合があり、さらにこれらの状態で継続的に運用されると、キャビテーションエロージョンによる調節弁や弁下流側配管の損傷に至り、流体が外部に漏れる重大な不具合につながる場合がある。そこで、空調稼働中の調節弁で発生するキャビテーション

の状態を判断できることが望ましい。

本研究では調節弁にキャビテーション診断機能を追加することを目的として、調節弁固有のキャビテーションの特性を考慮したキャビテーション診断方法を考案した。その際に、調節弁に搭載するための技術課題を明確にし、その解決手段を検討した。そして、考案した診断方法を適用して調節弁のキャビテーション診断を実施した結果、キャビテーション診断の可能性を見出した。

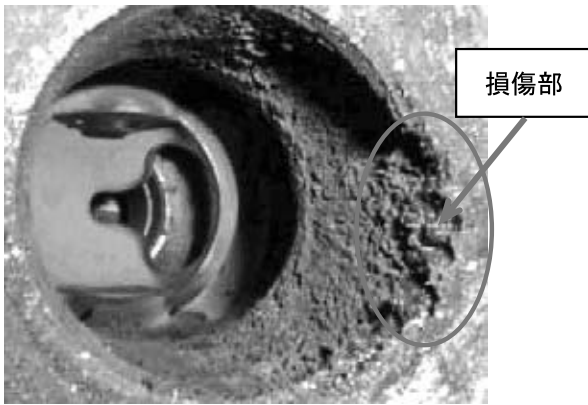


図1. キャビテーションエロージョンによる調節弁の損傷事例 (調節弁下流側)

## 2. キャビテーション診断方法の検討

### 2.1 診断方法

調節弁におけるキャビテーション性能の評価方法として、JIS規格ではJIS B2005-8-2 (2008)で規定されている。同規格では弁開度を固定して、調節弁前後の圧力比  $X_F$  と騒音レベルの関係を求める。一般的にその関係は図2のような傾向を示し、傾きの様子からキャビテーションの状態を推定する。ここで、調節弁におけるキャビテーションの状態は、実用的な観点から次の3つに分類されている<sup>(1)(2)</sup>。

- 初生  $X_{Fz}$  : キャビテーションの発生崩壊により騒音レベルが急激に大きくなる状態
- 臨界  $X_{Fcri}$  : キャビテーションの発生崩壊が定常的に起こる状態
- 閉塞  $X_{Fch}$  : 差圧を高くしても流量が増加しない状態

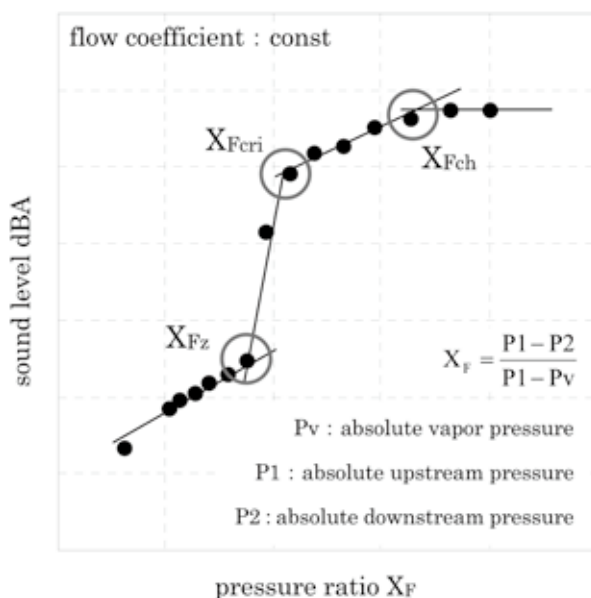


図2. 圧力比  $X_F$  と騒音レベルの関係

本研究では図2の圧力比と騒音レベルの関係を利用してキャビテーションの状態を診断する。調節弁の初生、臨界、閉塞状態での圧力比  $X_F$  は開度ごとに異なるため、その圧力比を開度ごとにあらかじめ求め、調節弁開度と各キャビテーションの状態における  $X_F$  のテーブルを作成する。このテーブルを製品に搭載し、調節弁前後の圧力と開度を計測し、テーブルと比較することでキャビテーションの状態を診断する方式を考案した。以降、圧力比テーブル方式と表現する。

### 2.2 圧力比テーブル方式の技術課題

#### 2.2.1 圧力計測位置

JIS B2005-8-2では調節弁前後の圧力を調節弁から上流 2D、下流 6D (D: 弁の呼び径) の位置で計測することが規定されている。実際の調節弁の設置条件は設置スペースや計装の都合により、必ずしも規格と同等の設置条件になっているわけではない。調節弁と圧力計測位置の間に曲がり管や縮小管などの配管が設置されている場合は、そこでの圧力損失によって圧力比  $X_F$  が変化する。そこで、規格に準じた圧力計測位置で圧力計測を行うとすれば、設置条件ごとに圧力比テーブルが必要となる。したがって、新たに調節弁の設置条件の影響を受けにくい圧力計測方法を考案する必要がある。

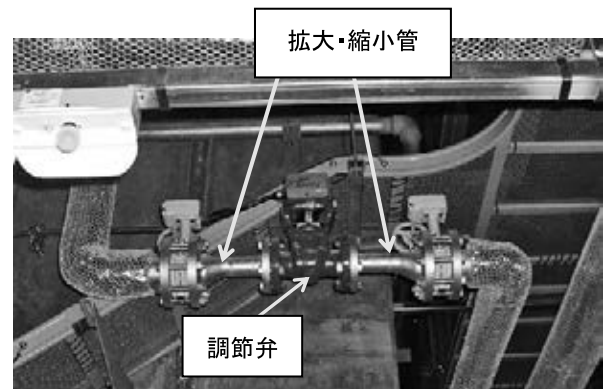


図3. 調節弁の施工例

#### 2.2.2 キャビテーションの状態の推定方法

調節弁の各開度における騒音レベルと  $X_F$  の関係を実験により確認すると、弁口径や開度によって騒音レベルの変化が図2のように明確に現れない場合がある。そのため初生、臨界、閉塞の  $X_F$  を近似直線から算出できず、圧力比テーブルを作成するのが困難となる。したがって、圧力比テーブルを作成するためにはキャビテーションの状態を弁口径などの条件によらずに推定できる方法を検討する必要がある。

### 3. 技術課題の検討

#### 3.1 圧力計測位置

調節弁の設置条件の影響を受けない圧力計測方法として、調節弁の絞り部（縮流部）前後の圧力を計測する方法を検討した。この圧力計測方法は図4に示す当社で製品化されている調節弁（製品名：アクティブル™ 電動二方弁流量計制御機能付 FVY51 シリーズ）で絞り部前後の差圧から流量を計測する方法として採用されており、調節弁前後の設置条件の影響を受けずに流量計測ができることが確認されている<sup>(3)</sup>。

そこで、この圧力計測位置を適用することで、キャビテーションの状態と縮流部前後の圧力比  $X_{Fv}$  ( $= (Pv1 - Pv2) / (Pv1 - Pv)$ ) の関係が設置条件の影響を受けるかを確認するため圧力比  $X_{Fv}$  と騒音レベルの関係を求めた。図5に実験設備を示す。配管の種類として弁前後に直管、曲がり管、縮小管をそれぞれ設置した。

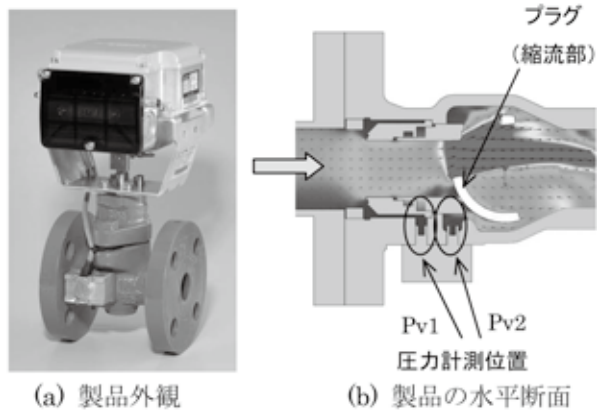


図4. 縮流部前後の圧力計測位置

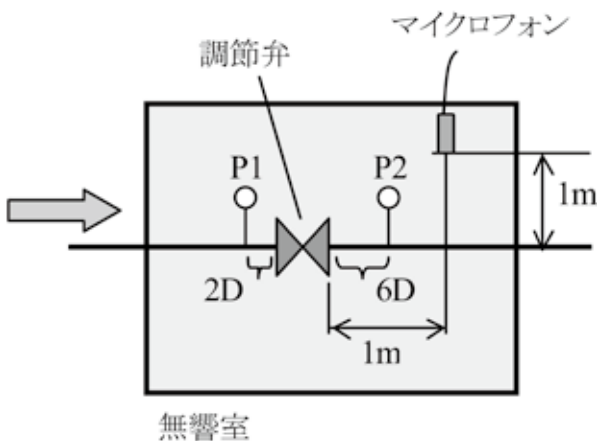
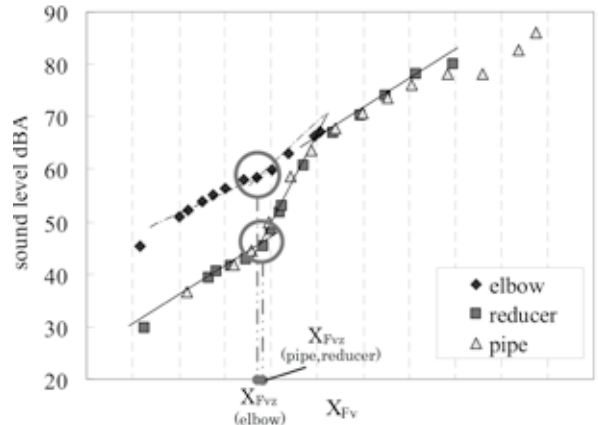


図5. 調節弁の騒音試験環境 (D: 弁の呼び径)

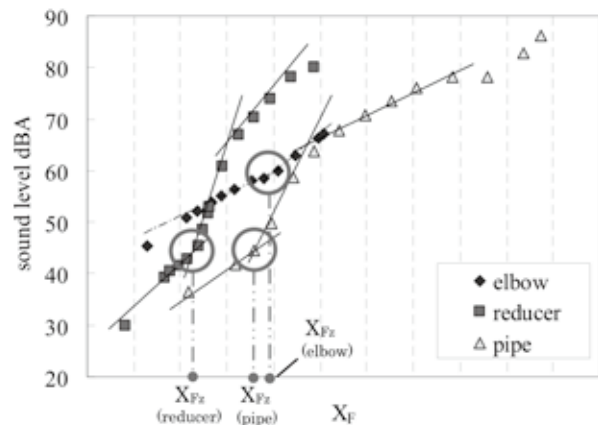
図6 (a) に縮流部前後の圧力比  $X_{Fv}$  と騒音レベルの関係を示す。そして、比較対象として、図6 (b) に調節弁前後の圧力比  $X_F$  と騒音レベルの関係を示す。図6 (a) では調節弁前後の配管の種類によらずキャビテ

ションの状態の圧力比（初生  $X_{Fv2}$ ）はほぼ同じと推定でき、この圧力計測位置が設置条件の影響を受けにくいことがわかる。一方、図6 (b) では配管の種類が異なるとキャビテーションの状態の圧力比（初生  $X_{F2}$ ）が変わることがわかる。

以上のことから、縮流部前後の圧力比を適用することで、調節弁の設置条件の影響を受けず、精度よくキャビテーションを診断できる。



(a) 縮流部前後の圧力比  $X_{Fv}$



(b) 調節弁前後の圧力比  $X_F$

図6. 圧力比  $X_{Fv} \cdot X_F$  と騒音レベルの関係

#### 3.2 キャビテーションの状態の推定方法

キャビテーションの状態の推定に用いる騒音には、キャビテーション騒音と流水音が含まれており、キャビテーションの状態の変化が流水音に隠れて騒音レベルの違いとして現れにくくなる場合がある。

そこで本研究では、キャビテーション騒音の特徴である気泡が崩壊する時の周波数に着目し、騒音の周波数分析法の一つである1/3オクターブバンド分析<sup>(4)</sup>によりその周波数帯を特定した。そして、圧力比と特定周波数帯の音圧レベルの関係を用いてキャビテーションの状態を推定する方法を検討した。

キャビテーション騒音の周波数帯を特定する方法と

しては、キャビテーションが間欠的に発生する圧力条件にし、キャビテーション発生時（図7 (a) A, C）と未発生時（図7 (a) B, D)における音圧データの1/3オクターブバンド分析の結果を比較する。その結果を図7 (b) に示す。図7 (b) より、キャビテーションの発生と未発生の音圧レベルの違いが2.5kHz から 20kHzの周波数帯に現れることがわかった。

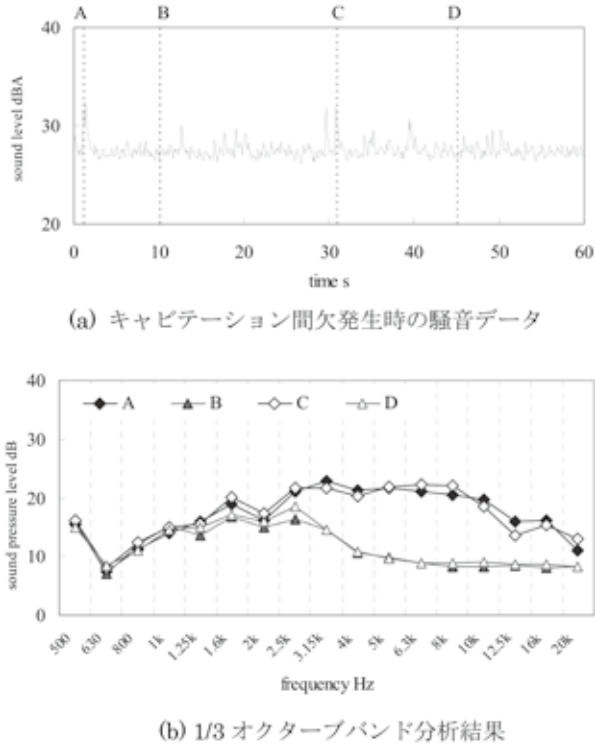


図7. キャビテーション騒音の周波数帯

この結果から、明らかな差異が見られた8kHzの周波数帯に着目し、圧力比と音圧レベルの関係を確認した。図8に一例として、キャビテーションの状態の推定が困難であった弁口径の圧力比  $X_{FV}$  と騒音レベル（図8下図）および特定周波数帯（8kHz）の音圧レベル（図8上図）

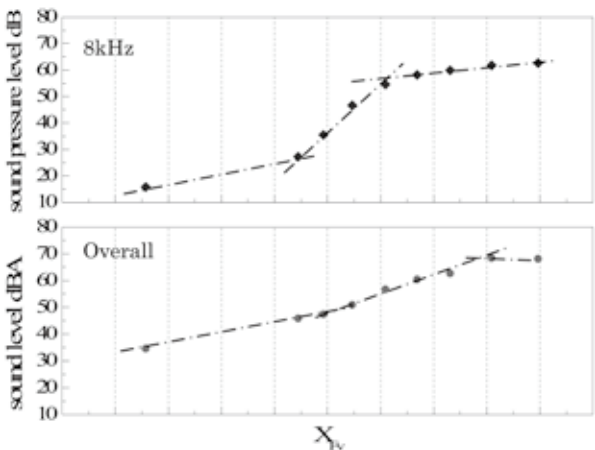


図8. 特定周波数帯を用いた推定方法

の関係を示す。図8より、騒音レベルよりも特定周波数帯の音圧レベルの方がその変化が明確で、音圧レベルで推定したキャビテーションの状態の圧力比が聴感で推定した圧力比とほぼ一致することを確認した。

以上のことから、圧力比と騒音レベルの関係から推定できなかったキャビテーションの状態を圧力比と特定周波数帯における音圧レベルの関係を適用することで推定できることがわかった。

#### 4. キャビテーション診断 実施例

実施例として、当社の調節弁 FVY51 を用いて圧力比テーブル方式によるキャビテーション診断を行った。実施手順として、まず実験により調節弁の開度ごとに絞り前後の圧力から求める圧力比  $X_{FV}$  と特定周波数帯の音圧レベルの関係を求め、圧力比テーブルを作成した。そして、テーブル値と圧力比  $X_{FV}$  を比較してキャビテーションの状態を判断するロジックを組んだ診断プログラムを作成した。

評価方法としては、圧力比テーブル作成に使用していない調節弁に対して、実験により初生および臨界の圧力比  $X_{FV}$  を確認し、圧力比テーブルと比較した。図9にキャビテーション診断の結果を示す。評価の結果、考案した圧力比テーブルによるキャビテーション診断方法により妥当な診断ができることが概ね確認された。評価結果を詳細に分析した結果、サンプルや圧力条件によって、初生と臨界が重なる領域が存在することがわかった。したがって、診断メニューとしては、初生か臨界のどちらかを診断するか、初生、臨界とその両者が存在する状態の3つの状態を診断することが考えられる。

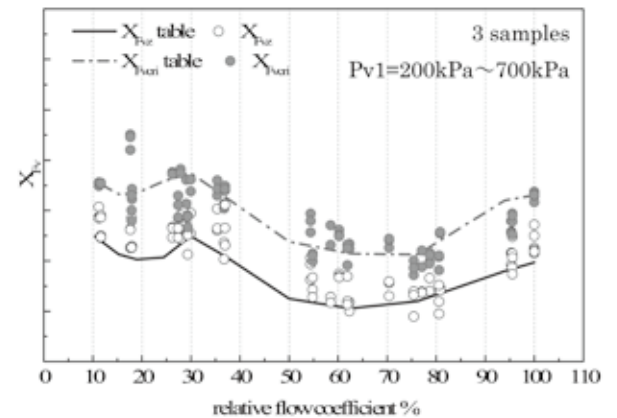


図9. キャビテーション診断実施例

#### 5. おわりに

本研究では、調節弁にキャビテーション診断機能を追加するために圧力比テーブルを用いたキャビテーション診断方法を考案し、その実現性を確認した。本技術を

実用化することにより、調節弁で発生するキャビテーションの問題に対して事前にその危険性を認識することができ、対応策を検討することができる。

今後は実用化に向けて、診断精度を決める重要な要素である圧力比テーブルの仕様を決定していく。そのためにバルブサンプルや使用流体の条件の違いによってどの程度の影響があるかを評価し、その影響の要因を明らかにしていかなければならない。その評価方法（試験設備やキャビテーションの可視化環境）の確立が検討すべき課題と考える。

<参考文献>

- (1) 加藤洋治：キャビテーション 基礎と最近の進歩，1999, pp.258-260, 槇書店
- (2) 山本和義，バルブとキャビテーション，バルブ技報, No.53, 2004, pp.7-11, バルブ工業会
- (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, Vol.27, 2009, pp.42-48
- (4) 守田栄，新版 騒音と騒音防止，1985, pp.69-74, オーム社

<商標>

アクティバルは、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

木下 良介   バルブ商品開発部  
角田 真一   バルブ商品開発部



# 節電・省エネ用クラウドサービスの開発

## Development of Cloud Services for Electric Power & Energy Savings

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

小柳 隆

Takashi Koyanagi

アズビル株式会社  
技術開発本部基幹技術開発部

近田 智洋

Tomohiro Konda

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

東島 浩史

Koji Higashijima

アズビル株式会社  
技術開発本部基幹技術開発部

今西 祐

Tasuku Imanishi

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

小野寺 博

Hiroshi Onodera

### キーワード

クラウド, Web-Infilex, SaaS/ASP, 節電, 電力モニタリング, 省エネ / 省 CO<sub>2</sub>, 送水温度最適制御

従来、高度なアルゴリズムを搭載したコントローラ（空調の省エネ制御などを実装）を建物に導入しようとする、高価なシステムとなるため、投資対効果が悪く、大規模な建物でないと導入できない課題があった。そこで、顧客ビルや工場と、遠隔に設置されたサーバを専用回線で結び、高度なアルゴリズムを遠隔サーバに実装し、遠隔から建物の省エネ制御などを実施するクラウドサービスを開発した。これにより、学習型VWT（Variable Water Temperature：可変送水温度）制御や、電力予測機能など、従来、建物ごとに実装するのが困難であったシステムを、多くの建物に提供することが可能になった。

A controller with advanced algorithms, such as an energy-saving control for a building air conditioning system, has conventionally been expensive, resulting in doubts about the return on investment, and installation that has been limited mainly to large buildings. We therefore developed cloud-based services which connect remote servers with client buildings and factories using dedicated communication lines. High-level algorithms on the servers are used to achieve energy savings, etc., at the buildings from the remote location. With this service, we can provide many buildings with systems and functions that were previously difficult to install, such as a variable water temperature (VWT) system with a learning function, and power-prediction functions.

## 1. はじめに

クラウドコンピューティング技術の発展は、建築設備分野でも少なからず影響を与えている。現地システムで監視、制御、計測、データ分析していた時代から、クラウド上のシステムへ、役割が移行しつつある。この流れの中で、特に制御、計測値の保存・表示部分の役割を現地システムからクラウド上のシステムに移行し、アプリケーションやサービスとして顧客に提供する遠隔制御システム（以下 Web-Infilex™）を開発している。

Web-Infilex は、クラウド上のシステムの長所である

高度なサービスを安価に提供することが可能で、現地側のシステム制約に拠らないアプリケーションや、クラウド上で気象予報などの外部リソースを活用したアプリケーションを提供することが可能である。

今までに、制御関連では、CO<sub>2</sub>総量リミット制御アプリケーション、学習型VWT制御アプリケーションを開発し<sup>(1)</sup>、計測関連では、電力の見える化システムを開発し<sup>(2)</sup>、顧客にサービスを提供している。



## 2. システム構成

Web-Infilex は、遠隔監視センターやインターネットから、現場にある設備機器を制御するシステムである。Web-Infilex システム全体の構成を図1に示す。

Web-Infilex は、ユーザー設定機能、見える化機能を担う「フロントエンド」と、遠隔制御機能を担う「バックエンド」に分けられる。

フロントエンドは、データセンターに設置しており、インターネットからのアクセスが可能である。

バックエンドは、各種制御プログラムを動作させる基盤である①制御フレームワークプラットフォーム、制御プログラムの設定、モニタリングを行う②制御プログラムエンジニアリング機能、フロントエンドとのデータのやり取りを行う③Web インターフェースで遠隔制御機能を実現している。

制御フレームワークプラットフォーム上で動作するプログラムを開発することで、現場の機器に手を加えることなく制御機能をリモートシステムへ提供することが可能である。

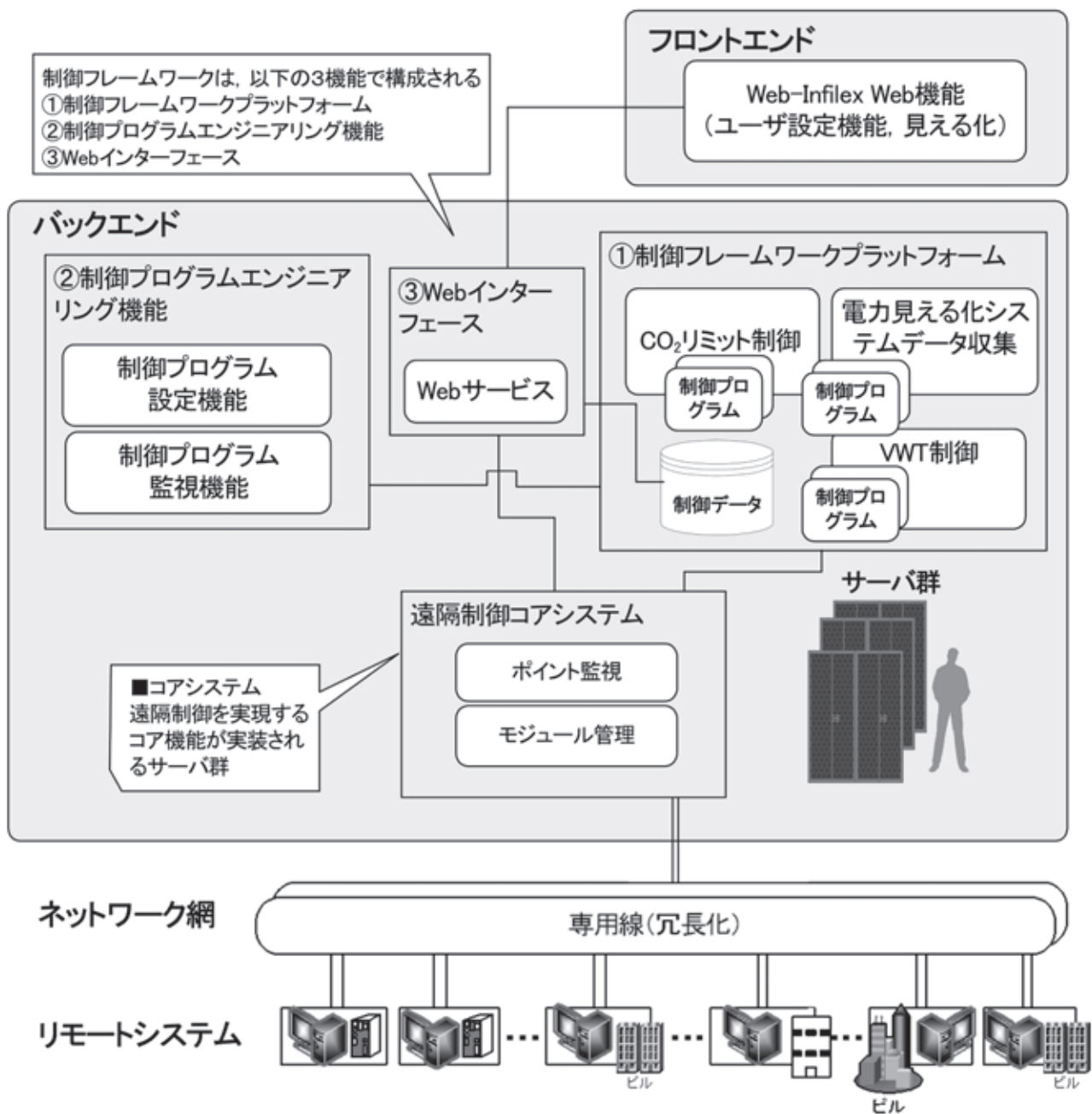


図1. システム構成図

### 3. CO<sub>2</sub> 総量リミット制御

#### 3.1 概要

本アプリケーションは、建物で使用した燃料・熱・ガス・電気などの年間の総量（CO<sub>2</sub> 排出量，原油換算量または電力量）が目標値以下になるように、空調設備を主体に運転状態（発停，設定温度）を抑制制御する（図2）。

対象建物の「管理対象となるエネルギー計量ポイント」，「抑制対象となる空調関連機器の監視・操作ポイント」をクラウド上の本アプリケーションに登録することで利用可能である。

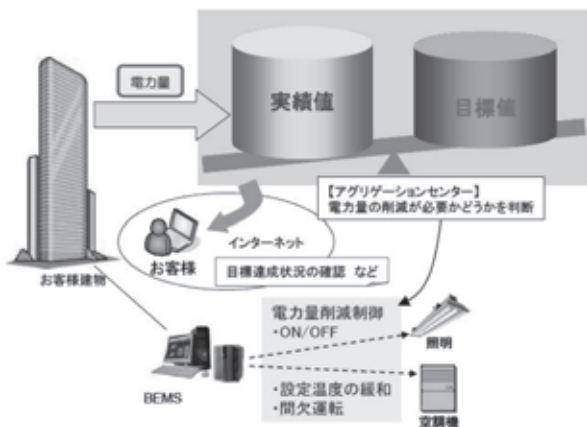


図2. CO<sub>2</sub> 総量リミット制御イメージ図

#### 3.2 特長

##### (1) 現地中央監視装置と情報連携

中央監視装置で保持している建物運用情報（カレンダー情報など）や空調設定値情報，空調運転状態を勘案した演算・制御が可能である。クラウドシステムと現地管理運用が連携した動作が可能となっている。

##### (2) 複数の省エネルギープログラムがワンパッケージで手軽に導入可能

「年間の総量を目標値以下に抑制する」という目的の下に，「目標値管理」「設定値の自動変更制御（ゆらぎ設定運転／省エネ設定運転）」「機器の運転停止制御（間欠運転／運転停止）」の各種省エネルギープログラムをワンパッケージにまとめたプログラムである（図3）。省エネルギープログラムは系統ごとに選択可能であり，重要系統は抑制禁止の指定も可能となっている。

##### (3) 年間の累計使用量が年間目標値を超過しないように抑制

年々強化されていく環境関連のビルへの規則に対応して，年間の累計使用量を目標値以下に抑制することを目的とした省エネルギープログラムである。

設定された月間目標値と当月の使用量予測値を比較してエネルギー抑制の要否を判断し，抑制が必要な場合は各種省エネルギー制御を起動させる（図4）。

抑制方法	省エネ対策		
	ゆらぎ設定運転	クールビズ ウォームビズ	運転時間短縮
室温設定の自動変更	現在設定±緩和幅の間を周期的に往復します	○	—
	省エネ設定の管理温度にプリセットします	○	—
機器の運転停止	間欠運転	—	○
	運転停止	—	○

図3. 省エネルギー制御一覧

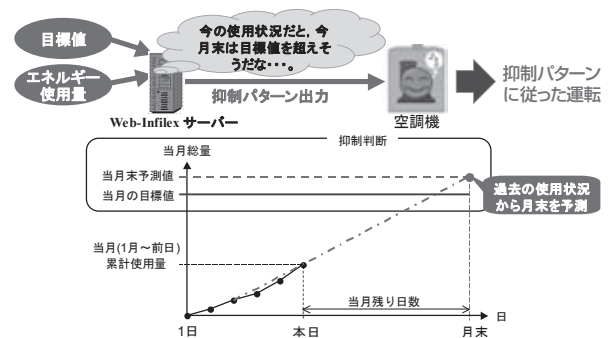


図4. エネルギー抑制の要否判断

##### (4) エネルギー使用量の合計値を容易に把握可能

ビルで使用する燃料，熱，ガス，電気などの各種エネルギー使用量の計量ポイントを本プログラムに登録することで，これらを合計した総量を算出し，数値およびグラフをWeb画面で表示可能である。

また，中央監視装置に取り込まれていないエネルギー使用量は，現地の読み値をWeb画面から直接入力することで総量の算出に加えることも可能である。

#### 3.3 省エネルギー制御

前述のように，本プログラムは省エネルギー制御として「設定値の自動変更制御」，「機器の運転停止制御」を実施する。

##### (1) 設定値の自動変更制御（ゆらぎ設定運転）

室温設定値を，現在設定±緩和幅（冷房時は「+」方向，暖房時は「-」方向）の間を一定周期で段階的に変更する。周期は系統ごとにずらすことも可能である。

##### (2) 設定値の自動変更制御（省エネルギー設定運転）

室温設定値を省エネルギー設定の管理基準温度にプリセットする。

##### (3) 機器の間欠運転制御

運転中の機器を周期的に一時停止する。

(4) 機器の運転停止制御

運転中の機器に停止指令を出力する。

(5) 自動復帰機能

省エネルギー制御が動作中に手動にて設定値が変更されたり、機器が運転された場合に、一定時間経過後に元の省エネルギー制御に復帰する。これは省エネルギー効果を確実にするための機能であるが、現地の運用上、再度省エネルギー制御が動作することが望ましくない場合は、本機能を動作させないことも可能である。

3.4 見える化画面

総量の使用状況、目標達成状況、省エネルギー制御の動作履歴および室内の温熱環境を Web 画面上のグラフに表示している。

ユーザーはこれらの画面を見ることで、目標と実績の進捗管理や制御パラメータの変更検討を行うことができる(図5)。

詳細に分析したい場合には、Excel ファイルでの出力も可能である(図10)。

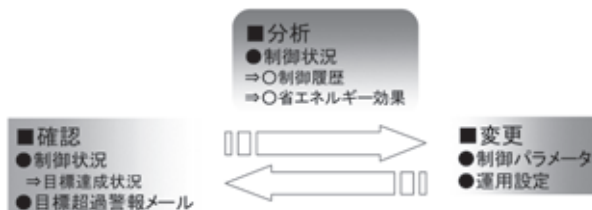


図 5. CO<sub>2</sub> リミット制御運用

(1) 目標達成状況

年間目標値や月間目標値に対する実績の状況を確認できる(図6, 図7)。

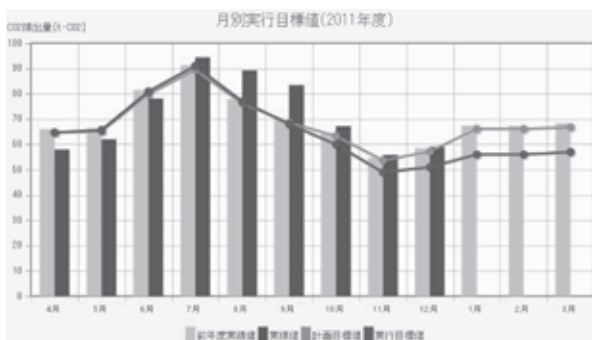


図 6. 年間目標達成状況

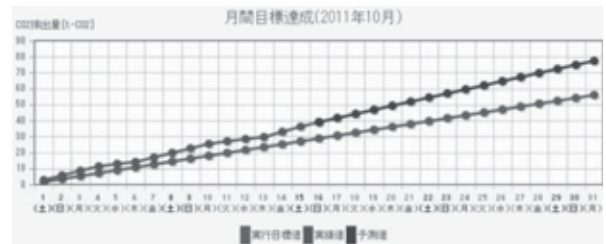


図 7. 月間目標達成状況

(2) 制御状況

日別の実績値、および系統全体の省エネルギー制御利用状況と室内温度状況を確認できる(図8, 図9)。

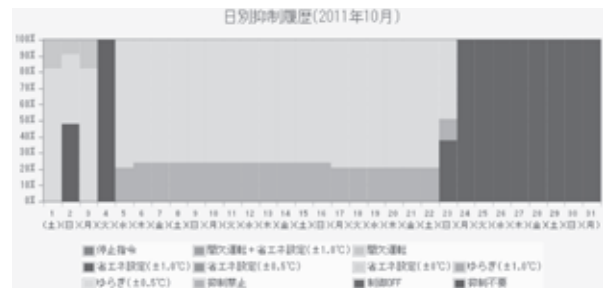


図 8. 抑制履歴

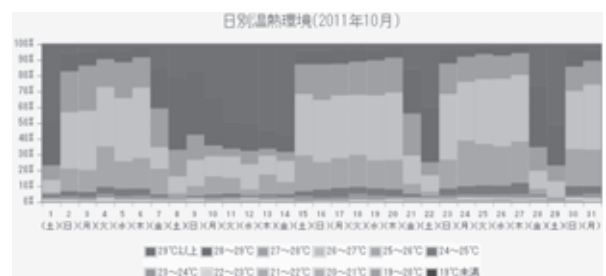


図 9. 温熱環境履歴

(3) 制御状況出力 (Excel ファイル出力)

各系統の制御状況を Excel ファイルで確認できる(図10)。

図 10. Excel ファイル出力

## 4. 学習型 VWT 制御

### 4.1 概要

熱源送水温度を最適に制御するアプリケーションである。学習機能を有しており、設備の経年劣化や運用変さらにも柔軟に対応できる。

### 4.2 課題

熱源は通常 7℃ 程度の冷水を送水しているが、これを高く設定すると熱源の効率が上昇する特性があることがわかっている。

夏期には冷房能力を確保するために 7℃ の冷水が必要であるが、多くの建物では春や秋などの中間期にこままでの低温度は必要なく、10℃ などの冷水でも十分に冷房可能である。しかしながら、冷水流量が増加しポンプの搬送動力が増加するトレードオフの関係が存在し、最適な設定温度の把握が困難であるため、従来は送水温度 7℃ 固定で運用される場合が多かった (図 11)。

上記のような最適送水温度を決定するためには、高度なアルゴリズムや多くの演算量が必要となり、高価なシステムとなるため、投資対効果が悪く、大規模な建物でないと導入が難しかった。

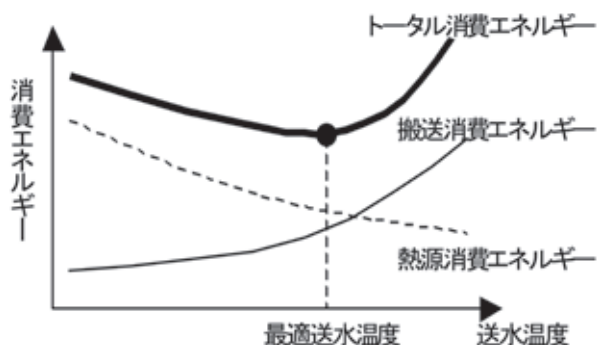


図 11. 熱源送水温度と消費エネルギーの関係

### 4.3 クラウドシステムによる課題解決

この課題に対して、当社保有技術である位相事例ベースモデリング (TCBM<sup>TM</sup>: Topological Case-Based Modeling)<sup>\*1</sup> と多次元スプラインによる応答曲面法 (RSM-S: Response Surface Methodology by Spline)<sup>\*2</sup> を利用した送水温度最適設定制御 (以下、学習型 VWT 制御) をクラウドシステムに構築した。

これにより、従来、建物ごとに実装するのが困難であったシステムを、多くの建物に提供することが可能になった。

※1 TCBM: 入力データ間の類似度合いをもとに、データを事例化するモデリング手法であり、与えられた入力に類似した過去の事例を参照して、必要な出力を導く。こうした事例ベース推論法では、過去に経験した事例ベース

の中に入出力関係が内包されているため入出力関係を規定するモデル構造を特別に作る必要がなく、非線形な入出力関係にも対応することができる<sup>(3)</sup>。

※2 RSM-S: 計測データをもとに近似モデル (応答曲面モデル) を生成し、最適条件を探索する最適化手法である。本手法では応答曲面モデルとして、多変数スプラインを利用している。これにより、入出力関係が複雑なシステムにおいて、実際に計測された離散的データからすばやく滑らかな応答曲面モデルを生成でき、かつ再現性のあるモデル構築が可能となっている<sup>(4)</sup>。

### 4.4 制御ロジック

学習型 VWT 制御の概略の枠組みを示す (図 12)。

- (1) 熱源送水温度とトータル消費エネルギーの関係を随時学習し、外部環境変動や建物の運用変化にも追従するモデルを構築する。
- (2) 得られたモデルから、現在の状況下でトータル消費エネルギーが最小となる熱源送水温度設定値を算出し、出力する。
- (3) 再度、制御結果を学習し、次の制御に活用する。

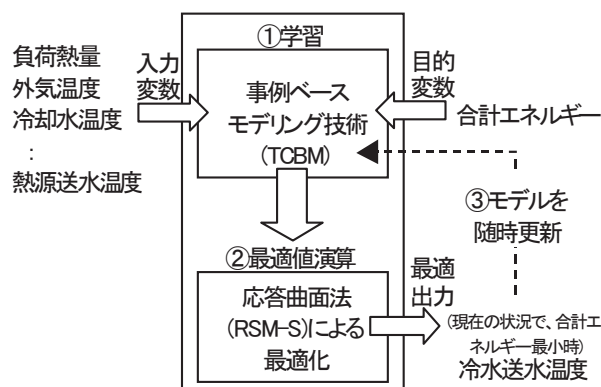


図 12. 学習型 VWT 制御の枠組み

## 5. 電力見える化システム

### 5.1 概要

近年の電力不足への対応は、これまでのように建物管理者が主体的に行う対策だけでは不十分となり、建物居住者の節電・省エネ対策に対する理解と協力および、自発的な行動が不可欠となってきている。

そのためには、建物の電力需要量と今後の見通しを、簡潔かつリアルタイムに情報提供することが重要であると考え、本機能を開発した。

### 5.2 グラフ表示機能

主なユーザーには建物居住者を想定しており、パソコンからだけでなくスマートフォンに対応した画面を

用意している。

提供しているグラフには、1時間ごとの電力量実績値、前日の電力量実績値、1週間前の電力量実績値、当日の電力量予測値、電力量の上限値、現時の使用率を表示している。電力量実績値は、毎時10分ごとに更新する。また、グラフの印刷機能や表示データのCSV出力機能を用意している(図13)。

過去のデータを参照することも可能であり、月ごとの日単位の電力量実績値、および日ごとの時間単位の電力量実績値の表示が可能である(図14)。



図13. 当日の電力量の表示例

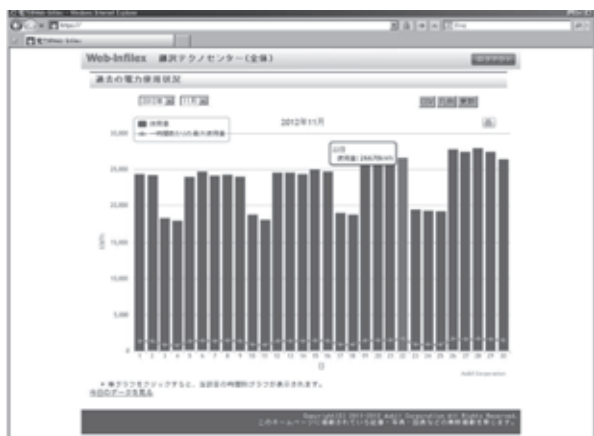


図14. 月ごとの電力量の表示例

### 5.3 電力予測機能

電力量予測には、TCBMを利用し、電力量の実績データ、外気温度、外気湿度の実測データから演算した外気エンタルピーに基づき、0時に1時~24時までの電力需要量を1時間単位で予測する(図15)。さらに、当日の電力需要量に応じて、電力需要量予測結果を補正する機能を有している。また、自動学習機能により、1日1回、電力需要量の実績データに基づいて、予測モデルが更新されるため、季節による変化やお客さまの建物の運用状況が変化した場合に、迅速に対応することができる。

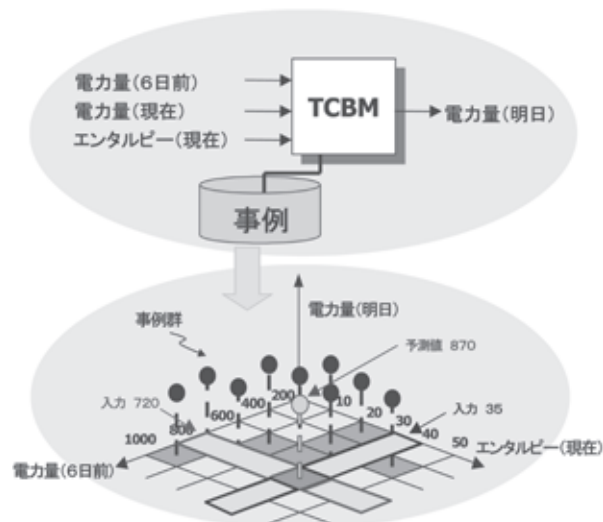


図15. TCMBモデルイメージ

## 6. おわりに

本論文では、節電・省エネルギーに役立つクラウドサービスであるWeb-Inflexのシステム概要、アプリケーション群を紹介した。

東日本大震災以降の全国的な電力需給逼迫により、節電・省エネルギーに対するニーズはさらに大きくなっている。クラウドサービスの特性を活用し、広域でのエネルギー需給連携を想定したデマンドレスポンス機能や、熱源・蓄熱システム制御の開発に取り組んでいる。また、建物居住者の快適性・利便性が向上するようなクラウドサービスも併せて提供していく予定である。

### <参考文献>

- (1) 近田, 西口, 平田, 太宰, 中村, 小野寺: ASP型省CO<sub>2</sub>サービスと学習型熱源最適化制御, azbil Technical Review (2011), pp. 10-15, 株式会社山武
- (2) アズビル株式会社: 「製品紹介」電力の見える化クラウドサービス 電力@Web-Inflex™, 計測と制御 51-7 (2012)
- (3) 筒井ほか: データマイニングにおける非線形システムのモデリングとその応用, システム/情報/制御 40-12, pp. 552-530 (1996)
- (4) C. Kaseda: The Practical Study on Response Surface Methodology, JSM 2004 Proceeding, pp. 2128-2134 (2004)

### <商標>

Web-Inflexは、アズビル株式会社の商標です。

TCBMは、アズビル株式会社の商標です。

電力@は、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

小柳 隆	ビルシステムカンパニー 開発本部開発3部
東島 浩史	ビルシステムカンパニー 開発本部開発3部
小野寺 博	ビルシステムカンパニー 開発本部開発3部
近田 智洋	技術開発本部基幹技術開発部
今西 祐	技術開発本部基幹技術開発部



# 流量計測制御機能付制御弁による 空調機エネルギー性能の見える化

## Visualizing the Energy Performance of an Air Handling Unit Using a Control Valve That Measures and Controls Flow Rate

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	佐藤 慶大 Keita Satou	アズビル株式会社 バルブ商品開発部	古谷 元洋 Motohiro Furuya
アズビル株式会社 バルブ商品開発部	木下 良介 Ryosuke Kinoshita	アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	太宰 龍太 Ryouta Dazai

### キーワード

制御弁, 流量, 熱量, 圧力, エネルギー, 空調機, 見える化

建物の省エネルギーを実現する上で、空調機廻りのエネルギー性能を把握し、エネルギー性能の改善を実施すべきシステムの抽出や具体的な対策方法を提示することは重要である。空調機ごとに設置される制御弁に流量計測機能を搭載させたことで、省コスト・省施工でかつ、きめ細かく空調機廻りのエネルギーを把握することが可能となった。また、取得可能なエネルギーデータを利用して、空調機廻りのエネルギー性能の改善対策箇所を抽出するためのロジックを立案し、当社藤沢テクノセンター第100建物で検証を行い、その有効性を確認した。

In order to achieve energy savings in a building, it is necessary to understand the energy performance of the air handling unit, to identify a system that will improve energy performance, and to provide specific countermeasures. By including a function for measuring the flow rate in the control valve installed in each air handling unit, we have made it possible to gain a detailed understanding of the energy use of the air handling unit at a lower cost and with less construction work. Moreover, we have worked out the logic for using obtainable energy data to extract areas where measures are needed to improve the air handling unit's energy performance. Verification was carried out in Building 100 of our Fujisawa Technical Center, and effectiveness was confirmed.

## 1. はじめに

建物全体の省エネルギーを実現する上で、エネルギー性能を常に把握し、これらを維持向上させることが重要である。そのために用途別、系統別、機器別に計測・計量を行い、エネルギー消費状況を把握する必要がある。その中で空調機廻りのエネルギー性能を把握するためには、流量計、熱量計などの計測・計量機器の設置が必要となるが、多大な費用がかかる。また、計測・計量により得られるデータからエネルギー性能の改善を実施すべきシステムの抽出や具体的な対策方法を提示するため

の検証・評価方法が定まっていない。

本論文では、空調機廻りの流体データ（温度、流量、熱量）を省コスト・省施工で計測・計量することを可能とした流量、温度計測の機能を搭載した流量計測制御機能付制御弁の概要を報告する。さらに流量計測制御機能付制御弁を当社藤沢テクノセンター第100建物へ導入し、計測・計量データを元にした空調機運転状態を把握することでエネルギー性能の改善対策箇所の抽出を行うためのロジックの立案と検証を行った。



## 2. 流量計測制御機能付制御弁の概要

### 2.1 流量計測原理

配管内を流れる流量を計測する原理の一つに差圧式流量計測がある。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が算出できる。

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

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

図1に示すように、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プラグの前後差圧と、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のC<sub>v</sub>値から流量を算出している。

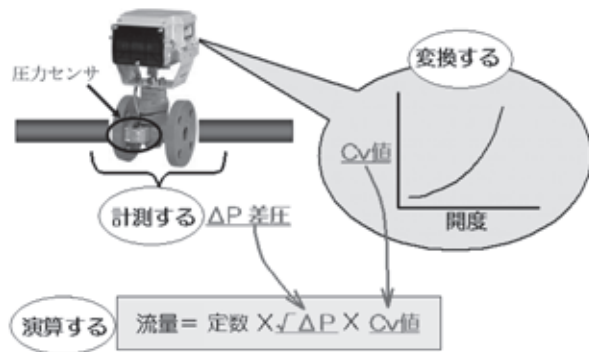


図1. 流量計測の原理

### 2.2 熱量演算

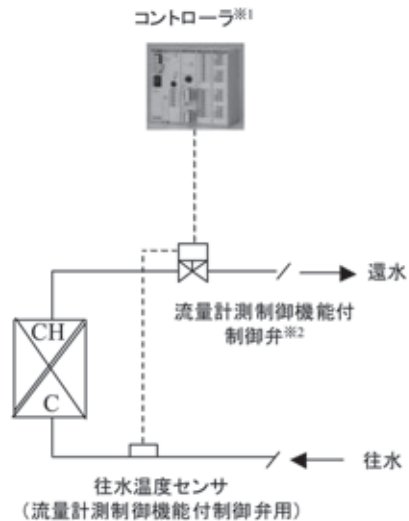
流量計測制御機能付制御弁で計測している流量、往水温度、還水温度の情報を元に下記計算式に基づいてコントローラにて熱量を演算する。(図2参照)

$$W = K \times Q \times \Delta T \quad \dots (2)$$

W : 熱量            K : 熱量換算係数  
 Q : 流量            ΔT : 往還温度差

流量計測制御機能付制御弁から出力される計測計量データとコントローラを組み合わせると、別途流量計や熱量計を設置することに比べ、省コスト・省施工で以下の計測計量データを取得することができる。

- ①往水温度(℃) ②還水温度(℃) ③瞬時流量(l/min)
- ④瞬時熱量(MJ/h) ⑤積算流量(l) ⑥積算熱量(MJ)
- ⑦制御弁(%) ⑧制御弁1次側圧力(kPa) ⑨制御弁2次側圧力(kPa) ⑩制御弁前後差圧(kPa)



- ※1 コントローラに熱量演算機能を搭載
- ※2 流量計測制御機能付制御弁の圧力センサ部に温度計測機能を搭載

図2. 空調機コイルの消費熱量把握

## 3. VAV (Variable Air Volume) 空調方式における空調機消費熱量を利用した運用改善対策システムの抽出口ロジックの立案

### 3.1 制御性能の確認

VAV空調方式において、各VAVが必要とする熱量は同じでないため、システム全体として最適な給気温度を判断し給気温度設定値を変更する制御を行う。

冷房時の場合、負荷が大きければ給気温度設定値は低くなる傾向を示す。この傾向を利用し、負荷の大小と給気温度設定値との相関関係から制御性能を確認する。負荷の大小と給気温度設定値との相関が強ければ正常と判断できるが、そうではない場合は制御的なフォルトがあると判断できる。フォルトの想定要因としては、制御弁の故障・固着や温度センサの計測異常(劣化、不適切な設置位置)などが考えられる。

また、負荷の大小の判断は、以下のように本論文で新たに定義した「熱使用率」を利用する。

$$\text{熱使用率} = (\Sigma W \div \Sigma W_{\text{max}}) \times 100 \quad \dots (3)$$

ΣW : 月積算熱量(実績値)  
 ΣW<sub>max</sub> : 月積算定格熱量 = 設計積算流量 × 設計往還温度差

### 3.2 エネルギー性能の改善対策箇所の抽出

複数の空調機が設置されている場合、効率的に運用改善を行うには、どの空調機から対策を講じていけば良いのかを判断することが重要である。

消費熱量の絶対量が多ければ対策の効果は大きく、熱使用率が高ければ運用改善を行える可能性が高いことから消費熱量かつ熱使用率が高い空調機を抽出する。

次に抽出した空調機において、消費熱量かつ熱使用率が高い要因分析を行う。消費熱量かつ熱使用率が高い要因は以下の2点が考えられる。

- ①設定フォルト（設定値問題） ②熱負荷過剰

冷房時の場合、上記要因をVAV運転状態から以下の観点で切り分けることにした。

- (1) VAV 温度設定 (SP) 頻度分布 (設計温度 26°C 時)  
 ⇒ VAV 温度設定値 26°C 以上の出現頻度が多い  
 ⇒ VAV 温度設定値 26°C 未満の出現頻度が多い

- (2) VAV 制御状態 (冷房時) 頻度分布

VAV 制御状態は図3に示すように室内温度と冷房設定との偏差によって、大きく4つの状態(1:冷房能力増要求, 6:冷房能力適正化要求, 2:適正冷房, 3:最小風量)に分類される。各状態の出現頻度の多さによって要因を切り分ける。

- ⇒ 2: 適正冷房, 6: 冷房能力適正化要求,  
 3: 最小風量 の出現頻度が多い  
 ⇒ 1: 冷房能力増要求 の出現頻度が多い

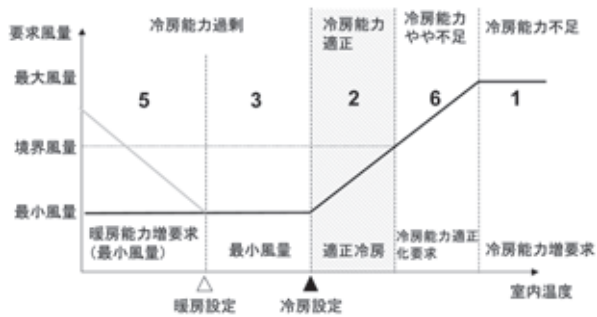


図3. VAV 制御状態 (冷房時)

- (3) (VAV 温度計測値 - 設計温度) 頻度分布

VAV 温度計測値と設計温度との偏差を確認する理由は、VAV 温度設定値 26°C 未満の出現頻度が多い、かつ VAV 制御状態が 1: 冷房能力増要求 の出現頻度が多い状態の場合は、設定フォルトと熱負荷過剰を切り分けられないからである。例えば、VAV 温度設定値が 24°C で VAV 計測温度が 25°C の場合で、VAV 制御状態が “1” となっている状態は、設計温度 26°C を満足しているから設定フォルトと判断できる。一方、VAV 温度設定値が 24°C で VAV 計測温度が 28°C の場合で、VAV 制御状態が “1” となっている状態は、設計温度 26°C を満足していないため熱負荷過剰と判断できる。

したがって、VAV 温度設定値 26°C 未満の出現頻度が多い、かつ VAV 制御状態が 1: 冷房能力増要求 の出現頻度が多い状態の場合は、VAV 温度計測値と設計温度との偏差が、“0°C 以下” もしくは “0°C より大” の出

現頻度の多さによって要因を切り分ける必要がある。

- ⇒ 0°C 以下の出現頻度が多い  
 ⇒ 0°C より大の出現頻度が多い

(1) ~ (3) の一連の要因判断フローを図4に示す。

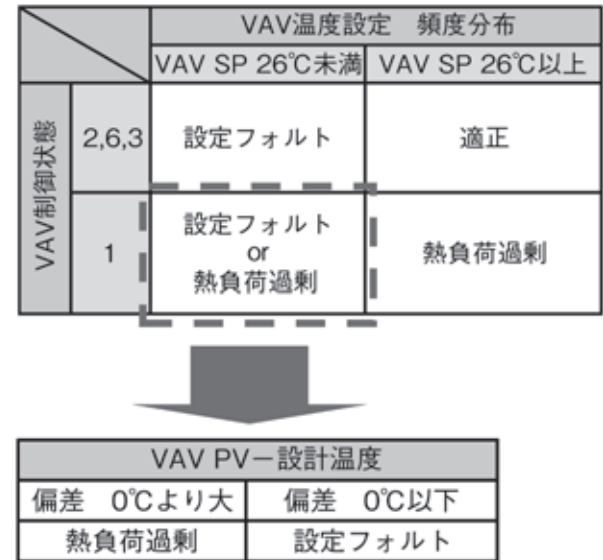


図4. 要因分析判断ロジック

#### 4. ロジックに基づいたデータ分析

3項で立案したロジックを流量計測制御機能付制御弁が導入されている当社藤沢テクノセンター第100建物のデータを用いて検証を行った。

##### 4.1 建物概要

表1に流量計測制御機能付制御弁を導入した当社藤沢テクノセンター第100建物を示す。建物の主な用途は事務室であり、2階～7階が基準階で、各階空調機は4台設置されている。空調設備システム概要を図5に示す。VAV空調方式を採用している。運用は、平日8時前後から空調を開始し、19時ごろに停止を基本としている。

表1. 建物概要

項目	建物概要
所在地	神奈川県藤沢市
延床面積	17,840 m <sup>2</sup>
規模	地上7階、塔屋2階
竣工時期	2006年11月
用途	事務所

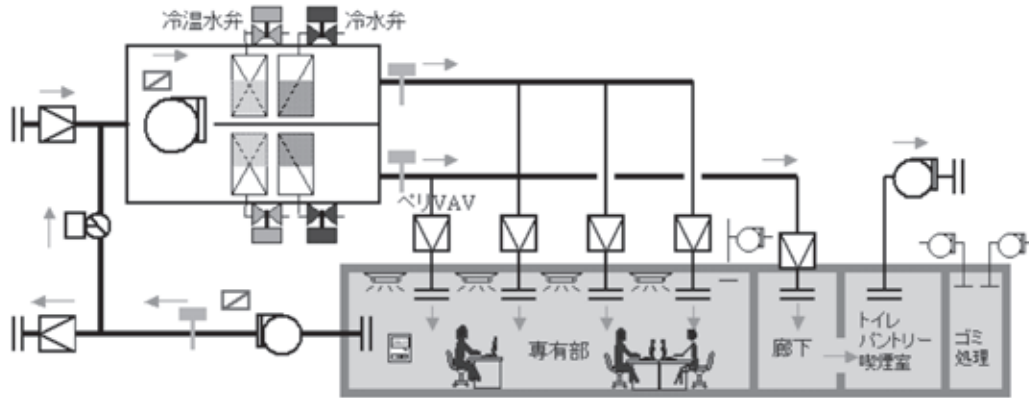


図5. 空調設備システム概要

4.2 検証結果

3階～6階に設置された空調機を解析対象として、2010年7月～9月におけるデータを用いて検証した。

(1) 制御性能の確認

熱使用率と給気温度設定値の相関図を図6に示す。熱使用率が高い場合、給気温度設定値は低く、熱使用率が低い場合、給気温度設定値は高い傾向となっている。

したがって、制御弁の故障や温度センサの計測異常などのような制御的なフォルトは無いと判断できる。

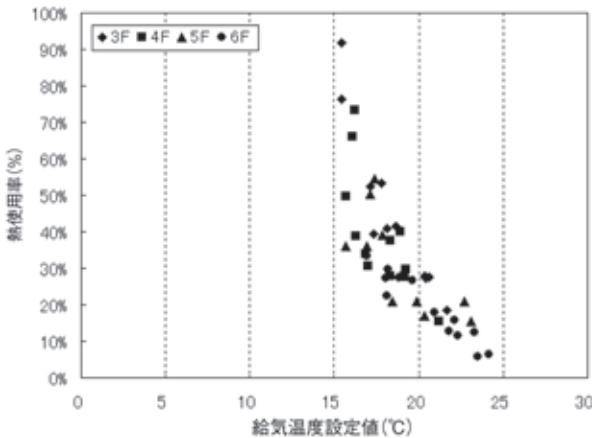


図6. 熱使用率と給気温度設定値の相関図

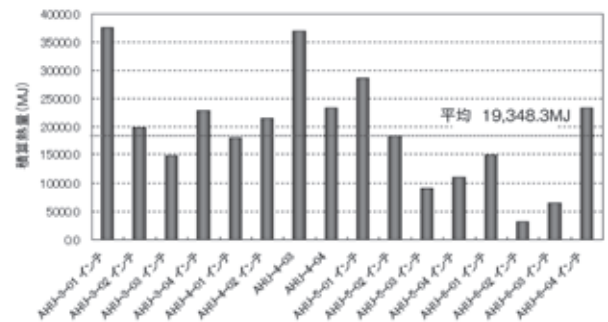


図7. 空調機別の積算熱量比較 (2010年7月)

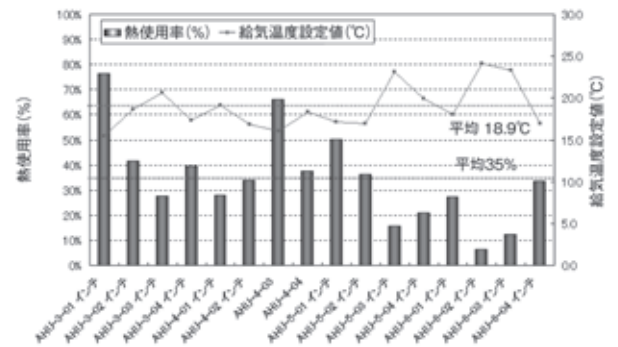


図8. 空調機別の熱使用率比較 (2010年7月)

(2) エネルギー性能の改善対策箇所の抽出

空調機別の積算熱量比較を図7に、また、空調機別の熱使用率比較を図8に示す。全体的には、3階～4階系統が積算熱量および熱使用率が高い傾向となっている。特に、AHU-3-01、AHU-4-03が突出して高くなっている。その要因分析のためAHU-3-01とAHU-4-03のVAV 運転状態を確認することにした。

AHU 系統と VAV 系統の組合せは表2の通りである。

表2. AHU 系統と VAV 系統の組合せ

AHU系統	VAV系統
AHU-3-01 インテ	VAV-3-1-1～4
AHU-4-03	VAV-4-3-1～3

AHU-3-01 系統 VAV-3-1-1～4 系統運転状態を図9に、また、AHU-4-03 系統 VAV-4-3-1～3 系統運転状態を図10に示す。それぞれに (a) VAV 温度設定 頻度分布, (b) VAV 制御状態 頻度分布, (c) (VAV 温度計測値－設計温度) 頻度分布を示す。

① AHU-3-01 系統, VAV-3-1-1～4 系統

(a) VAV 温度設定 頻度分布

VAV-3-1-1～3 の3系統は、VAV 温度設定値 26℃以上の中心値となっており、VAV-3-1-4 の1系統のみが VAV 温度設定値 26℃未満の 24～25℃が中心値となっていた。

(b) VAV 制御状態 頻度分布

VAV-3-1-1～3 の3系統は、2：適正冷房, 6：冷房適正化要求が中心値となっており、VAV-3-1-4 の1系統のみが1：冷房能力増要求の頻度が極端に高い状態となっていた。

ここで、VAV-3-1-1～3 の3系統は適正な運用がされていると判断できる。

(c) VAV 温度計測値－設計基準温度偏差 頻度分布

VAV-3-1-4 は、0℃より大が中心値だったため、現状の設備能力に対しては熱負荷過剰と判断できる。

したがって、VAV-3-1-4 系統においては熱負荷を削減するか、もしくは他系統へ熱負荷を移すなどの対策が必要という一次判断ができる。

② AHU-4-03 系統, VAV-4-3-1～3 系統

(a) VAV 温度設定 頻度分布

VAV-4-3-2～3 の2系統が VAV 温度設定値 26℃未満の 25℃が中心値となっていた。

ここで、VAV-4-3-2～3 系統は運用上何かしらの問題があることと、VAV-4-3-1 系統は適正な運用がされていると判断できる。

(b) VAV 制御状態 頻度分布

VAV-4-3-2～3 の2系統が比較的1：冷房能力増要求の頻度が多くなっていた。

(c) VAV 温度計測値－設計基準温度偏差 頻度分布

VAV-4-3-2 は、0℃以下が中心値だったため、設定フォルトと判断できる。VAV-4-3-3 は、0℃より大が中心値だったため、現状の設備能力に対しては熱負荷過剰と判断できる。

したがって、VAV-4-3-2 においては VAV 温度設定を 26℃に緩和する対策が必要という一次判断が行え、VAV-4-3-3 系統においては熱負荷を削減するか、もしくは他系統へ熱負荷を移すなどの対策が必要という一次判断ができる。

5. まとめ

流量計測制御機能付制御弁を導入し、それにより取得できる空調機消費熱量を利用した運用改善対策箇所を

抽出するロジックを立案し、検証を行った。

その結果、別途流量計や熱量計を設置せずに省コスト・省施工で空調機消費熱量が把握できるようになり、さらには運用改善が必要な系統を絞り込み、その要因を一次的に判断することがおおよそ可能であることを示した。

今後はより汎用性と信頼性を高めていくため、複数建物での分析と、データ上における分析結果と現場における実運用との差異の確認を行っていく予定である。

<参考文献>

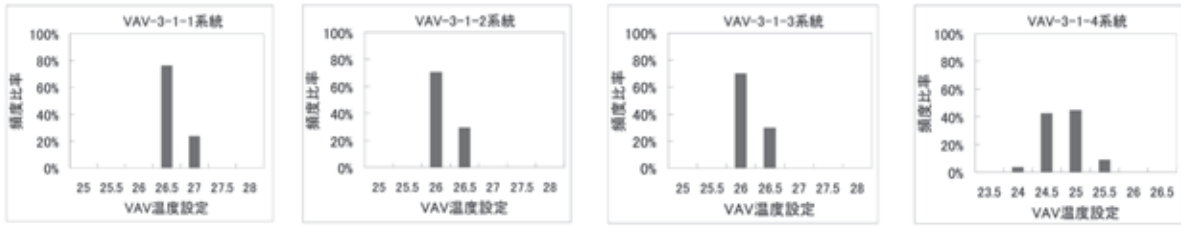
- (1) 佐藤：計装技術, Vol.28, No.2, 平成20年9月
- (2) 計測と制御, 第48巻, 第3号, 2009年3月号
- (3) 渡邊：特集 視覚化・見える化 BEMS データの視覚化, 空気調和・衛生工学, Vol.85, No.2, pp121-130
- (4) 空気調和・衛生設備の環境負荷低減マニュアル
- (5) 環境・エネルギー性能の最適化のための BEMS ビル管理システム
- (6) 古谷, 大谷：流量計測・制御機能付きバルブの開発, azbil Technical Review 2009年12月発行号

<商標>

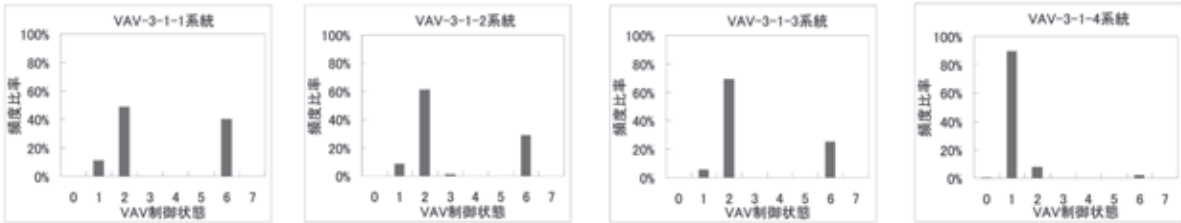
BEMS は、財団法人省エネルギーセンターの商標です。

<著者所属>

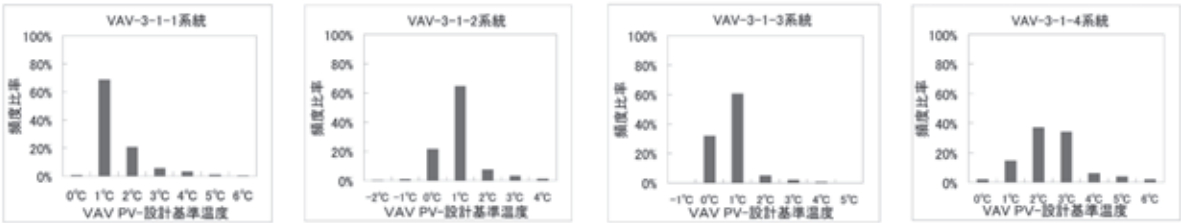
- |       |                              |
|-------|------------------------------|
| 佐藤 慶大 | ビルシステムカンパニー<br>プロダクトマーケティング部 |
| 古谷 元洋 | バルブ商品開発部                     |
| 木下 良介 | バルブ商品開発部                     |
| 太宰 龍太 | ビルシステムカンパニー<br>プロダクトマーケティング部 |



(a) VAV 温度設定 頻度分布

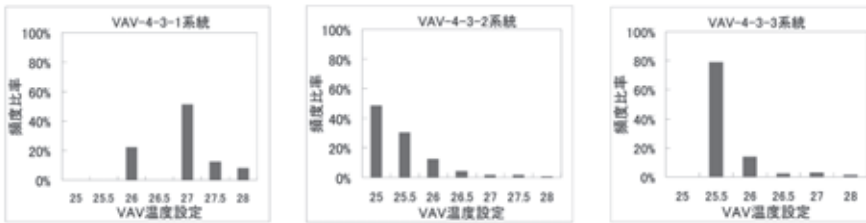


(b) VAV 制御状態 頻度分布

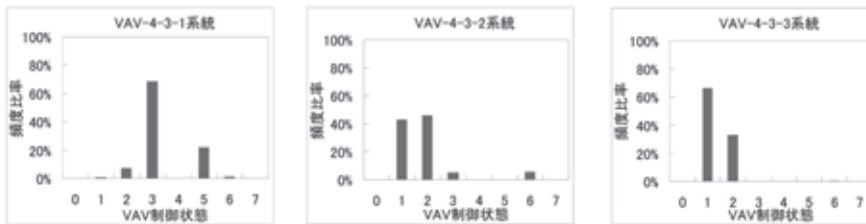


(c) (VAV 温度計測値-設計温度) 頻度分布

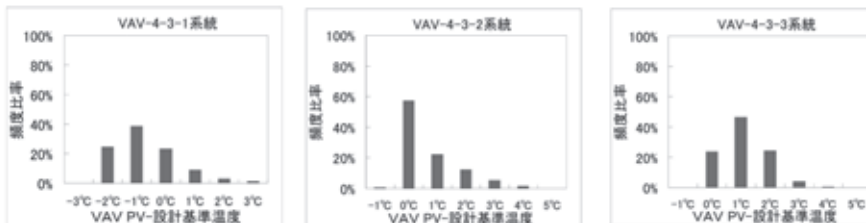
図9. AHU-3-01 系統 VAV-3-1-1～4 系統 運転状態 (2010年7月)



(a) VAV 温度設定 頻度分布



(b) VAV 制御状態 頻度分布



(c) (VAV 温度計測値-設計温度) 頻度分布

図10. AHU-4-03 系統 VAV-4-3-1～3 系統 運転状態 (2010年7月)

表3. VAV 温度設定の定義

項目	範囲
25℃	25℃以下
25.5℃	25℃より大きく、25.5℃以下
26℃	25.5℃より大きく、26℃以下
26.5℃	26℃より大きく、26.5℃以下
27℃	26.5℃より大きく、27℃以下

表4. 温度偏差の定義

項目	範囲
0℃	0℃以下
1℃	0℃より大きく、1℃以下
2℃	1℃より大きく、2℃以下
3℃	2℃より大きく、3℃以下

# 往還温度差確保と快適性確保を両立する ファンコイルユニット制御ロジックの開発

## Control Logic That Maintains a Difference in Water Temperature between Fan Coil Unit Inflow and Outflow While Keeping Living Areas Comfortable

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

木都 孝洋  
Takahiro Kido

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

田原 淳平  
Junpei Tahara

アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー

沖 直道  
Naomichi Oki

### キーワード

ファンコイルユニット, 還温度制御, ローセレクト, 過流量抑制

ファンコイルユニット（以下、FCU）において、室内における快適性の維持とコイルを流れる水の往還温度差を両立する制御ロジックを開発したので報告する。FCUにおいては、実運用時に設計段階で期待した往還温度差が確保されていないケースが発生していると言われている。設計往還温度差が確保されないと、FCU内の流量が無駄に増えることのみならず、熱源機も非効率な運転になるなど、空調システム全体でのエネルギーロスが生じてしまう。今回報告するロジックは室内の快適性を維持したままこの問題を解決するロジックである。

This paper reports our development of fan coil unit (FCU) control logic that maintains a water temperature difference between FCU inflow and outflow while ensuring comfort in the residential area. In the actual application of conventional FCUs, it is understood that the temperature difference that was anticipated at the design stage will not always be maintained. Failure to maintain the difference causes too much water to flow through the FCU and causes inefficient operation of the heat source, resulting in energy loss from the entire air handling system. The logic reported in this paper resolves this problem and maintains indoor comfort at the same time.

## 1. はじめに

ファンコイルユニット（FCU）は、ホテルや病院などの居住者スペースやオフィスビルのベリメータ（窓際ゾーン）に設置され、居室内空調負荷の除去に寄与する装置である。従来FCUに対しては、ON/OFF 弁や比例弁が適用され、室内温度制御によってコイルを流れる

流量を調節する制御手法が取られてきているが、中には設計段階で期待した往還温度差が確保されていないケースが発生していると言われている。

設計往還温度差が確保されないと、FCU内の流量が無駄に増え搬送動力が増大することになるだけでなく、熱源機も非効率な運転になるなど、空調システム全体でのエネルギーロスが生じてしまう。

当社は解決策として、FCU 制御において、室内の快適性は維持しつつ温度差確保の課題を解決できる制御ロジックを考案し、FCU コントローラ Inflex™ FC に搭載した (図1)。本論文ではそのロジックと有効性検証結果について報告する。



図1. 還温度制御付き Inflex FC

## 2. ロジックの概要

考案した制御ロジックは、内部に2つのPI (比例・積分) ループを持つものとなっている。

空気側においては、室内/還気温度計測値を設定値に追従させるためのPIによる制御ループを持ち、水側においては還温度計測値を設定値に追従させるためのPIによる制御ループを持っている。コントローラは、これら2つの出力の内、低い方を選択しバルブに出力する(図2)。ファン風量は、「自動」を選択した場合、室内/還気制御ループの出力に従い変化する。

## 3. ロジックとFCU 特性との関係

前項で紹介したロジックがFCU 動作に及ぼす影響について、本項ではFCU の特性を用いて解説する。

FCU は流量の増大に伴って往還温度差は小さくなり、熱処理量は大きくなる傾向を示す。図3は、FCU メーカーから仕様書で提供されている流量ごとの還温度と顕熱交換量をプロットした特性図例である。一般的に

FCU は機種による値の違いこそあるが、本例と同等の傾向を示すと考えてよい。

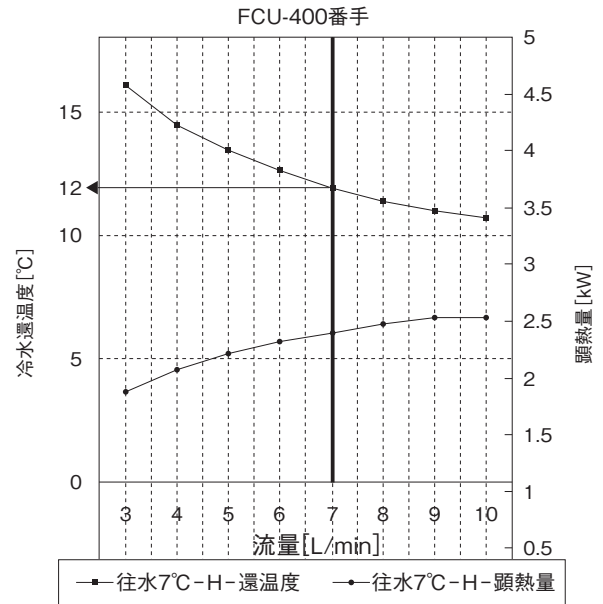


図3. FCU 特性例

特性図より、還温度は、流量が増えるに従い送水温度に近付くが、顕熱処理量については流量の上昇に伴う増加の割合は徐々に減少していき、特に定格流量 (図3では7l/min) を超える範囲ではその増加量は僅少に留まることがわかる。言いかえると、FCU においては定格流量よりも大きな流量を流しても温度制御による快適性維持にはほぼ寄与せず、流量過多による搬送動力増大のみが発生することになる。

また同時に、FCU において往還温度差が縮小するのはその様な過大流量が発生した場合であり、還温度制御の設定値を設計温度に設定し、還温度を設計温度以上に維持することができれば過大流量を抑止でき、結果として省エネルギーに貢献できることがわかる。

本特性図において2項のロジックの振舞いを考察したのが図4である。

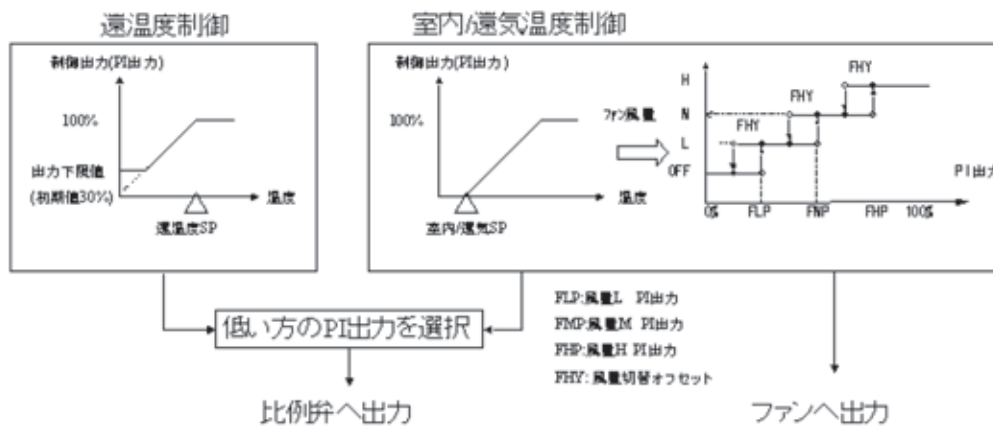


図2. 考案した制御ロジック

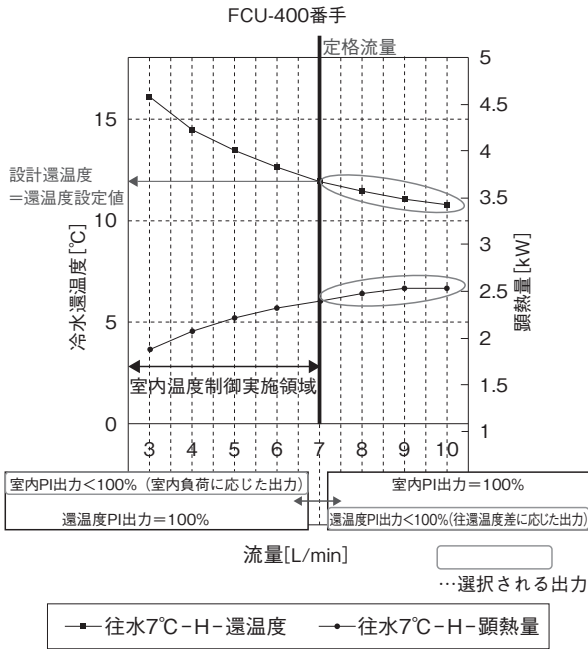


図4. FCU 特性図上における考案ロジック

まず、定格流量以下において2つのPI出力について考えると、還温度ループについては計測値が設定値以上であるから100%出力となり、必ず室内温度制御ループによって演算された制御出力が選択されることになることがわかる。すなわち、この領域においては従来の室内温度制御と同等の制御性が確保される。

一方、定格流量よりも高い流量域について考える。還温度は設定値以下となるはずなので、計測値を設定値に追従させるべく、還温度PIループからバルブを絞る制御量が出力されていることになる。要求流量が大きいと言うことは、室内負荷は高い領域であると言えるので、室内温度制御ループの出力は100%という値を取っているはずである。この結果、この領域においては還温度制御ループの演算結果が選択される。結果として過流量が発生した場合にそれを定格流量まで絞り込む動作が実施されることになる。

#### 4. 実験による検証

考案したロジックの妥当性を検証する実験を行った。実験は表1の条件を持つ図5に示す構成の、当社所有建物の1室を使って行った。

実験に際して、事前にFCU実機の実験を実施した(図6)。これにより実験に用いるFCUも一般的なFCUの特性と同じ傾向を持つことと、流量が9.0l/minを超えたところで顕熱処理量の増加率が下がっていることが確認できた。これにより、本FCUの定格は流量9.0l/min、その時の還温度計測値である15℃を還温度設定として、実験を行うことにした。

実験は同環境において、従来制御である室内温度制御

表1. 実験条件

項目	値	単位
室内温度設定	26.0	°C
還温度設定	15.0	°C
内部発生熱量(※)	2.05	kW
FCU定格流量	9.0	l/min
風量H時処理顕熱量(計測値)	2.2	kW

(※) 内部発生熱量は空気調和ハンドブックの記載を元に推定した外窓貫流熱0.13kW、外窓日射0.37kW、内窓貫流熱0.08kW、外壁貫流熱0.11kW、人0.24kW、PC0.08kW、ヒータ1.20kWを合計。

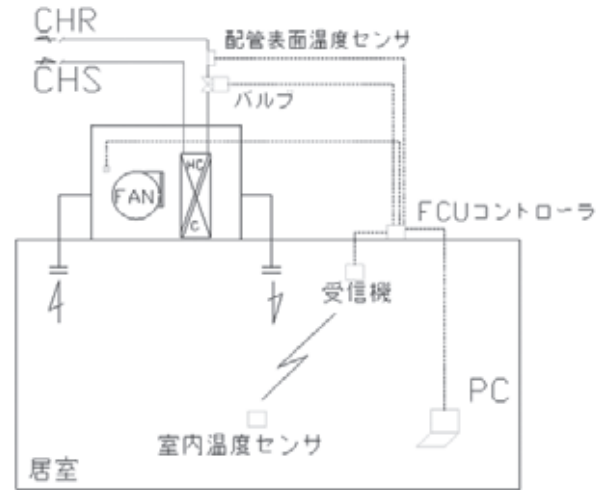
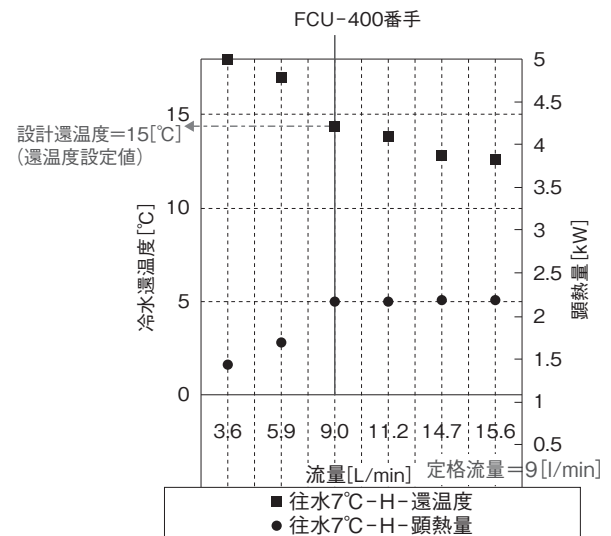


図5. 実験環境



流量：流量計による計測値  
 還温度：還温度センサによる計測値  
 顕熱量：FCUに入出する空気温度差と計測風量により演算

図6. 実験に用いたコイルの特性

のみの場合と、今回考案したロジックを用いた場合とを行い、結果を比較した(図7)。

結果、双方とも室内温度計測値の設定値に対する追従の度合いはほぼ同等である一方、室内温度制御のみの場合は還温度計測値および流量が成り行きで推移してい



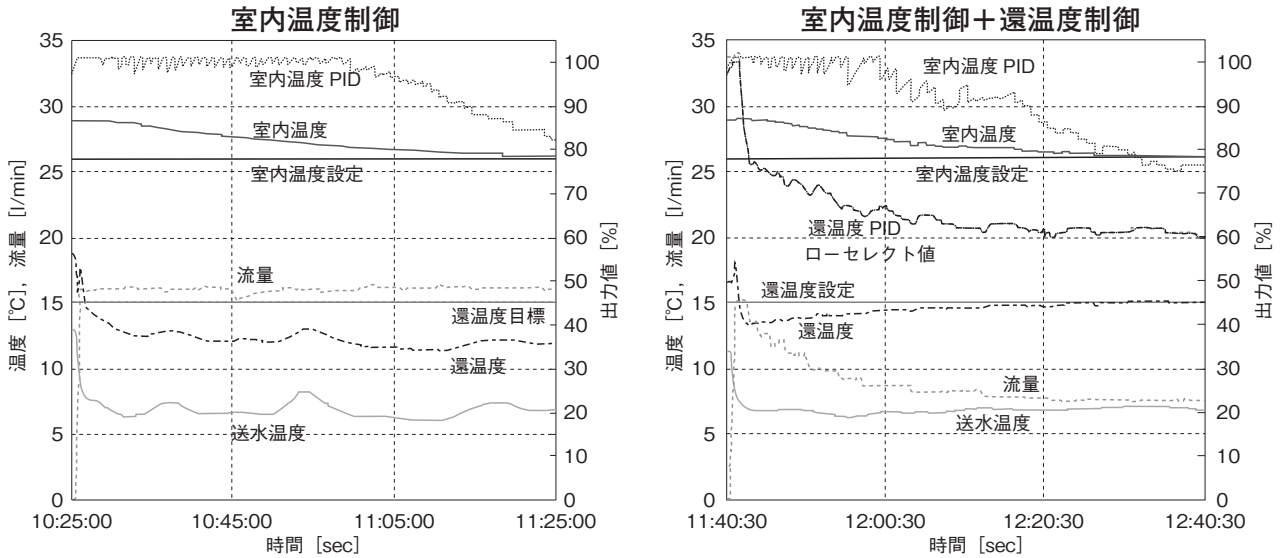


図7. 還温度制御有無による応答の比較

るのに対し、考案ロジックの場合には還温度の設定値に対する追従および流量の削減が認められ、搬送動力の削減に貢献できていることが確認できる。

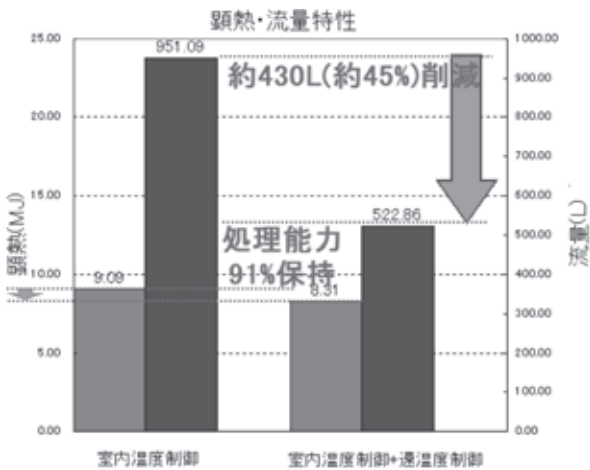


図8. 還温度制御有無における積算熱量と積算流量の比較

同実験の結果を積算熱量と積算流量で整理したのが図8である。還温度制御の有無にかかわらず積算顕熱量（室内環境に与える影響）はほぼ同等であるのに対し、積算流量は45%減に抑え込まれ、搬送動力の削減に貢献できていることが確認できた。

### 5. シミュレーションによる検証

実際にFCUを運用する際には、往還温度差を縮小させる条件が存在する。このような条件下においても考案したロジックが有効に働くことを検証した。

この検証は、実験において各条件を自在に発生させる

ことが困難であったため、シミュレーション技術を用いて実施した。

図9はシミュレータ全体構成の概要であり表2がシミュレーション条件である。制御部には、図2の考案ロジックが実装され、コイルモデルには図3と同様な傾向のコイルの特性が組み込まれている（図10）。

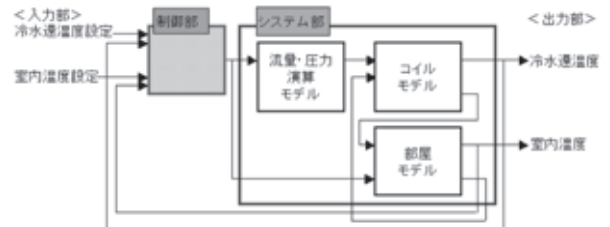


図9. シミュレーション全体構成概要

表2. シミュレーション条件

項目	値	単位
室内温度設定	26.0	°C
還温度設定	12.0	°C
内部発生熱量	1.75	kW
FCU定格流量	7.0	l/min
定格時処理顕熱量	1.76	kW

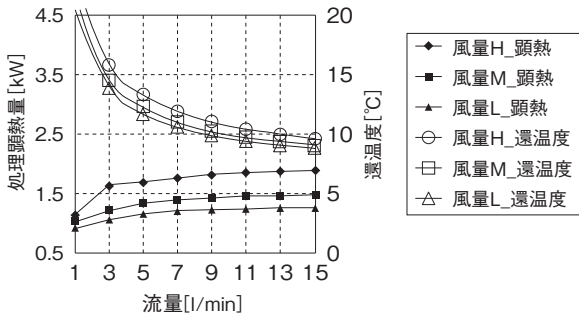
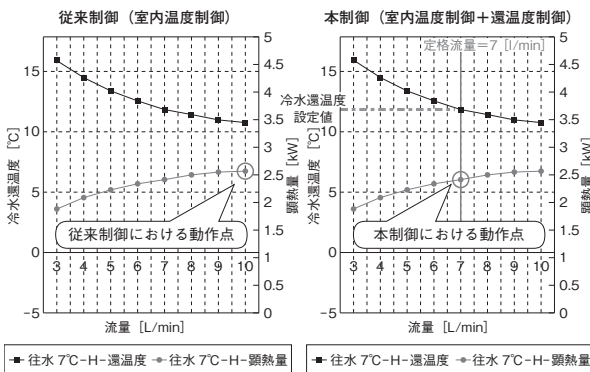


図 10. シミュレーションで使用した FCU 特性

往還温度差を縮小させる条件として考えられる要素はいくつかあり、それぞれ検証を実施した。

### 5.1 極端な室内温度設定

室内温度設定が極端な値に設定されてしまうと、一時的に処理すべき熱量が増大する。従来型の室内温度制御の場合、この様な状況下では流量が過大となり(図 11 左)還温度が設定を満たさない状況が発生する。



※図1をベースに考察。シミュレーション条件とは異なる。従来制御の動作点は実際には前後差圧の影響を受ける

図 11. 極端な室内温度設定の影響の考察

ここに還温度制御ロジックを適用すると、特性図上の動作点は図 11 右のように、定格流量における 1 点となる。

3 項で述べた通り、定格流量を超えた流量は顕熱処理にほとんど貢献しないため、室内温度設定の急激な変化があった場合に、還温度制御における流量制限の効果が発揮されても、室内温度の制御性にはほぼ影響を及ぼさないと考えられる。

シミュレーションの結果、室内温度制御の制御性はそのままに還温度制御の効果が得られていることが確認できた(図 12, 図 13)。

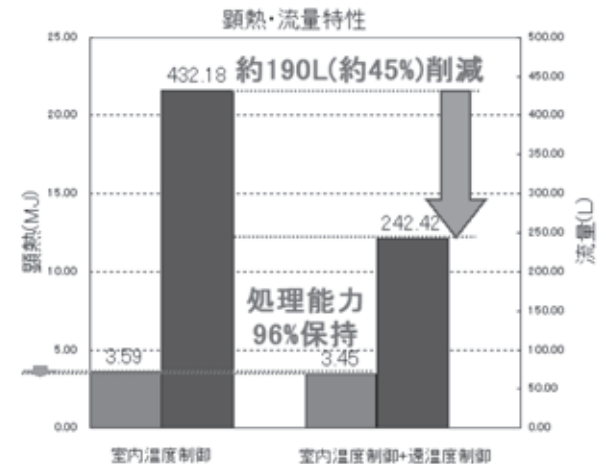


図 13. 室内温度設定の急激な変更時における室内温度制御と還温度制御の積算熱量と積算流量の比較

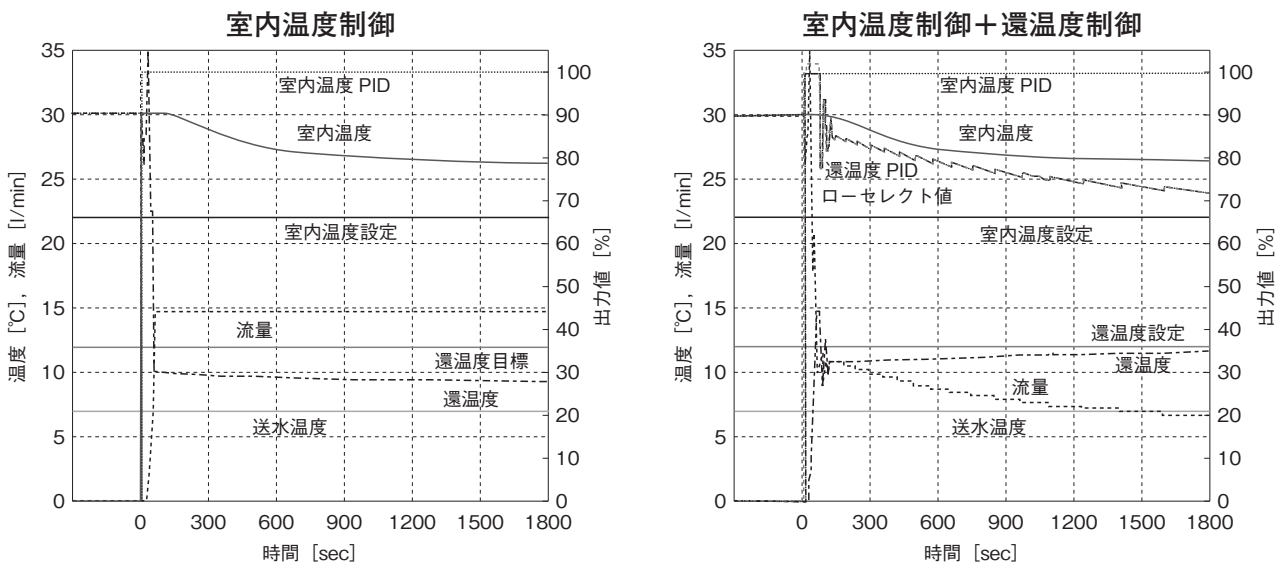
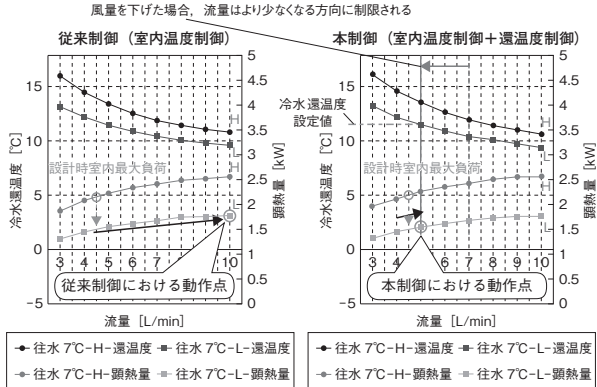


図 12. 極端な温度設定を想定したシミュレーション結果

5.2 ファン風量

ファン風量が下がると熱交換量が減り、温度差も縮まる方向にFCUの特性が遷移するため、処理すべき熱量が同一であれば、流量の増大が発生する。図14に示す様に、還温度制御なしの場合は無制限に流量が増大するが、ありの場合は流量が制限される。



※図1をベースに考察。シミュレーション条件とは異なる。従来制御の動作点は実際には前後差圧の影響を受ける

図14. ファン風量変化の影響の考察

風量Lの場合も、制限された流量以上の流量は処理顕熱量に寄与しない過流量と見なせるため、還温度制御の効果が出ることが確認できた(図15, 図16)。

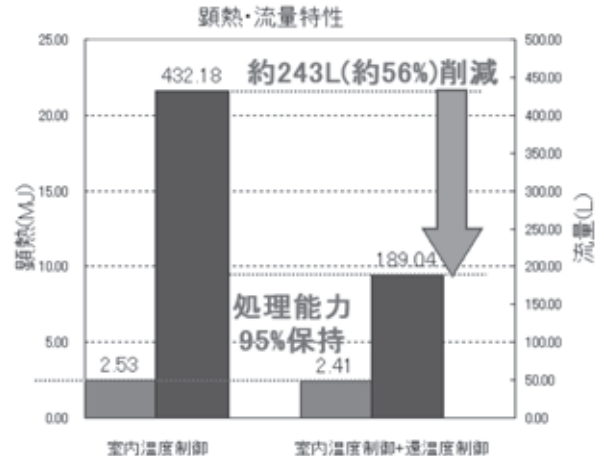


図16. ファン風量変化時における室内温度制御と還温度制御の積算熱量と積算流量の比較

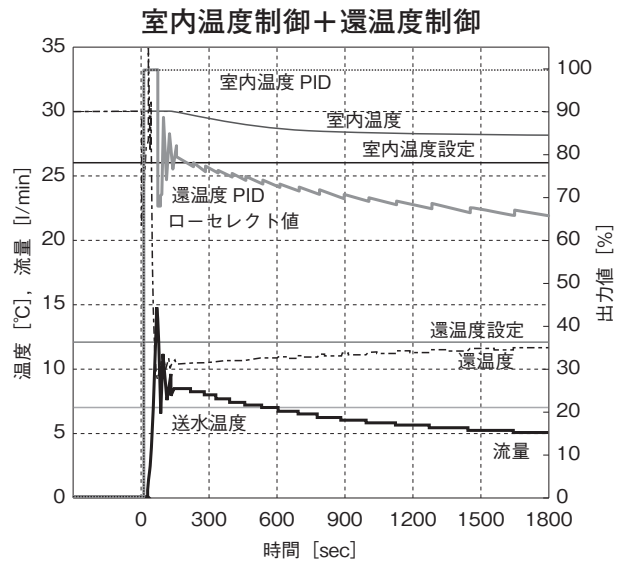
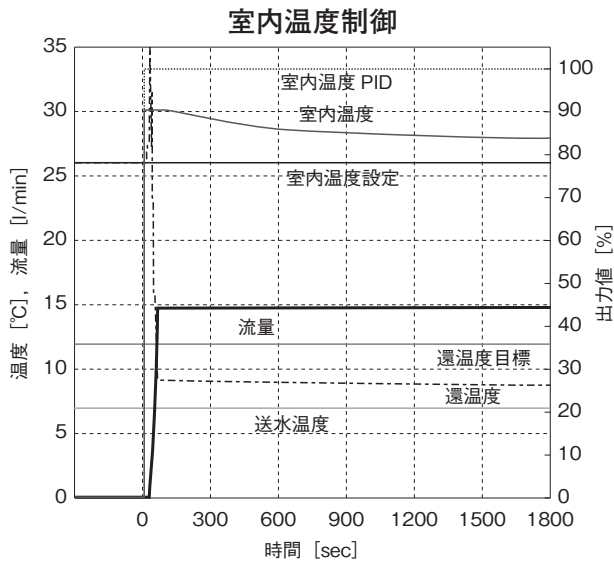


図15. ファン風量変化時におけるシミュレーション結果

### 5.3 送水温度

送水温度が上がれば還温度は上がって処理顕熱量は下がり、送水温度が下がれば還温度は下がって処理顕熱量は上がる方向にFCUの特性は遷移する(図17)。この遷移により還温度制御による流量のリミットも変化

するが、送水温度が高い場合には制限流量が増え、その代わり熱交換量が減り、低い場合には制限が減り、代わりに熱交換量が増えるため、還温度制御が処理可能熱量に及ぼす影響はほぼないことが確認できた(図18)。

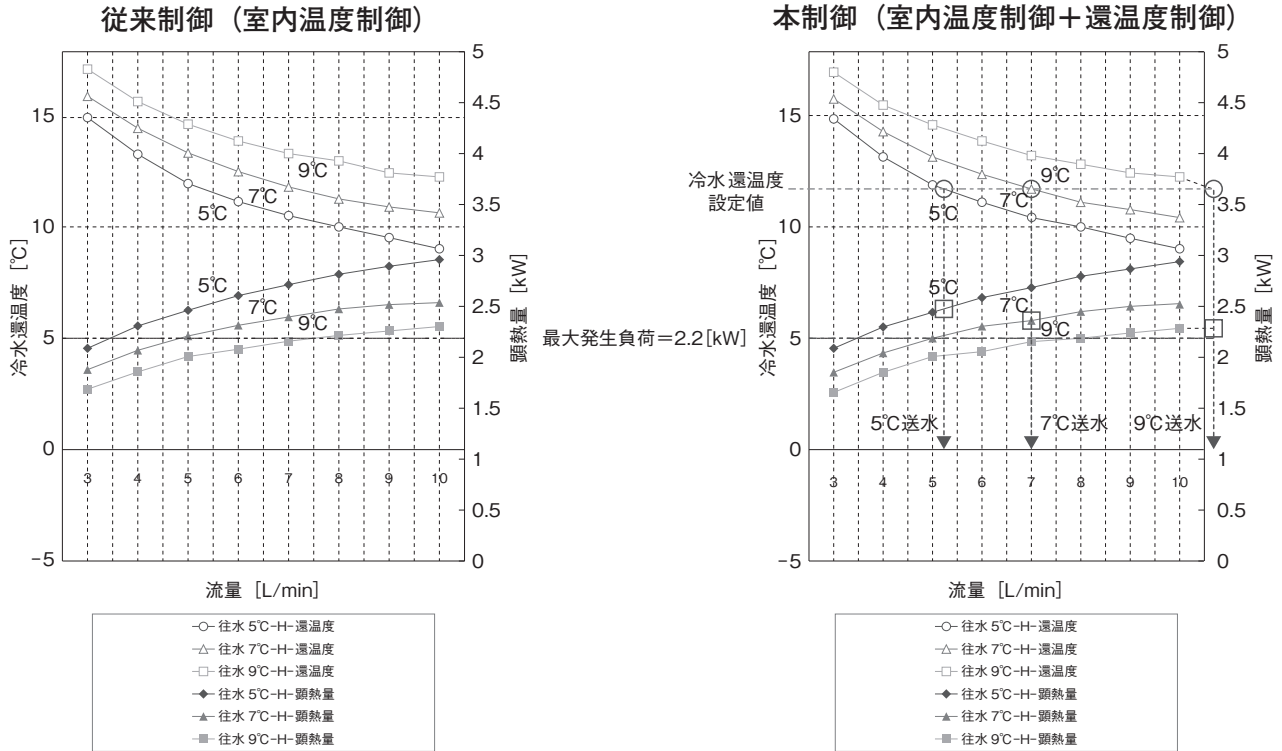


図17. 送水温度変化の影響の考察

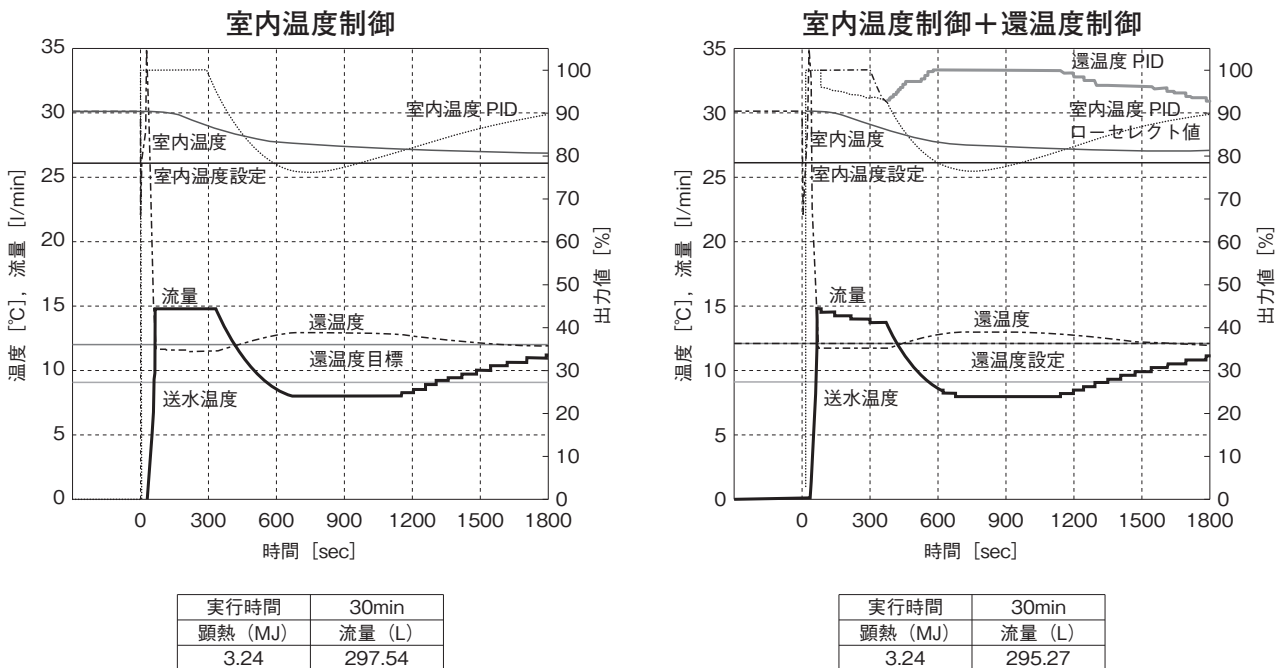


図18. 送水温度変化時におけるシミュレーション結果

実行時間	30min
顕熱 (MJ)	流量 (L)
3.24	297.54

実行時間	30min
顕熱 (MJ)	流量 (L)
3.24	295.27

## 6. おわりに

新ロジックが快適性を維持しつつ、省エネルギーにも貢献できるものであることを報告した。本ロジックが、多くの現場で重要性の増している省エネルギーや節電への対応に貢献することを願って止まない。

また次の機会に、本ロジック搭載のコントローラからの情報を使った様々なアプリケーション例について具体的に紹介する機会を得られれば幸いである。

### <参考文献>

- (1) 空気調和・衛生工学会シンポジウム「熱媒の温度差を確保する技術と問題点」空気調和設備委員会  
地域冷暖房技術検討小委員会
- (2) 空調システムの運転実態を設定条件に近づける統計的設計→空調システムの統合的設計と運転に関する委員会「空調システムの最適化を目的とした統合的設計・運転手法に関する報告」
- (3) 空気調和ハンドブック，改訂5版，井上宇市編，丸善株式会社
- (4) 新晃工業 FCU カタログ：ファンコイルユニットシリーズ CLIMATOR (FC-10-A)」
- (5) SIMBAD  
(FCUのコイルモデルには、SIMBADのDetailed Static cooling coilを使用した。)
- (6) HVACSIM+ (J)  
(流体ネットワーク計算には、HVACSIM+ (J) のType501～503, 506を使用した。)

### <商標>

Inflex は、アズビル株式会社の商標です。

### <著者所属>

木都 孝洋	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
田原 淳平	ビルシステムカンパニー 計装エンジニアリング部
沖 直道	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部

# 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

## Seeking Dependable, Safe, and Comfortable Living: Technical Integration Trials in the azbil House

アズビル株式会社  
ホームコンフォート本部事業開発部

岩田 昌之  
Masayuki Iwata

キーワード

HEMS, 暮らし, 安心, 安全, 健康, azbil グループ, azbil ハウス, 全館空調システム

azbil グループ ライフオートメーション事業における「暮らし」の「安心・快適・達成感・地球環境への貢献」を探求するためのフラグシップ研究施設・PR施設として、「空気と暮らしの研究所“azbil ハウス”」を開所した。同施設の狙いや、そこで行われる azbil グループ各事業体の技術やサービスのシナジーについて紹介する。

The azbil House, a laboratory for air-conditioned comfortable living, has opened as the flagship research and publicity facility of the azbil Group's Life Automation business, and as an expression of the Group's philosophy of seeking safety, comfort and fulfillment in people's lives, and contributing to global environmental preservation. We describe the aims of this facility and the synergy therein of the technology and services of each business entity in the azbil Group.

### 1. はじめに

azbil グループはライフオートメーション事業の一つとして、戸建住宅用の全館空調システム「きくばり™」を開発、施工、販売している。

本事業は、長年にわたり蓄積された建物空調のノウハウを活かし、15年前に発足し、現在までに約4500棟の住宅に実績がある。

また、本事業では azbil グループのビルの空調制御システムにおける豊富な経験とノウハウをはじめ、研究開発における IT 技術、温度や消費電力などのデータ収集、解析技術などを総合的に活かし、「きくばり」の開発や、ライフスタイルに合わせた様々な提案を行っている。

今回、azbil グループの技術のさらなる融合を目指した、研究施設「空気と暮らしの研究所“azbil ハウス”」を建築・開所した。



azbil ハウス

### 2. 暮らしにおける安心・安全・快適

本項では日常生活における快適性、安心や健康について、主に住宅における空気環境の観点でいくつか紹介する。

これらの課題を解決、またはリスクを低減することが本事業の使命の一部となる。

(1) 快適性

住宅における不満のワースト 10 を表 1 に示す。10 項目のうち、6 項目が空気環境に関する項目である。

住宅建築後に実際に生活をするすると空気環境に関連する項目が重要になるということがわかる。

表 1. 住宅の「住み心地」不満・悩みワースト 10

1 位	暑い
2 位	寒い
3 位	結露
4 位	虫・ゴキブリ
5 位	風通し
6 位	暖房が効きにくい
7 位	湿気
8 位	カビ
9 位	西日
10 位	すきま風

【出典】『日経アーキテクチュア』2005 年 6 月 13 日号「特集 住宅の「力」住まい手 1 万人調査 不満解消には事前の説明」から抜粋

(2) 温度による健康リスク

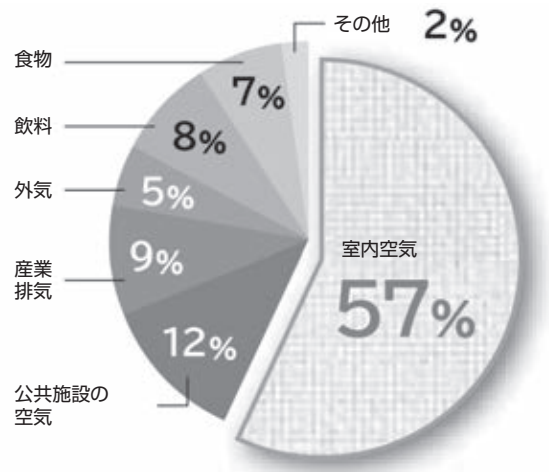
近年の調査では、冬場の入浴時などに温度差が体に負担をもたらしておこる「ヒートショック」による死亡が交通事故よりも多いというデータがある。

※ヒートショックによる死亡者数は交通事故者数の 2.5 倍。年間 17,000 人が「ヒートショック」で死亡：東京都健康長寿医療センター研究所および azbil グループ共同調査：2012 年 12 月発表

また、夏場の「屋内熱中症」も話題になっている。これらのリスクは、居住空間の温度を制御することによりリスクを低減できる。

(3) 空気中の物質

近年では PM2.5 などの大気汚染をはじめ、花粉やハウスダストなどのない環境で暮らしたいというニーズが強まっている。人体の物質摂取量は図 1 のように、食物よりも空気から取得するものが多いことから、生活空間の空気の清潔度合いが重要であると言える。



【出典】：村上周三著『室内環境と空気汚染』

図 1. 人体の物質摂取量 (質量)

### 3. 空気と暮らしの研究所「azbil ハウス」

#### 3.1 コンセプト

空気と暮らしの研究所「azbil ハウス」は、「人を中心としたオートメーション」の技術を発展させ、戸建住宅におけるさらなる「安心」「快適」「達成感」「地球環境への貢献」を追求するための研究施設で、azbil のライフオートメーション分野におけるフラグシップ研究施設であり、PR 施設である。

ここで研究、開発、実証された技術や知見を応用し、技術・製品を基盤にしたソリューション展開で顧客・社会の長期パートナーとなることを目指す。

また、当施設を利用することで、上記技術を応用した暮らしの体感が可能となり、それを認知いただくことで企業ブランド向上、商品ブランド向上、販売促進にもつながると考えている。

#### 3.2 概要

azbil ハウスは、2 棟の住宅で構成されている。住宅 2 棟のうち一方 (A 棟) を全館空調システム「きくばり」、もう一方 (B 棟) を複数のルームエアコンで空調することで、様々な研究や実証を行っている。快適性の違いを体感したり、温度や消費電力、粉じんの量などのデータの比較研究、さらに、全館空調システムのメリットである温度差のない家・きれいな空気・音の静かさ・空調の違いによる住宅計画の差異などについても違いを評価している。



図 2-1. 住宅計画の例：オープンな間取り



図 2-2. 住宅計画の例：仕切られた間取り

#### 4. azbil グループの技術・サービスの融合

戸建住宅におけるさらなる「安心」「安全」「快適」を追求するため、azbil ハウスでは、azbil グループの様々な部門、事業者からの技術を融合している。

##### 4.1 ビルディングオートメーション技術

長きにわたり、ビルの空調制御業界において幅広い実績をもつビルディングオートメーション分野では、使用電力予測モデリング技術などの応用により、オフィスビルや商用ビルのみならず、高級ホテルや、病院、音楽ホールなど、人の心地よさや省エネルギーに関与する実績を多数保有している。

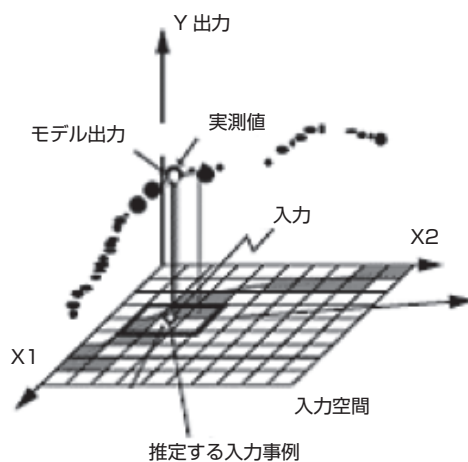


図 3. 使用電力予測のモデル

※ TCBM (Topological Case-Based Modeling) は、過去の事例に基づき未知の問題を解く手法である事例ベース推論の考え方をモデリングに適用したもので、連続な入出力を持つ対象に適用可能な azbil オリジナルのモデリング技術です。

##### 4.2 研究開発技術

azbil グループの研究開発部門では、暮らしにおける快適性の向上や省エネルギーなどに貢献するため、様々な情報が画面で確認できる「屋内環境見える化システム」(以下、見える化システム)をはじめ、シミュレーション技術による住宅性能評価やスマートハウス技術などの研究を行っている。

「見える化システム」は屋内の以下についてのデータを収集、監視、蓄積する。

- ・各室および外気の温度分布、湿度分布 (図 4-2)
- ・外気温と消費電力量 (図 4-3)
- ・室内および外気の粉じん量 (図 4-4)
- ・換気システムの熱交換効率

見える化システムの画面表示例を図 4-1～4 に示す。また、使用電力予測や、住宅性能評価の一つ、通風シミュレーションの例を示す (図 4-5)。





図 4-1. 見える化システム

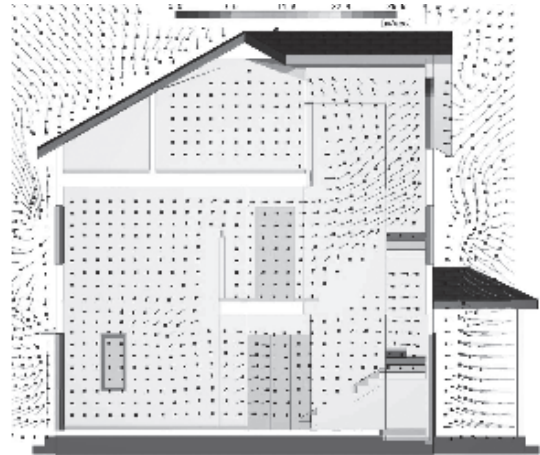


図 4-5. 通風シミュレーション

さらに、拡張現実（AR）技術により住宅内に設置した空調システムの見える化を行っている（図 5）。



図 4-2. 見える化システム (温度分布)



図 5. 拡張現実 (AR) によるシステムの見える化

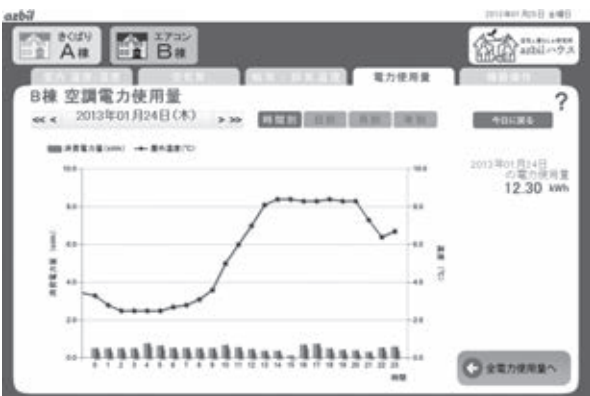


図 4-3. 見える化システム (外気温と消費電力量)

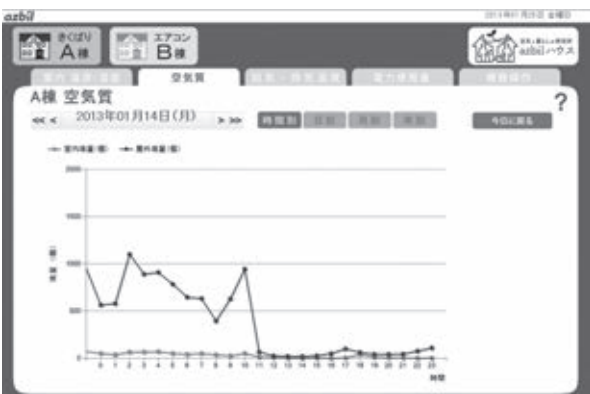


図 4-4. 見える化システム (室内および外気の粉じん量)

### 4.3 全館空調システム「きくばり」商品技術

azbil の全館空調システム「きくばり」商品技術として、例えば以下の技術を開発している。

- ・電子式エアクリーナによる粉じん除去技術
- ・省エネルギーと省スペースを両立させるダクトシステム技術
- ・最適な送風に向けての風量操作技術
- ・暮らし、住まい方に合わせた最適な空調設計技術
- ・排気熱をエネルギーとして回収する熱交換技術
- ・省エネルギー運転技術
- ・ヒューマンインターフェース技術

また、電子式エアクリーナにおいては、通常の家電で一般的なフィルタ式エアクリーナに比べ、大容量で家中の空気を常時清浄できるほか、より細かい粉じんまで除去できる。

本電子式エアクリーナでは、設計値として $0.01\ \mu\text{m}$ までを集じん範囲に設定しており、 $0.3\ \mu\text{m}$ 以上の超微粒子を除去できる性能（集じんセル単体性能）を検証・確認している（図7）。

注：PM2.5は $2.5\ \mu\text{m}$ 以下の粒子を示すが、測定技術の問題から $2.5\ \mu\text{m} \sim 0.3\ \mu\text{m}$ の粒子でその有無を判別することとなっている（環境省『大気中微小粒子状物質（PM2.5）測定方法暫定マニュアル』による）。

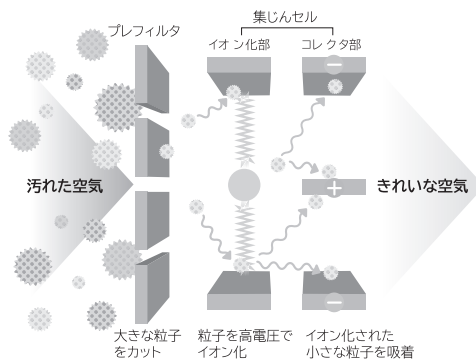


図6. 電子式エアクリーナのしくみ

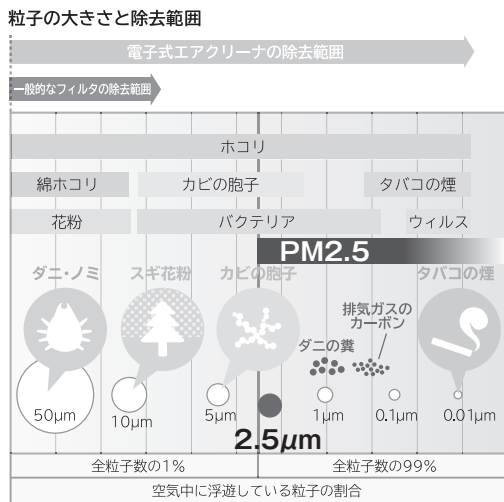


図7. 電子式エアクリーナの除去範囲

#### 4.4 高齢者の健康管理、介護

azbilハウスでは、健康面を含め、お年寄りも安心して過ごせる暮らし方を提案している。azbilグループのアズビルあんしんケアサポート(株)では、「あんしんセンター事業」として、緊急時や健康に関する不安や疑問があったときに24時間365日医療系専門スタッフが的確な対応を行っている。

また、「介護サービス事業」として、福祉用具貸与・販売や、訪問介護、デイサービス、グループホーム経営などを行っている。

きくばりの定期点検サービス加入ユーザーには、空調についての24時間問い合わせ受付に加え、アズビルあ

んしんケアサポート(株)のスタッフによる健康相談「きくばり健康ダイヤル24」も利用できる。

azbilハウスでは、主にお年寄りのいる家族に、健康で安心な暮らしを提供する提案として、個人向け緊急通報サービス「お家でナースホン™」と、福祉用具貸与の例として、介護ベッドを展示している。

#### 4.5 サーモグラフィー

azbilハウスでは、室内の温度分布を計測し、「きくばり」による空調効果や、ルームエアコンによる個別空調時の課題などを確認している。室内（外）の様々な箇所の温度をその場で確認することで、よりスピーディに室内環境を把握でき、来訪者の体感する感覚を、実データによって確認できる。azbilハウスではアズビル商事(株)の販売する赤外線サーモグラフィーを使用し、効果的な空調設定や、デモンストレーションを行っている。



図8. サーモグラフィーでの温度分布確認

### 5. おわりに

少子高齢化、温暖化、大気汚染などの問題が顕在化して来ている中、また、健康や教育に対する意識の変化の中で、家での暮らしにおいて、家族との絆を深め、より安心、安全で健康に暮らすということが注目され、価値のあることになって行くと考えられる。

屋内の空気環境をより良くすることによってそれらの多くを解決できるということを、より多くの方に知っていただき、少しでも快適で健康、安全に暮らしていただける様、このazbilハウスで伝えていくと共に、研究開発を進めて行きたいと考える。

<商標>

「きくばり」は、アズビル株式会社の商標です。

「お家でナースホン」はアズビルあんしんケアサポート株式会社の商標です。

<著者所属>

岩田 昌之 ホームコンフォート本部事業開発部

# Technical Review

---

azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2013年4月発行号

---

発行日 2013年4月1日(通巻54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 編集長:塩手良知

委員:長田光彦、野間節、奥野啓道、筒井宏明

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

©2013 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。

# 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いたしました。

〒100-6419

東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル

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



PR-1106J(1304-8K-KY)

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。