

azbil

アズビル株式会社

2012年4月1日、株式会社 山武はアズビル株式会社へ社名を変更しました。

〒100-6419

東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル

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



azbilグループは環境に配慮した取組みを推進しています。

azbil Technical Review

azbil

Technical Review

2018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

2018年4月発行号

特集：「人を中心とした」の発想に基づく人と機械・システムとの協調

表紙について

雲によって可視化された、大規模な大気の「流れ」

うずれつ
カルマン渦列

皆さんは、カルマン渦列という言葉を目にしたことがあるでしょうか。実は私たちは、知らず知らずのうちにカルマン渦列を体験しています。「強い風が吹いたときに電線からビュンビュンと音がする」、「国旗が風ではためいている」、「銭湯の煙突が風で揺れる」といった現象は、すべてカルマン渦列と関係しているのです。

カルマン渦列とは、一定の方向に流れている流体の中に、細い円柱などの障害物を置くことで、障害物の後ろに渦が発生する現象です。流体が障害物の後ろ側に回りこむことで、時計回りと反時計回りの渦が交互に規則正しく発生するのです。このことは古くから経験的に知られていた現象ですが、1911年にハンガリーの航空工学者カルマンが発生する原理を解明したことから、その名がつけました。

カルマン渦列は一定の間隔で規則的に発生するので、カルマン渦を数えることで、流体であれば気体でも液体でも流速を測ることができます。現在ではそのしくみを利用して流体の流れる量を計測する流量計がつけられており、私たちの生活に役立っています。

地球上では大規模なカルマン渦列が発生していて、その姿は衛星画像などで見られます。日本付近では冬に、韓国の済州島と鹿児島県の屋久島付近でカルマン渦列がよく発生します。表紙の写真は、この2カ所で発生しているカルマン渦列をとらえたものです。

冬の日本付近では、シベリア大陸に高気圧、北西太平洋に低気圧が位置する西高東低の気圧配置になることが多くあります。この気圧配置になると、大陸から北西寄りの冷たい風が吹いてきます。この風が海上に出ると、海から熱や水蒸気が供給され雲がつけられます。雲は視認できるため、風の流れが可視化されます。北西の風が高度500～2000mあたりで吹くと、済州島や屋久島にある山にぶつかり、風下側にたくさんの渦ができます。1つひとつの渦は直径20～60kmほどとなり、人工衛星で鮮明にとらえることができます。

この地域でつくられるカルマン渦列の姿は、ひまわり8号リアルタイムWebでも見ることができます。こまめに確認してみると、ひと冬に何度かカルマン渦列に出会うことができるはずです。

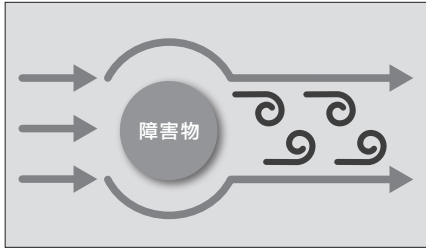
ひまわり8号リアルタイムWeb

<http://himawari8.nict.go.jp/ja/himawari8-image.htm>

監修：気象庁気象研究所 研究官 荒木健太郎

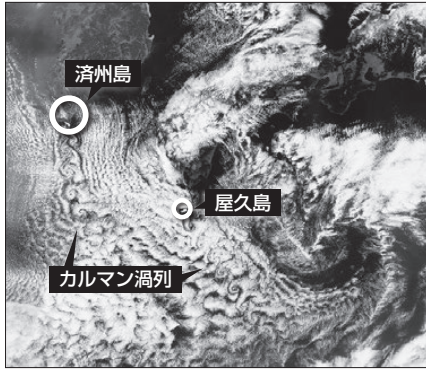
画像：NASA EOSDIS worldview による衛星 Terra の可視画像

カルマン渦列が発生するしくみ



ある速度の流体が障害物にあたると、その後ろに時計回りと反時計回りの渦が発生

韓国・済州島と鹿児島県・屋久島付近で発生したカルマン渦列



西高東低の冬型の気圧配置により発生した雲が渦巻き状になっている

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

Contents

巻頭言：「人を中心とした」の発想に基づく人とシステムとの共創 1

京都大学大学院

工学研究科機械理工学専攻 教授

榎木 哲夫

特集に寄せて：競争力あるアズビルならではの生産体制構築に向けて

—人と機械・システムとの協調を通じた生産変革— 2

アズビル株式会社 取締役執行役員常務 アドバンスオートメーションカンパニー社長

プロダクションマネジメント本部長

北條 良光

特集論文

融合

次世代スマートロボットの開発 3

アズビル株式会社 技術開発本部

原田 豊

田原 鉄也

岩下 純久

調和

熱源システム運転の効率化に貢献するクラウドサービスの開発 8

アズビル株式会社 ITソリューション本部

小柳 隆

鈴山 晃弘

古賀 圭

村田 裕志

鹿島 亨

太田 延樹

進化

オペレータの意思決定を支援する
バッチプロセス向けオンライン異常予兆検知手法の開発 14

アズビル株式会社 ITソリューション本部

鈴木 毅洋

西口 純也

進化

都市ガス事業者の地震対策を支援するガバナ監視システムの開発 21

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 蒔田 浩子

喜多井 剛志

小泉 芳範

快適

居住者に「快適」を提供する温冷感リクエスト型空調の開発 25

アズビル株式会社 ITソリューション本部

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー

大曲 康仁

水高 淳

伊藤 卓

太宰 龍太

一般論文

自在

熱伝導率の温度特性を利用した天然ガス計測技術の開発 31

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 濱口 竜一

自在

ユニバーサル入出力ICの開発 36

アズビル株式会社 技術開発本部

加藤 太一郎

栗林 英毅

手島 紘明

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
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー

小木曾 康弘

平山 博文

井波 太郎

梶田 徹矢

自在

13 Paレンジサファイア隔膜真空計の開発 41

アズビル株式会社 技術開発本部

石原 卓也

栃木 偉伸

添田 将

関根 正志

自在

感度波長拡大型UVチューブの開発 46

アズビル株式会社 技術開発本部

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

中島 有紀

住吉 啓介

片桐 宗和

築田 菜々子

調和

ダイヤモンドリスポンスシステムの開発と
バーチャルパワープラント構築実証事業への適用 50

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー

中村 瑞

水谷 佳奈

調和

IoT時代の熱源コントロール・ソリューションの紹介 56

アズビル太信株式会社

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

小林 広伸

山田 晃

5つの戦略技術領域

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

融合

= 人間・機械融合システム技術

進化

= わかる化プロセス情報技術

快適

= 快適空間計測制御技術

自在

= 自在計測制御技術

調和

= 環境調和計測制御技術

Contents

Preface : “Human-Centeredness” for Human-Systems Co-Creation 1

Professor, Department of Mechanical Engineering and Science,
Graduate School of Engineering, Kyoto University Tetsuo Sawaragi

Introduction to the Special Issue: Establishing a Production System that Strengthens Azbil's Competitiveness: Innovative Production with People and Machines or Systems Working Together 2

Executive Director, Managing Executive Officer, President of Advanced Automation Company,
General Manager of Production Management Headquarters, Azbil Corporation Yoshimitsu Hojo

Articles on Special Issue

Biomimetic Production	A Next-Generation Smart Robot with Force-Sensing Technology 3
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation	Yutaka Harada Tetsuya Tabaru Sumihisa Iwashita

Harmony with the Environment	Improvement of Heat Source System Efficiency Using a Cloud Service 8
IT Solutions Headquarters, Azbil Corporation	Takashi Koyanagi Kei Koga Toru Kashima Akihiro Suzuyama Hiroshi Murata Nobuki Ota

Evolution through IT	An Online Anomaly Detection System Supporting Batch-Process Operator Decision-Making 14
IT Solutions Headquarters, Azbil Corporation	Takehiro Suzuki Junya Nishiguchi

Evolution through IT	Development of a Governor Monitoring System to Support Earthquake Countermeasures by the City Gas Companies 21
Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Hiroko Makita Tsuyoshi Kitai Yoshinori Koizumi

High-Quality Living Space	A New Environmental Control System Responsive to the Preferences of All Building Occupants . . . 25
IT Solutions Headquarters, Azbil Corporation Building Systems Company, Azbil Corporation	Yasuhiro Omagari Suguru Ito Jun Mizutaka Ryota Dazai

Articles on Other Subjects

Freedom of Time and Place	Natural Gas Measurement Using Temperature-Dependent Thermal Conductivity 31
Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Ryuuichi Hamaguchi

Freedom of Time and Place	An IC with Universal Input/Output Terminals 36
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation	Taichiro Kato Hideki Kuribayashi Hiroaki Teshima Yasuhiro Kogiso Tetsuya Kajita
Advanced Automation Company, Azbil Corporation Building Systems Company, Azbil Corporation	Hirofumi Hirayama Taro Inami

Freedom of Time and Place	Extending the Measurement Range of a Sapphire Diaphragm Vacuum Gauge to 13 Pa 41
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation	Takuya Ishihara Masaru Soeda Masashi Sekine Hidenobu Tochigi

Freedom of Time and Place	A UV Tube with Extended Wavelength Sensitivity 46
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Yuki Nakashima Munekazu Katagiri Keisuke Sumiyoshi Nanako Yanada

Harmony with the Environment	Development of a Demand-Response System and Its Application to a Virtual-Power-Plant Construction Demonstration Project 50
Building Systems Company, Azbil Corporation	Mizu Nakamura Kana Mizutani

Harmony with the Environment	A Heat-Source Control Solution for the IoT Era 56
Azbil Taishin Co.,Ltd. Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Hironobu Kobayashi Akira Yamada

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

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

巻頭言

「人を中心とした」の発想に基づく 人とシステムとの共創



京都大学大学院工学研究科
機械理工学専攻
教授

榎本 哲夫

我が国の科学技術施策の骨格をなす第5期科学技術基本計画では、世界に先駆けた「超スマート社会」の実現が目指されている。一方、オックスフォード大学のC. B. Frey and M. A. Osbornによれば、今後10～20年程度のうちに、7割以上の業務が自動化される可能性が高い職種は全体の47%という予測もあり、AIによるテクノロジー失業が深刻な課題になりつつある。また、世界に先駆けて超高齢化社会を迎える我が国では、近い将来の労働現場と労働市場の大幅な変化に対して人が不適応を起こすことも危惧される。ここでは、働く人の健康・働きやすさ・働きがいを保証するQoW (Quality of Working) をいかに高く保てるかが鍵になる。今後の望ましい我々の社会の姿は、常に人が絡み合い、福祉や環境を取り込んで、人が育ち、商品を生みながら、限りなく改良・改善が成されていく社会システムの実現である。「人間力の持続性を保証できる社会」であり、人にとって「やさしすぎる」社会ではなく、人の側の主体的なコミットメントを引き出していける社会である。

自動化の導入を考える際の方針は、(1)自動化できない部分を人任せ、(2)人と自動化の分業、へと推移し、いまでは(3)人と自動化の協働、の段階へとシフトしている。このような「人中心」の発想の起源は北欧である。同じ欧州でもアングロ・サクソン流の考え方は随分異なり、その典型的なものにマニュアル徹底方式に基づくオペレーションがある。その本質は、Command, Control, Communication, Intelligence (CCCI) を核とし、階層的な指示系統で人間も環境も制御することができるという考え方にある。一方ドイツのラインラント流の考え方は、Craftsmanship, Connection, Trust and Inspiration (CCTI) を重視し、マネージャーは命令するのではなく分かり合って互いを信頼することに重きが置かれ、人は制御される対象ではなく不測の事態への効果的な応答が求められる。

ところで、京都大学名誉教授で哲学者・精神科医の木村敏氏によれば、西洋では世界や自然を客観的に観察することにより、これを「もの」として眺めることで自然科学や合理的世界観が発達してきたのに対して、「こと」の世界に対する静かな共通感覚的感受性こそ、欧米には見られない日本独自の心性であるという。「アクチュアリティ」と呼ばれるこの現実の様態は、絶えず現在進行形で動き続けている現実であり、それを自らのものとするためには、現実を突きつ

けられる側も常にそれに即応した動きの中に入り込むことができ、自分自身の心の動きによってそれに参加できなくてはならない。この行為的実践的な参加がスムーズに運べるようにするためのシステムこそ「人を中心とした」システムである。そこでシステムが人に提供すべき要件は、(1)自分の能力に対して適切な難易度のものに取り組み、(2)対象への自己統制感がある、(3)直接的なフィードバックがある、(4)集中を妨げる外乱がシャットアウトされている、の4要件である。これらはいずれも、これからの自動化が人のパートナーとして実現すべき要件であり失業への危惧も解消できる。このような人をループ内に残した制御系や監視系の作業環境をいかにデザインすべきかについて、本特集号では興味深い研究事例が紹介されている。

最後に、1962年に当時の米国の大統領John F. Kennedyが残した言葉を引用したい。「我々は信じる。人間を労働から追い出す機械を新たに発明する才能があるのなら、その人間を労働へと戻らせる才能もまた人間にはあるだろう。」まさに今の時代に我々が突きつけられている課題であろう。

著者紹介：

1983年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。1986年同大学院博士課程指導認定退学。京都大学工学部助手、工学研究科助教授を経て、2002年同教授、現在に至る。1991～1992年米国スタンフォード大学客員研究員。京都大学工学博士。人間—機械共存環境下での協調システムの設計・解析と知的支援に関する研究に従事。ヒューマンインタフェース学会会長、システム制御情報学会会長、計測自動制御学会関西支部長、IEEE SMC 日本支部支部長、IFAC TC4.5. (Human Machine Systems) Vice-Chair、文部科学省中央教育審議会大学分科会専門委員、ほかを歴任。計測自動制御学会論文賞・著述賞、システム制御学会論文賞、日本知能情報フジ学会論文賞、市村産業賞貢献賞などを受賞。

著書に、知識システム工学(コロナ社、1991年)、スキルと組織(国際高等研究所、2011年)、アーティファクトデザイン(共立出版、2018年発行予定)など。

次世代スマートロボットの開発

A Next-Generation Smart Robot with Force-Sensing Technology

アズビル株式会社
技術開発本部

原田 豊
Yutaka Harada

アズビル株式会社
技術開発本部

田原 鉄也
Tetsuya Tabaru

アズビル株式会社
技術開発本部

岩下 純久
Sumihisa Iwashita

キーワード

スマートロボット, カセンシング, ロボットハンド, 柔らかく掴み, ダイレクト教示, 協働ロボット

アズビルはロボットに力センシング技術を内蔵した“次世代スマートロボット”を開発した。このロボットの特長は力センシング技術で、それをロボットアームおよびロボットハンドに適用し、これを触覚機能として実現した。また、画像処理技術を用いた視覚機能を実装した。このロボットを用いたデモ装置も開発し、2017年11月29日～12月1日に開催されたSCF／計測展2017に出展した。まだ試作機ではあるが、生産ラインの自動化に貢献できるよう、商品化に向けた開発を進める。

Azbil has developed a next-generation smart robot with built-in force-sensing technology implemented especially in its robot-arm and hand to enable tactile functions. We also implemented a visual function using image processing technology. Demonstration equipment using this robot was exhibited at the System Control Fair / Measurement & Control Show 2017 held in Tokyo from Nov. 29 to Dec. 1, 2017. Although the robot is still a prototype, we are working to develop it for commercialization in order to contribute to the automation of production lines.

1. はじめに

昨今のファクトリーオートメーション (FA) 工場では、組み立て生産ラインの自動化に産業用ロボットが用いられている。アズビルも汎用アンブ内蔵光電センサHP7の自動化ラインに、産業用ロボットを導入している⁽¹⁾。±0.02mmの高度な繰り返しの位置決め精度と10m/sの高速な移動動作を備え、精密な組み立てと高速なタクトタイムの要求に对应している。ただ、この社内ユースでいくつかの課題が顕在化した。

1つは教示作業である。教示作業は専用の動作デバイス (教示ペンダント) を使う。操作ボタンと液晶画面で操作するのだが、例えばロボットの手先を思っている方向に移動させる場合、モード変更、移動速度 (または移動量) 設定、移動方向設定 (ロボット本体に対する方向や手先に対する方向などいくつか方向の基となる種類が選択できる) 等を行い、ようやくボタンを押して移動させる。この時に各設

定が間違っていたり、方向の+/-を間違えたり、押すボタンを間違えるとロボットの手先が有らぬ方向に移動し、周辺機器と接触し破損するなどの事象が生じる。教示点を1つ設定するだけでも、ロボットに対する専門知識と教示作業経験が必要になり、時間も要する作業となっている。このほか、ロボットを動作させるためのプログラミング作業や、ワークに適切なエンドエフェクター (吸着ハンドや把持ハンド) の選定／設計、自動化装置としての全体装置への結合などのエンジニアリング作業があり、これらも専門知識や技能が要求され、これがロボットの導入の敷居を高くしており、小ロットで多品種の組み立て作業等がある生産ラインへの導入が難しい状況となっている。

しかし、ロボットの導入ニーズは高まる一方である。理由は人件費を下げるための自動化が主であるが、それ以外に国内においては働き方改革や労働人口が減少する背景もあると考える。この影響だとすると、ロボットの使われ方ニー

特集に寄せて

競争力あるアズビルならではの生産体制構築に向けて —人と機械・システムとの協調を通じた生産変革—

アズビル株式会社
取締役執行役員常務
アドバンスオートメーションカンパニー社長
プロダクションマネジメント本部長

北條 良光

グローバルでの競争が拡大するなか、どういう競争力をもって我々は戦うのでしょうか？

複合的な競争力の構築が、オートメーション事業をグローバルに展開するには重要であると考えています。その複合的な競争力を構成するものの1つに生産での競争力があります。我々は、競争力あるアズビルならではの生産体制構築に向け、弛まぬ生産変革に取り組んでいます。

今号では、「“人を中心とした”の発想に基づく人と機械・システムとの協調」をテーマに、いくつかの新たな技術開発の取組みを紹介していますが、それに関連してここでは人と機械・システムとの協調が欠かせない生産現場における変革として、「HCA-MS」と「超混流生産」の2つの取組みについて紹介します。

1) HCA-MS (Human-Centered Automation for Manufacturing System)

HCA-MSとはグループ理念である「人を中心としたオートメーション」を生産システムで実現するものです。生産ラインの状況変化に応じた柔軟な作業や複合的な判断など、人が本来保有する強みを生産活動に活かすとともに、精密な測定や微細な組立・加工などは機械がもつ正確さをもって行うことで、人と機械・システムが高度に協調し、人だけではできない、また機械だけでもできない生産システムを目指しています。他社ではつくりえない、あるいはつくり出すことが難しい生産システムであることが競争優位の源泉の1つとなります。また、HCA-MSは生産工程の効率化や品質向上を実現するだけでなく、そこで働く人すべてに、ものづくりの達成感を与える生産システムでもありたいと考えています。

人と機械・システムが高度に協調する生産システムを構築するには、先進的な生産技術の要素開発も欠かせません。力センシング技術を活用して、位置制御と力制御を同時に行うことができるアクティブコンプライアンス制御やAI (人工知能) を取り入れた画像処理技術などが独自開発した技術事例です。これらアズビル独自の生産要素技術からなるHCA-MSは、本紙で紹介しているUVチューブに使われる肉厚がわずか0.2mmの微細ガラス管の組立自動機や、数10μmの位置精度が要求される光学部品のはんだ付け装置に適用され、お客さまの高い要求に応える生産システムとして貢献しています。

2) 超混流生産

アズビルの事業特性からくるものづくりの特徴として、多品種変量生産、カスタマイズ生産を実現することで、顧客ニーズに対応していることが挙げられます。アズビルのものづくりは既に多品種変量生産、カスタマイズ生産を一定の水準をもって実現していますが、今後予測されるさらなるカスタマイズ範囲の拡大や、より高いレベルでの品質・コスト・納期に対する要求を実現するためには、製品シリーズの枠を超えて、複数種類の製品シリーズを同一生産工程で生産できる超混流生産が必要となると考えています。

超混流生産の効果としては、製品開発においての部品の共通化、モジュール設計が加速され、部品コストの低減と開発期間の短縮が期待できます。生産工程においては、同様に生産立ち上げや各種の工程変更への省人化と時間短縮が可能になるとともに、生産オペレーションでは、製品ごとの負荷変動に対し柔軟に対応できるようにもなります。

また、これらの実現には新たな生産技術、生産手法の導入も必要です。例えば、超混流生産により新たに発生する生産工程の分岐と合流、飛ばしといった専用ラインではない工程の不安定要素に対しては、AI、IoTを活用した工程シミュレーション、トレーサビリティシステム、ヒューマンエラー防止システム、さらに、特集で紹介している協調ロボットによる作業支援等々の取組みが有効です。

世の中の技術潮流が大きく変化するなか、お客さまのオートメーション企業に対する期待も変化しています。

今回紹介した「HCA-MS」と「超混流生産」は、人と機械・システムとの協調を目指した新たな価値創造を生み出す可能性のある取組みです。まだ途についたところでもあり、さらに進化させていくべき事項も数多くあります。引き続き技術潮流の変化とお客さまのニーズを捉えたアズビルならではの生産変革として進めていきたいと考えています。

azbilグループは、「人を中心としたオートメーションで、人々の安心、快適、達成感を実現するとともに、地球環境に貢献します」をグループ理念として、人と機械・システムとの協調による高信頼、高効率、高品質な生産体制を引き続き提供してまいります。

ズは、(休んだ、退職した、繁忙期で急に忙しくなったなど)一時的に人が必要になったときに使いやすいロボットのニーズが増えてくることが予想される。急にロボットを利用したいような場合、先に記述したような高度なエンジニアリングスキルを不要にする必要がある。

これに応える機能として、教示作業のときにロボットに「力」を加え思いどおりの方向や位置に動かせるダイレクト教示とか、適切な「力」でワークを掴むとか、適切な「力」で作業を行うといった力覚機能が「使いやすさ」に対して重要であると考えた。このことから当社の計測と制御技術を応用して、「力」センシング技術を開発し、これをロボットやロボットハンドに搭載した“次世代スマートロボット”を開発した。

この「力」センシング技術をベースに今まで導入が困難であった力加減が必要な作業の自動化や、使いやすくしたロボットで高度なスキルを持たないユーザーでも使用することを可能とし、ロボットの利用範囲を広げることで社会的な課題に貢献することを目指した。

2. 特長機能と開発仕様

“次世代スマートロボット”として必要な機能を下記に列記する。(1)～(4)は「力」センシング技術に基づく機能、(5)については画像技術に基づくものである。このように触覚に相当する機能と視覚に相当する機能を有している。

(1) 繊細なハンドリング

柔らかいもの、傷つきやすいものを掴むことが可能

(2) ダイレクト教示

直接ロボットアームを操作でき、軽い力で楽な教示作業が可能

(3) 力覚動作

探り動作やならい位置合わせ動作により、状況の変化による対象物の位置ズレなどに対応が可能

(4) 高精度衝突検知

軽い接触力で停止することによる安全機能の実現

(5) 画像認識

対象物の位置や形状の認識により確実なハンドリングと作業を実現

次に開発のための仕様を記す。

表1 ロボットアーム仕様	
種類	垂直多関節型ロボット
軸数	6軸
アーム長	683mm
可搬質量	3kg
繰り返し精度	±0.02mm
教示	ダイレクト教示方式
作業力	指定可
接触停止	可能
最大速度	2m/s

表2 ロボットハンド仕様	
種類	2指把持ハンド
把持長	0～90mm
把持力	1～75N

これを基に開発したロボットおよびロボットハンドを図1に示す。



図1 ロボットアームおよびロボットハンド

ロボット形状の特長としては、手挟みを抑制するための隙間が設けられている。これはダイレクト教示で直接人がロボットに触れるためである。ほかの協働ロボットもこの本質安全な構造になっており、従来の産業用ロボットと異なる形状になっている。また、ロボットアームやロボットハンドの内部に「力」センシング技術が内蔵されていて力覚機能を実現している。さらにロボットハンドにはカメラが内蔵されており画像処理装置をととして視覚機能を実現している。なお、図1にはロボットを制御するコントローラおよび画像処理装置は記されていない。

3. 「力」センシング技術を用いた機能について

“次世代スマートロボット”の最も特長となる機能は前章の(1)～(4)で、それを「力」センシング技術で実現している。ここではその技術を用いた実施例を紹介する。なお、(5)の画像認識について今回は紹介を省く。

3.1 微細なハンドリング

ロボットを用いて作業を行わせるときに対象物を移動したり作業したりする手段として、吸着や把持(掴む)などがある。社内ユースでも把持を行わせるために2指の電動ハンドを用いる場合がある。空気式ハンドを用いるのと比較して、複数点の把持位置が設定できたり、掴んだ位置を検出して状態を確認できたりと利点がある。さらに掴む力(把持力)を設定できるため、対象物ごとに適切な把持力で作業することが可能である。しかし、従来の電動ハンドには次の課題が挙げられる。

- ・「ストローク」と「把持力」の要求仕様に基づき市販品のラインアップから選択する必要があるが、選定者にはメーカー知識、対象物の適正な把持力、作業に応じた把持力やストローク決めなどのスキルが求められる。
- ・「ストローク」と「把持力」の関係について複数メーカーの電動ハンドを調査すると、大ストロークで微小把持力を制御できる製品が存在していない(図2参照)。

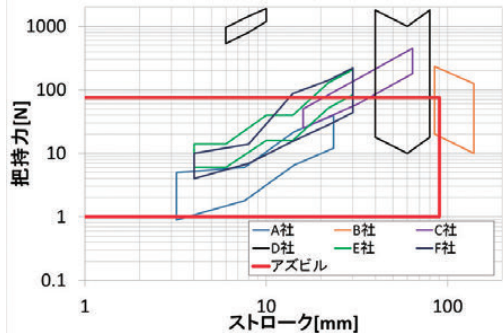


図2 「ストローク」と「把持力」の関係(当社調べ)

大ストロークで、かつ微小力で掴めるハンドがあると、1つのハンドで様々な対象物をハンドリングすることが可能となる。

この課題に対応するため1つのハンドで広範囲の把持力とストロークが可能なロボットハンドを開発した(図2赤線内)。そのハンドの概要図を図3に示す。2指の機構は並行リンク式となっており1つのアクチュエータで同期動作させている。

このハンドは、従来のアクチュエータ駆動負荷から掴み力を推定する方式と異なり、2指構造部にかかる「力」を直接センシングする技術を用いていることで、微小力制御を実現している。

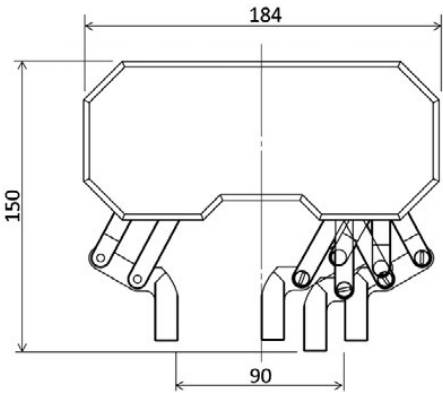


図3 開発したロボットハンド概要

この「力」センシング技術を用いたことで、従来は定格把持力の30%程度が最小把持力だったのを、1%程度を実現することができた。この能力を示す実験として、木綿豆腐の把持と、飲料用のアルミ缶をつぶす程度の把持が可能であることを確認している(図4参照)。

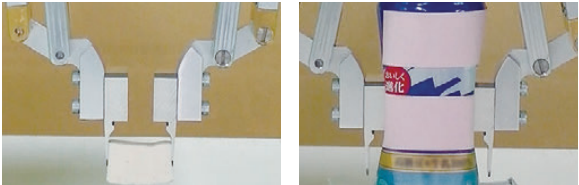


図4 把持実験(左:木綿豆腐、右:アルミ缶)

実験では豆腐は0.5Nで持ち、アルミ缶は30Nでつぶしている。この豆腐並の微小な把持力が実現できたことで、これまで難しいとされていた柔らかいものや脆いもののワークハンドリングができるようになる。これは工業用の生産だけでなく、食品や農産物の生産現場へも適用できる可能性がある。

また生産現場では、当初の掴み力に対する要求仕様が間違っていた場合や、製品の変更によって対象物が変化した場合に、適切な把持力に変更する必要がある。把持力の設定範囲やストロークが広いハンドはこのような変化への対応にも容易である。

3.2 ダイレクト教示

“次世代スマートロボット”では、教示を直観的かつ容易にするためにダイレクト教示機能を搭載した。ダイレクト教示は人がアームを直接操作して教示点と姿勢を教示するものだが、本ロボットでは「力」センシング技術を用いてこの機能を実現している。本節ではこの機能を実現するための制御技術について述べる。

図5に制御系の概略構成図を示す。人がアームを操作することで発生した外力は、「力」センシング部によって検知される。しかし、検知される力には重力に起因する成分も含まれているため、そのまま用いても人の操作どおりにアームを動かすことはできない。そのため、重力補償を行い、人によるアームの操作のみを推定する必要がある。開発した制御アルゴリズムにはこのための外力推定機能があり、ロボットの重力モデルに関節角測定値を代入して重力成分を

推定することで、検知した外力を補償している。推定されたアームの操作は従動制御ロジックに送られ、人の操作に従うように関節角指令値が更新される。このようにして、人のアーム操作に従って動作するような制御系を実現している。

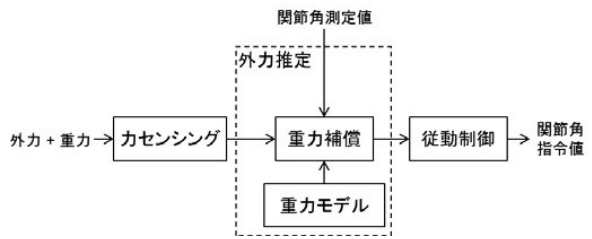


図5 ダイレクト教示のための制御系概略構成図

3.3 力覚動作

“次世代スマートロボット”は基本的な位置制御に加え、「力」センシング技術を用いた力覚動作機能を持っている。本節ではこの機能の概要について述べる。

図6に力制御系の概略構成図を示す。ダイレクト教示の節で説明した外力推定機能により外力を推定し、それを指定された力指令値(ベクトル)と比較することで、力制御を行っている。これによりアームの位置と姿勢が決まるので、逆運動学(IK)によって関節角指令値に変換し、ロボットアームを制御する。このようにして、「力」フィードバック制御を実現している。

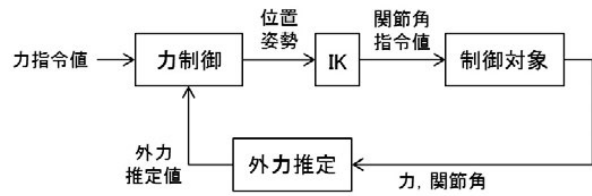


図6 力制御系概略構成図

力覚動作の一例として押付け作業を実現するには、外力の推定値が力指令値と一致するように位置・姿勢を制御することで、押付け力が一定となるようにしている。

これを用いてスナップフィットなどの挿入作業を行わせることができる。スナップフィットでは適正な挿入力で組み立てることが要求される。挿入中に過大な力を生じると対象物が破損することがあるからである。押付け作業をさせると、外力推定値と関節角(作業位置)を監視しているため過大な力を生じたときに安全に動作を止めることができるのと、その位置を評価して挿入作業の良否判定が行える。また、接着作業など確実に対象物同士を密着させて、かつ一定の接触力で押し付ける作業にも適用できる。

この制御ロジックを用いて、ロボットの先端で秤を押し、その秤値を読み取るという実験を行った(図7参照)。

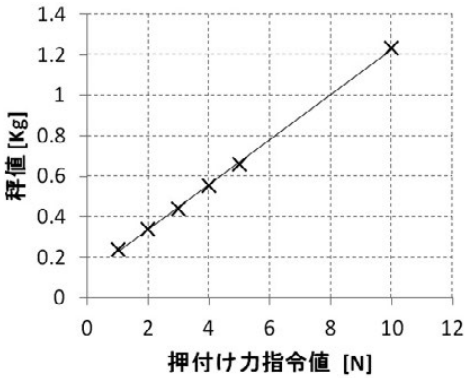


図7 押付け指令値と秤値

直線性は1%以下で、同じ作業位置であれば精度のよい押付け作業が可能であることが示された。この実験ではオフセットがあるので指令値に対して誤差を持っているが、押付け作業直前に外力値を取り込み、それに指令値を加算することで精度を出すことができることを確認した。

3.4 高精度接触検知

3.2項のダイレクト教示や3.3項の力覚動作はロボットアームに内蔵した「力」センシング技術によって実現されているが、これによってロボットアームが外部と接触したことの検知もできている。これによって人との接触が検知できるが、検知可能な「力」レベルが数N程度を目指し開発を進めている。押付け制御の実現しているレベルから十分可能性がある。

4. デモンストレーション装置について

“次世代スマートロボット”の特長(1)～(5)を適用したデモンストレーション装置をいくつか開発し、2017年11月29日～12月1日に開催されたSCF2017／計測展2017に参考出展を行った。そのデモ機について簡単に紹介する。

4.1 柔らかいもののハンドリング

柔らかいものの例として、木綿豆腐・カステラ・ブドウ・ゆで卵を掴み、皿に載せて、皿を掴み、テーブルに置くという作業を行わせた(図8参照)。

柔らかいものは1N程度で、皿は30N程度で掴み、それぞれを搬送することができた。見た目で分かりやすいという理由で食品系の対象物を用いたが、粉を固めたものや変形しやすい対象物なども掴める可能性がある。



図8 柔らかいものをハンドリングするデモ機

4.2 スナップフィット作業とダイレクト教示

スナップフィットとはフックが付いた部品を差し込む作業で、ケーブルのコネクタ挿入・固定用ピン挿入などがある。フック部分の弾性部や樹脂材料の場合は挿入時に過度な力がかかると変形して破損したり差し込んだ後に抜けやすくなったりする。そこで挿入時に力制限を設けて過負荷を検知して作業を止める動作をデモンストレーションした(図9参照)。

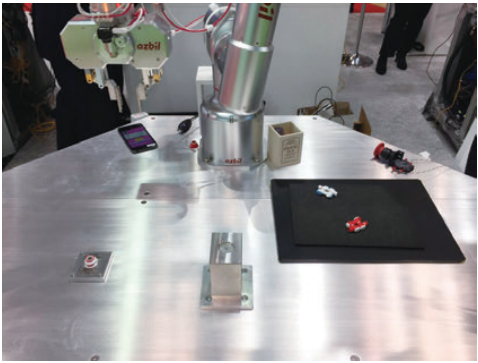


図9 スナップフィット作業をするデモ機

5. おわりに

この“次世代スマートロボット”は、これまでロボットの適用が難しい「力」作業の自動化、食品や農作物のハンドリング等への適用を想定している。また、ダイレクト教示や力覚動作機能で「簡単」にロボットが利用でき、容易に導入できることを目指していることから、ロボット関連のスキルを持った人材が少ない企業の生産現場への適用も想定している。

今後はアズビルと一緒に自動化を検討して頂ける企業とともにさらに開発を進める。

<参考文献>

- (1)原田豊, 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, azbil Technical Review, 2013年4月発行号, pp.6-11

<著者所属>

- | | |
|-------|--------------------------|
| 原田 豊 | アズビル株式会社
技術開発本部HCA技術部 |
| 田原 鉄也 | アズビル株式会社
技術開発本部HCA技術部 |
| 岩下 純久 | アズビル株式会社
技術開発本部HCA技術部 |

熱源システム運転の効率化に貢献するクラウドサービスの開発

Improvement of Heat Source System Efficiency Using a Cloud Service

アズビル株式会社 ITソリューション本部	小柳 隆 Takashi Koyanagi	アズビル株式会社 ITソリューション本部	古賀 圭 Kei Koga
アズビル株式会社 ITソリューション本部	鹿島 亨 Toru Kashima	アズビル株式会社 ITソリューション本部	鈴山 晃弘 Akihiro Suzuyama
アズビル株式会社 ITソリューション本部	村田 裕志 Hiroshi Murata	アズビル株式会社 ITソリューション本部	太田 延樹 Nobuki Ota

キーワード
クラウドサービス, 熱源システム, 需要予測, 数理最適化

建物・工場の管理業務を支援する,「クラウドサービス」のメニューの1つとして, 熱源最適運用支援を開発し, サービス提供を開始した。本機能は, 熱源システムを運転管理する設備オペレータの日常業務を支援することを目的としている。本稿では, 需要予測機能, 熱源最適運用支援機能, 台数制御コントローラ連携機能, コメント機能などを紹介する。また, 本サービスにおける最適化演算の処理内容, および利用している技術について概要を説明する。

As one part of our cloud service menu in support of building and factory administration, we have developed and offer a service providing optimal heat source operation. The service is designed to assist the daily work of the facility operators who control the heat source system. We describe various functions for demand forecasting, optimization of heat source operation, cloud-linked control of the number of operating heat source units, addition of comments to items on the screen, and more. In addition, we provide a brief overview of the optimization calculations and technology that we utilize.

1. はじめに

地球温暖化によるとされる海面の上昇や異常気象, 生態系の変化などの問題はもはや無視できないものとして, 地球レベルでの温室効果ガスの削減, 省エネルギーが求められ, 産業部門(工場等)や業務部門(オフィスビル等)に対する環境規制は年々厳しくなっている。

また, 東日本大震災以降, 災害発生時の電力供給確保(BCP)ニーズの高まり等のため, 自家発電設備, 特に熱電併給設備(CGS:Cogeneration System)が熱源システムに多く導入されている。CGSは内燃機関で発電し, その際に発生する熱を多様な設備で有効活用するものであるが, 需要負荷の変動やエネルギー単価の変動に応じて, コスト削減・省エネルギー・高効率運転となるように各設備の運転計

画をたてることが課題となっている。

これらの課題を解決する技術として,「需要予測」と数理計画法に基づく「最適化」が注目されている。

熱源システムの運転計画に「最適化」を適用する事例には従来から取り組んできた⁽¹⁾。しかし, 実用的な演算時間で最適解が得られるように問題を定式化するには専門的で高度な知識が必要だったため, 汎く普及するには至っていない。近年のハードウェアの高速化, 最適化問題を解くアルゴリズムの高速化により⁽²⁾, 上記の課題(演算時間, 問題の定式化)は解決されつつある。

一方で, 近年の情報通信技術の発達や通信インフラの整備により, 従来は利用者が手元のPCで利用していたアプリケーションやデータをインターネット経由のサービスとして, 利用者に提供するクラウドサービスが日常生活のあら

ゆるところで急速に普及してきている。

このような状況のなかで, 大規模化・複雑化した熱源システムに対する最適運用を支援するクラウドサービス「熱源最適運用支援(OP)」を開発しサービスを開始した。

本稿では, この「熱源最適運用支援(OP)」について紹介する。

2. クラウドサービスの概要

アズビルのクラウドサービスは, ビルオーナーや設備オペレータ, 居住者などビルにかかわる様々なユーザーに対してインターネットを経由してサービスを提供している。本稿で紹介する熱源最適運用支援(OP)だけでなく, エネルギー管理(EM), 設備保全管理(BM), テナントサービス(TS)などのサービスメニューを用意しており, 顧客は必要なメニューを組み合わせる利用することができる(表1)。

表1 サービスメニュー一覧			
コンテンツ	提供価値	主要機能	主要ユーザー
EM エネルギー管理	省エネ見える化	・消費傾向分析 ・総量目標管理 ・サイネージ ・エキスパート機能	プロパティマネージャ (ビルオーナー会社)
TS テナントサービス	快適性 利便性	・照明/機器発停 ・空調設定 ・申告空調制御	居住者(テナント)
BM 設備保全管理	LCC低減	・設備保全管理 ・中長期保全計画 ・点検支援	設備オペレータ (ビル管理会社)
OP 最適運用	省エネ/省CO2 省コスト	・需要予測 ・最適運転シミュレーション ・COP管理	設備オペレータ
DR デマンドレスポンス	電力需給連携	・DR管理機能 ・節電制御	—

クラウドサービスというシステム形態のメリットは, 下記の3点が挙げられる。

- (1) 利便性の向上
 - ・アクセス場所や端末を選ばないため, ユーザーの利用形態に柔軟に対応できる
 - ・常に最新のアプリケーションや情報を利用できる
 - ・高性能・大容量サーバで処理するため, 高度な制御や分析が可能である
- (2) システム管理品質の向上
 - ・システム管理の専門家が一括して運用するため管理品質の向上が見込める
 - ・データセンターを利用することで, 耐災害性やセキュリティ対策が高いレベルで確保できる
- (3) コスト削減
 - ・サーバ等の情報機器や高価なアプリケーションを保有する必要がなく, 初期投資をかけずにサービスを利用できる
 - ・ハードウェアの維持管理コストを大幅に削減することが可能

このように, クラウドサービスは, その利用形態により, 利用者に様々なメリットを提供することができる。

3. 熱源最適運用支援(OP)

熱源最適運用支援(OP)では, 予測された需要量に対して, ある最小化目的に沿った熱源の「最適運転計画」を立案する(図1)。なお, 最小化目的としては, コスト最小化やCO₂排出量最小化等を選択可能である。



図1 熱源最適計画 処理概要

3.1 需要予測機能

本機能では, 冷温水や電気, ガスなどの使用量を最大7日先まで予測可能である。予測には, 当社保有技術である位相事例ベースモデリング (Topological Case-Based Modeling:TCBMTM)^{注1}を使用している。予測の入力データには, 気象予報データや建物運用カレンダーに加えて, 当社中央監視装置savic-netTMで設定されている「空調機の運転スケジュール情報」も利用することができる。また, 指数平滑法に基づく予測値の自動補正や, 予測値の手動修正機能も備えている。

図2に需要予測画面を示す。薄い色の棒グラフが予測結果, 左側の濃い色の棒グラフが実績値を示している。

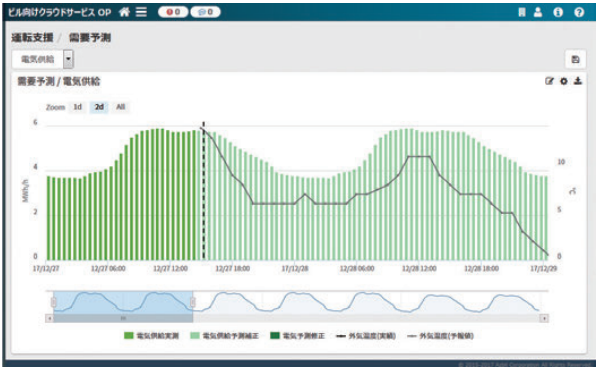


図2 需要予測画面

3.2 熱源最適運用支援機能

熱源の「最適運転計画」は, 熱源システム運用を混合整数線形計画問題(Mixed Integer Linear Program:MILP)としてモデル化し, 数理最適化ソルバーにより最適解を求めることで得られる。主な特長を以下に挙げる。

- ・予測負荷に基づき, 最短30分周期で情報更新
- ・熱源の部分負荷特性を考慮
- ・熱源が能力を発揮するまでにかかる「立ち上がり時間」を考慮
- ・エネルギー単価の季時別時間帯別料金に対応
- ・年間制約条件(年間最低使用量や年間負荷率のような年間累積値に対する契約条件)を考慮

注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つくる必要がなく, 非線形な入出力関係にも対応することができる

3.2.1 ダッシュボード

本システムにログインして、最初に表示されるのがダッシュボード画面である(図3)。ユーザーはダッシュボード画面にて、直近の負荷予測結果や熱源運転計画の概況を直感的に把握することができる。具体的な表示項目については、表2に示す。



図3 クラウドOPダッシュボード画面

表2 タイルごとの表示項目

番号	タイトル名称	説明
①	これからの熱源運転	現在時刻以降の熱源運転台数
②	需要予測	現在時刻以降の需要予測
③	気象予報	建物所在地の天気予報
④	電力需要予測	電力需要の実績と予測
⑤	年間予測	年度末における各種指標(コスト, CO2排出量, COPなど)の予測値

3.2.2 熱源運転計画

熱源運転計画画面では、立案した最適運転計画に基づき、今後の各熱源の運転/停止スケジュール、製造エネルギー量を表示する。表示画面には、短期計画と長期計画、2種類ある。

短期計画は直近の最適運転計画を細かく把握するための画面で、最大7日後までの30分データを表示する。なお、吸収式冷凍機など、起動から十分な能力を出力するのに時間がかかる機器の場合、その時間分早く起動させるような運転/停止スケジュールを表示する(図4)。

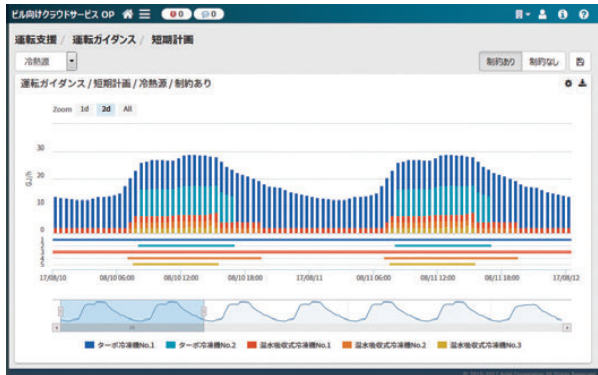


図4 熱源運転計画(短期)

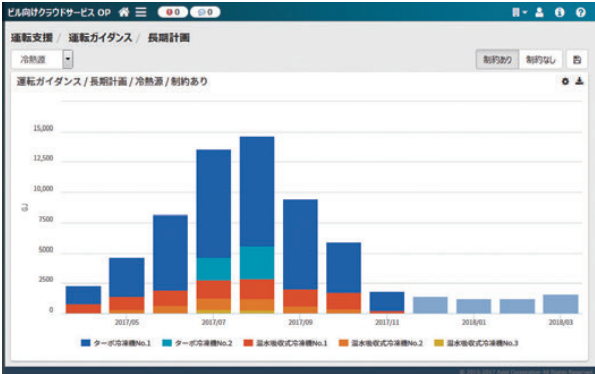


図5 熱源運転計画(長期)

長期計画は、年間の大まかな熱源運転方法を把握するための画面で、年度末までの1カ月データを表示する(図5)。

3.2.3 システムCOP管理

システムCOP管理画面では、熱源システムの運転効率(Coefficient of Performance: COP)の実績値、および予測値を表示する(図6)。表示画面には、30分データ、月データ、年間累積データの3種類がある(図6は年間累積データ)。

システムCOPの予測値は、需要予測値および最適運転計画から演算できる熱源消費エネルギー量から算出している。これにより、時間帯ごと、月ごと、あるいは年間のシステムCOP値の推移をあらかじめ把握可能となるので、効率改善策の検討に役立てることができる。



図6 システムCOP確認画面(年間累積データ)

3.2.4 エネルギー契約達成状況

図7は、立案した最適運転計画がガス契約を満足しているか確認できる画面である。

ガス契約では一般的に、年間最低使用量、最大需要期使用量の上限値、年間負荷率の下限値など、ガスの使用量に対して複数の条件が設定されている。

可視化画面では、ガスの使用量を、12月~3月(最大需要期)と4~11月(非最大需要期)との期間別に、別の軸に配置することで、複数あるガス契約を同一のグラフ内に表現している。グラフ上に、ガス使用量実績、および運転計画におけるガス使用量の計画値をプロットすることで、ガス契約の達成見込みを確認できる。

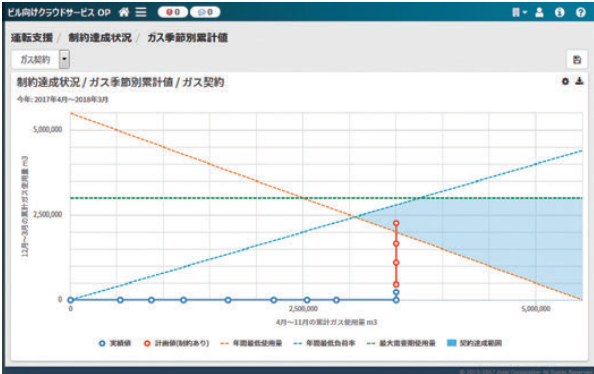


図7 ガス契約の達成状況確認画面

3.2.5 ユーザー設定画面

最新の契約情報で運転計画を立案するために、Webアプリケーション画面にてユーザーが単価や燃料調整費を設定することができる(図8)。



図8 エネルギー契約設定画面

熱源は故障やメンテナンスで運転できない場合がある。ユーザーが、Webアプリケーション画面で熱源を停止したい時間帯を設定することができる(図9)。最適化演算処理では、除外設定を考慮して計画を立案する。なお、除外設定は、BAシステムの除外情報も自動反映可能である。

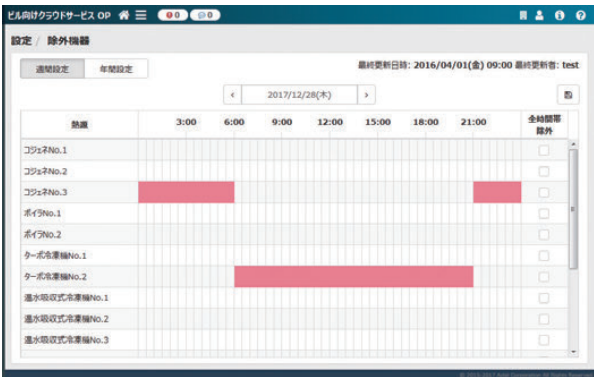


図9 熱源除外スケジュール設定画面

3.3 台数制御連携機能

クラウド側で画面表示している最適運転計画を現地の台数制御に反映可能である。クラウド側と自動制御の役割分担の考え方は、クラウド側では最適運転計画に基づいた制御パラメータを決定し、自動制御側は決定された制御パラメータに基づいて、需要側の変動に対応する。

3.4 コメント機能

グラフ上の任意の位置をクリックすることで、その場所にコメントを作成可能である。作成されたコメントはグラフ上にアイコンとして表示されるとともに(図10)、一覧表に表示することもできる(図11)。一覧表には検索機能があり、作成時期、該当グラフ、作成者、コメント内容等の条件で絞り込むことができる。

コメント機能は建物内外のユーザー間のコミュニケーションツールとしての活用が期待される。

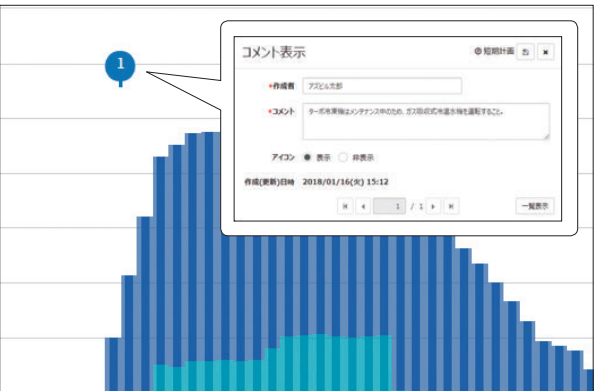


図10 グラフ上のコメント作成

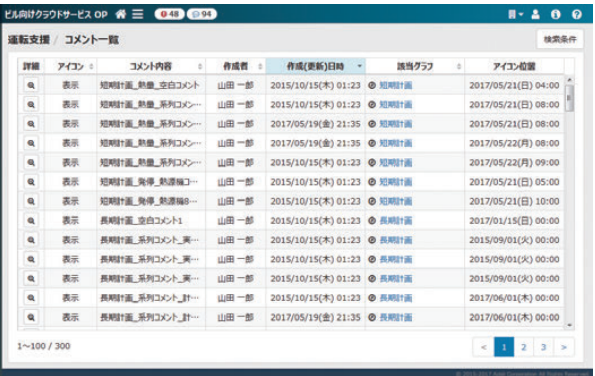


図11 コメント一覧の表示

3.5 スマートガイダンス機能

あらかじめシステムにガイダンス内容および表示条件を登録しておくことで、条件式が成立した場合に、自動的にグラフ上にガイダンス内容に関連付けられたアイコンを表示させることができる(図12)。

本機能は、過去実績値を用いた判定のみならず、将来の予測値や計画値を用いてガイダンスを出せることが特長である。具体的には、需要予測値の上限監視、熱源の運転停止操作ガイダンスの事前通知、管理指標の達成状況の把握等への利用が考えられる。



図12 グラフ上のスマートガイダンス表示

4. 最適化演算処理について

本章では、本サービスにおける最適化演算の処理内容、および利用している技術について概要を紹介する。

4.1 最適化演算処理の概要

まず、最適化演算時の基本的な処理内容について説明する。最適化演算では、最適な運転計画、すなわち各操作変数(各予測対象日および代表日の各時刻における各設備の稼働／停止を表す0-1整数変数、および入出力熱量を表す連続変数)の値をMILPを用いて算出する。

最適化演算実行の各タイミングで、初期導入時に作成した数理モデルファイル(運転計画の目的と制約条件を、目的関数、制約式として定式化し、最適化ソルバーが読み込める形式で記述したファイル。以下、数理モデル)、ユーザーが画面上で設定したパラメータのデータ(除外設定、エネルギー単価等)、時間の経過とともに変化する実績値データ、予測値データが最適化ソルバーに渡され最適化計算が行われる。

数理モデルは、導入時に、ユーザーから運転計画の目的(省コスト、省CO2、省エネ等)と、制約条件(各設備機器の入出力特性、設備機器・エネルギー購入源・エネルギー供給先の接続関係、運転ルールや各種エネルギーの購入契約等)をヒアリングし、それらを適切に定式化して作成する。

4.2 モデリング技術

上記最適化演算により算出される運転計画が、現場の状況に則した実用的なものとなるためには、数理モデルを十分かつ適切に作り込む必要がある。本節では、本サービスで利用している、数理モデルの作成に関する技術について概要を紹介する。

4.2.1 多様な設備構成への対応

設備構成(各設備機器の入出力特性、設備機器・エネルギー購入源・エネルギー供給先の接続関係)の数理モデル作成にあたっては、定式化方法を抽象化・標準化しているため、多種多様な設備機器・エネルギーを利用している複雑な設備構成の現場にも柔軟に対応可能である。例えば、設備機器は各種冷凍機、ボイラ、コジェネ、蓄熱槽な

ど(いずれも補機動力も考慮可能)、エネルギーは蒸気、ガス、電気、冷熱、温熱、石油等をモデル化可能である。図13に対象設備構成の一例を示す。

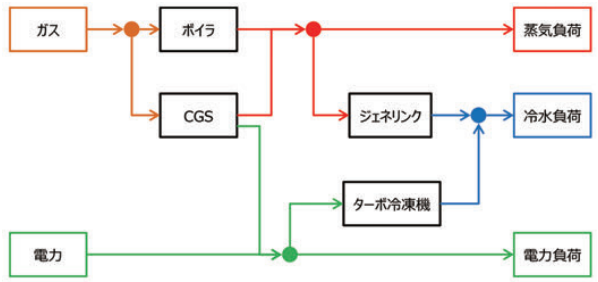


図13 設備機器・エネルギーの接続関係の例

また、非線形な部分負荷特性を持つ設備機器についても、区分線形関数を用いて近似的にモデル化可能である。複雑な形状の関数を近似するには、区分の数を多くすればよい。しかし、区分の数が多くなると、解くべきMILPの規模が大きくなり、計算時間の増大を招く。本サービスでは、フィッティング精度と区分数のトレードオフを調整しながら区分線形関数を自動生成する独自技術を利用しており、実用上十分な精度を保ちつつ、計算時間の増大を回避している。

4.2.2 制約条件のモデリング

数理モデルに定式化されるべき制約条件は、4.1で述べたとおり様々なものがある。通常、ヒアリングした制約条件を一度単純な等式・不等式で定式化しただけでは不十分であることが多い(算出される運転計画が実用的でないものとなる)。その主な原因は、暗黙に想定しているものも含め制約条件を洗い出さきれていないことや、各制約条件の遵守の絶対性が定まっていない(できれば遵守したいが、目的をさらに改善したり、競合する制約条件を遵守可能にしたりするために緩和してもよい制約条件がある)ことなどが挙げられる。

したがって、初期導入時の数理モデル作成にあたっては、制約条件の洗い出しと明確化を進めながら、それらを適切に数理モデルに組み込んでいく作業が必要となる。具体的には、数理モデルの編集 → 最適化計算の試行・結果確認 → 分析 の作業サイクルを繰り返す必要があるが、この作業サイクルの効率化が、最終的な数理モデルの品質向上のための1つの課題となる。

これに対し、まず、典型的な制約条件について定式化のテンプレート集を作成することで、数理モデルの編集作業、とくに新規制約条件のモデル化作業を容易にしている。また、このように制約条件の種類をリストアップすることで、どの制約条件を使用しているか、あるいは使用していないかが分かるため、制約条件の洗い出し漏れを低減している。さらに、制約条件の充足状況確認や、分析(目的に対する感度、制約条件同士の競合関係など)、調整(緩和の程度や対象範囲など)が容易にできるよう、定式化方法にも独自の技術を用いている。これらにより、前述の作業サイクルを効率的に回すことができるため、制約条件の

数理モデルを十分に作り込むことが可能となり、現場の状況に則した実用的な熱源運転計画を算出する数理モデルが作成できる。

4.3 年間制約計算の高速化

最適化演算は、エネルギー負荷予測に基づいた熱源最適運転計画を30分ごとに算出する。算出される最適運転計画は、予測対象日数で表される短期間において最適化されているだけでなく、長期間のエネルギー契約(最大1年間)に従っている必要がある。

しかしながら、一般的に、大規模なMILPの最適化は計算負荷が大きいことが知られており、長期間のエネルギー契約を考慮した最適化計算を短時間で行うことは難しい。本サービスでは、様々な技術を駆使して、計算時間の短縮を図っている。

その1つは、MILPを上位問題(年間制約問題)と下位問題(予測対象日数分の最適化問題)に分割した上で、上位問題を解く頻度を減らすことである。

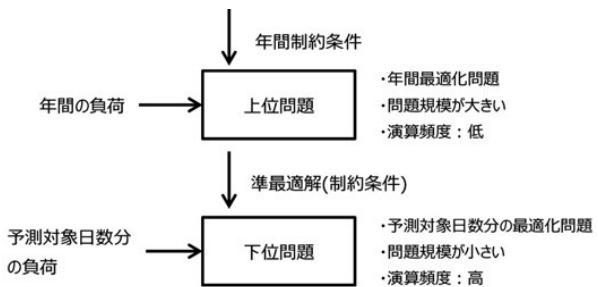


図14 上位問題と下位問題

上位問題(年間制約問題)を解く際には、予測対象日数分のエネルギー負荷予測、その先最大1年分の代表負荷パターン、年間のエネルギー契約、その他すべての制約条件を考慮する。ここで、完全な最適解を求めるには計算時間がかかるため、実用上十分な精度での解を求める「準最適化」を行うことで、計算時間を短縮する。

準最適化とは、例えば、一部の整数変数を緩和した緩和解を求めたり、分枝限定法における上下限のギャップを大きくして実行可能解を算出したりすることを指す⁽³⁾。

一方、下位問題(予測対象日数分の最適化問題)を解く際には、上位問題を解くことにより得られた解を、都度新たな制約条件として問題に組込んだ上で、予測対象日数分のエネルギー負荷予測を考慮した最適化を行う。下位問題の解が、組込まれた新たな制約条件を満たしていれば、年間のエネルギー契約に従うような、予測対象日数分の運転計画が得られることになる。

下位問題は上位問題と比較して問題規模が小さく、短時間で計算可能である。このようにして、問題の規模を小さくしつつも、長期間のエネルギー契約(最大1年間)に従った熱源運転計画を30分ごとに算出することが可能となる。

5. おわりに

クラウドサービスの熱源最適運用支援(OP)を紹介した。年々高まる環境規制、多種多様な熱源設備の登場、自然エネルギー利用の拡大、BPCを考慮した設備構成、デマンドレスポンスへの対応など、建物・工場の熱源システム運用は、今後さらに複雑化していくと思われる。また、労働人口の減少により、熟練設備オペレータの確保が困難になることが予想されている。したがって、熱源システム運用品質の維持・向上を図るためには、数理最適化技術の有効活用が必要である。

今後は、数理最適化技術を熱源システムのみならず、スケジューリング問題や生産計画など他の分野への応用を検討していきたいと考えている。

<参考文献>

- (1)神村、宮坂、伊藤、『空調熱源運用計画シミュレータの開発』、Savemation Review, Vol.11, No.2, 1993
- (2)梅村、『組合せ最適化入門 線形計画から整数計画まで』、言語処理学会第19回年次大会, 2013
- (3)T. Kashima and S. P. Boyd, "Cost optimal operation of thermal energy storage system with real-time prices," 2013 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Nha Trang, 2013, pp. 233-237.

<商標>

TCBMはアズビル株式会社の商標です。
savic-netはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

小柳 隆	アズビル株式会社 ITソリューション本部ITソリューション開発部
鹿島 亨	アズビル株式会社 ITソリューション本部ITソリューション開発部
村田 裕志	アズビル株式会社 ITソリューション本部ITソリューション開発部
古賀 圭	アズビル株式会社 ITソリューション本部ITソリューション開発部
鈴山 晃弘	アズビル株式会社 ITソリューション本部ITソリューション開発部
太田 延樹	アズビル株式会社 ITソリューション本部ITソリューション開発部

オペレータの意思決定を支援する バッチプロセス向けオンライン異常予兆検知手法の開発

An Online Anomaly Detection System Supporting Batch-Process Operator Decision-Making

アズビル株式会社
ITソリューション本部

鈴木 毅洋
Takehiro Suzuki

アズビル株式会社
ITソリューション本部

西口 純也
Junya Nishiguchi

キーワード

バッチプロセス, 異常予兆検知, 意思決定の支援, AI

近年、プロセスデータを利用した自動監視ニーズが高まっている。本稿では、特に運転管理が煩雑なバッチプロセスを対象とし、従来のような対象プロセスの詳細な知見がなくてもプロセス全体をモデル化できる「MTSA (Multivariate Time series Shape Analysis) モデリング」を提案する。本手法はプロセスを自動監視し、捉えた異常を変数間の相関構造とともに直観的に理解しやすい形で提示できる。これにより、オペレータは自身の知見とあわせた異常の原因分析が実現でき、検知後の早期アクションに役立てることができる。

In recent years, the need for automatic supervision through the use of process data has increased. In this paper we propose “Multivariate Time-series Shape Analysis (MTSA) modeling,” which allows an entire process to be modeled without the detailed knowledge of the process that is conventionally required. This technique is particularly intended for batch processes whose operation control is complicated.

With the use of this technique, processes can be automatically monitored, and any detected deviations of process variables, as well as correlations among variables, can be presented in an intuitive, easy-to-understand format. Combining this information with their own knowledge, operators are able to analyze the root cause of anomalies and take action at an early stage.

1. はじめに

情報処理技術の発達が著しい現在、あらゆる分野においてビッグデータやAI、IoTといったキーワードを目にするようになった。日本の製造業においても産学官連携でのAI、IoTを活用する取組みが既に始まっており、実現場での成果も報告されている。

プロセスオートメーション (PA) の分野では、従来より設備や品質の適切な管理が課題となっており、こうした情報処理技術の応用が期待されている。近年のPAの現場では、計器室の統合が進むことでプラント運転管理範囲が拡大し、限られた運転員がプロセス全体の管理を任される傾向にある。またプラントの運転経験が豊富な熟練者が定年

を迎える一方、知見やノウハウの十分な継承が行われていない現場も多く、設備保全や製品品質の確保への関心がより一層高まっている。こうした背景を受け、データベースに蓄積されたプロセス変数のデータ等、プラント運用時に収集された様々な情報から有益な知見を抽出し、設備や品質の管理へ活かすことが望まれている⁽¹⁾。

このような状況から近年では、情報処理技術を応用した異常検知システムの活用が進んでいる⁽²⁾。AI等の情報処理技術により設備をリアルタイムに自動監視し異常を捉え、オペレータはその段階でアクションを行うことで、設備故障によるプロセスの緊急停止やオフスペック品製造等のリスクを最小限にとどめることができる。

しかし、異常検知後の原因特定や対処法の立案には、

設備同士の繋がりやプロセスフロー等、対象プロセスに関する詳細な知見を要することがある。このため現場での早期の対処には、異常を検知し通知する従来の機能に加え、オペレータに対し意思決定の助けとなる情報を提示できる機能を備えていることが望ましいといえる。

特にバッチプロセスにおける異常検知後のアクションには、より多くのプロセスの知見が必要であると考えられる。バッチプロセスとは、品種ごとに原材料の仕込みや加工処理、製品の払い出しを繰り返し行う製造工程のことを指し、重合反応工程や半導体・医薬の製造工程が相当する。バッチプロセスは一般に同一設備で多くの品種が生産されるため、運転管理が難しく煩雑である。このため異常検知後の意思決定もより困難であり、従来の通知するだけのシステムでは、設備や品質管理の十分な高度化が期待できないと考えられる。

そこで、本稿ではオペレータの意思決定を支援できる新たなバッチプロセス向け異常検知手法MTSA (Multivariate Time series Shape Analysis) を提案する。本手法は各プロセス変数の異常をオペレータが直観的に解釈しやすい方式で表示するほか、各変数間の相関構造を推定することで、異常検知後のオペレータの意思決定をサポートすることが特長である。

2. バッチプロセス異常検知における従来手法の課題

異常検知の一般的な手法の1つである回帰分析⁽³⁾は、リスク対策の観点で重要度の高いプロセス変数を目的変数として監視対象に定め、その変数と関連度の高い説明変数を用いて監視対象の変数の挙動をモデル化する方法である。他の手法に比べ精度よく検知できるというメリットはあるが、プロセス全体を監視することができないという欠点がある。

その他の手法としては、主成分分析を利用したMSPC (Multivariate Statistical Process Control) が用いられる⁽⁴⁾。MSPCは、監視対象プロセスの詳細な知見なしにプロセス全体をモデル化できることが特長で、バッチプロセス向けに拡張した手法も提案されている。また検知した異常に対して各変数の寄与度を求めることも可能で、オペレータの原因分析を支援できる。しかし、MSPCの寄与度は異常なデータ自体の影響を受け、異常原因となる変数を見誤る可能性があると指摘されている⁽⁵⁾。

これに対し本稿で提案するMTSAは、詳細な知見なしにプロセス全体をモデル化できる方法であるという点では前述のMSPCと同様であるが、個別の変数に対して独立に異常を検知するため、ダイレクトに異常原因としての解釈が可能である。

3. バッチプロセス異常検知手法 MTSA

3.1 概要

MTSAは、バッチプロセスを対象としたオンライン異常検知手法である。手法全体の概要を図3-1に示す。本手法は、バッチ進行中における監視対象の異常度合いを表す評

価値をリアルタイムで算出する機能(3.2節)と、監視対象のプロセス変数間の相関構造を抽出する機能(3.3節)を提供する。

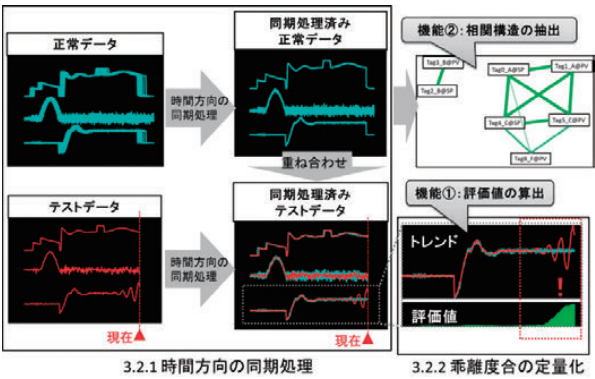


図3-1 MTSAの概要

3.2 MTSAの機能①:評価値の算出

MTSAの評価値は、検証対象のプロセスデータを、バッチ開始・終了で分割された正常期間のデータ（以降、正常データ）と重ね合わせた際の乖離度合を定量化することで算出される(図3-1)。ただし、バッチプロセスの進捗は外部温度や原材料の純度等の条件に応じ変化するため、時間方向の同期処理を実施した上で重ね合わせを行う。実際の処理では、事前に正常データ間のみで同期処理を行っておき、オンライン検知時には検知対象バッチのデータ（以降、テストデータ）と正常データで同期処理を行うことで、各変数の正常データに対する乖離度合が評価値として求められる。

3.2.1 時間方向の同期処理

次に、時間方向の同期処理と乖離度合の定量化について詳しく述べる。時間方向の同期処理は、複数の時系列データ間のサンプル同士の対応関係を求めることができるDTW (Dynamic Time Warping, 動的時間伸縮法)を用いて行う⁽⁶⁾ (図3-2)。

DTWは単変量の時系列データ向けの方法であるため、多変量データであるバッチプロセスへそのまま適用することは難しい。そこで既存手法としては、バッチプロセスの進行度を表すIndicator Variableを基準として各サンプルの対応関係を求める方法⁽⁷⁾や、正常データ間の同期処理の結果に基づいて各変数の重み付けを行い、重みの大きな変数を基準として各サンプルの対応関係を求める方法⁽⁸⁾が提案されている。

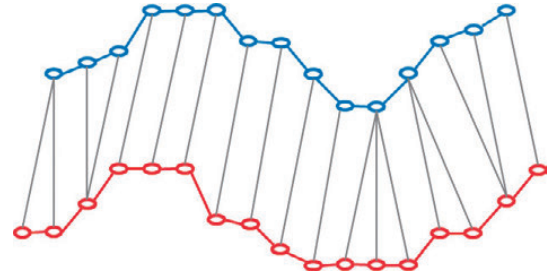


図3-2 DTW (Dynamic Time Warping)

しかし、それらの方法をオンラインでの異常検知に適用する際に、同期処理の基準となる変数に異常が発生した場合、誤った変数を異常と判断してしまうことがある。図3-3は4つの変数A,B,C,Dを含むテストデータと正常データの同期処理が失敗する例を示したものである。異常が発生している変数Cを同期処理の基準としているため、異常発生後のデータが不自然に引き伸ばされている。その結果、変数Dは本来正常であるにもかかわらず、異常であると誤検知されてしまう。

そこで提案手法では同期処理を行う前に、あらかじめ各変数が同期処理の基準として適切かどうかの判断を動的に行うことで上記課題を解決する。これは各サンプルに対し、その時間方向の近傍 ε に対応するデータが、許容誤差 σ の中に収まっているかどうかを判定することで行う。図3-4にその具体例を示す。異常がまだ発生していないa点におけるサンプルでは、近傍 ε に対応するテストデータのサンプルは許容誤差 σ の中に収まっているため、同期処理に採用する。一方で、異常発生後のb点では、近傍 ε に対応する全てのサンプルが許容誤差の外側に存在するため、変数Cのサンプルは採用せず、他の変数を基準として同期処理を実施する。このように、同期処理に使用するサンプルを動的に選択することで、不適切な同期処理を防ぐことができる。この方法は、各変数のトレンドの概形は毎ロットにおいて類似しており、バッチ開始からの経過時間が同程度であればプロセスの値も近いというバッチプロセスのデータの特徴に基づいている。

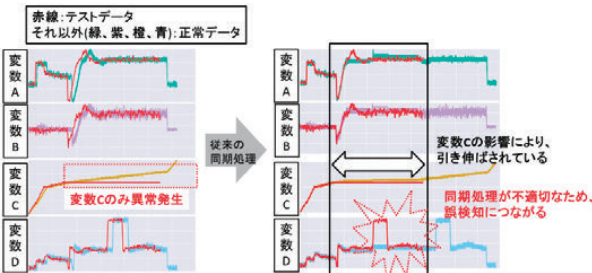


図3-3 従来手法による同期処理の失敗例

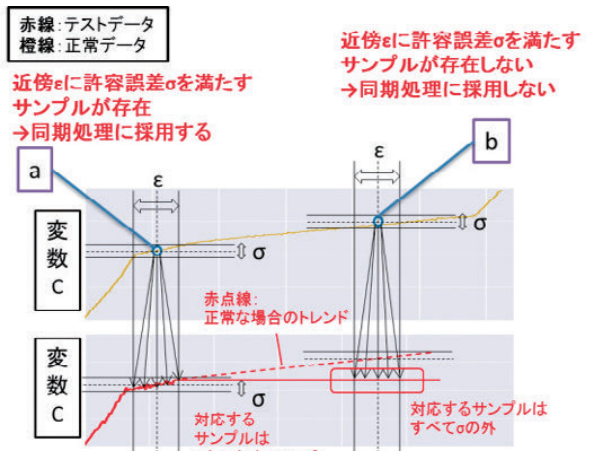


図3-4 同期処理への採用可否の判断

3.2.2 乖離度合の定量化

乖離度合の定量化では、各変数に対し個別に異常かどうかの判定を行う。従来の単変量の監視では、正常時における標準偏差の3倍を逸脱した場合に異常と判定する3シグマ法⁽⁹⁾が用いられている。この方法では、監視対象の変数が期待値を中心として対称に分布することを仮定しているが、実際のバッチプロセスのデータは仕込み量の違いや外気温度、運転条件の違いなどにより、必ずしも対象の分布にならない。そこで本手法では、任意の分布を表現できるKDE (Kernel Density Estimation, カーネル密度推定) を用いて監視を行う⁽¹⁰⁾。KDEは得られた有限のデータに基づき、そのデータを生成する全体の確率分布を推定することができる(図3-5)。

正常データの確率分布を推定しておけば、得られたテストデータが発生する確率pが求められる。テストデータが異常であればpは小さく、正常であれば大きいといった対応関係が成り立つため、評価値はpを用いて計算できる。テストデータの異常判定は、あらかじめ正常データを用いて算出された閾値を超えたかどうかによって行われる。

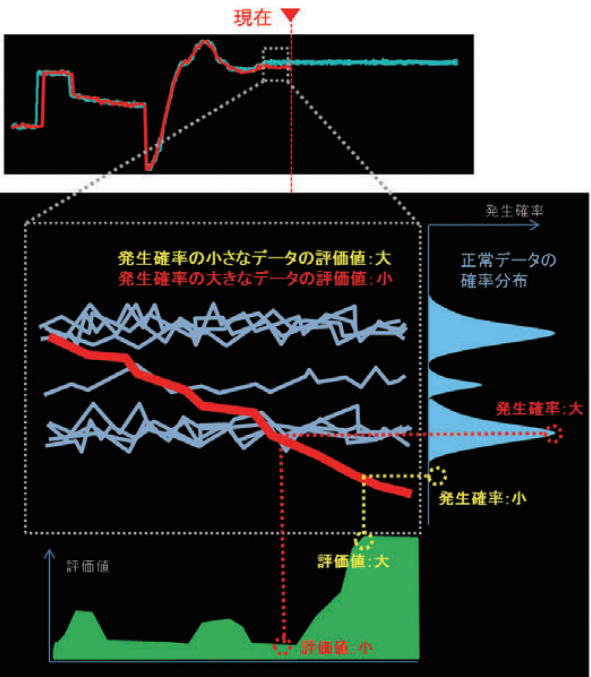


図3-5 KDEによる評価値の計算

3.3 MTSAの機能②: 相関構造の抽出

MTSAは異常検知後の意思決定支援やプロセスの理解の補助を目的とし、変数間の相関関係を推定する機能を備えている。一般によく用いられる相関の尺度としてはピアソンの積率相関係数⁽¹¹⁾があり、これを各変数のペアに対して計算することで、プロセス変数全体の相関構造を求めることができる。しかしこの相関係数は、疑似相関と呼ばれる見かけ上の相関関係を含んでしまうため、抽出された構造の解釈が難しいといった課題がある。そこで本手法では、各変数同士の相関関係が疎(スパース)であると仮定することで本質的な相関構造のみを抽出できるGraphical Lasso⁽¹²⁾を用いる(図3-6)。

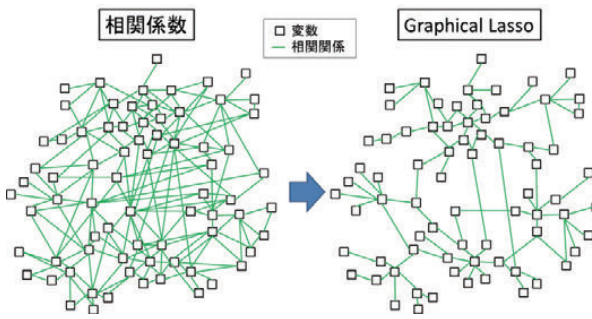


図3-6 相関構造の抽出イメージ

疎な相関構造を得ることで、後述(4章)するように発生した異常の伝搬を予測する際に、伝搬経路の絞り込みに活用できる。

4. 異常検知への MTSA の活用例

本章ではMTSAの活用がどのように異常検知後のリアルタイムの意思決定を支援するかについて、事例を用いて紹介する。当社では既に複数のエンドユーザーの異常事例についてフィジビリティスタディ(FS)を行っており、MTSAはオペレータの意思決定に有益な情報を提示できることを確認している。本章で使用するデータは人工の模擬データではあるが、実現場で発生した異常のシナリオを基に作成している。

4.1 想定する異常ケース

使用する人工データのトレンドを図4-1(a)に示す。監視対象のプロセス変数は10個、同一の製造条件で20バッチ分の製造が行われたとし、1バッチの長さはおおよそ300~350分の間で一定していないという特徴を持つ。ここでは異常を含むテストデータとその5バッチ前までの正常データを示している。各変数名の命名規則はTag [インデックス]_[装置名]@[種別]とし、インデックスは各変数に対応する一意な番号、装置名は装置固有の名称を表し、各装置にはPV (計測値) もしくはSP (設定値) の種別が定義される。

想定する異常伝搬のシナリオ (以降、異常シナリオ) を図4-1(b)に示す。図中の番号①~④は異常発生に対応している。まず装置Dの変数(Tag6_D@PV)が正常時の値に到達せず(①)、その影響を受け装置Aの変数(Tag0_A@SP, Tag1_A@PV)の値が低下する(②)。そして装置C (Tag4_C@SP, Tag5_C@PV)の値がハンチングを起こし(③)、最後に装置Bの変数(Tag2_B@SP, Tag3_B@PV)が正常時より早く立ち下がってしまう(④)、という状況を表している。オペレータが異常を認知したタイミングは図4-1(b)中、▲で示した時点であり、①~④の時点では認知していない。

なお、オペレータは装置Aから装置Cへの異常伝搬(②→③)の伝搬が起ることを認識していない。これについては4.3節にて詳述する。

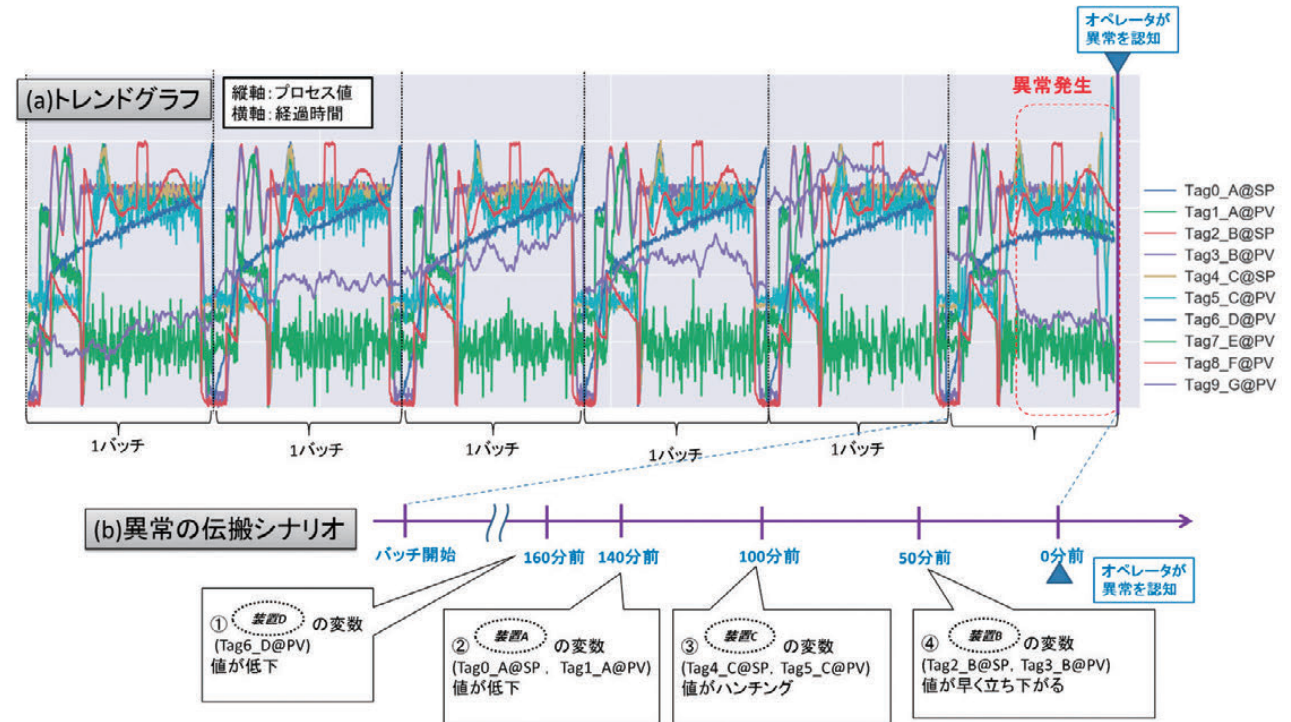


図4-1 人工データのトレンドグラフと異常の伝搬シナリオ

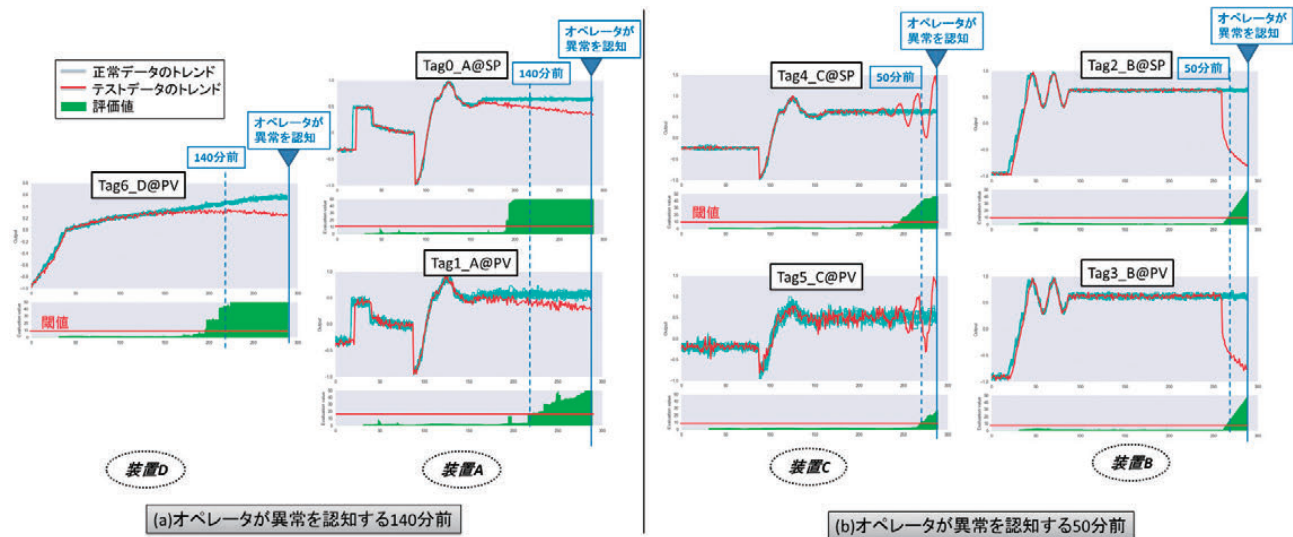


図4-2 MTSAによる異常検知結果

4.2 MTSA適用結果

本人工データに対しMTSAを適用し異常を検知した結果を図4-2に示す。また図4-3(a)に、MTSAで推定した変数の相関構造を示す。

図4-2(a)はオペレータが異常を認知する140分前において、評価値が閾値を超えている変数、すなわち異常と判断された変数を示している。人が気付く2時間以上も前に、前述した異常シナリオにおける①と②の異常、すなわち装

置D (Tag6_D@PV)、装置A (Tag0_A@SP, Tag1_A@PV)の異常を捉えていることが分かる。

図4-2(b)はオペレータが異常を認知する50分前において、(a)で検知した変数に加え、新たに異常と判断された変数を示している。異常シナリオにおける③と④の異常、すなわち装置C (Tag4_C@SP)、装置B (Tag2_B@SP, Tag3_B@PV)の異常を捉えていることが分かる。

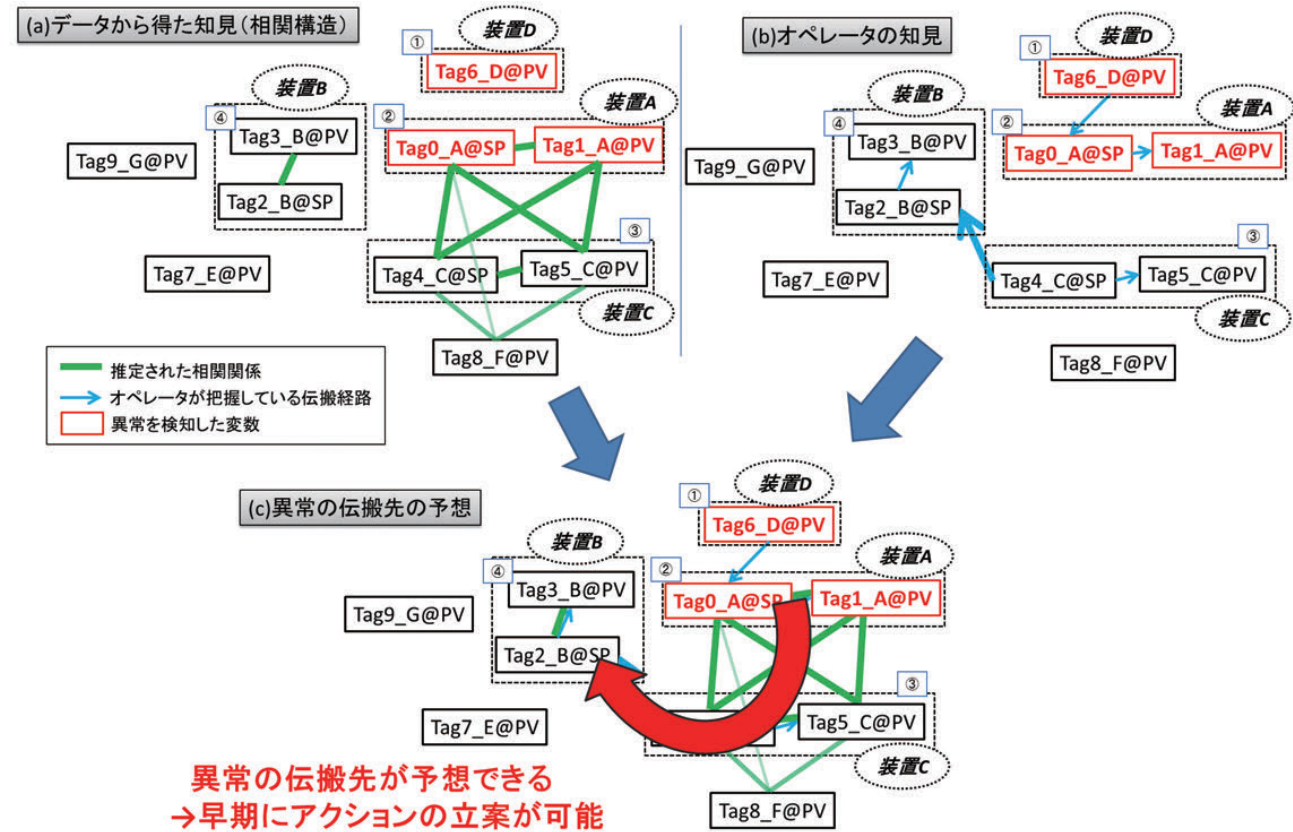


図4-3 異常の伝搬

4.3 異常の伝搬先の予測

本節ではオペレータが異常を認知する140分前に、MTSAを活用し異常の伝搬先を予測することで、オペレータの意思決定を支援する例について具体的に述べる(図4-3)。

異常を認知する140分前において、4.2節で述べたように、MTSAは装置D、装置Aの異常を検知している(図4-2(a))。異常を捉えた変数はわずか3つの変数のみであるが、推定された相関構造(図4-3(a))と、オペレータの知見(図4-3(b))を併用することで、異常の伝搬先を以下のように予想することができる。

まず推定した相関構造は、異常を検知した装置Aの変数(Tag0_A@SP, Tag1_A@PV)と装置Cの変数(Tag4_C@SP, Tag5_C@PV)との間に相関があることを示しており、装置Aから装置Cへの異常伝搬(②→③)の可能性を示唆している。この伝搬は4.1節で述べたようにオペレータの知見にはないが(図4-3(b))、推定した相関構造からオペレータは気づきを得ることができる。

次にオペレータの知見を用いると、装置C (Tag4_C@SP)の異常が装置B (Tag2_B@SP, Tag3_B@PV)へ伝搬することが分かる(③→④)。このように、データから得た知見、すなわち相関構造と、オペレータの知見を融合することで、現時点で検知されている装置D (Tag6_D@PV)の異常が、最終的に装置Bへ伝搬すると予想することができる。

仮に伝搬の結果、プロセスの緊急停止やオフスペック品製造等の特に重大性の高い事態の発生が予想される場合は、この時点で復帰アクションを立案することによりリスクを抑えることができる。一般に復帰アクション立案の際は異常原因の特定が必要となるが、MTSAでは個々の変数で異常を検知するため、検知した変数がそのまま原因の候補となる。この例では上述した3変数(Tag6_D@PV, Tag0_A@SP, Tag1_A@PV)が異常原因である可能性が高いといえる。

一方で異常を検知したものの、異常伝搬先が複数予想できるなど、伝搬先の予想が不確実な場合がある。仮に重大性の高い事態の発生リスクが予見されても、バックアップ設備への切替え等により即時対処が可能な場合は、不確実な状態での対処を保留したい場合もある。このような場合、異常が伝搬する間のプロセスデータを得ることで、予想をより確実なものとし判断に活かすことができる。本ケースではオペレータが異常を認知する50分前、MTSAは新たにTag4_C@SP, Tag5_C@PV, Tag2_B@SP, Tag3_B@PVの異常を検知しており(図4-2(b))、140分前の伝搬先の予想が妥当であったことが分かる。

以上のように、MTSAは異常検知だけでなく、異常の原因分析および発生しうる事態の予測をサポートする。これによりオペレータは、予測される事態と対処の難易度に基づき、リアルタイムにスマートな意思決定ができる。

5. MTSAを用いたシステム構成イメージ

本章では、開発中のバッチプロセス向け異常予兆検知システムの概要を述べる。本システムはビューア、サーバ、コンフィギュレータの3つのモジュールから構成される(図5-1)。

ビューアは監視対象プロセスの現在の状態および異常検知後の意思決定を支援する情報をオペレータに分かり易く伝えるためのグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)である。異常検知時にアラームを発報するほか、相関構造(図4-3(a))、個別変数のトレンドと異常評価値(図4-2)、検知順序を表示する機能を備える。図5-2にトレンドと評価値を表示する監視画面のイメージを示す。

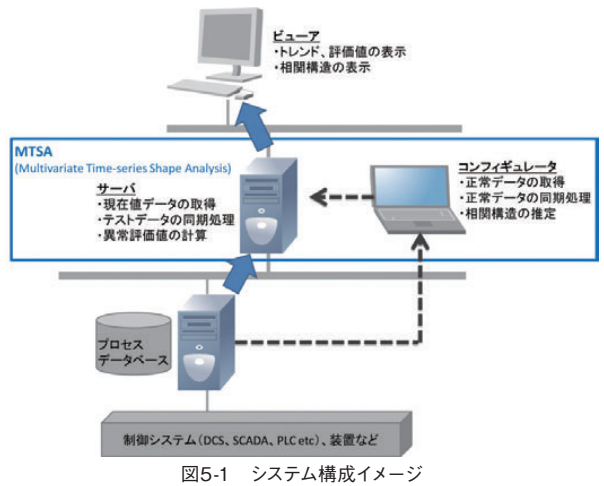


図5-1 システム構成イメージ

サーバはオンラインの異常検知を実施し、その結果をビューアへ転送する。プロセスデータベースから一定周期で各プロセス変数の現在値を取得し、テストデータと正常データの時間方向同期処理、異常評価値の算出および異常の有無の判定を行う。

コンフィギュレータはサーバに対し監視機能を定義するためのツールである。監視対象工程の正常データの取得と時間方向の同期処理、相関構造の推定を行い、サーバへアップする機能を備える。

6. おわりに

本稿ではバッチプロセス向けに新たに開発した異常検知手法MTSAについて述べた。本手法は異常の検知に加え、異常原因の分析や異常伝搬先の予測に役立つ情報を提示することで、検知後のオペレータの意思決定を支援できるという特長をもつ。

当社は既に複数のエンドユーザーのバッチプロセスにおける実際の異常事例において検証を重ねており、本手法の有効性を確認している。今後は、さらに多くの製造現場で手軽に活用して頂けるよう、ユーザビリティの向上に努めていく。多くの製造現場に採用頂いている連続プロセス向け異常予兆検知システムBiG EYESTM(13)に並び、バッチプロセスへの活用も検討頂けたら幸いである。

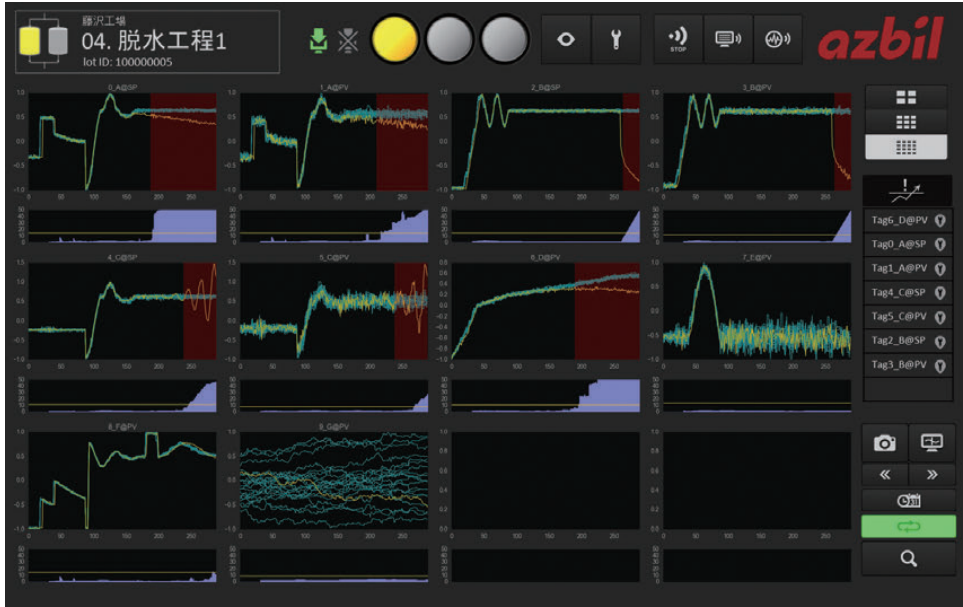


図5-2 ビューア監視画面イメージ（※開発中につき将来変更される可能性があります）

＜参考文献＞

- (1) 経済産業省 商務流通保安グループ, IoT・ビッグデータなどを活用した産業保安のスマート化, 第6回産業構造審議会保安分科会, 資料2-1, 2016年4月
- (2) 経済産業省保安課, スマート保安先行事例集 ～安全性と収益性の両立に向けて～, 2017年4月
- (3) 井手 剛, 入門 機械学習による異常検知, コロナ社, 2015, p.159
- (4) Michael A. B. and Gregory K. M. New Directions In Bioprocess Modeling and Control, International Society of Automation, 2007, p.247
- (5) 渋谷 久恵, 前田 俊二, 二次元分布密度に基づく設備の異常関連センサ特定技術, 電気学会論文誌C, Vol. 135, No.6, 2015, pp.611-618
- (6) Sakoe H., Chiba S., Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 26, 1978, pp.43-49
- (7) Cenk Ündey, Bruce A. W. and Ali Çinar, Monitoring of Batch Pharmaceutical Fermentations: Data Synchronization, Landmark Alignment, and Real-time Monitoring, 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002
- (8) A. Kassidas, Fault Detection and Diagnosis in Dynamic Multivariable Chemical Processes using Speech Recognition Methods, PhD thesis, McMaster University, 1997
- (9) 船津公人, 金子弘昌, ソフトセンサー入門, コロナ社, 2014年, p.5
- (10) Silverman, B. W., Density estimation for statistics and data analysis, Monographs on Statistics and Applied Probability, Chapman & Hall, 1986
- (11) 基礎統計学I 統計学入門, 東京大学出版会, 1991年
- (12) J. Friedman, T. Hastie and R. Tibshirani, Sparse

inverse covariance estimation with the graphical lasso, Biostatistics, 2007

(13) 木村 大作, 山縣 謙一, IoT時代のスマート設備管理を目指す操業ビッグデータを活用したオンライン異常予兆検知システムの開発, azbil Technical Review, 2016年4月号, pp. 9-15

＜商標＞

BiG EYESは、アズビル株式会社の商標です。

＜著者所属＞

鈴木 毅洋 アズビル株式会社
ITソリューション本部ITソリューション開発部

西口 純也 アズビル株式会社
ITソリューション本部ITソリューション開発部

都市ガス事業者の地震対策を支援するガバナ監視システムの開発

Development of a Governor Monitoring System to Support Earthquake Countermeasures by the City Gas Companies

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

蒔田 浩子
Hiroko Makita

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

喜多井 剛志
Tsuyoshi Kitai

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

小泉 芳範
Yoshinori Koizumi

キーワード
遠隔監視, ガバナ

IoT (Internet of Things) という言葉が今は一般的になり、ガス事業者は震災のたびに浮き彫りになる課題に向け、遠隔監視システムの機能強化が求められている。そこで、震災時においても強力に支援できる機能を備え、かつシステム導入を容易にしたガバナ監視システム (GMS) を開発した。

The term IoT (Internet of Things) is now common, and gas companies are required to strengthen the functions of remote monitoring systems in order to solve the problems that emerge in every time when the earthquake disaster may occur. Therefore, we developed a governor monitoring system (GMS) that has a function that can strongly support even in the occurrence of the earthquake and that the system may be introduced easily.

1. はじめに

都市ガス事業では、全長数万kmにも及ぶ配管網を安全かつ安定した供給設備として効率的に維持するために、1990年代から公共回線を利用した遠隔監視を実施してきた。

しかし、ICT (Information and Communication Technology) やIoT (Internet of Things) という言葉が一般的となった現在において、遠隔監視は監視だけに留まらず、震災のたびに浮き彫りになる課題解決のための機能が求められている。

中小ガス事業者を中心とした一部のガス事業者においては、課題を解決するためのシステム導入費用、時間などが導入の障壁となることが多い。

本稿では、これらの課題を解決するために開発したガバナ監視システム (以下GMS) を紹介する。

2. ガバナ監視システム (GMS)

まずは、GMSについて説明する。

都市ガスは、ガスの製造拠点でつくられた高圧で送り出されたガスを中圧にし、工場や大型施設などに届けられる。さらに、中圧のガスを減圧し、低圧ガスが各家庭に届けられる。この一連の流れを示したものが図1である。

ガバナ設備は、ガスの圧力を中圧から低圧に減圧する変圧器およびそれに付帯するセンサなどで構成される。そして、この設備を遠隔地で監視するシステムがGMSである。GMSは、図2に示すとおり、ガス供給指令センターなどの監視室に設定されたセンター側PC (サーバ機能+GUI機能) と、地区ガバナ側に設置された伝送装置盤 (以下、子局という) から構成される。

センターと子局間は株式会社NTTドコモの閉域網回線

び局追加／変更に伴うタグ作成や画面作成にかなりのエンジニアリング工数がかかることが課題であった。

本システムでは、必要な機能を標準パッケージ化し、市販の表計算ソフトを使って効率的にエンジニアリングできるツールまでを用意した。このツールはほぼすべての機能をコンフィグレーションできるようになっており、中小規模のガス事業者が監視する子局30～40局を約1日で設定可能とし、工事等とのスケジュールに併せて柔軟に使用できる。コンフィグレーションと一覧表示パーツの例は、図8に示すとおりである。

NAME	C2	C3	C4	姓名	中庄(MPa)	中庄(MPa)	中庄(MPa)
别名	中庄(MPa)	中庄(MPa)	中庄(MPa)				
100	72	72	72	東京	0.432		1.444
	0B	0B	0B	兵庫県	0.442		2.499
	P01 PV	P03 PV	P03 PV	静岡県	0.427		2.492
\$LNAME	P01 PV	P03 PV	P03 PV	滋賀県	0.478		2.476
\$LNAME	P01 PV	P03 PV	P03 PV	山梨県	0.459		2.493
\$LNAME	P01 PV	P03 PV	P03 PV	富山県			
\$LNAME	P01 PV	P03 PV	P03 PV	石川県	0.464	0.228	
\$LNAME	P01 PV	P02 PV	P02 PV	福井県	0.461	0.228	
\$LNAME	P01 PV	P02 PV	P02 PV	岐阜県	0.425		2.450
\$LNAME	P01 PV	P03 PV	P03 PV				

図8 表示用コンフィグレーションと一覧表示パーツ

また、画面用に図9で示す局単位の各種表示パーツを用意しており、テレメータ通信情報や入出力データ定義後にパーツをドラッグ&ドロップすれば画面が出来上がる。表示位置は表示ウィンドウ内の縦横比率(%)で管理しているので、画面サイズ変更／解像度の違いにも対応できる。

G001 東京		
測定時刻	2017/12/04 13:02:20	
項目[単位]	測定値	ステータス
中圧A[MPa]	0.452	正常
低圧B[kPa]	1.444	下限界警報
合成加速度[Gal]	0	正常
SV値[kine]	0.0	正常

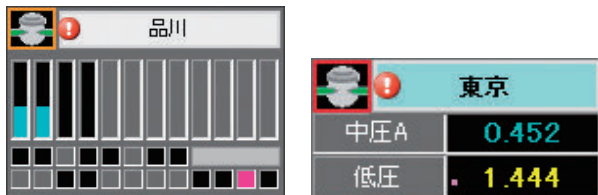


図9 各種表示パーツ

なお、表示色などは都市ガス事業者ごとに好みやポリシーがあるため、図10で示すコンフィグレーション専用画面をエンドユーザーに提供する。また、通知先のメールアドレスもここで設定する。



図10 エンドユーザー向け設定ツール

6. おわりに

GMSは、震災時において強力な支援機能を備えるとともに、パッケージ化することで容易な導入を可能とした。

今後は、設備管理を効率化したいという要望を、過去の運転データを用いた機械学習による供給配管網の異常検知等で実現し、自らの状態や状況を伝え、人に行動を促す関係へと進化させたい。

さらに、これまでの知見、技術を洗練することで、進化した人と機械との協調による安全かつ効率的な製品、サービスを提供し、課題解決に貢献していきたい。

<商標>

DoPaは株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモの登録商標です。
FOMAは株式会社NTTドコモの登録商標です。
Ethernetは米国ゼロックス社の登録商標です。
Harmonas-DEOはアズビル株式会社の登録商標です。

<著者所属>

蒔田 浩子 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
エンジニアリング本部ソリューション技術部

喜多井 剛志 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
SSマーケティング部

小泉 芳範 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
エンジニアリング本部PAソリューション部

快適空間計測制御技術

居住者に「快適」を提供する 温冷感リクエスト型空調の開発

A New Environmental Control System Responsive to the Preferences of All Building Occupants

アズビル株式会社 ITソリューション本部	大曲 康仁 Yasuhito Omagari	アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	水高 淳 Jun Mizutaka
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	太宰 龍太 Ryota Dazai	アズビル株式会社 ITソリューション本部	伊藤 卓 Suguru Ito

キーワード
快適性, 温冷感リクエスト

居住者の環境満足度の向上のために、居住者からの「暑い(涼しくしてほしい)」「寒い(暖かくしてほしい)」といった温冷感リクエストに対応して室温設定値を適切に変更する空調システムを開発した。システムを実建物に導入し、居住者のリクエスト履歴を解析するとともに、アンケートを実施した。アンケート結果では90%以上の居住者から、このような空調方式に違和感はないとの回答を得た。また、「暑い」「寒い」という相反するリクエストが、30分以内に発生する頻度は少なく、リクエストに対して後優先で対応する方式が居住者に受け入れられると判断する。

We have created an indoor environment control system that can collect the temperature preferences of every person in the environment and modify the HVAC settings appropriately. In this paper we describe the installation of the system in an office building, analyze occupants' use of it, and present the results of questionnaires. Over 90 % of occupants found this system of air conditioning to be acceptable. Since the number of conflicting temperature requests (I'm hot: AC please! / I'm cold: heat please!) by an occupant within 30 minutes of an initial request was very small, we conclude that the occupants accepted our method of responding to temperature preferences.

1. はじめに

環境満足度は、オフィスで働く人(以下、オフィス居住者)の生産性に影響を及ぼす。環境に対する満足度が高いほど、作業成績が高く疲労が少ない。また、同じ温熱環境でも自ら調整した環境の方が(環境選択権がある方が)満足度が高いという結果が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。ただし、環境満足度を向上させるために温度設定値を居住者に開放すると、個人的な感情により極端に低い温度に設定されてしまうなどして適切な設定にならず、ほかの居住者の不満足やエネルギーの浪費につながる可能性もある。

これらの課題を解決するため、居住者が好みの室温を設定する代わりに、「暑い」「寒い」といった今の温冷感をリクエストできるようにする。そして、空調システム側で、その温冷感ニーズを満たすような設定温度を決定し、制御する温冷感リクエスト空調（以下、温冷感空調）を開発した。

2. システムの概要

はじめに、システム構成とシステムの基本的な動作を説明する。

2.1 システム構成

システムは、当社で従来から提供しているクラウド型のテナントサービス機能上で実現している。入力手段としてカード型の専用端末を試行開発した。

2.1.1 クラウド型テナントサービス

クラウド型のテナントサービスは、空調の温度設定やスケジュール予約をWeb画面から投入する機能を持つ。そこで、温冷感空調システムは、温度設定機能に代わる入力方式として、温冷感をリクエストする機能を選択できる。つまり、居住者はWeb画面(図1)で、従来の温度設定の代わり

に、「暑い(涼しくしてほしい)」「寒い(暖かくしてほしい)」というリクエストを入力する。

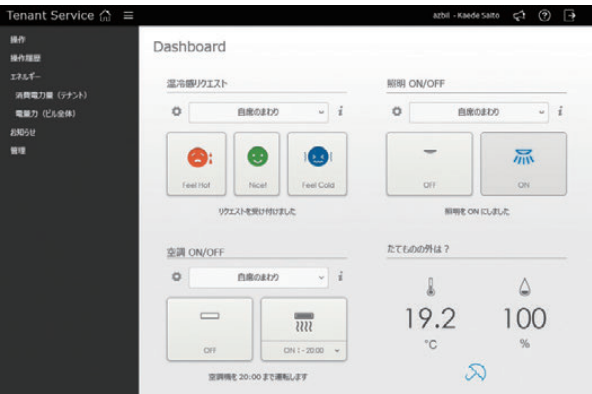


図1 テナントサービス機能のダッシュボード

クラウド型では、リクエストに対応するための演算をするサーバーをクラウド上に配置する(図2)。入力端末としては、通常のPC用のほか、スマートフォンも想定しており、専用画面も用意している(図3)。

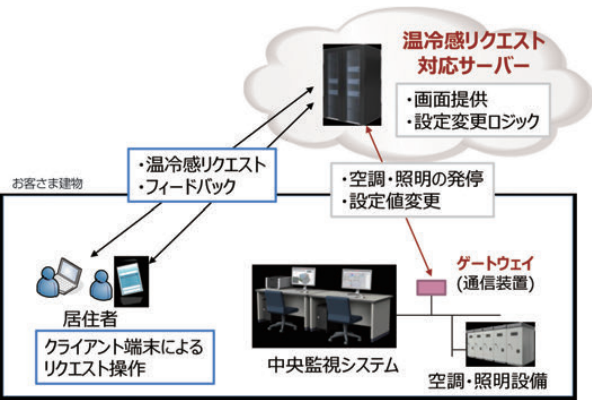


図2 クラウド型システム構成

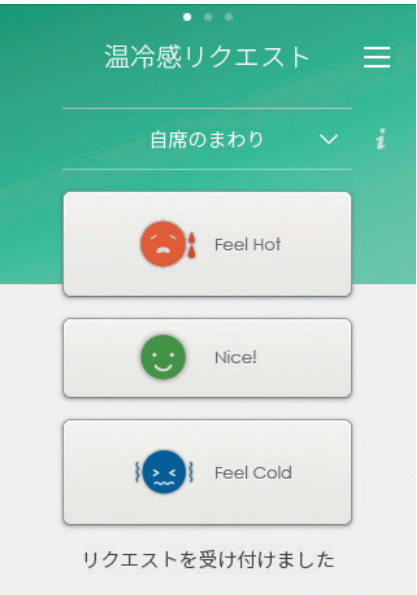


図3 スマートフォン用の画面イメージ

2.1.2 カード型専用端末を用いたシステム

PC、スマートフォンの場合、ブラウザの起動とログインも含め、自分の場所を選択してリクエストボタンを押すまでの操作が煩雑になる。自分の場所を登録する機能を付けるなどで、ある程度の短縮は可能だが、セキュリティの観点からログイン操作が省略できないなど限界がある。そこで、思ったら即座にボタンを押せるカード型の専用端末を試行開発した(図4)。専用端末は、BLE^{注1}という通信方式を利用し受信機を通じてリクエストを伝達する。個人が社員証などと一緒にカードケースに入れて持ち運べることを想定し、クレジットカード等の一般のカードサイズよりも小さく(70mm×35mm 厚さ3.3mm)した。また、直感的に操作しやすいようにデザインを工夫している。カード型システムでは、受信機と空調機を対にしておく。リクエストがあったときには受信強度の最も強い受信機に対応する空調機の設定を変更するようにする。こうすることで、居住者は空調機の位置を意識することなく、最も近い空調機に温冷感をリクエストできる。

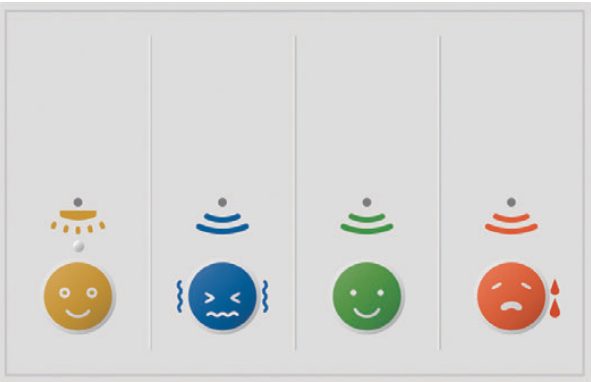


図4 カード型の専用端末

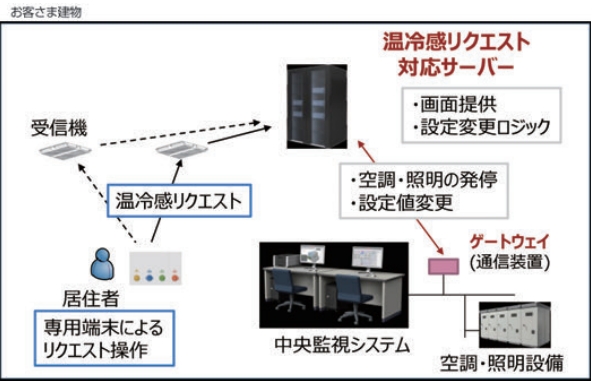


図5 専用端末対応時のシステム構成

このシステムの場合、受信機を現地の天井に設置する必要がある。そのため図5に示すように、受信信号の処理も含めて、ロジック演算用のサーバーはお客さまの建物内に設置する。結果の可視化、設定画面のユーザーへの展開が必要な場合には、クラウドシステムとデータやり取りする。お客さまのリクエスト方法への要望に応じて提供するシステムを変更する。

注1 BLE (Bluetooth® Low Energy): Bluetoothと比較して、省電力かつ省コストで通信や実装を行うことを意図して設計された通信方式

2.2 温冷感リクエスト対応空調制御

2.2.1 リクエストへの対応動作

「暑い」リクエストを受けた際の、設定値の変更方法の例を図6に示す。リクエスト受付後、室温設定値を下げる際、一時的に設定値を大幅に下げた(図中①)後に所定の設定値とする(図中③)。設定値を大幅に変更し、風を最大限に増やすことで、居住者のリクエストにより早く反応することを狙っている。

複数の人が「暑い」「寒い」の相反するリクエストを出した場合は、最後のリクエストを優先する後優先方式をとっている。一定時間の多数決をとる方式も考えられるが、その場合、即応性が悪くなってしまう。また、本システムを適応するVAV空調方式の場合、局所的に極端な温度の温風・冷風が当たる可能性がないため、同じ空調エリア内では、相反するリクエストが同時に発生する可能性が低いと考えられる。そのため、即応性を優先し、後優先方式を採用した。

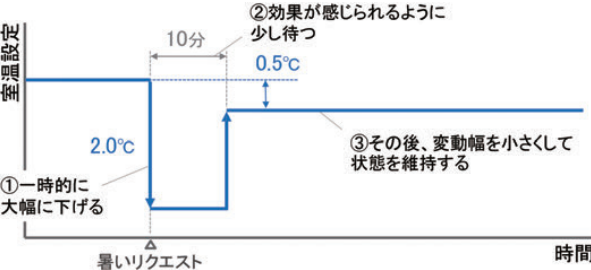


図6 暑いリクエストに対するシステムの挙動

2.2.2 リクエスト内容の判別

食事後や、外出先からの帰社後は、代謝量が上がっており一時的に暑く感じる人が多い。その人・その時間固有の「暑い」というリクエストに応じて設定値を下げたのち、そのまま放置され、代謝量が落ちたときに寒くなってしまうということも起こりがちである。そこで、そのリクエストを一時的なものか、恒久的なものかを判別し、一時的なリクエストである場合には、設定値を一定時間経過後に元に戻す機能を持たせている。一時的／恒久的の判別方法としては、環境情報による判別方法、時間帯による判別方法を用意している。これらの2つの方法は組み合わせて利用できる。

環境情報による判別法の簡易的な例を図7に示す。実際には不快指数や体感温度で判別するが、この例では説明を分かりやすくするために、温度による判別方法で説明する。まずは判別に利用する「判別温度」をあらかじめ設定しておく。暑い(室温が判別温度よりも高い)環境で「暑い」という要求が来た場合には、恒久的なリクエストであると判別する。逆に、既に涼しい(室温が低い)環境で「暑い」という要求がきた場合、その要求はその人固有の要求であり一時的なリクエストであると判別する。

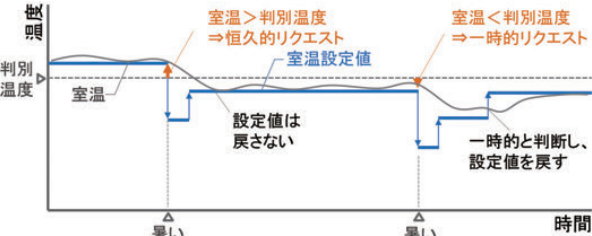


図7 環境情報による一時／恒久リクエストの判別

時間帯による判別法の例を図8に示す。出勤直後や昼食後など、人の行動により代謝量が一時的に変化している時間帯のリクエストを一時的なリクエストであると判別する。一時判別時間帯は、建物ごとに管理者が設定することを想定している。

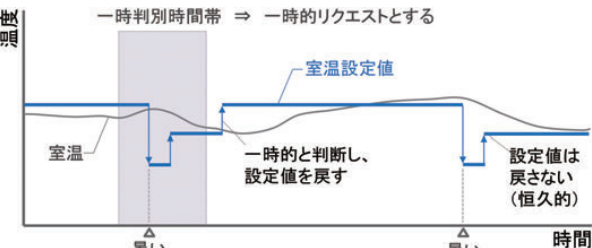


図8 時間帯による一時／恒久リクエストの判別

3. 評価運用

2015年8月から当社藤沢テクノセンター第100建物(居住者数約1000名)にシステムを導入し、評価運用を継続している。利用者のリクエスト結果や、実施したアンケート結果を元に考察する。



図9 建物外観

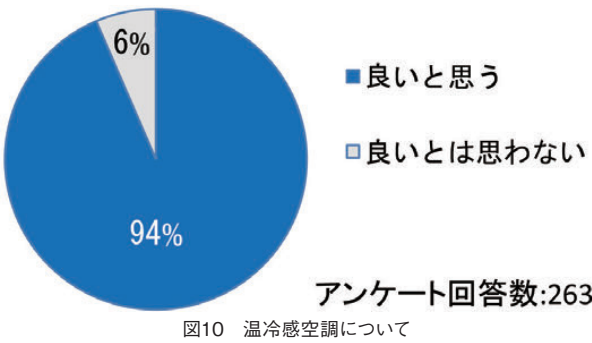
表1 建物概要

建物	アズビル(株)藤沢テクノセンター第100建物
用途	事務所ビル
建築面積	2,810m ²
延床面積	17,918m ²
対象人数	約1000人(カードシステムは4階のみ約200名)
空調方式	VAV ^{注2} 式セントラル空調 1フロアあたり、約2000m ² 、空調機4台、 VAVゾーン16箇所

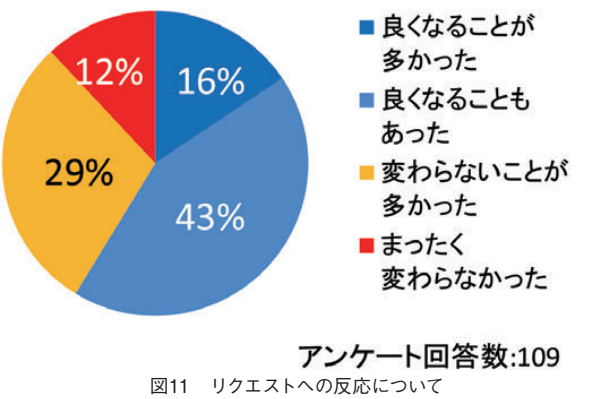
注2 VAV (Variable Air Volume): 可変風量制御。ゾーンごとに風量を変更して室内温度を制御する空調方式

3.1 居住者の反応

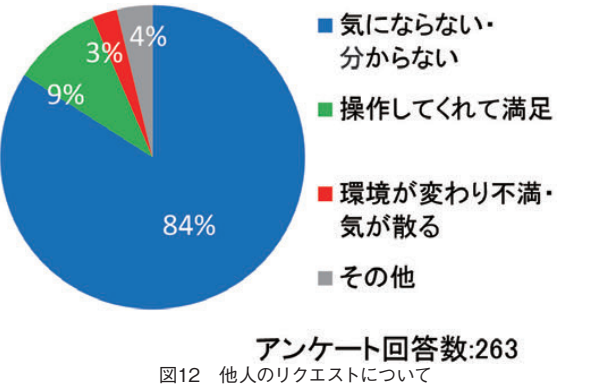
居住者へのアンケート結果の解析結果を示す。まず、温冷感をリクエストする空調システムが、従来と比較して良いかどうかを尋ねた結果を図10に示す。結果として、94%の人が良いと回答した。理由としては、「肌で感じる感覚で操作できるのは良い」「暑さ寒さの感じ方は人それぞれなので、自分の感覚を主張することは妥当だと思う」という回答があった。本システムのように温冷感により制御する方法は居住者に受け入れられるといえる。



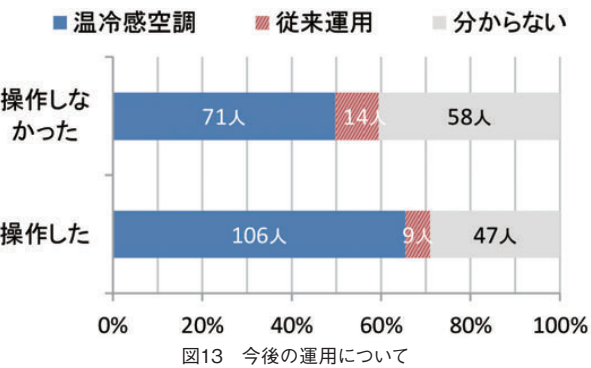
リクエストをしたことがある人を対象に、リクエストした後にリクエストどおりにシステムが反応し、環境が改善したかどうか尋ねた。結果を図11に示す。59%の人が改善することがあったと回答している。一方で、全く効果がないと回答した人も12%いる。リクエストに応じて設定値を変えるシステムなので、空調システムが既に最大能力で運転している場合など、改善しないこともある。システムがどのように反応したのかをフィードバックできることが望ましい。



また、ほかの居住者のリクエストに対する反応をどう感じるかについて尋ねた結果(図12)、「気にならない・分からない」が84%と最も多く、「代わりに操作してくれて満足している」の9%と合わせると、ほかの人のリクエストによる設定変更を気にしないという意見が90%以上の結果となった。ほかの人の操作に不満の人は3%と少なく、実際に操作をしない人にも抵抗感なく許容されていることが分かった。

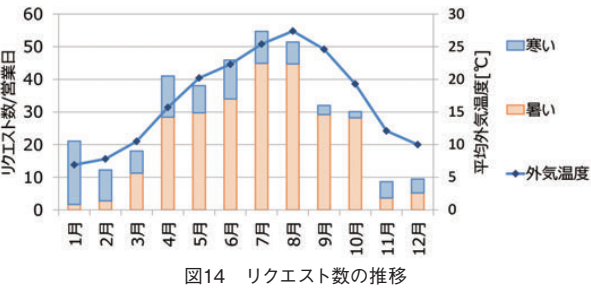


最後に、今後の運用として、温冷感空調方式と従来からの運用方式(壁の設定器により設定値を変更する方式)とのどちらが望ましいかを居住者に聞いた。全体では温冷感空調を望む人は58%と、従来の運用を望む人の8%より大幅に多い結果であった。操作したことのある人となない人に分けて、集計した結果を図13に示す。操作をしたことがある人では65%の人が、操作をしたことがない人でも50%の人が温冷感空調システムを肯定的に考えている。「人の体感で制御できる」ことや、「自席で操作できること」が好感を得ていた。

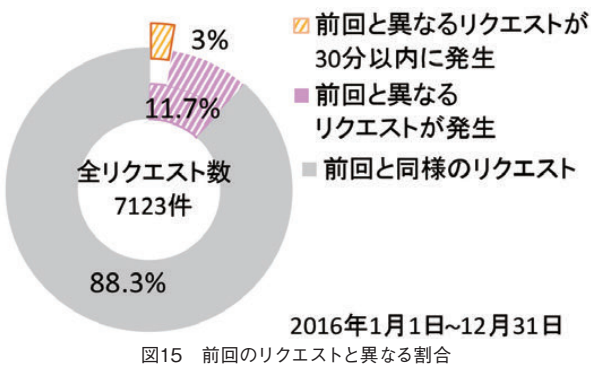


3.2 リクエストの傾向

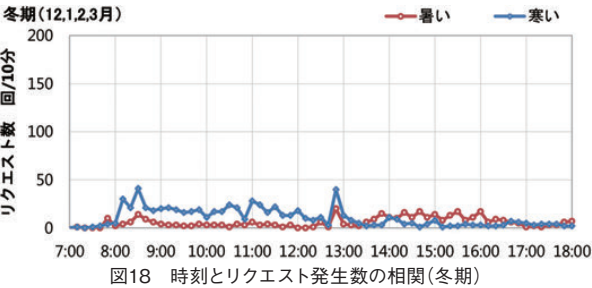
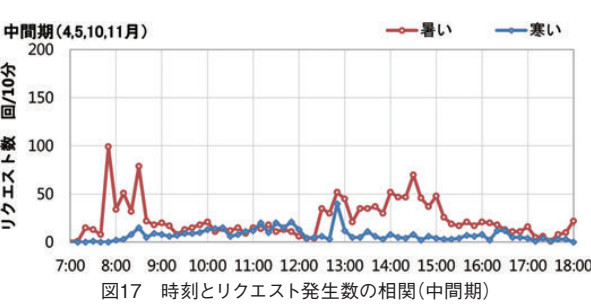
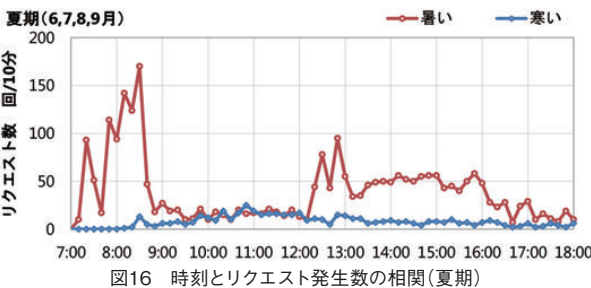
居住者からのリクエスト状況を確認する。図14にリクエスト種別(暑い・寒い)に分けて月ごとのリクエスト数および、平均外気温度を示す。なお、カードシステムを導入した4階の結果のみを表示している。外気温度が高い夏期にリクエスト数が増える傾向がある。また、全体的に、「暑い」というリクエストが多い傾向が確認できる。「暑い」場合よりも「寒い」場合の方が、着衣など各自の調整で対応しやすいため、居住者の温冷感許容範囲にも違いがあるためと考える。



リクエストに対する設定値変更は、最後のリクエスト内容に反応する後優先方式を採用している。そのため、各居住者の感じ方の違いにより「暑い」「寒い」が同時に発生すると、設定値変更が居住者の希望どおりに変化しない。そこで、「暑い」「寒い」というリクエストが、同時に発生する頻度を調査した。そのために図15のように、同一の空調エリアで前回とリクエスト内容(「暑い」「寒い」)が異なったリクエストの割合を用いて評価した。全体のリクエストのなかで、88%以上が前回と同様のリクエストであり、30分以内に前回と異なるリクエストが発生した割合は3%にとどまっている。よって、VAV空調方式では短時間で相反するリクエストが発生する可能性が低く、後優先方式でも居住者の希望に反することはまれであるといえる。



リクエストに応じて設定値を適切に変更するシステムではあるが、システムがリクエストの傾向を把握し、リクエストが発生する前に適切な環境をつくり出せれば、居住者により適切な環境を提供できる。そこで、リクエストの発生傾向を解析するために、夏期(6月～9月)・中間期(4月、5月、10月、11月)・冬期(12月～3月)ごとに、時刻とリクエスト数の相関を確認した。結果を図16～図18に示す。なお、本建物では勤務開始時間は8:30であり、昼食は12:00～12:45である。駅から徒歩15分の場所にあり、歩いて通勤する人も多い。



夏期は、出勤後時間帯7:30～8:30頃および、昼食後の時間帯に、「暑い」リクエストが多いことが確認できる。中間期は夏期ほどではないが、同様に出勤後と昼食後15:00までのリクエストが増えている。よって代謝が上がっている出勤後と昼食後の室温を低めに設定しておくことは居住者の快適性向上につながると考えられる。冬期は、リクエスト数は少なくなるが、午前中「寒い」リクエストが多く、14:00頃になると逆に「暑い」リクエストが多くなる。午前中に室温を高くしすぎない方がよい。

ここではフロア全体の傾向をまとめて示したが、系統ごとに傾向が異なることも確認している。居住者にとってより快適となる空間をつくり出すために、場所による温度のムラや外気温度の違い等の要因を考慮した、系統ごとの制御手法の提供に取組んでいく予定である。

4. おわりに

環境満足度の向上のために考案した温冷感空調システムを実建物に適用し、居住者の反応を確認した。アンケート結果では94%の居住者から、このような空調方式に違和感はないとの回答を得た。実際の操作をした／しないにかかわらず、従来運用よりも温冷感空調システムでの運用を望む居住者が多数を占めた。

また、「暑い」「寒い」という相反するリクエストが、30分以内に発生する頻度は少なく、ほかの居住者のリクエスト操作に対し「気にならない・分からない」「代わりに操作してくれて満足している」が高い水準であることから、リクエストに対して後優先で対応する方式が居住者に受け入れられると判断する。

今後は、リクエスト結果を居住者や管理者へフィードバックする仕組みを構築するとともに、リクエスト傾向を学習しリクエストに先立って快適な環境を提供する仕組みを開発していく。1年間の運用結果から、夏期・中間期には朝の出勤後や昼食後に、また冬期は午後から「暑い」リクエストが増加する傾向があることを確認した。

今回開発した温冷感空調は、居住者からの反応も良く、居住者の快適性向上に貢献するものと確信している。これからもグループ理念である「人を中心としたオートメーション」の下、建物の居住者の快適性向上に貢献する製品を開発していきたい。

＜参考文献＞

- (1)川口 玄 他:室内環境における知的生産性評価
(その8)採涼手法の導入による温熱環境満足度の向上が知的生産性に与える影響, 空気調和・衛生工学会 学術講演論文集, 2008, 2015-2018
- (2)野部達夫:快適と省エネの両立を目指して, NEDO, ZEB・ZEHの最新動向の調査分析ならびに普及に向けた取り組みに関する検討(成果報告会)
http://www.nedo.go.jp/content/100528958.pdf
- (3)空気調和・衛生工学会 温熱環境委員会 我慢をしない省エネへ –夏季オフィスの冷房に関する提言– 報告書, 2014

＜著者所属＞

- 大曲 康仁 ITソリューション本部ITソリューション開発部
水高 淳 ビルシステムカンパニー
ワークスペースソリューション部
太宰 龍太 ビルシステムカンパニー マーケティング本部
プロダクトマーケティング部
伊藤 卓 ITソリューション本部ITソリューション開発部

熱伝導率の温度特性を利用した天然ガス計測技術の開発

Natural Gas Measurement Using Temperature-Dependent Thermal Conductivity

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

濱口 竜一
Ryuichi Hamaguchi

キーワード

天然ガス, LNG, 発熱量, メタン価, カロリーメータ

近年, 供給形態の多様化や環境保護への関心の高まりからエネルギーとしての天然ガスが注目されており, 天然ガスやLNGの組成変動とそれに伴う発熱量などの各種指標を計測するニーズが高まっている。それらの要求に応えるべく天然ガス熱量計GasCVDTMを開発した。GasCVDは発熱量のほかにもウォッベ指数, メタン価, 密度などを出力することが可能であり, それぞれに対応した機種を用意している。

本稿ではGasCVDで採用している熱伝導率の温度特性を利用した天然ガス計測技術について紹介する。

Natural gas has drawn attention in recent years due to the increasing diversification of the energy supply and interest in preserving the environment. As a result, there is a growing need to determine the composition and calorific value of natural gas and LNG. To meet this need, we have developed a natural gas calorimeter, GasCVDTM, which can output a fuel's Wobbe index, methane number, density, etc., as well as its calorific value. We offer different models depending on the type of output required. In this paper we describe the natural gas measurement technology adopted for GasCVD, temperature-dependent thermal conductivity.

1. はじめに

1.1 天然ガス市場の動向

現在, 世界的に天然ガスの需要が高まっており, 天然ガスを燃料とする発電所やガスエンジンなども増えてきている。一方で, 天然ガスはメタンを主成分として, エタン, プロパン, ブタンなどの炭化水素と, 窒素や二酸化炭素などの不燃成分からなる混合ガスであり, その産地により組成が大きく異なる。またLNGにおけるボイルオフガス混入の例のように, 使用する際にガスの性状が変動することが少なくない。このため, 燃焼機器や燃料機関の高効率化を考慮すると, リアルタイムでのガス組成の変動とそれに伴う各種指標(発熱量, ウォッベ指数^{注1}, メタン価^{注2}など)を把握することが必要となってきた。

1.2 天然ガス計測における課題

従来からある熱伝導式や振動式密度計測のカロリーメータは不燃成分が誤差要因となるため, 窒素や二酸化炭素を含む混合ガスには対応し難い。また, 周囲温度や圧力の変動も誤差要因であり性能に影響を与える。

ガス事業者では, 主にガスクロマトグラフィーが使われており, こちらは不燃成分を含む混合ガスであっても高精度の計測が可能であるが, 分析時間に数分を要しリアルタイムのモニタリングには対応できない。また, キャリアガス(ヘリウムガス)を用意する必要があることや高価なことなどの理由で普及は一部に限られている。

近年では, 熱伝導率や密度など複数の物性値の組合せと発熱量との相関を利用した製品も市場に出回り始めているが, いずれもセンサを複数必要とし比較的高価なため普及が進み難い面がある。

注1 ウォッベ指数とは, 燃焼器のノズルから噴出するガスの入熱量を示す指数。ガスの単位体積当たりの総発熱量を空気に対する比重の平方根で除した値である。

注2 メタン価とは, ガスエンジンのノッキングに対する抵抗性を示す指数。ガソリンエンジンでのオクタン価のようなものであり, 数値が小さいほどノッキングが発生しやすい。算出法に関しては, 経験則を基に複数の方式が提案されており, GasCVDではCEN規格とCARBIに対応している。

1.3 GasCVDの特長

GasCVDは、出力更新周期2秒の高速応答で天然ガスの発熱量などを計測するフィールド機器である。

天然ガスを構成する成分ごとに、熱伝導率の温度特性が異なる点に着目し、MEMS熱式センサの計測部位を5段階の温度に高速で変化させて、その時のセンサ信号から相関法で出力値として発熱量やメタン価を算出する。

センサ信号の処理には、当社独自に工夫したサポートベクトル回帰を応用した特性式を使用している。

この多点温度の熱伝導率を利用する新たな手法を採用することで、不燃成分を含む混合ガスの測定が可能となり、またセンサ1個の使用で電気回路や演算処理がシンプルで済むことから低コスト化も実現している。

2. ガスの熱伝導率の測定

ここでは、MEMS熱式センサの構造とその駆動方法、気体の熱伝導率の測定方法について述べる。

2.1 MEMS熱式センサの構造

GasCVDには、当社で開発製造しているMEMS熱式センサを使用している。

図1にセンサの構造図を示す。

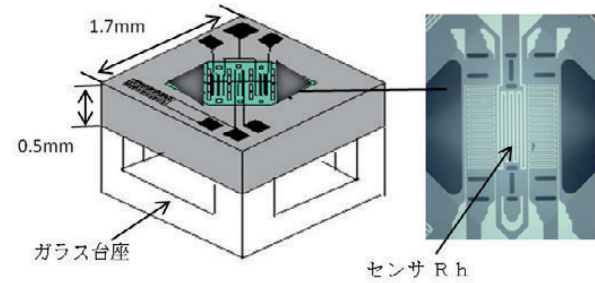


図1 MEMS熱式センサの構造

センサは、シリコンチップ上で橋状の窒化シリコン薄膜を空中に保持した構造となっている。窒化シリコン膜は厚さが1μmと薄く、膜の中央部に白金蒸着膜で形成したセンサRhを設けてある。

膜厚が薄いので駆動電圧を変化させても数十ミリ秒の短時間で温度が安定する。また、センサの形状が大きいとガス密度の違いによって自然対流が発生し計測誤差の要因となるが、センサRhの面積は約100μm×300μmと発熱面積が非常に小さいことから自然対流の発生を抑えることができる。

2.2 センサの駆動方法

図2に、回路構成とセンサを駆動するタイミングを示す。5段階の電圧が時系列的に切り替えられて、センサRhの発熱温度が変わるようになっている。この時のセンサ出力電圧をAD変換してセンサ信号とする。

CPUは回帰式を使用して発熱量などの出力値に変換し、DA変換(DAC)を通じてアナログ電圧で出力する。

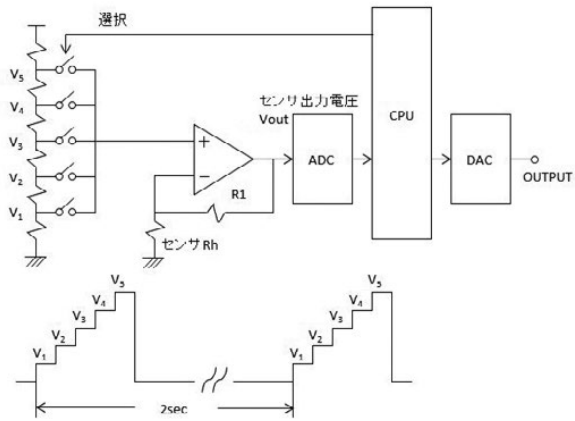


図2 センサ信号処理回路とタイミングチャート

2.3 熱伝導率と放熱係数の関係

センサ出力電圧Voutから、センサに印加する電力と温度上昇の関係を示す放熱係数を求めることができる⁽¹⁾。放熱係数Cは、次式で表される。

$$C = \frac{Ph}{(Th - T_0)} \quad (\mu W/^{\circ}C) \quad \text{式(1)}$$

Ph: センサに印加する電力 (μW)
Th: センサの温度 (°C)
T₀: 周囲温度 (°C)

放熱係数はセンサからガスに熱が放散される程度を表しており、ガスの熱伝導率によって変化する。

図3は組成の異なる23種類の混合ガスについて、実際に測定したセンサの放熱係数と組成から計算して求めた熱伝導率との関係である。放熱係数と熱伝導率は良い相関を示しており、センサ出力から熱伝導率が計測できることが分かる。

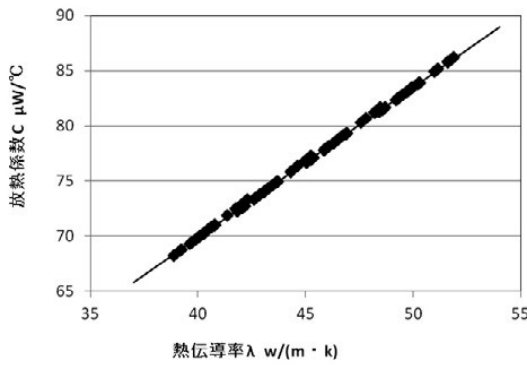


図3 放熱係数と熱伝導率の相関

以上の原理を利用して、センサの発熱温度を5段階に切り替えることで混合ガスの5つの異なる温度の熱伝導率を測定し、そのセンサ信号を入力値として、後述する特性式(サポートベクトル回帰式)によって出力値(発熱量など)を演算する。

3. センサ信号から出力値への変換

本節では、センサ信号から出力値を演算するために必要な特性式の同定手法と個々の製品ごとに適用するためのキャラクタリゼーションについて述べる。

3.1 天然ガス組成からの熱伝導率の算出

天然ガスの熱伝導率は、Lindsay-Bromleyの近似式⁽²⁾で求めた各成分の結合係数を使ってWassiljewa式⁽²⁾から算出している。これらは実験式であり近似誤差を持つが、図3に示すように放熱係数の実測値とよく一致する⁽¹⁾。

3.2 天然ガス組成からのセンサ出力の推定

図2に示す回路図で、センサに印加する電圧がV1の時、センサに印加される電力Phは式(1)から放熱係数Cとセンサ温度Thで表される。

$$Ph = V_1^2 / Rh = C (Th - T_0) \quad \text{式(2)}$$

Rh: センサ抵抗(Ω)

また、センサ抵抗Rhは次式で表わせる。

$$Rh = Rh_{20} (1 + \alpha_{20} (Th - T_0) + \beta_{20} (Th - T_0)^2) \quad \text{式(3)}$$

Rh₂₀: 20°Cにおけるセンサ抵抗値 (Ω)
α₂₀: 1次の抵抗温度係数 (ppm/°C)
β₂₀: 2次の抵抗温度係数 (ppm/°C)

式(2)(3)から熱平衡する動作点温度Thが求められる。Thを再度式(3)に代入してRhを算出し、次式でセンサ出力電圧Voutを求めることができる。

$$Vout = V_1 (1 + R_1 / Rh) \quad \text{式(4)}$$

この方式で任意のガス組成を計測した際のセンサ信号を算出するシミュレーションを開発し、特性式同定に活用している。

3.3 サポートベクトル回帰

GasCVDでは、非線形解析手法の1つであるサポートベクトル回帰を応用した特定式同定手法を用いている。その特長は下記となる。

(1) 製品スペックに応じた誤差設計

組成から理論的に求め算出した出力値(発熱量など)を真値として同定を行う。この際に、出力値の誤差が設定精度以下となる最も滑らかな曲線の特性式を生成する。

(2) 高速演算ができる特性式の構造設計

現場型工業計器に求められる低消費電力で測定周期が数秒の高速演算に対応する次数・項数の特性式を生成する。

3.4 特性式の同定

3.2のシミュレーションで算出したセンサ信号と組成から計算した真値から、サポートベクトル回帰によってセンサ信

号と出力値の関係を所定の設定精度で実現する特性式を同定する。

特性式を同定するにあたっては、天然ガスの各成分が各々変動することを考慮し、対象とする組成範囲全域でのガス組成の組合せについて出力値の相関を確認する必要がある。

GasCVDの天然ガス仕様を例にすると、対象とする組成範囲は以下になる。

メタン	: 80～100 mol%,
エタン	: 0～11 mol%,
プロパン	: 0～5 mol%,
ブタン	: 0～2 mol%,
窒素	: 0～7 mol%,
二酸化炭素	: 0～2 mol%,

以上の6成分が各々1%刻みで変動した場合でも、数万種に及ぶ組成の組合せが存在する。組成数が膨大ですべての組成についてセンサ信号と出力値の相関関係を調べることは困難であることから、シミュレーションを活用して各組成の入出力値の相関を解析し、少数で組成範囲全体を代表できるガス組成の組合せを選定している(この代表的な組成のガスをSVRガスと呼称している)。

ここで選定したSVRガスのセンサ信号と真値を入力値として特性式を同定する。

図4は、天然ガス仕様の組成範囲を対象として選定したSVRガス(40種)による特性式の出力値の計算結果である。組成範囲全域に及ぶ500種以上の組成について確認を行っているが、SVRガス以外の組成の出力値もすべて設定の誤差範囲内(±1.2%RD)に収まっている。

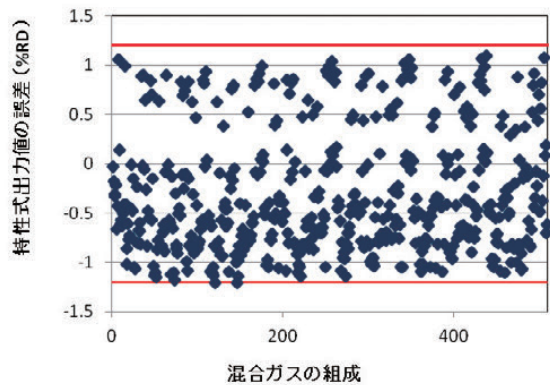


図4 SVRガス40種による特性式の出力値の誤差

特性式は3次式(5変数)としている。

また、環境条件の変動に対して安定した特性式とするため、周囲温度や圧力の変動を考慮したデータを入力値として追加している。

3.5 キャラクタリゼーション

センサ特性のパラツキを持つ個々の製品に対して特性式

を同定するには、実際にSVRガスを流して各製品のセンサ信号を得る必要がある。しかし数十種に及ぶ組成の混合ガスを用意し、データを取得するには多くの費用と工数が必要となり現実的ではない。

この問題を解決するために、GasCVDでは実ガスの測定を省略し、シミュレーションで算出したSVRガスのセンサ信号を各製品のセンサ感度に合わせて補正し、作成した補正データから特性式を同定している。

2.1で紹介したMEMSセンサはその物理的形状のバラツキが極めて小さく、抵抗温度特性の直線性も高いため、ガス組成が変動した際のセンサ信号の変化率が2つの基準ガス間で正規化するとセンサの個体差がほとんど見られない。よって2種の基準ガスについてセンサ信号を測定すれば、式(5)から各SVRガスのセンサ信号を推定することが可能となる。

補正値=A ×[(E/C-1) ×[(B/A-1)/(D/C-1)] +1] 式(5)

- A:基準ガス1のセンサ信号(各機体の実測値)
B:基準ガス2のセンサ信号(各機体の実測値)
C:基準ガス1のセンサ信号(計算値)
D:基準ガス2のセンサ信号(計算値)
E:各SVRガスのセンサ信号(計算値)

このようにシミュレーションによる計算値を補正してキャラクターゼーションを行うことで、実際にSVRガス組成の混合ガスを用意する必要がなくなる。これによって特性式を同定する際にSVRガスの数を無制限に増やすことが可能となり、より広い組成範囲について適合性の高い安定した特性式が同定できるようになっている。

4. 測定結果例

図5はC1～C6の炭化水素とN2およびCO₂からなる異なる組成のテストガス40種類について、GasCVDによる計測値と組成から計算した真値を比較した結果である。

発熱量(SCV)は精度±1.5%RD以下、メタン価は精度±3以下で計測できている。

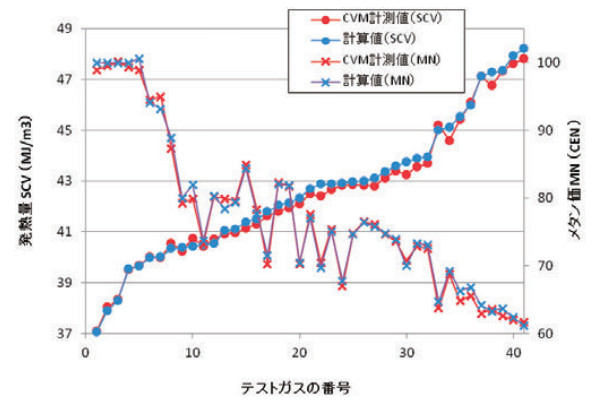


図5 テストガスの計測結果

また、図6および図7には、5本のテストガスについての周囲温度(−10℃～50℃)と大気圧(983hPa～1043hPa)が変

動した際の計測値の誤差変動を示す。周囲温度や大気圧が変化しても安定して計測できている。

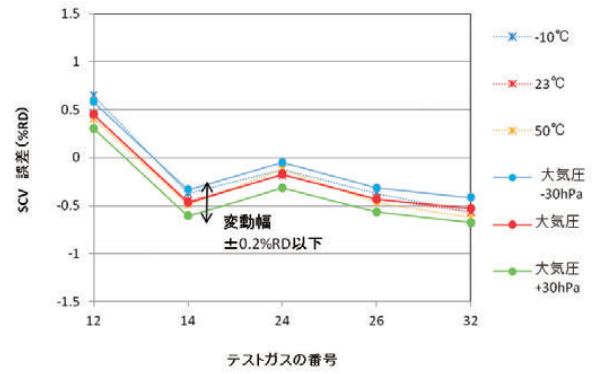


図6 周囲温度および大気圧変動時の誤差変動(SCV) 周囲温度特性(±30℃)、大気圧変動特性(±30hPa)は、ともに±0.2%RD以下

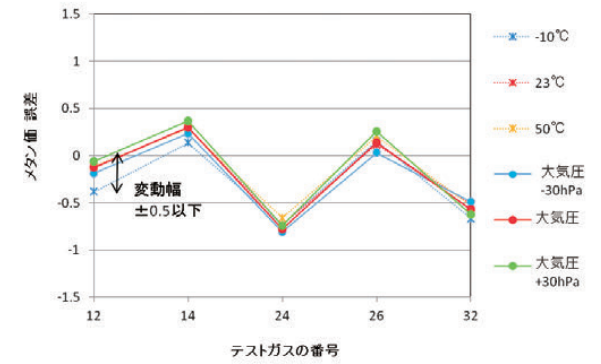


図7 周囲温度および大気圧変動時の誤差変動(メタン価) 周囲温度特性、大気圧変動特性ともに±0.5以下

5. 計測システム例

図8に計測システムの例を示す。GasCVDはこれまでの熱量計に比べてコンパクトで小さなスペースへの設置が可能である。機器内にパーツとして組込むことも検討されている。

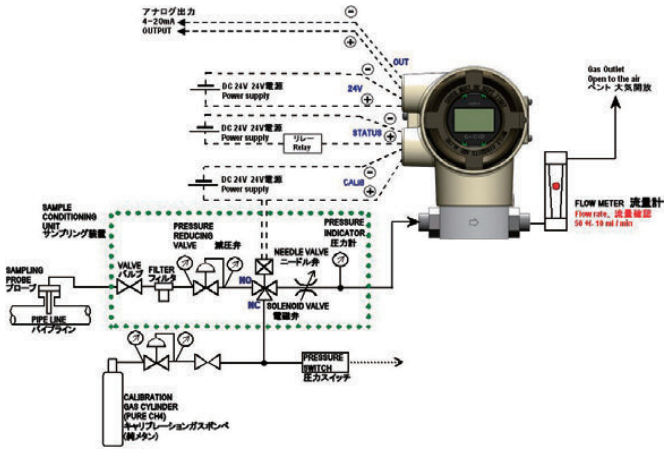


図8 GasCVDのシステム例

6. おわりに

センサ温度を5段階に切り替えることでガスの多点温度の熱伝導率を計測し、さらにセンサ信号から出力値への変換方法を工夫することで、MEMSセンサ1個で精度よく天然ガスの発熱量やメタン価を計測することができた。

今後、ガス市場には大きな変革が予想されており、天然ガスやLNGの発熱量などのパラメータを測定する需要と重要性はますます大きくなってきている。

市場のニーズを的確にとらえ、高精度で種々のパラメータを計測できる製品を開発していきたいと考えている。

<参考文献>

- (1)大石安治,「MEMSセンサを用いた天然ガスの熱量計測技術と展望」,計測自動制御学会 第57回自動制御連合講演会(2014年)
- (2)日本機械学会,伝熱工学資料(改訂第3版),1975,(312)

<商標>

GasCVDはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

濱口 竜一 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
IAP開発部

ユニバーサル入出力ICの開発

An IC with Universal Input/Output Terminals

アズビル株式会社 技術開発本部	加藤 太一郎 Taichiro Kato	アズビル株式会社 技術開発本部	栗林 英毅 Hideki Kuribayashi
アズビル株式会社 技術開発本部	手島 紘明 Hiroaki Teshima	アズビル株式会社 技術開発本部	小木曾 康弘 Yasuhiro Kogiso
アズビル株式会社 技術開発本部	梶田 徹矢 Tetsuya Kajita	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	平山 博文 Hirofumi Hirayama
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	井波 太郎 Taro Inami		

キーワード
ユニバーサル入出力 (UIO)， インターリーブ A/D 変換， 出力モニタ機能， チッププラットフォーム

産業用コントローラなど信号入出力回路を有する機器において，設置場所に機器を導入したあとに，入出力対象を変更・追加することが考えられる。追加機器をできるだけ削減して，追加・変更に対応するためには，同じ端子を使って様々な入力対象および出力対象端子に対応できることが望ましい。さらに信号入出力回路を1つの構成で実現することによって，入出力ボードの種類を削減することが可能であり，在庫削減に貢献することができる。そこで，レジスタ設定により，同一端子で信号の入出力を可能とする，ユニバーサル入出力機能を有するチップ（以下，UIOチップ）を開発した。

In devices having signal input/output circuits, such as industrial controllers, there are cases where input or output configurations should be changed or added after installation. In order to reduce the number of additional devices as much as possible while facilitating additions and changes, it is desirable to be able to handle various types of input and output connections using the same terminal. Furthermore, by having only one signal input/output circuit configuration it is possible to reduce the number of I/O board types and thus to reduce inventory. For the above reasons we developed an IC, the UIO chip, which has a universal input/output function, allowing a variety of signal inputs or outputs using the same terminal simply by setting the register.

1. はじめに

産業用コントローラは，石油化学プラント，鉄鋼，紙パルプなどのプラント産業，半導体，食品，自動車などの工場，ビル等の建物，上下水道，ガス，電気などの社会インフラの各分野における製造設備や制御機器に使用され，計測・制御システムの中核を担っている。これらは，流量計や圧力センサ，温度センサなどから入力したアナログ信号をデジタル信号に変換して読み込み，制御演算を行い，その結果に基づいて，制御信号を操作弁やシーケンス装置に出力することでプロセス制御を行っている。

いずれもA/D変換器，D/A変換器を含む入出力機能を有し，各種センサ・アクチュエータに対応する必要がある。各分野では，対象となるセンサ・アクチュエータが異なるものの，入力機能としては，電圧入力(0-10V，熱電対／零接点)，電流入力(4-20mA)，抵抗入力(3線，2線，ブリッジ)，リレー接点，およびデジタル入力，出力機能としては，電圧出力(0-10V)，電流出力(4-20mA)，およびデジタル出力に集約される。製品ごとにI/O部を設計し，最適化されているが，共通部分が多く，プラットフォーム化することで，開発効率を上げることが望まれる。

この要望に対応するために，各種入出力機能を有する専用

チップ (UIOチップ)を開発した。UIOチップを用いるとコントローラの各端子に対して，ソフトウェア切替えだけで各種入力機能，および出力機能を割り付けることが可能である。このユニバーサル入出力機能によって，いくつかの課題解決を実現できる。

まず，コントローラ機器導入後の構成変更を容易にする。コントローラの設置を行ったのち，センサ種の変更や入出力の拡張が必要になった場合，従来機器ではそれぞれの入出力に対応した基板や製品型番で構成されているため，コントローラ機器本体の交換追加が必要であった。この課題に対して，UIOチップ搭載のコントローラ製品では，ソフトウェアで内部レジスタの設定を変更することにより構成変更を行うことができる。

そしてお客さまの在庫管理コストも低減する。生産ラインなどの運用システムのダウンタイムを最小限にとどめるために，従来ではお客さまのもとでも入出力の種類ごとに在庫管理をする必要があり，管理コストも課題の1つとなっていた。UIOチップ搭載製品では製品型番を共通化することができ，ソフトウェアによって機能変更を設定できるため，お客さまの在庫品の種類を統一でき，在庫管理コスト削減につなげることが可能となる。

いちばんの特長であるユニバーサル入出力機能に加えて，UIOチップはコントローラの信頼性を確保するために，ほかにもいくつかの機能を搭載した。2章では機能概要，3章では回路構成について説明する。

2. 機能概要

2.1 入出力切替機能

UIOチップは，最小限の外部素子(ディスクリート回路)を利用して，同じ外部端子で各種入力機能および出力機能をレジスタ設定で切り替えることができる，入出力切替機能を内蔵している(図1)。

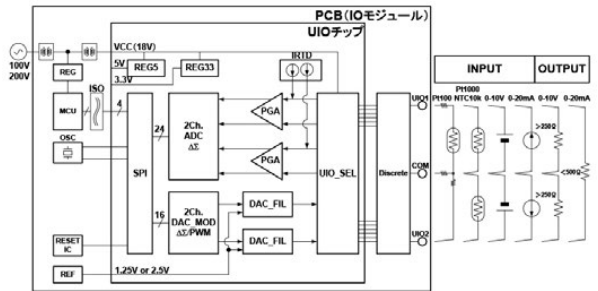


図1 UIOチップ周辺ブロック

このように，設定の自由度を与えることによって次のような利点が考えられる。

- ・コントローラを設置場所に導入後，入出力対象が変更になった場合，または追加が発生した場合など，ソフト的な内部レジスタの設定変更により構成変更，および機能拡張を行うことができるため，対応した機器を追加する必要がない。
- ・信号入出力回路を1つの構成で実現できるため，型番を共通化することができ，在庫削減に貢献することができる。

昨今のIoT時代に対応したシステム構築においては，短時間で検証結果を出し，システム改善サイクルを上げることが要求される。例えば温度センサとして安価なTCセンサを用いるシステム構築をしたのち，温度精度要求が強くなった場合でも，センサを測温抵抗体に取り換えることで，スピーディで柔軟なシステム構築が可能になる。ほかにも，あらかじめセンサ数や出力数が定まらないときでも，UIOチップ搭載のコントローラ機器は，入力種類の変更だけでなく，入出力自体も切り替えることができるため，システム変更に要する時間短縮が期待できる。

2.2 インターリーブΔΣA/D変換

UIOチップは，アナログ信号用のA/D変換用に，2チャンネルの2次ΔΣ型A/D変換回路を内蔵している。独自開発したΔΣ型A/D変換回路は，1つの回路ブロックで2チャンネルの変換に対応するために，アナログ信号のサンプリングの動作からデシメーションフィルタによる量子化ノイズ除去までを，2チャンネル交互にサンプリングを行うインターリーブ式を採用したことを特長としている。

1つの回路で2チャンネルの入力に対応するためには，マルチプレクサを用いて入力信号を切り替える方式が一般的であるが，入力信号を切り替えるたびにΔΣ型A/D変換器を構成する積分回路やデシメーションフィルタをリセットする必要がある。2次ΔΣA/D変換回路は，量子化ノイズ除去に3次の特性のフィルタを使用するため，フィルタリセット直後のデータ出力に出力レート3周期分の処理レイテンシが発生する。高精度計測が求められるなか，ΔΣ型A/D変換器は非常に有望であるが，その一方で制御周期を短くしたいという市場要求に対しては，大きな課題となっていた。開発したUIOチップに搭載した独自のA/D変換回路によって，この相反する要求を実現させた。

2.3 商用ノイズ抑制フィルタ機能

コントローラ機器が設置される環境はモータや様々な機器が動作している環境であり，商用電源周波数に同期した大きなノイズがまん延している。周知のように日本国内だけでも50Hzと60Hzが地域によって使用されており，商用電源周波数のノイズを抑制するためには，両方の周波数での除去特性を有する必要がある。最も簡単で従来から採られる手段は，時定数の大きなフィルタによって除去する方法である。しかし時定数が大きいフィルタによって，高速の信号変化を捉えることは当然できない。

上述の矛盾する要求を答えるため，高速動作が可能な商用ノイズ抑制フィルタも独自開発した。

2.4 出力モニタ機能

UIOチップは，同一端子を入力端子および出力端子に使用できるように，チャンネルごとのA/D変換器とD/A変換器が搭載されている。そのため，出力設定時に，内蔵のA/D変換器を用いて出力端子の監視を行うことで，断線，短絡，および誤接続による異常を検知することができる。

電圧出力の場合は，出力端子の基準電圧からの電位差，電流出力の場合は，検出抵抗に生じる基準電圧からの電位差を，それぞれ電圧入力としてA/D変換することで，負荷接続点の出力値を検出する出力モニタ機能を搭載

した。例えば、電流出力時に断線が起こった場合、検出抵抗に電流が流れないため、モニタされたA/D変換値が設定値と大きく異なる値になる。これにより、異常を検知することができる。

2.5 高信頼性読み出し機能

UIOチップは、MCU (Microcontroller) 等の制御デバイスとの接続バスとしてSPI (Serial Peripheral Interface)を採用している。UIOチップは、このSPI経由でのA/D変換結果の送信時に連番のIDを付加し、MCU等の制御デバイスは、このIDを用いてA/D変換結果の更新およびデータ欠損の判定を行うことができる。UIOチップは、MCUからどのようなタイミングでA/D変換読み出し要求を受け取ったとしても変換結果が破壊されないよう保護するため、MCUは任意のタイミングで更新判定が可能である。また、産業用途では読み出しデータの信頼性も求められるため、UIOチップはSPI通信時のCRC (Cyclic Redundancy Check) またはチェックサム付加にも対応している。さらに、A/D変換結果をチャンネルごとに最大1024回、二乗和を行う機能を内蔵しており、MCUが電力の実行値計算をする際の負荷を低減することができる。この二乗和はUIOチップから出力可能な制御信号オン時の積算値、オフ時の積算値、オン/オフの区別をしない積算値の計3通りの算出が可能であり、オン/オフ切り替えによる過渡応答中の期間の積算を除外することもできるため、図2のようにヒータ等の制御における短絡検出、断線検出に応用することができる。

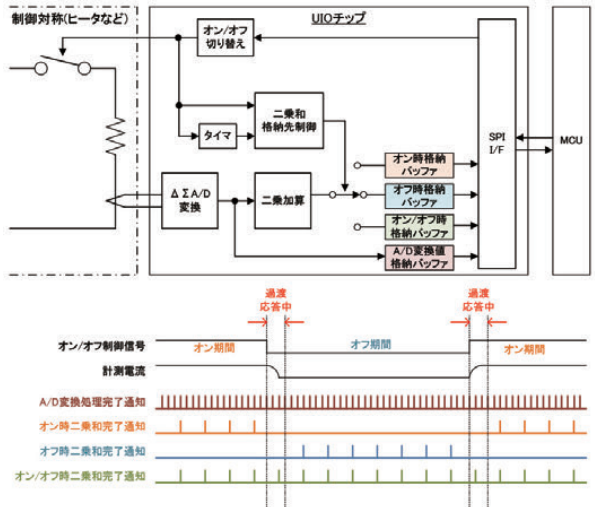


図2 ヒータ制御における短絡・断線検出

3. 回路構成

図3に示すように、UIOチップは、入出力切替部、PGA (プログラマブル・ゲイン・アンプ)、抵抗センサ用励起電流源、および2チャンネル2次ΔΣ型A/D変換回路を含む入力回路、D/A変換回路を含む出力回路、SPI通信回路、レギュレータ回路を搭載する。各ブロックの回路構成について説明する。

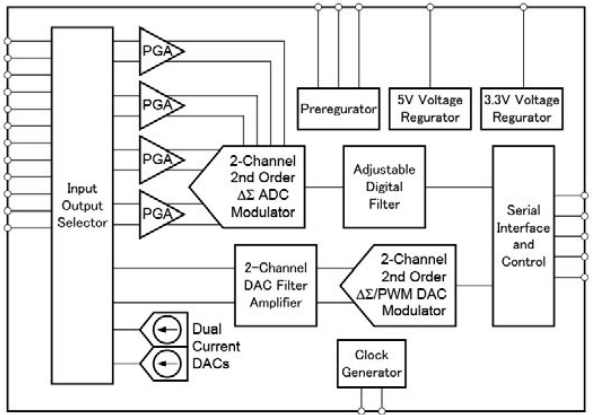


図3 UIOチップブロック図

3.1 入出力切替部

同一の外部端子を使って入出力機能を実現する。そのためには、外部端子の入力インピーダンスをHigh-Zにする構成を必要とする。具体的には、電流入力検出抵抗、電圧出力分圧抵抗、電流出力検出抵抗、および抵抗センサ用参照電圧検出抵抗の電流パスを切り離す構成である。入出力対象切替回路の状態は、インターフェース回路を介してソフトウェアにより設定することができる(表1)。

表1 入出力レジスタ設定

NO.	チャンネル1		チャンネル2
	入力選択	出力選択	選択可能な入出力
1			
2	3線RTD①		
3	2線RTD		①②除くすべて
4	サーミスタ		①②除くすべて
5	熱電対		①②除くすべて
6	冷接点		①②除くすべて
7	ブリッジ抵抗		①②除くすべて
8	電圧入力		①②除くすべて
9	電流入力		①②除くすべて
10		電圧出力	①②除くすべて
11		電流出力②	①②除くすべて
12	入力校正		① 除くすべて

この入出力切替部では、チップ端子数および外部素子を最小限にするように設計を行った。様々な入力素子、出力負荷が接続されるため、耐圧、過電流、ESD/LU、および誤接続に対する対策を行った。

3.2 入力切替回路

UIOチップの入力回路は、0-10V電圧入力、4-20mA電流入力、測温抵抗体(RTD)、熱電対(TC)など、各種入力信号に対応した選択機能を持ち、選択した入力に対してノイズのフィルタリングと増幅を行い、後段のA/D変換回路に信号を入力する。入力回路は、外部端子の接続状態を切り替える選択回路と、ノイズ除去用のローパスフィルタ回路、電圧増幅およびバッファ用のPGA (プログラマブル・ゲイン・アンプ)

回路、ΔΣ型A/D変換回路で構成されている。また、RTD (測温抵抗体)の励起用に、定電流源回路も内蔵している。

選択回路は、スイッチと誤接続保護用の抵抗で構成されている。内部レジスタ設定に従って、外部端子とPGA回路間のパスを切り替えることで、基板の部品実装を変えることなく、様々な系統の信号入力に対応できる。

3.3 定電流源回路

定電流源回路は、出力電流を50uA~1mAの範囲で設定でき、3線式RTDの励起用に最大2系統の出力が可能である。2系統出力時のマッチングを高めるために、電流パスを交互に入れ替えることで、相対誤差の軽減を実現している。

3.4 フィルタおよびPGA回路

アナログ入力信号は内蔵のローパスフィルタ回路によってノイズを除去する。このフィルタ回路は、キャパシタとチップ内蔵のボリ抵抗とで構成されるパッシブフィルタである。ボリ抵抗の抵抗値は、選択回路の設定にかかわらず一定となるよう調整されており、キャパシタの容量値で時定数を選択する。

PGA回路は、2つのチョッパ安定化アンプと、PGAのゲインを設定する抵抗帰還ネットワークで構成されている。チョッパ安定化アンプを採用しているため、低ドリフト (低オフセット)を実現する構造となっている。PGAの増幅率は1倍~128倍まで設定できる。

3.5 A/D変換回路

A/D変換回路は、前述のインターリーブΔΣ型A/D変換回路である。最大2チャンネルのアナログ信号のA/D変換に対応し、データレートを100SPS~1600SPSの範囲で設定可能である。A/D変換回路は、スイッチトキャパシタ式積分回路を用いたΔΣ変調回路と、量子化ノイズ除去のためのデシメーションフィルタで構成される。多くの回路素子を共有することで、A/D変換回路を2個搭載する場合と比較して、回路面積を削減している。

3.6 商用ノイズ抑制デシメーションフィルタ

UIOチップのΔΣA/D変換は、インターリーブ式のΔΣA/D変換であるため、量子化ノイズ除去のためのデシメーションフィルタを2つのチャンネル間で共用することが可能となる。さらに、商用ノイズ (50/60Hz) 除去のためのデジタルフィルタの伝達関数とデシメーションフィルタの伝達関数を見直し、最適化することで、2つのフィルタを単純に直列接続した場合と比較して面積を約40%削減することができた。この最適化されたデシメーションフィルタは、量子化ノイズの除去に加えて、商用ノイズをおよそ55dB減衰することができ、チャンネル切り替え時の高速応答も可能である(図4)⁽¹⁾⁽²⁾。

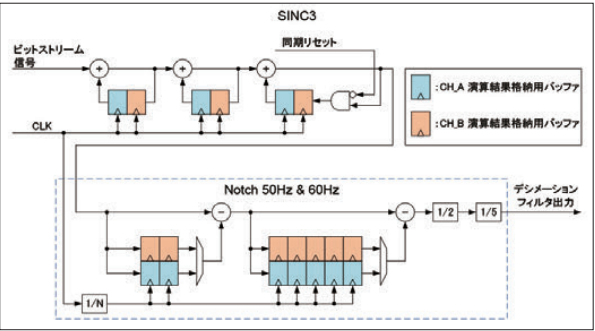


図4 商用ノイズ抑制デシメーションフィルタ

3.7 出力回路

電流出力、電圧出力に用いる変調信号は、ゼロ出力時の精度とリップル精度の要求に対応するために、特殊PWM信号(16ビット、8ビット分割型、1MHz)、とΔΣ型変調信号(16ビット、100kHz)のどちらを使うかをレジスタ設定により選択することができる。

変調信号の平滑化に用いるローパスフィルタは、内蔵の100kΩ抵抗と外部キャパシタによるRCフィルタの構成をとっており、キャパシタの容量により時定数を選択することができる。例えば、33nFの外付けキャパシタと組み合わせた場合、63%応答の時間が約10msecとなる。

平滑後の増幅回路はゲイン設定機能を含み、外付け回路との組み合わせにより、0-10Vや0-5Vなどの電圧出力、4-20mAの電流出力が可能である。UIOチップには、独立した2チャンネルの出力回路が搭載されており、電圧出力においては、異なる値に設定した2チャンネルの同時出力が可能である。電流出力においては、1チャンネル出力となる。

3.8 プレレギュレータ

電圧出力、電流出力において、発熱を抑えるプレレギュレータ回路を搭載した。この回路によって外付け駆動トランジスタの電源電圧を出力値に応じて制御して、駆動トランジスタのコレクタ-エミッタ間、またはドレイン-ソース間の電圧を下げることで、発熱を抑えることが可能になる。プリレギュレータ回路は、外部の降圧型スイッチング電源と接続する。出力値をモニタして、駆動トランジスタの電源電圧を基準とした三角波と比較を行い、スイッチング電源のPWM制御信号を出力する。三角波はロジック回路から100kHzを入力し、容量(100pF)への充放電を用いて生成する。図5に出力電圧と出力トランジスタの電源レベルを示す。ドレイン-ソース間電圧をおよそ2.24V程度固定することができる。

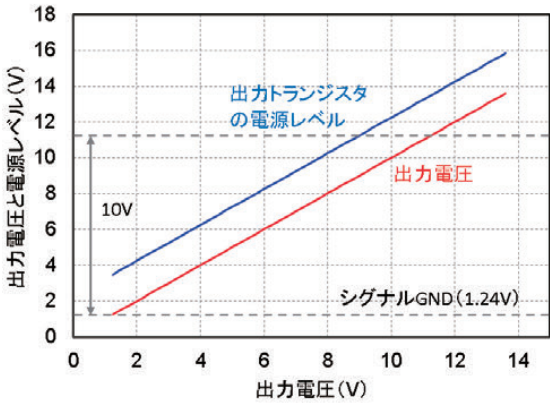


図5 プリレギュレータ機能(測定値)

3.9 SPI通信部

UIOチップのSPI通信部は、MCUからアクセスタイプ設定コマンドを受け付けることにより、SPIアクセスを通常アクセス(チェックサム、CRCともに付加なし)、チェックサム付加アクセス、CRC付加アクセスの3通りから選択することができる。UIOチップが付加するCRCの生成多項式は、多くのMCUでハードウェア演算が可能なCRC16-CCITTを用いているため、CRC算出ハードウェアを内蔵するMCUであれば演算負荷を増やすことなく、SPIアクセスの信頼性を高めることが可能である。CRC算出ハードウェアを持たないMCUを用いた製品に対してUIOチップを適用する場合は、CRCではなくチェックサムを付加したアクセスにすることで、演算負荷を抑え、SPIアクセスの信頼性を高めることができる(表2)。

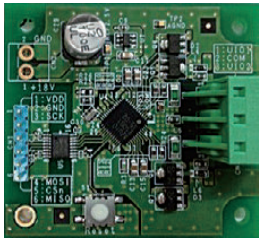
表2 SPIアクセスタイプ

	通常 アクセス	チェックサム 付加	CRC 付加
演算負荷	◎	○	△*
アクセス時間	◎	○	△
信頼性	△	○	◎

※MCUがCRC算出ハードウェアを内蔵する場合は◎

4. 評価結果

1章で説明したように、UIOチップは入出力回路のプラットフォーム化を目的の1つとしている。このため、対象となる現行製品の仕様から、今後の製品搭載にあたりチップの満たすべき特性を決め、設計を行った。チップ評価から、これらの特性が基本的に達成されていることが確認できた。



評価基板(中央にUIOチップ)

また、UIOチップでは、ESD試験や高温連続動作試験などのICにおける一般的な信頼性試験項目のほかに、計測制御の専門メカならではの視点で、製品に搭載された場合の特定アプリケーションにおける耐量試験も併せて行っている。例えば、計装時、無電源状態で電圧入力を逆接続で受けるといったような想定できる不注意に対しても、故障が生じないように、市販ICでは行わないような耐量試験も実施してアズビル製品の信頼性を高めている。

5. おわりに

コントローラ製品のアナログ・デジタルI/O機能プラットフォームとして、ユニバーサル入出力IC(UIOチップ)を開発した。UIOチップは、コントローラ製品に必要なほぼすべての入出力種別に対して、少ない外付け部品だけでI/O構成が可能である。構成切り替えは内部レジスタによる切り替え設定で行うことができる。また、インターリーブ $\Delta\Sigma$ A/D変換回路の採用により、チャンネル間の同時性を確保でき、高速に商用電源ノイズ除去を可能とした。

<参考文献>

- (1)H.Kuribayashi and T.Kajita, “Area-Efficient Decimation Filter with Power-Line Noise Suppression for $\Delta\Sigma$ A/D Converters” SICE Annual Conference 2016
- (2)H.Kuribayashi and T.Kajita, “Area-Efficient Decimation Filter with 50/60 Hz Power-Line Noise Suppression for $\Delta\Sigma$ A/D Converters” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration Vol.10 (2017) No.3 p.165-169

<著者所属>

- 加藤 太郎 技術開発本部センシングデバイス部
栗林 英毅 技術開発本部センシングデバイス部
手島 紘昭 技術開発本部センシングデバイス部
小木曾 康弘 技術開発本部センシングデバイス部
梶田 徹矢 技術開発本部センシングデバイス部
平山 博文 アドバンスオートメーションカンパニーCP開発部
井波 太郎 ビルシステムカンパニー開発本部開発4部

13 Paレンジサファイア隔膜真空計の開発

Extending the Measurement Range of a Sapphire Diaphragm Vacuum Gauge to 13 Pa

アズビル株式会社 技術開発本部	石原 卓也 Takuya Ishihara	アズビル株式会社 技術開発本部	添田 将 Masaru Soeda
アズビル株式会社 技術開発本部	関根 正志 Masashi Sekine	アズビル株式会社 技術開発本部	栃木 偉伸 Hidenobu Tochigi

キーワード
真空計, 隔膜式真空計, 静電容量式圧力センサ, キャパシタンスマノメータ, エッチング, スパッタ

これまで開発してきたサファイア真空計の計測圧力レンジは主として半導体製造装置のCVD、ALDなどの成膜プロセスをターゲットとして133Paから133kPaであった。これを13Paまで広げることにより今まで対象外とされていたエッチングやスパッタ成膜への適用を図った。大気圧の1/10000の圧力をフルスケールとするため、ダイアフラムを20umまで薄くするなど困難な加工技術が求められる。さらにその薄いダイアフラムに起因するスティッキング、圧力ヒステリシスなど133Pa以上のレンジでは顕在化しなかった様々な技術的課題を解決することにより、これまでにない200℃までの自己加熱が可能な静電容量式隔膜真空計を実現した。これにより低真空でも高温計測が必要な新しいプロセスアプリケーションへの適用が可能となったのでここに報告する。

The pressure measurement range of sapphire vacuum gauges has been mainly from 133 Pa to 133 kPa for use in film formation processes such as CVD and ALD in semiconductor manufacturing. We extended this range to 13 Pa with the aim of enabling gauge use for etching and sputtering deposition. We developed a capacitance diaphragm vacuum gauge capable of self-heating up to a heretofore unattained 200 ℃ by solving various technical problems that do not arise at 133 Pa or more. To make a pressure of 1/10000 of atmospheric pressure to be the full scale amount, we thinned down the diaphragm to 20 μm, and we found methods to deal with other difficulties such as pressure hysteresis and sticking due to the thinness of the diaphragm. As a result, the sapphire vacuum gauge can be used in new process applications requiring high temperature measurement in a low vacuum.

1. はじめに

近年、製造業ではIoT (Internet of Things)が注目され、実際に様々な分野で活用されはじめている。それに伴いデータの処理に必要な半導体デバイスの需要が増々高まるとともに、デバイスの集積度を高めるために次々と新しいプロセスが提案・実用化されてきている。なかでも原子層堆積法(ALD:Atomic Layer Deposition)やALE (ALE: Atomic Layer Etching)は基板最表面の化学吸着を利用したプロセスであり、デバイスの3次元化に大きな役割を果たしている。このような半導体プロセスの圧力の監視や制御に用いる隔膜真空計、あるいはキャパシタンスマノメータは真空領域のガス種依存性がない大気圧以下の絶対圧を計測するセンサである。このセンサは内部への副生成物への

の堆積を防ぐために自己加熱されるのでそれに対する耐熱性や各種腐食性のプロセスガスに対する耐食性が求められる。大別すると隔膜真空計により制御・監視される半導体プロセスは成膜系とエッチング系に分けられ、主としてエッチング系のプロセスで13Paフルスケール、成膜系のプロセスでは133Pa～1333Paフルスケールのセンサがそれぞれ使用されている。ただし、スパッタリングのように13Paのセンサが用いられる成膜のプロセスも存在する(図1)。また、真空計内部へのプロセス副生成物の堆積を避けるため、成膜系のプロセスでは150～200℃の自己加熱型の隔膜真空計が用いられている。それに対してエッチング系のプロセスでは、それほど内部への堆積を考慮する必要はなくセンサを安定させるため、一般的には45℃、高くても100℃の自己加熱温度であった。

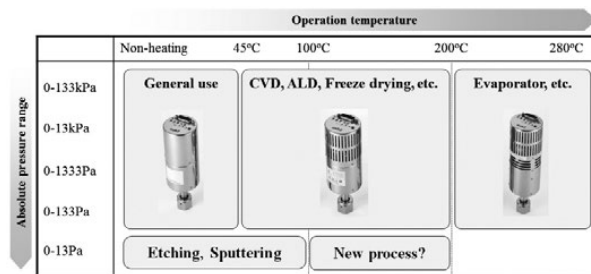


図1 隔膜真空計のレンジ・加熱温度とアプリケーション

ところが、前述のALEのように最新のエッチングプロセスでは単純なエッチングだけでなく、プロセスレシピのサイクルの中に成膜のステップが含まれるようなものがある(図2)⁽¹⁾。

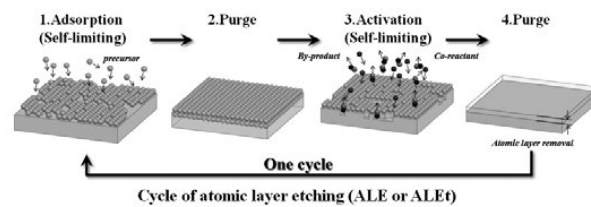


図2 ALEのプロセスサイクル

このようなプロセスでは当然成膜時の副生物の真空計内部への堆積を防ぐために100℃以上、150～200℃の自己加熱温度に耐え得る隔膜真空計が必要となると考えられる。アズビルでは、腐食性雰囲気や600℃以上の高温雰囲気で成膜する半導体製造装置におけるガスの圧力計測機器用として、耐腐食性・耐熱性に優れた工業用サファイアを用いた静電容量式圧力センサ素子およびその特長を活かしたパッケージ技術を開発することにより、「サファイア隔膜真空計」を開発してきた⁽²⁾。しかし、その圧力レンジが133P～133kPaなので、主なアプリケーションはCVD (Chemical Vapor Deposition)やALDなどの成膜プロセスに限られていた。

本稿では従来のサファイア隔膜真空計のレンジを13Paフルスケールまで拡張し、さらに今までにない200℃まで自己加熱可能としたのでそれについての報告を行う。

2. 13Paレンジの技術課題とその対策

本章では抜本的な開発が必要とされたセンサチップまわりについて報告する。真空計のレンジを13Paフルスケールへ拡張するには感度を得るためにそのセンサダイアフラムを薄くする必要があるが、それに付随して様々な技術課題が発生した。最も困難な技術的課題は圧力ヒステリシスであり、その次はダイアフラムのスティッキングであったのでこの2つについて次項に詳述する。

2.1 ダイアフラムのスティッキング

薄いダイアフラムをもつMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサで、ダイアフラムのスティッキングはごく一般的な問題であるが、基材として一般的なシリコンではなくサファイアを用いているので、その高い絶縁性

により課題を難しくしていることが判明した。

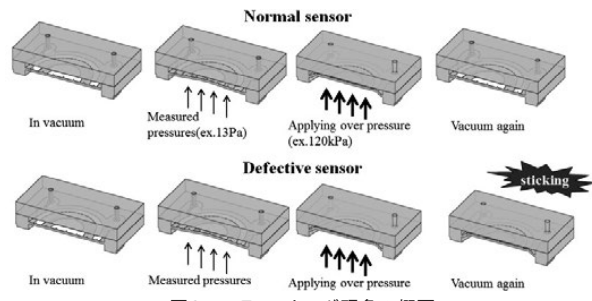


図3 スティッキング現象の概要

図3にその現象の概要を示す。通常、隔膜真空計は出荷・搬送時やメンテナンス時に大気圧等のその計測レンジよりはるかに大きな過大圧が印加される。その際、ダイアフラムは固定電極側の台座に着底する。正常なセンサは再度真空引きされた時に台座から離脱するが、この不具合現象が発生するものは真空引きして着底したままとなる。スティッキングが発生すると出力はオーバーレンジにはりつたままとなり、致命的な不良となる。

このような現象を防ぐには接触面積を減らすために、柱状や梁状の構造物を設けることがMEMSセンサでは一般的であり、サファイア真空計の場合でも133Pa以上のレンジではその対策で効果がみられた。ところが、13Paを計測するためにダイアフラムをより薄くすると復元力が桁違いに小さくなるので、この対策だけでは不十分なことが判明した。この現象には①温度が低い方が発生しやすい、②低い温度でスティッキングしたものを真空中に引いたまま温度を上げると自然に復帰する、③過大圧を印加したまま温度を上下すると発生するなどの特徴があり、これらのことから、スティッキングはサファイアの非常に高い絶縁性のため、接触部に静電気が発生し、それに起因する引力により発生すると推測される(図4)。

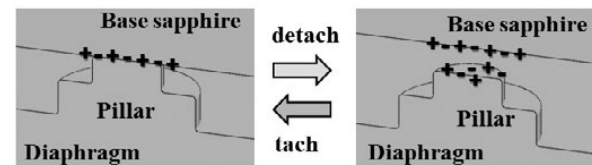


図4 スティッキングの推定原因

この仮説に対しては帯電防止のために金属膜等を接触面に配置し、その金属膜を静電容量計測用の電極に接続し、計測回路に電荷を逃がすことにより回避可能ではある。しかし静電容量式センサの場合、台座側電極とダイアフラム側電極間に容量を計測するための交流電圧が印加されており、接触部に電極が存在すると着底から離脱した瞬間はそれらの電極間隔が極めて小さいので静電引力が発生し出力が不安定になる不具合が生じる。これを回避するため、接触部の電極と容量計測用の電極をある一定の距離を保つように配置した(図5)。この構造により両電極間の絶縁部はRCのローパスフィルタとして働き、直流では電荷が逃げ、計測する交流周波数では電気絶縁が確保できるので先の不具合を改善することが可能となった。

スティッキングの原因は静電気以外に接触面に発生する分子間力等も考えられるので、接触部の面積を極小化するために接触面を丸めたり、復元力になるべく強くなるように柱構造の配置を見直したりなどの対策も併せて実施した。

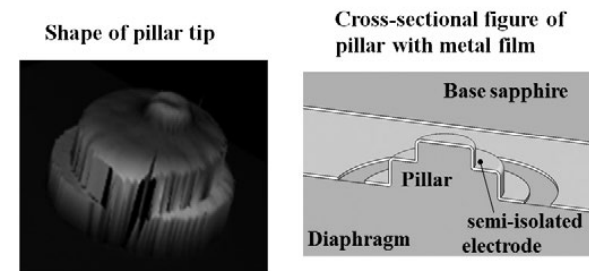


図5 スティッキング対策

2.2 圧力ヒステリシス

ここでいうところの圧力ヒステリシス（以下、圧力ヒス）は図6のグラフに示すようにセンサに圧力を印加した後の零点シフトとそれに引き続いて発生する零点のドリフトである。特にこのドリフトは10時間以上も延々と続き、なかなか収束しないので大きな問題となった。

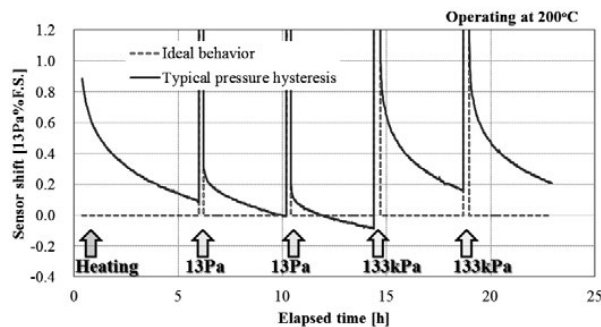


図6 圧力ヒスの概要

この現象は13Paのセンサ特有であって、温度依存性があり、100℃以上で顕著に発現する。さらに圧力を印加しなくとも単に加熱ただけでドリフトが発生することもあった。また、13Paの圧力を印加しても120kPaの圧力を印加してもその大きさに多少の差異はあるが同じような現象を示す。

まず、発生箇所の切り分けを実施したところで判明したのは、ダイアフラムに被測定媒体のガスが到達して初めて発現するということである。

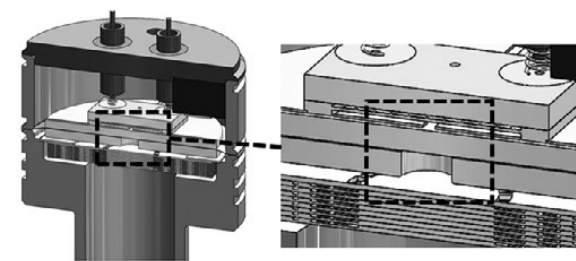


図7 センサ密閉構造

つまり、図7のようにセンサチップを密閉し、機械的要因のみが特性に影響を与えるように限定すると圧力ヒスは全く起きない。

また、ダイアフラム上の空間へのガスの導入口の形状や配置も影響が大きいことが判明した。

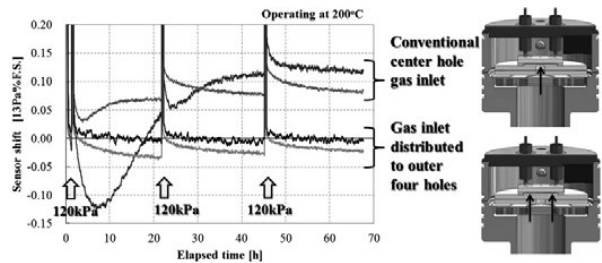


図8 圧力ヒスとガス導入口の形状・配置

アズビルでは、成膜プロセス中に真空計に膜が堆積してもシフトの影響が小さくなるようなセンサを開発したが、その特長の1つにガス導入口をダイアフラムの中心に相対する1つの穴ではなく、外側に4つ設けた構造がある⁽³⁾。この構造でパッケージし、圧力ヒスを計測してみると同じ設計のセンサチップでも図8のように明らかな改善がみられることが分かった。

この理由を明らかにするため、シミュレーションでの検証を実施した。まず、穴の形状・配置の影響を調べた結果を図9に示す。解析条件は圧力導入口の形状・配置に対応するダイアフラムの表面に一定の熱流束を与え、さらに境界条件としてダイアフラム端の温度を200℃に固定した。ダイアフラムは熱流束を受けるとその部分の温度が上昇して膨張が起き、その影響で撓みを生じることとなる。この結果からおよそどのくらいのセンサシフトが発生するかを見積もることが可能である。

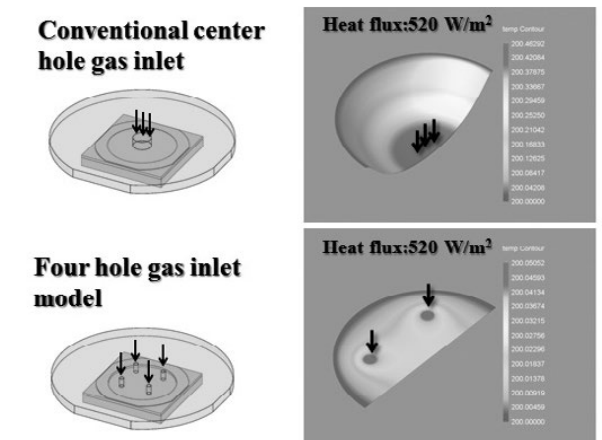


図9 導入口の形状・配置の熱シミュレーション

結果は520W/m²の熱流束を与えた時、従来の中心穴の場合は最大温度上昇が0.46℃に対して4つ穴モデルはわずか0.05℃、撓みもそれに対応してシフトが小さくなり、それぞれ5.0%F.S.および0.65%F.S.となった。この改善の理由は熱流束が照射される部位がダイアフラム端に近いほど熱が端から逃げる事が可能となり、温度上昇が抑えられるためと推測される。

次にダイアフラムの厚みの影響を調査した。同様に一定の熱流束(5000W/m²)を中心穴の部位に照射し、温度上昇と撓みおよびそれにより生じるシフトを計算した。結

果を図10に示す。

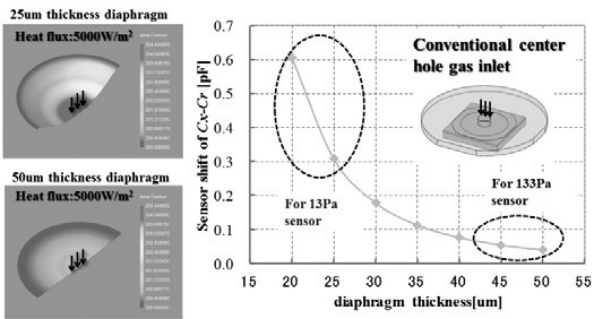


図10 ダイアフラム厚みの熱シミュレーション

我々の製品の場合で133Paフルスケールに相当するダイアフラム厚50umのセンサ零点シフトは約0.05pFであるのに対し、13Paフルスケールに相当するダイアフラム厚25umのものは約0.3pFとなり、センサの計測レンジが大きければこの問題は発生しないことが再現できた。

この理由も同じようにダイアフラムの厚みが厚い方が照射された熱が端から逃げる経路が大きいので、温度上昇が抑制されるためと考えられる。

以上の実験結果から我々は以下のような仮説を立てた(図11)。

- (1) ガスを導入し、その後真空引きすると真空計を取り付けたチャンバーおよび真空計のパッケージ内の内壁の温度分布は真空引き前後で異なる
- (2) そのため、真空引きした後にダイアフラムに到達した薄ガス(～10⁻⁴Pa)とセンサダイアフラムの間に微妙な温度差が生じる
- (3) 結果として、熱エネルギーの交換が希薄ガスとダイアフラム表面間に起きてダイアフラムの部分的熱膨張、もしくは収縮を生じさせてダイアフラムを撓ませる
- (4) この部分的熱膨張、もしくは収縮は内壁の温度分布が圧力印加前に戻るまで続くので、元にもどるまで非常に長い時間を必要とする

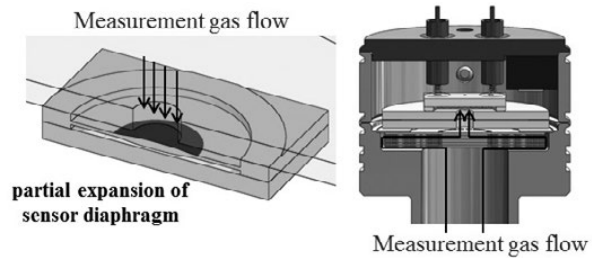


図11 圧力ヒステリシスの発生機構

この仮説が正しければ圧力ヒスは薄いダイアフラムで13Paのような低いレンジの圧力を計測する際に生じる根本的な課題であったといえる。

この節の最後に圧力ヒスの解決策を解説する。前述した4つの圧力導入口を持つ構造でもかなりの改善効果が得られるが、さらに圧力ヒスの発生を抑制するために図12、13に示すようなセンサ構造を最終的に採用した。

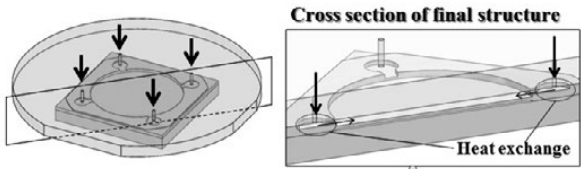


図12 圧力ヒス対策構造

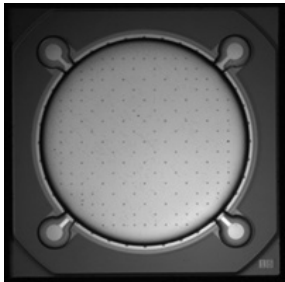


図13 センサチップ平面図

この構造では圧力計測対象のガス分子は直接垂直にダイアフラムに衝突するのではなく、いったんセンサチップの基材に衝突してからダイアフラムと並行にダイアフラム上の空間へ侵入することとなる。したがって、ダイアフラムに到達する前にセンサチップと熱エネルギーの交換を行うことが可能で温度差を減らすことができる。

3. 結果

図14にスティッキング対策の効果を明示するものとして45℃における圧力サイクル試験の結果を示す。

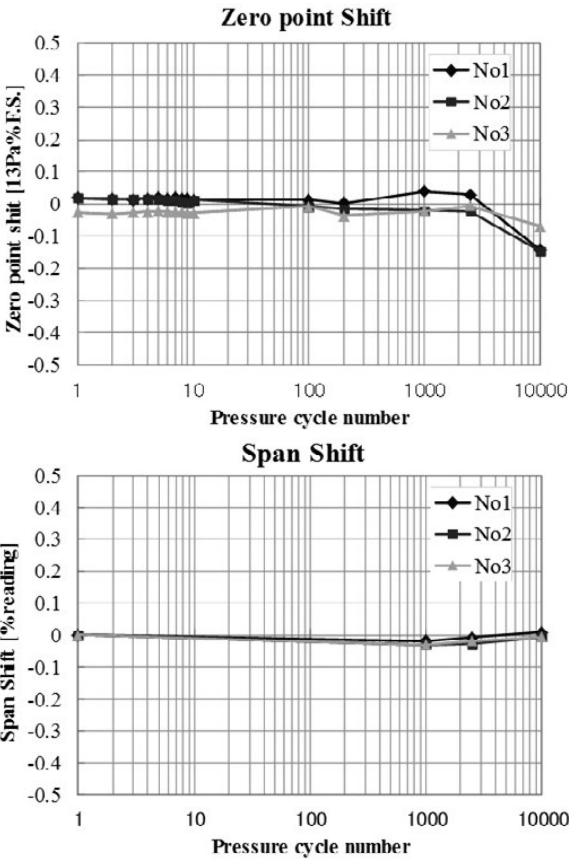


図14 圧力サイクル試験結果

133kPaの圧力サイクルを10,000回印加してもスティッキングは発生せず、零点シフトは0.15%FS以下、スパンはほとんど変化しない結果となった。

次に圧力ヒスの結果を図15に示す。比較のために従来の構造のものも併せて表示してある。

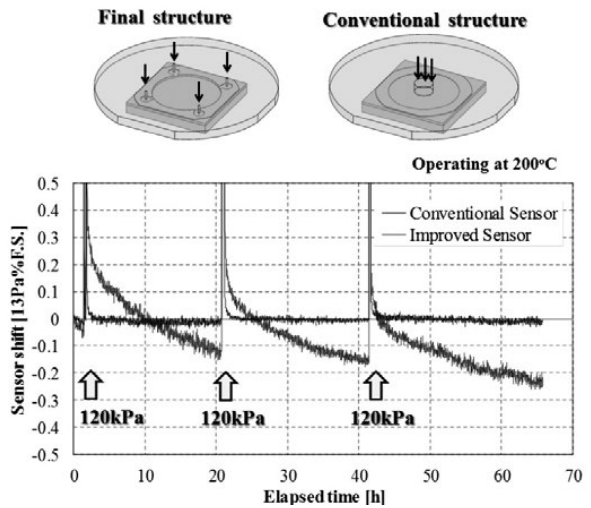


図15 圧力ヒステリシス計測結果

最終構造の改良されたセンサは120kPaの圧力印加後もシフトはほとんど発生せず、零点ドリフトも起きないことが確認できる。

最後に、その他のセンサ基本的特性を表1にまとめたものを示す。

表1 センサ基本特性

Characteristics	Result
Pressure range	0-13.332Pa
Temperature	45-200°C
Sensor output	0-10V
Pressure sensitivity at 200°C	Cx-Cr:1.39pF/13.332Pa
Temperature dependence at 200°C	Zero:-0.15%FS/°C Span:-0.017%reading
Zero point drift at 200°C	<0.3%F.S./720hours
Output error of manometer	<0.25%Reading

これらの結果は今までにない200℃で動作可能な静電容量式隔膜真空計が実現できたことを示している。

4. おわりに

サファイア真空計は、13Paレンジに対応することにより今までのCVD、ALDなどの成膜を主としたアプリケーションだけでなく、スパッタ成膜やエッチングのプロセスにも対応することが可能となった。さらに温度が200℃まで動作可能なので、より多くのアプリケーションが期待できる。半導体のプロセスは日進月歩で常に新しいものが提案・実用化されており、アズビルとしてもこのような顧客課題に迅速に対応することにより顧客価値の拡大に努めていきたい。

<参考文献>

- (1)CVD反応分科会主催第25回シンポジウム「原子層堆積／原子層エッチングの基礎と応用」配布資料（公社）化学工学会 CVD反応分科会
- (2)日本真空学会 2016年12月研究例会「真空中での原子層成長:ALD技術の最近の進歩」配布資料,（一社）日本真空学会 <http://www.nedo.go.jp/content/100528958.pdf>
- (3)石原, 長田:高温型サファイア隔膜真空計の開発, 2006, 第23回センシングフォーラム, (pp.130-135)
- (4)S. Kimura, Y. Ishikura, T. Kataoka, M. Soeda, T. Masuda, Y. Yoshikawa, M. Nagata:Stable and Corrosion-Resistant Sapphire Capacitive Pressure Sensor for High Temperature and Harsh Environments, Transducers '01, 2001, (pp.518-521)
- (5)M. Soeda, T. Kataoka, Y. Ishikura, S. Kimura, Y. Yoshikawa, M. Nagata:Sapphire-Based Capacitive Pressure Sensor for High Temperature and Harsh Environments Application, 2002, Proceedings of the IEEE Sensors 2002 conference, (pp.950-953, 2002)
- (6)関根, 差波, 石原, 谷:サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発, 2010, Azbil Technical review 2010, (Vol.27)
- (7)栃木:原子層堆積法向けサファイア隔膜真空計の開発, 2013, 第30回センシングフォーラム, (pp.125-130)
- (8)石原, 関根, 栃木:原子層堆積法向けサファイア隔膜真空計の開発, 2014, Azbil Technical review 2014, (Vol.31)

<著者所属>

- 石原 卓也 アズビル株式会社
技術開発本部センシングデバイス技術部
添田 将 アズビル株式会社
技術開発本部センシングデバイス技術部
関根 正志 アズビル株式会社
技術開発本部センシングデバイス技術部
栃木 偉伸 アズビル株式会社
技術開発本部HCA技術部

感度波長拡大型UVチューブの開発

A UV Tube with Extended Wavelength Sensitivity

アズビル株式会社 技術開発本部	中島 有紀 Yuki Nakashima	アズビル株式会社 技術開発本部	片桐 宗和 Munekazu Katagiri
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	住吉 啓介 Keisuke Sumiyoshi	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	篠田 菜々子 Nanako Yanada

キーワード
紫外線検出, 感度波長, 仕事関数, 熱処理, 結晶方位, 拡散

特殊燃料の火炎検出が可能であるチューブユニットAUD20用UVチューブを開発した。特殊燃料の火炎検出には、波長185～270 nmの紫外線に対する感度を持つUVチューブが求められる。UVチューブが検出できる紫外線波長は、受光面であるカソード電極の仕事関数によって決まり、波長185～270 nmの紫外線を検出するためには4.6 eV以下の仕事関数を持つカソード電極が求められる。AUD20のカソード電極は、キュプロニッケル圧延材に銅メッキを行った構造を採用しており、結晶方位の制御および表面へのニッケル偏析を目的とした2段階の熱処理プロセス技術開発により仕事関数制御を行った。

We have developed an ultraviolet phototube for our AUD20 tube unit which can detect the flame of particular fuels. To do so, the AUD20 must be able to detect UV wavelengths from 185 to 270 nm. The range of wavelengths detectable by the UV tube is determined by the material of the cathode, which is the element receiving the ultraviolet light. To detect wavelengths of 185–270 nm, the material of the cathode must have a work function of less than 4.6 eV. The cathode of the AUD20 is copper-plated rolled cupronickel. Using a thermal process to control crystal orientation and nickel segregation on the surface, we are able to control the work function of the cathode material.

1. はじめに

UVチューブは火炎検出器に内蔵される紫外線を検出する放電管センサである。ガスバーナや工業用油が燃焼する際に発生する非常に微量な紫外線を検出し、火炎の有無を監視する機能を持っている。

アズビルはAUD10およびAUD15用UVチューブの量産技術を開発し、高い信頼性を持つ火炎検出器を燃焼安全市場に安定的に供給してきた。これらのUVチューブは、火炎検出器アドバンスAUD™シリーズに搭載され、自動車のボディや部品の塗装ラインにおける乾燥炉、アルミ・亜鉛ダイカストに使用する溶解炉、金属部品の焼き入れ等熱処理炉といった各種工業炉の燃焼制御の分野で幅広く使用されている。

AUD10およびAUD15は、紫外線受光面であるカソード電極にタングステンを使用し、火炎から放出される波長185～

245 nmの紫外線を検出する。この波長域の紫外線が検出可能であると、都市ガス、天然ガス、灯油、重油といった一般的な燃料の火炎の検出が可能である。しかしながら、低発熱量火炎や紫外線吸収媒体によって紫外線が減衰する際には火炎検出が難しい場合がある。例えば、石油精製副生ガス、硫化水素といったプラント等で使用される特殊燃料の火炎検出が厳しい(表1)。

図1に、アルコール火炎の紫外線強度分布図を示す。図1より、紫外線波長が長いほど紫外線強度が大きくなる傾向があることが分かる。表1に示した燃料を燃焼させた場合も基本的には同じような紫外線強度分布を示すため、245 nmよりも長い波長の紫外線を検出可能なUVチューブは、検出できる紫外線強度が大きくなり、特殊燃料等の採用により火炎検出が厳しい環境下でも火炎検出が可能となる。我々は、波長185～270 nmの紫外線を検出でき、特殊燃料の火炎検出が可能なAUD20用UVチューブを開発した。

表1 プラント等で使用される燃料と火炎検出可否

燃料の種類	総発熱量 (kJ/Nm ³)	AUD300* AUD500
都市ガス	18,837～20,930	○
天然ガス : CH ₄	39,930	○
プロパンガス : C ₃ H ₈	101,400	○
ブタンガス : C ₄ H ₁₀	134,100	○
灯油	34,514 (kJ/l)	○
重油	35,514～38,201 (kJ/l)	○
コーク炉ガス : COG	16,744～20,930	△
高炉ガス : BFG	2,930～3,767	×
転炉ガス : LDG	8,372～10,465	×
MIXガス : COG+BFG+LDG	4,186～12,558	△
アセチレン : C ₂ H ₂	58,311	○
一酸化炭素 : CO	12,709	×
エタン : C ₂ H ₆	69,132	○
エチレン : C ₂ H ₄	62,338	○
水素 : H ₂	12,767	△
ナフサ (粗製ガソリン)	13,605	△
ベンゼン : C ₆ H ₆	149,449	○
硫化水素 : H ₂ S	21,935	×
石油精製副生ガス	4,186～6,279	×

○：検出可、△：検出テスト必要、×：検出不可

【注】上記の△はあくまでも目安である。

*AUD300、AUD500はAUD10を搭載したアドバンスUVセンサ

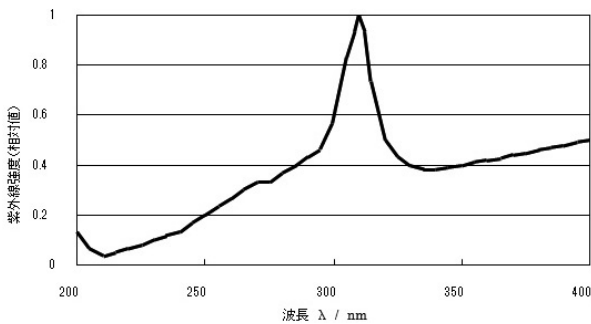


図1 アルコール火炎の紫外線強度分布図

2. UVチューブの紫外線検出原理と仕事関数の関連

UVチューブは硬質ガラスで構成されたガラス管体を持つ放電管である。内部空間に金属のアノード電極、カソード電極の電極対を備えており、特殊な混合ガスが封入されている。それぞれの電極はコパールピンに溶接され、外部回路と接続される。上面に配置されたアノード電極は網目状に多数の貫通孔を持ち、電極間には所定の電圧が印加されている。ガラス管体を介して入射された紫外線がカソード電極に到達すると、光電効果により電子が放出され、電子の衝突によって封入ガスがイオン化される。これにより電極間に放電電流が流れ、外部回路に火炎信号として送られる。

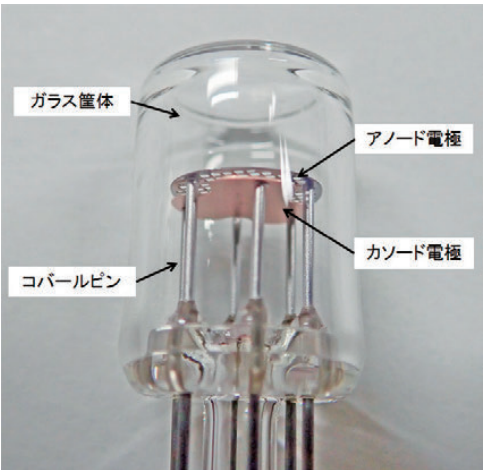


図2 AUD20用UVチューブの外観

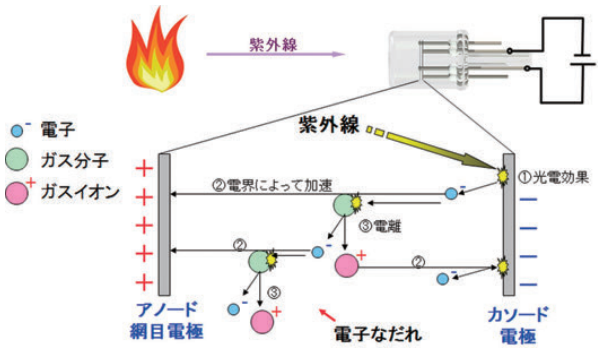


図3 UVチューブの検出原理模式図

光電効果とは、物質に光を照射した際に光のエネルギーを吸収して電子が放出される現象を指す。物質から電子を取出すために必要な最小エネルギーを仕事関数といい、物質により異なる値を持つ。UVチューブに当てはめると、火炎から発生する紫外線の持つエネルギーがカソード電極の仕事関数よりも大きければ光電効果が発生し、火炎検出が可能となる。

より長波長の紫外線、言い換えればエネルギーの小さな紫外線に対する検出感度を持つためには、AUD10およびAUD15のカソード電極材料であるタングステンよりも小さい仕事関数を持つカソード電極が必要となる。具体的には、タングステンの仕事関数が約5.2 eVであるのに対して、波長185～270 nmの紫外線を検出するためには4.6 eV以下の仕事関数を持つカソード電極が求められる。

我々は、銅-ニッケル合金であるキュプロニッケル圧延材に銅メッキを行った構造を持つカソード電極を採用し、熱処理プロセスによる仕事関数制御によって波長185～270 nmの紫外線の検出を可能とした。以下の章で、技術開発詳細を述べる。

3. 技術開発詳細

3.1 結晶方位制御による仕事関数制御

一般的に、金属は2～6 eV程度の仕事関数を持ち金属種により異なる値を持つが、同一金属でも結晶方位によって仕事関数が異なることが知られている。表2に金属の仕事

関数の結晶方位依存性を示す。結晶方位により仕事関数が異なるのは、結晶方位により原子の密度が異なるからであり、同一金属であれば原子密度が大きい面ほど仕事関数が大きくなる傾向がある。目的の仕事関数を持つカソード電極を得るためには、特定の結晶方位に所望の仕事関数を持つ金属材料を選択し、電極表面をその結晶方位に配向させる必要がある。

表2 金属の仕事関数の結晶方位依存性
(単位:eV)

金属	結晶格子	結晶方位		
		(110)	(100)	(111)
Cu	fcc	4.48	4.59	4.94
Ag	fcc	4.52	4.64	4.74
Ni	fcc	5.04	5.22	5.35
Au	fcc	5.20	5.22	5.26
Al	fcc	4.28	4.20	4.24
Mo	bcc	4.95	4.53	4.55
Fe	bcc	5.05	4.67	4.81
W	bcc	5.25	4.63	4.47

我々は、カソード電極のベース材料として銅を選択した。銅を選択した理由は、銅を(110)面または(100)面に配向させることで4.6 eV以下の仕事関数を持つカソード電極が得られるためである。

図4に、(a)キュープロニックル圧延材で作製した電極、(b)キュープロニックル圧延材に銅メッキした構造の電極、(c)(b)に熱処理を行った電極のX線回折パターンを示す。(a)キュープロニックル圧延材で作製した電極は(220)面に配向している。(b)銅メッキ後の電極は(111)面に配向していることが分かる。銅等の面心立方構造の結晶系の粒子は、原子密度が一番大きい(111)面を最表面にとって安定する傾向にある。(c)熱処理を行った電極は、(111)面のほかに(200)面に起因する回折パターンが顕著に出現する。これらのピークはメッキ層に由来する回折パターンであり、メッキ層、すなわち電極最表面に(200)面が存在することを示している。

熱処理によるメッキ層の変化は、キュープロニックル圧延材の結晶方位配向の変化の影響と考えられる。図4(a)より、キュープロニックル圧延材は(220)面に配向していることが分かるが、加熱すると再結晶が進行し配向面は(200)面に変化する。この影響によりメッキ層の結晶方位が変化し、電極最表面に(200)面が出現すると考えられる。

銅の(200)面と(100)面の原子密度は同じであるため、(200)面の仕事関数と(100)面の仕事関数は同等といえる。また、(c)の回折ピークより、電極表面には(111)面と(200)面が共存することになるが、(111)面と(200)面では、(200)面の方が小さい仕事関数を持つと考えられるため、(200)面が光電効果の起点となる。

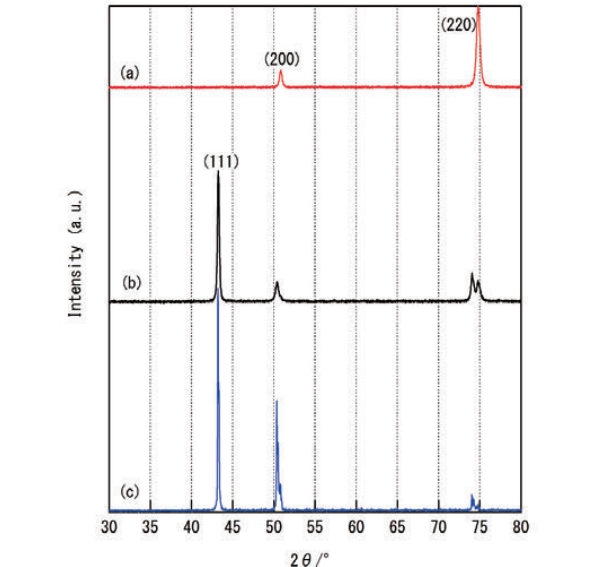


図4 X線回折によるカソード電極表面の結晶方位解析:(a)キュープロニックル圧延材で作製した電極、(b)キュープロニックル圧延材に銅メッキした構造の電極、(c)(b)に熱処理を行った電極

3.2 ニッケル偏析による仕事関数制御

熱処理によって、積極的にニッケルを拡散させカソード電極表面の元素分布に変化を起こすことも可能である。図5に、熱処理前および熱処理後のカソード電極表面におけるニッケルの面分布を示す。熱処理により粒界部にニッケルが偏析していることが確認できる。

ニッケルを粒界へ偏析させる効果について、金属表面の電子分布の模式図を用いて簡単に説明する。

図6で示すように、金属表面付近の電子は、表面から十分深い箇所に存在する電子と異なり、プラス電荷を持つ原子核に引き付けられる力が弱く、真空中にしみ出している。電子が表面から真空中にしみ出しているために、固体側にプラス、真空側にマイナスの電気双極子が発生する。電気双極子が金属中から取り出される電子と相互作用を起こすため、仕事関数は表面の電子状態の影響を受ける。このしみ出している電子は、光電効果の障壁となるため、電子しみ出し量が多い場合仕事関数は大きくなり、小さい場合仕事関数は小さくなる。

仕事関数の異なる2つの原子を接触させた場合、仕事関数の小さい原子から大きい原子に電子が引き付けられる。銅とニッケルを接触させた場合には、銅の電子がニッケル側に引き付けられ、銅近傍の電子しみ出し量が小さくなり、ニッケル近傍の電子しみ出し量が大きくなる。その結果、ニッケルと接触している部分の銅の電子放出障壁が小さくなり、部分的に銅の仕事関数が小さくなる(図6(b))。周囲と比較して仕事関数が小さな箇所は光電効果のトリガーとなり、UVチューブの検出限界波長が長くなる効果をもたらす。実際に我々は、粒界周辺での仕事関数の低下を確認した。

しかし、熱処理条件が不適切な場合は、粒界ではなく粒内で拡散が起こり、電極表面での合金化が懸念される。また、粒界での偏析にとどまらず、さらなる拡散により表面全体をニッケルが覆い尽くすことも懸念される。した

がって、適切な熱処理条件を選定し、ニッケルが粒界拡散によって電極最表面に偏析されることが必要である。

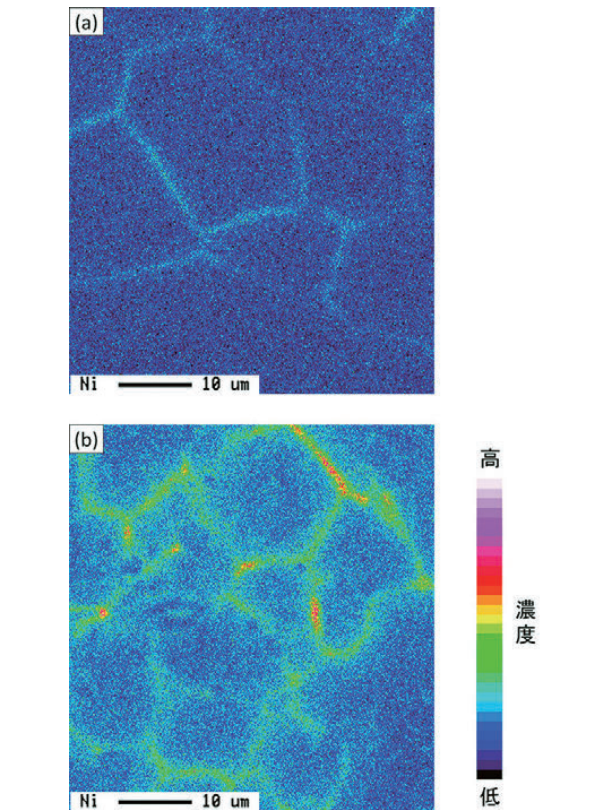


図5 カソード電極表面のニッケル面分布:(a)熱処理前、(b)熱処理後

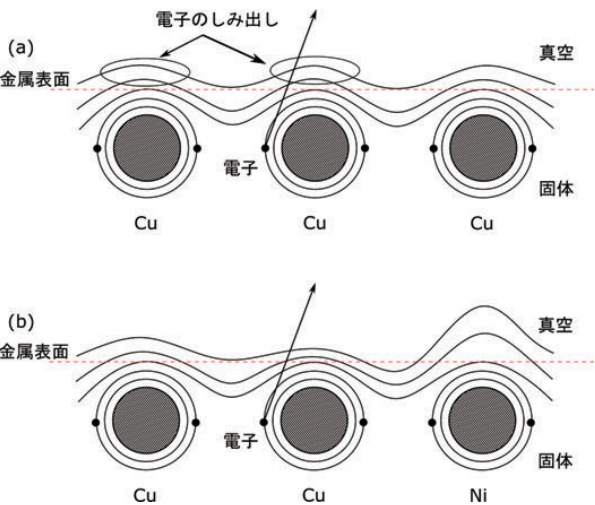


図6 金属表面の電子分布の模式図:(a)銅表面、(b)銅とニッケルが接触している場合の表面

4. まとめ

以上のように、カソード電極の仕事関数制御は結晶方位や電極表面の材料分布を適切な特性とすることにより達成される。図7に、UVチューブの相対感度の波長依存性を示す。線(1)は電極にタングステンを用いているAUD15、線(2)は開発したカソード電極を使用したAUD20の感度特性である。カソード電極に対する熱処理プロセスの開発によって、AUD20は波長185～270 nmの紫外線検出が可能となった。

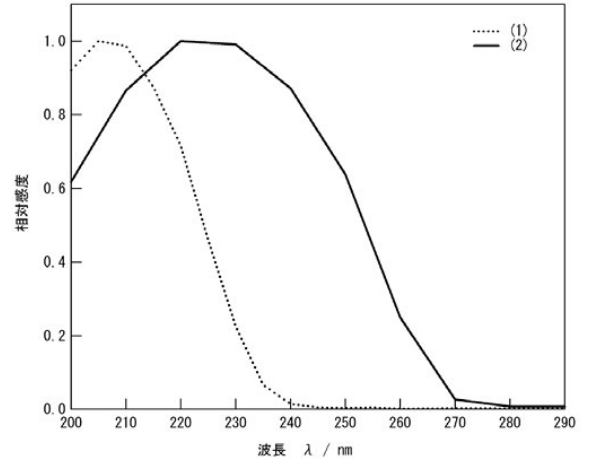


図7 UVチューブの相対感度の波長依存性:(1)AUD15(タングステン電極)、(2)AUD20

5. おわりに

日本のエネルギー消費量の約2割を占める工業炉は、省エネ省・CO₂の点でも注目され、燃料転換、高効率化設備等、様々な施策が行われている。業界動向により燃焼環境が大きく変化しても、常に安定した火炎の検出ができるように、今後も高感度で信頼性の高いUVチューブの開発をしていきたい。

＜参考文献＞

- (1) 關宏治:紫外線検出センサUVチューブの量産技術開発, azbil Technical Review, 2012, pp.68-72, アズビル株式会社
- (2) 関一夫:バーナ火炎の火炎センサ (UVセンサ) による計測と燃焼制御, 日本バーナ研究会会報109号, 2005, pp.6-18, 日本バーナ研究会
- (3) 岩澤康裕 他:ベーシック表面化学, 2014, p.50, 株式会社化学同人
- (4) R. W. Strayer *et al.* : Work function measurements by the field emission method, Surface Science, 1973, Vol34, Issue2, pp.225-248
- (5) 吉武道子 他:仕事関数／イオン化ポテンシャルの計測・評価と制御・利用 事例集, 2010, pp.3-48, 株式会社 情報機構
- (6) 須藤一 他:金属組織学, 1972, pp.109-120, 丸善株式会社

＜商標＞

AUDはアズビル株式会社の商標です。

＜著者所属＞

- 中島 有紀 技術開発本部工程開発部
 片桐 宗和 技術開発本部工程開発部
 住吉 啓介 アドバンスオートメーションカンパニー CP開発部
 築田 菜々子 アドバンスオートメーションカンパニー CP開発部

ディマンドリスponsシステムの開発とバーチャルパワープラント構築実証事業への適用

Development of a Demand-Response System and Its Application to a Virtual-Power-Plant Construction Demonstration Project

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	中村 瑞 Mizu Nakamura
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	水谷 佳奈 Kana Mizutani

キーワード

ディマンドリスpons, ネガワット, アグリゲーター, バーチャルパワープラント, OpenADR

東日本大震災後の電力需給逼迫^{ひっばく}などをきっかけに、ディマンドリスponsという、電力の供給に合わせて需要を調整する手法が注目されはじめた。経済産業省もディマンドリスpons関連の実証事業を開始し、それに応じてアズビルもディマンドリスponsのためのシステムを開発した。本稿ではアズビルのディマンドリスponsシステムである、AutoDRTMシステムと、2016年度から実施されている「バーチャルパワープラント構築実証事業」へのアズビルの取り組みを紹介する。

The demand response method of regulating demand in conformity to the available supply of electric power began to gain attention in the wake of the tight electric power supply situation after the Great East Japan Earthquake. Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry initiated demonstration projects related to demand response, and Azbil has developed a demand response system called AutoDRTM. This paper introduces the system and describes our virtual power plant construction demonstration project, which has been ongoing since 2016.

1. はじめに

2011年の東日本大震災以降、原子力発電所の停止などで電力の供給能力が低下した。当時、国内でいくつかのスマートシティプロジェクトが進んでおり、そこには「ディマンドリスpons」と呼ばれる、電力の供給に合わせて需要を制御する実証も含まれていた。震災以前のディマンドリスponsは省CO₂が主な目的だった⁽¹⁾。しかし、電力会社の電力供給能力が低下したため、電力の需給調整の必要性が高まり、ディマンドリスponsが以前よりも注目されるようになった。このような状況に対応して、経済産業省は2012年度から「エネルギー管理システム導入促進事業費補助金(BEMS)」の事業を開始した。アズビルはこの事業でアグリゲーター

事業者として採択され、複数の建物に設置されているビル管理システムを遠隔から集中管理して、使用電力量の可視化や、電力需給の逼迫^{ひっばく}の度合いに応じたディマンドリスponsを実現した。その後、米国のOpenADR Alliance (URL: <http://www.openadr.org>) が標準として規定している、ディマンドリスponsのシステム関連系プロトコルであるOpenADRを、日本でも利用することになった⁽²⁾。経済産業省のディマンドリスpons関連の実証事業も、OpenADRで通信できることが事実上の参加条件になった。アズビルはOpenADRを使ったディマンドリスponsシステムである、AutoDRシステムを開発して、関連する実証事業に2015年から参加している。

2. ディマンドリスpons関連用語の説明

本稿の内容を理解しやすいように、本稿で使用する用語を説明する。

(1)ディマンドリスpons
ディマンドリスponsは、電力供給側の要請に需要(ディマンド)側が応えて(リスpons)、使用電力量を削減して電力需給を調整することを指す。従来は、需要家(本稿では「建物」と同じ意味で使っている)が使う電力量に合わせて供給側が発電をしていた。ディマンドリスponsはこれとは逆の発想である。本稿では以降、ディマンドリスponsをDR (Demand Response)と略記する。

(2)ネガワット
削減された電力を指す。ネガワットにより、需要家はエネルギーコストを削減できる。また、ネガワット取引ではネガワット量などに応じた収益を得られる。電力供給者側は、ネガワット取引を利用すれば、発電設備の増強などの投資を抑制できる。

(3)アグリゲーター
アグリゲーターとは、多くの需要家を集め、各需要家に使用電力量の削減を依頼して、ネガワットを電力供給側に提供したり、ネガワットを売買する事業者を指す。

(4)バーチャルパワープラント
再生可能エネルギー発電設備や蓄電池などのエネルギー設備、DRによるネガワットなどを統合して、仮想的な発電所とみなすことを指す。本稿では以降、VPP (Virtual Power Plant)と略記する。

(5)OpenADR
DRのために定義された通信プロトコル標準である。米国のOpenADR Allianceが策定および管理している。発電事業者などの電力供給者側のシステムであるVTN (Virtual Top Node)と、アグリゲーター側のシステムであるVEN (Virtual End Node)の間の通信を規定している。VTNとVENの間の通信には、VTNからのDRの要請通知(以降、DRイベントと呼ぶ)や、測定値などの送受信などがある。

OpenADR仕様の最新版はOpenADR2.0bであり、日本ではこの版が標準的に利用されている。

3. AutoDR システム

AutoDRシステムは、アズビルが開発したDRシステムである。アズビルは、このAutoDRシステムを使って、アグリゲーター事業に取り組んでいる。この章では、AutoDRシステムの概略を説明する。

3.1 システム構成
システム構成を図1に示す。AutoDRシステムは、アズビルのアグリゲーションセンター(以降、センターと略記する)に設置している。AutoDRシステムは専用ネットワークを使って、需要家側に設置されているビル管理システムのLANと接続している。AutoDRシステムはこの専用ネットワークを経由して、ビル管理システム側に、DRを実現するための制御などを遠隔から実行する。

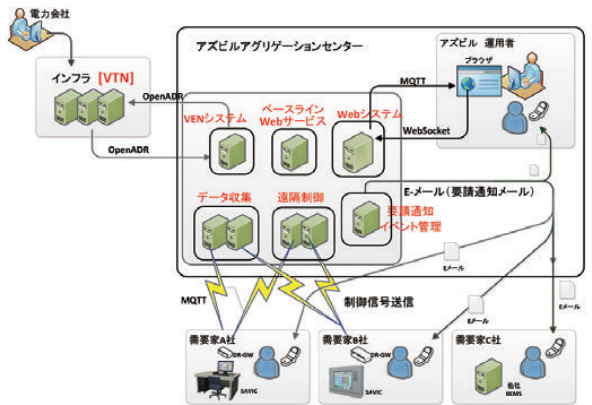


図1 AutoDRシステムのシステム構成

AutoDRシステムは、以下の6つのサブシステムで構成している。

- ・VENサブシステム
- ・要請通知イベント管理サブシステム
- ・データ収集サブシステム
- ・ベースラインWebサービス
- ・遠隔制御サブシステム
- ・監視用Webシステム

この節では、これらのサブシステムの概要を説明する。

3.1.1 VEN (Virtual End Node) サブシステム
OpenADRで定義されているVENの機能を提供するサブシステムである。発電事業者などが運用するVTNと連携してDRを実現する。AutoDRシステムのVEN機能はOpenADR2.0b準拠の認証を取得しており⁽³⁾、OpenADRに対応しているVTNに接続可能である。

3.1.2 要請通知イベント管理サブシステム
本サブシステムは、VENサブシステムがDRイベントを受信した場合に、関係者へDRが要請されたことを通知する。通知する方法には、下記の3つがある。

(1)要請通知メール(需要家向け)
AutoDRシステムからDRを要請するすべての需要家の関係者に、要請通知メールを送信する。自動で需要の抑制制御をしない需要家の関係者は、このメールを受信すると、設備を停止させるなど、需要抑制のための操作を手動で実行する。

(2) 要請通知警報(需要家向け)

需要抑制の要請があったことを、現場のビル管理システムの警報を発生させることで需要家に通知する。通知を受ける対象者はビル監視業務の担当者を想定している。

(3) 要請通知イベント管理画面(アグリゲーター向け)

AutoDRシステムの運用者が、DRイベントをリアルタイムで監視する機能である(3.2.3項を参照)。DRイベントをリアルタイムで表示し、ブザー音を鳴らすことができる。

3.1.3 データ収集サブシステム

使用電力量の実績などを記録するために、計測値を収集するサブシステムである。これは以下の2つの機能で構成している。

(1) DRゲートウェイ

需要家の建物に設置するゲートウェイである。ビル管理システムから1分周期で使用電力量の計測値を取得し、センター側のMQTT (Message Queue Telemetry Transport) ブローカへリアルタイムで送信する。

(2) 時系列データ蓄積

MQTTブローカ経由で、DRゲートウェイから受信した計測値をデータベースに保存する機能である。

3.1.4 ベースラインWebサービス

需要抑制制御の結果、どれだけ電力を削減できたかを計算する必要がある。この場合、需要抑制制御をしなかった場合の使用電力量の予測値が必要である。これをベースラインと呼ぶ。
ベースラインにはいくつかの計算方法が決められている⁽⁴⁾が、本システムでは、標準ベースラインであるHigh 4 of 5 (当日調整あり)ならびに事前計測の2種類を、5分または30分周期のデータを使ってリアルタイムで算出している。
ベースラインの値はWebサービスで提供しており、ほかのサブシステムから容易に利用できる。

3.1.5 遠隔制御サブシステム

需要家の設備を、現場のビル管理システムを経由して、遠隔から制御する機能である。制御には次の2種類がある。

(1) 発停制御機能(設備のOFF/ON制御)

空調機や照明などの設備を遠隔から自動で、停止または運転する機能である。DRイベントで要求された時刻に設備を停止し、DRイベントで要求された継続時間が経過した後に運転を再開させる。

(2) 設定値制御機能(室温設定等アナログ値設定制御)

室温、開度、周波数などのアナログ値を遠隔から自動で、指定幅分下げる、または上げる機能である。発停制御と同様にDRイベントで指定された時刻に設定値を変更し、DRイベントで要求された継続時間が経過した後に設定値を元に戻す。

3.1.6 監視用Webシステム

AutoDRシステムのユーザーインタフェースを提供するサブシステムである。
WebSocketやMQTTなどの技術を利用することで、ブラウザでのリアルタイムでのイベント監視を実現している。
本サブシステムの利用者は、AutoDRシステムの運用者のみを対象にしている。詳細は3.2節で説明する。

3.2 ユーザーインタフェース

AutoDRシステムのユーザーインタフェースは、以下の4つの機能で構成している。

3.2.1 制御設定機能

電力会社ならびに需要家の情報(提供するサービス等の設定、メール送信アドレス、受電ポイント、設備制御のポイントなどの情報)を設定する機能を提供する。画面の例を図2～図4に示す。
図4の制御設定画面では、緊急時に設備の制御を止めることもできる。



図2 電力会社情報設定画面



図3 需要家情報設定画面



図4 制御設定画面

3.2.2 ディスパッチ設定機能

ここでの「ディスパッチ」とは、DR時に需要抑制する需要家を選択することである。図5に示すディスパッチ設定画面で、DRイベントで指定された条件に応じて、どの需要家にディスパッチするかを設定する。
本システムでは、次の2種類のディスパッチ方法が選択できる。



図5 ディスパッチ設定画面

(1) 手動ディスパッチ

あらかじめ決めた需要家すべてを制御対象とするディスパッチである。

(2) 自動ディスパッチ

自動ディスパッチでは、DRの時間帯やDRで要請された削減量などの条件に応じて、システムが自動でディスパッチする建物を選択する。

AutoDRシステムは、リレーディスパッチに対応している。リレーディスパッチとは、要請されたDR時間帯を複数の時間帯に区切り、複数の需要家で分担して需要抑制制御をするDR手法である。リレーディスパッチは、手動ディスパッチと自動ディスパッチの両方で利用できる。
リレーディスパッチの設定画面を図6に示す。



図6 リレーディスパッチ設定画面

3.2.3 イベント監視画面機能

図7に示すイベント監視画面は、DRイベントや、需要家設備の警報、制御の失敗、データの欠測など、DRを実行するために必要な各種イベントの情報を、リアルタイムに監視する画面である。



図7 イベント監視画面

イベント監視画面は、VENや遠隔制御などのサブシステムからのイベントをMQTTブローカから取得することで、リアルタイム監視を実現している。WebブラウザからMQTTブローカには、WebSocketを使って接続している。
図8にVTNからのDRイベントをイベント監視画面に表示するまでのデータの流れを示す。

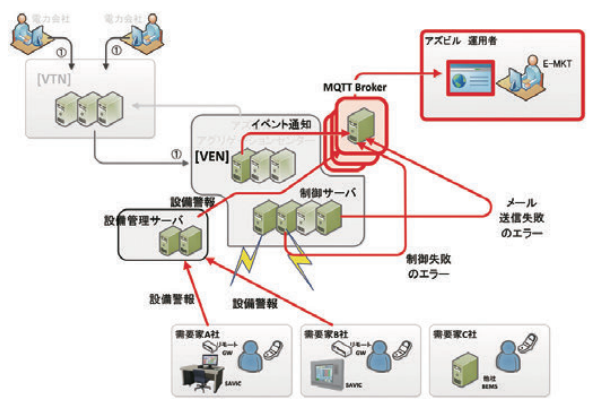


図8 イベント監視の流れ

3.2.4 状態監視画面機能

状態監視画面は以下の2つの画面で構成している。

(1) ポイント監視画面

図9に示すポイント監視画面は、制御対象ポイントの設定値の、直近4時間の変化を表示する画面である。
この画面は、制御対象のポイントの設定値が別の制御プログラムなどが変更していないかを監視するために使う。

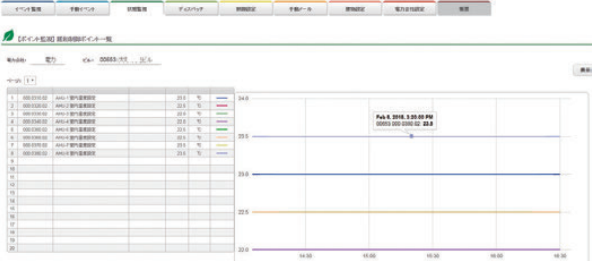


図9 ポイント監視画面

(2) 削減量監視画面

図10は、DR要請により需要抑制制御を実行している間の、5分ごとの削減量を表示する削減量監視画面である。
目標値と実績値(削減量)を表示することで、目標未達の兆候を早期に発見することができる。



図10 削減量監視画面

3.3 ディマンリスボンス制御の流れ

この節では、本システムでのDR制御の流れを説明する。

3.3.1 VTNからDRイベントを受信する

AutoDRシステムは、OpenADRプロトコルでDRイベントを受信する。このDR要請を受け入れる場合は、VTNへ“OptIn”を返す。要請を拒否する場合はVTNへ“OptOut”を返す。

3.3.2 DRイベントの内容から制御をスケジューリングする

受信したDRイベントの内容(制御開始時間、制御継続時間、削減量)を確認し、あらかじめデイスパッチ設定された需要家の情報を加味しながら、制御対象とする需要家とその制御時間帯を計算する。計算された結果に基づき具体的な制御の時間帯をスケジューリングする。

3.3.3 制御対象の需要家に事前の通知を送る

制御対象の需要家を決めると、その需要家に登録されているメールアドレスへ制御開始の予告メールを送信する。遠隔から設備を制御しない需要家の場合は、このメールに従って、需要家側の設備管理者が手動で設備を停止するなどの操作を実行する。

3.3.4 制御開始～制御終了

3.3.2で決めたスケジュールに従って需要家の設備を遠隔から制御する。制御中は、AutoDRシステムの監視系画面で、制御の状況などを確認できる。

また、VTNから要求されれば、OpenADRのレポートサービスを使って、計測値などを送信できる。

3.3.5 制御終了後

制御終了後、VTNからの要求に応じて、VTNへレポートを送信する。例えば、DR時間帯の1分周期の使用電力や、その間のベースラインの値を送信できる。

4. 2016年度 VPP実証事業の紹介

2016年度、アズビルは経済産業省の「バーチャルパワープラント構築実証事業」の「B.高度制御型ディマンリスボンス実証事業」に、アグリゲーター事業者として参加した。

2016年度の実証事業の主な特徴は次のとおりである。

(1) DRイベントで削減容量が指定される

前年の実証事業では、DRで削減する容量は、需要家ごとにあらかじめ取り交わした契約容量だった。しかし、2016年度の実証事業では、DRイベントごとに異なる削減容量が指定されるようになった。

(2) DRの成功基準が厳格になった

前年の実証事業では、需要家ごとにあらかじめ取り交わした契約容量以上を削減できていれば成功と判定されていた。

2016年度はDRイベントで指定された削減容量の±10%以内に収まることが成功条件とされた。また、需要家ごとに成功か失敗かを判定するのではなく、アグリゲーターとして成功か失敗かを判定するようになった。

上記の特徴に、AutoDRシステムとしてどう対応したかを紹介する。

(1)ではDRイベントごとに削減容量が指定される。そのため、図11のように、デイスパッチ設定画面でデイスパッチ対象の需要家建物のグループを複数登録できるようにした。どのグループを使ってデイスパッチするかは、DRの時間帯や要求された削減容量から、削減可能性が近いものを自動で選択するようにした。



図11 デイスパッチ設定の例

(2)では要求された削減容量の±10%の精度が要求される。しかし、削減量の変動要素が多い需要家建物や、発電機などの突発的な故障などにより、計画どおりに使用電力を削減できないこともある。そのため、図10の削減量監視画面や図7のイベント監視画面で、AutoDRシステムの運用者が計画とのかい離や設備の異常を早い段階で検知できるようにした。

計画とのかい離があった場合は、AutoDRシステムの運用者は別途、遠隔設備管理システムを使って、追加で機器の動作を停止させるなどの処置ができるようになっている。

その他、アズビルの実証結果の詳細は参考文献⁽⁵⁾に記載している。

5. おわりに

アズビルは2017年度もVPP実証事業に参加している。2017年度の実証事業では、下記の2つの機能を追加している。

- ・OpenADRのレポートサービスを使った各種計測値のVTNへの送信
- ・リレーデイスパッチ (3.2.2節を参照)

今後、削減容量を目標値に一致させる精度を上げるためのデイスパッチアルゴリズムの改良や、AutoDRシステムの運用者の利便性を向上させるなど、多くの改良に取り組んでいく予定である。

<参考文献>

- (1)独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO再生可能エネルギー技術白書, 2010, pp. 531-538
- (2)JSCAスマートハウス・ビル標準・事業促進検討会, デマンドレスポンス・インタフェース仕様書, <http://www.meti.go.jp/>
- (3)<https://products.penadr.org/product/azbil-corporation-azbil-dr-system/>
- (4)経済産業省 資源エネルギー庁, ネガワット取引に関するガイドライン, <http://www.meti.go.jp/>
- (5)アズビル株式会社, バーチャルパワープラント構築実証事業成果報告書, <https://www.iae.or.jp/download/a-1-3vpp/?wpdmdl=8989>, 2017

<商標>

AutoDRはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|---|
| 中村 瑞 | アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー 開発本部開発3部 |
| 水谷 佳奈 | アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー マーケット本部
環境マーケティング部 |

IoT時代の熱源コントロール・ソリューションの紹介

A Heat-Source Control Solution for the IoT Era

アズビル太信株式会社

小林 広伸
Hironobu Kobayashi

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

山田 晃
Akira Yamada

キーワード

熱源機器, 燃焼制御, ボイラ, IoT, メンテナンス, 燃焼安全規格, 省エネルギー

成熟市場といわれるボイラや冷温水装置に代表される熱源機器の市場においても、温暖化対策、省エネルギー、環境負荷低減、少子高齢化対策、安全・安心の社会の実現など、取り組むべき多くの課題がある。

熱源機器を取扱うメーカーにおいては、これらの課題に対応するために装置の高性能高機能化に取り組んでいる。今回、業務用熱源機器メーカー向けの相手先ブランド製品として、ユーザーの課題に柔軟に対応でき、かつ、アズビルの最新の燃焼安全技術を用いて制御性と安全性を高いレベルで両立したコントローラを開発したので紹介する。

In a mature heat-source equipment market typified by boilers and cold/hot water equipment, many challenges remain, such as devising measures to counter global warming, to promote energy efficiency, to minimize the burden on the environment, to counteract declining birthrate and an aging population, and to realize a safe and secure society.

Manufacturers of heat source and related equipment are working to make high-performance and advanced-function equipment that can help to meet these challenges. In this paper we report on the development of a flexible controller for original equipment manufacturers (OEM) of industrial heat source equipment. The controller can handle a variety of user requirements, and it incorporates Azbil's latest combustion safety technology in order to provide a high level of both controllability and safety.

1. はじめに

原発事故は、我が国のエネルギー政策の大きな転機となり、一時的に化石燃料に依存せざるを得ない状況にある。こうした状況は、エネルギーコストの上昇と温室効果ガスを増大させる原因となり省エネルギーの対応が急務となっている。ボイラや冷温水装置に代表される熱源機器は燃料消費を少なくするために、より効率化が求められ制御は高精度・高速化に向かっている。一方、熱源機器の多くは燃焼を伴うため爆発・火災のリスクに対する安全性の確保が必要である。これまで制御性と安全性はトレードオフの関係にあると考えられ、これらを両立させることは課題となっていた。アズビルでは従来のハードウェアによる安全設計に代わりソフトウェアによる燃焼安全技術を開発した。これはソフトウェアの特性を活かし精度が高く、ユーザーの課題に柔軟に対応することができる。今回、最新の燃焼

安全技術を用いた制御性と安全性を高いレベルで両立し、今後の熱源機器のIoT化に対応できるコントローラを開発したので紹介する。

2. アズビルのソリューション

アズビルが販売する燃焼安全機器は、カタログに掲載される標準品と、熱源機器メーカーの要求仕様に応じた相手先ブランド製品(以後、カスタム品と呼ぶ)に分類できる。

バーナコントローラ(形番:BC-R15/25/35)に代表される標準品は、燃焼安全に最小限必要な機能に絞り込むことで汎用性を高め、多種多様なアプリケーションに対応できる。安全機能を集約することで安全系と制御系の分離が容易となり、より確実な安全計装を行うことができる。しかし、別途、調節計やPLC(プログラマブル・ロジック・コントローラ)などの制御機器が必要となるため、コストや省ス

ペースにおいて不利な面がある。また近年、グローバルに展開するため各国の安全規格を取得する必要がある。これらは機能安全規格をベースとしたマイコンおよびソフトウェアを主体とした規格となっており、多くの安全手法を取り入れる必要がある。設計、検証項目は多岐にわたり、最終的に第三者機関による認証を受ける。よって開発のリードタイムは長期化する傾向にある。

一方、アズビルが開発委託を受けるカスタム品の多くは、システム全体を統括する一体型コントローラであり、温度・圧力制御、水位制御、表示操作部、ユーティリティ制御、通信、燃焼制御が含まれる。装置固有の危険源があり、個別にリスクアセスメントを実施し必要な対策を行うことが重要となる。アズビルの安全・安心設計に対するお客さまの期待に応えるために、バーナコントローラ(形番:BC-R15/25/35)などの標準品で培った安全技術のレベルを下げることなく、サイズ、コスト、納期面で制約のあるカスタム品へいかに適用することができるかが課題であった。

これらカスタム品特有の厳しい制約や要求に対して、受託開発に豊富な実績を持つアズビル太信が開発を担当することで開発リードタイムの短縮とサイズ／コストの最適化が可能となった。

電子部品が搭載されるプリント基板は、リードタイプ部品の自動実装、表面実装タイプ部品の自動実装、リレーやコネクタなどの機構部品の人の手による実装、防湿や絶縁のためのコーティング処理など、様々な工程を経て完成す

る。アズビル太信のものづくりは、組織間の距離が近く、開発と製造部門で密に連携できることで製品の試作段階から、工程の最適化を意識した設計となっている。これにより、試作回数、設計の手戻りが少なくなることで開発期間が短縮でき、また、効率的な生産によりコストの低減が可能となった。

カスタム品における安全確保の方法については、次章以降で紹介する。

3. 最新のコントローラ設計

図1に、最新コントローラのアーキテクチャ例を示す。安全システムの基本として安全系と制御系を分離する必要がある。今回、燃焼安全系、システム安全系、制御系の3つの系で構成した。

燃焼安全系は、燃焼安全規格の第三者認証を取得したバーナコントローラ(形番:BC-R15/25/35)と同様のハードウェアおよびソフトウェアで構成している。

システム安全系は、重要な機能を、ソフトウェアを介在せずに独立したハードウェアで構成することで安全を確保している。

制御系は、安全関連部と完全に切り離されることで安全設計・検証を不要とし、安全設計を意識せずに制御機能を作り込むことができる。

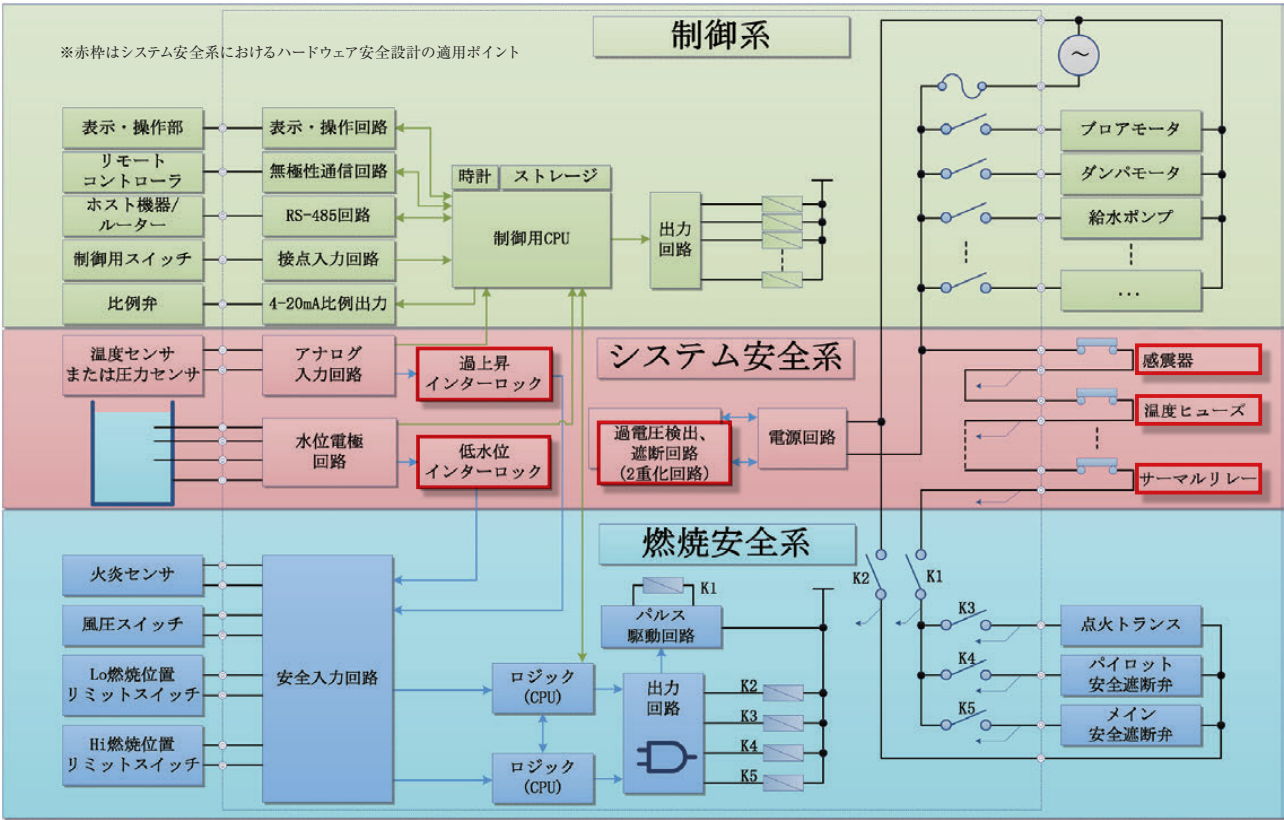


図1 最新コントローラのアーキテクチャ例

3.1 燃焼安全系

燃焼安全系の目的は爆発を防ぐことであり、炉内に未燃燃料が蓄積されている状態で点火させないこと、運転中に何らかの原因でバーナが断火した場合は、即座に燃料供給を遮断することが必要となる。

燃焼安全系の構成は、実績のあるアズビルのバーナコントローラ（形番:BC-R15/25/35）のアーキテクチャ(図2)を採用した。安全アーキテクチャは、1oo2D (1 out of 2 channel with Diagnostics)とし、ロジック（CPU）と出力部は2重化されている。

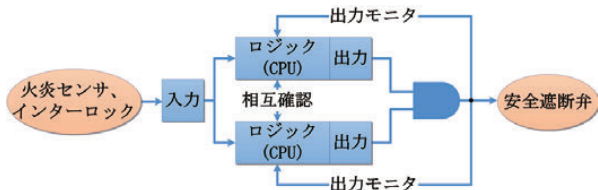


図2 安全アーキテクチャ

診断機能として出力のモニタリング、ロジック（CPU）間の相互確認が行われる。安全関連の内部信号をパルス化（ダイナミック信号）することで診断系も含めて部品の危険側故障を検出可能とした。

ロジック（CPU）部は、次に示す燃焼安全の根幹となる燃焼シーケンスの実行を行う。

- (1) 起動時に安全関連部が正しく動作しているか確認を行う（スタートチェック）。
- (2) 点火前には決められた時間のバージを行い確実に未燃ガスを排出する（プレバージ）。
- (3) 決められた時間内に点火できない場合は、確実に燃料遮断を行う（点火トライアル）。
- (4) 運転中に火炎が消失したら、即座に燃料遮断を行う（フレームレスポンス）。

これらが常に正しい順序とタイミングで行われることが、ロジック（CPU）に求められる。万一の事故においては人命を損なう危険性があるため関連する安全規格（IEC60730-2-5）では、ソフトウェアクラスCという一番厳しい安全レベルを満たすことが求められる。ここでは2つの側面がある。側面の1つは、ロジック（CPU）部の故障に対する対応としてハードウェアの構成要素の全てについて可能な限り診断しなければならない。以下に診断の内容について示す。

- ・演算/制御結果について自己および相互チェック
- ・安全パラメータの自己および相互チェック
- ・プログラム実行順のチェック
- ・内蔵RAM、レジスタの固着チェック
- ・CRCコードによるFlashROM、EEPROMのチェック
- ・割込み処理層のデッドロックチェック
- ・スタックレジスタのチェック
- ・命令コードの動作チェック
- ・タイマ割込み処理の周期チェック
- ・CPU間通信のフォールト抑制

もう1つの側面としてソフトウェアのリスクに対処する必要がある。ソフトウェアのリスクは偶発的な故障というものは

なく、安全仕様の不備やバグなどの設計ミスによるものであり、条件がそろえば100%顕在化するものである。複雑に絡み合うソフトウェアの中で作り込まれる人為的なミスを回避するために、関連規格で定義された開発プロセスや設計技法を適用することが求められている。開発品においては、バーナコントローラ（形番:BC-R15/25/35）で欧州の第三者認証機関に監査を受けたソフトウェアのアーキテクチャ、自己診断処理を、そのまま使用することで安全レベルを維持した。このソフトウェアは、あらかじめ作り込まれている安全機能について任意のパラメータを選択することで設備に要求されるシーケンスやタイミングを実現することが可能となっている。

例えば、プレバージ時間は任意に設定可能となっておりプロアや燃焼室容積に合わせて最適化することを可能とする。安全に関連するパラメータ変更は、プログラムコードの変更を伴わないため検証が不要となり、ソフトウェアの変更リスクや開発工数を低減できる。

燃料を遮断する安全遮断弁を駆動するリレーの接点溶着故障は最も危険な故障の1つである。そのため、燃焼シーケンスを開始する前にリレー接点の開閉をチェックし、正常に開閉ができることを確認してから動作を開始する。図3のように、安全遮断弁のリレー接点は両切り接点構成とし、3つのリレー接点が直列に入る。また全てのリレー接点は、正しく動作しているか常にモニタリングされていることから極めて安全度は高い。

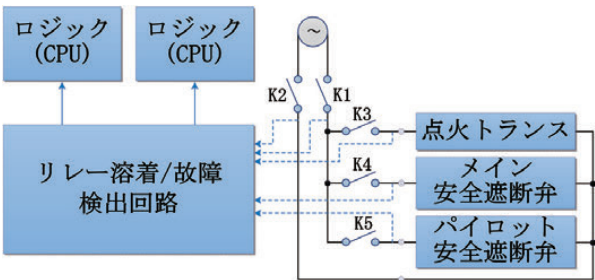


図3 リレー接点構成

3.2 システム安全系

システム安全系は装置固有のリスクに対応する。

缶体の過昇温や、モータ焼損などの火災リスクに対して温度ヒューズを、直接、電源と駆動リレーの間に挿入し、温度ヒューズ作動により供給電源が遮断される構成とした。ソフトウェアが介在しないため安全性が高い設計となる（図1の感震器、温度ヒューズ、サーマルリレーに該当する）。

ボイラ内の水位が低下しているときに燃焼を継続すると空焚きとなり破裂・圧かいや火災のリスクとなるため低水位検出は重要な機能となる。回路故障により水位検出の誤検出とならないように検出信号をパルス化し、故障時は運転停止となるように考慮されている（図1の低水位インターロック回路に該当する）。

3.3 制御系

燃焼安全系の2重化されたCPUとは別に、専用に制御系を担当するCPU（制御用CPUと呼ぶ）を用意し、全体とし

て3つのCPUで構成される。制御系CPUは、表示操作、温度制御、ユーティリティ制御、通信など装置機能を担当する。安全系と分離されているので、制御用CPUのソフトウェア設計は、安全のための設計、検証作業は不要となる。メリットとして制御性をより向上させるために装置を熟知した熱源機器メーカーの技術者がソフトウェアを設計し、アルゴリズム開発を行うことが可能となる。またお客さまから要求される個別要求にも短いリードタイムで対応することが可能となる。アズビルの基幹技術である高度な制御技術や通信技術を組込むことも可能である。

4. アズビル独自の安全設計

4.1 共通原因故障の対応

燃焼安全系は2重化設計としていることで危険側故障率が大幅に低減できていると過大評価される場合がある。実際のところ2重化しても故障率はそれほど小さくならない。例えば各チャンネルの故障率が 10^{-6} (/hr)の時、故障率が全体として 10^{-12} (/hr)のように2乗で小さくはならない。

機能安全規格IEC 61508では、いかに多重化しても共通原因故障割合 β が存在し0.1～0.01程度の改善しか望めないとしている。先の例では、 10^{-7} ～ 10^{-8} (/hr)程度の改善となる。通常、燃焼安全機器としては、 10^{-7} (1/hr)未満（数千年に1度程度）の故障率が求められる。共通原因故障とは、ソフトウェアのバグ、マニュアルの間違いなど条件がそろえば2重化された双方で同時に起こる可能性が高い事象が対象となる。関連規格における共通原因故障対策のための設計技法の一部を示す。

- (1) 設計時に共通原因故障を考慮し、評価結果がフィードバックされているか。
- (2) 異なる設計者が設計したか。
- (3) 使用する設計上の技術は5年以上実際に首尾よく稼働したか。

アズビルでは、これら設計技法を開発プロセスに取込み開発を行っている。次に、共通原因故障対策の実施例を紹介する。

4.2 電源故障対策

2重化されていない電源の異常は共通原因故障となる。CPUなどの半導体部品は許容範囲を超えた電圧の印加に対して動作保証されず、CPUが暴走し制御不能となる危険性がある。本来、電源についても2重化が望ましいが、製品の小型化やコスト面で不利となるため、1つの電源に対して、過電圧検出と電源遮断機能を2重化することで対策としている。

4.3 EMC対策

2重化されていない入力端子がノイズの影響を受け、入力値を誤認識したり、ノイズの影響で2重化されたCPUが同時に誤動作することも共通原因故障といえる。関連規格のノイズ基準を超える独自の試験方法によりマイコンの誤動作レベルと動作モードを確認し、安全確保を行っている。これは燃焼安全機器の長年の販売実績がある当社のノイズ

対策ノウハウとなっており、強力なノイズ源となる点火装置や、インバータが発生するノイズを模した機器により試験を行っている。

4.4 CPUクロック故障対策

安全上重要なシーケンスタイミングのカウンタはCPUのクロック周期に依存している。2重化されたCPUのクロック源として、それぞれセラミック発振子が実装されているが、発振子は動作原理と製造プロセスが同一のため、温度特性や経年変化が同じ傾向となる場合が多い。

したがって同じような割合でクロック周期が変動した場合は、CPU間で相互比較しても異常検出できない危険性がある。そこで商用電源周期のチェックを追加し、シーケンスタイミングの正しさを保証している。

5. 熱源機器のIoTへの方向性

IoTとは、インターネットを通じてあらゆるモノやサービスが連携する仕組みであり、あらゆる分野で、このIoTを活用して新しい価値やビジネスモデルの創出を目指す動きがある。熱源機器の市場においてもメンテナンス効率化や省エネルギーなど、IoTにより多くの恩恵が受けられると考える。IoT活用の一歩としてアズビルでは機器の内部データを有効に利用し、機器の一層の見える化を進め課題の解決と企業の利益に貢献したいと考える。

5.1 メンテナンスの効率化

少子高齢化、人口減少へ向かう中で熟練技術者が少なくなり人手不足の問題と、スキル不足により定期点検の不備や操作ミスによる事故の増加などが懸念される。従来の定期点検主体の予防保全から、機器診断により故障を事前に察知して修理を行う予知保全に移行することでメンテナンス業務を効率化することができ、お客さまにおいてはダウンタイムがより少なくなるメリットがある。効率的な予知保全を実現するための機器の対応としてはアクチュエータが動作してからセンサが応答するまでの遅れ時間を計測し記録し、その結果を見える化する。

これによりアクチュエータの異常、断熱材の劣化など、各部位の状態変化が進んでいることを捉えることができる。計測項目の例を次に示す。

- (1) センサ（風圧スイッチ、インターロック）の動作遅れの計測
- (2) 着火遅れ時間の計測
- (3) 火炎レベルトレンドの計測
- (4) 昇温時間の計測
- (5) エラーに至らない疑似火炎、残火の頻度の記録
- (6) リトライの発生状況の記録

燃焼機器のトラブルとして多い着火ミスを具体例として示す。着火を阻害する要素として送風経路の詰まりや、点火ロッドの絶縁劣化、ガス圧の変動、火炎センサの汚れなどがある。多くの場合、これらの劣化は時間経過とともに徐々に進行していくので、正常データを記録し、そのデータ

との比較を行うことで、劣化の検出を行うことができる。図4のように点火ごとに現在値と比較し、着火遅れの状況を把握することで機器の劣化を知り、着火ミスに至る前に対処することができる。

また季節などの外的要因で着火性が変わる場合は、季節ごとの初期データを取得し、そのデータと比較することで、劣化判定の精度を向上させることもできる。

それぞれの計測データにおいて、時間、日、週、月のそれぞれの時間軸におけるトレンドを見ることで、外的要因の影響などをあらかじめ把握することもできる。

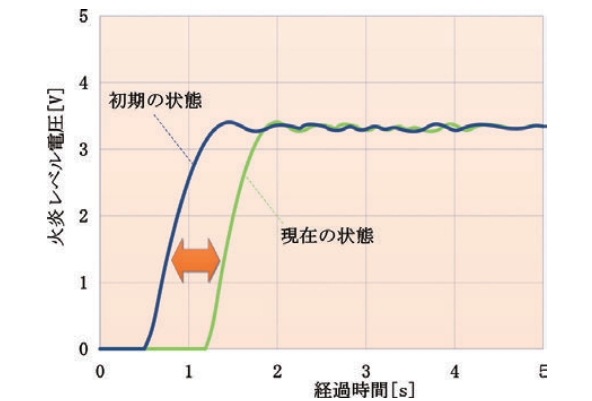


図4 着火遅れ状況の可視化

5.2 現場トラブルの対応

トラブルが発生すると状況把握、修理・調整、確認など数回の訪問サポートが必要になる。機器はブラックボックス化が進み故障要因の特定が難しくなる状況にある。そこで機器の対応としては、次に示す異常発生時の詳細な状況を記録することで原因究明をサポートする。

(1)エラー発生前後の状態のトレンドグラフ
(2)エラー発生履歴

図5に遠隔監視ソリューションのイメージを示す。高解像度のモニタやタブレットを活用し、遠隔地より状況を確認することで現場訪問前に機器状態が把握できる(図6)。この例では、燃焼ガス流量が低下することで空燃比が乱れ、断火に至ったと推定することができる。このように1次対応の段階で原因推定により対策を絞り込み、交換部品やツールを事前に用意することができるため、早期に復旧を行うことができる。

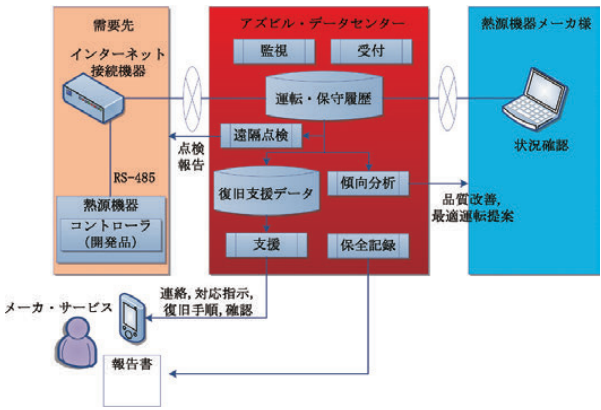
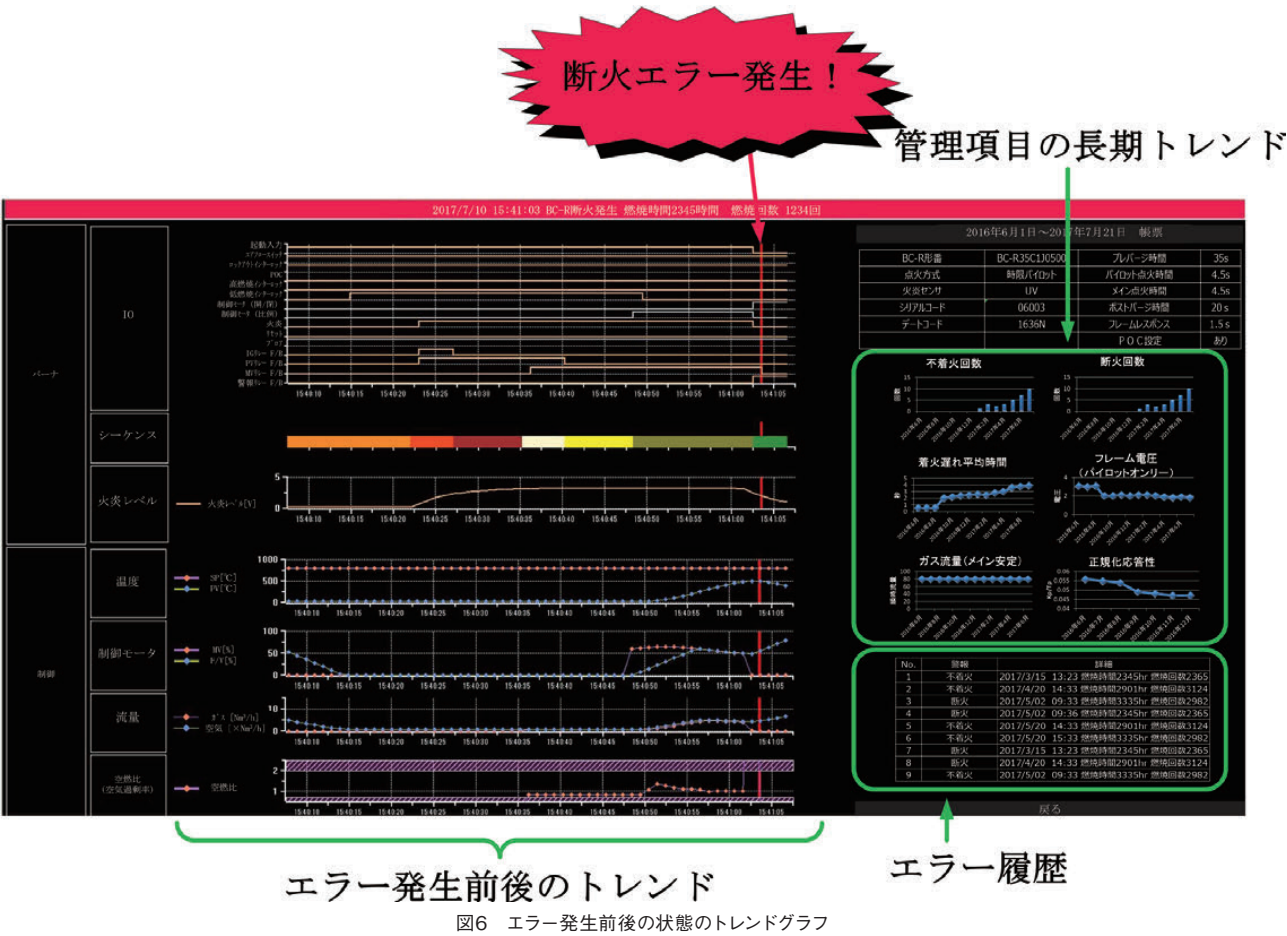


図5 遠隔監視ソリューション



エラー発生前後のトレンド

図6 エラー発生前後の状態のトレンドグラフ

エラー履歴

熱源機器の省エネ性能は飛躍的に向上した。しかし、機器の省エネ性能を100%発揮させるためには、日々のメンテナンスが重要である。省エネルギー法では、効率、空気比、排ガス温度などの管理指標を設定し計測および記録し、エネルギーの効率的利用を維持することを求めている。将来的には、ネットワークを介して、すべての熱源機器、センサをクラウドと接続し、管理指標の見える化を実現し、さらにディープラーニングを活用した運転状態の最適化を行うことで装置の省エネルギーに貢献していきたいと考える。図7に、azbilグループの熱源コントローラに対するIoT化のアプローチを示す。

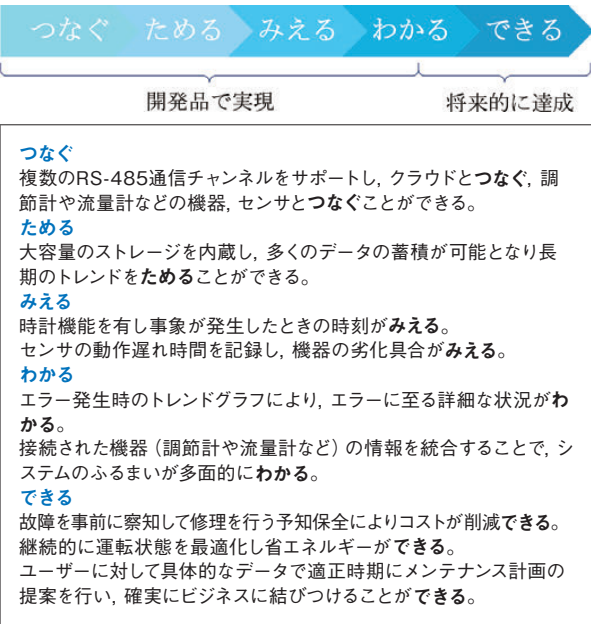


図7 熱源コントローラのIoT化アプローチ

6. おわりに

アズビル太信の将来的なコア技術を目指して、2013年秋よりこの燃焼安全機器の開発準備を進めてきた。

単なる生産拠点の位置付けではなく、開発を主体的に行い、さらに生産に対する管理、品質保証をも責任をもって行うためには、最新の燃焼安全技術の吸収や最新の開発プロセスの習得、様々な管理体制の整備が急務であった。そのために技術者のアズビルへの出向と若手技術者の増員など人材計画を実施し、継続的に開発が可能となる体制を作ってきた。

生産体制としても最新鋭の表面実装ラインへの切替え、X線検査装置、コーティング剤自動塗布機などの新規導入など、汎用生産設備の高効率化も並行して検討・実施し効率化と品質面で高いレベルでの体制を構築することができた。生産設備のうち、電気試験設備等は、検査仕様に基づき社内で製作することによって、正確で迅速な生産立ち上げを可能とし、開発効率を上げることができた。

今後も、「人を中心としたオートメーション」の理念に基づき、最新の燃焼安全技術を核として、さらにIoT活用を促進させて、お客さまを含め人々の「安心、快適、達成感」の実現のために、生産活動を追求し続けていきたいと考えて

いる。

<参考文献>

- (1)IEC61508-3:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related system - Part 3
- (2)2重化システムのMTBF 共通要因故障の有無の影響 <http://controlsystemlab.com/index.php/fs-mtbf-duplex/> 制御システム研究所

<著者所属>

- 小林 広伸 アズビル太信株式会社 開発部
- 山田 晃 アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー CP開発部



azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2018年4月発行号

発 行 日 2018年4月1日(通巻59号)
発行責任者 高橋実加子(アズビル株式会社 経営企画部広報グループ)
編集委員会 委員長：塩手良知
委 員：増子正、百瀬修、筒井宏明、安藤啓之、小浜孝光
事務局：小貝正義、菅野裕子
発 行 所 アズビル株式会社 経営企画部広報グループ
〒100-6419 東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル
TEL.03-6810-1006

本誌掲載の論文は下記サイトでご覧いただけます。
<http://www.azbil.com/jp/corporate/pr/library/review/>
©2018 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。