

# azbil

アズビル株式会社

〒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

2020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

2020年4月発行号

特集：社会課題の解決に貢献するazbilグループの多様性



## 表紙について

日本一の山が作り出す、独特な大気の「流れ」

## 富士山の笠雲・吊るし雲

標高約 3776m を誇る日本一の山である富士山。山脈が多い日本の山の中では珍しい独立峰として存在し、東西南北どの方向からでも、長い裾野を広げた美しい姿を見せてくれます。また、季節ごとに様々な顔を見せる富士山は、国内だけでなく、世界の人たちをも魅了しています。

そんな美しい山のそばに、珍しい雲が出現して、目を見張ることがあります。その代表が、笠雲や吊るし雲です。笠雲はまるで笠をかぶせたように山頂を覆う雲、吊るし雲は山頂から少し離れた場所に円盤が積み重なったように見える雲を指します。

雲は、地表近くの水蒸気が上昇気流によって空高く上げられることによってつづられます。周囲に遮るものがない富士山は、湿気を含んだ風が直接山肌にぶつかるので、上昇気流が起こりやすいのです。笠雲は、水蒸気を含んだ風が山を乗り越えるように上昇していくことで、形づくられます。ただし、笠雲ができるにはいくつかの条件があります。

まずは風の強さ。風が弱いと、山をう回して反対側に回りこんでしまうので、山頂を乗り越えるためには、ある程度強い風が必要になります。また、気温も関係します。風によって山を

上昇した大気は、だんだんと冷やされます。温度や水蒸気量など、いくつもの条件がちょうどよくそろうことで、山頂付近に雲が出現します。

そして、山の上空で空気の層が安定していることも重要です。笠雲は長時間、同じ場所で見えることが多いので、同じ雲がその場にずっととどまっているように見えますが、雲はできては消えてを繰り返しています。安定した空気の層があると、山を乗り越える上昇気流が維持されるため、水蒸気が次々とやって来て、笠雲が同じ場所につづられ続けるのです。

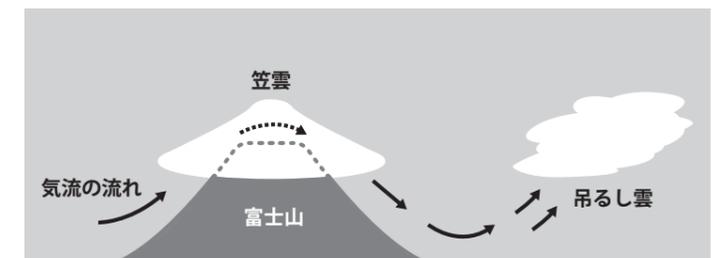
吊るし雲は、山頂から少し離れた風下側にできることが多いものです。山を乗り越えて風下側に流れた気流が、そこで上層の空気に水蒸気を供給することにより形づくられるからです。

富士山の原型は、今から約 10 万年前にできたと考えられており、噴火や山体崩壊を繰り返し、時代によって形を変えてきました。現在のような独立峰となったのは、今から約 2900 年前の縄文時代後期で、山の歴史から考えるとつい最近のことです。美しい山の姿と不思議な雲の共演を楽しむことができる私たちは、とても幸運な時代を生きているのです。

画像提供：近藤耕司



吊るし雲。笠雲と吊るし雲は、レンズ雲と呼ばれる雲種の1つであり、出現すると近いうちに雨が降るといわれています



笠雲・吊るし雲ができるための気流の流れ。湿った空気と強い風が必要

# Contents

<b>巻頭言：感性を計測する時代</b> .....	1
東京大学教授	篠田 裕之

<b>特集に寄せて：多様性と一体感でイノベーションを起こす</b> .....	2
アズビル株式会社 執行役員常務 azbilグループ研究開発担当	西本 淳哉

## 特集論文

<b>赤外線アレイセンサシステム</b> 人を中心としたスマートビルディング実現の基盤技術 .....	3
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	本田 光弘 長嶋 聖 青山 章一郎

<b>制御システム向けサイバー攻撃センサの開発</b> .....	10
アズビル株式会社 IT開発本部 アズビル株式会社 人事部付	有元 伯治 佐々木 太一 佐内 大司

<b>IPv6におけるノードの発見とプロミスキャスモードの検出</b> .....	15
アズビル株式会社 IT開発本部 アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー アズビル株式会社 人事部付	佐々木 太一 太田 貴彦 佐内 大司

<b>価値創出を指向するメーターデータプラットフォーム ガスミエール™</b> .....	20
アズビル金門株式会社 経営企画部	村上 英治

<b>組合せ最適化手法によるLPガス容器配送方法とその効果</b> .....	24
アズビル金門株式会社 経営企画部 東京ガス株式会社 デジタルイノベーション本部	村上 英治 土岐 爽真

<b>安全な動力プレス機械を実現するためのデュアルバルブの開発</b> .....	29
アズビルTACO株式会社 開発部	川口 豊 鷲野 向一 大島 章義

<b>CFDを用いた調節弁に発生するキャビテーション壊食の予測</b> .....	33
アズビル株式会社 バルブ商品開発部	斉藤 健二 尹 鍾皓

<b>凍結乾燥機用ローダアンローダによるバイアルトレース機能の開発</b> .....	38
アズビル株式会社 技術開発本部	別府 永志

<b>マザー工場での生産工程の革新</b> .....	44
アズビル株式会社 技術開発本部	關 宏治 矢野 貴史 片桐 宗和

## 製品紹介

<b>熱量演算器 WJ-1203</b> savic-net™ G5 システムに接続可能な積算熱量計 .....	51
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	藤田 雄三

<b>マルチベンダー通信に対応するIoTゲートウェイ 形 NX-SVG</b> .....	53
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	牧野 豊

<b>熱式微小液体流量計 形 F7M</b> 微小な液体流量を高精度に測定しプロセスの品質改善・向上に貢献 .....	55
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	山崎 吉夫 千崎 昌彦

# Contents

<b>Preface : The age of measuring feelings</b> .....	1
Professor of the University of Tokyo	Hiroyuki Shinoda

<b>Introduction to the Special Issue : Creating innovation with a sense of unity in diversity</b> .....	2
Managing Executive Officer, Responsible for azbil Group Research and Development	Junya Nishimoto

## Articles on Special Issue

<b>An infrared array sensor system: Basic technology for achieving human-centered smart buildings</b> .....	3
Building Systems Company, Azbil Corporation	Mitsuhiro Honda Sei Nagashima Shoichiro Aoyama

<b>Development of cyber attack detection system for ICS</b> .....	10
IT Development Headquarters, Azbil Corporation Human Resources Department, Azbil Corporation	Michiharu Arimoto Taichi Sasaki Daiji Sanai

<b>Detection of promiscuous IPv6 nodes</b> .....	15
IT Development Headquarters, Azbil Corporation Building Systems Company, Azbil Corporation Human Resources Department, Azbil Corporation	Taichi Sasaki Takahiko Ohta Daiji Sanai

<b>A meter data platform for value creation</b> .....	20
Corporate Planning Department, Azbil Kimmon Co., Ltd.	Eiji Murakami

<b>Improving LP gas cylinder delivery using ensemble learning and combinatorial optimization</b> .....	24
Corporate Planning Department, Azbil Kimmon Co., Ltd. Digital Innovation Division, Tokyo Gas Co., Ltd.	Eiji Murakami Soma Toki

<b>An improved dual valve for safer power press machines</b> .....	29
Development Department, Azbil TA Co., Ltd.	Yutaka Kawaguchi Koichi Washino Akiyoshi Oshima

<b>Prediction of cavitation erosion in control valves using computational fluid dynamics</b> .....	33
Valve Production Development Department, Azbil Corporation	Kenji Saito Chongho Youn

<b>A vial-position tracking function for freeze-drying machine loader-unloaders</b> .....	38
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation	Hisashi Beppu

<b>Innovative production processes at Azbil's mother factory</b> .....	44
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation	Koji Seki Takashi Yano Munekazu Katagiri

## Product Introduction

<b>Model WJ-1203 heat quantity calculation device: An integrating calorimeter connectable to the savic-net G5 system</b> .....	51
Building Systems Company, Azbil Corporation	Yuzo Fujita

<b>Model NX-SVG IoT gateway for multi-vendor communication</b> .....	53
Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Yutaka Makino

<b>Model F7M Micro flow rate liquid flow meter: Improving process quality with high-accuracy micro liquid flow rate measurement</b> .....	55
Advanced Automation Company, Azbil Corporation Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Yoshio Yamazaki Masahiko Senzaki

## 感性を計測する時代

篠田 裕之  
Hiroyuki Shinoda

東京大学教授  
Professor of the University of Tokyo



人々が何を感じているのか、個人の内面の状態を客観的に計測し、活用する時代が始まりつつある。いわば「心」の状態の計測である。そのような計測技術は、あくまで脳科学などの基礎研究での話題であって、それが日常生活と直接関わるのは遠い将来のことと考えられていた。少なくとも10年前はそうであった。ところが近年、10年前には想像していなかった形でそれは現実のものとなってきている。

2008年ごろに、計測自動制御学会で「SICE City 生きがい創出都市」という勉強会を実施したことがある。21世紀の科学技術は人々の心を支援するべき、というテーマで、様々な角度から議論を行った。しかしその中で、人々の心を科学的に計測することについて、深く議論することはなかった。現実味がなく、実りある議論になるように思えなかったからである。そもそも科学の基本は、主観的要因を明確に切り分け、排除することである。そのため、心は科学にとって最も扱いにくいものに思え、心を科学的に計測・制御することをタブー視する感覚もあった。

では最近の10年間で何が変化したのであろうか。第1の変化は、人間の思考や行動が情報化し、心の一部やプライバシーをコンピュータに委ねる状況が既成事実化したことである。Webで何を検索し、購買し、どこを訪れたか、など、本人の思考と嗜好をそのまま反映した行動履歴や状況写真、会話までもが自分の手が届かないコンピュータの中に残されている。それに基づいて広告を表示することは、言い方を変えれば「心の計測と制御」である。「機械が心を推定する」こと自体は、すでに突飛な問題設定ではなくなってしまった。

自分が機械に計測されること、例えば写真や動画を撮られることに対する警戒感が大幅に薄れた。店舗に設置されたカメラで店内が撮影されていることは、防犯と安全・安心のためにむしろ当然のことと受け止められている。言うまでもなく、そこで撮影されている映像には心の情報が豊富に含まれている。表情や振る舞いを観察すれば、その人が商品に対して何を感じているか、かなりの確度で推察することができる。また、心拍、発汗、血圧などの生体情報も、ウェアラブルセンサーで常時計測できるようになってきたが、これらはいわゆる「ウソ発見器」を常時装着しているのと同じことである。

そしてもう1つ、大きな違いが、機械学習と呼ばれる処理技術の実用化である。1人の人間の瞬時的な心の状態は、言葉の組み合わせでは定義しきれない曖昧かつ多面的なものであるが、長時間での行動・動作履歴や生体情報などを総合すれば、かなりの程度その状態を同定することができる。「心」とは何か、その実体を言葉で書き下すことができなくても、例えばあるサービスに対する満足度や、作業に対する関心、やる気、など、心の状態を表すパラメータを推定す

るための材料は、客観データの中にすでに十分含まれている。近年急速に整備された機械学習は、この推定の可能性を大幅に広げた。

このように人間の内面を推定することが技術的に可能となり、人々もそれを受容する時代が急速に訪れることとなった。特定の営利企業が情報を独占する危険や、プライバシーの問題など、未解決な問題を抱えつつも、それをポジティブに活用する方法を模索する時代になったことは間違いない。

オフィスの設計や自動化の考え方も今後大きく変化していくと考えられる。すでにオフィスの中ではセンサフィードバックが重要な役割を果たしている。人々の活動状況を計測し、それに基づいて制御することで、室内をより快適な温度や明るさに調整し、同時にエネルギーを節約することもできる。これに加えて働く人の内面情報も計測してフィードバックできたら何ができるであろうか。

例えば集中力を高めたいときは、温度はやや低い方がよいであろうし、過度に緊張している場面では、柔らかい照明にし、リラックスを誘導する香りなども効果的である。ちょっと仕事に飽きてきたタイミングで、壁の一部のデザインや、照明が変化し、そよ風が吹いてくれたらリフレッシュできる。このように、各人の内面が計測できたら、各人の内面の状態を最良に保つように環境を変化させることが可能になる。

さらに進んで、「イライラしている時間が長いので、少し休んだ方が、効率が上がりますよ」「ストレスを感じていないので、もう少し頑張っても大丈夫ですよ」など、自分の内面を客観的に教えてもらえると、自分のパフォーマンスを最大化する方法を自分自身が見出すための手がかり情報になる。集中して頑張ったときに「頑張りましたね」とコンピュータから言ってもらえると、本当に集中していたことが自分自身でも確認できる。

これらのフィードバックがおせっかい過ぎる場合や、常に管理されているような気がしてストレスになっては逆効果であるが、働く人々の生産性をさりげなく高め、健康にも導いてくれるのであれば、ぜひ活用したいはずである。環境が心を読んでもくれる時代は、危険もあるが、可能性も大きい時代である。

### 著者紹介:

1988年東京大学工学部物理工学科卒業。90年同大学院計数工学修士、同年より同大学助手、95年博士(工学)。同年東京農工大学講師、97年同助教授、99年UC Berkeley客員研究員を経て2001年東京大学大学院情報理工学系研究科助教授、2012年同教授、2013年より東京大学大学院新領域創成科学研究科教授。ハプティクス(触覚技術)、センサシステムとデバイス、二次元通信、ヒューマンインターフェース、光・音響・生体計測などの教育と研究に従事。

## 多様性と一体感でイノベーションを起こす

アズビル株式会社  
執行役員常務  
azbilグループ研究開発担当

西本 淳哉

IoTという言葉は今ではすっかり定着しました。AIも何度目かのブームと言われています。しかしながら、アイ・オー・ティやエー・アイを呪文のように唱えるだけで道が開けるわけではありません。この本質を良く見極める必要があります。

アズビルはこれまでイノベーションによって難局を打開してきました。例えば、インターネットが世に出る10年以上前、1984年に通信回線経由で顧客のビル空調を遠隔制御する総合ビル管理サービスBOSS™を開始しました。昨今、ダイヤモンドリスポンスやネガワット取り引きが注目を浴びていますが、アズビルはビルを対象にオンライン、リアルタイムでこれらを実現する取組みをいち早く開始しています。このサービスもBOSSの仕組みが土台となっています。「ソリューションで顧客に貢献する。これをリモートで行う」。このコンセプトは、インターネットやクラウドサービスの先駆けであったと言えます。まさに、技術的にもビジネスモデル的にも大きな成長をもたらすものでした。

MEMSへの投資も思い切ったものでした。1986年にクリーンルームを整備し、マイクロフローセンサ™の開発に着手しました。最初の製品が上市されたのは1994年です。まさに苦節十年だったわけですが、今や、ここから生み出されるマイクロフローセンサ、ピエゾセンサ、サファイアセンサなどは、アズビルならではの付加価値の高いフィールド機器類となっています。

DCS (Distributed Control System;分散制御システム)の分野でも、1995年にアズビルはWindows®ベースのDCSを提案しました。今やこのコンセプトはDCSの常識となっています。

これらはほんの一例で、アズビルは大きな技術の潮流を捉え、積極的に新技術開発に取り組み、新たな事業モデルを提案することで発展してきました。

イノベーションは破壊的に起こります。従来技術の延長に拘泥していると、突然新たなプレイヤーが新たな技術を引っ提げて登場し、市場を席卷します。継続的にイノベーションを起こし続けなければ企業として成長が停滞し、やがて市場から退出を求められるでしょう。これまでの先人の取組みに匹敵するイノベーションを我々の手で生み出し、未来につながらねばなりません。

チャンスはあります。イノベーションは少しの発想と技

術の組合せで起こるということです。今後、計測制御システムの付加価値は、「システム化/ソリューション化」と「フィールド機器の高機能化」に二極分化していくでしょう。このとき有効なのはアズビルの技術基盤の多様性です。IT企業がプロセスの中身まで理解してソリューションを提供することは難しいでしょう。また、フィールド機器だけを提供している企業にはシステム全体を把握してソリューションを構想することは容易ではないでしょう。

azbilグループにはビル制御、プラント制御、AI、MEMSなど多様な技術基盤と知見があります。しかし多様であるだけでは生き残れません。多様な技術基盤を元に、外部からの様々な知見を有機的に組み合わせ、新たな技術、ソリューション、事業モデルを提案しなければなりません。多様な技術を1つにまとめるチームとしての一体感が重要です。

イノベーションのタネはそこかしこに埋まっており、これに気づき、掘り起こし、ものにする発想と一歩踏み出す勇氣を持たねばなりません。

今般のTechnical Reviewには、azbilグループの各社から、システム、センサ、アクチュエータ、AIなど多様な論文が掲載されています。これらの技術のタネから新たなイノベーションが生まれることを期待します。

Windowsは、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標または商標です。

# 赤外線アレイセンサシステム

## 人を中心としたスマートビルディング実現の基盤技術

### An infrared array sensor system:

### Basic technology for achieving human-centered smart buildings

本田 光弘  
Mitsuhiro Honda

長嶋 聖  
Sei Nagashima

青山 章一郎  
Shoichiro Aoyama

キーワード

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

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

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

## 1. はじめに

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

## 2. システム構成

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

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

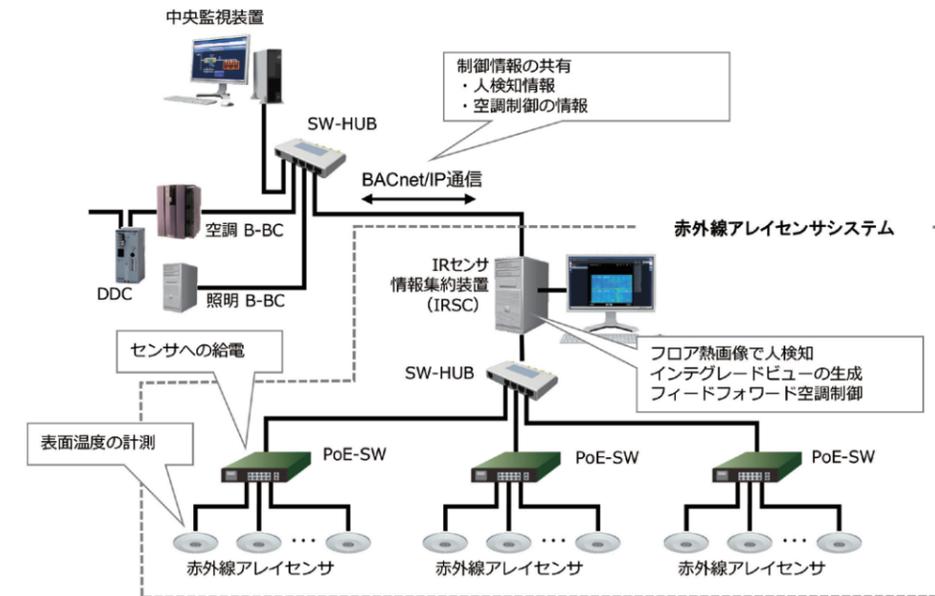


図1 システム構成

## 3. 赤外線アレイセンサ

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

### 3.1 オフィス用途

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

#### 3.1.1 形 TY2000A1000 天井設置・角度固定タイプ

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



図2 形 TY2000A1000の外観

#### 3.1.2 形 TY2000A2000 天井設置・角度調整タイプ

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



図3 形 TY2000A2000の外観

#### 3.1.3 形 TY2000A3000 壁設置・角度調整タイプ

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



図4 形 TY2000A3000の外観

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

注2 条件によって異なる。TY2000\*で測定対象物15~35℃かつセンサ周囲温度15~35℃の全画素平均値で、±1℃の計測精度となる。

### 3.2 高天井用途

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

#### 3.2.1 形 TY2001C2000 形 TY2001B2000

##### 天井設置・角度調整タイプ

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



図5 形 TY2001B2000の外観

#### 3.2.2 形 TY2001C4000 形 TY2001B4000 雲台タイプ

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

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



図6 形 TY2001B4000の外観

### 4. 情報集約装置 形 BH-311JOW0000

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

他社の類似製品の中には、計測した表面温度に対する

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

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



図7 情報集約装置の画面

### 5. インテグレートドビュー機能

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

以下で、インテグレートドビュー機能の主なサブ機能について説明する。

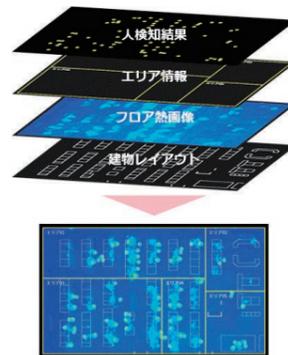


図8 インテグレートドビュー

#### 5.1 熱画像合成機能

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

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

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

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

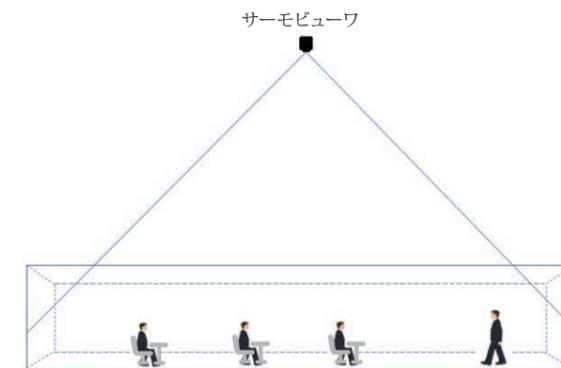


図9 高画素サーモビューワによる真上からの測定

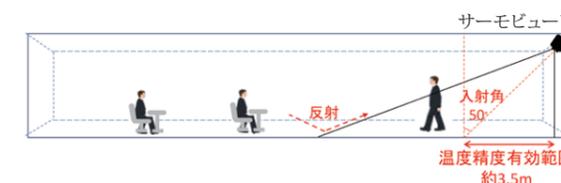


図10 高画素サーモビューワに斜めからの測定

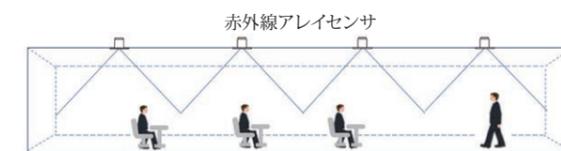


図11 多数の低画素センサによる真上からの測定

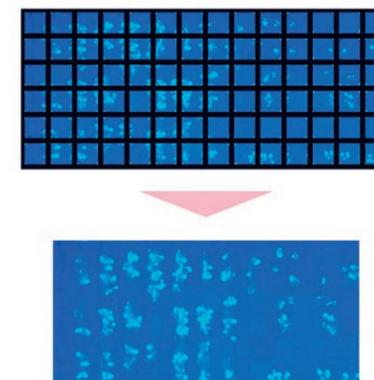


図12 温度データの合成

#### 5.2 人検知機能

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

インテグレートドビューでは、人と検知された発熱体に丸がついて表示される(図8)。他社の多くの人感センサでは、2つのセンサの境界に人がいる(図13(a))と、両方のセンサで映った人(図13(b))を検知してしまい、ダブルカウントする可能性が高い。これに対し、本製品では、フロア熱画像を生成してから人を検知する。隣り合うセンサ同士で重複する部分を考慮して合成することでダブルカウントを低減している(図13(c))。また、他社の多くの人感センサは数m単位で人の位置を出力するのに対して、本製品は数10cm単位で人の位置を出力することが可能である。

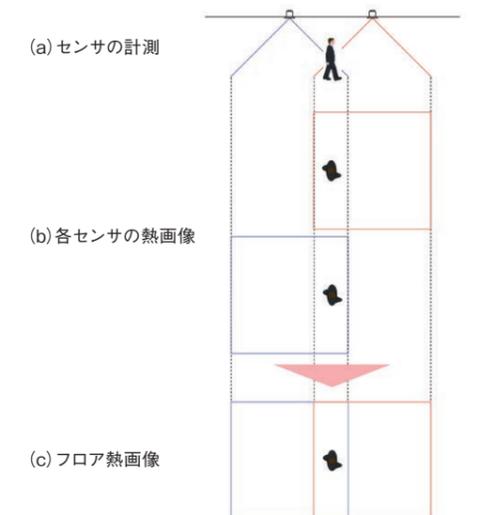


図13 熱画像の合成によるダブルカウントの低減

#### 5.3 その他の機能

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

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

## 6. フィードフォワード空調制御機能

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

### 6.1 室内モデルと表面温度の重要性

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

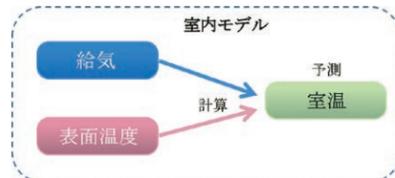


図14 室内モデルの概念

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

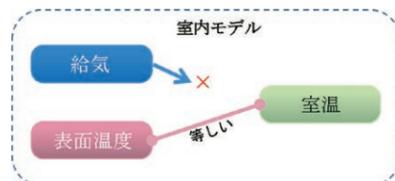


図15 室内モデル(給気がない状態)

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

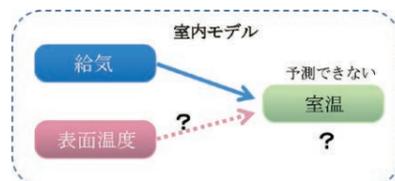


図16 室内モデル(表面温度がわからない状態)

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

### 6.2 フィードバック制御

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

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

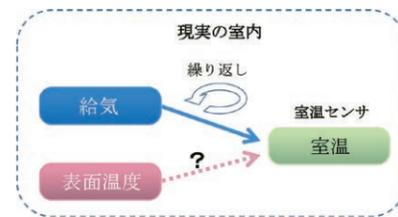


図17 フィードバック制御

### 6.3 フィードフォワード制御

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

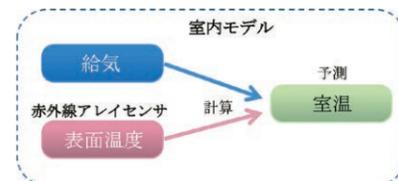


図18 フィードフォワード制御

### 6.4 メリット

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

### 6.5 最適化問題

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

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

### 6.6 製品への実現方法

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

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

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

### 6.7 製品動作検証

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

図19は、赤外線アレイセンサで床、天井、壁の表面温度を計測し、その平均の時間変化を示したものである。また、執務者付近ではないため参考ではあるが、壁に設置した室温センサによる室温の変化も示す。空調が行われることによって、徐々に表面温度と室温が26℃に近づいていくのが分かる。図20は要求風量、図21は給気温度設定を示している。省エネルギーになるよう空調開始の瞬間から給気風量が最小にする給気温度(この場合、最低の15℃)が分かるのがフィードフォワード制御の特長である。最初は、表面温度が高いため、風量も多く要求されているが、表面温度が給気によって徐々に下がっていくと、それに合わせて給気温度を維持しながら要求風量が先に下がってバランスをとる。さらに表面温度が低下して、要求風量が最低風量の1,200m<sup>3</sup>/hに達し、これ以上下げられなくなると、今度は給気温度設定を上げて、給気の熱量のバランスを保っていくことが分かる。

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

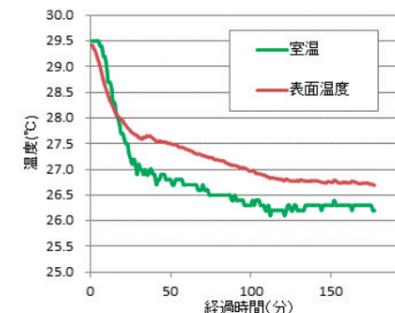


図19 平均表面温度と室温

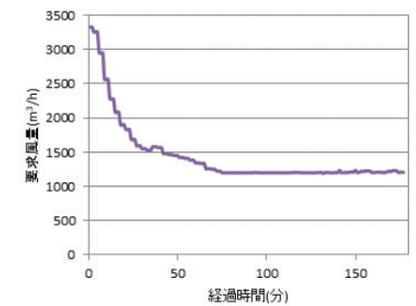


図20 要求風量

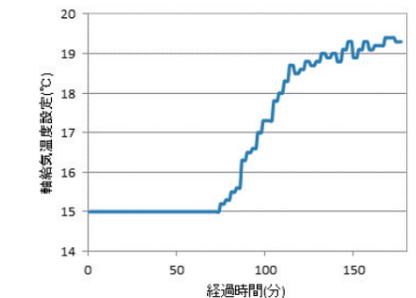


図21 給気温度設定

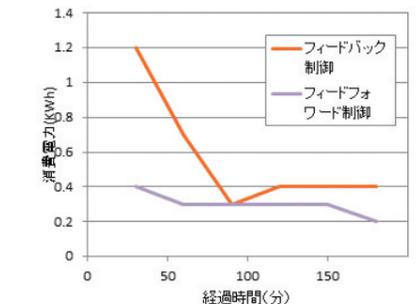


図22 消費電力

## 7. 今後の展開

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

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

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

## 8. おわりに

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

### <参考文献>

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

### <商標>

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

### <著者所属>

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

# 制御システム向けサイバー攻撃センサの開発

## Development of cyber attack detection system for ICS

有元 伯治  
Michiharu Arimoto

佐々木 太一  
Taichi Sasaki

佐内 大司  
Daiji Sanai

キーワード  
セキュリティ, サイバー攻撃, 攻撃検知, 制御システム, 重要インフラ

近年、社会インフラや産業基盤に物理的なダメージを与えるサイバー攻撃のリスクが増大している。東京オリンピック・パラリンピックを狙ったサイバー攻撃も懸念され、重要インフラにおけるサイバー攻撃への対策が急務となっている。このニーズをうけて、制御システム(ICS:Industrial Control Systems)向けのサイバー攻撃検知センサを開発した。これにより、もし制御システムにサイバー攻撃が侵入しても、システム内部での攻撃を早期に検出することを期待できる。本稿では、その検知技術について報告する。

In recent years, the risk of cyber-attacks that damage public and industrial infrastructure has increased. There are also concerns about cyber-attacks aimed at the Tokyo Olympics and Paralympics. Measures against cyber-attacks on critical infrastructure are therefore urgently needed. To meet this need, we have developed a cyber-attack sensor for industrial control systems. With this sensor, even if an attacker manages to enter the control system, detection of the attack at an early stage can be expected. In this paper, we report on the detection technology.

## 1. 背景

2019年4月1日、サイバーセキュリティ基本法改正が施行され、重要インフラ事業者等におけるサイバーセキュリティの確保が義務化された。2019年8月の時点で重要インフラ事業者として指定されているのは、情報通信、金融、航空、空港、鉄道、電力、ガス、政府・行政サービス、医療、水道、物流、化学、クレジットおよび石油の14分野であるが、それ以外の産業分野を含めて、2020東京オリンピック・パラリンピックの開催までの早急なセキュリティ対策が求められている。

このような中で、「人を中心としたオートメーション」で事業展開をするazbilグループは、重要インフラ事業者に制御システム(図1参照)を提供している。制御システムのサイバーセキュリティの確保の要となる、ローカルネットワークにおけるセキュリティ技術を2000年から研究開発してきた。

本稿では、制御システムのセキュリティ上の特徴と、制御システム向けのサイバー攻撃検知センサの検知技術について説明する。

## 2. 制御ネットワークの特徴とセキュリティ課題

制御システムの構成は、分野や業種によって差異はあるが、センサやアクチュエータが繋がるフィールドネットワーク、PLC(Programmable Logic Controller)、DCS(Distributed Control System)などのコントローラ、EWS(Engineering WorkStation:エンジニアリングワークステーション)やOPC(OLE for Process Control)サーバなどが繋がる制御系ネットワーク、生産管理サーバなどが繋がる制御系情報ネットワークから構成される(図1)。

制御情報ネットワークや制御システムネットワークに接続されているHMI(Human-Machine Interface)、EWS、OPCサーバなどにはWindows®が多く使われているため、これらのネットワーク・セグメントはWindowsネットワークで成されていることが多い。そのため、サイバー攻撃の最初のターゲットとされるのが、これらのネットワーク上のWindowsである。

Windowsを中心に構成される制御ネットワークをセキュリティの視点で見ると、同じようにWindows中心のオフィスの情報系ネットワークとは違ったような特徴がある。

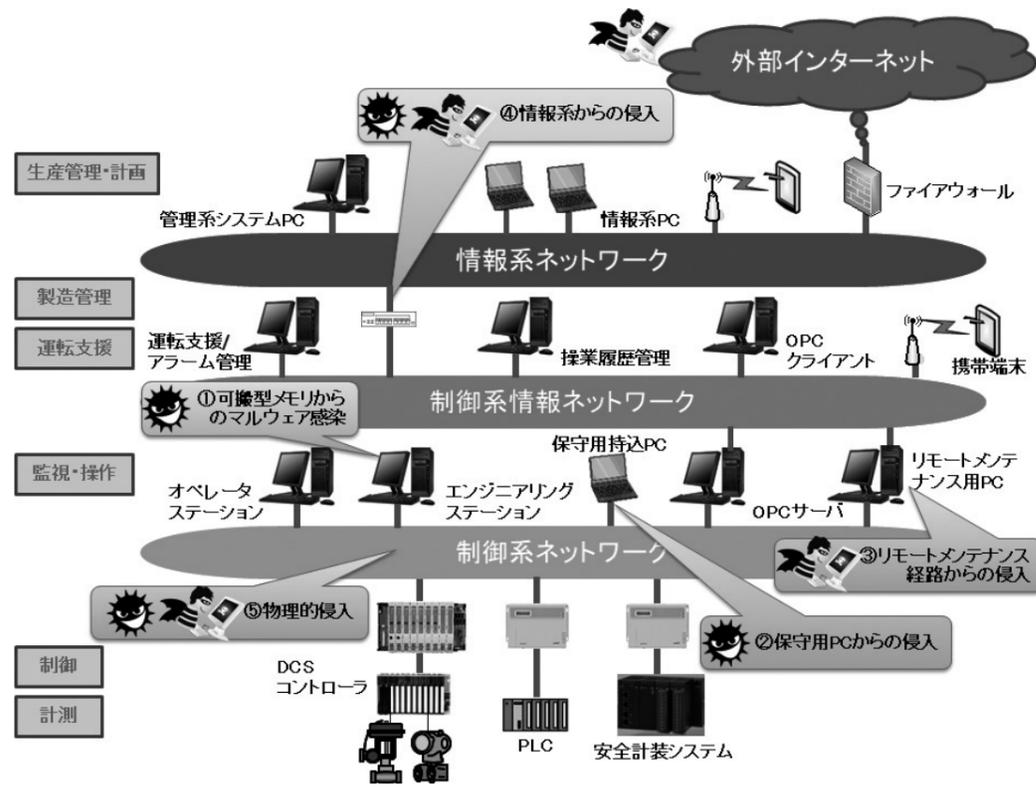


図1 制御システムの構成 (1)

(1) 24時間連続運転

制御システムの多くは、24時間365日連続稼働することを基本として設計されていて、これらを停止するのは、計画的な定期メンテナンスの時だけである。そのときでも、安定して動作することを優先するためにOSのパッチの適用はほとんど行われない。

(2) 長い使用年数

制御システムは、ひとたび稼働すると10年～20年と長い期間使用される。

(3) 古いOSが使われている

使用年数が長いため、既にサポート切れになっているOSがそのまま稼働していることがある。可用性が優先であり、リスクを伴うOSの更新は先送りにされてきた。

(4) 古い設計思想

10年以上前の古い設計思想で設計されている。当時の設計では、利便性の高いファイル共有手段として、Administratorアカウントや管理共有(C\$やAdmin\$など)が多用されていた。この問題は、システムを丸ごと乗っ取られてしまう危険性があり、サポート切れのOSの問題よりも根が深い、あまり認知されていない。

(5) 共通アカウント

すべてのWindowsにおいて共通のユーザーアカウントとパスワードが使用されている。

(6) メンテナンスPCの接続

メンテナンス用のWindowsを必要に応じて、システムに接続することができる。

(7) 決められたアクセスだけのネットワーク

オフィスのような人によるアクセスではなく、設計されたとおりに決められたアクセスだけが発生する。制御システムでは、決められたアクセス以外が発生する場合は、何らかの異常が発生していることが疑われる。

3. Windows ネットワークの基礎知識

3.1 Windowsへの侵入/操作とは

Windowsは他のWindowsを自由に管理できるネットワーク関連機能を標準搭載している。Windowsの共有機能が有効になっているとき、Administratorグループのユーザーアカウントとそのパスワードが分かれば、他のWindowsを自由にコントロールすることができる。管理共有に接続できる状態は、このWindowsを自由にコントロールできる状態である。

そして、ローカルネットワークに侵入した後のサイバー攻撃の多くは、この標準機能を悪用しているが、このような管理機能があることは一般ユーザーにはあまり認識されていない。

3.2 Windowsのセキュリティ機能とその推移

Windowsはバージョンアップを繰り返し、セキュリティを強化してきた(図2)。Windows® XPでは、DCOM(Distributed Component Object Model)をはじめとしたネットワーク機能に対して、ポリシーによるアクセス制御が加えられた。

Windows XP SP2(Service Pack 2)とWindows Server® 2003では、ファイアウォールが標準搭載され、必要最低限のサービス以外へのアクセスが制限された。さらに、Windows Vista®とWindows Server® 2008から導入されたユーザーアカウント制御(UAC:User Account Control)により、管理者権限を必要とするプログラムの実行が制限された。そして、Windows 10では、アンチマルウェア機能としてWindows Defenderが標準搭載された。

3.3 DCOMのセキュリティ

DCOMは、米マイクロソフトが開発したCOM(Component Object Model)を拡張した分散コンピューティング環境である。共通のアカウントとパスワードをもつコンピュータ間で自動的に接続できてしまう。

米マイクロソフトは、これへのセキュリティ対策として、デフォルトではDCOMを利用できないように制限した。この機能を利用するためには、Windowsのファイアウォールの設定を変更し、さらにUACを無効にする必要がある。

制御システムで使われることがあるOPC Classicは、クライアントとサーバの接続にDCOM通信を使用している。そのため、OPCが動作しているPCは、DCOMを悪用されるリスクがある。

4. 制御システムにおけるサイバー攻撃検知へのアプローチ

4.1 基本アプローチ

我々は制御システム上を流れるWindowsネットワークをレイヤー7で分析し、Windowsの危険な操作やサイバー攻撃を検知することに取り組んだ。Windowsネットワーク

のSMB(Server Message Block)やMSRPC(Microsoft Remote Procedure Call)などを分析することにより、詳細なネットワーク活動を監視できる。制御システムに悪影響がないようにパケットキャプチャ方式を採用した。パケットキャプチャ方式は、システムの構成ノード上で稼働する必要がなく、また、システムのネットワークにパケットを送出しないため制御システムに負荷をかけない。

ITシステムと同様に制御システムにおいても、Windowsのファイル共有やデータ交換などが行われており、Windowsのネットワークコマンドが流れている。サイバー攻撃により発生したネットワークコマンドも消去や改変することはできず、正常な操作によるものに紛れてネットワークを流れる。その中から、サイバー攻撃や危険な操作が行われた場合の特徴を捉えた攻撃検知を試みた。

4.2 研究開発

まず、サイバー攻撃に利用される可能性のあるWindows API(Application Programming Interface)を洗い出した。そのAPIが実行された際に飛ぶネットワークパケットを多面的に分析した。攻撃者の手法は、マルウェアやハッキングツール、シェルなど様々で特定できないが、攻撃者がどのようなツールやコマンドを用いるかにはかかわらず、その内部ではWindows APIが実行されている。

Windowsには数千種類のWindows APIがある。ハッカーがサイバー攻撃を行うとき、これらのWindows APIが利用されている。そして、ハッカーが多用するAPIには管理者権限が必要であることが多い。我々はこの点に注目した。そこで、管理者権限を必要とすることが多いシステム管理のAPIを調査した。例えば、それは、イベントログ、レジストリ、サービス、アカウントなどを管理するAPIである。さらに、リモート

Windows バージョンのリリース			Windows搭載のセキュリティ機能			
リリース年	クライアント OS	サーバOS	ファイアウォール	ポリシーによるセキュリティ制御	UAC	アンチウイルス
2000	Windows 2000 Windows XP	2000 Server Server 2003	インターネット接続 ファイアウォール (オプション) ↓ Windows ファイアウォール	↓		
2005	Windows Vista	Server 2008	↓	↓		Security Essentials (オプション)
2010	Windows 7 Windows 8 Windows 8.1	Server 2008 R2 Server 2012 Server 2012 R2	↓			↓ Windows Defender (標準搭載)
2015	Windows 10	Server 2016 Server 2019	↓			↓
2019			↓			↓

図2 Windowsのセキュリティ機能とその推移

コンピュータに対して実行可能なAPIとネットワークコマンドとの関連性を調査し、マッピングした。

その結果、ネットワークコマンドから管理者操作をある程度特定できることが分かった。そして、このネットワークコマンドは、ハッカーの隠ぺい工作の影響を受けにくいことから、ネットワークコマンド監視によるサイバー攻撃検知手法は実用性の高い手法だといえる。

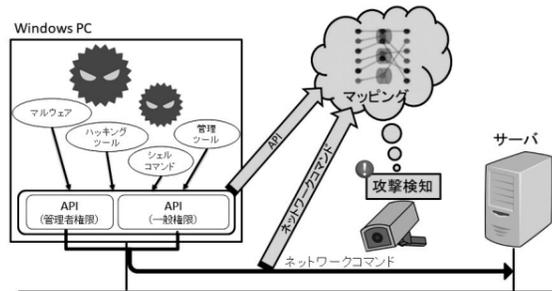


図3 Windows APIとネットワークコマンドのマッピング

Windows APIとネットワークコマンドの関連性の調査とマッピングに加えて、制御システムの特徴やハッカーの行動特性を考慮し、以下の調査も行った。

- (1) Windows XPなど古いWindowsのAPIとネットワークコマンドの関連性の調査、マッピング
- (2) 制御システムで特徴的なDCOM利用時の管理操作とネットワークコマンドのマッピング
- (3) アクセス制限のかかる管理者コマンドの洗い出しと、ネットワークコマンドへのマッピング
- (4) 古い設計思想のシステムの特徴をネットワークコマンドとマッピング
- (5) ハッカーの活動の微かな痕跡とそのネットワークコマンドに現れる特徴を調査
- (6) ハッカーの行動パターンから、関連するネットワークコマンドを調査
- (7) Windowsのシステムが利用する非公開APIの調査

### 4.3 サイバー攻撃を検知するネットワークセンサの実装

我々は、これまでWindowsネットワーク解析技術(VISUACTテクノロジー)を開発<sup>(2)</sup>してきた。この技術によりWindowsネットワークのパケットをリアルタイムで解析し、ネットワークコマンドを抽出することができる。それに、本稿で述べたWindows APIとネットワークコマンドのマッピング技術を組み合わせ、サイバー攻撃を検知するネットワークセンサを開発した。このセンサによって、正規なアクセスに紛れた攻撃や不審なアクセスを検知することが可能になった。これにより、制御システムへの現実的なセキュリティ対策の導入を目指している。

## 5. 稼働中の制御システムへの現実的なセキュリティ対策

### 5.1 現場で稼働システムの現状を調査

稼働中の制御システムに対して、システムに影響を及ぼすセキュリティ対策の導入はリスクがある。サイバー攻撃検知

センサは、パケットキャプチャ方式を採用し、稼働中のシステムに影響なく、既存ネットワークに設置できる。現場でシステムの現状を調査し、マルウェアによる攻撃を検知したり、システムの使い方やセキュリティ上の弱点を洗い出せる。

これまで、重要インフラを中心とした制御システムで、サイバー攻撃検知センサを使ったセキュリティ検査を行ってきた。その結果、予想以上に多くのシステムで、危険なコマンドや操作が検知された。制御システムで特徴的にみられる旧OSや共通アカウント、管理共有の利用など、古い設計思想による設定、運用が行われていることに起因するものが多くみられた。

### 5.2 システムの弱点監視を強化

連続稼働している制御システムでは、問題や弱点が発見された場合でも、設計変更やシステム更新を、短期的に実施することは難しい。しかし、短期的な対策が難しいにしても、システムが侵害されやすい状態にあることを認識し、運用上利用せざるを得ない弱点部分を中心にセキュリティ監視の強化を実施する必要がある。ここでは、システムの弱点に対して、攻撃や不審なアクセスがないか重点的に監視することが重要である。

### 5.3 設計仕様外の通信を監視

制御システムでは設計仕様どおりの通信が行われるのが原則である。通信するノードの組み合わせがあらかじめ決められているので、設計上想定外の通信を監視することが有効である。設計外の通信が見つければ、攻撃の可能性があり、調査や監視強化の対象になる。

設計外のIPアドレスやポートの組み合わせが発生していないかを監視し、気づきを提供する。さらに、Windowsネットワークの監視によって、攻撃に使われるコマンドを検知することができる。

## 6. 新しいセキュリティ課題への挑戦

我々は、想定できないサイバー攻撃の手口に追従するために、その根底にある普遍的な課題に取り組んできた。新しいネットワークの機能はハッカーの行動の見えない化にも利用されるが、それらの検知が今後の課題となる。現在の2つの技術課題に取り組んでいる。

#### (1) ネットワークの暗号化とその弊害

データの機密性がますます求められるため、これからのネットワークが暗号化されていくことは間違いない。その一方で、ネットワークが暗号化されると通信内容が見えなくなるというリスクがある。つまり、暗号化は、サイバー攻撃の隠蔽に利用され、サイバー攻撃を検知できなくなる可能性がある。そこで、暗号化によって通信内容がわからなくても、サイバー攻撃を検知できる新しいアルゴリズムが必要となる。

#### (2) IPv6 (Internet Protocol Version 6)への対応

IoTの加速にともなって、IPv6の普及も加速している。一方で、ハッカーは、以前よりIPv6を悪用してきた。このこ

とは、あまり認識されていない。そのため、IPv6に未対応のツールが多いという現実がある。IPv6をベースとした攻撃の監視や検知のための技術開発が急務である。

#### <参考文献>

- (1) 木内誠, 田中良則, 関英信, 黒木亮, 小森谷良明: 「ICSのサイバーセキュリティへの取組み。今, 生産制御システム(ICS)が狙われている!」, azbil Technical Review, 2015年4月発行号, pp.25-32
- (2) 「いつ, 誰が, どのファイルに, 何をしたのか?」, azbil Technical Review特別別冊 azbil 技術レポート 2006, pp.47-48

#### <商標>

VISUACTはアズビル株式会社の商標です。Microsoft, MS, Windows, Windows Server, およびWindows Vistaは、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。

#### <著者所属>

- 有元 伯治 アズビル株式会社  
IT開発本部開発1部
- 佐々木 太一 アズビル株式会社  
IT開発本部開発1部
- 佐内 大司 アズビル株式会社  
人事部付

# IPv6におけるノードの発見とプロミスキャスモードの検出

## Detection of promiscuous IPv6 nodes

佐々木 太一  
Taichi Sasaki

太田 貴彦  
Takahiko Ohta

佐内 大司  
Daiji Sanai

キーワード  
IPv6, IoT, プロミスキャス, ネットワーク盗聴, ハッキング, サイバー攻撃, セキュリティ

ローカルネットワーク内のIPv6(Internet Protocol Version 6)ノードを列挙し、そのIPv6ノードがプロミスキャスモードかどうかを判定できる技術を開発した。この技術は、IoT時代のネットワーク資産の管理や、ネットワーク盗聴やハッキングを行うプロミスキャスモードのPCなど悪意ある機器を検出可能とすることで、より高度なセキュリティ管理を実現できる。

We have developed a technology that can enumerate Internet Protocol Version 6 (IPv6) nodes on a local network and determine whether they are in promiscuous mode or not. This technology allows more advanced security management of network assets in the IoT era and enables the detection of malicious devices such as PCs in promiscuous mode used for network tapping and hacking.

### 1. 背景

IPv4(Internet Protocol Version 4)アドレスの枯渇問題によりIPv6の推進が始まってから既に20年以上が経過している。一般的に広く使われているWindows®はWindows®XPからIPv6を搭載した。そしてWindows Vista®以降のWindowsは、IPv6を優先的に利用する設定に変わった。つまりユーザーが意識しなくても自動的にIPv6が使われている。さらにスマートフォン、Wi-Fi、IoT機器などの加速的な普及によってIPv6はバックグラウンドでも確実に普及している。その結果、このIPv6の普及はネットワークの運用・管理において新しい以下の課題を生み出している。

- (1) ネットワーク管理者やシステム管理者の意図しないIPv6の通信が行われている。
- (2) セキュリティ監視ソフトウェアやネットワーク監視システムが、IPv6に対応していない。IPv6による攻撃を検知できない。
- (3) ネットワーク管理者は、IPv6アドレスとPCとの関連を管理できていない。結果としてIPv6アドレスからPCを特定できない。
- (4) 管理されていないIoT機器がサイバー攻撃の起点となる可能性がある。

このような背景からローカルネットワーク内のIPv6ノードを発見し調査する技術が求められている。

### 2. IPv6 ノードの検出における基本的な技術課題

ネットワークに接続しているノードを列挙するとき、従来のIPv4ネットワークであれば、ネットワークアドレスの範囲内のすべてのアドレスに対してアクセスを試みる手法が有効であった。例えば、192.168.1.1~192.168.1.254のネットワークセグメントであれば、254回のARP(Address Resolution Protocol)リクエストを送信することでノードの有無を確認できた。また、TCP(Transmission Control Protocol)やUDP(User Datagram Protocol)を使ってのアクセステストでもノードの列挙が可能であった。しかしIPv6のアドレス空間は、IPv4の32bitから128bitへと天文学的な数に拡大されている。このためIPv4の場合と同様な総当たりでの検索方法は不可能である。さらにIPv6ではブロードキャストおよびARPの廃止によって、従来のノードを探索する手法自体も使えなくなった。そこで、我々がまず解決しなければいけない課題は、ローカルネットワーク、すなわち管理下にある物理的ネットワーク上に接続しているIPv6ノードを列挙する手法の開発であった。IPv6では、ブロードキャストに代わって多くのマルチキャストアドレスが定義されている。我々の開発目的の1つとして、これらマルチキャストアドレスを活用してネットワーク上の未知のノードを列挙する手法を検討し開発することである。

### 3. IPv6 ノード検出のアプローチ

我々は、IPv6ノード検出として4つのアプローチを試みた。

- (1) IPv6のPingを使用した検出方法
- (2) RA(Router Advertisement)を使用した検出方法
- (3) パラメータ不正のICMPv6(Internet Control Message Protocol for IPv6)パケットを使った方法
- (4) MLD(Multicast Listener Discovery)を使った方法

各手法について説明する。

#### 3.1 IPv6のPingを使用した検出方法

このアプローチではIPv6ノードの有無を確認するためにIPv6のPing機能を使用する。一般的にPingは検査をしたノードに対してPingリクエストを送信し、その応答によってノードの存在を確認する。しかし先に述べたように、未知のノードを探索する場合にIPv6のアドレス空間は広すぎるので、すべてのアドレスに1つずつPingを送信する手法は現実的に不可能である。そこでIPv6 Pingの宛先アドレスをマルチキャストグループアドレスに対して送信する。例えばオールノードマルチキャストのアドレスである「ff02::1」にして送信する。これによりローカルネットワークに接続しているすべてのIPv6ノードがPingリクエストに応答すると期待できる。しかし残念ながらこの方法では、検出できないノードが多数あった。理由は近年のセキュリティ意識の向上から、存在確認に応答すること自体にセキュリティ上のリスクがあると考えられ、Pingリクエストを受け付けないノードが多いのである。代表的な例としては、Windows10がIPv6 Pingには応答していない。

#### 3.2 RA(Router Advertisement)を使用した検出方法

IPv6ネットワークにおけるグローバルアドレスやゲートウェイの設定は、ルータからのRAにより行われる。具体的にはルータからのRAパケットを受信した各ノードは、RAのPrefix値から新たにIPv6アドレスを算出する。それを重複確認してから利用する。この重複確認にはNS(Neighbor Solicitation)が使われる。この機能を利用して、ルータのふりをしてRAパケットを送信する。その応答のNSパケットを収集すれば、ノードのリストが生成できる。

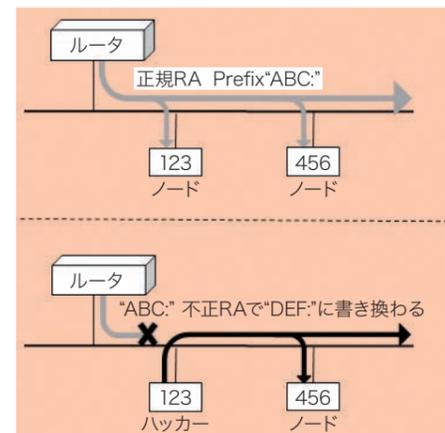


図1 RAによるPrefix書き換え

このRAは、ほとんどのIPv6機器で動作するので高い確率でノードを列挙できる。しかし、この方法はIPv6ネットワークのハッキング手法の1つでもあるので、不正な設定を強制的に行ってその反応を見るという本手法は、通信障害の原因になるなどリスクも多く実践には利用できない。

#### 3.3 パラメータ不正のICMPv6パケットを送信する方法

この手法は、パラメータに異常があるパケットを送り付け、ノードがエラー応答することを期待する手法である。IPv6に関連する標準勧告文書のRFC1885の3.4項には、「パケットを処理するIPv6ノードが、完全にそのパケットを処理することが不可能であるIPv6ヘッダもしくは拡張ヘッダに含まれる問題のあるフィールドを見つけたのであれば、そのパケットは破棄しなければならず(MUST)、パケットの発信元にタイプと問題個所を示したICMPv6パラメータ不正メッセージを送信すべきである(SHOULD)」<sup>(1)</sup>と定義されている。この定義に準じていれば、IPv6のヘッダに矛盾があるパケットを、オールノードマルチキャスト宛に送信したとき、パラメータ不正を通知するICMPv6が返信されてくるのが期待できる。このエラー応答により、IPv6ノードを列挙できる可能性がある。実験の結果、カーネルレベルの応答においては、ほとんどのノードがパラメータ不正のICMPv6パケットに応答することが分かった。しかし、現在のOSは、セキュリティ対策としてファイアウォールを実装しているものが多い。このファイアウォールの機能によりパラメータ不正のパケットはカーネルに届くことなく破棄されている。つまり、不正パケットはカーネルに到達しないことがありノード検出の手法としては利用できない。

#### 3.4 MLD(Multicast Listener Discovery)を使った方法

IPv6ネットワークは、マルチキャストを多用するプロトコルである。ルータは自分の配下にあるノードが、どのマルチキャストグループのパケットを必要としているのかを管理することで、セグメントを超えたマルチキャストを実現している。このルータによるマルチキャストノードの管理に使われるのがMLDである。本手法では、ルータが配下のノードに対してマルチキャストグループを問い合わせるMLQ(Multicast Listener Query)を使った。MLQの宛先をオールノードマルチキャストにすることで、配下のノードは、自身が参加しているマルチキャストグループ情報を記したMLR(Multicast Listener Report)をマルチキャスト宛に返信してくる。この応答を収集することで、マルチキャストを受信しようとするノードの列挙ができる。このマルチキャストの管理は、IPv6の基盤となる仕組みのため、ほぼすべてのIPv6ノードが検知可能である。

我々は、これらの4つの手法を実験した結果、システム障害の可能性がなく、セキュリティシステムの影響を受けずにIPv6ノードが検知できるMLDを採用することにした。

### 4. IPv6 でのプロミスキャスモードの検出

前述の手法でIPv6ノードを列挙できれば、その中でネットワーク盗聴しているものを検出できる可能性がある。ネッ



# 価値創出を指向するメーターデータプラットフォーム ガスミエール™

A meter data platform for value creation

村上 英治  
Eiji Murakami

キーワード  
data platform, as a Service

LPガス事業の経営課題である少子高齢化による人手不足や働き方改革に対しては、データ活用とデータ分析が重要である。そのためにメーターデータをIoTによりメーターデータプラットフォームに集約する。メーターデータプラットフォームはLPガス事業者に有益なデータを提供することやデータを使ったas a Service型のソリューションを提供する。as a Service型ソリューションの第一弾としてLPガスボンベ配送合理化クラウドサービスを開発した。

To implement “work style reform” and address labor shortages caused by a declining birthrate and an aging society, which are management problems in the LP gas business and in society as a whole, data utilization and data analysis are important. To better utilize data, we employ an IoT to consolidate meter data on a meter data platform. The meter data platform is able to provide useful data to LP gas suppliers and also to provide, as a service, solutions that use the data. For example, we have developed a cloud service solution that optimizes LP gas cylinder delivery.

## 1. はじめに

IoT, ビッグデータ, AIなど新技術を活用したDX (Digital Transformation:デジタルトランスフォーメーション)の展開によるスマートシティ実現のためのas a Service型モデルが期待されている。

国内において、エネルギー自由化の規制緩和やスマートシティなど次世代社会の実現に向けた取組みが行われている。また我が国が目指すべき未来社会の姿として科学技術基本法の第5期科学技術基本計画において「IoT, ロボット, AI, ビッグデータなどを取り入れイノベーションを創出し、社会的課題を解決する」Society5.0が提唱されている。

海外においては、パリ協定をはじめとする環境保全の枠組み強化や環境負荷低減への投資が活発化する動きが顕著になってきている。

アズビル金門株式会社を取り巻く事業環境においてはIoTやAI, ビッグデータ活用の流れを受け、スマートメーターの導入やクラウドサービスの利用が進んでおり、少子高齢化による人手不足と合わせて、IoTによる自動検針や収集されたデータを活用したas a Service型事業モデルへの対応が求められている。

本論文ではB2B (Business to Business)やB2B2C (Business to Business to Consumer)のお客さまに対して、

メーターデータの収集・蓄積・管理・利用を容易にするとともに、データ活用により社会問題を解決するための価値創出を指向するメーターデータプラットフォームを紹介する。またメーターデータ分析の諸問題についても論じる。

本論文の構成は次の通りである。2章でメーターデータ分析の課題と分析例を示す。3章で価値創出を指向するメーターデータプラットフォームの概要とそのプラットフォームを利用した付加価値クラウドサービス例を説明する。4章でこのプラットフォームを使った将来の展望を述べる。最後にまとめを述べる。

## 2. メーターデータ分析

従来、メーターデータ分析については欧州を中心に電力メーターの電力消費量の研究が行われてきた。2019年は我が国において、携帯電話の4G LTE回線を使ってガスおよび水道メーターのIoTサービスが開始された。このIoT化により、従来1か月から2か月ごとしか行われていない消費量計測が少なくとも1日ごとに実施され、必要に応じて数時間ごとに計測することが可能となった。

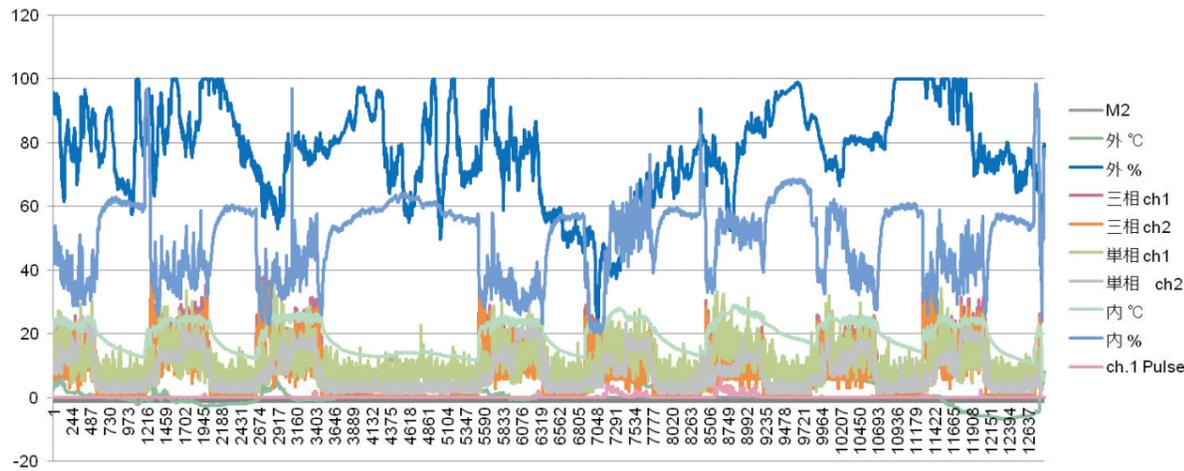


図1 レストランにおける各種データ

### 2.1 データサンプリング周期

メーターデータ分析においてデータのサンプリング周期は重要である。サンプリング周期が1時間から15分の場合は、横軸を時間として取得したデータを可視化した場合、棒グラフによるガスや水道の時刻別の消費量変化となる<sup>(1)</sup>。サンプリング周期が1分から1秒の場合は、取得したデータを可視化した場合、時系列分析が可能な折れ線グラフとなる。つまりガスや水道の1秒ごとの消費量変化が分かり、この消費パターンからどんな目的でガスや水道を消費していたかを推定することが可能となる。

Armel<sup>(1)</sup>は1分周期の電力メーターにおける電力消費量から消費量の変化パターンを抽出し、電気機器の種類を推定できることを示した。データのサンプリング周期が十分短ければ、このようなことができる。

### 2.2 メーターデータと属性データ

図1は当社で測定したあるレストランにおけるガス、電気の使用量および温度、湿度、ヒトの出入りを計測した例である。

グラフの凡例の意味は以下の通りである。M2はガス消費量、外は屋外の温度、湿度、ch1、ch2は電力メーターの電力消費量、内は室内の温度、湿度である。横軸は計測開始からの経過時間を分で示した。データ間の関連を探索する目的から、縦軸は計測値の最大値が100になるように調整した<sup>(2)</sup>。Ch1.pulseはレストラン入口に設置した人感センサの値でゼロ以上の整数値。データのサンプリング周期は1分である。

使用した分析手法は統計的手法として、相関分析、因子分析、主成分分析を用いた。

図1を目視することでは難しいデータの関連性も主成分分析<sup>(3)</sup>を使うことで次のことが分かった。

- (1) ガス消費量、室内温度、単相電力消費量ch1の組み合わせは同じ振る舞いをする。
- (2) 単相電力消費量ch2、三相電力消費量ch1、ch2の組み合わせは同じ振る舞いをする。
- (3) 外気温度、人感センサは関連がある。

(4) 一方、屋外湿度と室内湿度は相関が低い。得られた仮説として、外気温度と人感センサの値の相関に注目すると、外気温度が低いと客の入りが良い、と言える。仮説の検証として、このレストランは札幌にあるラーメン屋である事実からこの現象は説明可能である。

### 2.3 低サンプリング周期と属性データ

2.2は高サンプリング周期で属性データが多数あった場合であった。仮に2.2において、サンプリング周期が1分から1時間になった場合を考える。サンプリング周期が1分の場合はグラフの形は各データの計測値をプロットし測定値同士を線でつなぐ折れ線グラフとなり、時系列分析が可能である。一方サンプリング周期が1時間の場合は各データの計測値は棒グラフで表現される。このとき1時間内で発生したデータの変動はグラフ上では見えなくなってしまう、1時間内で発生したデータの変化は知ることができない。これはサンプリング周期を低周期にした場合の具体的な弊害である。

次に利用可能な属性データが減った場合を考える。2.2では、属性データに対して統計的手法を適用した。主成分分析によって、外気温度、人感センサの間に関連があることを探索的に発見することができた。得られた知見は札幌のラーメン屋なら当たり前のことであるが、これを探索的な方法ではなく、最初から計測するデータを絞り込み、仮説生成および検証を行うことは容易ではない。データの収集・蓄積・管理・利用が容易になることにより比較的素朴な統計的手法を用いた場合においてもデータ間の関連を見出すことができる。このような知識発見が可能になることがデータプラットフォームの価値である。

### 3. 価値創出指向メーターデータプラットフォーム

2章ではレストランにおける各種データを使った分析例を示した。探索的な分析方法によりデータ間に存在する知識を発見することができた。3章ではデータの収集・蓄積・管理・利用を容易にするとともに、高度なデータ活用を可能とするデータプラットフォームを紹介する。

### ■LPガスメーター+「新無線通信端末」～「ガスミエール」接続イメージ

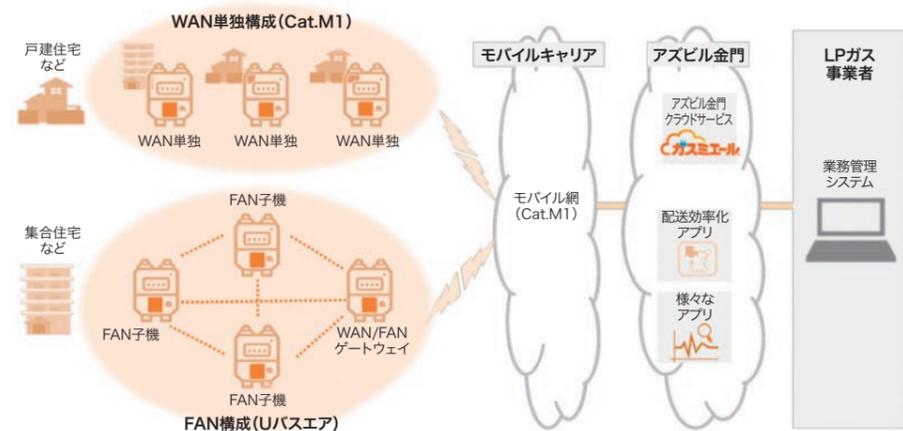


図2 ガスミエールの構成

アズビル金門はLPガス事業者向け「新時代クラウドサービスガスミエール<sup>TM</sup>」を販売開始した。

ガスミエールは指針値データや保安情報など様々なメーターデータをIoTによりメーターデータプラットフォームに集約しLPガス事業者にとって有益なデータを提供するクラウドサービスである。

図2にガスミエールの構成を示す。

LPガス事業で課題となっている人手不足による事業継続リスクや働き方改革に対してメーターデータを活用することで課題解決できるas a Service型のソリューションを提供し、LPガス事業者にとって価値創出となるクラウドサービスを開発していく。

その第一弾として、LPガスボンベ配送合理化クラウドサービスを開発した<sup>(4)</sup>。

また、ガスミエールはLPガスボンベの所在地とLPガスの消費量およびLPガスボンベやガスメーターの状態データを地理情報と関連付けることができる。2.3のような低サンプリングデータや属性データが少ない場合におけるセレンディピティ(serendipity)な知識発見も可能となる<sup>(5)</sup>。これにより単なるLPガスの消費量の可視化と管理を超えた価値を創出することができる。

### 4. 今後の展望

LPガスボンベの配送計画はMulti-Depot Periodic Vehicle Routing Problem<sup>(6)</sup>として解くことができる<sup>(7)</sup>。配送計画に必要なデータは配送先住所と配送日情報である。ガスメーターのIoT化により、ガス消費量のデータを毎日取得することが可能だ。配送日が決まれば、その日に配送するガス需要家の住所を抽出し、その住所集合に対して最短距離で配送するルートを計算する。

LPガスボンベ配送計画に必要なデータはガス消費量と需要家の住所情報だけである。この制限された情報を使って我々の生活が豊かになる他のアプリケーションを考えてみる。



図3 地図上にガス使用に関する色を配置した例

図3はガス需要家の住所に対してガス消費量データのある演算を施しその結果に基づいて色を付けた例である<sup>(8)</sup>。

この色の意味はいろいろ考えられるが例えば、ガス消費量が多いと赤色に変える例や、LPガスボンベの容積があらかじめ分かっているのに、ガス消費量からLPガスボンベの残りのガス量が少ない場合に赤色に変えたりするなどが考えられる。このように地図上にある意味を持つ特別な領域を示すことができる。この特別な領域の意味は色を付ける演算それぞれによって異なる。

しかし、使用するデータはToki<sup>(7)</sup>と同じで、それに地理情報を追加しただけである。このように地理情報を使ったアプリケーションはGIS (Geographic Information System) と呼ばれる。

今後はToki<sup>(7)</sup>のような低周期サンプリングにより取得されたガス消費量データと少数の属性データや地理情報を使ったアプリケーションの研究<sup>(9)</sup>や限定された情報を使って社会全体が豊かになるサービスについて探求する予定である。

### 5. おわりに

本論文ではデータ活用とデータ分析が可能となるメーターデータプラットフォームを紹介した。また、データ分析について乗り越えるべき課題があることを示した。この課題の解決方法として、メーターデータのGIS化が有力であることを示した。

本論で紹介したメーターデータプラットフォームを通じ

てLPガスボンベ配送合理化クラウドサービス<sup>(4)</sup>が利用可能となっている。このソリューションや将来利用可能となるソリューションによりLPガス事業者およびLPガス利用者の課題が解決され豊かな社会になる一助となれば幸いである。

<参考文献>

- (1)Carrie Armel, Energy Disaggregation, Precourt Energy Efficiency Center, Stanford, 2011
- (2)Aurélien Géron, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and Tensorflow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems, O'Reilly, 2019
- (3)Victor A. Bloomfield, Using R for Numerical Analysis in Science and Engineering, Chapman and Hall, 2014
- (4)村上英治, 土岐爽真, 組み合わせ最適化手法によるLPガス容器配送方法とその効果, 技術報告書azbil Technical Review, 2020年4月発行号
- (5)大澤幸生, チャンス発見のデータ分析-モデル化+可視化+コミュニケーション->シナリオ創発, 東京電機大学出版局, 2006
- (6)Roberto Cantu-Funes et al., Multi-depot periodic vehicle routing problem with due dates and time windows, Journal of the Operational Research Society, 2017
- (7)Soma Toki, Naoshi Shiono, Eiji Murakami, A practical approach to the vehicle routing problem in cylinder gas distribution, INFORMS Annual meeting, 2018
- (8)Eiji Murakami, How to enable the utility data under the lower sampling rate and less attribute for making smart cities, The 33rd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2019
- (9)TM Vinod Kumar, Geographic Information System for Smart Cities, Copal Publishing Group, 2014

<商標>

ガスミエールはアズビル金門株式会社の商標です。

<著者所属>

村上 英治 アズビル金門株式会社  
経営企画部

# 組合せ最適化手法による LPガス容器配送方法とその効果

## Improving LP gas cylinder delivery using ensemble learning and combinatorial optimization

村上 英治  
Eiji Murakami

土岐 爽真  
Soma Toki

キーワード  
Ensemble learning, Combinatorial optimization

LPガス容器の配送において人手不足や長時間残業の課題を解決し、働き方改革を推進することが可能な技術を開発した。この技術はIoTによりLPガス消費量を取得し、そのデータを使って複数の予測器を用いLPガス容器の残量を予測する。この予測値に基づきLPガス容器配送先住所を選択し、配送車両や配送時間を最小化する最適解探索により配送計画を作成する。

We have developed a technology that promotes “work style reform” and can solve the problems of labor shortages and long overtime in LP gas cylinder delivery. Our method uses an IoT to obtain LP gas consumption data. Ensemble learning is applied to the data to predict the amount of LP gas remaining in gas cylinders.

Based on the predictions, addresses for LP gas cylinder delivery are selected and an optimal delivery plan is created that minimizes the number of delivery vehicles and the amount of delivery time.

### 1. はじめに

近年、物流業全般において、人手不足や長時間残業が深刻な問題となっており、経験やノウハウの少ない配送員が働きやすい環境を整備し労働時間を削減するなどの労働環境改善が求められている。

笹山ら<sup>(1)</sup>によりLPガス容器の配送に関して、配送計画問題とIoTによりLPガス消費量を取得することで解決できることが提案されている。

本論文の構成は次のとおりである。2章でLPガス容器配送最適化の概要を説明し、3章でLPガス容器残量予測とLPガス容器配送計画の解法を説明する。4章で本手法を用いた実験結果を示す。最後にまとめを述べる。

### 2. 遠隔検針導入によるLPガス容器配送効率化

本章ではLPガス容器の配送に関する配送計画問題に対し遠隔検針により得たLPガス消費量を基に解決する方法を述べる。

LPガス容器は空になる前に、ガスが充填された別の容器と交換する必要がある。充填済み容器の配送タイミングは、LPガス供給事業者が月1回の検針データを基に決定し

ており、データが少なく推定が困難であった。そのため使用中の容器内に多くのガスが残った状態で充填済み容器と交換されることがあり、配送コストの無駄、および、回収した容器に残るガスを考慮することにより不要な在庫が発生するなど、非効率なものであった。

この課題を解決し効率の良いLPガス容器の配送計画を得ることができる方法を提案する。

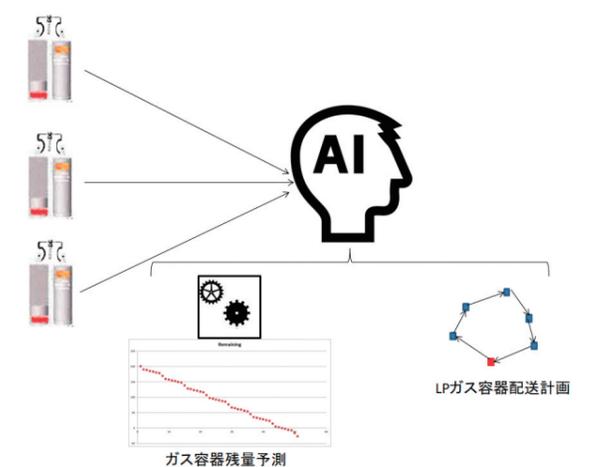


図1 LPガス容器配送計画

図1に提案する方法の概要を示す。LPガス容器配送計画を実行するには、毎日のLPガス消費量をIoTにより取得し、LPガス容器内のガスの残量がなくなる日を予測する。次にLPガス容器内のガスがなくなる前にLPガス容器の回収/交換を行うLPガス容器の設置住所を抽出し、その住所へLPガス容器を配送する配送計画を作成する。

LPガス容器を配送する配送計画問題を解くにあたりこの問題の特徴を述べる。抽出した住所にLPガス容器を配送するには、配送車両のキャパシティの制約から、複数回LPガス容器の充填所に立ち寄り、充填済みLPガス容器を配送車両に積み込み、未回収/未交換の住所へ引き続きLPガス容器を配送する必要がある。この種の配送計画問題はMulti-Depot Periodic Vehicle Routing Problem<sup>(2)</sup>と呼ばれる。

3章ではLPガス容器配送最適化を実現するために必要なLPガス容器残量予測方法およびLPガス容器配送計画方法について論じる。

### 3. LP ガス容器配送効率化の実現方法

#### 3.1 LPガス容器残量予測

LPガス容器は空になる前に、ガスが充填された別の充填済みタンクと交換する必要がある。本章ではLPガス容器内の残量を予測する手法を説明する。

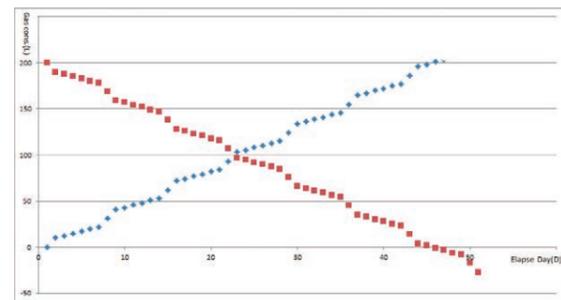


図2 毎日のLPガス消費量とLPガス容器内残量

図2は本手法が想定する毎日のLPガス消費量とLPガス容器内残量の関係を示したグラフである。◇はLPガス消費量を示し、□はその結果としてのLPガス容器残量を示す。このグラフはLPガス容器満充填量を200LとしたときのN日経過時点でのLPガス消費量とLPガス容器残量の関係である。特に□のプロットでLPガス容器残量が負となっている領域については、3.2で述べるLPガス容器残量予測モデルで予測し外挿<sup>(3)</sup>した結果である。

#### 3.2 アンサンブル予測モデル

複数の予測器が同じLPガス消費量データを使って将来のLPガス消費を予測し、結果としてLPガス容器内の残量を予測する。

図3は3種類の予測器によるアンサンブル学習<sup>(4)(5)</sup>による予測モデルの概要である。

ヒューリスティクス予測器はLPガス消費における曜日効果に着目した予測方法である。月曜から日曜の各曜日のLP

ガス消費量が一とおり得られたなら、7日先のLPガス消費量は直近の7日とほぼ同じであると仮定した場合はこの方法は簡単な方法だが高い予測精度が期待できる。

しかし、この方式は月曜から日曜の7日間を学習期間とした場合に、この学習期間内にカレンダー上の特異日が含まれる場合は予測精度の低下が懸念される。この予測精度の低下を改善する目的で図3のように異なる種類の予測器結果と組み合わせることでLPガス消費量予測の予測精度の低下を回避することが可能となる。

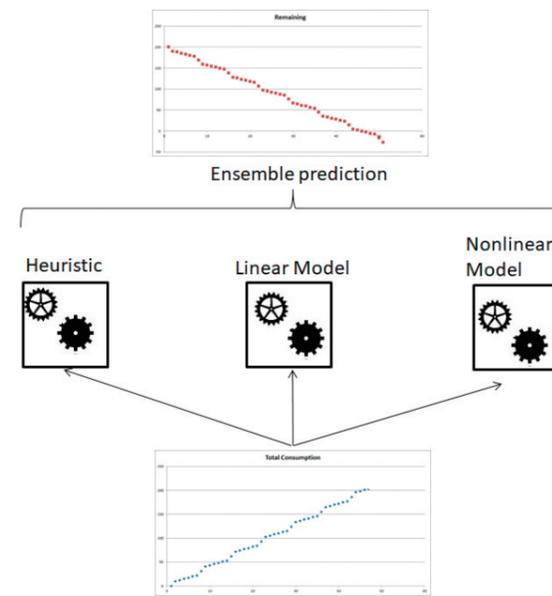


図3 複数予測器によるアンサンブル予測

線形予測器は図3に示すように異なる種類の予測器として使用する。

式(1)は一般的な線形回帰モデルを示す。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon \quad \dots(1)$$

ただし、LPガス消費予測においてYはLPガス消費量、 $X_1$ は使用経過日数、 $X_2$ はダミー変数化した曜日情報である<sup>(6)</sup>。必要に応じてその他の変数を説明変数 $X_p$ に追加。この予測器はカレンダー上の特異日を説明変数として扱うことで特異日効果によるLPガス消費の変化に対応することが可能である。つまり、ヒューリスティック予測器に対してLPガス消費量の補正をすることができる。

非線形予測器は線形予測器と同様に図3に示す異なる種類の予測器として使用する。

式(2)は非線形モデルを示す。

$$y = f(x, \beta) \quad \dots(2)$$

ただし、 $f$ は非線形モデルを表す。 $y$ はLPガス消費量、 $x$ は使用経過日数および曜日情報を示すベクトル、 $\beta$ はモデルのハイパーパラメータである。予測器は量的変数と質的変数を取り扱うことができる非線形モデルを選択<sup>(7)</sup>。

深層学習<sup>(8)</sup>やSVM Regression<sup>(9)</sup>などが利用可能である。

以上の3種類の予測器から、ある基準に基づいた投票形式により、1つの予測器の結果を採用する。投票形式で1つの予測器の結果を採用するに当たり、予測器の運用者はAgent<sup>(10)</sup>であると考えられる。Agentには効用関数<sup>(11)</sup>が存在しその効用を最大化するように各予測器の結果を選択する。

3種類の予測器の値には常に真値との誤差が存在する。予測器の値から求めるLPガス容器残量も誤差が存在し、この残量から得られるLPガス容器内のガスがゼロになる日も予測器ごとに異なる。

予測器の運用者がリスク回避型の効用関数を持っている場合は3種類の予測器の中で1番直近にLPガス容器残量がゼロとなる日を採用する。なぜなら、予測器の値と真値の差からLPガス容器内の真の残存ガス量が1番多くなるのが予想される。結果として予測器を使った場合のLPガス容器内のガスは1番多い値をとるので予測器の値に誤差が含まれていても現実世界においてLPガス容器内のガスがなくなってしまうリスクは1番小さくなる。

逆に予測器の運用者がリスク選好型でかつLPガス容器残量がゼロとなる1日前のLPガス容器内のガス量が1番少なくなることを期待する場合は3種類の予測器の中から1番未来にLPガス容器残量がゼロとなる日を選択する。

このように予測器の運用者はAgentの効用関数に従い3種類の予測器を選択する。これをアンサンブル予想モデルと呼ぶ。

### 3.3 LPガス容器配送計画問題の数理的アプローチ

#### 3.3.1 LPガス容器配送の特徴

LPガス容器の配送が一般的な宅配便などの配送と異なる大きな点は、配送管理が供給者側に委ねられているというところにある。このような配送はVMI (Vendor Management Inventory)方式と呼ばれ、ガス切れに対する責任が供給者側に課せられる一方、配送のタイミングは基本的に供給者側が決定することができる。したがって、複数ある配送候補日の中から最適な配送日を選択する問題ととらえることができるため、LPガス容器の配送計画問題は多期間計画問題に属する。

多期間計画問題を解くに当たっては、その計算を実施する期間を設定する必要がある。期間は長ければ長いほど全体最適に近づくが、より未来の配送計画を立てる際には供給先のガス消費量など不確定な要素が増えることや計算負荷の増加につながる。したがって、計算期間を現実的には区切る必要が生じるが、その際に考えられる懸念としては、ちょうど区切られた前後の日の計画に関しては、お互いの配送計画が考慮されておらず、非効率な配送になる可能性があることである。

加えて、ガス切れリスクとのトレードオフではあるが、配送日を遅らせて可能な限り容器内のガスを空に近づけた状態で交換する方が訪問頻度を下げられるため、配送の効率化につながるという側面がLPガス容器配送においては存在する。そのため、配送計画は配送先の在庫を考慮しながら作成する必要がある。このような問題はInventory routing (在庫運搬経路)問題と呼ばれる。

### 3.3.2 LPガス容器配送の問題設計

多期間計画問題を解くに当たり、まず配送先ごとのガスの使用状況などをもとに配送候補期間を算定する。本配送計画問題においては、その期間内に配送を終えるようにしながら、配送距離や時間を最小化する組合せ最適化問題を解く。期限内に配送できない物件が存在する場合は大きなペナルティを目的関数に課すことで、可能な限り期限内で配送を完了させる計画作成を行うように設計した。

また、多期間計画問題における計算期間の区切りにあたる部分で、その前後の計画が非効率になる懸念に関しては、ローリングホライズン方式を用いることで解決を狙った。ローリングホライズン方式とは、複数日におよぶ配送計画の内、初日のみを採用し、翌日以降の計算に関しては、計算期間を1日スライドして、同様に計画の作成と初日の配送計画の採用を繰り返すというものである。これにより常に数日先の予定を見越した上で、計画が作成されるため、計算期間の区切りにおいて、配送が非効率になることは生じなくなる。

最後に、在庫運搬経路問題を解くに当たっては、与えられた配送候補期間の内、可能であればうしろの日付で配送に行くよう、M. DROR<sup>(12)</sup>が示すように前倒しで配送するほど、追加でコストがかかるように目的関数に工夫を加えた。これにより、過剰な前倒しを抑えつつ期限切れのリスク管理も行うことができる。

### 4. 実験結果

実際のLPガス容器配送の実績データを使って3章の方法でLPガス容器配送計画を作成した。問題の規模は1日の配送車両1台当たりLPガス容器を配送可能な住所は最大で50件。利用できる配送車は4.1, 4.2は1台, 4.3は最大9台とする。また配送車両の運行可能時間は8時間と設定し、8時間を超える場合も残業扱いで運行可能であるが可能な限り回避することにする。

#### 4.1 ヒトの配送計画との差

配送員が配送した実績と3章のアルゴリズムにより解いたLPガス容器配送計画の差異分析を行った。

表1 ヒトとアルゴリズムの差

	距離(Km)	時間(分)
実績	27	231
配送順序最適化	22	216
改善効果	▲18%	▲6.5%

表1は配送実績として配送員が配送車両1台を運行して1日に移動する総距離と所要時間および、アルゴリズムが同じ住所に配送する場合の配送計画を示す。

配送員の方は10年以上の経験を持ち、担当地域の道路事情に精通した熟練者であるがその熟練者と比較して、総移動距離で18%、所要時間で6.5%アルゴリズムの方が良い配送計画を作成することができた。

この結果からアルゴリズムは少なくともヒト（熟練者）と同等以上であると考えられる。

#### 4.2 アルゴリズムの視野による差

アルゴリズムがLPガス容器配送計画作成時に利用できる配送先住所の集合の大小をアルゴリズムから見た場合の問題の視野とし、その大小の差から結果がどのように異なるかを実験した。

表2において1日分の視野とはLPガス容器残量予測においてLPガス容器内のガスがゼロになる1日前のLPガス容器交換先住所しか見えない状態である。一方5日分の視野とはLPガス容器内のガスがゼロになる5日前からLPガス容器交換先住所が見えている状態を示す。アルゴリズムにおいては見えているLPガス容器交換先住所の集合に対して住所を選択しLPガス容器配送計画を作成することができる。

表2 アルゴリズムの視野ごとの配送計画

	配送数	1件当たり距離 (Km)	1件当たり時間 (分)	総距離 (Km)	総時間 (分)
1日分の視野で最適化 (2日合計)	82	1.19	11.1	98	916
5日分の視野で最適化 (2日合計)	95	1.02	10.4	97	993
改善効果	+13	▲0.17	▲0.7	▲1.0%	+77

LPガス容器の配送交換件数は5日分の視野を持っている方が13件多く、総移動距離は1.0%短縮され、総時間は77分、1日分の視野を持っている場合と比べて増えている。1件当たりの配送にかかる距離と時間で比較すると、1日分の視野では1.19 km/件、11.1 分/件、5日分の視野では1.02 km/件、10.4 分/件となっており、与えられたリソースを効率的に使いながら配送ができているといえる。

表3 1日分の視野における毎日の配送計画差

日付	車両数	配送件数	総時間(分)	超過勤務(分)
5月15日	1	52	573	93
5月14日	1	30	343	0
			230分差	93

表4 5日分の視野における毎日の配送計画差

日付	車両数	配送件数	総時間(分)	超過勤務(分)
5月15日	1	49	475	0
5月14日	1	46	518	38
			43分差	38

表3は1日分の視野に対して5月14日、15日のLPガス容器配送計画を作成した結果である。表4は5日分の視野で5月14日、15日のLPガス容器配送計画を作成した結果である。

この結果より、アルゴリズムの視野は広い方が毎日の配送計画の総時間の差が少なく1日当たりの業務が平準化されていることが分かる。

これは可能な限り残業を回避する設計であるため、視野が5日の場合には2日間の超過勤務でない時間のリソースをまず使い切ろうとするためである。1日の視野の場合には、

直前の配送先しか見えていないため配送日の選択ができず、日をまたいでこのような調整を図ることができない。この例では、1日分の視野での残業時間が93分であるのに対し、5日分の視野では残業時間が38分となり、トータルとして残業時間の削減に成功している。

上記の考察はアルゴリズム同士の比較であったが、人手による複数日にまたがる視野を持ちながら最適な配送先住所を選択することは容易ではないので、扱う情報が多くなり問題の規模が大きくなるに従いヒトとアルゴリズムの差は大きくなると考えられる。

#### 4.3 配送先住所の担当制がない場合

4.1と4.2は配送車両が1台の場合であった。今度はより大規模な問題として、より多くの配送先住所に対して複数の車両を利用できる条件下で配送計画を考える。アルゴリズムの視野は1日分とし、LPガス容器内のガスがゼロになる1日前のLPガス容器交換先住所しか配送できないとする。

表5 エリア担当制の差異によるリソース使用

	車両数	総距離 (Km)	総時間(分)
エリア担当制あり	9	615	2615
エリア担当制なし	5	484	2355
改善効果	4台減	▲21%	▲10%

表5においてエリア担当制とは配送車両ごとに担当する配送先が決まっていることを表す。エリア担当制なしがエリア担当制ありと比べて使用する車両数において4台減、総移動距離において21%短縮、総時間は10%減で同じ配送先を巡回することができる。

エリア担当制なしがエリア担当制ありと比べて車両や時間など配送で利用できるリソースの使用が少なく済む理由として、例えばエリア担当制ありの場合、各担当の境界付近においては効率的に配送できないことや、車両の荷量を最大限活用することができず結果として車両数が増えてしまうということが考えられる。

### 5. おわりに

本論文では次の内容について論じた。LPガス容器の配送における物流問題に対し、IoTによりLPガス消費量を取得し、そのデータを使って複数の予測器を用いLPガス容器内残量予測を行う。予測器の運用者は各人の効用関数<sup>(11)</sup>に従いリスク回避型からリスク選好型までの予測値を選択的に採用する。採用した予測値に基づきLPガス容器配送先住所を選択し配送車両や配送時間を最小化する配送計画最適化手法について論じた。

本論文で述べた手法は現在LPガス容器の配送効率化を目的としてフィールドテストを実施している。配送員の高齢化ならびに人手不足の深刻化が問題視されるなか、本手法により配送計画を最適化することで、配送員の業務負荷の低減および働き方改革の実現や業務におけるヒューマンエラー防止への貢献も期待できる。LPガス配送事業の効率化・高度化への一助となれば幸いである。

#### <参考文献>

- (1) 笹山晋一, 山上伸, 片瀬成識, LPGボンベの効率的な配送方法について, オペレーションズ・リサーチ, 43 (11), pp.614-617, 1998
- (2) Roberto Cantu-Funes et al., Multi-depot periodic vehicle routing problem with due dates and time windows, Journal of the Operational Research Society, 2017
- (3) Victor A. Bloomfield, Using R for Numerical Analysis in Science and Engineering, Chapman and Hall, 2014
- (4) Leo Breiman, Pasting Small Votes for Classification in Large Database and On-Line, Machine Learning 36, no. 1-2(1999):85-103
- (5) Gilles Louppe et al., Ensembles on Random Patches, Lecture Notes in Computer Science 7523 (2012):346-361
- (6) 塚本邦尊 他, 東京大学のデータサイエンティスト養成講座, マイナビ出版, 2019
- (7) Aurélien Géron, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and Tensorflow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems, O'Reilly, 2019
- (8) Lai, Guokun, et al., Modeling long-and short-term temporal patterns with deep neural networks, The 41st International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval., ACM, 2018.
- (9) C.M. ビショップ, 元田 浩 (監訳), パターン認識と機械学習 上下, 丸善出版, 2012
- (10) S.Russell, P.Norvig, Artificial Intelligence A Modern Approach, Pearson, 2016
- (11) P.A. Samuelson, Foundations of Economic Analysis, Harvard Univ. Press, Cambridge, 1947
- (12) M. DROR, M. BALL and B. GOLDEN, A COMPUTATIONAL COMPARISON OF ALGORITHMS FOR THE INVENTORY ROUTING PROBLEM, Annals of Operations Research 4(1985/6)3 -23

#### <著者所属>

- 村上 英治 アズビル金門株式会社  
経営企画部
- 土岐 爽真 東京ガス株式会社  
デジタルイノベーション本部基盤技術部

# 安全な動力プレス機械を実現するためのデュアルバルブの開発

## An improved dual valve for safer power press machines

川口 豊  
Yutaka Kawaguchi

鷲野 向一  
Koichi Washino

大島 章義  
Akiyoshi Oshima

キーワード  
動力プレス機械, デュアルバルブ, ソレノイド

動力プレス機械は、高性能なサーボプレス機に比べ構造が単純なため、現在も多くの生産現場で使用されている。動力プレス機械の起動制御(モータからプレス機構へのエネルギー伝達過程)に排気優先の2重化電磁弁であるデュアルバルブを使用することで、故障時に動力プレス機械のエネルギー伝達を確実に遮断できる。その結果、故障発生時の予期しない起動や重大事故を防ぎ、危険側故障の発生確率が極めて低くなる。動力プレス機械に搭載される安全のための機能は常に進歩しており、デュアルバルブへの要求も変化している。今回、より安全で安心できる動力プレス機械を実現するためにデュアルバルブTXを新たに開発したので、その特長、技術的内容について報告する。

Power press machines are still used at many production sites because they have a simpler structure than high-performance servo press machines. By using a dual solenoid valve with a high exhaust function for startup control of a power press machine (the process of transferring energy from the motor to the press mechanism), it is possible to reliably shut off the energy transfer to the power press machine in the event of a failure. As a result, serious accidents that may follow an unexpected startup can be prevented, and the probability of occurrence of a dangerous failure is extremely low. The safety features on power press machines are constantly developing, and the requirements for dual valves are changing. In our report, we describe the features and technical details of a new dual valve that we developed in order to realize a safer and more reliable power press machine.

### 1. はじめに

アズビルTACO株式会社のデュアルバルブは1979年の発売開始以来、国内外の動力プレス機械に採用されている。

安全側面における動力プレス機械に対する要求は年々高まっており、デュアルバルブに対する要求も変化している。デュアルバルブに求められる新たな要求として、予期しない起動を防止するために必要な故障時の特性向上と、緊急停止時に速やかに動力プレス機械を止めるための応答時間・排気時間の短縮がある。これらの要求に対応することを目的に、デュアルバルブTXを開発した。

故障時の特性向上のために、新たな流路形式であるL型クロスフローを考案するとともに、高速な排気時間のために排気有効断面積の最適化を行った。また、圧縮空気の質に影響を受けない、高速な応答時間のソレノイドバルブを開発した。今回、これらにより安全で安心できる動力プレス機械のためのデュアルバルブTXが実現した。

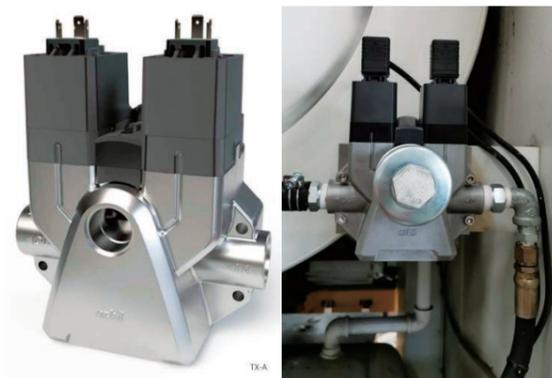
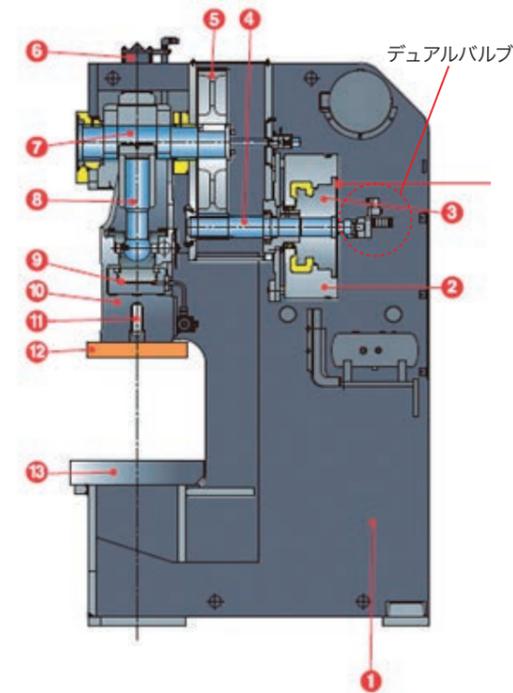


図1 開発したデュアルバルブTX  
(右は動力プレス機械に取り付けた状態)

### 2. デュアルバルブとは

動力プレス機械における起動制御に、デュアルバルブは使用される。図2に動力プレス機械の構成を示す。動力プレス機械は、モータで駆動するフライホイールの回転力をクラッチ/ブレーキを使いクランクシャフトに伝え、直線運動に変換することでプレス機能を発揮する。クラッチ/ブレーキに印可する空気圧力を上げることでクラッチが付き、空気圧力を下げることでばねの力によりブレーキが作動する。クラッチ/ブレーキの制御にシングルバルブを使用すると、ピストンやバルブへの異物噛み込みなどによりバルブがON側故障(バルブの復帰不良)した場合、バルブの出口(クラッチ/ブレーキ側)に圧縮空気が常時供給されてしまうため、動力プレス機における予期しない起動が発生してしまう。一方デュアルバルブは2つのバルブを並列に一体化した構造となっており、双方のバルブがONしないとデュアルバルブとしてON状態にならない冗長性を備えており、図3(c)に示すとおり1つのバルブがON側故障(以下、片側ON故障)したときに、圧縮空気は一方の正常なバルブから排気され、出口圧力はブレーキの作動圧力に抑制されることで、動力プレス機械を安全に停止できる。



1. フレーム	8. スクリュー
2. フライホイール	9. オーバーロードプロテクター
3. クラッチ/ブレーキ	10. スライド
4. ピニオンシャフト	11. スライドノックアウト装置
5. メインギヤ	12. スライドプレート
6. スライドバランス	13. ボルスター
7. クランクシャフト	

図2 動力プレス機械の構成<sup>(1)</sup>

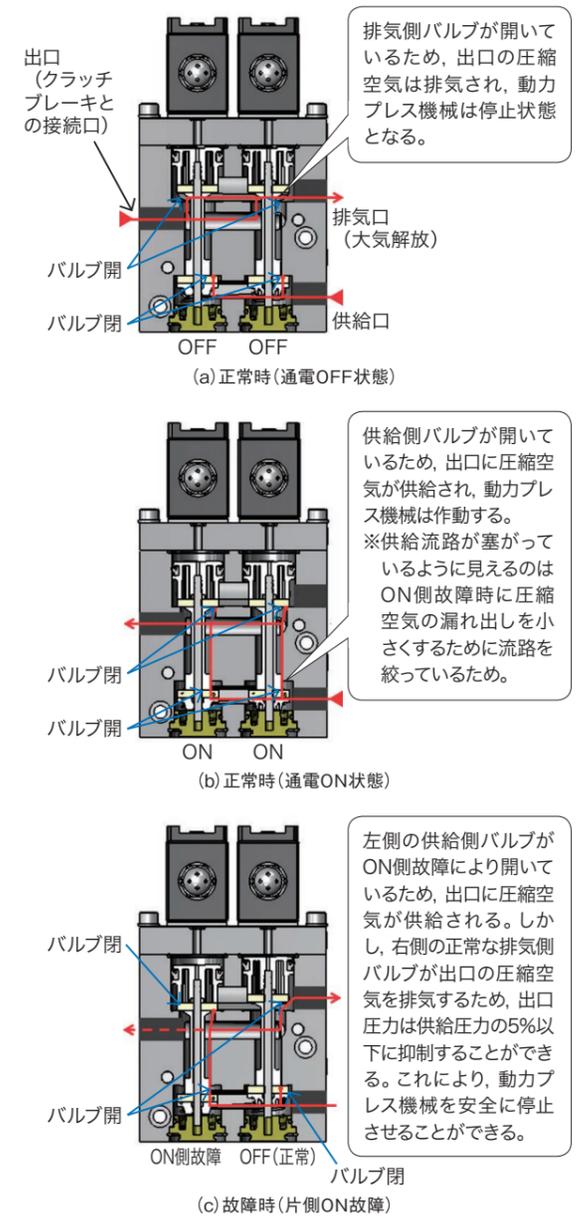


図3 正常時と故障時における圧縮空気の流れ  
(モデルは従来機パラレルフロー)

### 3. 開発のポイント

より安全で安心できる動力プレス機械を実現するためのデュアルバルブとして、下記を開発のポイントとした。

- (1) ゼロに近い片側故障時の出口圧力
  - (2) 高速排気のための大きな排気有効断面積
  - (3) 圧縮空気の質に影響を受けない高速な応答時間
- さらに、新しい価値を備えたTXを表現するためのインダストリアルデザインを開発のポイントに加えた。

#### 4. ゼロに近い片側故障時の出口圧力

動力プレス機械の安全側面においてデュアルバルブに要求される重要な性能は、片側ON故障時の出口圧力である。片側ON故障時でも確実にブレーキを動作させるため、0に近い出口圧力が要求される。

デュアルバルブの流路形式にはパラレルフローとクロスフローがある。図4に片側ON故障時におけるパラレルフローとクロスフローの比較図を示す。クロスフローは、片側ON故障時に供給圧力空気は弁体を通ずるが正常側の弁体により供給圧力は遮断されるため、パラレルフローよりも出口圧力を抑制することが容易である。

図5に従来クロスフローとTXクロスフローの比較図を示す。(a)に示す当社従来品(以下、従来品)では左右の流路を繋ぐために流路部品(X)と(Y)が必要であった。一方(b)に示すTXでは、新たに考案したL型レイアウトを採用することで、従来品における流路部品(Y)が不要となるクロスフローが実現した。また、片側ON故障時の出口圧力は従来品(パラレルフロー)が供給圧力の4.5%に対しTXは2%以下に低減できた。

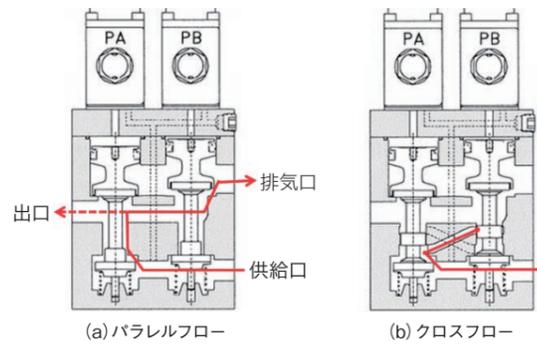


図4 片側ON故障時比較

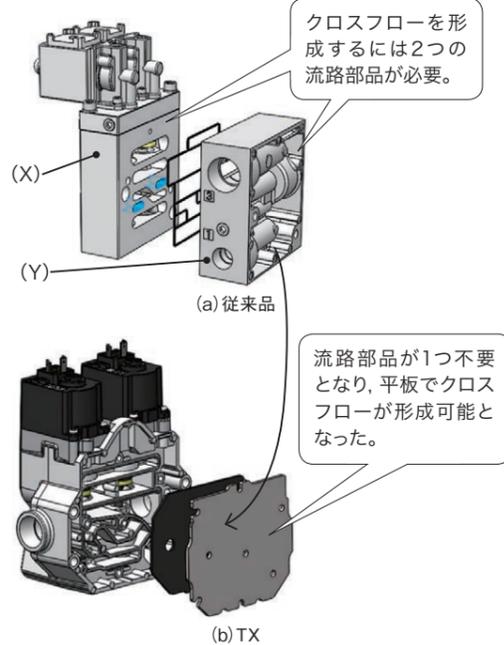


図5 クロスフロー流路比較

#### 5. 高速排気のための大きな排気有効断面積

動力プレス機械において、緊急停止時に動力プレス機械が停止するまでの時間(以降、停止時間)が短いほど安全な機械といえる。停止時間が短ければ、動力プレス機械に備えるガード装置と危険部分の間に確保すべき距離が短縮し、動力プレス機械のコンパクト化に貢献する。動力プレス機械の停止時間を短くするには、クラッチ/ブレーキに印可する圧縮空気を速やかに外気に排出し、デュアルバルブの出口圧力をブレーキが作動する圧力未満に低下させることが必要である。排気時の空気流量は以下の式で表せる。

$$Q = 120 \times S (P_h + 0.1) \sqrt{\frac{293}{T + 273}}$$

Q: 空気流量(L/min) S: 有効断面積(mm<sup>2</sup>)  
P<sub>h</sub>: 上流側圧力(MPa) T: 温度(°C)

したがって、排気時の空気流量を増やすにはデュアルバルブの排気有効断面積を大きくする必要がある。排気有効断面積を大きくするために流路形状の見直しを行った。図6に流路変更箇所例を、図7に放出法による排気有効断面積の測定結果を示す。TXは従来品から排気口付近にR形状の追加と出口付近の流路断面積を大きくした。結果、排気有効断面積は従来品から20%向上した。

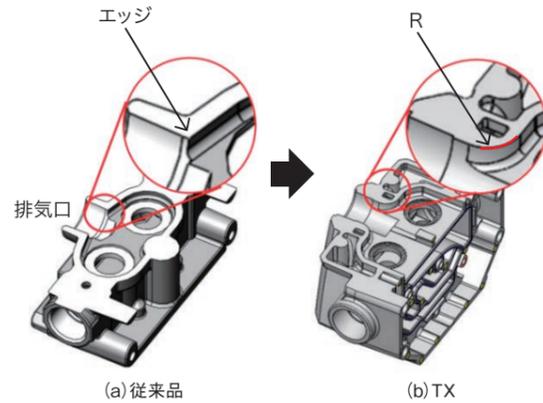


図6 流路変更箇所例

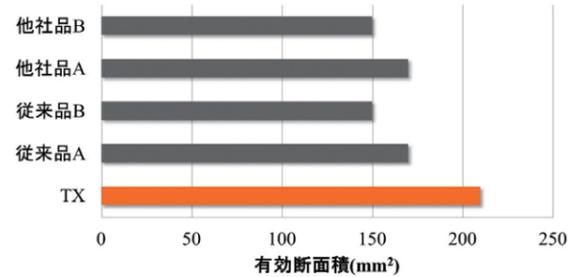


図7 有効断面積測定結果

#### 6. 圧縮空気の質に影響を受けない高速な応答時間

動力プレス機械に使用されるクラッチには、乾式クラッチと湿式クラッチがある。乾式クラッチを使用する場合、

ルブリケータ等を用いて積極的に潤滑油を圧縮空気に含ませる必要がある。圧縮空気の加圧により固定コアと可動コアの密着力が増加するため、潤滑油を含んだ圧縮空気が固定コアと可動コアの接触面に付着すると、ON→OFF応答時間が遅くなる問題があった。

図8にソレノイドバルブの構造比較を、図9に応答時間改善と潤滑油付着の影響を示す。従来品では圧縮空気中の油分が固定コアと可動コアの接触面に付着する構造となっており、コア接触面に潤滑油を塗布すると4msec程度のON→OFF応答時間の遅れが発生した。

TXではソレノイドバルブにスプールを追加することで、固定コアと可動コアの吸着面への圧縮空気の侵入を防ぐとともに、固定コアと可動コアの密着力を抑制し、たとえコア接触面に潤滑油が付着してもON→OFF応答時間の遅れを0.3msec程度に抑えることができた。

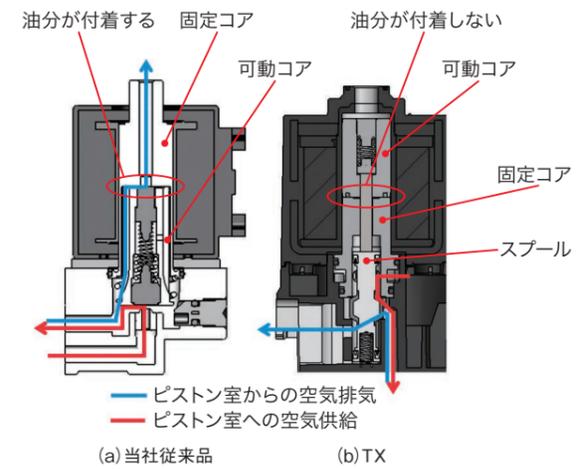


図8 ソレノイドバルブの構造比較

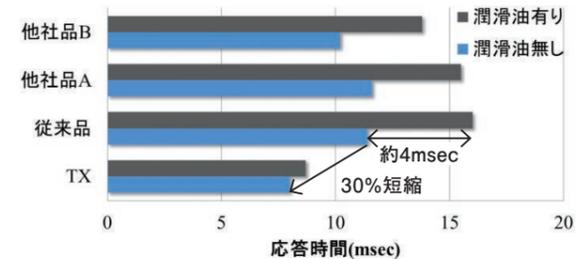


図9 応答時間改善と潤滑油付着の影響

#### 7. TXの価値を表現するインダストリアルデザイン

当社はazbil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、ユーザーの使いやすさ、分かりやすさを踏まえたインダストリアルデザインの統一を進め、製品価値や企業ブランド価値の向上に取り組んでいる。

図10に当社デュアルバルブの外観比較を示す。空圧機器は、機能のみを追求する傾向にあり、従来品では内部メカニズムから外観が決まることが多かった。TXでは、機能だけでなく外観にもこだわった。開発当初から目指すインダストリアルデザインを定め、内部メカニズム設計と両立することで、多様な動力プレス機械に溶け込みながら、

TXが持つ新しさ・精密さ・堅牢さを表現できるインダストリアルデザインが実現した。

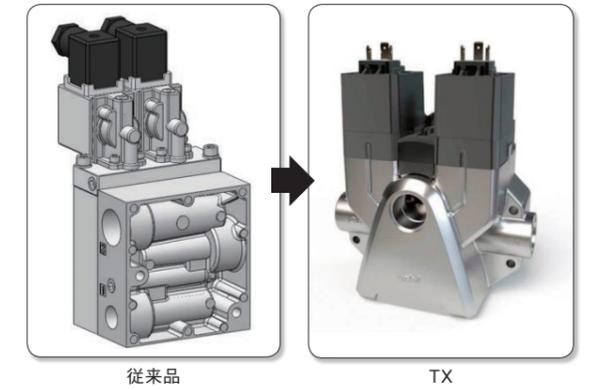


図10 当社バルブの外観比較

#### 8. おわりに

今回、従来製品の良さを継承しながら、さらに安全で安心できる動力プレス機械を実現できるデュアルバルブTXを開発した。結果を以下にまとめる。

- 新しいL型レイアウトのクロスフローを採用することで、片側故障時の出口圧力を4.5%から2%以下に改善することができた。
- 流路形状を見直し、排気有効断面積を従来品から20%向上させた。
- ソレノイドバルブの固定コアと可動コア間に圧縮空気が侵入しない構造にすることで、圧縮空気中の潤滑油による応答時間遅れを抑制することができた。また、応答時間を30%短縮することができた。
- TXが持つ価値を表現したインダストリアルデザインができた。

<参考文献>

- OCP C型シングルクラックプレスカタログ  
CHIN FONG MACHINE INDUSTRIAL CO., LTD.

<著者所属>

- 川口 豊 アズビルTACO株式会社 開発部  
鷲野 向一 アズビルTACO株式会社 開発部  
大島 章義 アズビルTACO株式会社 開発部

# CFDを用いた調節弁に発生するキャビテーション壊食の予測

## Prediction of cavitation erosion in control valves using computational fluid dynamics

齊藤 健二  
Kenji Saito

尹 鍾皓  
Chongho Youn

キーワード  
調節弁, キャビテーション壊食, CFD, 可視化, エロージョン指標

調節弁ではキャビテーションに起因する壊食(エロージョン)が発生するケースも多く、調節弁メーカーにとってキャビテーションの発生抑制および壊食防止は重要な技術課題である。この課題に対する1つの試みとして、キャビテーションを考慮した非定常CFD解析を行い、エロージョン指標を用いて解析結果を可視化した。その結果、調節弁の壊食箇所の特定に有効な指標を明らかにし、また壊食とキャビテーションの発生形態との関連性についてCFD解析結果から推測を行ったのでここに報告する。

Erosion often occurs in control valves due to cavitation. Therefore, for valve manufacturers, the prevention of erosion and suppression of cavitation are important technological problems. As one attempt at a solution, we used an unsteady computational fluid dynamics (CFD) analysis that took cavitation into account, and visualized the results of analysis using published erosion indexes. As a result, we found effective indexes for locations of control valve cavitation erosion, and from the CFD analysis we were able to estimate the relationship between the forms of occurrence of erosion and cavitation.

### 1. はじめに

調節弁はプラグを上下に動かして流路の隙間を制御することで、流量を調節したり流体を止めたりする機能を持った流体機械である。調節弁はプロセス制御における操作端として様々なプラントや工場の配管系に使用されている。

アズビル株式会社では特定顧客向けのバルブも多数生産しており、例えば化学市場向けの高圧アングル弁やLNG基地向け大口径調節弁といった実績を長期にわたり培ってきた<sup>(1)</sup>。こうした多種多様な環境下ではプロセス流体の条件も幅広く、特に液体の場合には局所的な流速の増加や渦によりキャビテーションが発生するケースも多い。

キャビテーションとは、液体の圧力が飽和蒸気圧以下に下がることで気泡が生成され、やがて圧力回復し崩壊するまでの過程を指す。この気泡の崩壊が壁面近傍で起こった場合、崩壊時に発生する衝撃力が壁面に印加され、これが長期間継続することでやがて壊食(エロージョン)が発生する。キャビテーション壊食により弁本体や内弁の損傷が起こると、プラントの停止といった深刻な問題を引き起こすこともある。このような背景から、調節弁に発生するキャビ

テーション壊食の研究として、上流圧力が最大20MPaの高圧アングル弁を対象とした実験が過去に行われている<sup>(2)</sup>。一方、近年ではキャビテーションによる壊食を机上で予測する方法として、CFD (Computational Fluid Dynamics) による数値解析から算出したエロージョン指標が提案されており、プロペラ等の翼形状を対象に壊食箇所の予測について検討が行われている<sup>(3)(4)</sup>。しかし、調節弁のような流体機械に対して同様の指標を用いて検討した事例はあまり見当たらない。

そこで、本研究ではCFDを用いた非定常キャビテーション解析を行い、エロージョン指標を用いて解析結果を可視化した。また、エロージョン指標の有効性について検討を行い、プラグに起こる壊食とキャビテーションの発生形態との関連性についてCFD解析により推測した。

記号

- $C_v$  : 流量係数
- $\dot{m}^+, \dot{m}^-$  : 物質移動率
- $P$  : 圧力
- $Q$  : 体積流量

- $\alpha$  : ボイド率
- $\sigma$  : キャビテーション係数
- $\rho$  : 密度

添字

- $D$  : 下流
- $l$  : 液相
- $U$  : 上流
- $v$  : 気相

### 2. CFDを用いたキャビテーション解析

#### 2.1 CFDモデルおよび解析条件

解析対象であるコンタード形アングル弁のモデルを図1に示す。形状および寸法は先に紹介した高圧アングル弁と同様で、流れ方向はflow-to-openである<sup>(2)</sup>。図1のモデルから計算領域となる流路を抽出し、格子生成を行った。格子生成後のモデルを図2に示す。要素数は約700~800万要素である。入口境界、および出口境界には一様分布の静圧を与えており、アングル弁前後の配管長さは配管径Dに対して上流側は2D、下流側は6Dとした。また、今回の解析対象とするモデルの弁開度は定格リフトの100%および90%の2種類とした。

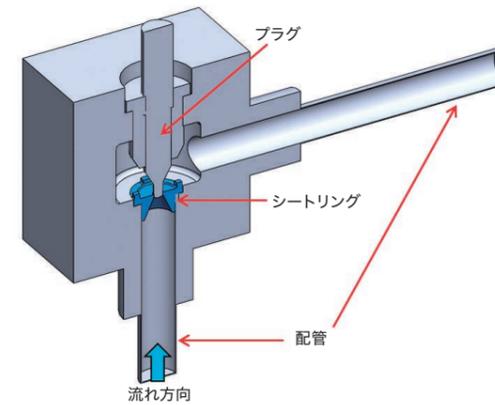


図1 解析対象断面

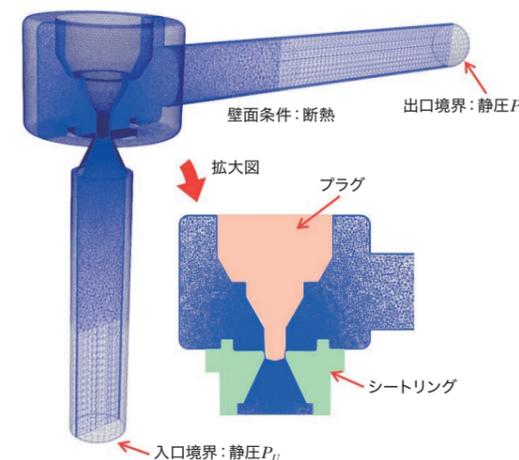


図2 要素分割モデル

CFD解析条件について表1に示す。CFDのソルバーは汎用流体解析コードのAdvance/FrontFlow/Red Ver5.4を用いた。キャビテーションモデルには齋藤ら<sup>(5)</sup>によって提案された均質流モデルを使用した。均質流モデルでは、キャビテーションの発生および消滅時の相変化について以下の式を用いてモデル化している。

$$\dot{m} = \begin{cases} \dot{m}^+ & \text{if } P < P_v^* \\ \dot{m}^- & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

$$\dot{m}^+ = C_c A \alpha (1-\alpha) \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right) \frac{P_v^* - P}{\sqrt{2\pi R T_s}} \quad (2)$$

$$\dot{m}^- = C_c A \alpha (1-\alpha) \frac{P_v^* - P}{\sqrt{2\pi R T_s}} \quad (3)$$

$$A = C_a \alpha (1-\alpha) \quad (4)$$

ここで、 $T_s$ は臨界温度、 $P_v^*$ は飽和蒸気圧、 $C_1^* = C_c C_a$ 、 $C_2^* = C_c C_a$ はモデル定数であり、それぞれ蒸発および凝縮速度に関するパラメータである。また、ボイド率 $\alpha$ は気液二相流の中で気体の占める体積比率であり、ある要素内に気泡がどの程度存在するかを表す重要なパラメータである。

コンタード形調節弁では最縮流部で発生する剥離によって大規模な3次元渦構造や強い旋回流が発生する<sup>(5)</sup>。これらは本質的に非定常な流れであり、 $k-\epsilon$ モデルを代表としたRANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations) により乱流の運動をモデル化した場合、この非定常性の強い渦構造を表現することができない。しかし、キャビテーションの発生形態と渦の間には密接な関係がある。そこで今回は乱流モデルにLES (Large Eddy Simulation) を選択した。LESは格子サイズより小さい渦のみモデル化し、格子サイズ以上の渦の運動は直接計算する手法である。また、LESは計算の安定性が悪く大規模な計算格子を必要とする反面、高精度な結果が期待できる。

壁面の速度境界条件は、通常LESではNo-Slip境界を与え、第1格子点が粘性底層に入るように壁面近傍は境界層の解像度を高くする。しかし、今回は計算領域の広さや計算コストを考慮してSpalding則を与えモデル化した。メッシュ生成時には、今回注目するプラグ周辺部はキャビテーションが高速かつ非定常に繰り返されるため、縮流部およびプラグ周辺の要素解像度が最も高くなるようにメッシュサイズを決定した。

計算に用いる刻み時間については、キャビテーションの発生、崩壊の現象を捉えられる程度に細かく設定した。具体的には、CFL条件(Courant-Friedrichs-Lewy Condition)としてクーラン数を概ね10程度に収まるように設定した。また、計算資源はスーパーコンピュータ「京」を用いて288並列計算を行い、計算時間を短縮した。

表1 CFD解析 計算条件

ソフトウェア	Advance/FrontFlow/Red Ver5.4	
乱流モデル	Large Eddy Simulation (LES)	
流体	水(25°C, 圧縮性)	
メッシュセル数	開度:100%	6,723,867
	開度:90%	7,899,316
差分スキーム	運動量	2次精度風上
	エネルギー	1次精度風上
壁面条件	Spalding則	
刻み時間 $\Delta T$ [s]	2e-06 ~ 1e-05	
並列数	288	

2.2 解析結果

2.1節にて示した計算条件で、まずはキャビテーションを考慮したCFD解析の妥当性について検証した。解析の条件について表2に示す。ここで、キャビテーション数 $\sigma$ は式(5)で定義される。

$$\sigma = \frac{P_U - P_v^*}{P_U - P_D} \quad (5)$$

表2の条件でCFD解析を行い、得られた流量から流量係数 $C_v$ を算出した。図3に、表2と同じ条件により得られた実験結果の流量係数とともに示す<sup>(2)</sup>。両者の誤差は流量係数比較でおよそ2%とよく一致していることが分かる。

表2 試験条件

キャビテーション数 $\sigma$	1.13
リフト [%]	100
上流圧 $P_U$ [kPa (abs)]	1,100
下流圧 $P_D$ [kPa (abs)]	128.7

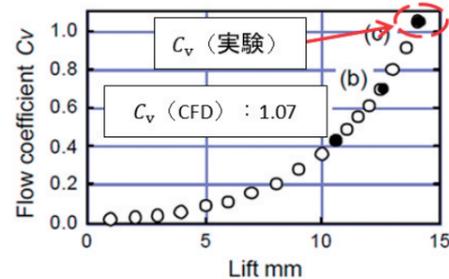


図3 実験<sup>(2)</sup>とCFD解析による流量係数

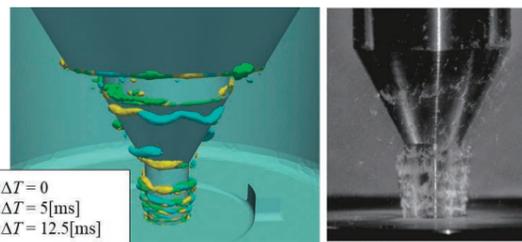


図4 ボイド率 $\alpha=0.05$ のCFD結果と実験結果との比較

図4はボイド率 $\alpha=0.05$ のコンター図と実験による気泡発生時の瞬間写真を示したものである。この図から、気泡の発生様相についても定性的に妥当な結果が得られている。以上より、本研究で用いたCFD解析モデルは妥当であると考えられる。

3. キャビテーション壊食の数値解析

3.1 エロージョン指標

エロージョン指標は、物体表面における気泡や圧力の変動が壊食強さを規定するパラメータであると仮定し、関数化したものである。今回使用したエロージョン指標は能美ら<sup>(4)</sup>によって提案された次式を用いた。

$$\text{指標1: } \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} a \cdot \max \left[ \frac{\partial P}{\partial t}, 0 \right] dt \quad (6)$$

$$\text{指標2: } \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} a \cdot \max [P - P_v^*, 0] dt \quad (7)$$

$$\text{指標3: } \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \max \left[ -\frac{\partial a}{\partial t}, 0 \right] dt \quad (8)$$

$$\text{指標4: } \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \max [P - P_v^*, 0] \cdot \max \left[ -\frac{\partial a}{\partial t}, 0 \right] dt \quad (9)$$

ここで $T_c$ はキャビテーションの発生周期であり、今回は1周期分の時間積分を用いた。3.2節ではこの式(6)~(9)の指標を用いてCFD解析結果を可視化し、評価を行う。

3.2 実験による壊食結果との比較

3.1節で示した各エロージョン指標の妥当性について検討するため、実験結果との比較を行った。CFD解析条件および実験条件について表3に示す。条件はケース1、ケース2の2種類で、それぞれ下流圧が異なる。なお、実験結果のプラグの写真は30時間経過後のものであり、プラグの材質はSUS316である。

図5、図6には式(6)~(9)のエロージョン指標によって得られた解析結果のコンター図、および実験においてプラグで発生した壊食結果を示す。両ケースの実験による壊食結果を比較すると、壊食はプラグシート面、円錐面、円錐面端部で発生しているがケース1とケース2ではその壊食の様相が異なっている。ここで、ケース1の各コンター図を見ると指標3ではプラグ先端で高い値を示しており、これは実験による壊食結果と定性的に一致していない。指標1、指標2、および指標4については実験結果と近い様相を示している。

表3 壊食実験条件

実験条件	ケース1	ケース2
キャビテーション数 $\sigma$	1.058	1.041
リフト [%]	90	
上流圧 $P_U$ [MPa (abs)]	20	20
下流圧 $P_D$ [MPa (abs)]	1	0.8

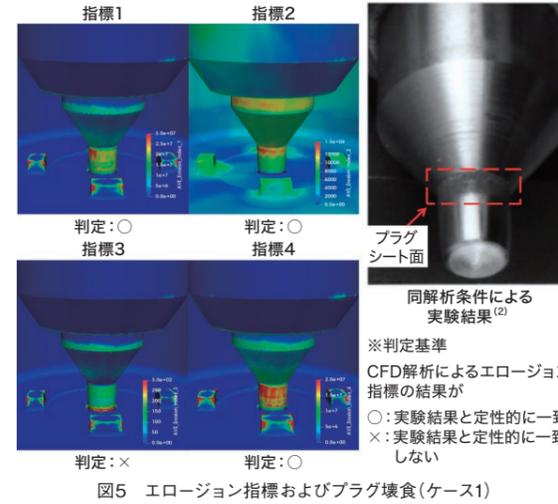


図5 エロージョン指標およびプラグ壊食(ケース1)

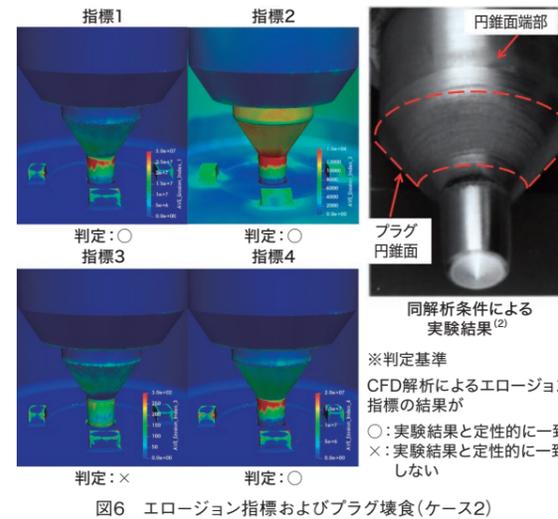


図6 エロージョン指標およびプラグ壊食(ケース2)

次に、ケース2では実験結果の写真から、シート面の他にプラグ円錐面でも広く壊食が発生していることが分かる。ケース2でも指標3は実験結果と一致しないが、指標1、指標2、および指標4については実験結果と大きな差は見られない。

以上から、エロージョン指標1、2、および4は、壊食のリスクがある箇所の特定に有効であると考えられる。

3.3 キャビテーション流れによる壊食

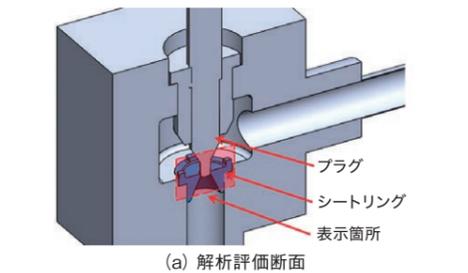
ここでは、3.2節のケース1とケース2においてキャビテーション壊食の様相が異なる理由について、非定常キャビテーション流れのCFD解析結果から考察する。ケース1、2ともに十分に時間発展した流れ場を形成した後、そこからさらに時間 $\Delta T$ だけ進んだときのキャビテーション流れの変化を可視化し、評価を行った。解析評価断面を図7(a)に、可視化したボイド率のコンター図を図7(b)にそれぞれ示す。

図7から、気泡はケース1、ケース2両者ともプラグ最縮流部付近で発生し、発生した気泡が流れに沿ってプラグ前方からシート面へ向かって流れていく様子が分かる。この気泡はプラグおよびシートリングで剥離して発生した渦に起因

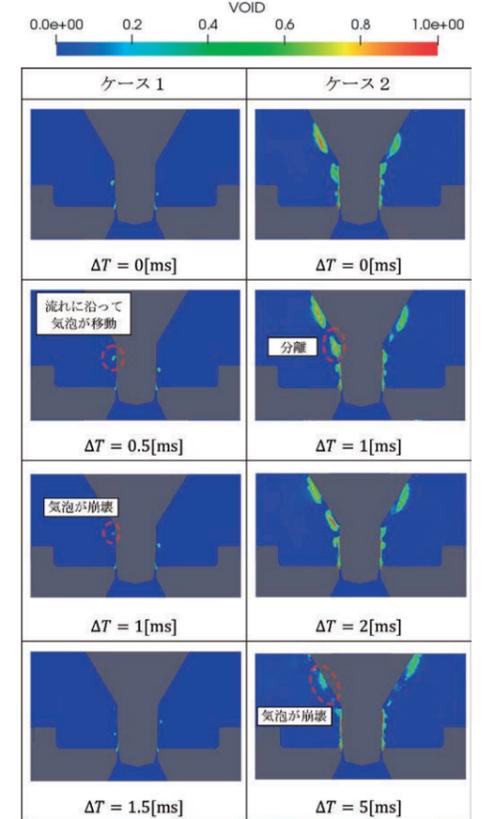
するキャビテーションだと考えられる。

ケース1では、気泡はプラグの円錐面まで到達する前にシート面付近で崩壊する様子から $\Delta T = 1$ [ms]の結果から読みとれる。ケース1の条件下では、この気泡崩壊が継続して発生することによって主にシート面付近でのみ壊食が発生していると推測される。

ケース2では、プラグ特性部が気泡により層状に覆われている様子が分かる。これは発達したシートキャビテーションによるものだと考えられる。翼形状による研究ではシートキャビテーションは時間とともに発達した後気泡群の一部が分離し、雲状の塊となって後流へ流れていくことが知られている(クラウドキャビテーション)<sup>(6)</sup>。ケース2の結果、シートキャビテーションからクラウドキャビテーションへ移行し、円錐面に衝突して崩壊の様子が分かる。また、キャビテーション壊食の原因はクラウドキャビテーションによる影響が大きいことから、ケース2ではプラグ表面から分離した気泡群がプラグ円錐面に衝突、崩壊することで壊食に至ったと推測される。



(a) 解析評価断面



(b) キャビテーション流れの変化

図7 各ケースにおけるキャビテーションの様相

以上のCFD解析結果から、ケース1、およびケース2のキャビテーション壊食の様相の違いは、キャビテーションの発生形態の違いに起因すると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、アングル形調節弁を対象にキャビテーションを考慮したCFD解析を行い、調節弁に発生するキャビテーション壊食の予測に有効なエロージョン指標を検討した。乱流モデルにLESを用いて非定常なキャビテーション解析を行った結果を以下にまとめる。

- (1) エロージョン指標を用いた壊食の評価を行った結果、エロージョン指標1, 2, 4は壊食のリスクがある箇所の特定に有効であることが分かった。
- (2) プラグ表面に発生したキャビテーション壊食の様相がケースによって異なるのは、キャビテーションの発生形態が異なることに起因すると考えられる。

今後は、実験によるキャビテーション壊食量とエロージョン指標の値を定量的に評価することにより、CFD解析によるエロージョン評価手法を確立していくことが必要である。これによりキャビテーション壊食を設計・開発段階にて予測可能となれば、調節弁の性能、品質が著しく向上されることで、プラントの長期的な安定操業を実現し、基盤産業の発展への貢献が期待できる。

#### <参考文献>

- (1) 中橋, 低温用自動調節弁の特徴と設計の実際, バルブ技報, vol.20, No.1319, 1991, pp.32-41
- (2) 湯沢聡, 高圧水流の減圧・制御にともなう調節弁のキャビテーションと壊食に関する研究, 早稲田大学博士論文, 2003
- (3) Onur Usta, Batuhan Aktas et al., A study on the numerical prediction of cavitation erosion for propellers, *Fifth International Symposium on Marine Propulsion*, Finland, 2017
- (4) N.Hasuike, S.Yamasaki et al., Numerical Study on Cavitation Erosion Risk of Marine Propellers Operating in Wake Flow, *Journal of the JIME*, Vol. 46, No.3, 2011, pp 79-87
- (5) Y.Saito, T.Ikohagi et al., NUMERICAL ANALYSIS OF UNSTEADY VAPOROUS CAVITATING FLOW AROUND A HYDROFOIL, *Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003)*, Osaka, Japan, 2003
- (6) 加藤他, 新版キャビテーション 基礎と最近の進歩, 森北出版株式会社, 2016, pp.124-127

#### <著者所属>

斉藤 健二 アズビル株式会社  
バルブ商品開発部  
尹 鍾皓 アズビル株式会社  
バルブ商品開発部

## 凍結乾燥機用ローダアンローダによるバイアルトレース機能の開発

### A vial-position tracking function for freeze-drying machine loader-unloaders

別府 永志  
Hisashi Beppu

キーワード  
凍結乾燥, ローダアンローダ

医薬品の製造において薬品の入った多数のバイアルを炉内へ投入し凍結乾燥処理を行う工程がある。品質管理のためバッチ処理されたバイアルの抜取検査を行うが、炉内の温度は均一ではないため適切な位置のバイアルをサンプリングできるようバイアルの炉内位置をトレースする必要がある。本開発では炉内へ1列ずつ整列し投入されたバイアルを凍結乾燥処理した後、整列状態を維持しつつバイアルを1列ずつ順番に切り離し、搬出する機構を追加することでクリーンエリアを拡大することなく抜取検査のサンプリングのためのバイアル炉内位置のトレース機能を追加することを可能とした。

One process in the production of pharmaceuticals involves the loading of a large number of vials containing chemicals into a chamber for freeze-drying treatment. For quality control, samples from the batch-processed vials are inspected. However, since the temperature inside the chamber is not uniform, it is necessary to track the location of the vials within it so that vials in appropriate positions can be sampled. We have developed a method of adding a vial-position tracking function without enlarging the clean area. This was accomplished by adding a mechanism that removes the vials row by row, maintaining their alignment, after the freeze-drying process.

#### 1. はじめに

医薬品の製造工程において人が作業に介在することで製品を汚染するリスクを低減するため、また人体に有害な薬品を取り扱う際に人を危険にさらさないためなどの理由から製造装置の自動化の需要は高まっている。医薬品に異物や細菌の混入があると人体に影響を及ぼすことから、製造ラインはアイソレータやRABS (Restricted Access Barrier Systems) と呼ばれる清浄度、無菌状態を保つ装置の中に構築され製造装置においても同様に高い清浄度や滅菌性が求められる。azbilグループの一員である Azbil Telstar, S.L.U.は製薬向け凍結乾燥機において50年以上の製造実績があり、凍結乾燥機へ医薬品が入った容器(以下バイアル)を供給し、凍結乾燥処理後にバイアルを凍結乾燥機から回収する自動搬送装置(ローダアンローダ)も自社開発している。2017年には新しいコンセプトのローダアンローダをアズビル株式会社と共同開発しており、azbil Technical Review<sup>(1)</sup>にて報告した。これは非接触での動力伝達を可能とする磁気ネジを利用したローダアンローダで、従来方式より低発塵で、さらに洗浄性や滅菌性の向上で製品の汚

染リスクを下げることに貢献した。

本稿ではさらに商品価値を高めるため、抜取検査のサンプリングのためバイアルの炉内位置のトレースを可能にするローダアンローダの新機能の開発について報告する。



図1 医薬品製造ライン

#### 2. 凍結乾燥機とローダアンローダ

凍結乾燥機の概要とローダアンローダによる凍結乾燥機へのバイアルのローディング、アンローディング方法について説明する。図2に凍結乾燥機およびローダアンローダの

全体図を示す。凍結乾燥機は凍結乾燥処理に必要な温度や圧力を制御できる炉であり、炉内にはバイアルが搭載される棚板が複数設置されている。棚板は上下に移動することができ、1段ずつ搬送高さに位置決めした後にバイアルが投入される。

図3にローダアンローダの上面図を示す。ローダアンローダは凍結乾燥機の扉正面に設置されており、バイアルを搬送するコンベアと、バイアルをコンベアから押し出すプッシャと、コンベアと棚板間でバイアルを搬送するスライダ、スライダに設置されバイアルを押し引きするバーなどから構成される。バーは上下に可動する機構を備え、上にあるときバイアルはバーの下方を通過することができ、下にあるときバーはバイアルに接触し搬送することができる。コンベアと棚板の間はブリッジと呼ばれる可動式の搬送板があり、バイアルを棚板へ搬送する際はコンベアと棚板間を橋渡しし、凍結乾燥処理中は炉の扉が閉まるよう退避することができる。

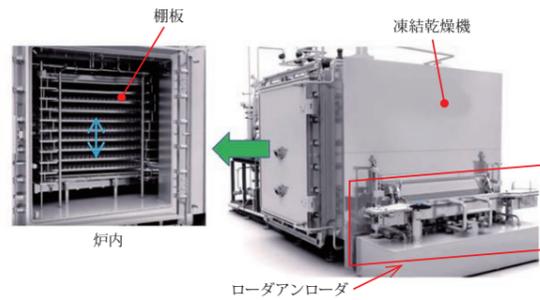


図2 凍結乾燥機およびローダアンローダ

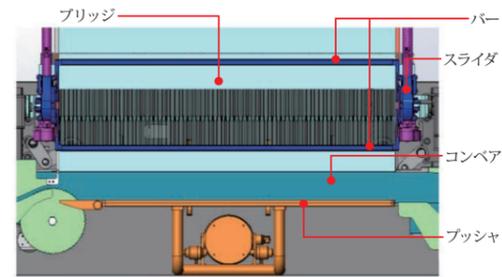


図3 ローダアンローダ上面図

バイアルを凍結乾燥機へとローディングする手順について説明する。前工程で薬液の充填、半打栓(ゴム栓が完全には閉じられず隙間がある状態)されたバイアルはコンベアによって凍結乾燥機へと運ばれる。コンベア上にはガイドが設置されておりバイアルは凍結乾燥機の正面で1列に整列され、コンベアが停止した後、バイアルはプッシャによってコンベアからブリッジへと押し出される。再びコンベアは搬送を開始し次のバイアル1列を凍結乾燥機正面へと運びプッシャで押し出す。この動作を繰り返し棚板1段に搭載可能な数のバイアルがコンベアから押し出されるとスライダによってすべてのバイアルは棚板上に位置決めされる(図4)。

バイアルをアンローディングするときはスライダが炉内奥へ移動した後バーを下に降ろし、棚板の後方からすべての

バイアルを引き出してくる。バイアルはコンベアへと引き出され、後工程へと搬送される(図5)。

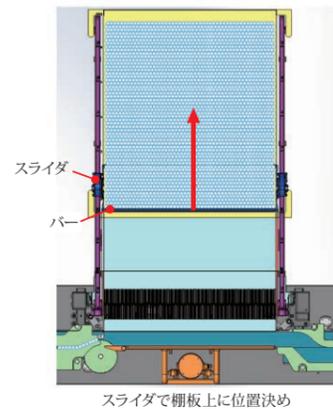
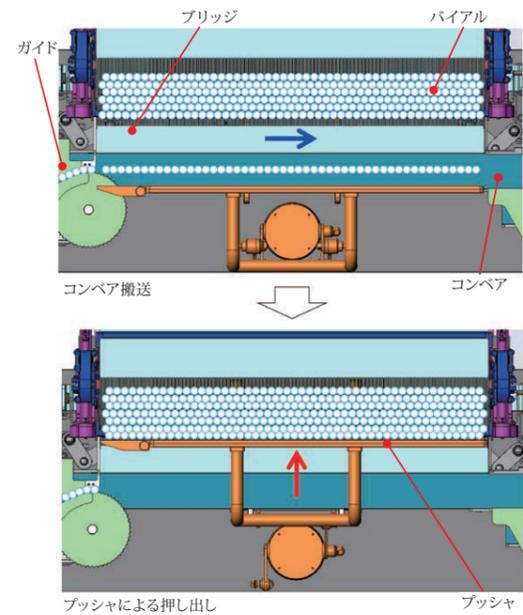


図4 ローディング

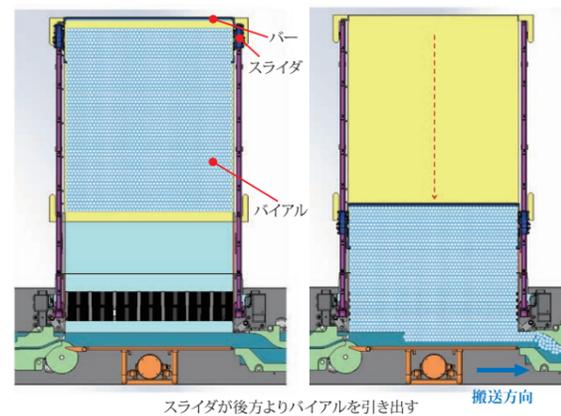


図5 アンローディング

### 3. 課題

凍結乾燥処理は図6に示すように「製品を冷却し凍結する」「真空雰囲気にして沸点を下げる」「製品を加熱して水分を気化、乾燥させる」プロセスで行われる。炉内の温度、圧力を制御するとともに、製品を効率よく加熱、冷却できるように製品が搭載される棚板も温度制御がなされる。炉内には1度に数千~数十万個のバイアルが投入され処理されるが、炉内の温度分布は必ずしも均一ではない。したがってそれぞれのバイアルは置かれた位置によって異なった条件で処理されたことになる。もし製品の抜取検査をする際に、良い条件のバイアルだけをサンプルとしてしまった場合、不良品を発見できずに流出するリスクがある。そのため例えば炉内を複数のエリアに区切り、各エリアから満遍なくサンプリングしたり、不良品が発生しやすいエリアからサンプリングするなど適切な位置のバイアルをサンプリングできるよう、バイアルの炉内位置をトレースできることが求められている。



図6 凍結乾燥処理

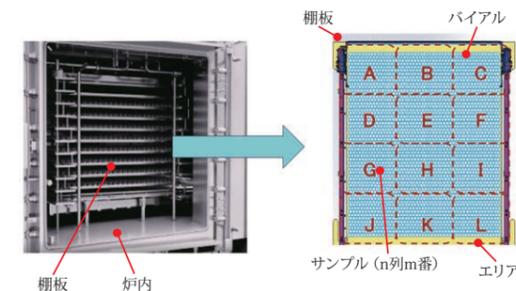


図7 炉内のバイアル

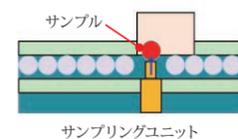
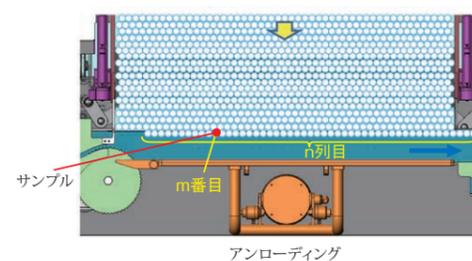


図8 バイアルのサンプリング

ここで図7に示すように棚板上をAからLのエリアに分け、エリアGに位置するコンベア側よりn列目、右から数えてm番目のバイアルをサンプリングする場合について考える。ローディングの際にバイアルは1列ずつ整列された状態で搬送され、炉内に投入した後も整列状態は維持されている。したがって図8に示すようにアンローディング時も整列状態を保ったまま1列ずつ順番にコンベアへ押し出せばn列目のバイアルだけを搬出でき、また別に設置したサンプリングユニットで通過するバイアルをカウントし、m番目のバイアルを抜き出せば目的のバイアルをサンプリングすることができる。

ところで円筒形状のバイアルは効率よく密集させて棚板に搭載するため1列ずつ互い違いに重なり合って整列される。この状態でバイアルを1列ずつコンベアに押し出して搬送しようとする、1列目のバイアルと2列目のバイアルがぶつかり合い転倒したり、また1列目のバイアルとの接触により2列目のバイアルが回転し、この回転によって隣接する2列目のバイアルがコンベアへ押し出されたりする。押し出されたバイアルは底面の一部がコンベアに接触するため、さらに回転しながらコンベア上へ飛び出てくる。コンベア上に飛び出した2列目のバイアルによって進路を塞がれ滞留し、整列状態が乱れる。先に述べたサンプリングユニットでm番目のバイアルをカウントし抜き出すことは整列が乱れた状態では実施が困難であるため、バイアルの整列状態を保ったままアンローディングする方法の確立が課題であった(図9)。

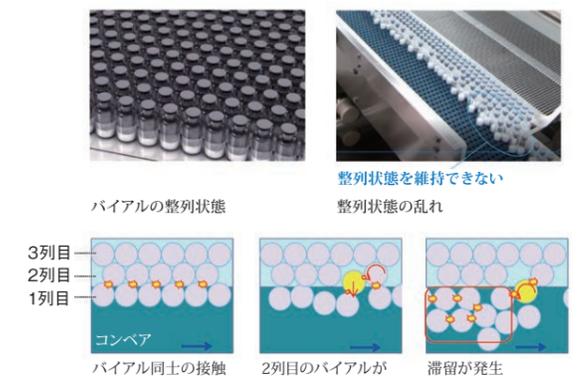


図9 バイアルの整列状態と搬出時の問題

### 4. 解決策

1列目と2列目のバイアル同士の接触による整列状態の乱れを解消するため、図10に示すように1列目のバイアルを切り離す方法を考えた。

- (1) スライダでバイアルを引き出して最前列のバイアル1列がコンベア上に載るよう位置決めする。
- (2) ベルトをスライドし最前列のバイアルを引き出す。
- (3) 1列目と2列目のバイアルの間にできた隙間にゲートを上昇させる。
- (4) ベルトを元の位置に戻す。

- (5) コンベアを駆動し1列分のバイアルを搬送する。
- (6) コンベアを停止しゲートを下げる。

1列目のバイアルを引き出し2列目との間にゲートを差し込むことでバイアル同士の接触を防ぎ、1列目のバイアルだけを搬送することができる。

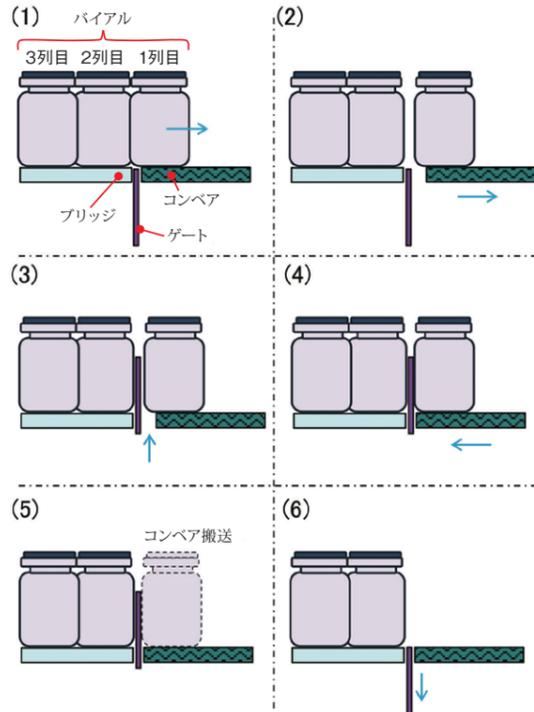


図10 1列ずつのアンローディング

この方法を実現するため1列目のバイアルを引き出す「ベルトスライダ」と、2列目との隙間にゲートを差し込む「パーティカルゲート」機構を開発した。図11にベルトスライダの構造を示す。ベルトスライダはスライド部とスライド部を移動させる偏心ロータなどから成り、コンベアの筐体内部に設置される。偏心ロータの回転に合わせてスライド部は前後にスライドし、スライド部がベルト裏面にあるガイド用の突起部をひっかけることでベルトを移動させる。ベルトは複数のコマが連なって構成されておりコマ同士は互いに回転できるように連結されている。連結部には若干の遊びがあるためベルトはスライド部の動作によって変形し、ベルト上の1列目のバイアルを引き出すことができる(図12)。

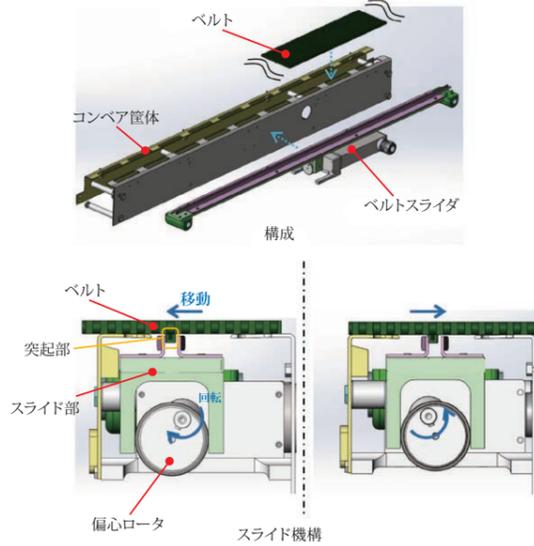


図11 ベルトスライダ

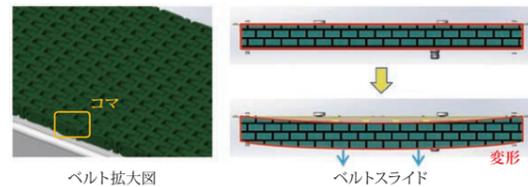


図12 ベルトストローク

ところでバイアル列の重なり量はバイアルの外径をdとすると下式で計算できる。

$$\text{重なり量} = d(1 - \sin 60^\circ)$$

バイアルの形状やサイズはユーザーの環境によりまちまちであるが、ISO8362 Injection containers and accessoriesで規定されたバイアルのサイズを参考にそれぞれの重なり量を計算すると最大のもので4.1mmであった(表1)。したがってアンローディングの際に図10の(1)で1列目のバイアルを引き出し、バイアル列の重なりをなくするためのベルトスライダのストロークは4.1mmより大きくする必要がある。

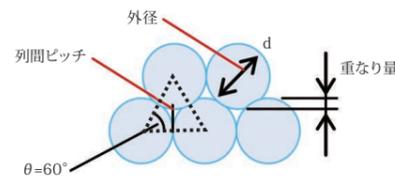


図13 バイアル列の重なり量

表1 重なり量の計算結果

種類	2R	4R	6R	8R	10R	15R	20R	25R	30R
外径(mm)	16.0	22.0	24.0						30.0
列間ピッチ(mm)	13.9	19.1	20.8						26.0
重なり量(mm)	2.2	3.0	3.3						4.1

図14にパーティカルゲートの構造と動作について示す。パーティカルゲートはコンベアとブリッジ間に設置されたゲートと、ゲートを上下に移動するためのモータとリンク機構を備えており、ゲートが下方にあるとき上端がブリッジやコンベアの搬送面と同じ高さになり、上方にあるときはバイアルの高さに応じた搬送面から任意の高さに突き出してバイアル同士の接触を防ぐことができる。

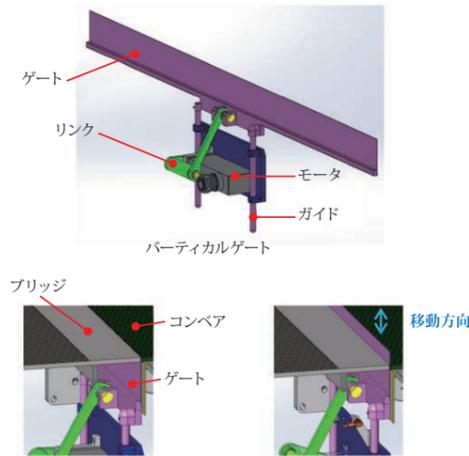


図14 パーティカルゲート

### 5. 検証実験

ローダアンローダの試作機を製作しベルトスライダとパーティカルゲートによる1列ずつのアンローディングが実現できるか検証を行った。試作機の全体を図15に示す。図中には示していないがコンベアの内部にベルトスライダが設置されている。

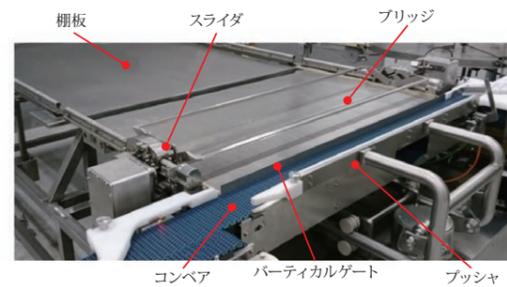


図15 ローダアンローダ試作機

試作機でのアンローディングの様子を図16に示す。1列目のバイアルを引き出す際のベルトのストロークはバイアルの重なり量以上必要であるが、試作機では10mm程度のスト

ロークがあり表1で示したいずれのバイアルでも十分なストロークが得られている。ベルトスライダにより引き出された最前列のバイアルはパーティカルゲートにより次列のバイアルから切り離され、プッシャとゲートおよびガイドで支持されながらコンベアで搬送される。これにより整列状態を保ちつつ1列ずつの搬送が行えることが確認できた。

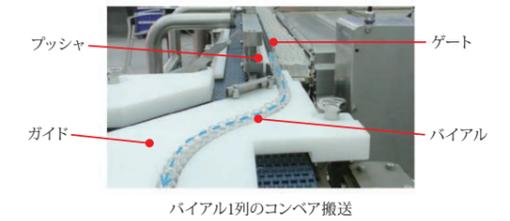
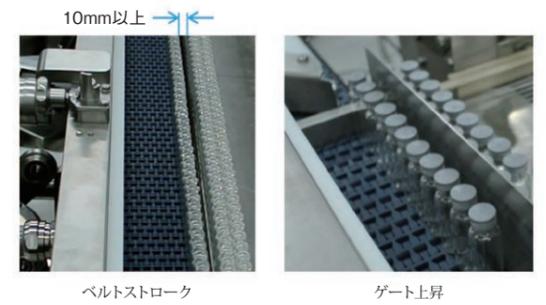


図16 試作機での検証

ところで実際の製造現場ではバイアルの整列状態が理想的でない状況が起こりうる。例えば打栓時のバイアルの転倒である。凍結乾燥処理時に水分を逃がすためバイアルは半打栓状態で炉に投入され、処理後に棚板の上下動を利用して打栓される。この時ゴム製のキャップが棚板に吸着しバイアルが持ち上がった後に脱落し転倒することがある(図17)。バイアルは互いに交互に並び密集することで整列状態を保っているが、転倒したバイアルがあると密集状態が崩れ整列を乱す。そのため1列目のバイアルがコンベア上に整列できず、ベルトスライダとパーティカルゲートによる1列ずつのアンローディングが機能しない。

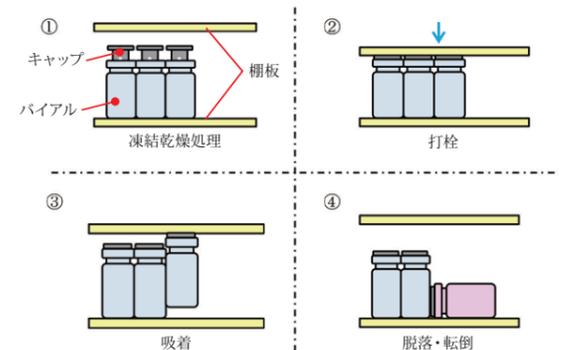


図17 棚板による打栓

そこでプッシャを利用して1列目のバイアルを再度コンベア上に整列させてアンローディングする方法を考えた(図18)。また図19に示すようにプッシャの下部に転倒バイアルを排出するための開口を設けた改造を施した。まず前列のバイアル数列分がコンベア上に到達するまでパーで搬送する。次にプッシャでバイアルの前列側から押し戻し、1列目だけがコンベア上に残る位置まで押し返す。このときバイアルの1列目はプッシャの接触面に倣って整列される。また転倒バイアルが1列目にあったときにはプッシャの開口部から排出される。以上のように転倒バイアルにより整列状態が乱れた時でもプッシャを利用することで1列ずつのアンローディングを実現することができた。なお転倒バイアルにより整列状態が乱れた際に、一部のバイアルは位置が前後の列や左右で入れ替わることが起こりうる。しかしながら3項で説明したように特定のエリアのバイアルを採取検査する場合、例えばエリアの中心に位置するバイアルを目標としておけば列や順番が数個分ずれたとしても同一エリア内からサンプリングできるので運用上の問題は無い。

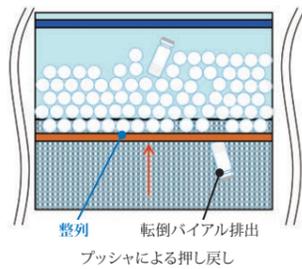
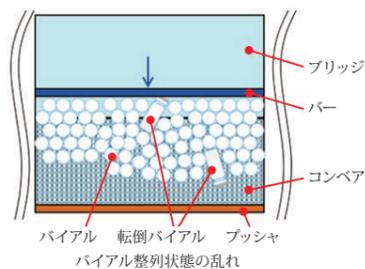


図18 プッシャを利用した1列ずつのアンローディング

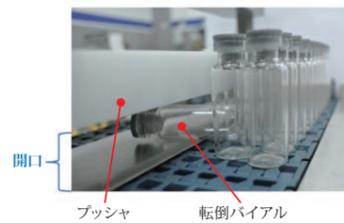


図19 プッシャの改造

## 6. おわりに

今回開発したベルトスライダとパーティカルゲートによって整列状態にあるバイアルを1列ずつ順番にアンローディングできることが確認できた。これによって各バイアルの凍結乾燥処理中での位置のトレースを行うことが可能となった。またベルトスライダはコンベアの筐体内部に、パーティカル

ゲートはコンベアとブリッジの間に設置することができたため、従来のローダアンローダに対し追加のスペースを必要としない。したがって既に製造現場で稼働しているローダアンローダを改造して追加することが容易にできる。またローダアンローダが設置されるアイソレータやRABSは敷設する面積に応じて高額な投資を必要とするが、今回の機能拡張版は従来のローダアンローダと同じフットプリントであるためこれらの追加投資なく追加できる。

### <参考文献>

- (1) Xavier Gomez Garcia, Hisashi Beppu, Mitsuharu Tanaka, Yoichi Okawa, A Vial Loading System with Non-Contact Drive Mechanism Using Magnetic Technology, azbil Technical Review, 2017年4月発行号, pp.39-44

### <著者所属>

別府 永志 アズビル株式会社  
技術開発本部工程開発部

# マザー工場での生産工程の革新

## Innovative production processes at Azbil's mother factory

關 宏治  
Koji Seki

矢野 貴史  
Takashi Yano

片桐 宗和  
Munekazu Katagiri

キーワード  
マザー工場, センサパッケージング, ヒューマンエラー, AI, 混流生産

新たな製品を生み出すための先進的な生産技術を獲得するとともに、継続的な製造コスト低減と製造品質の向上を図っていくことが、azbilグループの生産をリードするマザー工場としての役割の1つである。長年にわたり構築されたセンサパッケージング技術を活用した高度な生産工程として、AI画像処理技術や力制御技術を用いた部品の精密実装、微細組立の事例を述べる。またazbilグループの強みである顧客の様々なニーズに対応する多品種変量生産/カスタマイズ生産を支える混流生産方式をグローバル生産に展開するための生産システム構築、ヒューマンエラーの排除、および新たな混流生産ライン構築への取組みについて、ここに報告する。

The acquisition of advanced production technology for the creation of new products, the pursuit of continuous reduction in manufacturing costs, and the improvement of manufacturing quality are some of the roles of the "mother factory" that stands in the vanguard of azbil Group production. This paper describes advanced production processes utilizing sensor packaging technology acquired over many years, including the precision mounting and microassembly of parts using AI image processing technology and force-control technology. In addition, we report on our efforts to construct a globally deployable flexible manufacturing system that supports multi-product variable production and customized production in order to meet our customers' various needs, as well as our efforts to eliminate human error and to construct a new flexible production line.

## 1. はじめに

アズビル株式会社ではこれまで伊勢原工場(神奈川県伊勢原市)、藤沢テクノセンター(神奈川県藤沢市)に分散していた生産機能を、湘南工場(神奈川県寒川町)をazbilグループのマザー工場と位置付け集約し、先進的な生産技術による生産の実証の場として生産革新に取り組んでいる。

現在azbilグループのマザー工場では大きく分けて2つの機能強化を進めている。まず1つには昨今の大きな技術変革の潮流に対応した新たな製品を生み出すための生産技術の獲得による生産強化である。他社が容易にまねできない、追随困難な生産工程による製品を開発することがアズビルならではの製品仕様となり、製品価値を高め顧客満足を得ることができると考える。もう1つはazbilグループの強みである顧客の様々なニーズに対応できる多品種変量生産/カスタマイズ生産体制を維持したうえで、継続的な製造コスト低減と製造品質の向上を図り、グローバル生産に展開していくことである。

1つ目の課題に対しては、長年にわたる各種センサを搭載した製品開発で構築されたセンサパッケージング技術に、新たにAI画像処理技術や微細部品の組立に活用できる力制御

技術を加えることで、生産工程の高度化を進めている。

2つ目の課題に対しては、多品種変量生産/カスタマイズ生産を支える混流生産方式に生産情報の一元管理や加工条件の自動設定などICT側面での強化や生産作業個人経験や技能に依存した生産工程からの脱却、またヒューマンエラーの排除を目的とした生産工程の自動化に取り組む超混流生産ラインの構築を進めている。

本稿では2つの課題に対する技術的なアプローチによる解決手段を述べ、具体的に得られた結果をその成果として報告する。



図1 アズビル湘南工場に新設された生産棟

## 2. 生産工程を取り巻く課題

### 2.1 生産技術による競争優位製品の開発

昨今のIoT、ICTニーズの高まりを支えている計測機器製品を開発する上で、最も重要な技術の1つとしてセンサパッケージング技術がある。センサパッケージング技術とは物理的、電気的にセンサやマイクロデバイスを製品の電気回路に接続するためのモジュールを生産する技術と位置づけることができる。このモジュールを安定的に生産するためには、脆性材料の切削や接合・接着、また微細な金属材料加工や精密組立といった要素技術の蓄積と、それらを生産工程として実現する機械装置を開発できる生産技術力が求められる。このセンサパッケージング技術を高度化することで、計測性能、製品品質を高め、他社が容易に追従できない製品を獲得することが可能となる。高度なセンサパッケージング技術に基づく生産工程を保有することがazbilグループのマザー工場に求められる1つ目の課題であり、使命となる。

### 2.2 多品種変量生産/カスタマイズ生産のグローバル生産対応に向けて

顧客の様々なニーズに対応するための多品種変量生産/カスタマイズ生産はazbilグループの強みである一方、これらに対応するために生産工程設計や設備設計は個別最適化が進み、工場全体で見た稼働効率やスペース効率が低下する傾向が顕在化していた。その解決策の1つとして考えられるのが従来から複数の製品や機種を共通の生産工程・設備で流す混流生産ラインの適用拡大である。

昨今では顧客ニーズが多様化しているため多品種変量生産がさらに進む状況にある。生産工程では機種別に生産数量の平準化など生産計画で運用面での効率化を図るものの、頻繁な生産機種の切り替えによる部品変更、組立手順変更、設備の段替え(条件・設定変更)が余儀なくされていた。またこれに顧客ごとのカスタマイズ対応も加わると特別仕立ての部品・組立方法・設備仕様を追加されることになるため、混流生産ラインはさらに複雑化し、生産現場の負担が増大していた。

また、混流生産は国内の生産において、生産作業者の高い習熟度、多能工や現場管理者のスキルによって、複雑な生産工程にも柔軟な対応を行ってきた。高い現場スキルによって支えられた生産体制であったと言える。混流生産ラインの適用拡大を進めるには、(1)デジタル化された生産情報を生産現場が活用できる状態で蓄積するデータベースを含む工程管理システムの構築、(2)工程管理システムのデータベース情報を使って作業者にタイムリーに正確な作業指示を与えることでヒューマンエラーを排除し、製造品質を安定させることのできる装置の導入、(3)人と機械、システムが協調した新たな混流生産ラインの構築<sup>(1)</sup>、が必要となる。混流生産をグローバルでも展開するために、生産設備や工程管理システムの標準化を行い、現場で働く人への負担や依存度がさらに軽減された、ストレスのない超混流生産ラインを構築することが、azbilグループのマザー工場に求められる2つ目の使命となる。<sup>(2)</sup>

## 3. 生産工程の革新への取組み

### 3.1 高度センサパッケージング技術による生産

#### 3.1.1 部品の精密実装

小型化、高精度化を求められるセンサパッケージングにおいて、微細部品の精密位置決め、組立技術は、不可欠な要素技術である。例えば、汎用アンプ内蔵光電センサ形HP7では、光を集光するレンズに対してLEDの搭載相対位置精度が光学性能を左右するため、数十 $\mu\text{m}$ オーダーの位置精度でプリント基板へはんだ付けを行う必要がある。従来技術としては、LEDをカメラで撮像しモニタに拡大表示させ、熟練作業者が手作業で位置合わせを行い、治具で固定してはんだ付けを行っていた。近年では、画像処理による精密位置決めとはんだコテを使用した自動はんだ付け装置の導入により工程の自動化を進めてきた。しかしながらはんだ付けを行うはんだコテの酸化やコテ先のメッキの消耗などによる経時変化が発生するため、はんだ流れを制御することは困難であり、はんだ付けの出来栄に不安定さが見られた。加えてコテはんだ付け方式では供給するはんだ量も多く、はんだに含まれるフラックスがプロセス中に多く飛散してしまう。これによってLEDを把持する自動はんだ付け装置のツールが汚染されるために、精密な位置決めが阻害され安定生産には至っていなかった。

これらコテはんだ付け方式の課題を解決するために、非接触式のレーザー加熱によるはんだ付け方式を採用した。これにより酸化や消耗などの経時変化に影響されづらい安定したはんだ付け装置を生産導入することができた。非接触式のレーザー加熱では、はんだコテ側に残るはんだがなくなるため、供給するはんだ量、すなわち1回のプロセスで溶融させるはんだ量を少なくすることができるため、フラックス飛散によるツールの汚染を低減することができた。しかしながらツール表面がフラックスで汚染されると、その粘性によってLEDがツールに付着する現象を完全に防止するまでには至らず、位置決め後のLED解放時に突発的な位置ずれが発生する。また短いサイクルでの連続実装によってツール先端の温度が上昇するためツールの伸びが発生し、連続的に変化する位置ずれも発生していることから長期的な安定性を実現するまでには至らなかった。そこで実装されたLEDの位置ずれ量を計測し、LEDの位置決め狙い値にフィードバックすることで、実装位置を補正する制御方式を導入した。

図2に補正制御の有無によるLEDの位置ずれ量の比較を行った結果を示す。補正制御を行っていない従来の実装方法ではLEDの実装位置は狙い値に対して横方向も縦方向も生産台数が増えるとともに位置ずれ量の変化が発生していることが分かる。これに対して補正制御を行った今回の実装方法では、狙い値に対して一定の位置ずれ量で安定していることが分かる。

今回導入した制御ではLEDの位置ずれ量に統計的処理を行い、経時的に発生している位置ずれとLEDのツールへの付着など突発的に発生する位置ずれを分離し、経時的な変化のみを補正している。また突発的な位置ずれの発生

頻度からツールのクリーニング時期を判断し、作業者に対してアラートを上げることにした。これにより高精度な位置決めでのLEDの実装を実現している。

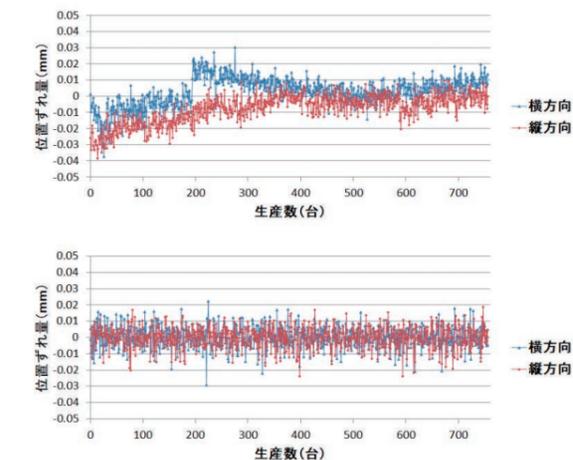


図2 補正制御の有無によるLEDの位置ずれ量の比較(上:補正制御なし、下:補正制御あり)

#### 3.1.2 はんだ付けの出来栄検査の自動化

次にはんだ付けの出来栄検査工程について説明する。従来は熟練作業者がすべて目視により検査を行っていたが、AIを活用した画像検査を適用することによりグローバル生産に展開できる自動検査へと移行する生産改革を進めている。

一般的なAI学習であれば、良品・不良品画像の両者を教師データとして学習させるが、生産現場では多量の不良品画像を取得することは困難であること、また未知の不良が発生した場合、不良と良品のどちらに近いかという判断を行ってしまうと、生産工程では許されない不良品を良品として判定する可能性が生じる<sup>(3)</sup>。これを防止するために良品画像のみを教師データとして機械学習を行い、不良品を次工程に流出させることのない検査アルゴリズムによる検査プログラムを作成した。

しかしこの方法の最大の難点は不良品の過剰判定による過検知である。これまで行っていたコテを使用した自動はんだ付け装置ではコテの表面状態、温度の変化などの要因によってはんだの出来栄形状が多岐にわたり、良否判定そのものが難しかった。実際のはんだ不良率の数倍から数十倍の過検知が発生しており、自動検査後に不良判定された製品を再度目視検査するというムダな作業が必要であった。今回導入したレーザー加熱方式では要因変化とはんだ出来栄形状がAI画像検査技術で扱いやすい範囲に収まり、自動検査が可能になったと考えられる。

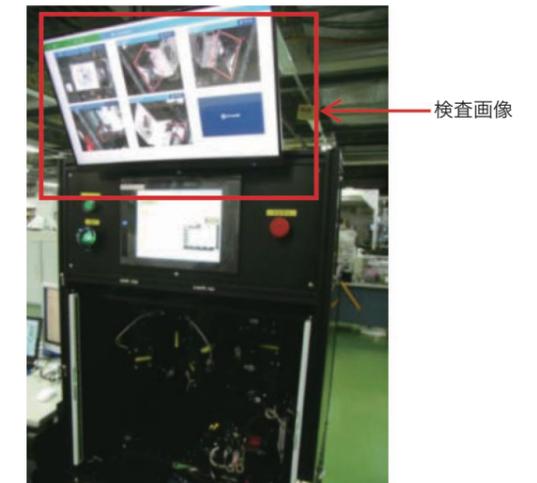


図3 画像検査装置



図4 画像検査結果(上:OK判定、下:NG判定)

#### 3.1.3 微細組立

センサパッケージングでは、脆性材料からなるセンサチップを接着、接合などの組立を行うため、力制御ができる部品の搬送技術も重要な要素技術である。スマート・バルブ・ポジションナ200シリーズ、300シリーズ、700シリーズに搭載される磁気抵抗センサのセンサパッケージでは、センサホルダと呼ばれる樹脂の部品に対し、センサチップを接着するダイボンディング構造となっており、磁界を印加するマグネットとセンサチップの相対位置精度が計測性能を決定する。そのためセンサチップの搭載高さ、回転等、高精度な位置決めが要求される。また脆性材料であるセンサチップの搬送時の破損を防止するために、ピックアップ時やセンサホルダへの搭載時の力制御も不可欠である。センサ

の微細組立は、位置制御と力制御を同時に行うことができるアズビルの独自技術であるアクティブコンプライアンス™制御を用いることで、実現している。(4)

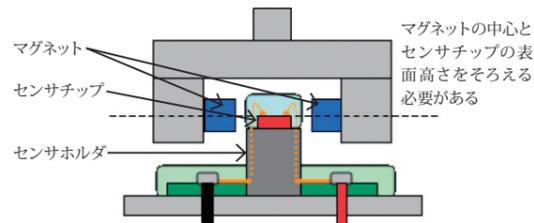


図5 磁気抵抗センサイメージ図

具体的な生産工程の説明を行う。センサチップは、チップトレイに入った状態でダイボンディング装置に供給され、はじめに画像処理により、センサチップの座標位置、回転角度を計測したあと、吸着式ノズルによってピックアップされ位置補正を行う。その後あらかじめ精密ディスペンサによりダイボンド剤を塗布したセンサホルダに固着させている。センサチップのピックアップ時には、センサチップを破損しないように弱い力でセンサチップに近づき、センサチップをピックアップする吸着式ノズルの移動量の変化を見ることでセンサチップに接触したことを検知して、把持を行っている。

一方、センサホルダへの接着時には、接着剤の粘度に応じて、センサチップを破損しない力で所定の搭載高さまで押し込むことで、位置精度の安定したダイボンディング工程を実現している。このように力制御を応用したアクティブコンプライアンス制御の適用により、回転角度だけではなく高さ方向の制御が安定して接着できるようになったため、後工程での実装検査も削除することができた。



図6 磁気抵抗センサダイボンディング装置

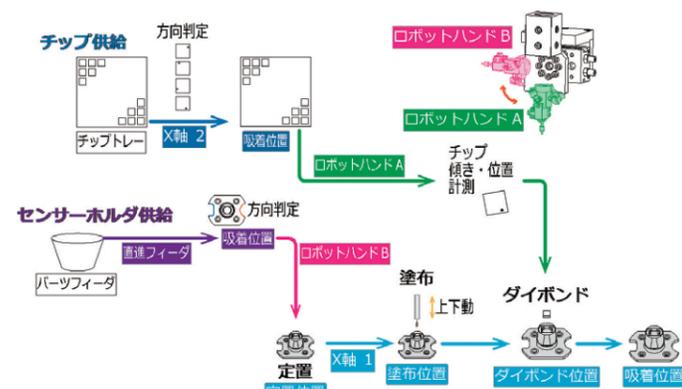


図7 磁気抵抗センサダイボンディング工程

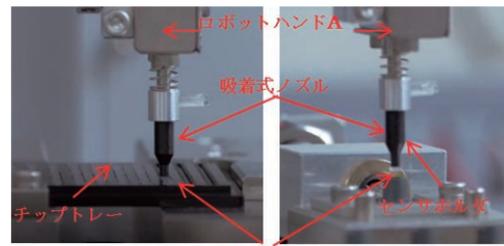


図8 センサチップピックアップ写真(左)、  
センサチップダイボンディング写真(右)

### 3.2 超混流生産ラインの構築のための具体策

#### 3.2.1 工程管理システムの構築

生産現場へのInput情報、現場からのOutput情報をデジタル化し、管理、活用するためには、全社の基幹システムと生産現場をつなぐMES (Manufacturing Execution System)が必要となる。市場には各種のパッケージソフトウェアが用意されているが、導入による費用対効果やアズビル生産形態とパッケージソフトウェアの親和性の検証など選定は容易ではない。また検討開始時点では超混流生産ラインのシステム要件定義も困難であることから、azbilグループの生産特性に適したMESの機能の一部を果たす工程管理システムを開発することからスタートした。

今回開発した工程管理システムは全社の基幹システムとMicrosoft® SQL Serverと生産設備をネットワークでつないだシステム構成となっている。製造指示情報(シリアル番号・機種識別情報)、生産進捗・来歴データ、M-BOM(製造部品表)、機種別設定情報など生産現場が活用するための各種情報をデータベースに蓄積することができる。生産される製品の個体認識によって工程管理システムから使用する生産設備を特定し、生産設備の加工条件など必要な情報を自動的に取り出すことができる。また生産工程の検査データや部品情報など来歴データのOutput情報も工程管理システムのデータベースに製品の製造シリアル番号をキーとして保管することができる。例えばプラント工場などで気体、液体、蒸気の流量、圧力、液位などを測定できる差圧・圧力発信器Advanced Transmitter Model GTX□□□□などでは年間に7,800種類を超える形式を生産しており個々の製品が適切な工程で生産されたことを保証する生産トレース情報は重要である。これを今回導入した工程管理システムではリアルタイムに取り出すことができるようになった。

#### 3.2.2 多品種、カスタマイズ生産における ヒューマンエラーの排除

多品種、カスタマイズ生産において作業者の習熟度や多能工化状態など人の管理スキルに依存する領域が多く存在することでヒューマンエラーのリスクは増大する。多種類の部品ピックアップ、作業指示、高頻度の設備段替えの際に人の関与を減らすことがヒューマンエラーリスクを低減し、高品質・高効率な生産ラインを維持することができる。今回導入した工程管理システムによって、生産設備が製品シリア

ル番号を認識し、データベースにアクセスすることで機種ごとのピックアップ情報や設備の条件設定情報を取り出すことができる。部品ピックアップ支援装置や製品に製品形番や機種ごとに固有の情報を印字するマーキング装置への自動設定などに適用することで、生産作業者のスキルに依存することなく、差圧・圧力発信器Advanced Transmitter Model GTX□□□□のような多品種製品の組立工程においてもヒューマンエラーを排除した生産工程の確立が可能となった。

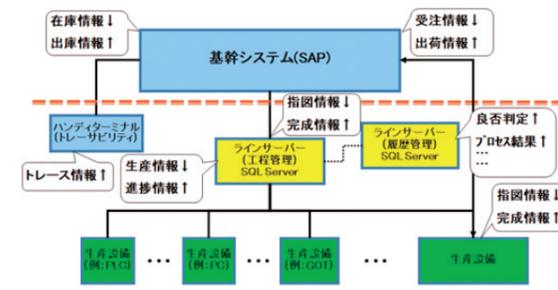


図9 工程管理システム概要

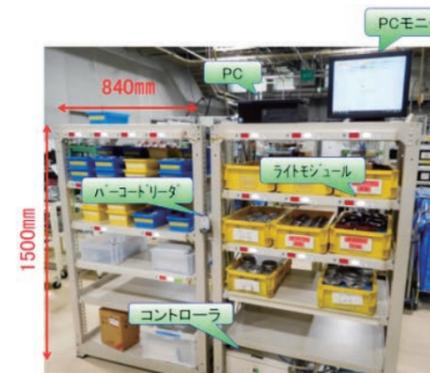


図10 ピックアップ支援装置

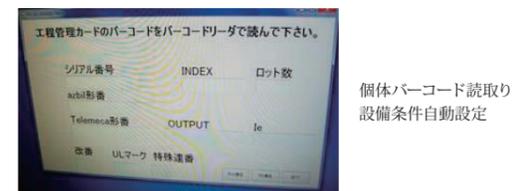


図11 マーキング条件設定

#### 3.2.3 新たな混流生産ラインの構築

工程管理システム、ヒューマンエラー排除の仕組みの構築をベースにして、混流生産ラインの再構築を行った。共通機能工程を多く持つ生産ライン(製品シリーズ)を対象に定め、混流による効率化が可能な工程を抽出した。実際には、気体流量計の生産ラインを対象にして、以下の工程に対して混流化を図った。

- はんだ付け工程
- 耐圧リーク検査工程
- 電気機能検査工程
- 流量調整、校正工程

同一製品シリーズといっても各製品の開発時期が異なるため同じ電気基板のはんだ付け工程にしても、はんだパットの形状やレイアウトはまちまちであった。そこで1台の自

動はんだ付け装置で対応できるようにするためには、電気基板の共通化、統一化も並行して行う必要があった。同様に混流化工程の部品の共通化を行い、結果として部品点数を10%削減することができた。

生産エリアでは従来の製品シリーズごとに専用ライン、専用設備を導入する場合に比べ、スペース効率、設備稼働効率を向上させることが実証できた。

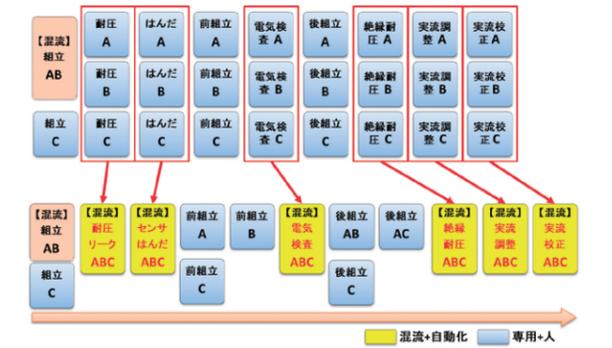


図12 混流生産概要

## 4. 成果

### 4.1 センサパッケージング技術による製品の競争力強化

センサパッケージングではセンサチップの取扱い等で微妙な力加減が要求されるため、組立工程での自動化が限定的であったが、アクティブコンプライアンス制御の適用により工程の自動化を加速することができた。アクティブコンプライアンス制御と非接触式のレーザーはんだ工法、精密位置決め技術、位置制御を組み合わせることにより、より小型のセンサパッケージングの生産が可能となった。

また、AI画像検査の導入により、後工程への不良品の流出の排除を実現し、そのトレードオフとなる過剰判定率(過検知率)も従来の画像検査の1/10以下と精度が高い検査となった。現在AI画像検査は、はんだ検査に加え、官能検査の領域となる他の検査工程への展開を進めている。

### 4.2 超混流生産に向けて

- (1) azbilグループの生産特性に適した工程管理システムの構築
- (2) 工程管理システムを活用し、ヒューマンエラーを排除する装置導入
- (3) 新たな混流生産ラインの構築

これらの取組みによって、小規模で投資効率が高く、人への依存が低い混流生産ラインとなった。

今回の気体流量計の生産ラインでは3シリーズの製品に対して、混流化を行い、専用ラインを設置する場合に比べ、専有面積はおおよそ50%で構築可能となった。設備タクトの長い設備稼働率は17%向上した。自動化や工程管理システムを活用したガイダンス装置により、製造不良削減に一定の成果を得ている。混流生産をきっかけに、開発部門と協業した製品の共通化設計に貢献した。

今後は生産工程の情報の把握のリアルタイム性を上げてさらに生産性や品質の向上を図っていく。加えて、製品設

計との情報連携により、生産設備設計・構築の短縮化へも繋げていくことも必要と考える。

## 5. おわりに

azbilグループのマザー工場でのセンサパッケージング技術による生産工程の高度化および、多品種変量生産／カスタマイズ生産をグローバル生産展開するための“超”混流生産への取組みについて報告を行った。

センサパッケージング技術ではAIを活用した画像処理技術などを積極的に取り入れ、アズビルらしい計測機器を顧客に提供できるように生産技術開発をこれからも強化していく。

また超混流生産では徹底した標準化を進め、日本国内、海外のどの工場でも同様に高い品質レベルで生産を行うとともに、生産工程で得られた貴重なデータを製品開発にフィードバックすることで、より高度な製品をより早く開発することに貢献できるものと考えている。

### <参考文献>

- (1)北條良光, 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改革-, azbil Technical Review, 2018年4月発行号, p.2
- (2)経済産業省中部経済産業局, 「2040年のものづくりの未来の姿」～時流に先んじた戦略立案に向けて～2040年ものづくり未来洞察調査(概要版)
- (3)田中拓哉, 笠原亮介, 画像を用いた自動外観検査技術, 日本画像学会誌, 2016年, 第55巻, 第3号, pp.348-354
- (4)川瀬茂, 津村高志, 小黒直輝, アクティブ・コンプライアンスデバイスの開発, azbil Technical Review, 2009年12月発行号, pp.63-67

### <商標>

Microsoft®は、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標または商標です。  
アクティブコンプライアンス™はアズビル株式会社の商標です。

### <著者所属>

關 宏治 アズビル株式会社  
技術開発本部工程開発部  
矢野 貴史 アズビル株式会社  
技術開発本部工程開発部  
片桐 宗和 アズビル株式会社  
技術開発本部工程開発部

# 熱量演算器 WJ-1203

savic-net™ G5 システムに接続可能な積算熱量計

Model WJ-1203 heat quantity calculation device:

An integrating calorimeter connectable to the savic-net G5 system

藤田 雄三  
Yuzo Fujita

## 1. はじめに

積算熱量計は、熱交換設備を通過する冷温水の流量と、冷温水配管の送り側、返り側の温度とを測定し、熱交換設備で消費される熱量を演算する製品である。アズビル株式会社では、1991年から中大規模建物用である積算熱量計の販売を開始し、WTYシリーズとして進化を続けてきた。近年、当社のビルディングオートメーションシステムはsavic-net™ FXシステムから新システムであるsavic-net™ G5システムへの移行をはじめた。本稿では、WTYシリーズの機能を継承し、savic-net G5システムに通信接続可能な新製品、熱量演算器(WJ-1203)を紹介する。

## 2. 製品概要

熱量演算器(WJ-1203)は、特定計量器の範囲外である口径40Aを超える配管での熱量課金用途に使用することができる製品である。また、表示器(QJ-1203)を接続することで、設置場所で各計測値を確認することができるだけでなく、製品動作状態などの情報を確認することができる。



図1 熱量演算器構成図

## 2.1 特長

### 2.1.1 savic-net G5システムへの接続

熱量演算器(WJ-1203)はsavic-net G5システムにおけるプ

ライマリデバイスであるジェネラルコントローラ(WJ-1111)および熱源アドバンストコントローラ(WJ-1102)との通信接続を実現することでスーパーバイザデバイスである統合コントローラ(BH-101J0)での監視を可能とした。通信接続となるため省配線工事が期待でき、パルスカウントの計量ミスをなくすることができる。また、熱量演算器(WJ-1203)のsavic-net G5システムへ接続は、電気・水道・ガスなど異なる種類のメータの値を収集し、一定期間内の使用料を算出する機能をもつ集中検針が可能である。

通信方式はオープンプロトコルであるBACnet MS/TP, Modbus™に対応しており、用途に応じて使い分けができる。そのため、BACnet MS/TP接続では当社のセカンダリデバイスとしては同一ネットワークでの一元管理ができる。また、Modbus接続は量水器、電力量計などの機器に多く採用されているため、同一ネットワークに各機器を接続した検針システムを構築することが可能であり、シンプルな設備管理を実現する。

### 2.1.2 エンジニアリング

BACnet MS/TPでの接続では、savic-net G5向けエンジニアリングツールにて、パラメータを遠隔から設定することが可能である。また、積算値のプリセット等熱量演算器のパラメータや通信等のパラメータはNFC (Near Field Communication)対応Android™端末に実装したアプリケーションのSmart Engineering Toolで設定が可能である。Smart Engineering Toolを利用することで事前にオフィスでパラメータを作成しておけば、製品本体へはAndroid端末をかざすだけでパラメータを一括ダウンロードすることができる。そのため、パラメータの設定間違いの低減、同一パラメータ内容機器へのパラメータ設定時間の短縮、帳票の管理の向上が期待できる。

### 2.1.3 フレキシブルな機能拡張

熱量演算器(WJ-1203)はsavic-net G5システムと接続しない場合でもスタンドアロンとして利用することができる。この場合、小型リモートI/Oモジュール(RJ-12)を別途手配し組み合わせることで、演算部の入出力機能が選択可能となり、現場に最適な入出力機能に拡張することができる。

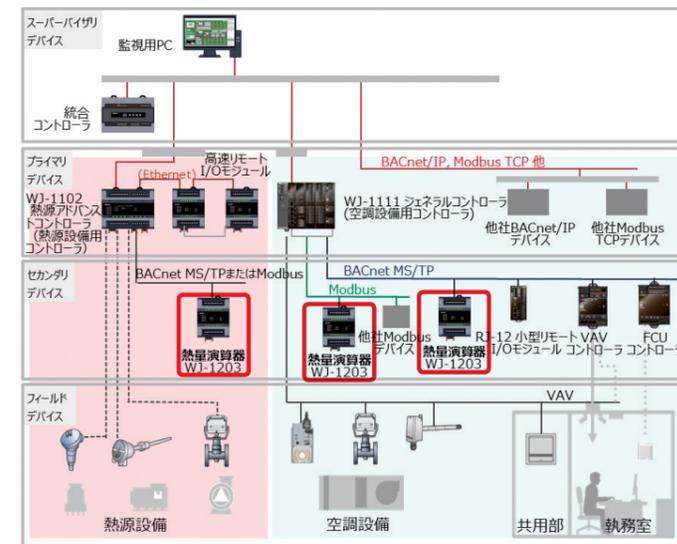


図2 システム構成図

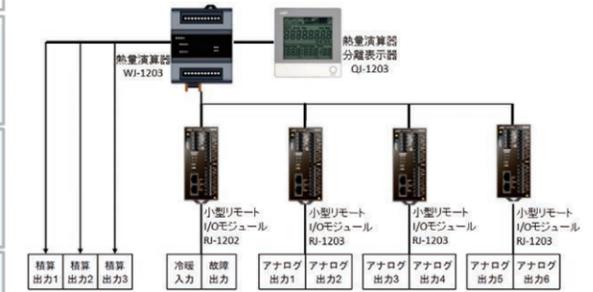


図3 機能拡張例

### 2.1.4 冷暖自動切替

小型リモートI/OモジュールのDIOモジュール(RJ-1202)を接続し、DI機能を利用することで冷房と暖房の切替を手動切替することができるが、送り側温度と返り側温度の大小関係から冷房か暖房かを自動で判別し、切り替える方式も選択できるようにした。この方式を選択することで省エネ計装での中温冷水(15℃程度の冷水)を活用した空調方式での冷水判断が可能となった。また、ヒートポンプを活用した空調ユニットの温水で冷房、冷水で暖房する計装でも冷暖の判断が可能となった。

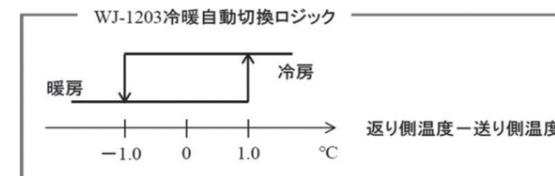


図4 冷暖自動切替ロジック

## 2.2 最新のJIS (JIS B 7550:2017) 準拠

### 2.2.1 計測精度

熱量演算器(WJ-1203)は特定計量器でないため検定対象ではないが、新JIS (JIS B 7550:2017)に準拠した性能を確保した。新JISに準拠させるための計測精度は、熱量演算器(WJ-1203)と体積計量器であるMagneW™3000 (Model MGG□□)、感温部であるTY7840それぞれで精度を確保することで、各部を組み合わせられた状態で検査をする必要がなく、それぞれを必要な時に手配できるようにした。

### 2.2.2 熱量換算係数の自動算出

従来製品(WTY8000)では熱量換算係数として30℃未満は4.186(冷房時)、30℃以上は4.123(暖房時)と固定値を使用している。しかしながら新JIS (JIS B 7550:2017)では国際法定計量機関の定める熱量換算係数(OIML R75)となったため、送り側温度及び返り側温度の計測値より温度計測毎の自動算出を採用した。

## 3. おわりに

今回、口径40Aを超える積算熱量計を開発し概要と特長を紹介した。今後40A以下の特定計量器の領域の積算熱量計が求められるため、必要追加機能を整理し、ビル市場における積算熱量計を本製品である熱量演算器でカバーし客先ニーズに対応していく所存である。

### <商標>

savic, savic-net, savic-net FX, MagneWは、アズビル株式会社の商標です。  
AndroidはGoogle LLCの商標です。  
BACnet MS/TPは、ASHRAEの商標です。  
ETHERNETは、富士ゼロックス株式会社の商標です。  
Modbus is a trademark and the property of SchneiderElectric SE, its subsidiaries and affiliated companies.

### <著者所属>

藤田 雄三 アズビル株式会社  
ビルシステムカンパニー開発本部開発4部

# マルチベンダー通信に対応するIoTゲートウェイ 形 NX-SVG

## Model NX-SVG IoT gateway for multi-vendor communication

牧野 豊  
Yutaka Makino

### 1. はじめに

エンドユーザーのスマートファクトリー化ニーズを背景として、装置メーカーにおける装置のIoT化要求が高まっている。この要求に対し、通信プログラムの開発作業負荷および開発納期が課題となっている。さらにはIoTデータ収集対象となるデバイス種類、ネットワーク種類は拡大傾向にあり、様々な通信プロトコルに対応可能なマルチベンダー通信に対応したIoTゲートウェイへのニーズが高まっている。

この需要に応えるため、形 NX-SVG (図1)を開発した。形 NX-SVGは省スペース化を要求される装置にも組み込み可能なコンパクト設計を実現し、また、通信プログラム(通信ラダープログラム)が一切不要なうえ、かつ多種多様なデバイスとの通信を実現した。



①各社表示器	⑨小型デジタルマスフローコントローラ
②CNC	⑩エア管理用メータ
③各社PLC	⑪電力調整器
④計装ネットワークモジュール	⑫デジタル指示調節計
⑤グラフィカル調節計	⑬プログラム調節計
⑥記録計	⑭デジタルマスフローコントローラ
⑦インバータ、電力量計等	⑮バーナコントローラ
⑧各社PLC	

図1 形 NX-SVG

### 2. 製品概要

形 NX-SVGに実装されたすべての機能は、装置開発者の開発労力を最小化することを目的としている。その特長について述べる。

### 2.1 特長

#### 2.1.1 データレジスタtoデータレジスタの簡単設定

アズビル製機器ならびに各社のPLC (Programmable Logic Controller), CNC (Computerized Numerical Controller), Modbusなどの通信プロトコルに対応している。形 NX-SVGでは通信伝文構築という概念ではなく、転送元デバイスのデータレジスタと転送先デバイスのデータレジスタを設定するだけで通信設定が完了する(図2)。異なる通信プロトコルの機器間であっても、データレジスタtoデータレジスタのエンジニアリング思想は同じであり、完全なプログラムレス通信(ラダーレス通信)を実現している。このエンジニアリング低減効果は絶大である。

図2 データレジスタtoデータレジスタ設定

#### 2.1.2 通信異常の原因究明を支援する通信履歴機能

形 NX-SVGは、機器との通信異常が発生した場合、通信異常の履歴を内部に自動保存する。履歴には、発生時刻、通信異常が発生した下位機器の識別、下位機器から受信した通信エラーコード、読出/書込の識別、読み書きしたデータの値等が自動的に保存される。保存された履歴はPCで時系列データ(図3)として追跡することができ、開発時のデバッグ作業だけでなく、装置が出荷されたあとの通信トラブルの要因解析を強力に支援する。通信トラブル時の解析ができる製品とできない製品では、トラブル解決までの所要時間で非常に大きな差が出る。

図3 通信異常履歴データ

#### 2.1.3 高信頼で強力な通信接続台数

形 NX-SVGはアルミ電解コンデンサをもたないため、周囲環境温度が変動しても製品寿命が変動しない。また、バッテリーレスで停電保持可能な内部メモリを使用しており、バッテリーなどの定期交換部品も存在しない。

LAN×2ポート、RS485×2ポートの計4つに通信ポートを装備し、LAN1/2には合計128台(Modbus TCPマスターノードを含めると最大136台)、RS485には合計62台の計198台までの機器を接続可能な強力な通信機能を非常にコンパクトなハードウェアで実現している。

製品の信頼性と性能はエンジニアの作業効率の改善に大きく寄与する。

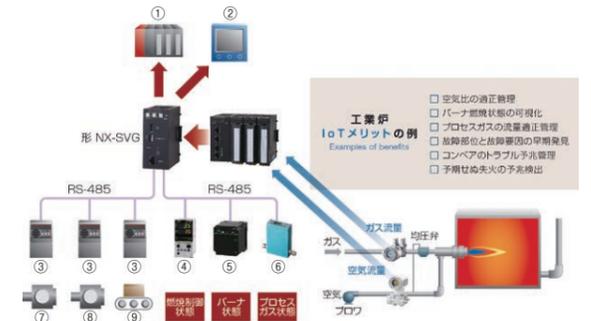
### 2.2 アプリケーション適用例

連続式炭焼炉などの工業炉では、機械全体の管理を行うPLCを中心としてバーナコントローラ、温度調節計、CP(カーボンポテンシャル)演算器、マスフローコントローラ、マスフローメータ、インバータ(コンベア制御)、ガス分析計など多くの計測制御機器が利用される。従来はこれらの機器の中でも相互インターロックが必要な部分のみI/Oでリンクされていた。しかしながら装置IoTが望まれる現在においては圧倒的に情報量不足であり、意思決定にはオペレータの熟練度を必要とする。

一方、IoT化された装置では、各機器、センサはIoTゲートウェイを通じて自由に情報交換ができるようになる(図4)。各機器がもつ有益なより多くの情報を収集、相互演算することで以下のようなメリットが生まれる。

- ・空気比の適正管理
- ・バーナー燃焼状態の可視化
- ・プロセスガスの流量適正管理
- ・故障部位と故障要因の早期発見
- ・コンベアのトラブル予兆管理
- ・予期せぬ失火の予兆検出

さらにIoT化が進むと、プロセス状態診断、燃焼状態診断、エネルギー診断、部品寿命予測など熟練オペレータが経験で判断していた高等技能を機械装置そのものもち、自ら判断できるようになる。形 NX-SVGはこのようなIoT化された装置の中で、各計測制御機器からより多くの情報を収集し、PLC、表示器、ストレージデバイスに情報を送る役割を果たす。



①各社PLC	⑥デジタルマスフローコントローラ
②各社表示器	⑦排気プロア
③インバータ	⑧送気プロア
④デジタル指示調節計	⑨コンベア
⑤バーナコントローラ	

図4 工業炉IoT

### 3. おわりに

今回、形 NX-SVGの概要と応用事例を紹介した。今後、需要が多くなるであろうOPC UA, EtherNet/IP, さらなる対応PLC機種追加(通信プロトコル追加)などを計画し、通信接続のバリエーションを増やすことで、ユーザーの通信プログラムレス対応が可能な機器の範囲をさらに拡大させる予定である。

さらには、形 NX-SVGに特殊な演算機能を追加したエッジコントローラ製品などに発展させていく予定であり、ユーザーのIIoT (Industrial IoT) ニーズに対応していく所存である。

#### <商標>

Ethernetは、富士ゼロックス(株)の商標です。  
Modbus is a trademark and the property of Schneider Electric SE, its subsidiaries and affiliated companies.  
EtherNet/IP™は、ODVAの商標です。  
OPC UAは、OPC Foundationの商標です。

#### <著者所属>

牧野 豊 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マーケティング部

#### 問い合わせ先

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マーケティング部  
0466-20-2278 <https://www.compclub.com/>

# 熱式微小液体流量計 形 F7M

微小な液体流量を高精度に測定しプロセスの品質改善・向上に貢献

Model F7M Micro flow rate liquid flow meter:

Improving process quality with high-accuracy micro liquid flow rate measurement

山崎 吉夫  
Yoshio Yamazaki

千崎 昌彦  
Masahiko Senzaki

## 1. はじめに

流量計測においては多様な計測方式が提案され実用化されているものの<sup>(1)</sup>、それぞれに長所・短所があり、計測対象流体・流体の性状・流量レンジ等のすべてにおいて万能な方式は存在しない。特に50mL/min以下の微小液体流量の領域では、用途を限定すれば複数の実用化例はあるものの一般産業市場・半導体製造プロセス・製薬・化学分析の分野にて、実際の使用条件に合致し、かつ使用者の要望(精度、サイズ、設置条件等)を満たす流量計の選択肢は限られている<sup>(2)</sup>。また、液体流量を扱うプロセスには様々な流体種類が存在し、流量計の測定原理によっては液体種類ごとに使用者が補正値を入力する必要がある。

これらの状況に対して、微小な液体流量を高精度に計測できる熱式微小液体流量計、形 F7Mを開発・販売した。



図1 形 F7Mの外観図

## 2. 熱式微小液体流量計 形 F7M

### 2.1 測定原理

形 F7Mは熱式流量計に区分され、消費電力方式と呼ばれる方式で流量計測を行っている。図2に測定原理図を示す。流路を構成するガラス管の上流側に液温センサ、下流側にヒーターセンサが配置されている。液温センサで測定した流体温度に対してヒーターセンサを一定温度高くするように温度制御する。この時、流量が大きいほど流体がヒーターから奪う熱量は大きくなるため、ヒーターで消費される

電力は流量に相関を持つ。ヒーターセンサの消費電力から流量を算出する測定原理である。

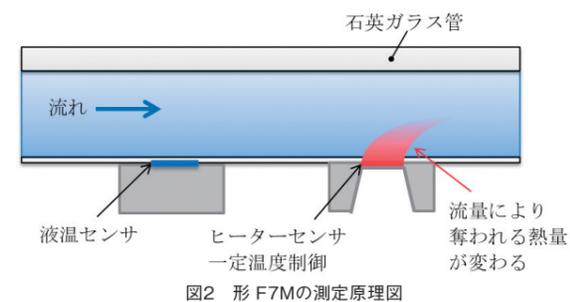


図2 形 F7Mの測定原理図

### 2.2 特長

形 F7Mの主な仕様を表1に示す。

表1 形 F7M主な仕様

製品形番	F7M9010	F7M9030	F7M9050
計測流量範囲	0.1~10mL/min	0.3~30mL/min	0.5~50mL/min
計測精度 (流体が水の場合)	±5%RD (20%FS以上) ±1%FS (20%FS未満)		
繰り返し性 (流体が水の場合)	±1%RD (20%FS以上) ±0.2%FS (20%FS未満)		
製品サイズ	幅22mm×高さ60mm×面間122mm		
重量	約85g		
流体圧力範囲	0~500kPa		
流路耐圧	700kPa		
保護構造	IP65		

形 F7Mは以下のような特長がある。

(1)高精度な微小流量計測が可能

形 F7Mは流量レンジの20%FS以上の流量に対して±5%RDの高い精度、かつ±1%RDの高い繰り返し性を実現している。これにより従来計測が困難であった微小流量の安定した計測が可能となり、ユーザーの製造工程管理、品質改善、歩留まり改善に貢献できる。

(2)ストレート流路で圧力損失が小さい

流体の流路は石英ガラス管と、流体の入出接続部で

あるフッ素樹脂製の継手で構成されており、流路は完全なストレート形状かつ流路内に障害物は存在しない。そのため最大流量時でも圧力損失は1kPa未満と小さい。これにより流体の送水圧力を小さくでき、設備の簡素化、省エネルギーに貢献できる。

(3)設置場所、流体を選ばない

熱式MEMSセンサはガラス管外面に配置され接液しない。接液材料は石英ガラスとフッ素樹脂だけであり、様々な流体に対して高い耐食性を持つ。保護等級はIP65に準拠し、さらに製品外面に一切の金属材料を使用していないため、腐食性の高い液体飛沫を受ける環境でも高い耐久性をもつ。これにより幅広いアプリケーションで安心して使用可能となっている。

(4)小型・軽量、取付け簡単

流量計本体は幅22mm×高さ60mm×面間122mmのコンパクトなサイズで重量は約85gと軽量、また水平配管、垂直配管のどちらにも取付け可能である。設置場所の自由度が高く、ユーザーの設備や装置の小型化に貢献できる。

### 2.3 液体変更時の補正係数自動設定機能

流量計の測定原理によっては、流体の種類(物理的パラメータ)に影響を受け流量計測に影響(測定誤差)を与える場合がある。形 F7Mは熱式の消費電力方式であるため液体の熱伝導率が流量出力に影響を与える。そのため正確な計測を行うためには液体種類ごとに補正係数を設定する必要がある。液体の熱伝導率が分かれば補正係数を推測することは可能だが、使用する液体の熱伝導率が不明である場合が多く、液体に合わせた補正係数の設定が難しいという課題があった。

形 F7Mでは、液体に合わせた補正係数を自動設定する機能を有する。停水している状態でのセンサ信号は液体の熱伝導率と相関がある(図3)。これを利用し、停水時にボタン操作することでその液体の補正係数を自動設定する。これにより、液体種類の変更に対する合わせ込み作業を簡便にすることができる。

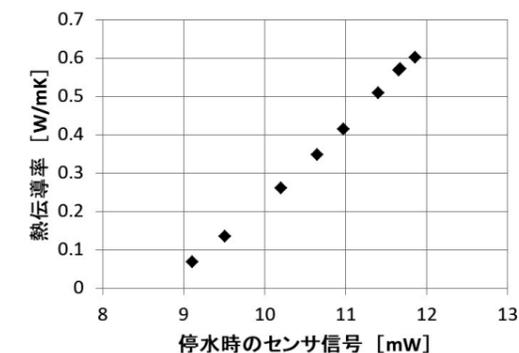


図3 停水時のセンサ信号と熱伝導率の関係

### 2.4 JCSS校正事業者

形 F7Mの校正は、生産工程において実際に液体(水)を流通して行っており、社内の流量標準は当社 技術標準部 計測標準グループにて構築している。同グループは2019年10月に微小流量計のJCSS (Japan Calibration Service

System:計量法に基づく校正事業者登録制度)登録事業者として登録認定(登録番号0155)された。流体を水とした微小流量範囲でのJCSS登録認定は国内初である。

これにより形 F7Mの品質に高い信頼性を付与し、国際的にも通用する計測トレーサビリティの体制を構築している。

## 3. おわりに

微小液体流量計測においては複数の計測方式が実用化されているものの、実際に流量計が使用されているアプリケーションは限られていた。

形 F7Mはその特長から、これまでは流量計を使用できなかったアプリケーションにも採用されている。形 F7Mの推奨するアプリケーション事例を図4に示す。

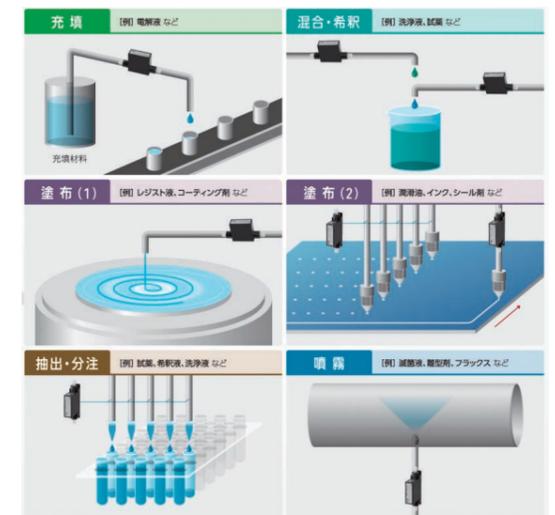


図4 推奨アプリケーション事例

今後、測定可能流量範囲の拡大、応答性の向上、流量制御バルブを付加した流量コントローラ化など製品仕様を拡張し、適用可能なアプリケーションを拡大することでさらなるお客さまのプロセス品質改善・向上に貢献する所存である。

### <参考文献>

- (1)日本計量機器工業連合会編:流量計の実用ナビ-改訂版(日本計量機器工業連合会, 2012)
- (2)チョン・カー・ウィー:微小液体流量計測の現状と将来展望,産総研計量標準報告 Vol.8, No.1(2010) pp.15-43

### <著者所属>

- 山崎 吉夫 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
- 千崎 昌彦 アズビル株式会社  
アドバンスオートメーションカンパニー  
CPマーケティング部

### 問い合わせ先

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マーケティング部  
0466-20-2226 <https://www.compoclub.com/>



---

azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2020年4月発行号

---

発行日 2020年4月1日(通巻61号)  
発行責任者 高橋美加子(アズビル株式会社 経営企画部広報グループ)  
編集委員会 委員長：坂本孝宏  
委員：吉村俊哉、百瀬修、筒井宏明、大塚尚樹、鹿島亨、  
久保田耕、倉科裕行  
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/>

©2020 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。