



# Contents

## 特集：バルブ・アクチュエータ

特集に寄せて	1
アズビル株式会社 アクチュエータ開発本部	高野 智宏

## 特集論文

バルブ・アクチュエータの進化と今後	3
アズビル株式会社 アクチュエータ開発本部	沖田 孝雄 大谷 秀雄 渡邊 清彦

次世代調節弁6000シリーズの開発	9
アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー アズビル株式会社 アクチュエータ開発本部	山本 博司 仁田 正史 吉田 貴浩

調節弁のキャビテーション抑制技術開発	17
アズビル株式会社 アクチュエータ開発本部	黒澤 祐貴 新谷 知紀 尹 鍾皓

ON-OFF弁スマート化による不調検知と運用変革 ～高付加価値バッチプロセス時代の製造業を支える技術～	23
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 史明 村田 耕一郎

高速作動バルブの状態監視に向けた セルラー通信技術の応用と低消費電力化への取り組み	29
アズビル株式会社 技術開発本部	築瀬 壮一郎 田辺 樹

AI技術を活用したバルブ整備作業の工程改善	35
アズビル株式会社 AIソリューション推進部 アズビル株式会社 サービス本部	細居 智樹 大枝 賢

## 一般論文

高性能で軽量な変化検知技術の異常検知への応用 ～人工知能分野の国際会議AAAIに採択された技術～	41
アズビル金門株式会社 経営企画部 山形大学 理学部	村上 英治 鈴木 郁美 原 一夫

コンテナ化技術を活用したsavic-net™ G5システムの 仮想化基盤技術の開発	47
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー開発本部	東出 功一

# Contents

## Special Issue : Valve・Actuator

Introduction to the Special Issue	1
Actuator Development Headquarters, Azbil Corporation	Tomohiro Takano

## Articles on Special Issue

The Evolution and Future of Valves and Actuators	3
Actuator Development Headquarters, Azbil Corporation	Takao Okita Hideo Otani Kiyohiko Watanabe

Development of 6000 Series Control Valve	9
Advanced Automation Company, Azbil Corporation Actuator Development Headquarters, Azbil Corporation	Hiroshi Yamamoto Masashi Nitta Takahiro Yoshida

Development of Cavitation Suppression Technology for Control Valves	17
Actuator Development Headquarters, Azbil Corporation	Yuki Kurosawa Tomonori Shintani Chongho Youn

Advanced ON-OFF Valve Technology for Fault Detection and Operational Transformation — Enabling Technologies for High-Value Batch Process Manufacturing —	23
Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Fumiaki Yamasaki Kouichiro Murata

Cellular Connectivity for Remote Status Detection of High-Speed Valves and Development of Battery Life-Extension Technologies	29
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation	Soichiro Yanase Itsuki Tanabe

Process Improvement in Valve Maintenance Operations Utilizing AI Technology	35
AI Solution Department, Azbil Corporation Service Headquarters, Azbil Corporation	Tomoki Hosoi Masaru Ooeda

## Article on Other Subjects

Applying a high-performance and lightweight algorithm to anomaly detection — A technology accepted by the international AI conference —	41
Corporate Planning Department, Azbil Kimmon Co., Ltd. Faculty of Science, Yamagata University	Eiji Murakami Ikumi Suzuki Kazuo Hara

Development of Virtualization Infrastructure Technology for the savic-net™ G5 System Utilizing Containerization Technology	47
Building Systems Company, Azbil Corporation	Kouichi Higashide

# 特集に寄せて

アズビル株式会社  
アクチュエータ開発本部

## 高野 智宏

私たちアズビルは、1906年の創業時に掲げた「人間の苦役からの解放」という理念を、現在のグループ理念「人を中心としたオートメーション」へと受け継ぎ、ビルディングオートメーション、アドバンスオートメーション、ライフオートメーションの領域で約120年にわたり事業活動を続けてまいりました。事業を継続するためには、基盤技術である「計測と制御」を確立し、それを活かしたオートメーション関連の製品やサービスを提供することが不可欠です。パンデミックの発生などの突然の社会的変化や、急速な技術革新への対応はもちろん、常に技術レベルの向上に努め、今後も継続的な成長を目指します。

今回の特集テーマである「バルブ・アクチュエータ」は、アズビルの「計測と制御」の基盤技術の中でも、主に「制御」を担う主要製品です。過去を振り返ると、アズビルは工業系市場を中心に、1936年には当時輸入品が主流だった調節弁の国産化を初めて開始し、1964年には世界初のケージ弁の独自開発に成功しました。その後、空調市場向けにも1967年にグローブ形調節弁のV506xシリーズを開発し、国産化したモジュロールモータをアクチュエータ部に搭載しました。さらに、1992年には空調設備の小型化や現場での組付け・調整不要といったニーズに対応した回転弁「アクティブバル™シリーズ」を開発し、以後シリーズとして様々な機種を展開してきました。こうした歴史を持ち、「バルブ・アクチュエータ」においては、お客さまから一定の評価をいただいているものと自負しております。

事業継続のためには、お客さまに満足いただける製品を提供し続けることが必要であり、そのために何が求められるかを常に考えています。また、それを実現する技術力も不可欠です。

バルブについては、機械系を中心とした幅広い技術要素が求められますが、特に流体に関する技術が重要です。制御バルブの主な機能は、微小な流量から大流量まで精密にコントロールできることですが、様々な使用条件下ではキャビテーション（液体中の圧力変動によって気泡が発生・崩壊し、騒音や損傷の原因となる現象）が発生することもあります。そのため、製品の最適構造を導くには、流体シミュレーションによる解析や可視化技術を活用し、実機での実証テストを行うことが必要です。アズビルでは、長年にわたり大学との共同研究や公共機関の協力を得ながら技術を培ってきました。2022年にはグローバル規格に準拠した高圧条件下での試験を可能とした調節弁流量試験設備をアズビル京都株式会社内に構築しました。

アクチュエータについては、アズビルでは主として空気式と電動式に分かれます。空気式は特に工業系市場で防爆用途に適し、グローブ弁などのリニア動作型に多く採用されています。電動式は空調用途で小型・軽量といった特徴があ

り、回転弁を中心に採用され、駆動源として電気モータを使用し、減速機構を介してバルブを動作させます。主な技術としては、樹脂から金属まで多様な材料を用い、歯車やリンク機構などの機械要素部品を使用するため、材料やメカニズムの解析が中心となります。また、駆動源や開度検出に加え、高機能化対応機種で使用する状態認識には、電気的要素も含めたメカトロニクス技術が不可欠です。

今後の取組みについては、バルブ・アクチュエータの「流量制御」という基本機能の提供はもちろん、さらに発展させることを考えています。一つは、従来の技術を深化させ、現行製品に新機能を搭載することで、より高機能な製品・サービスを提供することです。例えば、流量計測制御機能付アクティブバルは、既存製品にバルブ内部の流体状態解析技術を活用し、流量や熱量を同時に計測する機能を付加したものです。アズビルが強化しているAI技術なども活用することで、新たな製品開発に取り組んでいます。もう一つは、アクチュエータの原点に立ち返り、培ってきた「動かす技術」を活用し、従来の事業分野にとらわれず新しい市場も視野に入れた製品化にチャレンジします。これには、柔軟なオープン・イノベーションの思想に基づき、社外との連携も視野に入れた活動となります。

今回の特集では、アズビルの「計測と制御」の技術基盤から、バルブ・アクチュエータに関連する技術開発事例および実際の製品開発事例をご紹介します。これらはすべて、azbilグループが目指す持続可能な社会への貢献に直結するものと確信しております。技術は進化を続けておりますが、今後はさらにそのスピードが加速すると考えられます。現状の技術に満足することなく、常に新しい画期的な技術習得を目指す探究心を大切にし、研究開発・製品開発に取り組んでまいります。

本特集に限らず、アズビルの探究心あふれる取組姿勢が少しでもお伝えできれば幸いです。

# Introduction to the Special Issue

Azbil Corporation  
Actuator Development Headquarters

## Tomohiro Takano

under high-pressure conditions in accordance with global standards.

At Azbil, actuators are primarily divided into pneumatic and electric types. Pneumatic valves are particularly well-suited for explosion-proof applications in industrial markets and are often used for linear-operated valves such as globe valves. Electric valves are characterized by their compact, lightweight design for air conditioning applications, and are mainly used in rotary valves. An electric motor is used as the driving source to operate the valve via a reduction mechanism. The main technology involves the use of a variety of materials, from resin to metal, and mechanical components such as gears and link mechanisms, so the focus is on the analysis of materials and mechanisms. Furthermore, in addition to detecting the drive source and opening, mechatronics technology, including electrical elements, is essential for status recognition used in highly functional models.

As for future initiatives, we are considering not only providing the basic function of “flow control” for valve actuators, but also further developing it. One approach is to provide more sophisticated products and services by deepening existing technologies and incorporating new functions into current products. For example, ACTIVAL with flow measurement and control function has been developed by utilizing fluid state analysis technology inside the valve, and adding the function of simultaneously measuring flow rate and heat quantity to the existing product. We are working on new product development by utilizing AI technologies that Azbil is strengthening. The other approach is to return to the origins of actuators, utilize the “movement technology” we have cultivated, and to take on the challenge of commercializing products that go beyond our traditional business fields and look into new markets. This will be an activity based on the idea of flexible open innovation, and will also take into consideration collaboration with external parties.

In this special feature, we will introduce examples of technological development and actual product development related to valves and actuators based on Azbil’s measurement and control technology foundation. We believe that all of these efforts will directly contribute to the sustainable society that the azbil Group aims for. Technology continues to evolve, and the pace of progress is expected to accelerate in the future. We will always seek to acquire new and innovative technologies, without being satisfied with the current state of technology, as we engage in research and development and product development.

We hope that this special feature and other efforts will convey to readers Azbil’s pioneering approach.

# バルブ・アクチュエータの進化と今後

## The Evolution and Future of Valves and Actuators

沖田 孝雄  
Takao Okita

大谷 秀雄  
Hideo Otani

渡邊 清彦  
Kiyohiko Watanabe

キーワード  
調節弁(バルブ), 耐キャビテーション技術, 低騒音化技術, 流量計測制御機能, グローバル展開

アズビルは1936年に国産初の調節弁製造を開始し、独自の耐キャビテーション技術や低騒音化、流量計測技術などを開発し、流量計測制御機能付きアクティブ™シリーズや工業用調節弁6000シリーズなどの高性能製品を展開してきた。また、国際標準対応の試験設備を新設することによりグローバル市場や新市場への対応の強化を図っている。今後は省エネルギー、信頼性、長寿命化、社会的要請への対応をさらに進め、持続可能な社会の実現に貢献していく。

Azbil began manufacturing Japan's first domestically produced control valves in 1936 and has since developed unique technologies such as cavitation resistance, noise reduction, and flow measurement. The company has launched high-performance products such as the Actival™ valve with integrated flow measurement and control, and the industrial control valve 6000 Series. In addition, Azbil has established test facilities compliant with international standards, strengthening its response to global and new markets. Going forward, the company will further advance energy saving, reliability, longevity, and responses to social demands, contributing to the realization of a sustainable society.

### 1. はじめに

近年、産業プラントや建物空調における省エネルギー化、快適性・安全性の向上、さらには環境負荷低減への要求が高まっている。こうした社会的要請に応えるため、空調・プロセス制御分野では流体制御の中核を担う調節弁の役割が一層重要となっている。調節弁は冷温水や蒸気、各種流体の流量や圧力を精密に制御することで、空調機器や生産設備の安定運転と高効率化を支えている。

アズビル株式会社(以下、弊社)は、長年にわたり建物空調や産業用途向けに多様な調節弁を開発・提供してきた。特に、電動操作器一体型のロータリー形調節弁や流量計測制御機能、耐キャビテーション・低騒音化技術を搭載した調節弁は、国内外の多くの現場での顧客価値を実現している。

本稿では、調節弁の歴史的な発展と技術革新の流れを概観し、弊社が取り組んできた耐キャビテーション技術や低騒音化技術、流量計測制御機能付きバルブの開発、メンテナンス性向上のための設計・運用手法、今後の展開について紹介する。

### 2. バルブ(調節弁)の歴史

弊社(旧・山武商会)は米ハネウェル社との提携以前から工業用調節弁を手掛けており、提携後も日本側独自に開発

を進めてきた。1964年に世界初のケージ形調節弁、その後Vシリーズ、CV3000シリーズ、アルファプラスシリーズを開発・販売した(図1)。さらなる海外市場の販売強化のため、2025年10月より前述の3シリーズを統合した調節弁6000シリーズの販売を開始した。

建物空調用調節弁としては、1967年にV506xシリーズを開発し、1992年にはアクティブ™シリーズを開発、2007年には流量計測機能及び流量制御機能を調節弁に一体化したアクティブ™を開発した。

これらの製品開発を確実に実施するため2007年には建物空調用の流量試験設備を構築し、2008年には流量騒音試験設備を増設した。さらに2014年に流体の温度制御機能を追加したことで建物空調向けの温度範囲を全てカバーできる試験設備となった。

2022年には世界市場における競争力強化を目指し、アズビル京都株式会社内に産業用の調節弁流量試験設備を建設し、国際規格準拠の高差圧領域での性能試験も可能となった。

#### 2.1 工業用調節弁の歴史

弊社は1936年に我が国で初めて調節弁の製造を開始した。当時、計器の調節弁のほとんどが輸入品であり、当該調節弁も輸入品を参考に設計した。1952年に米ハネウェル社と技術援助契約を締結し、1953年に米ハネウェル社からの

資本参加を得て合弁企業(旧・山武ハネウェル)となったが、調節弁事業は日本側が主導した。1959年に調節弁事業部が発足し、独自設計による製品系列が完成した。

1964年には米ハネウェル社のアイデアをヒントに、従来の「トップアンドボトムガイド形」とは異なるケージ形調節弁を世界で初めて製品化し、1965年にはVシリーズを製品化した。1973年には調節弁の専門工場として寒川工場(現・湘南工場)を竣工し、1985年にCV3000シリーズ、1995年にアル

ファプラスシリーズを製品化した。1994年には中国大連市に大連山武機器有限公司(現・アズビル機器(大連)有限公司)を設立し、調節弁の加工組立を開始した。

2000年代以降は製品の追加・改良などシリーズ製品の補強を行い、2013年にはアズビルサウジアラビア有限会社を設立し、調節弁の製造・販売・輸出を開始した。2017年には従来の3シリーズ製品の統合を目指してリニューアル開発に着手し、2025年に販売を開始した。



図1 工業用調節弁

#### 2.2 建物空調用調節弁の歴史

1967年に建物空調用調節弁V506xシリーズを開発し、ハネウェル社アクチュエータを国産化したモジュロールモータを搭載した。1992年には電動回転弁であるアクティブ™シリーズを開発した。1994年には中国大連市に大連山武機器有限公司を設立し、調節弁の加工組立を開始した。2002年以降はアクティブ™スプリングリターン、小型アクティブ™、高差圧対応などシリーズ強化の開発を行い、建物空調用回転弁の品揃えを拡大した。2004年にはV506xシリーズ用アクチュエータとして長年使用したモジュロールモータの置き換えとなる電動操作器MY3000・ECM3000を開発した。2007年にはインテリジェントコンポをテーマに流量計測機能及び流量制御機能を調節弁に一体化した流量計測制

御機能付アクティブ™を開発した。

また弊社は室内空気環境の厳密なコントロールが求められる病院や製薬工場、化学薬品などを扱う研究施設などにおいて活用されているヒュームフード<sup>注1</sup>に着目し、1998年に風量・室圧制御用ベンチュリーバルブの国内独占販売を開始した。

2009年にはsavic-net FX™に接続して運用情報を収集することができるコントローラと、ベンチュリーバルブを組み合わせた一体型の製品として風量制御コントローラ付きベンチュリーバルブ Inflex™ VNの開発・販売を開始した。また2021年には建物内の狭小空間や中小規模施設における高精度な気流制御を目的とした小口径型ベンチュリーバルブの開発・販売を開始した<sup>(1)</sup>。



図2 建物空調用調節弁

注1 ヒュームフードとは、化学実験などで有害な気体が発生するときや、揮発性の有害物質を取り扱うときなどに作業者の安全を確保するために用いられる箱型の局所排気装置。

### 3. 技術開発

弊社では、新製品開発を進める際、顧客価値向上を目指して製品仕様を定め、必要な要素技術を開発し、製品に適用することに努めている。これまでに確立した要素技術として、工業用調節弁の耐キャビテーション技術や、空調用制御弁の静音化技術など特徴ある技術を保有しており、その内容を紹介する。

#### 3.1 耐キャビテーション技術

調節弁は産業用プラントや建物空調など、さまざまな用途で使用されている。特に高圧・高温・多相流体といった過酷な条件下ではキャビテーション現象が大きな課題となる。キャビテーションは、弁内部の圧力が流体の飽和蒸気圧を下回ることで気泡が発生し、その崩壊時に発生する衝撃により、弁のトリム部や本体に壊食（エロージョン）を引き起こす。この現象は、弁の「締切機能」や「制御機能」の低下、さらには圧力容器としての機能喪失にもつながるため、耐キャビテーション技術の開発は極めて重要である。

弊社では、キャビテーション壊食の実態把握のため、透明アクリル製の弁室を用いた可視化実験や、20MPa級の高圧水流による壊食試験を実施し、キャビテーション発生パターンや壊食進展のメカニズムを詳細に解析<sup>(2)</sup>している。これらの研究から、キャビテーションの発生位置や進展速度は弁形式や開度、流体条件、材料特性など多くの因子に依存することが明らかになった。

耐キャビテーション弁の設計においては、多段減圧構造や多孔ケージの採用、トリム部への高硬度材料の適用が有効であることが実証されている。例えば、多段減圧構造や多孔ケージの形状によって、圧力を段階的に低減させることでキャビテーションの発生を抑制し、壊食や騒音の低減、長寿命化を実現している。

また、材料面では、SUS440Cやコバルトクロム合金、セラミックスなどの高硬度材料をトリム部に適用することで、壊食耐性を大幅に向上させている<sup>(3)</sup>。

さらに、キャビテーション診断技術の開発も進めている。例えば、空調用調節弁においては、弁の縮流部前後の圧力比と騒音レベルの関係を利用し、キャビテーションの発生状態をリアルタイムで診断する技術を開発している。圧力比テーブル方式や騒音の周波数分析（1/3オクターブバンド分析）を組み合わせることで、設置条件の影響を受けにくく、精度の高いキャビテーション診断が可能となっている<sup>(4)</sup>。

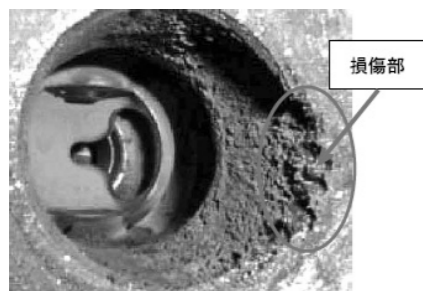


図3 キャビテーションエロージョンによる調節弁の損傷事例

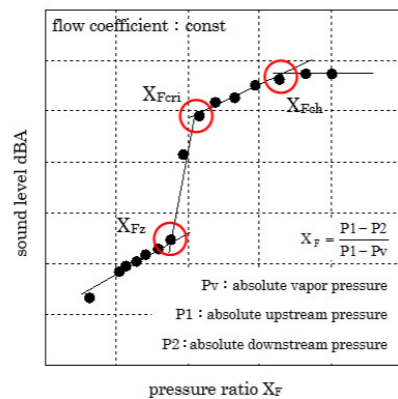


図4 圧力比 $X_F$ と騒音レベルの関係

#### 3.2 低騒音化技術

調節弁の騒音は、キャビテーションや乱流、ジェット流の発生など、弁内部の流体挙動に起因する。特に建物空調用途では、調節弁がホテル客室や病院など居住空間近くに設置されるため、低騒音化が強く求められる。これまでファンコイルで使用されてきたグローブ型調節弁は、中間～低開度でキャビテーションが発生しにくく、騒音レベルも低いという特徴があるが、異物噛み込みによる固着や設置スペースの問題が生じた。一方、回転弁（ボール弁）は小型化や操作性、耐異物性に優れるものの、構造上キャビテーションが発生しやすく、騒音レベルが高いという課題があった。

弊社では、数値流体力学（CFD）を活用し、圧力分布や乱流エネルギー分布、Powellの音源項などを解析することで、騒音発生メカニズムを可視化し、設計段階での騒音予測手法を確立した。これにより、キャビテーションや乱流騒音の発生領域を特定し、構造最適化による騒音低減設計が可能となった<sup>(5)</sup>。

具体的な低騒音化技術の一番目としてボール内部にくし歯状の流路を設ける構造とした。これによりジェット流を微細化し、乱流エネルギーの高い領域を縮小する。この結果、実使用圧力範囲内でグローブ型調節弁と同等以下の騒音レベルを達成している（特許出願済）。

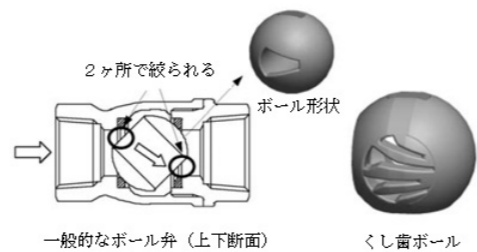
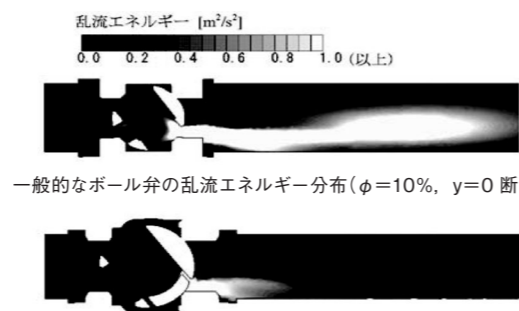
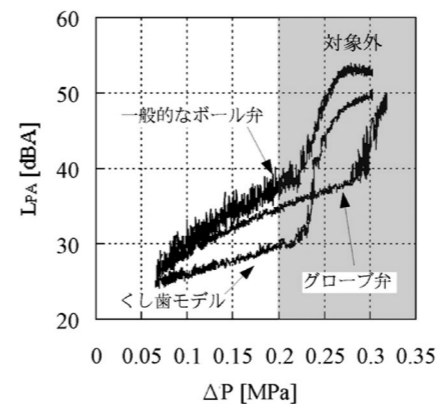


図5 一般的なボール弁の構造とくし歯ボールの構造



くし歯モデルの乱流エネルギー分布（ $\phi=10\%$ 、 $y=0.1[\text{mm}]$  断面）

図6 実流量試験による検討結果



φ=25%におけるΔP-LPAの騒音特性

図7 騒音試験結果

また、図8に示すように一般ボールの場合は流体の絞りが1次側・2次側にあり流線が曲がっているため、一次側の絞りにてキャビテーションが発生するとボール壁面への気泡の衝突および気泡同士の衝突による騒音が発生する。これに対し、具体的な低騒音化技術の二番目として、ボール内部に副流路を持つ構造とした。これにより、流体の絞りが2次側のみで流線もほぼ直線的となるため、流体の衝突が発生しにくくなる。このような効果により騒音低減を実現することができる。

アクチュエータの低騒音化ではギヤの材質や構造の最適化、制振効果のあるプラスチックカバーの採用、ワンウェイクラッチの組み込みなどにより、駆動音や伝達音の低減を図っている。これらの技術により、弊社の調節弁は、キャビテーションや乱流騒音の発生を抑えつつ、設置環境や用途に応じた最適な騒音性能を実現している<sup>(6)</sup>。

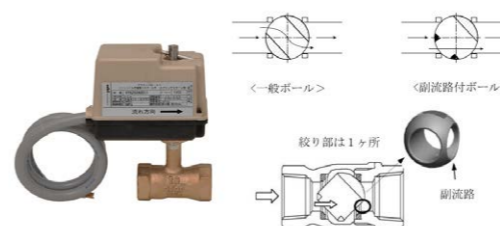


図8 副流路付きボール弁

### 4. 製品の紹介

製品開発を行う際は、3章で紹介した要素技術などを活用し、顧客への提供価値を日々高めることに努めている。顧客価値を明確にするため、市場調査を行い、機能思考（VE）をとることでオンリーワンとなる製品開発を目指している。

#### 4.1 工業用調節弁6000シリーズ

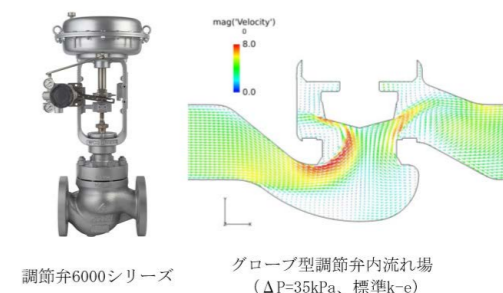
石油精製・化学品製造市場向けの基幹製品として、国際規格IEC60534<sup>(注2)</sup>に準拠した調節弁「調節弁6000シリーズ」は、CFD解析を活用した最適な設計により、制御性能を大幅に向上させるとともに、設備コスト削減、省スペース化、メンテナンス性向上など、プラントのライフサイクル全体での生産性向上に貢献する。

注2 IEC60534(工業プロセス調節弁の国際規格)

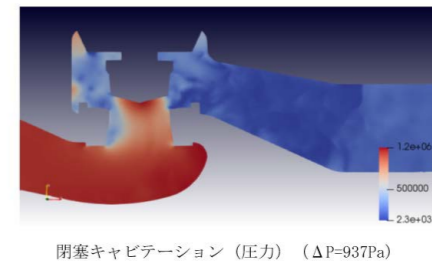
調節弁は生産プロセスでの流体制御を担う重要な機器である。特に石油・石油化学などのプロセスオートメーション領域で使用される調節弁には高い制御性能と長期安定性が求められる。加えて、グローバル市場における競争力を高めるためには、国際標準への適合も不可欠である。さらに、お客様の生産現場では働き方改革や労働人口構造の変化に対応するため、調節弁のような生産設備においても、プラントのライフサイクル全体を通じて生産性向上に貢献することが期待されている。こうした市場のニーズに応えるべく、「調節弁6000シリーズ」が開発された。主な特長として、CFD解析による精密なシミュレーションを用いて内部構造の設計を行ったことが挙げられる。さらに国際規格に準拠した流量試験設備による実測評価を実施し、その結果としてバルブ性能を表す代表指標の定格 $C_v$ 値<sup>(注3)</sup>は弊社単座弁比129%、弊社ケージ形調節弁比125%の向上を実現したことを確認した。

従来製品と比較して最大で高さ約40%の小型化を実現しながら、同等以上の性能を保持している。一台で幅広い流量を安定して制御でき、設備コストの削減と省スペース化を同時に実現している。小型でも高い締切性能を発揮し、空気消費量の低減や作業性の向上など、現場での運用効率が大きく改善できる。

特殊工具が不要な構造や部品の共通化をはじめ、メンテナンス性に配慮した設計により、保守作業の効率化と部品管理の簡素化を実現した。お客様の作業負荷軽減と長期的な運用コスト低減に貢献する。



調節弁6000シリーズ



閉塞キャビテーション（圧力）（ $\Delta P=937\text{Pa}$ ）

図9 調節弁6000シリーズのCFD解析結果

#### 4.2 流量計測制御機能付バルブFVY51シリーズ

近年、建物空調においては、エネルギー管理や省エネルギーの推進が強く求められており、空調機ごとの熱量計測や流量制御の重要性が増している。弊社では、こうしたニーズに応えるため、流量計測および制御機能を備えた電動二方弁アクティブシリーズを開発・展開している<sup>(7)</sup>。

このバルブは、従来の開度制御ではなく、バルブ自身が計測した流量を用いて流量制御を行うことができるため、

注3 流体の流れやすさを示す容量係数のこと。

空調機への過流量を抑制し、熱源やポンプの搬送動力を削減することが可能である。また、配管内の圧力変動があっても、常に最適な流量を維持できるため、室内の快適性向上にも寄与する。

流量計測には差圧式を採用し、バルブ内部の絞り部前後の差圧と、開度ごとに実験から求めたCv値テーブルを用いて、リアルタイムで流量を演算する。大口径モデルでは、プラグとステムの締結部構造やシャフトのねじれ補正アルゴリズムなど、計測精度向上のための独自技術も開発している。これにより、±5%RD（最大設定流量の10～100%範囲）という高い流量計測精度を実現している<sup>(8)</sup>

さらに、圧力センサや温度センサを一体化し、バルブ単体でエネルギー管理が可能となる省スペース・省施工設計も特徴である。これらの技術は、国内外の建物空調用冷水水制御に多数採用され、省エネルギーや快適性向上に大きく貢献している。

流量制御機能付バルブでは、自己診断機能や機器データの蓄積・活用による劣化予知やフォルト検知も進んでおり、現場保全作業の効率化や異常状態の早期発見・回避が可能となる。これらの技術は、今後のバルブメンテナンスの高度化・最適化に大きく寄与する。

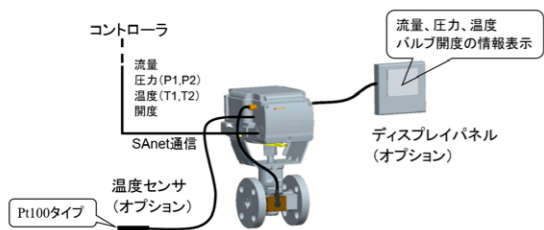


図10 流量制御機能付きバルブの製品校正

## 5. 京都試験設備

世界市場における競争力強化を目指し、アズビル京都株式会社内に調節弁流量試験設備を整備した。

### 5.1 設備の目的と概要

石油や石油化学などのプロセスオートメーション領域で使われている調節弁には、高い制御性能が求められる。こうしたニーズに対応し、さらなるグローバル市場の要求に適合した製品の研究・開発には、新たに設計した製品の特性を正確に検証・評価する必要がある。

そのため、流量計測機器の中核工場であるアズビル京都に調節弁の特性データの計測を効率的に実施できる試験設備を新設した。この試験設備では、国際標準に適合する試験（水ならびに空気）が実施可能である。既存の流量試験設備と合わせて、国内市場のみならずグローバル市場の要求にも対応できるようになった。

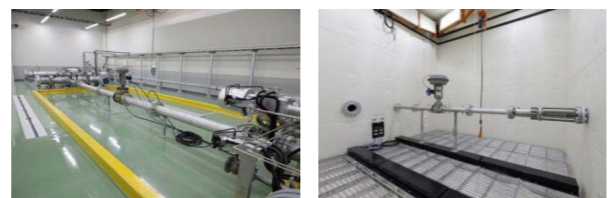
また新設した設備は、IECなどによる国際規格に準拠する評価試験手順が制御ロジックとして組み込まれており、弊社の協調オートメーションシステムHarmonas-DEO™による自動運転・自動計測を行うことができる。

### 5.2 設備の特徴

水用流量試験設備は、容量300トン規模の地下水槽を有し、口径に合わせた配管を使用して最大圧力3.25MPaで試験が可能である。

空気用流量試験設備は、10m<sup>3</sup>タンクを6基有し、最大圧力3MPaで試験ができ、また無響室内でバルブの騒音特性の計測も可能である。

国内では類例のない大流量対応の設備であり、試験プロセスの自動化による人的ミス防止のほか、遠隔地からの試験実施に向けた可能性も広がってくるものと期待している。



水用流量試験設備（試験エリア） 空気用流量試験設備（流体騒音計測用無響音室）

図11 調節弁の試験設備

### 5.3 グローバル市場への対応

国際規格に準拠した試験により、グローバル市場で広く利用されるバルブ選定ツールにも実測による数値の開示が可能となり弊社のバルブの登録可能な環境が整った。またこの設備は、新規バルブ製品の開発や技術研究の検証にも活用され、より高度な価値を提供している。この設備の導入により、弊社は国内外の顧客ニーズに応える製品開発力と技術力をさらに強化し、グローバル市場での競争優位性を高めることが期待できる。

## 6. 今後の取り組み

近年、社会全体で安全性・快適性・省エネルギー・環境負荷低減への要求が一層高まっており、調節弁をはじめとする流体制御機器にも、より高度な機能と信頼性が求められる。弊社では、これまでに培った耐キャビテーション技術、低騒音化技術、流量計測制御技術、メンテナンス性向上技術などを基盤としつつ、今後の製品開発・事業展開に向けて以下のような取り組みを進めている。

### 6.1 騒音・キャビテーション・摩食への技術対応

居住空間や静粛性が求められる用途では、騒音・キャビテーション・摩食対策が不可欠である。CFD解析や実験データに基づく騒音低減設計、耐キャビテーション構造・材料の開発、摩食耐性向上のための新素材・表面処理技術の導入など、引き続き基礎研究と応用開発を推進する。また、キャビテーション診断技術や流量・騒音の可視化技術の実用化を進め、現場でのトラブル未然防止や保全性向上に貢献していく。

### 6.2 省エネルギー・エネルギーマネジメント、スマート化への貢献

空調システムの省エネルギー化は、地球温暖化対策の観

点からも重要なテーマである。流量計測制御機能付バルブは、流量制御による過流量抑制やエネルギー管理の高度化に大きく寄与しており、今後も計測精度のさらなる向上、IoT・BEMSとの連携強化などを図っていく。これにより、建物・工場などの多様な用途でエネルギー最適化を支援し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献する。

さらに今後は、センサ・アクチュエータのインテリジェント化やデジタル通信、データ収集・解析機能の強化を通じて、設備全体の自動化・最適化を支援する。IoT・BEMS連携だけでなく、機器データの蓄積・活用による劣化予知・フォルト検知、遠隔監視・制御など、スマートビルディング・スマートファクトリー時代にふさわしい製品・サービスを展開していく<sup>(9)</sup>

### 6.3 高度化する社会的要請への対応

感染症対策や省エネルギー推進、カーボンニュートラル社会の実現など、社会的な要請は年々多様化・高度化している。例えば、病院や研究施設では、室圧・気流制御による安全・安心な空間の提供が強く求められており、小口径型ベンチュリーバルブなど新たな製品開発によって、従来適用が難しかった狭小空間や中小規模施設にも高精度な空調制御ソリューションを展開している。今後も、現場のニーズに即した製品ラインナップの拡充と、現場施工・運用の負担軽減に資する設計・サービスの強化を進める。

### 6.4 グローバル展開と新市場への挑戦

海外市場では、工業市場向けバルブにおける現地規格対応製品の開発・投入を進めている。今後も、各地域の法規制・市場ニーズに応じた製品開発と、現地サポート体制の強化を図り、グローバルに事業を拡大していく。

また、既存のバルブ市場に留まらず、新たな市場への挑戦を重要な戦略として位置付けている。その一環として、事業拡大や新規事業の立ち上げを目指し、ターゲット市場の検討や関連技術・製品の動向調査を段階的に進めてきた。対象市場にて必須となる新たな技術獲得を進め、新たな市場への参入を積極的に進めていく。

今後も弊社は、「人を中心としたオートメーション」の理念のもと、社会課題の解決と持続可能な社会の実現に向けて、技術革新と製品・サービスの高度化に取り組む。

### <参考文献>

- (1) 本間康正, 神出智之, 井坂威人, Withコロナ時代にも「安全と安心」を提供する小口径型(150A)定風量ベンチュリーバルブの開発, azbil Technical Review, 2021年, Vol.62, pp.8-13, アズビル株式会社
- (2) 奥津良之, 調節弁における耐キャビテーション技術の現状, azbil Technical Review, 1998年, Vol.39, pp.52-59, アズビル株式会社
- (3) 篠崎隆司, 奥津良之, 高速流れ摩食環境における調節弁の使用事例～損傷解析と考察～, azbil Technical Review, 1999年, Vol.40, pp.40-49, アズビル株式会社
- (4) 木下良介, 角田真一, 建物空調用調節弁のキャビテーション診断技術の開発, azbil Technical Review,

2013年, Vol.54, pp.54-59, アズビル株式会社

- (5) 野間口謙雄, ファンコイルユニット用調節弁の騒音性能の予測, azbil Technical Review, 2005年, Vol.46, pp.70-75, アズビル株式会社
- (6) 川端浩史, 渡邊清彦, ファンコイル用電動ボールバルブの開発, azbil Technical Review, 1998年, Vol.39, pp.36-43, アズビル株式会社
- (7) 古谷元洋, 大谷秀雄, 流量計測・制御機能付きバルブの開発, azbil Technical Review, 2009年, Vol.50, pp.42-49, アズビル株式会社
- (8) 新谷知紀, 松村剛宏, 野間口謙雄, 大口径流量計測制御機能付きバルブの流量計測精度向上技術, azbil Technical Review, 2019年, Vol.60, pp.32-37, アズビル株式会社
- (9) 沖田孝雄, 久保田秀雄, 関根秀太, 現場保全作業を効率化するセンサ/アクチュエータの開発, azbil Technical Review, 2008年, Vol.49, pp.18-22, アズビル株式会社

### <商標>

アクティブバルブはアズビル株式会社の商標です。savic-net FXはアズビル株式会社の商標です。Inflexはアズビル株式会社の商標です。Harmonas-DEOはアズビル株式会社の商標です。

### <著者所属>

- |       |                         |
|-------|-------------------------|
| 沖田 孝雄 | アズビル株式会社<br>アクチュエータ開発本部 |
| 大谷 秀雄 | アズビル株式会社<br>アクチュエータ開発本部 |
| 渡邊 清彦 | アズビル株式会社<br>アクチュエータ開発本部 |

# 次世代調節弁6000シリーズの開発

## Development of 6000 Series Control Valve

山本 博司  
Hiroshi Yamamoto

仁田 正史  
Masashi Nitta

吉田 貴浩  
Takahiro Yoshida

### キーワード

調節弁, 6000シリーズ, LES, パラメータ設計, モジュール設計, 部品種類数削減

次世代調節弁6000シリーズを開発した。主な特徴として、定格Cv値の向上による制御範囲拡大と部品種類数削減による納期短縮が挙げられる。定格Cv値はLES非定常解析とパラメータ設計を活用した流路最適化設計により現行品比で最大143%向上させた。また、部品種類数はモジュール設計を活用することにより現行品比で51%削減した。これらの取り組みを本稿で報告する。

The next-generation control valve, the 6000 series, has been developed. Its main features include an expanded control range achieved by increasing the rated Cv value, and shorter delivery times realized by reducing the number of component types. The rated Cv value was improved by up to 143% compared to existing products through flow path optimization design utilizing LES transient analysis and parameter design. Furthermore, by applying modular design, the number of component types was reduced by 51%. This paper reports on these initiatives.

## 1. はじめに

調節弁は外部信号を受けて流路の開口面積を調節し流体を制御する操作端であり、プラントや工場の配管系で広く使用されている。アズビル株式会社は1930年代からグローブ弁を主力として開発・生産を続けている。

現行主力品のグローブ弁としてCV3000とアルファプラスの2シリーズあり、両者は図1に示すように仕様が重複しているが、設計思想の違いから部品の共通化が困難となっている。その結果、部品種類数が増加し、在庫比率の低下により製品納期の短期化を困難にしている。また、選定時に定格Cv値<sup>注1</sup>が不足していたため広い制御範囲の要求に対応できず2台の調節弁を併用する場合もあった。

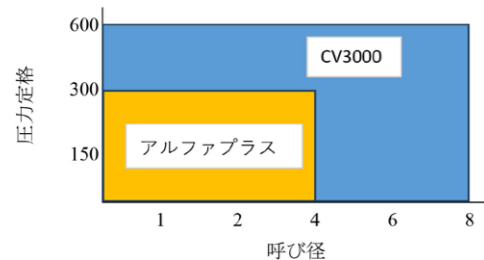


図1 現行品の仕様範囲

これらの課題を解決するため、シリーズを統一して部品種類数を削減し、在庫比率を向上させるとともに製品納期を短縮する。さらに、定格Cv値を向上し制御範囲を広げるこ

とで、1台で対応できる範囲を増やす。これらを目標として次世代調節弁6000シリーズの開発を行いリリースした。本稿ではその取り組みを報告する。



図2 6000シリーズ調節弁の外観

注1 Cv値とは容量係数のことであり、非圧縮性流体の場合は下記式で表される<sup>(1)</sup>。

$$C_v = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{\Delta p}}$$

Q:流量, N<sub>1</sub>:定数, ρ/ρ<sub>0</sub>:相対密度, Δp:調節弁前後の差圧

## 2. 製品の概要

### 2.1 仕様

表1から表3に6000シリーズの主な仕様を示す。

表1 6000シリーズ本体部代表仕様

基礎形番	AS111, AS211, AS311, AC111, AC211, AC311
弁形式	単座弁:AS111, AS211, AS311 ケージ弁:AC111, AC211, AC311
温度範囲	AS111, AC111:-17°C≤t≤230°C AS211, AC211:230°C<t≤400°C AS311, AC311:-45°C≤t<-17°C
呼び径(インチ)	1/2, 3/4, 1, 1-1/2, 2, 2-1/2, 3, 4, 6, 8
圧力定格	JIS10K, 16K, 20K, 30K ASME150, 300, 600 JPI150, 300, 600 HG/T20615 class150(PN20), 300(PN50), 600(PN110) HG/T20592 PN10, 16, 25, 40, 63, 100
接続方式	RF
本体材質	ASTM A216 WCB / JIS SCPh2 ASTM A351 CF8 / JIS SCS13A ASTM A351 CF8M / JIS SCS14A
トリム材質	【AS111, AS211, AS311】 ASTM A479 316, ASTM A479 316+CoCr-A盛 【AC111, AC211, AC311】 ASTM A351 CF8M, ASTM A351 CF8M+CoCr-A盛, ASTM A747 CB7Cu-1
レンジアビリティ	100:1(フルポート)
弁座漏れ性能	【IEC60535-4:2006, JIS B2005-4:2012, GB/T 17213.4:2015, GB/T 4213:2024】 クラスIV, V
外部漏洩性能	【ISO15848-1:2015】 Tightness class:BH (10 <sup>-4</sup> mg・s <sup>-1</sup> ・m <sup>-1</sup> ) (5~230°C) CH (10 <sup>-2</sup> mg・s <sup>-1</sup> ・m <sup>-1</sup> ) (5~350°C) Endurance class:CC3(10万回)

表2 定格Cv値

呼び径	単座弁		ケージ弁	
	リニア	イコールパーセンテージ	リニア	イコールパーセンテージ
1/2	5.1	5.1	—	—
3/4	9	9	—	—
1	20	20	—	—
1-1/2	42	42	44	37
2	67	71	71	60
2-1/2	102	102	114	100
3	142	142	146	134
4	232	245	232	203
6	—	—	516	464
8	—	—	863	735

表3 6000シリーズ操作器代表仕様

基礎形番	PA2, PA3, PA4, PA5
作動	正作動, 逆作動
供給空気圧/スプリングレンジ	140kPa / 20~100kPa 270kPa / 80~185kPa 400kPa / 120~280kPa
材質	ダイヤフラムケース:Q235B ダイヤフラム:布入りEPDM ロッド:ASTM A276 304 ヨーク:ASTM A216 WCB
空気配管接続	Rc1/4, 1/4NPT
出力	PA2:480, 960, 1,920, 2,040, 2,880 N PA3:840, 1,680, 3,360, 3,570, 5,040 N PA4:1,540, 3,080, 6,160, 6,540, 9,240 N PA5:2,100, 4,200, 8,400, 8,920, 12,600 N
トラブル	PA2:20mm PA3:20, 40mm PA4:20, 40mm PA5:20, 40, 75mm

### 2.2 特徴

制御範囲を拡大させるため定格Cv値(制御可能な最大値)を向上させるとともに、レンジアビリティ(Rb)(制御可能な最大値と最小値の比)を拡大させた。

部品種類数を削減し在庫比率を増やすことで現行品に比べて納期を短縮した。

## 3. 特徴を達成した手段と成果

### 3.1 制御範囲拡大のための流路最適化

#### 3.1.1 流路最適化の設計プロセス

制御範囲を拡大するために定格Cv値の向上とRbの拡大が必要となることを記したが、本節において定格Cv値の向上を目的として実施した流路最適化の過程について報告する。

まず、3次元CADを用いた流路設計を前提に図3に示す最適化設計プロセスを構築した。本プロセスにより、定格Cv値向上を可能とする最適流路形状の決定が可能となる。また、パラメータ設計と最適化は製造時に生じ得る寸法ばらつき等を考慮しており、これらの外乱に対して高いロバスト性を有し、かつ定格Cv値向上を可能とする最適流路形状の決定が可能となる。

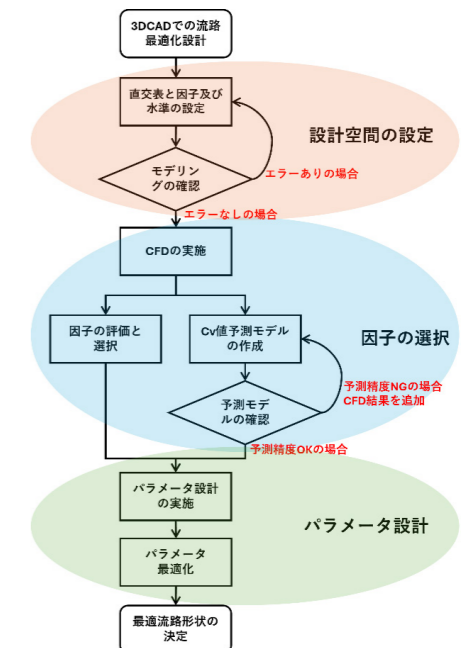


図3 最適化設計プロセス

#### 3.1.2 設計空間の設定

最適化設計プロセスの実施には、設計空間の設定が必要となる。流路形状を決定する各寸法をパラメータとして選定し、それぞれに水準を設けることで設計空間を構成する。多くのパラメータの選択と幅広い水準の設定によって、より広範な設計空間が確保できる。一方、流路形状には口径や面間寸法などの制約条件があり、これらを遵守した水準設定が求められる。加えて、流路形状は3次元の複雑な形態であるため、各寸法の拡大縮小に伴う整合性のあるモデリングが重要となる。

以上の要件を考慮し、本開発ではL36(4<sup>1</sup>×3<sup>13</sup>)直交表を適用し、14種類の寸法因子と各水準からなる設計空間を設定した。適用した制御因子、水準、直交表、及び各行で定義

される流路モデル形状を図4に示す。

水準	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	1.15	200	100	2.5	2.0	0.275	0.4	0.45	0.6	0.175	135	1.05	0	R大
2	1	200	200	2.1	1.6	0.15	0.3	0.25	0.4	0.125	112.5	1.00	22.5	R小
3	0.85	150	350	1.7	1.3	0.025	0.15	0.05	0.2	0.075	90	0.95	45	C大
4	0.7													

No.	流路モデル形状	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		1.15	200	100	2.5	2	0.275	0.4	0.45	0.6	0.175	135	1.05	0	R大
2		1.15	200	200	2.1	1.6	0.15	0.3	0.25	0.4	0.125	112.5	1	22.5	R小
3		1.15	200	350	1.7	1.3	0.025	0.15	0.05	0.2	0.075	90	0.95	45	C大
4		1	200	100	2.5	2	0.275	0.3	0.25	0.4	0.125	90	0.95	45	C大
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
36		0.7	150	180	2.1	1.3	0.275	0.3	0.45	0.4	0.075	135	1.05	22.5	C大

図4 設計空間の設定

### 3.1.3 因子の選択

図4で設定したL36直交表の因子の中からCv値への影響の大きい因子を選択する。L36直交表の各モデルについてComputational Fluid Dynamics (CFD)によるCv値の予測を行い、パラメータの寄与率を分散分析で評価した。

ここで、CFDによるCv値予測手法について説明する。一般的な弁内流れでは、弁内の最縮流部における圧力損失が主要な支配因子となる。この場合、Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)を適用した平均場的な予測でも十分な精度が得られることが知られている。一方、Cv値向上を目指す縮流部の圧力損失に加えて、流路全体(特に縮流部に至る前までの区間)における圧力損失の寄与が増大する。この状況下では、弁の流路形状の影響による流れの剥離や衝突、旋回など、複雑かつ非定常な渦構造の解析予測が重要となる。そのため高Cv値流れの予測に関しては、全ての渦を渦粘性でモデル化して解くRANSによる解析では予測精度に限界があった。

以上の課題から、本開発では乱流モデルに渦構造を直接計算できるLarge Eddy Simulation (LES)を適用した。LESは前述の複雑な流れ場を精度よく予測できる反面、RANSに比べると膨大な計算資源(モデル規模大及び反復計算回数)を必要とする乱流モデルである。そのため、本開発ではスーパーコンピュータを使用した大並列(200~1000並列)の計算に取り組み、モデル規模及び反復計算回数を確保することができた。

上述したLESによるCv値の解析値を用いて、各パラメータの寄与率を分散分析により評価した。ここからCv値への影響が大きい因子を抽出し、L18直交表を用いたパラメータ設計に展開する。特性値をCv値として整理した要因効果図を図5に、分散分析により抽出した因子の例を表4に示す。ここでは寄与率の大きい順に8つの因子を抽出した。さらに、L36直交表の各因子の値とCFD結果を多層ニューラルネット

トワークモデルに学習させ、Cv値を予測する回帰モデル(Cv値予測モデル)を作成する。この際、L36直交表に含まれないパラメータの組み合わせをサンプリングし、そのCFD解析結果に対して、Cv値予測モデルの予測精度が±10%以内であることを確認した。サンプリングは、設計空間の全組み合わせ(6,377,292通り)の中から、Cv値予測値が最大、中間、最小となる3点を選定した。予測精度が±10%を超えた場合は、該当するCFD結果を追加学習させ、精度が±10%以内に収束するまで同様の追加学習を繰り返した。以降のパラメータ設計では、このCv値予測モデルを使用する。各因子とCv値予測モデルの概念図を図6に示す。

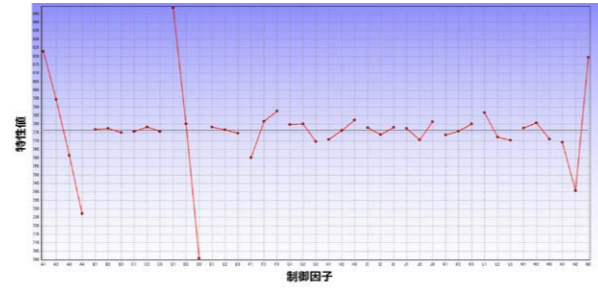


図5 要因効果図(特性値:Cv値)

表4 分散分析

制御因子	f	S	V	Fo	Prob	寄与率
A	3	46332.18	15444.06	119.0533	0.0000 **	20.29
B	2	36.75507	18.37754	0.14167	0.8707	-0.1
C	2	54.51566	27.25783	0.21012	0.8162	-0.09
D	2	130949.7	65474.87	504.7246	0.0000 **	57.72
E	2	79.34836	39.67418	0.30584	0.7473	-0.08
F	2	4950.651	2475.326	19.08148	0.0025 **	2.07
G	2	847.8165	423.9083	3.26777	0.1097	0.26
H	2	790.6386	395.3193	3.04739	0.1221	0.23
I	2	141.7488	70.87442	0.54635	0.6054	-0.05
J	2	696.9908	348.4954	2.68644	0.1468	0.19
K	2	266.1675	133.0838	1.0259	0.4138	0
L	2	1887.943	943.9713	7.27677	0.0249 *	0.72
M	2	577.0735	288.5368	2.22424	0.1894	0.14
N	2	38042.6	19021.3	146.629	0.0000 **	16.69
e	6	778.3438	129.724			2.01
Total	35	226432.5				100

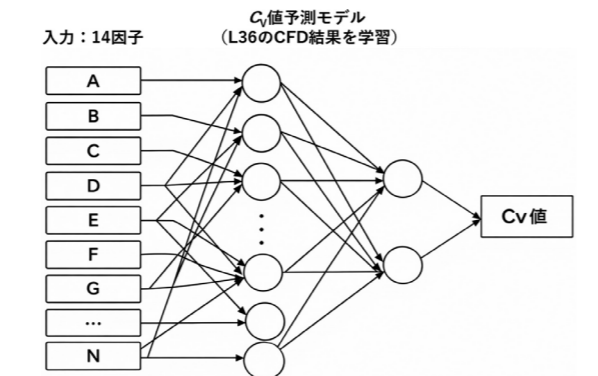


図6 Cv値予測モデル概念図

### 3.1.4 パラメータ設計

3.1.3で抽出した制御因子をL18(2<sup>3</sup>×3<sup>7</sup>)内側直交表に割り付け、理想機能をゼロ点比例式で定義したパラメータ設計を行う。Cv値の理論式<sup>(1)</sup>(1)を変形して得られる式(2)より、信号因子をQ、計測特性を√ΔP、ゼロ点比例式の傾きβをCv値の逆数に定数を乗じた値とする。

$$Q = 0.0865 C_v \sqrt{\Delta P} \quad \text{式(1)}$$

$$\sqrt{\Delta P} = \frac{1}{0.0865 C_v} \times Q \quad \text{式(2)}$$

L18直交表に用いた制御因子と水準を表5に示す。なお、直交表の計測特性の評価にはCv値予測モデルを使用する。

表5 制御因子と水準の設定(L18)

制御因子	水準	N	A	D	F	G	H	J	L
1	R大	1.15	2.5	0.275	0.4	0.45	0.175	1.05	1.05
2	C大	1	2.1	0.15	0.3	0.25	0.125	1.00	1.00
3		0.85	1.7	0.025	0.15	0.05	0.075	0.95	0.95

本開発において採用した流路構造は、鋳造プロセスによる製作を前提としている。そのため、鋳造時に発生する寸法ばらつきに対するロバスト性を考慮した最適化を検討した(品質工学会, 2007<sup>(2)</sup>)。具体的には、各制御因子について内側直交表の水準ごとに、実際の鋳造品に想定される寸法変動を誤差因子として外側直交表(N1~N18)に配置した。誤差因子の水準は基準寸法比で設定し、各水準の詳細を表6に示す。また、3水準の信号因子(M1~M3)を設定した直交表の全体図を表7に示す。表7から、組み合わせごとに信号因子と誤差因子の積である54通り(3×18)の試行が必要となることがわかる。したがって、直交表全体では合計972通り(54×18)の試行が必要となるが、CFDで計算することなくCv値予測モデルを活用することで各特性値を数秒で取得することができた。その結果、パラメータ設計を現実的な時間内で実行することができた。

表6 誤差因子と水準の設定(外側直交表)

	N	A	D	F	G	H	J	L
1	-	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.01
2	-	1	1	1	1	1	1	1
3		0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.99

※因子Nは文字情報のため誤差の水準は割り付けない。

表7 直交表全体  
信号因子3水準(M1~M3) × 誤差因子L18(N1~N18) × L18 = 972通り

No.	N	A	D	F	G	H	J	L	計測特性: √ΔP						
									M1N1	M1N2	M1N3	M1N4	...	M3N18	
1	R大	1.15	2.5	0.275	0.4	0.45	0.175	1.05	4.70	4.70	4.76	4.69	...	16.87	
2	R大	1.15	2.1	0.15	0.3	0.25	0.125	1	4.86	4.94	5.03	4.90	...	18.21	
3	R大	1.15	1.7	0.025	0.15	0.05	0.075	0.95	5.42	5.54	5.54	5.52	...	20.18	
4	R大	1.0	2.5	0.275	0.3	0.25	0.075	0.95	4.87	4.86	4.98	4.91	...	17.89	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
18	C大	0.85	1.7	0.15	0.4	0.25	0.075	1.05	5.34	5.44	5.41	5.40	...	19.70	

以上から得た要因効果図を図7に示す。なお、ゼロ点比例式の傾きβはCv値の逆数に関連するため、βが小さくなるとCv値が大きくなることに注意する。

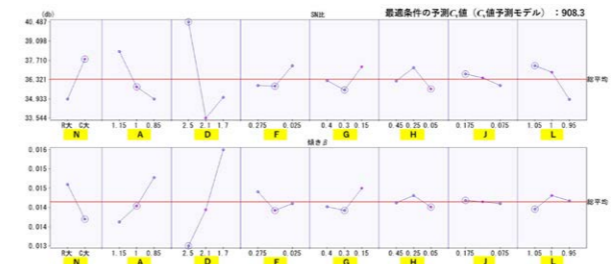


図7 パラメータ設計の要因効果図

SN比と傾きβを総合的に判断した各因子の最適水準を図7に白丸で示す。最後に、確認解析として最適流路形状を用いたCFDによるCv値と予測モデルとの比較結果を表8に示す。表8より、予測によるCv値908.3に対して、CFDでの確認解析によるCv値は907.1となり、良好に一致(0.1%差)していることがわかる。これより本稿に示す流路の最適化設計プロセスの妥当性を確認できた。

表8 CFDと予測モデルのCv値比較

	予測モデル	CFD	差 %
Cv値	908.3	907.1	0.1

### 3.1.5 定格Cv値向上の結果

本節で述べた流路の最適化設計プロセスを各呼び径で実施し、それぞれの最適流路形状を決定した。決定した流路形状は、流路下部にスタビライザー(整流機構)を設置する点が現行品の形状と大きく異なる(図8)。流路全体の形状最適化に加えて、スタビライザーの最適な配置により圧力損失の少ない効率的な流れを実現し、高Cv値を達成している。

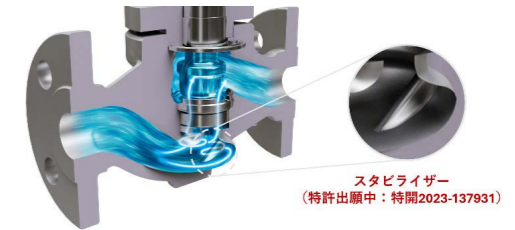


図8 スタビライザー構造

この最適流路形状をベースに製品形状を決定した結果、現行品と比較して最大で143%、全体平均においても127%という定格Cv値の向上を達成することができた。最終的に実機による流量試験で確認した本開発品の定格Cv値と現行品との比較を表9に示す。

表9 現行品との定格Cv値の比較

呼び径	単座弁		ケージ弁	
	リニア	イコールパーセンテージ	リニア	イコールパーセンテージ
1/2	128%	128%	—	—
3/4	113%	113%	—	—
1	143%	143%	—	—
1-1/2	140%	140%	129%	128%
2	142%	134%	118%	107%
2-1/2	120%	120%	141%	128%
3	123%	123%	127%	122%
4	123%	116%	114%	128%
6	—	—	139%	144%
8	—	—	109%	120%
平均	127%			

### 3.2 モジュール設計活用による部品種類数削減

現行品においては、仕様が重複しているシリーズが2つ存在することに起因し部品種類数が増加し、在庫比率の低下により納期短縮が難しくなっていた。本節では、モジュール設計の活用により部品種類数を削減し、在庫比率向上により納期を短縮した取り組みについて報告する。

一般的にモジュール設計は下記①から④の手順で進める<sup>(3)</sup>。

- ① 製品ミックス確立

- ② MDベースの設計・製造連携VE
- ③ 製品運用標準化提案制度
- ④ 設計のモジュール化

本稿では製品ミックス確立(シリーズの統一、操作器ラインナップ決め)、設計のモジュール化(上蓋部品種類数削減)について報告する。

### 3.2.1 製品ミックス確立(シリーズの統一)

6000シリーズ開発に伴い、仕様が重複する現行品を将来6000シリーズに統一していくことで仕様の重複を解消し、部品種類数を大きく削減することができる。呼び径4のアンバランスプラグを例にとって説明する。アンバランスプラグは図9に示すようにシートリングとの隙間を調節することで開口面積を変化させ流量を変化させる部品である。また、部品形状は定格Cv値、流量特性、レンジアビリティ、操作器機種で決まり、部品種類数は部品形状を決める仕様に材料数を乗じて決まる。シリーズを統一した場合の部品種類数削減結果を表10に示す。

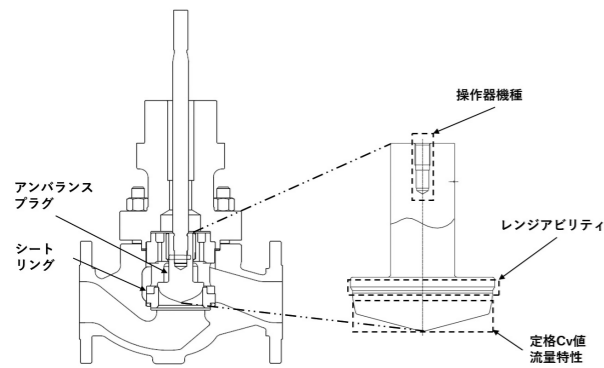


図9 アンバランスプラグの部品形状を決める仕様

表10 アンバランスプラグ部品種類数削減(呼び径4)

シリーズ	操作器機種	定格Cv値	流量特性	材料	レンジアビリティ	小計 (操作器機種×定格Cv値×流量特性×材料×レンジアビリティ)
CV3000	3	4	2	2	2	96
CV3000アルファプラス	2	3	2	2	2	48
合計	—	—	—	—	—	144

シリーズ	操作器機種	定格Cv値	流量特性	材料	レンジアビリティ	小計 (操作器機種×定格Cv値×流量特性×材料×レンジアビリティ)
6000	2	3	2	2	1	24
合計	—	—	—	—	—	24

表10より、シリーズが削減されることで部品種類数が144から24に大きく削減できることがわかる。

### 3.2.2 製品ミックス確立(操作器機種数決め)

操作器機種数は本体と異なり配管呼び径の制約がないため経済性評価に基づいて決定した。その手順を以下に示す。

現行品と6000シリーズ操作器は同じ方式である空気式操作器のため、現行品のコストを基に6000シリーズのコストを予想し機種数を決定する。現行品の機種別総コスト(1台

当たりのコスト×年間出荷台数)と操作器出力の関係を近似曲線として表し、6000シリーズの機種ごとのコストを近似曲線から四角形状として表した結果を図10に示す。図10は例として機種数を5とした場合であり、操作器出力は表11に示す標準数R3列を採用すると4.6kN、10kN、22kN、46kN、140kNとなる。最大操作器出力はR3に従えば100kNとなるが、要求最大出力は140kNのため100kNを調整し140kNとした。図10の機種ごとのコストと近似曲線との差分である斜線部分は、1機種当たりでカバーしなければならない操作器出力幅が広いために発生する余分なコストを表す。

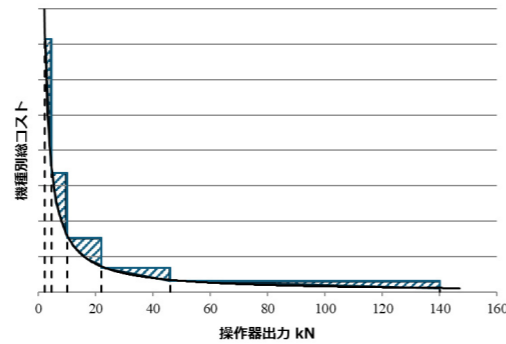


図10 操作器出力と機種別総コスト

表11 標準数

標準数				
R2	R3	R3.5	R4	R5
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3.2	2.2	1.9	1.8	1.6
10.0	4.6	3.7	3.2	2.5
31.6	10.0	7.2	5.6	4.0
100	21.5	13.9	10.0	6.3
316	46.4	26.8	17.8	10.0
	100	51.8	31.6	15.8
	215	100	56.2	25.1
		193	100	39.8
			178	63.1
				100
				158

図10より、操作器機種数が少ないと機種ごとの操作器出力幅が広くなり余分なコストが増えることがわかる。反対に、操作器機種数が増えるほど近似曲線に近づき余分なコストは減少する。最適な操作器機種数を決めるため、操作器機種数と余分なコストの関係を図11に示す。図11より、操作器機種数が8になると余分なコストの低減はほぼ飽和するので操作器機種数は8とした。ただし、本節で実施した操作器機種数は今後の拡張仕様も視野に入れて検討したが、本稿の段階である初期リリース時の操作器機種数数は4である。

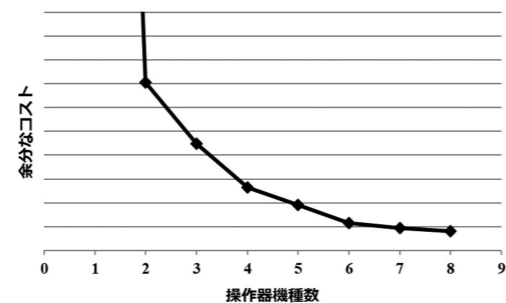


図11 操作器機種数と余分なコスト

### 3.2.3 設計のモジュール化(上蓋分割の例)

上蓋は図12に示すように弁本体とボルト・ナットで締結して使用する部品である。上蓋は図13に示すように本体の呼び径、圧力定格と操作器機種によって形状が決まるため部品種類数が多い。上蓋を一体構造から分割構造にすることにより、掛け算で増えていた部品種類数を操作器機種に依存する部分を足し算にすることで部品種類数を削減できる。理論的に上蓋を分割構造にした場合の呼び径当たりの部品種類数を比較検討した結果を表12に示す。

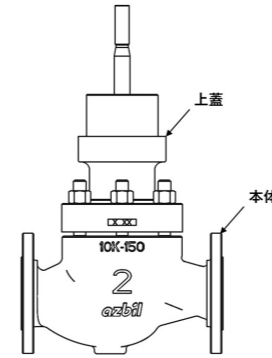


図12 上蓋部品

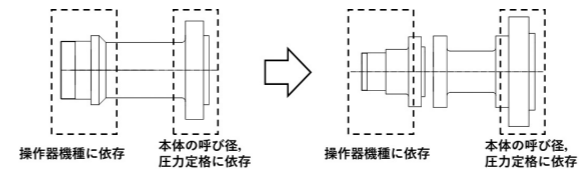


図13 上蓋のモジュール分割例

表12 上蓋分割構造による部品種類数

シリーズ	圧力定格	操作器機種	材料	温度	小計 (圧力定格×操作器機種×材料×温度)
CV3000	2	2	3	3	36
6000	2	2	3	3	24

表12より、部品種類数を36から24に削減できることがわかる。ただし、製品化にあたっては生産効率も考慮し、表13に示すように受注の多い仕様は一体構造に、受注の少ない仕様は分割構造とした。また、分割構造の呼び径6と8の上蓋は呼び径の小さい部品を流用し、部品種類数を削減した。さらに、6000シリーズは本体と上蓋の締結ガスケット種類を2種類に増やした。結果として、上蓋全体で表14に示す部品種類数となり504から276に部品種類数を削減することができた。

表13 上蓋構造

呼び径	圧力定格	温度区分	構造
4以下	150/300/600	常温/高温/低温	一体
6以上	150/300	常温	一体
		高温/低温	分割
	600	常温/高温/低温	分割

表14 上蓋部品種類数

シリーズ	上蓋	合計
CV3000	420	504
CV3000アルファプラス	84	
6000	276	

### 3.2.4 部品種類数変化

3.2.1から3.2.3の取り組みを呼び径、部品ごとに実施することで表15に示すように全体として部品種類数を51.1%削減することができる。

表15 全体の部品種類数変化

	現行品	6000シリーズ	削減率%
本体	2445	1200	50.9
操作器	371	177	52.3
合計	2816	1377	51.1

## 4. 今後の展開

今回開発した仕様は呼び径1/2~8、圧力定格class150~600、温度-45~400℃の範囲の汎用弁であり、現行品仕様を全てカバーするまでは至っていない。今後も開発を継続し順次仕様を拡大していくことで現行品の統廃合を進め、部品種類数を削減し短納期対応できる仕様を拡大していきたい。

## 5. おわりに

6000シリーズの開発過程においてLES非定常解析とパラメータ設計を組み合わせることで現行品よりも定格Cv値を大きく向上させた手法、及びモジュール設計の活用により部品種類数を減らし納期を短縮する取り組みを報告した。定格Cv値を向上し1台で対応できる範囲を増やすことは製品1台分の材料や加工・組立・輸送に必要なエネルギーを節約することができる。また、モジュール設計により部品種類数を減らすことで不要な部品を製作するために必要な材料や加工エネルギーを節約することができる。これらの取り組みは地球環境への貢献にもつながるものとする。今後もこの過程で得られた知見を活かし、社会に価値ある製品を提供し続けるとともに持続可能な産業の発展に寄与していきたいと考える。

### <参考文献>

- (1) 国際電気標準会議 (IEC) : IEC 60534-2-1:2019, 工業プロセス用調節弁-第2部: 流れの容量-第1節: 取付け状態における流れのサイジング式, 2019年
- (2) 品質工学会編: ベーシック品質工学へのとびら, 2007年, pp.133-139, 日本規格協会
- (3) 日野三十四: 実践モジュラーデザイン, 2011年, pp.54-56, 日経BPマーケティング

### <著者所属>

山本 博司 アズビル株式会社  
アドバンスオートメーションカンパニー  
IAPマーケティング部

仁田 正史 アズビル株式会社  
アクチュエータ開発本部開発1部  
吉田 貴浩 アズビル株式会社  
アクチュエータ開発本部開発1部

# 調節弁のキャビテーション抑制技術開発

## Development of Cavitation Suppression Technology for Control Valves

黒澤 祐貴  
Yuki Kurosawa

新谷 知紀  
Tomonori Shintani

尹 鍾皓  
Chongho Youn

キーワード  
調節弁, キャビテーション, Computational Fluid Dynamics (CFD, 数値流体力学), 液体圧力回復係数( $F_L$ 値)

高差圧条件下で使用される調節弁では、キャビテーションによって壊食（エロージョン）が発生する可能性がある。そのため、キャビテーションの抑制技術の開発は調節弁の信頼性向上において重要な課題となっている。今回、グローブ形調節弁の一形態であるケージ形調節弁における多孔ケージと、調節弁本体下流側に設置するディフューザの開発及び試作を行い、CFD解析と実験を実施した。その結果、キャビテーション抑制効果が確認され、全ての開度領域で $F_L$ 値の向上を達成したため、ここに報告する。

There is a risk of erosion in control valves used under high differential pressure conditions due to cavitation. Therefore, the development of cavitation suppression technology is an important issue in improving control valve reliability. CFD analysis and experiments were conducted in which globe control valves were developed using a perforated cage in a cage-type control valve and a diffuser was placed downstream of the control valve body. The results confirm that it is possible to suppress cavitation and improve the  $F_L$  value over the entire valve opening range.

### 1. はじめに

アズビルでは、高差圧条件下で使用される調節弁の信頼性向上のため、キャビテーションを抑制する内弁構造の技術開発を進めている。

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生成された気泡が、流体の流れに沿って飽和蒸気圧以上の地点に到達した際に崩壊するまでの過程のことをいう。気泡の崩壊の際には衝撃波が発生し、振動や騒音の原因となるだけでなく、構造物の近傍で起こると微細ながらも構造物を削っていく、壊食（エロージョン）という現象を引き起こす。壊食は時間と共に進展し、最終的に弁や配管の故障に繋がる。

調節弁の固有特性として、容量係数( $C_v$ 値)及び液体圧力回復係数( $F_L$ 値)がある。 $C_v$ 値は流体の流れやすさを示す値であり、流路構造のほかに、調節弁の開度とも密接に関係している。調節弁が高開度になると $C_v$ 値は増加し、低開度になると $C_v$ 値は減少する。 $F_L$ 値は閉塞流れ（キャビテーションが発生していることによって、差圧を増加させても流量が増加しなくなる流れの状態）を定義する値である。 $F_L$ 値の範囲は0から1であり、値が1に近づくほど差圧を増加させても閉塞流れが発生しにくく、キャビテーション抑制効果が高いことを示す。

キャビテーションの抑制技術として、複数の抵抗要素で減

圧する多段減圧がある。多段減圧によって急激な減圧を避けることができ、キャビテーションの抑制につながる。過去に3段絞り構造をもつケージを用いた調節弁の研究を行った際には、 $F_L$ 値は1に近い値となりキャビテーション抑制効果が非常に高いことを確認した<sup>(1)</sup>。しかしながら、3段絞り構造のような多段絞り構造は高い $F_L$ 値を得ることができるが、 $C_v$ 値が小さくなる。一方、抵抗要素が少ない1段絞り構造は3段絞り構造と比較すると $F_L$ 値は劣るが、 $C_v$ 値を大きくすることが可能となる。そのため、求められる $C_v$ 値や $F_L$ 値に応じて調節弁のキャビテーション抑制方法を選択する必要がある。

本技術開発の目的は調節弁の $F_L$ 値向上である。また、本技術開発は、製品仕様として要求される $C_v$ 値と $F_L$ 値のバランスを考慮し、1段絞り構造のケージ形調節弁を開発対象とした。キャビテーションを抑制するための新たな内弁構造として、テーパ形状を持つ多孔ケージと、スリット部を有するディフューザの形状を提案する。提案した構造について、Computational Fluid Dynamics (CFD, 数値流体力学)と実験によるキャビテーション抑制効果の検証を行った。以下、それぞれについて説明する。

### 2. 多孔ケージによる $F_L$ 値向上

多孔ケージの孔形状による $F_L$ 値向上の取り組みについて紹介する。初めに1段テーパ形状について、 $F_L$ 値の向上を検

討した。1段テーパ形状の高い $F_L$ 値を維持した状態で、更に $C_v$ 値を向上させることを想定した2段テーパ形状を検討し、実験でその効果を確認した。最後に2段テーパ形状の多孔ケージによる $F_L$ 値向上について言及する。

(1段テーパ形状, 2段テーパ形状についての特許2件を出願済み)

#### 2.1 1段テーパ形状

本項では、多孔の入口から出口まで一定のテーパ角度で多孔径が縮小する1段テーパ形状を検討する。

検討する1段テーパ形状の多孔ケージを調節弁内に配置したときの断面図を図1、多孔ケージの孔の断面図を図2に示す。図1に示す通り、調節弁の流れは左から右であり、多孔ケージの内径と接しているプラグの位置によって流量を制御する。本技術開発で用いた調節弁の呼び径は、2インチである。図2の通り、テーパ角度は $0^\circ$ （多孔内径が一定の円筒形状）、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ とし、多孔出口径を $\phi 2.5$  mmとした。多孔ケージの孔数は36である。

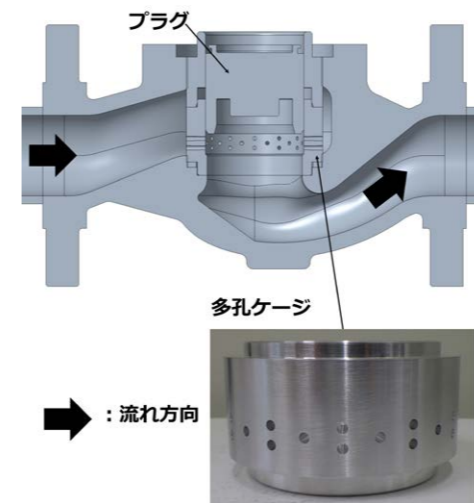


図1 調節弁断面図と多孔ケージ

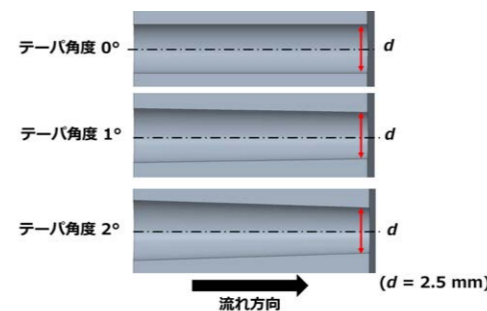


図2 1段テーパ形状の多孔断面図

圧力測定箇所は、International Electrotechnical Commission (IEC) 60534-2-3の調節弁試験圧力測定位置に従い、配管径 $D$ に対しそれぞれ上流側に $2D$ 、下流側に $6D$ の位置とし、1段テーパ形状の多孔ケージを用いて $C_v$ 値と $F_L$ 値の実験を実施した。 $C_v$ 値と $F_L$ 値の定義式を式(1)と(2)、実験結果を図3に示す。図3から、テーパ角度の増加に伴い $C_v$ 値と $F_L$ 値が向上することが確認された。

$$C_v = \frac{Q}{0.0865} \sqrt{\frac{1}{P_{in} - P_{out}}} \quad \text{式(1)}$$

$$F_L = \frac{1}{\sqrt{P_{in} - 0.96p_v}} \sqrt{P_{in} - P_{out}} \\ = \frac{1}{\sqrt{P_{in} - 0.96p_v}} \frac{Q_{max}}{0.0865C_v} \quad \text{式(2)}$$

Q:流量,  $P_{in}$ :上流圧,  $P_{out}$ :下流圧,  $p_v$ :飽和蒸気圧,  $Q_{max}$ :最大流量(閉塞状態)

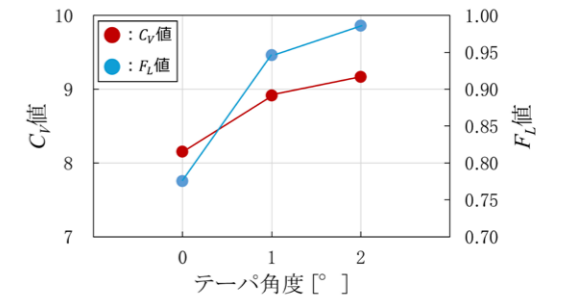


図3 1段テーパ形状の $C_v$ 値と $F_L$ 値

次にテーパ角度 $0^\circ$ 、 $2^\circ$ の1段テーパ形状の多孔ケージについて、 $F_L$ 値計測時と同じ圧力条件でCFD解析を行い、多孔付近のボイド率の分布を可視化した。ボイド率は気液二相流の中で気体が占める体積比率であり、1に近いほど気体の割合、つまり気泡が多くキャビテーションが激しく発生していることを示す。CFD解析には北海道大学のスーパーコンピュータ「Grand Chariot」を用いた。CFD解析の計算条件を表1、ケージのテーパ孔内流れのボイド率分布を図4に示す。

表1 CFD解析の計算条件

ソフトウェア	Advance/FrontFlow/Red Ver.5.4
乱流モデル	高レイノルズ数型k-εモデル
流体	水(25°C, 圧縮性)
メッシュセル数	約500万
運動量差分スキーム	2次精度風上
壁関数	Spalding則
時間刻み[s]	$5 \times 10^{-6}$

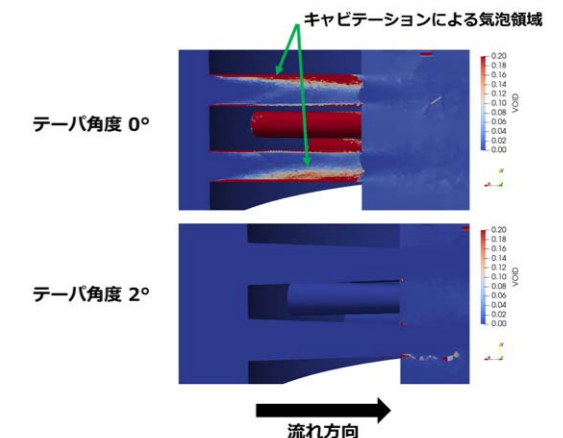


図4 1段テーパ形状におけるボイド率分布

図4は青色がボイド率0、赤色がボイド率0.2以上となり、キャビテーションの発生状況を確認できる。図4から、多孔内部において $F_L$ 値が小さいテーパ角度 $0^\circ$ ではキャビテーションが発生しているが、 $F_L$ 値が大きいテーパ角度 $2^\circ$ ではキャビテーションが確認されなかった。

以上から多孔を1段テーパ形状とし、テーパ角度を大きくすることで $C_v$ 値と $F_L$ 値の向上を確認した。CFDのボイド率分布から、多孔を1段テーパ形状とすることで多孔内部のキャビテーションを抑制できることが分かった。

## 2.2 2段テーパ形状

高い $F_L$ 値を維持しつつ定格 $C_v$ 値(全開時の $C_v$ 値)を更に増加させるため、テーパ角度が一定の1段テーパ形状に代わりテーパ角度を途中で変化させる2段テーパ形状を検討した。2段テーパ形状の詳細を図5に示す。2段テーパ形状の多孔出口径は1段テーパ形状と同一( $\phi 2.5\text{mm}$ )とし、入口から出口方向に対して付加されたテーパ角度を途中から小さい角度に変更している。この構造により、2段テーパ形状の多孔入口径は1段テーパ形状より小さくなり、ケージに配置可能な多孔数が増加した。

IEC 60534-2-3に基づき、2段テーパ形状の多孔ケージを用いて $C_v$ 値と $F_L$ 値の実験を実施した。実験で用いた2段テーパ形状の詳細を表2、 $L_1/L$ の値による2段テーパ形状の概略図を図6に示す。 $L_1/L$ の値によって、多孔入口径が異なるため、ケージに配置可能な多孔の最大数も $L_1/L$ の値によって異なる。また、実験結果を図7に示す。図7の縦軸に示す定格 $C_v$ 値比は、1段テーパ形状である $L_1/L=1.00$ の定格 $C_v$ 値を基準としたときの $L_1/L=1.00, 0.75, 0.50, 0.25$ の定格 $C_v$ 値との比率である。図7より、 $L_1/L=0.25$ では $F_L$ 値が減少したことが分かる。一方、 $L_1/L=0.75, 0.50$ は1段テーパ形状である $L_1/L=1.00$ と同等の $F_L$ 値を維持しつつ、 $C_v$ 値が向上した。

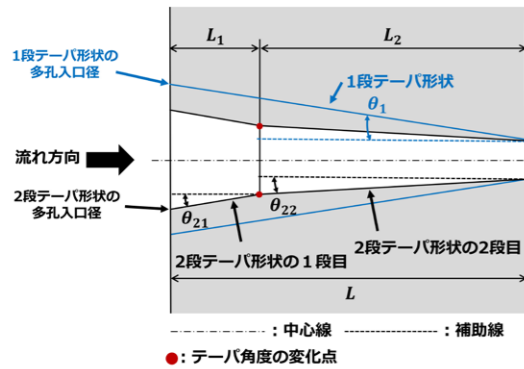


図5 2段テーパ形状の概略図

表2 実験で使った2段テーパ形状

	$L_1/L$ (入口側テーパ長さの割合)			
	1.00	0.75	0.50	0.25
1段テーパ形状 $\theta_1$ [°]	2			
2段テーパ形状の1段目 $\theta_{21}$ [°]		2		
2段テーパ形状の2段目 $\theta_{22}$ [°]			0.5	

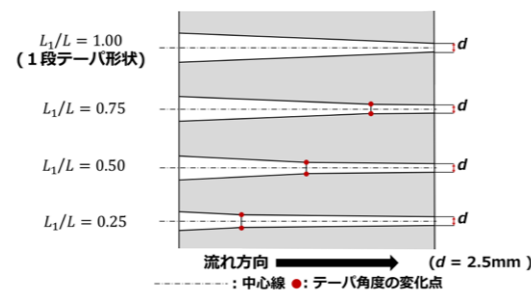


図6  $L_1/L$ の値による2段テーパ形状の概略図

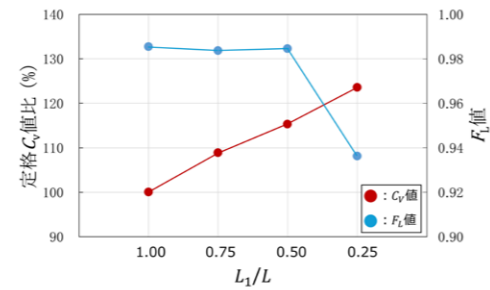


図7 2段テーパ形状の定格 $C_v$ 値比と $F_L$ 値

## 2.3 全ての開度領域における $F_L$ 値の評価

2.1項及び2.2項は $C_v$ 値が10程度と限定的な評価であったため、ケージの孔数を180に増やし、広範囲の $C_v$ 値となる全ての開度領域において $F_L$ 値の確認実験を行った。目標とする $F_L$ 値は0.9以上とした。

実験結果を図8に示す。図8より、 $C_v$ 値が30未満となる低开度から中間開度の領域では、目標値である $F_L$ 値0.9以上となった。しかしながら、 $C_v$ 値が30以上の高开度領域では、 $F_L$ 値は0.9を下回った。

テーパ形状を変更した多孔ケージを複数製作して実験を行ったが、いずれの多孔ケージにおいても $C_v$ 値30以上の高开度領域では、 $F_L$ 値は0.9以上には達しなかった。そのため、高开度領域における $F_L$ 値向上には、多孔ケージ以外の方法を検討する必要がある。

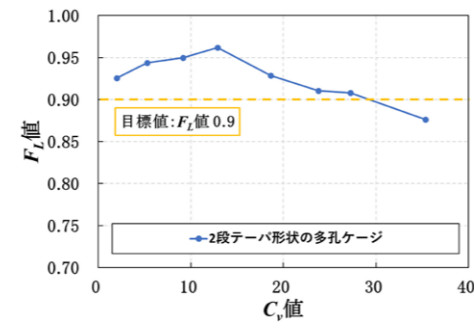


図8 2段テーパ形状の多孔ケージの実験結果

## 3. 調節弁本体下流側のディフューザ設置による $F_L$ 値向上

高开度領域の $F_L$ 値向上に向けた取り組みを紹介する。高开度領域における $F_L$ 値向上に必要な要因を検討し、調節弁本体下流側にスリットと穴出入口に $R$ を設けたディフューザを設置することとした。CFD解析の結果からディフューザ設置によ

るキャビテーション抑制効果を確認し、2段テーパ形状の多孔ケージとディフューザを調節弁に組み入れて実験を行った。(スリットと穴出入口 $R$ についての特許2件を出願済み)

### 3.1 高开度領域における $F_L$ 値向上のための要因分析

前項までの結果より、多孔ケージのみでは高开度領域で $F_L$ 値が向上しないことが分かった。

$F_L$ 値が向上しない要因を調査するため、CFD解析を行った結果、図9のように調節弁本体下流側の流れの剥離領域においてボイド率が高く、キャビテーションの発生が疑われる領域を確認した。低开度、中間開度ではこのようなボイド率の分布は見られないため、調節弁本体の流路形状の影響によるものと推定できる。そのため、調節弁本体下流側にディフューザを設置することで、高开度領域における $F_L$ 値向上を図ることとした。

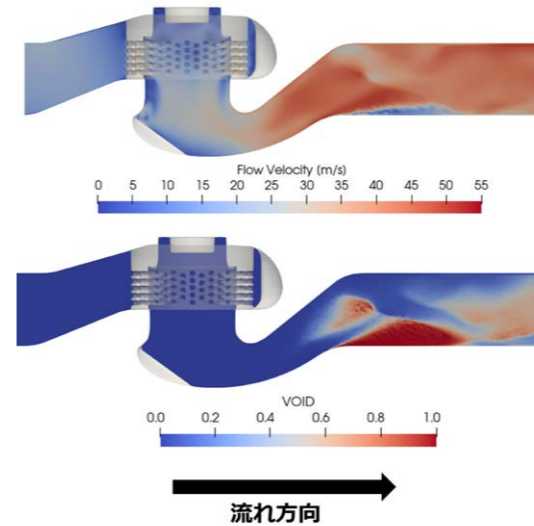


図9 全開時の調節弁本体下流におけるキャビテーション(上:流速分布,下:ボイド率分布)

高开度領域において $F_L$ 値の向上が見られない要因とその解決策の妥当性を別の観点から確認する。そのため、式(1)、(2)に示した $C_v$ 値と $F_L$ 値の式を用いて、調節弁における $F_L$ 値の推定を行った。図10のように調節弁の各要素を抵抗要素としてモデル化し、 $C_v$ 値と $F_L$ 値の式から非閉塞流れと閉塞流れにおける流量 $Q$ は式(3)、(4)のように表せる。また、調節弁全体の $C_{V\_ALL}$ と $F_{L\_ALL}$ はそれぞれ式(5)、(6)に示す。それぞれの抵抗が非閉塞流れ、または閉塞流れであるかを仮定し、式(3)と(4)を用いて中間圧を計算する。 $P_{in}$ と $P_{out}$ には、対象となる抵抗に応じて、上流圧、中間圧または下流圧を用いる。その後、各抵抗における圧力に関する条件を検討することでCFD解析や実験を実施しなくても調節弁全体の $C_{V\_ALL}$ と $F_{L\_ALL}$ を理論的に推定することが可能となる。

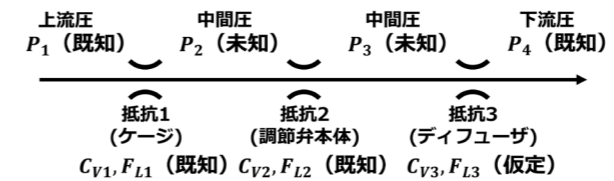


図10 ケージ、調節弁本体及びディフューザのバルブ抵抗要素のモデル化

$$Q = 0.0865 C_v \sqrt{P_{in} - P_{out}} \quad (\text{非閉塞流れ}) \quad \text{式(3)}$$

$$Q = 0.0865 F_L C_v \sqrt{P_{in} - 0.96 p_v} \quad (\text{閉塞流れ}) \quad \text{式(4)}$$

$$C_{V\_ALL} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{C_{V1}^2} + \frac{1}{C_{V2}^2} + \frac{1}{C_{V3}^2}\right)}} \quad \text{式(5)}$$

$$F_{L\_ALL} = \frac{Q}{0.0865 C_{V\_ALL} \sqrt{P_{in} - 0.96 p_v}} \quad \text{式(6)}$$

図11に調節弁本体下流側のディフューザの設置位置、図12にディフューザを設置した場合の $F_L$ 値の理論計算結果を示す。図12より、ディフューザを設置すると高开度領域において $F_L$ 値が向上すると予測できる。

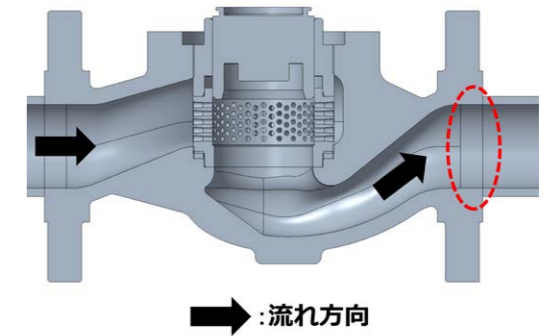


図11 ディフューザの設置位置

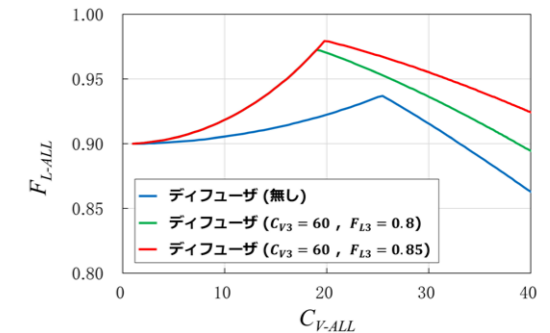


図12 調節弁本体下流位置へのディフューザ設置による $F_L$ 値の理論計算結果

### 3.2 CFDを用いたディフューザによる $F_L$ 値向上の検証

調節弁本体下流側に設置するディフューザの効果を検証するため、#1(多孔板)、#2(コーン形)、#3(コーン形+穴出入口 $R$ +スリット)の3つの形状についてCFD解析で検証した。CFD解析条件を表3に、解析モデルとCFD解析結果を図13、図14に示す。

表3 CFD解析の計算条件

ソフトウェア	Advance/FrontFlow/Red Ver.5.4
乱流モデル	DLES (Detached Large Eddy Simulation)
流体	水(25℃, 圧縮性)
メッシュセル数	約750万
運動量差分スキーム	2次精度風上
壁関数	Spalding則
時間刻み[s]	$5 \times 10^{-6}$



図13 CFD解析対象のディフューザ形状

ディフューザ	静圧分布	流速分布	ボイド率分布
無し			
#1 多孔板			
#2 コーン形			
#3 コーン形 + 穴出入口R1 + スリット			

図14 ディフューザのCFD解析結果 (流れ方向:左から右)

CFD解析結果から、特に#3 (コーン形+穴出入口R1+スリット)が高いボイド率の領域を抑えられ、 $F_L$ 値向上に大きな効果を示すことが分かった。理由としては以下の3点を挙げることができる。

①流れ同士の衝突による圧力回復

図15から、コーン形ではコーン内部で流れ同士が衝突して圧力が回復するためキャビテーションが抑制されることを確認した。流れが外側から中心に向かうケーシングでもキャビテーション抑制効果があることが知られている<sup>(2)</sup>。

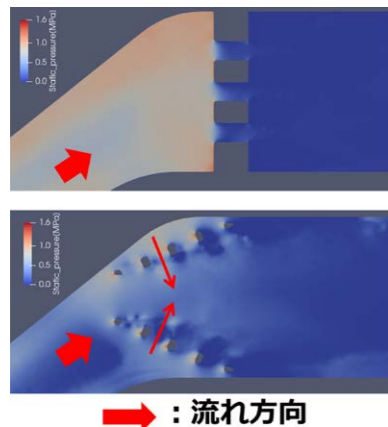


図15 ディフューザ付近の静圧分布 (上:#1(多孔板), 下:#2(コーン形))

②スリットによる流れの剥離防止

流れの剥離領域では圧力の低下や変動によりキャビテーションが発生しやすいことが知られているが、図16に示すように、#3ではスリットを通過した流れによりコーン外周部後流の流れの剥離が抑制され、ボイド率が高いキャビテーションの発生領域(図16の赤い領域)が減少している。

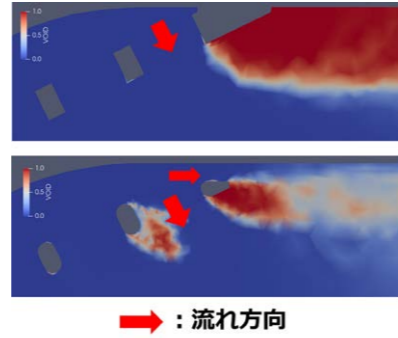


図16 ディフューザ付近のボイド率分布 (上:#2(コーン形), 下:#3(コーン形+穴出入口R1+スリット))

③コーン穴出入口のR形状による流れの剥離防止

図17から、コーン穴出入口にRを設けた形状では、流れが穴壁面に沿って流れやすくなるためコーン後流での流れの剥離が減少し、キャビテーションが抑制されることを確認した。

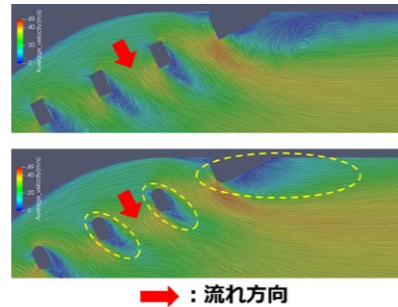


図17 ディフューザ付近の流線分布 (上:穴出入口Rなし, 下:穴出入口Rあり)

3.3 実験によるディフューザの高 $F_L$ 化検証

CFD解析よりキャビテーション抑制効果が最も高いと考えられる#3 (コーン形+穴出入口R1+スリット)を試作し、2段テーパ形状の多孔ケーシングと組み合わせた調節弁での実験を行った。図18に2段テーパ形状の多孔ケーシングとディフューザを組み合わせた調節弁を、図19にその実験結果を示す。図19に示す通り、ディフューザの導入によって高開度領域でのキャビテーションが抑制され、目標である全ての開度領域において $F_L$ 値0.9以上を達成した。

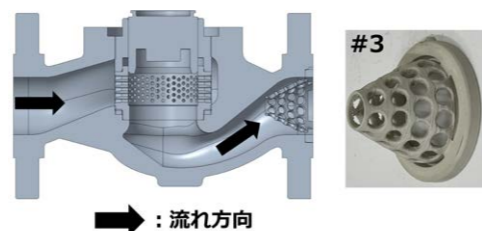


図18 2段テーパ形状の多孔ケーシングとディフューザを組み合わせた調節弁と製作したディフューザ

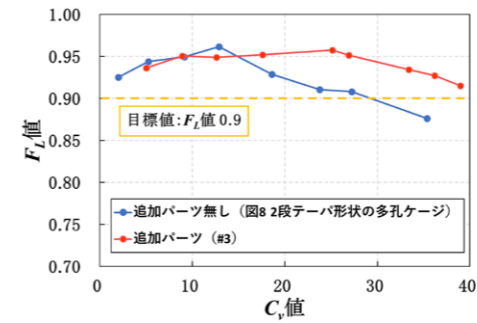


図19 2段テーパ形状の多孔ケーシングとディフューザを組み合わせた調節弁の実験値

4. おわりに

本技術開発では、CFD解析と実験により調節弁のキャビテーション抑制技術開発を行った。以下にその結果を示す。

(1) 2段テーパ形状の多孔ケーシングを開発し、特に低開度から中間開度の領域において $F_L$ 値向上を実現した。

(2) キャビテーションを抑制する構造のディフューザを調節弁本体下流側に設置することで、特に全開付近での $F_L$ 値向上を実現した。

これらの技術開発により、全ての開度領域で $F_L$ 値の向上を実現できる見込みが立った。

今後、この技術をシビアサービス向けの調節弁へ適用することでプラントの長期的な安定操作を実現し、基盤産業の発展への貢献が期待できる。

<参考文献>

- (1) Y. Kurosawa, C. Youn: Computational Fluid Dynamics of a Control Valve with Three-stage Perforated Cages under Varying Perforation Size Distributions, *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, 2025, Vol.12, pp.343-351
- (2) 加藤洋治 他 編著:新版キャビテーション 基礎と最近の進歩, 2016年, pp.259, 森北出版株式会社

<商標>

Advance/FrontFlow/redはアドバンスソフト株式会社の商標です。

<著者所属>

- 黒澤 祐貴 アズビル株式会社  
アクチュエータ開発本部開発1部1グループ
- 新谷 知紀 アズビル株式会社  
アクチュエータ開発本部開発1部1グループ
- 尹 鍾皓 アズビル株式会社  
アクチュエータ開発本部開発1部1グループ

# ON-OFF弁スマート化による不調検知と運用変革

～高付加価値バッチプロセス時代の製造業を支える技術～

## Advanced ON-OFF Valve Technology for Fault Detection and Operational Transformation

— Enabling Technologies for High-Value Batch Process Manufacturing —

山崎 史明

Fumiaki Yamasaki

村田 耕一郎

Kouchiro Murata

### キーワード

ON-OFF弁, スマート化, バッチプロセス, 不調検知, 異常検知, IoT, AI, 予兆保全

産業プロセス業界は高付加価値製品へのシフトに伴い、バッチプロセスの重要性が増している。本稿では、バッチプロセスにおけるON-OFF弁の不調検知と運用変革を目的としたスマート化技術を提案する。既設弁に後付け可能なセンサ「Smart Valve Motion Detector」を用いて、開閉動作データを高精度に取得し、クラウドで解析する仕組みを紹介する。この技術により、不調の早期検知、計画保全の最適化、運転員の負荷軽減を実現する。さらに、AIによる予兆保全、他業界への展開、システム連携による製造DX推進の可能性についても論じる。

The industrial processing industry is increasingly shifting toward high-value products, increasing the importance of batch processes. This paper proposes a smart solution for ON-OFF valve fault detection and operational transformation. We introduce the Smart Valve Motion Detector, a retrofit sensor that enables precise monitoring of valve motion. Combined with cloud-based analytics, this approach facilitates early fault detection, optimized maintenance planning, and reduced operator workload. Furthermore, we explore predictive maintenance powered by AI, cross-industry applicability, and opportunities for manufacturing digital transformation through system integration.

### 1. はじめに

近年、産業プロセス業界はグローバル競争の激化や市場ニーズの多様化を背景に、従来の汎用化学品から高付加価値のファインケミカルやスペシャリティケミカルへのシフトを加速させている。これらの分野では、従来の大量生産を目的とした連続プロセスではなく、少量多品種生産、厳格な品質管理、迅速な製品切り替えが求められており、バッチプロセスが主流となっている。

バッチプロセスは、工程ごとに原料投入、反応、生成物回収を区切って行う方式であり、流体切り替えや反応条件変更が頻繁に発生する。このため、流体の流れを確実に停止・開始するためにON-OFF弁が用いられる。ON-OFF弁は、配管内の流体を完全に遮断する、または全開で流すという単純かつ確実な制御を担い、原料の投入タイミングや反応停止、生成物の切り替えなど、工程の安全性と精度を確保する重要な役割を果たす。そのため、ON-OFF弁の開閉タイミングや動作の確実性は製品品質や安全性に直結する。

特にバッチプロセスでは、頻繁な開閉や厳しい流体条件に対応するため、高速、高トルクを発揮する空気式ON-OFF弁が、信頼性の面で重要な位置を占めている。一方で、現場ではON-OFF弁の開閉頻度や流体条件が多岐にわたるため、どの弁がいつ不調をきたすかを事前に把握することは容易ではない。また、不調が発生した場合、その原因を特定し、適切に対応するには熟練者のノウハウが求められる。しかし、近年は人材不足が進行しており、こうした対応を担う人員の確保が難しくなっている。その結果、安定した操業を維持することが現場の大きな課題となっている。

本稿では、ON-OFF弁の開閉動作における通常とは異なる挙動を「不調」と定義し、スマート化技術による早期検知と運用変革の可能性について論じる。アズビルではON-OFF弁のスマート化ソリューションとして、既設のON-OFF弁に後付け可能なセンサ「Smart Valve Motion Detector」を開発した。以下では特に、この「Smart Valve Motion Detector」を活用したデータ収集・分析の仕組みを紹介し、損失削減・保全最適化・安全性向上といった価値を提供す

る技術的アプローチを提案する。また、将来的なAI技術の活用や、他システムとのデータ連携による新たな価値創出の展望についても述べる。

本稿の構成は以下の通りである。第2章ではバッチプロセスとON-OFF弁の重要性を述べ、第3章で不調の定義と現場課題を整理する。第4章ではスマート化の目標と提供価値を示し、第5章でSmart Valve Motion Detectorの活用方法、第6章では実証事例と成果を紹介する。第7章ではデータ活用とAIによる運用最適化の展望を示し、第8章では他業界への展開と今後の課題を論じる。

### 2. バッチプロセスとON-OFF弁の重要性

バッチプロセスは、原料投入から反応、生成物回収までを工程単位で区切って行う生産方式であり、化学産業をはじめとする多くの産業プロセスで広く用いられている。このようなバッチプロセスは一般的な製造方式である一方、特にファインケミカルやスペシャリティケミカルなどの高付加価値製品分野においては、製品品質や安全性への要求水準が高く、プロセス機器のわずかな動作不良が歩留まり低下や品質不良、さらには重大な安全リスクにつながる可能性が大きい。

このように、バッチプロセスにおいてON-OFF弁は、工程の成立性、製品品質、および安全性を支える重要な役割を担っている。

産業プロセス業界のバッチプロセスで使用される自動弁は、「調節弁」と「ON-OFF弁」に大別される。調節弁は流量や圧力を連続的に制御するのに対し、ON-OFF弁は流体の通路を完全に開く（全開）または閉じる（閉止）という二位置制御を担う。ON-OFF弁の基本機能は、流体を確実に遮断し、全開時に必要な流量を安定供給することである。

ON-OFF弁には駆動方式の違いから「空気式」と「電気式」がある(図1)。本稿では、特に空気式ON-OFF弁に焦点を当てる。空気式は圧縮空気を動力源とし、開閉動作において高速性や高トルクが求められる場面で広く利用されている。バッチプロセスでは、頻繁な開閉や厳しい流体条件に対応するため、空気式の信頼性と応答性が重要な役割を果たしている。

構造面では、「回転弁」と「直動弁」に分類される。回転弁(ボール弁、バタフライ弁)は弁体が回転して開閉し、構造がシンプルで開閉が速く、メンテナンス性に優れる。一方、直動弁(グローブ弁、ダイヤフラム弁)は弁体が直線的に動作し、シール性が高い傾向があるが、遮断性能は弁の種類や設計によって異なる。

このように、バッチプロセス現場では用途や設置環境、制御要件に応じて多様なON-OFF弁が選定されているが、本稿では、バッチプロセスにおける空気式ON-OFF弁のスマート化を中心に論じる。



図1 ON-OFF弁の操作器駆動方式と弁構造

### 3. 不調の定義と現場課題

ON-OFF弁は構造こそシンプルであるが、バッチプロセスにおける流体切り替えや工程成立性を担う機器であり、その動作がプロセス全体に与える影響は極めて大きい。一方で、バッチプロセスの運用現場では、生産品目の切り替えや運転条件の変更に伴い、ON-OFF弁の動作環境が工程ごとに大きく変動するという特有の課題が存在する。

例えば、一日の開閉回数、流体の圧力・温度条件、さらには流体特性の違いによって、ON-OFF弁にかかる機械的・熱的負荷は一定ではない。その結果、不調の発生時期や進行度合いにばらつきが生じ、事前の予測や計画的な対応が困難となっている。

また、従来の保全や異常対応は、定期点検や日常運転中の目視確認、異音や振動の感知など、運転員の五感や経験に依存した方法が中心である。このため、対応が属人化しやすく、近年の人材不足と相まって、安定操業を維持することがますます難しくなっている。

このような運転環境のもとで、明確な故障として顕在化する前の段階で生じる動作変化を的確に捉えることが重要である。

本稿では、「不調」をON-OFF弁の異常兆候として定義する。不調は、完全な故障に至る前段階のわずかな変化を含み、通常とは異なる挙動が観測される状態を指す。具体的には、開閉速度の低下、開閉動作の形状(応答波形)の変化、異音や振動の発生、開度のバラツキなどが挙げられる。

バッチプロセスの運転員は、日常業務に加え、品種切替や工程変更など多様な作業を並行して行う必要がある。そのため、ON-OFF弁に異常が発生すると、突発対応が必要となり、全体の業務負荷が増大して通常業務が圧迫されることになる。特に非常作業では経験や判断力が求められるため、運転員にとって大きなストレスやリスクとなる。また、PV(Process Value)値に異常が生じた場合、原因特定に時間を要し、状況によっては災害や事故につながる危険性もある(図2)。

前述の通り、従来の保全手法は定期点検や目視確認が中心であり、運転員の五感や経験に依存した属人的な対応が多い状況である。そのため、リアルタイムでの不調検知は困難であり、データが十分に蓄積されないため、過去の傾向を把握して先手を打つことも難しい状況である。熟練者の経験や勘に頼る場面が多く、担当者によって対応にバラツキが生じやすいという課題も存在する。人材不足が進む現場では、こうした属人化が運転員の負担増や対応力の低下につながっている。

このように、バッチプロセス特有の運転環境ではON-OFF弁の不調を的確に捉えることは非常に難しい。現場の安全と安定操業を維持するためには、より効率的かつ確実な不調検知の仕組みが求められている。



図2 バッチプロセスにおける異常発生時の対応例

#### 4. スマート化の目標と提供価値

ON-OFF弁のスマート化は、運転員が安心して業務に集中できる環境を実現するための取り組みである。特に「運転中の異常ゼロ」「運転員の非正常業務ゼロ」「生産ロスゼロ」の3つのゼロを目標とし、現場の業務効率化と安定操作を目指す(図3)。



図3 現状と運用変革後のイメージ

現実的には、ON-OFF弁の異常を完全にゼロにすることは難しい。しかし、不調を早期に検知できれば、バッチ運転の合間(停止期間)を活用して計画的な保守や対処が可能となる。これにより、次のバッチ運転において、ON-OFF弁が原因となるトラブルが未然に防止され、安定した運転が維持される。突発対応の減少は非正常業務を最小化し、運転員の負担やストレスを大幅に軽減できる。

スマート化によって、弁の状態が「見える化」され、不調を早期に把握・通知できるようになる。これにより、運転員は突発的なトラブルに追われることなく、計画的かつ安全に業務を遂行できる。属人化を排除し、計画的かつ安全な業務遂行が可能となり、現場全体の安定操作と安全管理が実現する。

さらに、スマート化は運転員だけでなく経営層にも価値をもたらす。製品ロスや設備損傷による損失削減、予防保全によるコスト最適化、安全性と安定稼働の確保など、現場運用の変革と経営的メリットの創出を支える重要な手段となる。

#### 5. 技術的アプローチ:

##### Smart Valve Motion Detectorの活用

前章で述べた不調検知と運用変革の目標を実現するための中核技術が、Smart Valve Motion Detectorである。

Smart Valve Motion Detectorは、ON-OFF弁の開閉動作を高精度で検出する後付け型センサであり、開度状態のデータを取得する。既存のON-OFF弁に後付け可能な設計を採用しており、既存設備への導入障壁が低く、現場の多様なニーズに柔軟に対応できる。

本稿で対象とする空気式ON-OFF弁は、頻繁な開閉や高トルクが求められるため、動作状態の変化を正確に把握す

ることが重要である。Smart Valve Motion Detectorは、こうした弁の動作を監視し、不調を早期に検知するための有効な手段となる。

導入時は、数回のボタン操作で初期調整が完了し、専門知識を必要としない。さらに、ユーザーは専用のアカウントを作成し、デバイスを紐づけることで、ON-OFF弁の稼働データをクラウド上で即座に閲覧・運用できる。アカウント作成はWebブラウザ上で簡単に行うことができ、ユーザーごとに管理画面が提供されるため、複数の弁を一元的に管理することが可能である。

Smart Valve Motion Detectorは電池式を採用し、電源ケーブル敷設を不要とした。加えて、無線通信(セルラー通信)により信号ケーブルも不要となり、従来の産業用IoT導入で一般的だったゲートウェイ機器設置も不要とし、電源工事や電波干渉調査、管理機器増加といった従来のIoT導入課題を解消した。特に、電池式のゲートウェイ機器を採用する場合、運転員から目の届きにくい場所に設置されていることが多く、設置場所の管理や電池切れ時の所在確認が難しいため、保守負担が大きかった。しかし、Smart Valve Motion Detectorは、設置場所の管理が容易であり、クラウド上で電池残量や稼働状況を遠隔監視できるため、これらの問題を解決している(図4)。

取得したデータはゲートウェイ機器を介さず直接クラウドに送信され、時系列データとして蓄積される。このデータを活用することで、不調検知アルゴリズムや通知機能の実装、クラウド上でのAI・機械学習による予兆保全モデル構築、複数拠点・複数ラインの統合管理が可能となる。

さらに、Smart Valve Motion Detectorには、将来的な機能拡張に対応するため、FOTA(Firmware Over-The-Air:遠隔からファームウェアを自動更新する仕組み)機能を標準搭載している。これにより、クラウド経由でファームウェアの更新が可能となり、現場での作業を不要としつつ、新しいアルゴリズムや機能を継続的に提供できる。顧客は、導入後も常に最新の機能を利用でき、運用価値の維持・向上が期待できる。



図4 運用開始までのステップ

Smart Valve Motion Detectorを活用したシステム構成は以下の通りである(図5)。

- センサユニット: Smart Valve Motion Detector (既設ON-OFF弁へのアドオン設計, 電池式・無線通信対応)
- クラウドプラットフォーム: セルラー通信~サイバー空間(セルラー通信による直接接続, ゲートウェイ不要)
- ダッシュボード: WEBブラウザ(稼働データの可視化, アラート通知, 運用管理)

- API連携(他システムとのデータ連携)

このように、Smart Valve Motion Detectorは、現場の導入・運用負担を最小限に抑えつつ、空気式ON-OFF弁のスマート化を迅速かつ確実に実現する実用的なソリューションである。

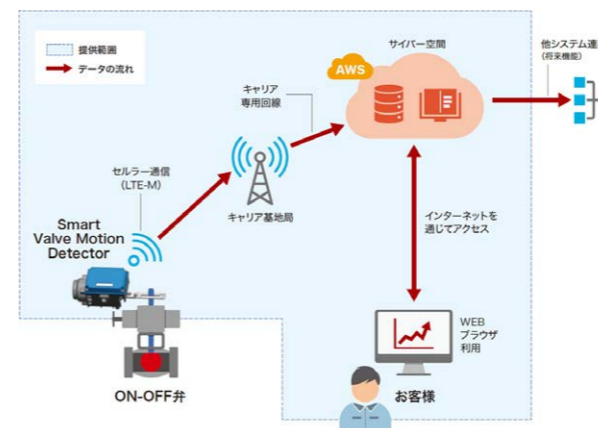


図5 Smart Valve Motion Detectorシステム構成図

#### 6. 実証事例と成果

本章では、バッチプロセス現場におけるSmart Valve Motion Detector導入事例を紹介する。

ある化学プラントでは、空気式ON-OFF弁の内弁腐食により閉止状態が維持できず、プロセス流体が下流側に漏れ出す問題が発生していた。腐食の進行は通常、年1回の定期修理で確認されていたが、運転中に兆候を把握することは困難であった。その結果、弁が中間開度で固着し、動作しなくなる現象が発生した。異常が疑われる場合、運転員は本来自動で動作する弁を手動で開操作・閉操作し、固着解除を試みることで流体漏れの影響を最小化していた。しかし、この対応は非正常作業を増やし、負担とリスクを高めていた。

Smart Valve Motion Detector導入後、弁の開閉動作データを収集・蓄積できるようになり、目視では確認できない作動不良が初期段階で検知可能となった。弁が中間開度で固着する現象も早期に把握でき、従来予想より約6か月早く不調が発生していたことが判明した。図6は、正常な状態におけるON-OFF弁の動作波形を示している。一方、図7は、不調が発生している状態におけるON-OFF弁の動作波形を示している。TemplateはON-OFF弁の正常状態から作成した基準波形、Targetは実運転下で記録した波形である。両波形の差分を用いて、動作特性の変化や劣化兆候を判定する。

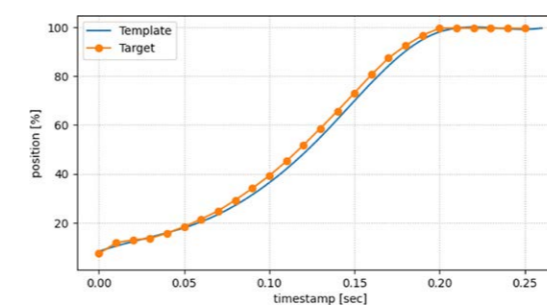


図6 正常なON-OFF弁動作

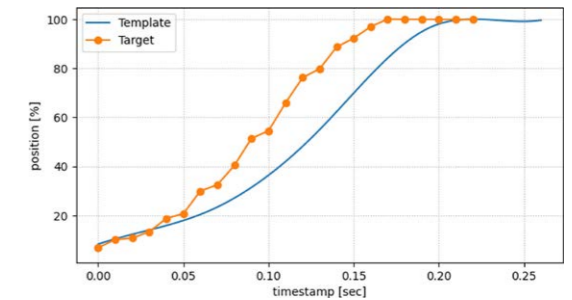


図7 不調な状態のON-OFF弁動作

さらに、新品弁への交換後もデータ収集を継続した結果、前回よりも2か月早く同様の兆候が現れた。これは、ON-OFF弁の不調が一定の時間軸で発生するものではなく、プロセス条件によって大きく変動することを示している。Smart Valve Motion Detectorの導入により、運転員はデータという客観的証拠をもとに、保全タイミングの見直しや弁仕様変更を実施し、その効果を定量的に確認できるようになった。結果として、非正常作業の削減、設備損傷リスクの低減、安定操作の実現につながった。

この事例は、空気式ON-OFF弁スマート化の有効性と現場への導入メリットを明確に示すものであり、今後の普及と現場改善への貢献が期待される。

#### 7. データ利活用とAIによる運用最適化の展望

本章では、ON-OFF弁スマート化によるデータ利活用とAI・機械学習の運用最適化について、現時点での構想と今後の展望を示す。以下は、今後の技術進展やシステム連携を見据えた方向性である。

##### 7.1 自システム内でのAI・機械学習活用

AI・機械学習の活用により、開閉動作データをもとに運用最適化を目指す。具体的には、以下のような機能拡張を構想している。

- 不調検知の自動化

AIによる開閉動作データの学習を通じて、通常とは異なる挙動や悪化傾向の早期検知を目指す。これにより、突発的なトラブルの未然防止や計画的な保全の実現が期待できる。

- 予兆保全・保全タイミングの最適化

時系列データを活用し、設備の劣化傾向や残寿命の予測、最適な保全タイミングの自動提案を目指す。運転員の負担軽減や安定操作への貢献を意図している。

- 運転条件の最適化支援

現場ごとの運転条件や設備特性の分析を通じて、最適な運転条件の提案や異常発生時の対応策のサポートを目指す。

これらの機能は、Smart Valve Motion Detectorのクラウドシステム内で完結し、導入現場ごとに活用できる仕組みとして構想している。

## 7.2 他システム連携によるAI活用の拡張

Smart Valve Motion Detectorで取得したデータをMES（製造実行システム）やERP（基幹業務システム）などの他システムと連携することで、設備状態データに加えて生産実績・品質情報・計画情報などの文脈データが統合され、分析可能な情報の範囲が拡張する。これにより、AI・機械学習の活用領域もさらに広がる。

- 全社的な最適化・品質保証体制の強化

複数拠点・複数ラインのデータを統合し、全社的な設備管理や品質保証体制の強化に活用することを目指す。

- 生産計画や運用の高度化

生産計画や品質管理データと連携することで、設備の稼働状況に応じた生産スケジュールの最適化や、品質異常の早期発見を目指す。

- システム診断・複合的なトラブル予兆把握

ON-OFF弁だけでなく、他の制御機器（ポンプ、流量計、圧力計など）とのデータ連携を進めることで、システム全体の挙動から異常を検知し、複合的なトラブルの予兆把握を目指す。

このように、まずは自システム内でAI・機械学習を活用し、さらに他システムとの連携によってデータの価値と活用範囲を段階的に拡張していくことが、現場の運用最適化と製造DX推進の重要な方向性であると考えられる(図8)。

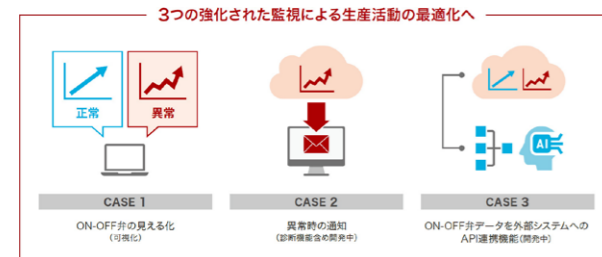


図8 AIとIoTデータ連携による運用最適化の展望

## 8. 他業界への展開と今後の課題

本稿で提案してきたON-OFF弁のスマート化技術は、化学プラントでの適用を主眼として、Smart Valve Motion Detectorを中核とする形で検討・開発を進めてきた。一方で、本技術の考え方やアプローチは、化学プラントに限らず、食品、医薬品、水処理、エネルギーなどの他業界にも適用できる可能性を有している。本技術は、衛生管理、品質保証、環境規制対応など、弁の状態監視が重要なさまざまな現場において、新たな価値を提供しうるものである。

たとえば、水処理やエネルギー業界では、広範な設備に多数のON-OFF弁が設置されている。従来の人手による点検・保全では、作業負担が大きく、十分な対応が困難である。こうした課題に対し、スマート化技術の導入は、遠隔監視や自動保全、省人化を可能にすることで、労働人口減少や運転コスト削減への有効な対応策となる。

他業界展開にあたっては、業界・現場ごとのニーズに応じた機能調整や設計最適化、既存の制御システムやMES、ERPなどとの円滑なデータ連携が特に重要な課題である。

加えて、セキュリティ対応やAIモデルの精度向上、現場条件に応じた継続的な学習・モデル更新は、全業界共通の技術的課題である。

将来的には、AI・IoT・クラウド技術を融合した「スマートファクトリー」や「自律型プラント」の実現に向け、ON-OFF弁スマート化技術が基盤技術の一端として重要な役割を果たすと考える。

## 9. おわりに

本稿では、バッチプロセスを中心とした産業プロセス業界におけるON-OFF弁の重要性や現場課題を整理し、スマート化技術による不調検知と運用変革の可能性について論じた。Smart Valve Motion Detectorを活用したデータ収集・分析の仕組みは、導入・運用負担を抑えつつ、状態監視や早期不調検知の実現に寄与することを示した。

また実証事例を通じて、従来は属人的・経験依存であった運用・保全業務が、客観的データに基づく効率的かつ安定したものへと移行しつつあることを確認した。本技術は、現場の負担軽減、コスト削減、全社的な品質保証体制の強化など、多面的な効果をもたらす実用的な技術基盤である。

さらに、同様の課題を抱える他業界への適用可能性も有しており、AI・IoT・クラウド技術との連携深化を通じて、より高度な価値創出が期待される。食品・医薬品・水処理・エネルギーなど多様な分野での応用も視野に入れ、より幅広い現場での活用を目指していきたい。

### <参考文献>

- (1) 柿元雄太郎 他, 日本の化学産業の今後の展望 世界をリードするスペシャリティケミカルメーカーへと進化するために, Energy Resources & Materials Article, 2023年4月13日, McKinsey & Company
- (2) 鳥稜 他, 化学・素材産業の過去・現在・未来の俯瞰と今後に向けた課題・打ち手, 知的資産創造, 2025年5月7日, pp.4-19, 野村総合研究所

### <商標>

Smart Valve Motion Detectorはアズビル株式会社の商標です。(商標出願中, 2026年3月25日時点審査中)

### <著者所属>

- 山崎 史明 アズビル株式会社  
アドバンスオートメーションカンパニー  
IAPマーケティング部
- 村田 耕一郎 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  
開発本部DXCV開発部

# 高速作動バルブの状態監視に向けた セルラー通信技術の応用と低消費電力化への取り組み

## Cellular Connectivity for Remote Status Detection of High-Speed Valves and Development of Battery Life-Extension Technologies

築瀬 壮一郎  
Soichiro Yanase

田辺 樹  
Itsuki Tanabe

キーワード  
無線通信, IoT, スマート化, 不調検知, 異常検知, バルブ, 省施工

高速で作動する既設バルブの状態監視ニーズが高まる一方、多くの現場は連続稼働しているため追加の配線工事を伴うような機器追加は困難である。配線工事を無くし省施工を実現する方法の一つとして無線通信と電池駆動による機器のフルワイヤレス化が挙げられる。しかし、ワイヤレス化と高速作動バルブのデータ計測は消費電力の増加につながり、産業プロセス業界で求められる定期修理周期(1~4年)を超える電池寿命の確保が困難となる。本論文では、上記課題を解決し、高速作動バルブの状態監視を実現するための技術開発について報告する。

Demand for condition monitoring of fast-acting valves in existing installations is growing, yet continuous plant operation makes retrofitting with wired systems impractical. Fully wireless solutions using radio communication and battery power simplify installation, but the combination of wireless communication and high-frequency data acquisition significantly increases energy consumption, making it extremely difficult to extend battery life beyond the process industry's 1-4 year maintenance intervals. This paper introduces advanced technologies to overcome these constraints and enable reliable long-term monitoring of fast-acting valves.

### 1. はじめに

アズビルでは従来、比較的低速で作動するバルブを対象とした状態監視技術を提供してきた。しかし近年、高速で作動するバルブに対する監視ニーズが顧客の間で高まっている。その一方で、稼働中の高速作動バルブのほとんどはリアルタイムでの状態監視ができていない。この背景を踏まえ、既存技術を発展させ、高速作動バルブの状態を正確に監視できるシステムを現場に導入し、その有効性を評価する必要があった。

高速作動バルブを正確に監視するためには、従来よりも高速なサンプリングが不可欠である。また、対象となるバルブの多くは既に現場で稼働しているため、状態監視システムは後付けできる必要がある。しかし、導入時に配線工事が必要な場合、高所でのケーブル敷設やループテスト等、多数の工程を要し、施工期間は数日に及ぶため、施工負担が増大し導入の障壁となる。したがって、状態監視システムには配線を必要とせず、容易に取り付け可能であることが求められる。一般的に配線不要とする方法として、無線通信および電池駆動を組み合わせ、通信と電源の双方を無線化する

フルワイヤレス化が挙げられる。しかし、電池駆動の場合は無線通信による消費電力への影響が大きく、高速なサンプリングも消費電力の増大を招く。一方で、電池駆動とする場合、産業プロセス業界では定期修理の周期を超える年単位の電池寿命が求められる。したがって、高速作動バルブの状態監視を実現するためには、省施工のためのフルワイヤレス化とバルブ波形取得のための高速サンプリングを実現したうえで、電池の長寿命化を達成する必要がある。

本論文では、これらの課題を解決するための、セルラー通信を活用したフルワイヤレス機器の開発と、高速サンプリングとセルラー通信を低消費電力で実現する技術の開発について報告する。

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では機器のフルワイヤレス化に向けた無線規格の選定について説明する。第3章では高速作動するバルブの状態監視における高速サンプリングの必要性について説明する。第4章では電池の長寿命化に向けた課題について述べる。第5章では長寿命化に向け開発した低消費電力化技術について説明する。第6章では本技術開発の成果について、顧客現場での実地評価をもとに述べる。

### 2. フルワイヤレス化のための無線規格の選定

第1章で述べた通り、バルブの状態監視システムには無線通信と電池駆動によるフルワイヤレス化が求められる。

無線通信の規格は多数存在するが、今回は敷地が広大なプラントへの適用が想定されることから、長距離通信が可能なLPWA (Low Power Wide Area)に分類される通信規格群から選定した。

LPWAは、低消費電力かつ広範囲の通信を可能にする無線通信技術である。主にIoT分野で利用されており、センサや端末が長時間稼働できることが特徴である。LPWAには、SigfoxやLoRaWANなど複数の規格が存在するが、今回はLTE Cat.M1 (LTE-M)やNB-IoT (Narrowband Internet of Things)のようなセルラーLPWAを採用した。セルラーLPWAは3GPPによって標準化されたIoT向けセルラー通信技術である<sup>(1)</sup>。既存のLTEネットワークを基盤とし、端末帯域幅を制限することで低コスト化を図るとともに、省電力モード (PSM)や拡張DRX (eDRX) 等、通常のLTE通信と比べ低消費電力化が可能な規格である<sup>(1)</sup>。

表1にセルラーLPWAとLoRaWAN, Sigfox, Wi-Fi HaLowの概略比較を示す。

表1 LPWA規格比較

	セルラーLPWA	LoRaWAN	Sigfox	Wi-Fi HaLow (IEEE802.11ah)
現場への親機設置要否	不要	要	不要	要
通信速度	高速	低速	低速	高速
消費電流	大	小	小	大

LoRaWAN, Wi-Fi HaLowは、端末とは別に外部のネットワークとつなげるための親機を設置する必要がある<sup>(2)</sup><sup>(3)</sup>。親機の設定には配線工事が必要であり、最適な設置場所を決定するための回線設計も必要となるため、施工負担軽減の効果は限定的である。一方でセルラーLPWAは通信事業者が提供する公衆回線を利用する。そのため、現場での親機設置が不要であり、端末設置のみで通信を開始することが可能である。

Sigfoxはライセンスパートナー企業が基地局を配置し公衆回線に似たネットワークを用意しているため、現場での親機設置は不要である<sup>(4)</sup>。しかし、ペイロード12バイト(上り)、送信回数1日140回など、通信仕様に制約<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>があり、用途としては河川や農地の水位・温湿度などの環境モニタリングのような、小容量、低頻度の通信用途向けの通信規格である。バルブの状態監視では連続した開度波形データを送る必要があるため、データ容量は温度データなどと比較して大きく、Sigfoxが想定する用途には適合しない。一方、セルラーLPWAは通常のセルラー通信と比べると通信速度は劣るものの、LTE-Mの上り通信速度は1Mbps(全二重)/300kbps(半二重)、NB-IoTでは62kbpsと他LPWAと比べ速く、数キロバイト程度であっても問題なく送信することができる<sup>(6)</sup>。

親機の設置が必要なく現場での施工が容易であるという

特徴と、比較的高速であるという特徴が、省施工と連続した開度波形データの送信という要求に適していると判断し、セルラーLPWAを採用することとした。

### 3. 高速サンプリングの必要性

高速作動バルブの状態監視システムの実現に向け、高速サンプリングも要求のひとつである。

バルブ監視の目的のひとつとしては、動作不良発生前の不調を検知することが挙げられる。例えば、バルブの動作中に引っかかりが発生した場合、急峻な変動が発生する(図1)。バルブの状態監視において、計測器にはこのような急峻な変動を検知できることが求められる。また、ボール弁やダイヤフラム弁のような小口径のバルブは作動速度が速く、例えば、ON-OFF制御のような全開、全閉動作をさせた場合、200~300ミリ秒で遷移するものも存在する。この場合、高速作動するバルブの不調を的確に検知するためには、数ミリ秒~10ミリ秒程度のサンプリング周期が必要である。

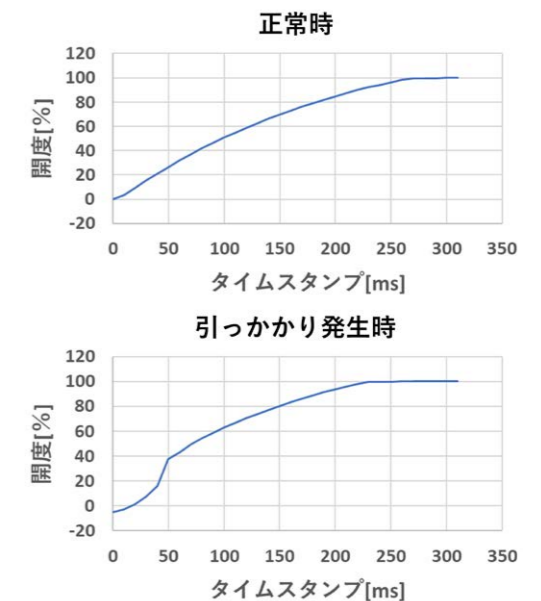


図1 正常時と引っかかり時のバルブ開度波形の代表例

### 4. 長寿命化に向けた課題

第1章で述べた通り、産業プロセス業界では定期修理の周期を超える電池寿命がひとつの要件となる。定期修理の一般的な周期は1年~4年であるため、本開発は最も条件の厳しい4年以上の電池寿命を目標とした。

第2章で説明したセルラーLPWAは他のLPWA規格と比較して消費電力が大きい。また、通信開始時にはネットワークアタッチやTLSハンドシェイクなど送信データ量に依存しない固定オーバーヘッドが発生するため<sup>(7)</sup>、これによる機器全体の消費電力への影響は無視できない(図2)。オーバーヘッドの影響を軽減し、電池寿命を延長するためには1回で送信する波形データの量を増やし、通信周期を延ばす必要がある。

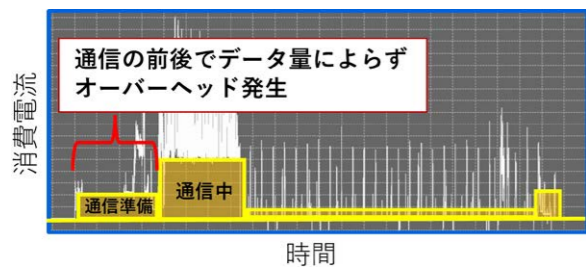


図2 セルラー通信時の消費電力波形の一例

通信周期を延ばすためには複数回分の波形データを計測機器の内部メモリに保持する必要がある。しかし、機器の内部メモリは限られているため、取得するデータ量は少ないことが望ましい。一方で、高速作動するバルブの開度波形を取得するためには高速なサンプリングが必要であり、それによりデータ量増加につながる。例えば、10ミリ秒間隔でサンプリングした場合、1データあたり4バイトと仮定すると、1秒間に400バイトのデータが生成される。マイコンのメモリ領域のうち40キロバイトを使用可能である場合、約100秒でメモリ容量が上限に達し、その前に無線によるデータ通信を実施する必要が生じる。マイコンのメモリを増やすことでデータ保持期間の延長が見込めるが、市販のマイコンのメモリ領域には限りがあり、メモリが大きいマイコンは製品のコスト増加にもつながる。このように、高速サンプリングによるデータ量の増加は通信頻度の増大を招き、結果として消費電力増加の要因となる。さらに、バルブの状態計測を行う際は角度センサ（以下、センサとする）への電力供給も必要となる。常時高速なサンプリングを行う場合、センサの電流静定時間も加味すると、測定に必要な電力供給を常時実施する必要があり、消費電力の増加につながる。

したがって、電池の長寿命化には、高速サンプリングと通信周期延長の両立に加え、センサ駆動の低消費電力化という複合的な課題解決が求められる。

## 5. 長寿命化実現のための技術開発

### 5.1 課題解決にむけた方針

第4章で述べた通り、常時高速サンプリングを行うと短時間でメモリ容量の上限に達し、通信周期の延長が困難となる。しかし、高速で作動するバルブの多くは常時動いているわけではなく、動作頻度は数時間～1週間に1度程度と待機時間が大半を占める。そこで、バルブの開閉動作時のみ高速サンプリングを行い、それ以外の待機時間は低速でサンプリングするように制御することで、最低限のデータ量でバルブ開度波形を取得でき、通信周期の延長も可能となる。

また、センサのS/N比は供給する電力量によって決まる。高精度な計測を行う際には高いS/N比が必要となるため、測定時には十分な電力を供給する必要がある。一方、測定時以外は高いS/N比を必要としない。そのため、測定以外の期間については、センサへ供給する電力量を抑える、もしくは電力供給自体を停止することが可能である。

以上より、電池の長寿命化実現に向け、データ量削減のためのサンプリング周期の制御と、センサ消費電力削減のためのセンサの間欠駆動という二つの方針を採用し、低消費電力化技術の開発を行った(図3)。

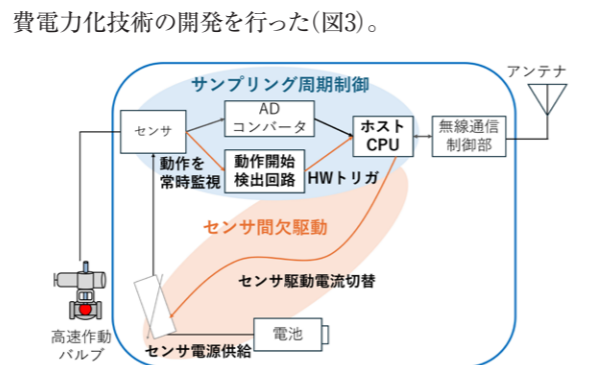


図3 サンプリング周期の制御とセンサの間欠駆動

### 5.2 低消費電力化技術

サンプリング周期の制御を実現するためには、センサの値を常時監視し、バルブの動作開始を迅速に検出する仕組みが必要である。

CPUによるセンサ信号の監視でバルブの動作開始を検出する方法を考える。例えば、センサの値を高速で測定し、バルブの動作開始検出から一定時間のみ内部メモリへ保持する仕組みとすることで、データ量は削減可能である。しかし、CPUは常にアクティブ状態になるためCPUの消費電力は増加する。一方、CPUの消費電力を抑えるために測定周期を延長すると、高速作動するバルブの動作開始を検出することができない。

この課題を解決するため、CPUから独立して動作する「動作開始検出回路」を設けることで、CPUのアクティブ時間を抑えつつ、高速作動するバルブの動作開始の瞬間を検出可能とした。

バルブ動作の常時監視から高速サンプリングを開始するまでの一連の流れを以下に示す(図4)。

- 動作開始検出回路によりセンサを常時監視する。その間CPUはスリープ状態を基本とし、設定した長い周期で復帰し、低速サンプリングを実行する。
- バルブが動作しセンサの出力が変化すると、検出回路がHWトリガを出力する。
- HWトリガによりCPUが復帰、高速サンプリングを開始する。

動作開始検出回路の機能としては、センサの急峻な変化を検出するという単純機能のみに限定している。機能を限定することで検出回路自体も低消費電力で動作可能としている。

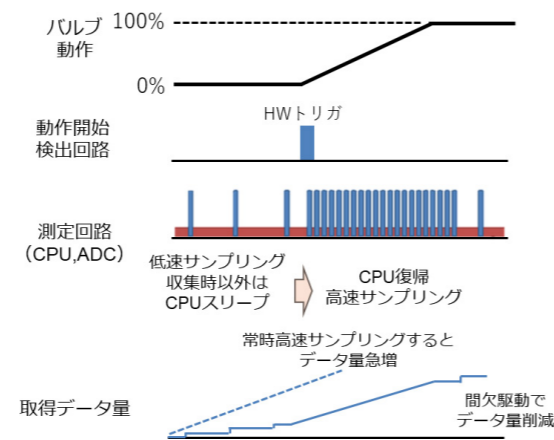


図4 サンプリング周期の制御

また、動作開始検出回路による常時監視を実現するためには常にセンサへの電力供給が必要となり、消費電力増加につながる。しかし、動作開始検出回路はセンサの変化のみをとらえられればよく、バルブの開度波形取得時のように高いS/N比を必要としない。そこで、常時監視時にはセンサに供給する電力を最小限にし、低速サンプリングと高速サンプリングのタイミングのみ、開度取得に必要なレベルの電力を供給する間欠駆動とした(図5)。センサを間欠駆動させることにより、バルブ動作を常時監視しつつセンサでの消費電力を50%以上削減した。

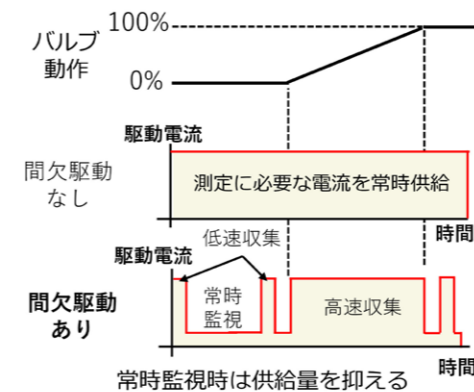


図5 センサ間欠駆動

### 5.3 低消費電力化技術の効果

サンプリング周期の制御とセンサの間欠駆動という2つの技術により、セルラー通信と高速サンプリングを低消費電力で動作させることが可能となった。その結果、バルブの動作頻度により変化するものの、年単位の寿命を実現した(図6)。グラフの電池寿命は、16Ahの電池の搭載を想定し、電池の個体差や電圧変動を考慮し電池容量を80%として計算した値である。バルブの動作周期が3時間の場合、電池寿命は約4.2年となる。目標としていた定期修理の周期である4年間を超える数値であり、産業プロセス業界現場で求められる長寿命を達成できた。

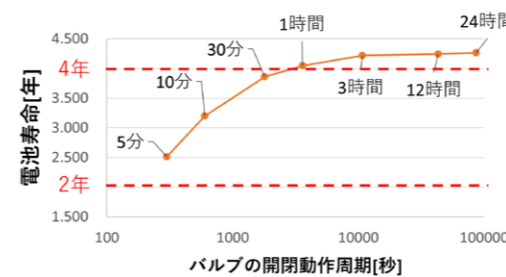


図6 バルブ開閉動作周期ごとの電池寿命 (16Ah電池)

## 6. 実地評価による検証

これまでに述べた技術により、バルブの高速作動を捉えつつ省電力で動作する、長寿命なフルワイヤレス機器を開発した。この機器を用いて顧客現場における評価を実施した。

評価の中で、従来は配線工事が必要で設置に数日を要していた作業が、フルワイヤレス化により設置から調整、動作

確認までを1台当たり30分程度で実施可能となることを確認した。これにより導入障壁であった施工負担を大幅に軽減でき、国内複数の顧客現場における既設弁での評価を実現することで、フルワイヤレス機器による省施工化の効果を実証した。

また、評価対象のバルブの中には200ミリ秒以下で作動するものも含まれていたが、そのような高速で作動するバルブの開度波形も問題なく取得できることを確認した(図7)。

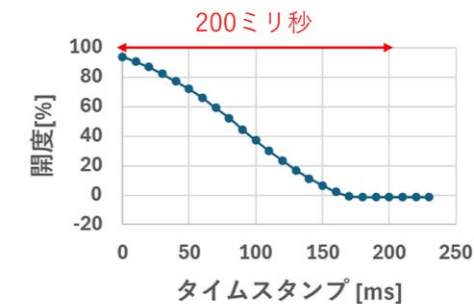


図7 高速作動するバルブの開度波形

さらに、一部の顧客では、バルブがスムーズに動作する「正常状態」から、最後まで閉じるものの途中で引っかかりが生じる「不調の検知」、途中で引っかかった状態で最後まで閉じることができなくなる「作動不良」に至るまでの過程を捉えられた(図8)。作動不良発生の前に遠隔から不調を検知可能とすることで、現場作業員のメンテナンス負荷の軽減や作動不良発生による生産への影響を軽減できると考えられる。本評価の結果より高速で作動するバルブの状態監視の有用性を立証できたといえる。

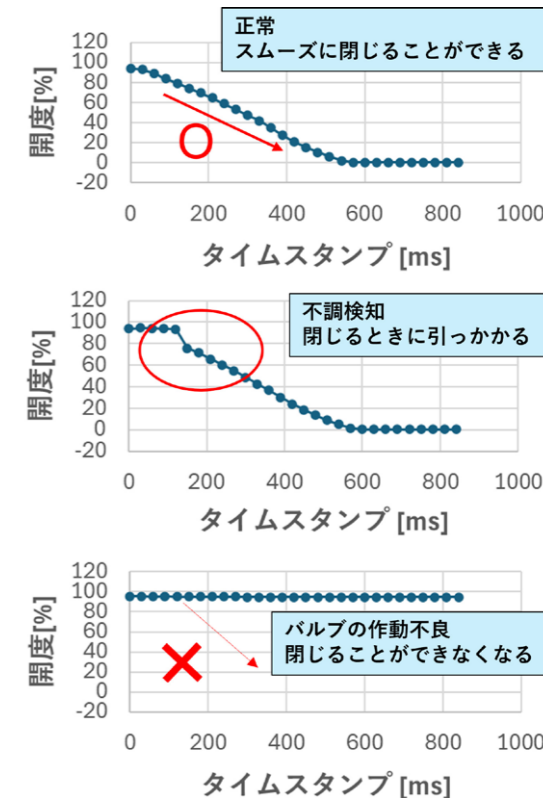


図8 正常状態から不調検知、作動不良までの一例

## 7. おわりに

本稿では、高速で作動する遠隔状態監視を実現するためのフルワイヤレス機器の開発と、セルラー通信と高速サンプリングを低消費電力で実現する技術の開発について述べた。

既設弁への導入に向け、現場への親機設置を必要としないセルラーLPWAと電池駆動によるフルワイヤレス機器を開発することで、現場での設置作業を簡素化し省施工化を可能とした。また、サンプリング周期の制御とセンサの間欠駆動という2つの技術開発により、200ミリ秒で作動するバルブの開度波形の取得が可能な高速サンプリングと、配線工事をなくし施工負担を軽減するためのフルワイヤレス化を実現しつつ、バルブの動作条件により4年以上の電池寿命を達成可能とした。さらに、これらの技術を搭載した遠隔状態監視システムを実際の顧客現場で評価した結果、施工負担の大幅な軽減効果や、バルブが作動不良に至る前の不調の検知ができることを確認した。今後は、本稿で説明した技術を基盤に製品開発を進め、バルブ事業の顧客課題の解決に貢献することを目指す。

### <参考文献>

- (1) 武田和晃他, ウリ A.ハブサリ, 高橋秀明, 藤島大輔, 繆震:LTE Release 13におけるIoTを実現する新技術, NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, 2016年, Vol.24, No.2, pp.32-37, NTT DOCOMO, INC.
- (2) Bernhard Koelmel, Max Borsch, Rebecca Bulander, Lukas Waidelich, Tanja Brugger, Ansgar Kuehn, Matthias Weyer, Luc Schmerber and Michael Krutwig:Quantifying the Economic and Financial Viability of NB-IoT and LoRaWAN Technologies:A Comprehensive Life Cycle Cost Analysis Using Pragmatic Computational Tools, FinTech, 2023, Vol.2, No.3, pp.510-526, MDPI
- (3) Arshad Farhad, Jae-Young Pyun:Resource Management for Massive Internet of Things in IEEE 802.11ah WLAN:Potentials, Current Solutions, and Open Challenges, Sensors, 2022, Vol.22, No.23, Article No. 9509, MDPI
- (4) Sigfox Technical Overview, 2017, SIGFOX
- (5) Massimo Ballerini, Tommaso Polonelli, Davide Brunelli, Michele Magno and Luca Benini:NB-IoT vs. LoRaWAN:An Experimental Evaluation for Industrial Applications, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, Vol.16, No.12, pp.7802-7811, IEEE
- (6) eMTC及びNB-IoTの技術概要・共用検討, 総務省情報通信審議会/アドホックグループ会合資料(第2回), 2017年, 総務省
- (7) Jörn Bodenhausen, Laurenz Grote, Michael Rademacher, Martin Henze:Adaptive Optimization of TLS Overhead for Wireless Communication in Critical Infrastructure,

Proceedings of the 8th Cyber Security in Networking Conference (CSNet 2024), 2024, pp.1-4, IEEE

### <商標>

3GPPおよびLTEは欧州電気通信標準協会(ETSI)の登録商標です。

SigfoxはUnaBiz SASの登録商標です。

LoRaWANはLoRa Alliance<sup>®</sup>の登録商標です。

Wi-Fi HaLowはWi-Fi Allianceの商標です。

### <著者所属>

築瀬 壮一郎 アズビル株式会社  
技術開発本部 基幹技術部

田辺 樹 アズビル株式会社  
技術開発本部 基幹技術部

# AI技術を活用したバルブ整備作業の工程改善

## Process Improvement in Valve Maintenance Operations Utilizing AI Technology

細居 智樹  
Tomoki Hosoi

大枝 賢  
Masaru Ooeda

キーワード  
バルブメンテナンス, AI, 業務DX

バルブ整備作業の現場では、熟練作業者の高齢化による人員不足や技能伝承のための時間確保ができないといった問題があり作業の効率化が望まれている。そこで、従来手作業で行っていたバルブ整備レポート作成作業の一部にAI画像処理技術を導入し自動化することにより、作業効率を向上することに取り組んだ。この自動化による効果を検証するため、バルブ整備レポート作成支援のためのツールを開発し、ユーザ評価を実施した。その結果、バルブ整備レポート作成作業に要する工数を削減でき、人員不足への対応に加え、後継人材育成のための時間確保に貢献できる可能性を確認した。

At valve maintenance sites, there are issues such as labor shortages caused by the aging of skilled workers and the inability to secure time for skill transfer, creating demand for work efficiency improvements. To address this, we introduced AI-based image processing technology to automate part of the valve maintenance report preparation work that was being done manually. To verify the effectiveness of this automation, we developed a valve maintenance report preparation support tool and conducted user evaluations. As a result, we confirmed the potential to reduce the amount of work involved in preparing valve maintenance reports, not only addressing labor shortages but also contributing to securing time for training successor personnel.

### 1. はじめに

近年、熟練作業者の高齢化に伴い、生産や製造、整備を担う現場における技能伝承の重要性がますます高まっている。バルブ整備作業のような高度な専門知識と経験を要する業務においては、技能を有する人材の確保が困難となっており、この問題を解決するための新たな取り組みが求められている。

こうした背景のもと、我々は、自動化により効率化できる作業をみつけるために、バルブ整備作業の工程分析を行った。その結果、バルブ整備レポート作成作業に作業効率を向上できる余地が大きいと考え、この作業にAI画像処理技術を導入し自動化することにより、作業効率の向上に取り組んだ。本稿では、この取り組みの結果について述べるとともに、今後の展望についても示す。

### 2. バルブ整備作業の課題と改善への取り組み

#### 2.1 バルブ整備作業の概要

バルブとは、液体や気体などの流体を制御し、配管内の圧力や流量を調整する役割を持つ機器であり、生産設備の

プロセス制御において不可欠な役割を担う。バルブにトラブルが発生した場合、設備停止や品質低下、さらには事故や災害につながる可能性がある。また、バルブは生産設備ごとに異なる環境で稼働しているため、その状態も個体ごとに異なる。そのため、バルブの定期的な検査や整備が重要となる。

生産設備には多数のバルブがあり、これらすべてを一度に点検・整備することは難しい。この課題に対して、当社では、バルブ稼働データと当社ノウハウを組み合わせ、点検・整備すべきバルブを特定するための「バルブ解析診断サービス」を提供している。

点検・整備対象となるバルブが決まれば、整備工場にバルブ本体を引き取り、分解・点検を行い、必要に応じて部品の清掃・修理・交換を実施し、再組立を行って、整備を完了する。整備完了後は「バルブ整備レポート」を作成する。そのレポートには整備前後の部品の画像が記録されており、整備による変化を視覚的に把握できる。

#### 2.2 バルブ整備作業の効率化の必要性

バルブ整備作業における現状として、作業者の高齢化により、これらの業務を担える人材が減少傾向にあり、後継人

材の育成が急務となっている。ただし、単に人員を増やすだけではこの問題は解決しない。なぜなら、前述の整備作業における、バルブの分解・点検・修理・交換・再組立などの工程は高度な専門知識と豊富な経験が求められ、これらの技能を後継人材に伝承していくには、多くの時間が必要となるからである。

しかし、現在の整備作業の現場では、作業者が整備作業そのものに多くの時間を費やし、後継に技能の伝承をするような時間が十分に確保できていないのが現状である。このため、後継者不足の背景には「育成時間の確保が困難」という構造的な問題点が存在する。

このような状況下においては、一連のバルブ整備作業のうち、自動化が可能な作業については自動化を進め、知識や経験、技能を必要とする業務に関しては、後継人材の教育に必要な時間を割り当てられるようにすることが重要である。

### 2.3 バルブ整備レポート作成作業の自動化

バルブ整備作業の一連の工程のうち、自動化による工数削減可能な作業を探索した結果、バルブ整備レポート作成作業に着目した。

バルブ整備レポート作成作業は、バルブ整備現場で撮影された整備前後の部品画像とチェックシート画像を用いて、レポートを作成するものである。

部品の撮影時には、一連の部品画像がどのバルブに属するかわかるように、バルブ本体の情報（顧客名、事業所名、装置名、タグ名など）を記したチェックシートを撮影し、続いて、そのバルブの各部品を撮影する。

レポート作成時には、チェックシートごとに部品画像をグループ化し、各部品画像を目視で分類しながら、レポートに画像を貼付し、レポートを作成する。なお、整備前後の判別は画像の撮影時刻をもとに判断する。

上記の作業のうち、作業者が部品画像を目視で分類し、手作業でレポートに貼付する作業を自動化することで、現場の作業手順を大きく変えることなく、工数削減ができると考えた。

そこで、部品画像を自動的に分類するバルブ画像自動分類技術と、チェックシート画像の情報を自動的に読み取るチェックシート自動情報抽出技術を開発し、これらを統合してレポート作成を支援するツールの開発に取り組んだ。以降、各技術について記す。

### 3. バルブ画像自動分類

#### 3.1 バルブ画像自動分類の問題

バルブ画像自動分類は、図1に示されるような整備現場で撮影された部品画像に対して、それぞれがどの部品に該当するかを自動的に判別する技術である。この技術を実用レベルで構築するためには、以下の問題を解決する必要がある。

- (1) 部品形状の構造識別: バルブ部品は形状が複雑で、別種の部品同士であっても局所的な特徴の差異が少ないため、部品構造のような大域的な特徴を捉えた識別

が必要となる。

- (2) 撮影条件のばらつき: 撮影画像は照明条件や撮影角度が一定ではなく、画像特徴量の変動により分類精度が低下する可能性がある。
- (3) 背景の影響: 撮影画像には、工具や作業台などが背景に映り込む場合がある。背景に影響されない識別が必要となる。

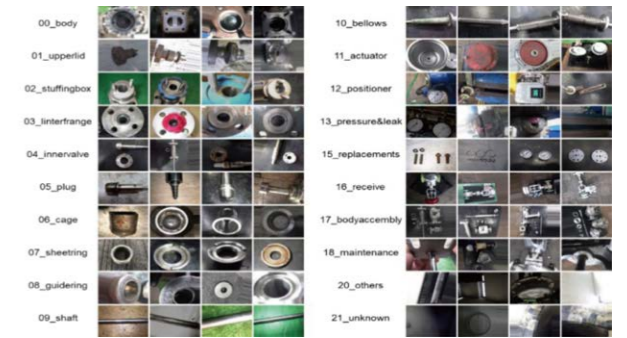


図1 バルブ部品画像の例

#### 3.2 採用した手法

バルブ画像自動分類を実現するため、深層学習を用いた画像分類手法を採用した。図2に学習過程と推論過程に関する処理フローを示す。学習過程では、撮影された部品画像とその正解情報からなる学習用データセットを構築し、これを用いて画像分類モデルを学習させる。推論過程では、学習済みの画像分類モデルを用いて、部品カテゴリが未知な画像に対して分類を行う。

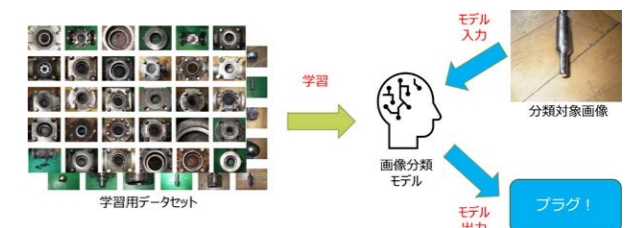


図2 バルブ画像自動分類の処理フロー

深層学習による画像分類モデルとしては、CNN(Convolutional Neural Network)が広く利用されている。CNNは畳み込み演算により局所領域から特徴を抽出し、それらを階層的に統合することで画像の理解を実現する。この構造により高い認識性能が達成されている。しかし、対象の形状や配置に関する大域的な変化や、要素間の依存関係の表現が十分でない場合がある。

前述のとおり、バルブ部品画像は局所的な特徴の差異が小さいため、CNNによる分類は困難であると考えられる。

こうしたCNNの構造的課題を克服するために、ViT(Vision Transformer<sup>(1)</sup>)が提案されている。ViTは、自然言語処理分野で開発されたTransformer<sup>(2)</sup>を画像処理に応用したものであり、入力画像を複数の領域画像に分割し、Multi-Head Attentionに基づいて各領域画像間の関係性を学習することで、画像特徴を大域的に捉えることを可能としている。

図3にViTの全体構成を示す。ViTは以下の主要な構成要素から成る。

- (1)入力生成部: 入力画像を一定サイズの領域画像に分割し、それぞれを一次元ベクトルに変換する。
- (2)特徴抽出部: 事前学習済みの特徴抽出モデルを用いて、各領域画像の特徴量を抽出する。
- (3)分類部: 特徴抽出部から得られたViT特徴量に対して、各認識タスクに応じてファインチューニングされた分類モデルを用いて、最終的な分類結果を出力する。

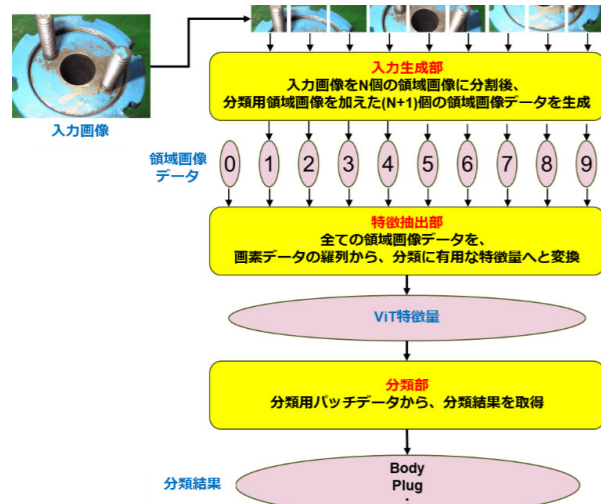


図3 ViTの全体構成

### 3.3 採用した手法の精度評価

#### 3.3.1 ファインチューニング/テストデータの準備

以下の手順でファインチューニングとテストのためのデータを作成した。

- (1) 図1に示すような、ファインチューニングデータとテストデータの元となる、正解情報付きバルブ部品画像の画像データセットを準備する。
- (2) 画像データセットを指定割合でファインチューニングデータとテストデータにランダムに分ける。
- (3) ファインチューニングデータの各カテゴリの画像枚数が均等になるよう、データ拡張(画像の回転や反転など)を行う。この処理により、学習時のカテゴリ間の認識精度の偏りを防ぎ、モデルの汎化性能を向上させる。

#### 3.3.2 画像分類モデルの比較

画像分類性能を比較するために、表1に示すCNN型の分類モデルであるResNet<sup>(3)</sup>、DenseNet<sup>(4)</sup>とViT<sup>(1)</sup>をベースモデルとして、サイト<sup>(5)</sup>から取得し、それぞれファインチューニングを行い、その正答率を比較した。なお、ファインチューニングおよびテストには、画像サイズを224×224に整えた16カテゴリ、1,376枚のデータを使用した。結果を表2に示す。

表1 各分類モデルの基本情報

分類モデル	モデル容量	パラメータ	モデル
ResNet	101[MB]	階層数:50	timm/resnet50
DenseNet	77.4[MB]	階層数:201	timm/densenet201
ViT	334[MB]	領域画像サイズ:16	timm/vit_base_patch16_224

表2 各分類モデルによる正答率

テストデータ割合[%]	ResNet	DenseNet	ViT
10	0.299	0.175	<b>0.934</b>
20	0.316	0.149	<b>0.916</b>
50	0.346	0.152	<b>0.914</b>

比較の結果、ViTは正答率90%以上であり、他の分類モデルより明らかに良好な結果を示し、今回対象とした画像データにおいては、ViTの優位性が確認された。

#### 3.3.3 ViTのハイパーパラメタの選定

最適なViTのハイパーパラメタを選定するために、データセット(19カテゴリ、4060枚)のデータから75[%]をファインチューニングに、残りをテストデータに割り当てて、ハイパーパラメタ(モデル規模、領域画像サイズ、入力画像サイズ、追加学習の有無)の違いによる正答率の評価を行った。結果を表3に示す。

表3のモデル規模列の各項目はbase(約344[MB])、large(約1.2[GB])、huge(約2.4[GB])である。追加学習有無列は、ベースモデルが追加学習されているかどうかを表す。

表3 各種ハイパーパラメタの組み合わせによる正答率

パラメータ組み合わせ	モデル規模	領域画像サイズ	入力画像サイズ	追加学習有無	正答率
P0	base	16	224	無	0.914
P1	base	16	224	有	0.905
P2	base	16	384	有	0.909
P3	base	32	224	無	0.901
P4	base	32	224	有	0.895
P5	large	14	224	無	0.915
P6	large	14	224	有	0.903
P7	large	14	336	有	0.915
P8	huge	14	224	無	0.921
P9	huge	14	224	有	0.914

上記の結果より、各ハイパーパラメタには以下の傾向がみられた。

- (1)モデル規模: モデル規模は大きいほど精度は高くなるものの、大きな改善は見られない。
- (2)領域画像サイズ: (P0, P3) (P1, P4)における正答率の比較より、領域画像サイズが小さいほど精度が高くなる傾向にある。
- (3)入力画像サイズ: (P1, P2) (P6, P7)における正答率の比較より、入力画像サイズが大きいほど精度が高くなる傾向にあるが、その改善効果は微小である。
- (4)追加学習有無: (P0, P1) (P3, P4) (P5, P6)における正答率の比較より、追加学習をしない方がより精度が高くなっている。

モデル規模が大きくなると、必要とされるハードウェアへの要求が高くなり、また処理時間も必要となることから、規模と分類精度のバランスを考慮して、baseを使用することにした。ここで、モデル規模がbaseで、最も精度の良いハイパーパラメタであるP0は、設計時に目標とした正答率90[%]以上を達成できているため、P0を採用した。

## 4. チェックシート自動情報抽出

### 4.1 チェックシート自動情報抽出の問題

チェックシート自動情報抽出は、図4に示すようなチェックシート画像から、顧客名、事業所名、装置名、タグ名などの情報を自動的に読み取る技術である。整備工場で撮影されるチェックシートには、以下のような問題があるため、これらの問題を解決する必要がある。

- (1)撮影条件のばらつき: チェックシート画像は撮影角度が固定されておらず、位置が画像内で変動する。
- (2)撮影画像の品質: 実際の撮影では、ピンボケやノイズなどにより画像品質が低下する場合があります、認識精度をさらに悪化させる。



図4 チェックシート画像の例

### 4.2 開発した処理フロー

QRコードの認識には高い画質の画像が必要となるが、一度認識できれば、得られた情報の信頼性は高い。一方、文字認識による情報抽出は、“1”と“l”のような紛らわしい文字による誤認識はあるものの、QRコードを認識できないような低い画質の画像からでも情報が抽出できる可能性がある。

前節で述べた問題と上記の特徴を踏まえ、チェックシート自動抽出の問題(1)に対しては、チェックシートの撮影範囲、角度、明るさなどに対して、撮影ルールを決めることで対応した。また、チェックシート自動抽出の問題(2)に対応するために、画像処理によって画質の改善を段階的に実施しながら、情報抽出精度が高いQRコードの利用を優先し、最後に補完方法として文字認識を使用する方針とした。図5に開発した処理フローを示し、以下に各処理内容について記す。

- (1)撮影画像からQRコード読み取り: QRコード認識ライブラリpyZBAR<sup>(6)</sup>を用い、撮影画像から直接QRコードを認識し、情報抽出が成功すれば処理終了。
- (2)撮影画像から領域群抽出: 回転や拡大に強い局所特徴量AKAZE<sup>(7)</sup>を用いて、テンプレート画像との位置合わせを行い、QRコード領域と文字領域で構成される領域群を抽出する。
- (3)領域画像(改善前)からQRコード読み取り: QRコード領域からQRコードを認識し、情報抽出が成功すれば処理終了。
- (4)領域画像群の画質改善: ピンボケの画質劣化を改善する技術NAFNet<sup>(8)</sup>を用いて、QRコード領域と文字領域に対して画質改善を実施。
- (5)領域画像(改善後)からQRコード読み取り: 画質改善

されたQRコード領域からQRコードを認識し、情報抽出が成功すれば処理終了。

- (6)領域画像(改善後)から文字認識: 文字認識ライブラリEasyOCR<sup>(9)</sup>を用いて、画質改善された文字領域から文字認識を実施する。文字認識の成否にかかわらず、この時点で処理を終了する。

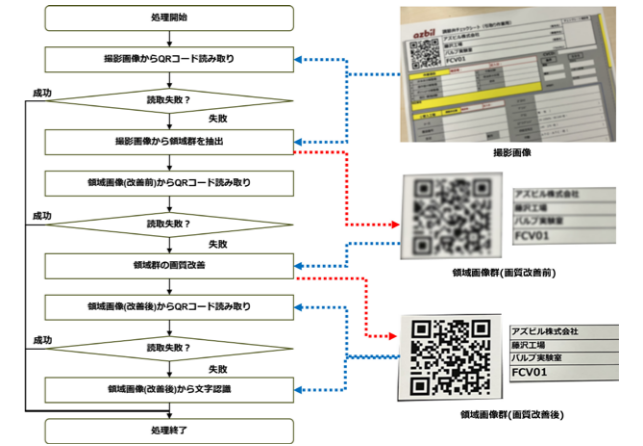


図5 チェックシート自動情報抽出の処理フロー

### 4.3 開発した処理フローの効果検証

開発した処理フローの効果を確認するため、図4に示すような画質が良いチェックシート画像に加え、図6に示すような様々な要因(ピンボケ、ノイズ等)で画質が悪いチェックシート画像を用いて、チェックシート自動情報抽出の成否結果を見ることにより、効果検証を行った。

検証の結果、単体のQRコード認識や文字認識では自動情報抽出が困難であった劣化画像に対しても、開発した処理フローでは自動情報抽出が可能であった。



図6 劣化チェックシート画像の例



図7 バルブ整備レポート支援の処理フロー

## 5. バルブ整備レポート作成支援の取り組み

### 5.1 バルブ整備レポート作成支援ツールのフロー

前述のバルブ画像自動分類とチェックシート自動情報抽出を活用し、バルブ整備レポート作成業務を支援する枠組みを考案した。図7にその処理フローを示す。

上記の処理フローにおいて、従来は目視で行われていた撮影画像の整理や帳票への貼付などの作業を自動化するバルブ整備レポート作成支援ツールを開発した。図8にツールの画面イメージを示す。

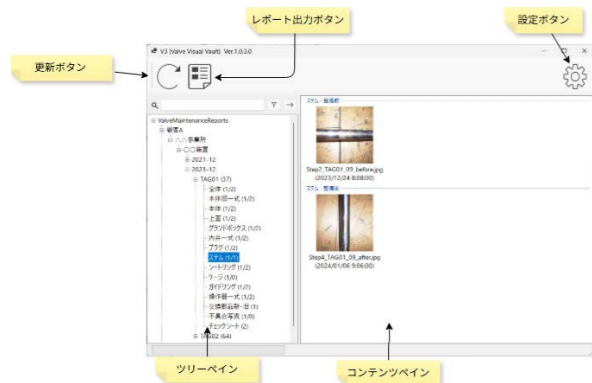


図8 作成したツールの画面イメージ

ツールを導入した一連の作業は以下の手順で行われる。整備前後に、作業者はチェックシートと各部品を撮影する。整備作業完了後のレポート作成時、作業者は主にツールを用いて作業を行う。

ツールは、撮影された画像のバルブ画像自動分類を行い、各画像が部品画像かチェックシート画像かの分類を行う。チェックシート画像に分類された画像に対してはチェックシート自動情報抽出を実施する。ここまでの処理で、バルブ画像自動分類やチェックシート自動情報抽出の結果に誤りがあった場合、ツールの画面上で修正を行う。

次に、上記の画像の整理結果をもとに、所定のフォーマット

に従って画像貼付と属性記述を自動的にを行い、作業者が修正可能な形式でレポートを出力する。

最後に、出力されたレポートに対して、作業者が手動でしか記述できない情報（整備所見など）を追記し、レポートを完成させる。

### 5.2 バルブ整備レポート作成支援ツールの評価

バルブ整備レポート作成支援による工数削減の効果を確認するため、国内外のバルブ整備作業者にツールを試用してもらい、所感や改善要望などの情報を収集した。

作業者10人を対象に、アンケート（選択式15問、自由記述1問）を実施し、集計した回答結果からツール導入効果を分析した。

#### 5.2.1 工数削減効果について

ツールによる工数削減効果のアンケート結果を図9に示す。バルブ一台あたりにかかる作業時間は、従来の人手による画像分類や画像貼付の作業と比較し、平均約19%の工数削減が見込まれることが判明した。従来1件のレポート作成には平均約24分の工数を要していたため、1件当たりの削減時間は約4.5分となる。これは、全国で年間バルブ10,000台を整備したとすると、全体で約750時間の削減ができることになる。

工数削減効果：平均19%削減

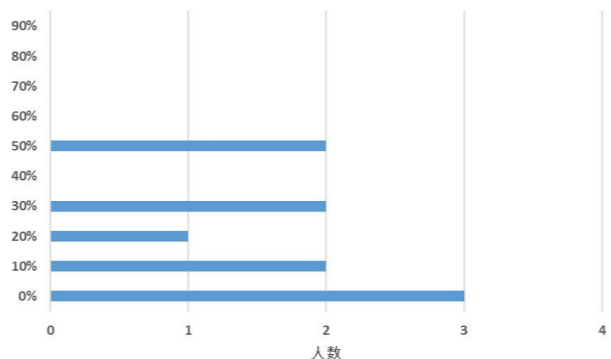


図9 アンケート回答結果  
(ツールによる削減時間について)

#### 5.2.2 ツールの改善要望と今後の対応

ツールの改善要望として以下のような項目が挙げられた。

- (1) バルブ画像自動分類の精度向上
- (2) 画像分類完了の待機時間の低減

(1)の「バルブ画像自動分類の精度向上」については、技術検討時は、自動分類精度が目標の90%を達成していたが、回答結果からすると、ツール試用時に分類精度が下がった可能性がある。

これについては、誤分類された画像を蓄積し、その画像を用いて再度ファインチューニングを行うことで分類精度の向上を図る方針である。

(2)の「画像分類完了の待機時間の低減」とは、1台のPCでまとめて画像分類処理を実行するために発生する数分程度の待機時間をなくしてほしいという要望である。この要望に対して、スマートフォンで撮影した画像をクラウドプラットフォームで逐次処理し、待機時間を解消することを検討している。

## 6. おわりに

本稿では、バルブ整備レポート作成作業にAI画像処理技術を導入し、自動化を行うことによる工程改善の取り組みについて紹介した。この取り組みにより工数削減を実現した。今後は、自動分類精度の向上、画像分類の完了待機時間の解消など、ユーザーの要望に対応していくことで、更なる効率化の実現を目指す。また、ここで開発した技術の適用範囲を生産や製造、整備など他の現場に適用拡大することで幅広い業務改善につなげていきたい。

これらの取り組みを通して、単なる作業効率化にとどまらず、人員不足への対応や、後継人材への技能伝承に必要な時間を確保することなど、現場が抱える課題の解決につながることを期待する。

### <参考文献>

- (1) Dosovitskiy, A.:An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale, arXiv, 2020, arXiv:2010.11929
- (2) Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Kaiser, L., Polosukhin, I.: Attention Is All You Need, Advances in Neural Information Processing Systems, 2017, Vol.30, pp.5998-6008, MIT Press
- (3) He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J.:Deep Residual Learning for Image Recognition, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp.770-778, IEEE
- (4) Huang, G., Liu, Z., van der Maaten, L., Weinberger, K.Q.:Densely Connected Convolutional Networks, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp.4700-4708, IEEE
- (5) Hugging Face, Inc.:Hugging Face Official

Website, 2025, <https://huggingface.co>, (Accessed: 2025/10/01)

- (6) Johnston, L.:pyzbar:Python library for reading barcodes and QR codes, 2018, <https://github.com/NaturalHistoryMuseum/pyzbar>, (Accessed: 2025/10/01)
- (7) Alcantarilla, P.F., Bartoli, A., Davison, A.J.:Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces, British Machine Vision Conference(BMVC), 2013, pp.1-11, BMVA Press
- (8) Chen, L., Chu, X., Zhang, X., Sun, J.:Simple Baselines for Image Restoration, European Conference on Computer Vision (ECCV), 2022, Springer
- (9) Jaided AI:EasyOCR:Ready-to-use OCR with 80+ Languages Supported, 2020, <https://github.com/JaidedAI/EasyOCR>, (Accessed: 2025/10/01)

<商標>

QRコードは株式会社デンソーウェーブの登録商標です。

<著者所属>

- 細居 智樹 アズビル株式会社  
AIソリューション推進部
- 大枝 賢 アズビル株式会社  
サービス本部サービス技術部

# 高性能で軽量な変化検知技術の異常検知への応用

～人工知能分野の国際会議AAAIに採択された技術～

## Applying a high-performance and lightweight algorithm to anomaly detection

— A technology accepted by the international AI conference —

村上 英治  
Eiji Murakami

鈴木 郁美  
Ikumi Suzuki

原 一夫  
Kazuo Hara

### キーワード

AIによる異常予兆検知, AI異常予知

産業機械の重故障から軽故障まで広く適用可能であり未経験の異常状態も含め検出が可能な新しい変化検知技術について論じる。この技術はセンサデータなどの対象機器のデータを事前に学習することが不要であり、アルゴリズムを実行する計算機環境とセンサデータさえあればすぐに利用することが出来る。利用にあたっては大きな計算機資源を必要としない、またアルゴリズムの実行処理速度が比較した他の技術と比べて高速であるので計算機システムで本アルゴリズムを実行した際には多くのセンサデータに対して異常状態となる変化を検出することが可能である。

This paper discusses a new change detection method that is widely applicable to industrial applications and is even capable of detecting previously unexperienced abnormal conditions. This method does not require pre-training on data from the target device and can be used immediately as long as you have sensor data and a computing environment to run the algorithm. Using this method does not require significant computing resources. Since this algorithm is faster than other technologies in our testbed, it is possible to detect abnormal conditions among many gigabytes of sensor data. We expect this novel method will be widely adopted alongside existing anomaly detection methods.

### 1. はじめに

AI (artificial intelligence) の発展および計算機の技術革新によりモバイル端末において、SNSにおけるコミュニケーション内容の多言語へのリアルタイム翻訳やスケッチの提示や自然言語によるコンセプト提示からの画像や動画の生成など高度なAI処理が実現されつつある。産業応用に注目すると、高度な深層学習による異常検知技術の開発と製造現場への応用も始まっている<sup>(1)</sup>。一方でこれらの先端的な技術の利用が困難な場面が多々存在する。産業機械においてはその構造や原理が何十年にもわたり変化がなく、また技術革新も行われぬものが多い。しかし社会的ニーズから必要とされるので同じ構造で生産され使用され続ける。これらの産業機械は異常検知の仕組みがなく、異常であることを把握するにはヒトが産業機械の前に行き機械が動作しているか停止しているかを五感で判断するケースもある。このように本来動作すべき機械が停止している重故障の場合は異常であることを判断しやすいが、機械は一見正常動作

しているように見えて、機械内部に異常が発生している場合がある。例えば、積算値の表示 (計測値や計量値の積算値) の進み方が正常時と比較してわずかに遅いもしくはわずかに速い軽故障が発生していることがある。このような軽故障を検知するにはヒトの五感に依らないデータに基づく異常検知方法が求められる。

本論文ではレガシー産業機械にもすぐに適用でき、異常検知が可能な新しい変化検知技術を提案する。また、最新の産業機械において既に高度な異常検知技術を採用済みの場合でも、協調的にこの変化検知技術を組み入れることが出来、異常検知の更なる高度化が可能であることについて述べる。

なお本論文で紹介する変化検知技術はAI、人工知能分野のトップ国際会議「AAAI 2025」で論文採択された技術である。AAAIはNeurIPS, CVPR, ICLRと並ぶAI分野の主要国際会議で、全体の投稿数は1万件を超え、採択率は20~30%程度。日本からの論文投稿に対する採択率は数%程度である<sup>(2)</sup>。

### 2. 関連技術

JIS Z9021 シューハート管理図と呼ばれる時系列データの異常値管理の方法が長年にわたって我が国の製造現場において利用されてきた。図1は弊社の時系列データの異常値管理ソフトウェアの画面例である。画面中段にWECOルール (Western Electric rules) による異常値管理画面がある<sup>(3)</sup>。

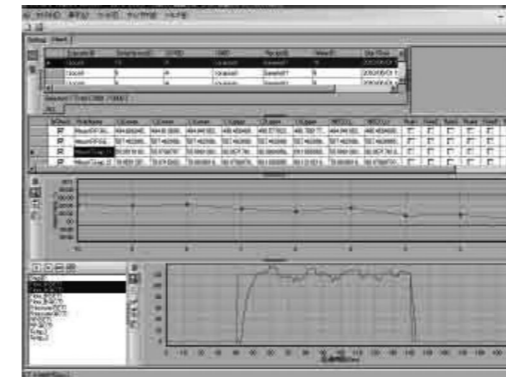


図1 SPC (Statistical Process Control) 管理の例  
山縣 et al. (2011) から引用

これは管理対象データが正規分布に従うとしグラフの縦軸中央をデータの平均、グラフの上と下に管理限界値を設定しその値を超えた回数によって異常が発生しているかを判断する手法である<sup>(4)</sup>。異常判定のアルゴリズムと管理限界値についてはJIS Z9021に規定されている。WECOルールは管理対象データが正規分布に従う限りは簡単なアルゴリズムであるにもかかわらず十分に異常値管理を行うことが出来る。一方、管理対象データが正規分布に従わない場合はこのアルゴリズムを適用することは出来ない。

WECOルールは簡単なアルゴリズムで異常値管理を実施できるのが特徴である。一方、複雑なアルゴリズムを用い大規模な計算機資源を使って異常検知を行う技術も存在する。例えば、NRAF (Nonlinear Regression Analysis using FNN, FNN: Fuzzified Neural Network) はデータから学習モデルを生成し、複雑なデータに対しても高精度な異常検知ができることを特徴とする技術である<sup>(5)</sup> <sup>(6)</sup>。データを学習する都合、データがある確率分布に従うことは想定するが正規分布に従うことまでは要求しないので適用範囲はWECOルールと比べ広範囲に及ぶ。

### 3. 提案手法

#### 3.1 変化検知とは

最初に本論文の表題にもある変化検知について説明する。時系列データがある確率分布に従うとき、その時系列データが別の確率分布に従うようになった時点を変化が発生したと定める。本節では確率分布の変化として平均だけを取り上げるが、提案する変化検知手法は他の統計量の変化も検出することが出来る。図2は正規分布に従う時系列データのグラフである。横軸Timeが200系列毎に平均値が変化。平均値 $\mu$ は $\mu=2$ ,  $\mu=6$ と変化する。つまり図2の横軸

Timeが200, 400, 600...の時点で確率分布が変化している。変化検知とはこの横軸Timeが200, 400, 600...の時点での変化を捉えることである。

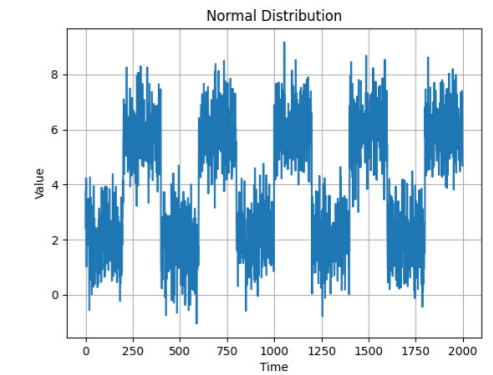


図2 正規分布の平均値を200系列毎に変化させたグラフ

図2のデータに2.関連技術で述べた山縣 et al. (2011) を適用した場合を考える<sup>(3)</sup>。データは正規分布に従うので横軸Timeが0から199までの区間において管理限界値を設定しこの区間を正常区間とした場合、横軸Timeが200から399までの区間は0から199までの区間と比べ平均値が異なる。先に設定した管理限界値を超えるデータが発生しているのが異常が発生している区間となる。山縣 et al. (2011) による異常検知は異常の有無や異常が発生している区間を捉える技術であり、本論文における変化検知はデータがある確率分布に従う場合、図2の横軸Timeが200, 400, 600...の時点で異なる確率分布になった時点を検出する技術である<sup>(3)</sup>。

まとめると変化検知は異常となっている区間の始まりやデータ部位を見つけた問題と捉えることが出来る。これを異常部位検出 (discord discovery) と呼ぶこともある<sup>(7)</sup>。

#### 3.2 関連技術が苦手とする問題例

最初に時系列データが正規分布に従わない場合の2.関連技術の異常検知と本論文における変化検知について論じる。図3は横軸Timeが200系列毎に自己回帰モデルのパラメータ $\mu$ が $\mu=2$ と $\mu=6$ の間で変化する。

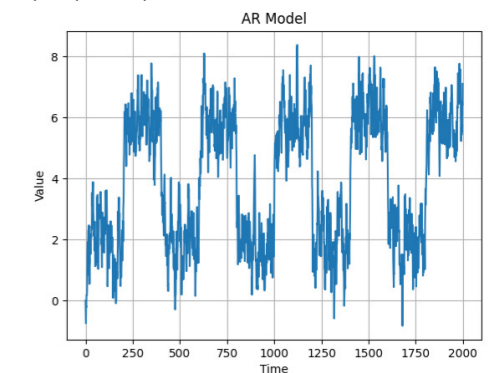


図3 自己回帰モデルの平均値を200系列毎に変化させたグラフ

山縣 et al. (2011) はデータの確率分布が正規分布であることを想定した異常検知であるので正規分布以外の時系列データに対して適用することは想定されていない<sup>(3)</sup>。一方、本論文における変化検知はデータの確率分布に寄らず適用可

能である特徴を持つ。

木村 et al.(2016), 青田 et al.(2024) はデータの確率分布を限定する手法ではなく、複雑なデータに対しても高精度な異常検知が行える<sup>(5)</sup>。しかし異常検知を行うためにはデータを学習し学習モデルを生成する必要がある。一方、本論文における変化検知はデータを学習し学習モデルを生成する必要はない。つまり時系列データに対してデータを学習する時間を要することなく、すぐに変化検知を実行できるのが特徴である。

### 3.3 変化検知アルゴリズム

本節ではThe 39th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI) で採択された変化検知技術について平易な説明を試みる。内容の詳細についてはSuzuki et al.(2025)を参照されたい<sup>(6)</sup>。

#### 処理手順(Algorithm)

1. 時系列データのスライド窓によるベクトルデータ化
2. 変化を検出したい時刻tの前後のベクトルデータを●, Xとする
3. Xから●への差分ベクトルを求める
4. 差分ベクトルを大きさ1で正規化
5. Rayleigh Scoreで偏りRを計算
6. ●からXへの差分ベクトルを求める
7. 差分ベクトルを大きさ1で正規化
8. Rayleigh Scoreで偏りR'を計算
9. RとR'で大きい方を出力

図4 変化検知アルゴリズム

図4は変化検知技術の処理手順(アルゴリズム)である。以下に図を交えながら説明する。

図5は変化検知アルゴリズムへ入力する時系列データの例である。グラフは時刻tにおけるデータ値ξを表す。この例では時刻t=100、データ値ξがPの前後でデータの確率分布が変化した。つまり変化検知アルゴリズムが検出すべき変化が発生した。

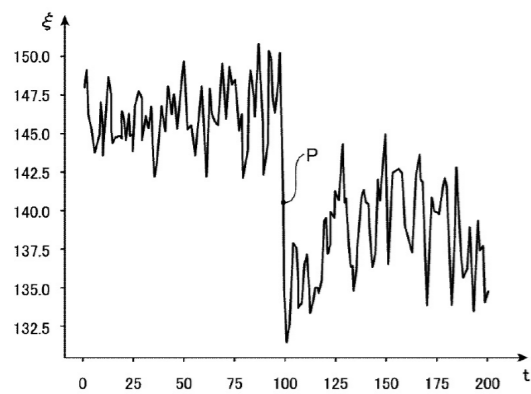


図5 変化検知アルゴリズムへ入力するデータ例

図6は時系列データをスライド窓によりベクトルデータ化する様子である。隣接するM個のデータをM次元のベクトルとして抽出する。スライド窓をデータに沿ってスライドすることで複数のM次元ベクトルに変換する。図6はスライド数を1とした例である。本論文の説明では変化検知アルゴリズムのスライド数は1, M=10とする。スライド窓によるベクトルデー

タ化については井手 et al.(2015)を参照されたい<sup>(7)</sup>。

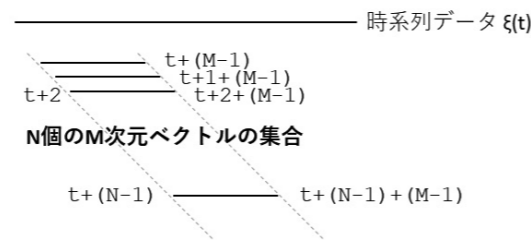


図6 スライド窓により時系列データをベクトルに変換

本節の以下に使用する図は説明を容易にするためにM=2の場合とする。図7はM=2として図6の時系列データからベクトルに変換した複数ベクトルをグラフにプロットした例である。変化検知アルゴリズムに入力されたデータは図5でありデータPの前後で変化が発生している。図7においてはデータPの前後はグラフの●(グラフの右上)とX(グラフの左下)で表される。

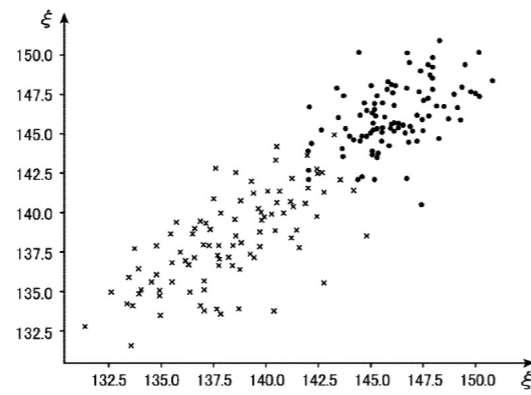


図7 図6のM=2ベクトルをグラフにプロットした例

図8左はデータP前後のベクトルVに対して図7のX(グラフの左下)から●(グラフの右上)へのベクトル(差分ベクトルと呼ぶ)を求めた例である。Xから最も近い●を抽出。その後、k近傍法により複数の●のグループ(クラスター)から重心を求めその重心に対してXから向かうベクトルを計算する。図8左はk近傍法を適用する前の様子である。この得られたベクトルを差分ベクトルと呼ぶ。



図8 確率分布に変化がある時の差分ベクトルの取得と正規化の様子

図8中央は得られた複数の差分ベクトルの様子である。ベクトルの向きと大きさは異なる。次に差分ベクトルの正規化処理を行い大きさ1に変換する。図8右は正規化後の差分ベクトルの様子である。図8は分かりやすく説明するためにM=2とし半径1の円周上に分布する様子を示す。実際の変化検知アルゴリズムはM=10なので次元数10の超球面上に分布する。

図9は図8に対して変化検知アルゴリズムへ入力する時系

列データに図5のデータPの前後の様な確率分布の変化がない場合の差分ベクトルの正規化後の様子である。差分ベクトルの方向は偏りが小さく正規化後の複数の差分ベクトルは円周上に均一に近い形で分布する。



図9 確率分布に変化がない時の差分ベクトルの取得と正規化の様子

図10は、図9までに説明した内容を、今度は図7の●からXに対して実施し差分ベクトルを求める手順を示したものである。つまり図8の説明と同じ処理を●からXに対して行う。



図10 ●からXに対して差分ベクトルの取得と正規化

複数の正規化後の差分ベクトルの分布の偏りはそれぞれ図8の場合と図10の場合で算出する。算出方法はレイリースコア(Rayleigh Score)を用いた<sup>(9)</sup>。レイリースコアは正規ベクトルが超球面上において分布が均一(一様)である場合にはゼロに近い値になり分布に偏りがある場合には正の大きな値になる<sup>(9)</sup>。このためレイリースコアの大きさを評価することで時系列データに変化があったか否かを判定することが可能となる。図8と図10でそれぞれ算出されるレイリースコアを比較して、値が大きい方のレイリースコアを最終的な変化検知のスコア値として選択する。

## 4. 実験結果

実際の産業機械の内部によく使用されているタイミングギアの劣化が発生したシナリオを想定し、産業機械に取り付けられた振動センサーの値を変化検知アルゴリズムへ入力したときの実験結果について説明する。

図11はタイミングギアの模式図である。タイミングギアは二つ、それぞれG1とG2がかみ合うようになっている。タイミングギアの劣化は摩耗、傷、欠け、異物の付着等によって起こる。これらにより振動が発生もしくは変化するため、タイミングギアから発生する振動の変化を検出することでタイミングギアの故障や異常を検出することが出来る。

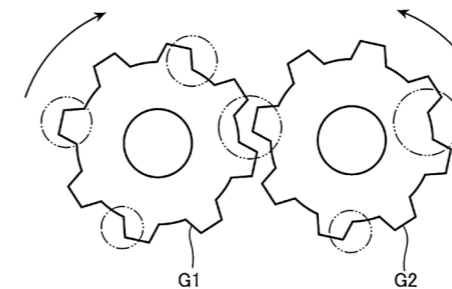


図11 産業機械のタイミングギアの例

図12はあるサンプリング周期でタイミングギアG1およびG2から発生する振動をセンサーにより取得した振動レベルのデータである。図11のタイミングギアG1およびG2の○で囲ったギア歯の箇所にも異物を付着してタイミングギアの劣化を模擬した。

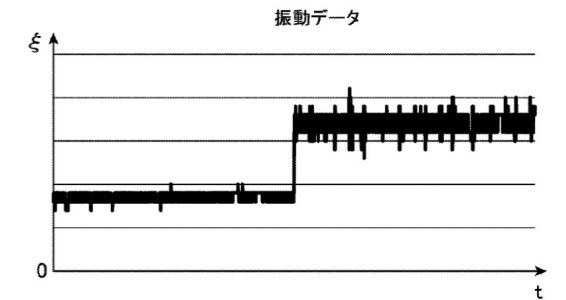


図12 タイミングギアの振動データ

図13は変化検知アルゴリズムに図12の振動データを入力し算出した変化スコアの推移である。図12の振動データの振動レベルが大きく変化した時刻に変化スコアが最大になっている。

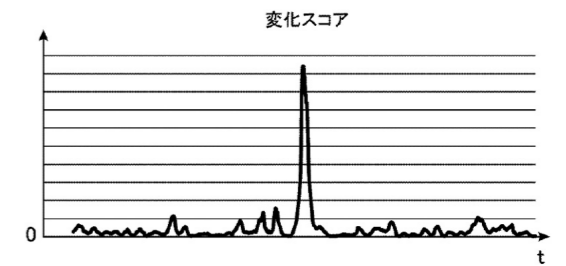


図13 タイミングギアの変化スコア

## 5. 複雑なデータへの適用例

本論文の変化検知技術をYamanishi et al. (2002)が実データを使った変化検知の標準問題として実施した株式指数(TOPIX, Tokyo stock price index)に対して適用してみる<sup>(10)</sup>。取引市場においてはたびたび潮目と呼ばれる取引参加者における投資行動の変化が確認されている。図14の様な東証株価指数(TOPIX)の日次の終値の階差を取った後、変化検知アルゴリズムへ入力する。従来の株価の研究においては、株価の変動(ボラティリティ、階差の大きさ)そのものが注目されることが多いが、変化検知アルゴリズムはこれらの変動の大きさをそのまま変化の大きさとして扱うわけではない(図15)。

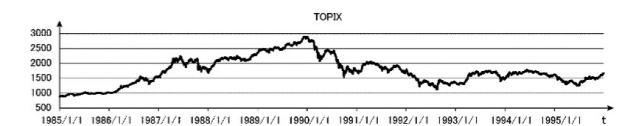


図14 1985年から1995年の東証株価指数(TOPIX)の日次の終値

株式市場における潮目と呼ばれるイベントは多々あるがここではよく知られたバブル景気を取り上げる。バブル景気

の期間は1986年12月から1991年2月までと言われており、岩田 (2005)で示されている<sup>(11)</sup>。この示された日付の近傍で図15を見ると変化スコアが1986年11月5日と1990年12月20日でスコア値が大となっており、変化検知アルゴリズムが変化を検出したことを表している。これは実証研究的な株価研究における一般的なバブル景気の開始時期よりも株式市場の変化を早く検出し、一般的なバブル景気の終了時期よりも株式市場の変化を早く検出していることを示している。

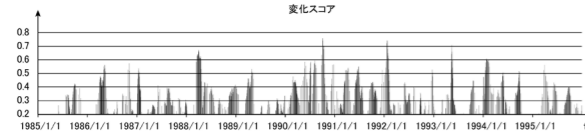


図15 東証株価指数(TOPIX)の変化スコア

株式指数 (TOPIX, Tokyo stock price index) の変化検知は図12のタイミングギアの振動データよりも複雑でありデータの確率分布を事前に把握することは困難であるにも関わらず変化検知アルゴリズムは未知の確率分布に従うデータに対して変化を検出した。このことから筆者らは本論文の変化検知技術は複雑な実世界における産業機械のセンサデータに対しても異常となる変化を検出できる可能性があると考えられる。

## 6. 異常検知技術への応用

### 6.1 他の手法との共存

本論文の変化検知アルゴリズムはそれ単独でも使用できるがアズビルがすでに保有している数々の異常検知技術と併存可能な点について述べる。

図16は村上 et al. (2020)において複数の予測モデルを並列的に使用することで予測精度が向上可能であることを示す概念図である<sup>(12)</sup>。この例では図の下から入力される燃料ガスの使用量 (青色でプロットされたグラフ) をHeuristic, Linear Model, Nonlinear Modelの3つの予測器に分配し、それぞれの予測器は燃料ガス容器が空になる日時を予測する。予測情報利用者の効用の中身により、1) 容器内の燃料ガス切れリスクを最大限回避したい場合は一番早い日時でガス切れを予測した予測モデル結果を採用、2) 総合的に容器内の燃料ガス切れを予測したい場合は3つの予測器が出力するガス切れ日時の平均を計算し採用、などが考えられる<sup>(13)</sup>。採用された燃料ガス容器が空になる日時を図16の図の上のグラフ (赤色でプロットされたグラフ) に出力する。

この考え方をアズビルの異常検知に取り入れると、図16の下のグラフは異常を検出したい対象機器の振動などのデータが該当する。図中のHeuristic, Linear Model, Nonlinear Modelは本論文の変化検知アルゴリズムおよび山縣 et al.(2011), 木村 et al.(2016), 青田 et al.(2024)などが該当する<sup>(3) (5) (6)</sup>。複数の異常検知および変化検知アルゴリズムにより検出された結果を多数決などの方法により統合し図16の図の上のグラフに出力する。この時、グラフの形は図16と異なることが予想される。

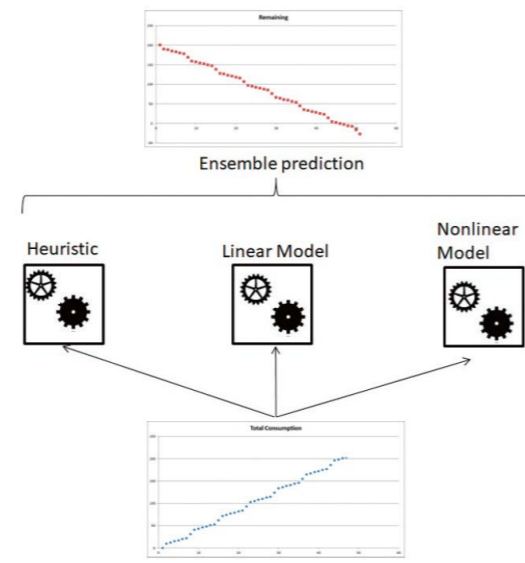


図16 アンサンブル学習の概念図

### 6.2 本手法の採用容易性

論文の変化検知技術についてアズビルの産業機械への適用やアズビルが保有する異常検知ソリューションへの採用の容易性について述べる。

最初にプログラムの実装について、仮に図4の処理手順 (アルゴリズム) をPythonでプログラミングした場合Pythonの標準に対して数値計算拡張モジュールNumPyのライブラリ使用を要求する程度で実行が可能である。つまり最新のAI処理で頻繁に利用され深層学習に代表されるニューラルネットワークを使うためのライブラリは不要である。このことからプログラムのバイナリコードを産業機械のローカルCPU上で実行する際に気になるROM化されるファイルサイズは深層学習による異常検知技術と比べ非常に小さなファイルサイズとなり、小規模な計算機資源である産業機械のローカルCPUで実行するのに適している<sup>(1)</sup>。

次にプログラムの実行処理時間について、Suzuki et al. (2025)は本論文の変化検知技術と他の手法の比較を行った<sup>(14) (15) (16) (17)</sup>。代表的な他の4つの手法との間で同一の産業機械のセンサデータに対して各アルゴリズムがデータ上の異常となる変化を検出するまでの処理時間を計測した<sup>(8)</sup>。その結果、本論文の変化検知技術が0.5秒で処理が終了するのに対して最も処理が軽いHooi et al. (2019)は1.1秒を要し、最も処理が重いニューラルネットワークを使ったChang et al. (2019)においては216秒を要した<sup>(15) (17)</sup>。つまり本論文の変化検知技術は他の4つの手法と比較して最も高速に処理できた。よって本論文の変化検知技術は同一計算機資源で実行した他の4つの手法と比べて処理時間が短い (処理が軽い)。このことからより多くのセンサデータに対して異常状態となる変化を検出することが可能となる。

## 7. おわりに

本論文の変化検知手法はデータに対する事前の学習が不要であり、データの確率分布も特に限定しない。処理速度は比較した他の変化検知手法と比べ高速であり、アルゴ

リズムの実行においては深層学習では必須となるGPUなど特別な計算機資源は必要としない。これらの特徴から他の異常検知と並列的に組み合わせることが容易である。

本論文の変化検知手法は日本国と米国特許出願済みであり、今後は他の異常検知技術と組み合わせるなど、実用ソフトウェアへ向け引き続き技術開発を行っていきたい。

### <参考文献>

- (1) 曾我部 東馬, 曾我部 完, Pythonによる異常検知, 2021年, オーム社
- (2) 鎌田久美, 堀田継匡, 「人工知能分野及びロボティクス分野の国際会議における国別発表件数の推移等に関する分析」, 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術予測・政策基盤調査研究センター, 2023年5月, <https://nistep.repo.nii.ac.jp/records/6846>
- (3) 山縣謙一, 黒澤敬, 村上英治, 製造データの超効率的解析による高収益精算への挑戦, azbil Technical Review, 2011年, Vol.52, pp.76-81, アズビル株式会社
- (4) Thomas P.R., Statistical Methods for Quality Improvement (Wiley Series in Probability and Statistics), 2013, Wiley.
- (5) 木村大作, 山縣謙一, IoT時代のスマート設備管理を目指す創業ビッグデータを活用したオンライン異常予兆検知システムの開発, azbil Technical Review, 2016年, Vol.57, pp.9-15, アズビル株式会社
- (6) 青田直之, 川瀬健, 日暮優, 小川勇馬, 藤原圭祐, オンライン異常予兆検知システムの大規模プラント向け拡張機能の開発, azbil Technical Review, 2024年, Vol.65, pp.21-25, アズビル株式会社
- (7) 井手 剛, 杉山 将, 異常検知と変化検知 (機械学習プロフェッショナルシリーズ), 2015年, 講談社
- (8) Suzuki, I.; Hara, K.; and Murakami, E., Hubness Change Point Detection, 2025, The 39th AAAI Conference on Artificial Intelligence(AAAI).
- (9) Rayleigh, L., On the problem of random vibrations, and of random flights in one, two, or three dimensions.1919, Philosophical Magazine, 37(220): 321-347.
- (10) Yamanishi, K.; and Takeuchi, J., A unifying framework for detecting outliers and change points from nonstationary time series data, In Proceedings of the Eighth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2002, 341-349, KDD.
- (11) 岩田規久男, 『日本経済を学ぶ』, 2025年, 筑摩書房〈ちくま新書〉
- (12) 村上英治, 土岐爽真, 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, azbil Technical Review, 2020年, Vol.61, pp.24-28, アズビル株式会社
- (13) Samuelson, P.A., Foundation of Economic Analysis, 1947, Harvard Univ. Press, Cambridge.

- (14) Liu, S.; Yamada, M.; Collier, N.; and Sugiyama, M., Change-point detection in time-series data by relative density-ratio estimation, 2013, Neural Networks.
- (15) Hooi, B.; Faloutsos, C., Branch and Border: Partition-Based Change Detection in Multivariate Time Series, 2019, In Proceedings of the 2019 SIAM International Conference on Data Mining (SDM).
- (16) Alanqary, A.; Alomar, A.; and Shah, D., Change Point Detection via Multivariate Singular Spectrum Analysis. In Ranzato, M.; Beygelzimer, A.; Dauphin, Y.; Liang, P.; and Vaughan, J. W., eds., Advances in Neural Information Processing Systems, 2021, volume 34, 23218-23230. Curran Associates, Inc.
- (17) Chang, W.; Li, C.; Yang, Y.; and Póczos, B., Kernel Change-point Detection with Auxiliary Deep Generative Models. In 7th International Conference on Learning Representations, ICLR 2019, New Orleans, LA, USA, May 6-9, 2019, 1-14. OpenReview.net.

### <著者所属>

村上 英治	アズビル金門株式会社 経営企画部
鈴木 郁美	山形大学 理学部
原 一夫	山形大学 理学部

# コンテナ化技術を活用したsavic-net™ G5システムの 仮想化基盤技術の開発

## Development of Virtualization Infrastructure Technology for the savic-net™ G5 System Utilizing Containerization Technology

東出 功一  
Kouichi Higashide

キーワード  
デジタルツイン, 現場品質の向上, savic-net™ G5

アズビルのビルディングオートメーションシステム(savic-net™ G5)を構成する制御コントローラをコンテナデバイス化し、ホストマシン上で現場のエンジニアリング設定に基づいたシステム構築や制御動作を再現可能な仮想化基盤技術を開発した。この基盤技術により、施工現場でのシステム立ち上げ前に、バックオフィスや工場でのステージング環境で制御動作を事前確認することができ、エンジニアリングの効率化や現場でのエンジニアリング品質の向上に加え、お客様のデジタルツイン環境と連携し机上の制御シミュレーション結果に基づいた新しい価値提案も期待できる。

We have developed a virtualization infrastructure technology that containerizes the controllers comprising Azbil's building automation system (savic-net™ G5) and makes it possible to reproduce system construction and control operations based on on-site engineering settings on a host machine. This technology allows for the pre-verification of control operations in a staging environment at the back office or factory before system startup at the construction site. It not only improves engineering efficiency and enhances on-site engineering quality but also enables collaboration with customers' digital twin environments, providing opportunities for new value propositions based on desk control simulation results.

### 1. はじめに

近年、ビルディングオートメーションシステムは、建物の効率的な運用や付加価値の向上において重要な役割を担っている。とりわけ、大規模施設や高度な自動制御を必要とする環境では、各種デバイスの連携や複雑な制御プログラムが求められるため、エンジニアリング作業は一層高度化・複雑化している。そこで、現場における作業効率の向上や、エンジニアリング品質の強化といった課題解決を目指し、仮想化技術を活用したsavic-net™ G5の仮想基盤技術を開発した。

本技術は、従来のエンジニアリングプロセスにおける制約を克服し、仮想環境上でのデバッグ、検証、調整を可能にすることで、作業効率の向上と現場での手戻り防止を実現できる。また、クラウド環境での運用に対応することで、関係者間での情報共有を強化し、エンジニアリングプロセス全体のデジタル変革を推進する。

本論文では、開発した仮想基盤技術の技術的背景、解決を目指した課題、特徴的な要素技術、および期待される効

果について詳述する。

### 2. savic-net™ G5のシステム構成

弊社が提供するビルディングオートメーションシステム(以下、BAS)の主力製品である savic-net™ G5は、図1に示すような各種制御コントローラおよびネットワークデバイスによって構成されている。

savic-net™ G5システムにおける制御コントローラは、スーパーバイザリデバイスである統合コントローラ、アドバンスドコントローラやジェネラルコントローラなどのプライマリデバイス、およびVAVコントローラやFCUコントローラに代表されるセカンダリデバイスに分類される。ネットワーク上には、統合コントローラが管理する履歴データを大容量で蓄積するためのネットワークアタッチドデバイスや、ビル制御のサブシステムを管理する他社製ネットワークデバイスが接続される場合もある。

savic-net™ G5に接続されるプライマリデバイスおよびセカンダリデバイスの台数は、建物の用途や顧客要求により異

なる。大型建物や高度な自動制御を必要とする案件では、統合コントローラが最大20台、プライマリデバイスが1,000台規模となり、さらにプライマリデバイス1台あたりに最大70台のセカンダリデバイスが接続される場合もある。これらの制御デバイスは階層的に管理され、各種通信プロトコルを介してシステム全体として統合されている。

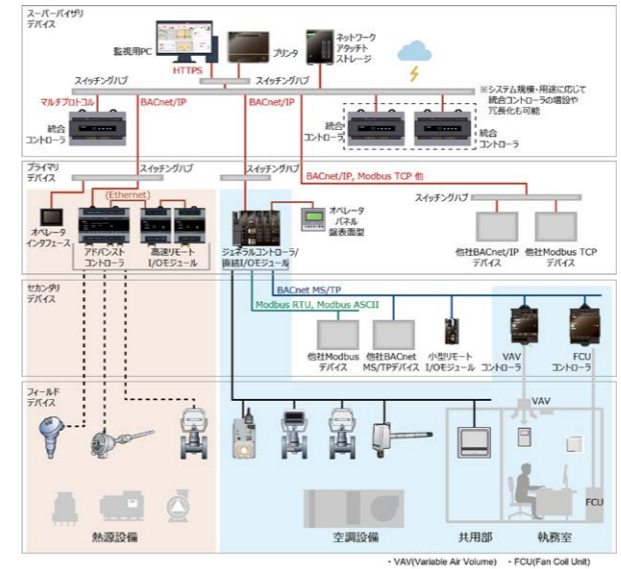


図1 savic-net™ G5システム構成図

### 3. エンジニアリング作業とその課題

システム構築に際しては、各建物の設備構成や監視・制御仕様に合わせて、統合コントローラ・プライマリデバイス・セカンダリデバイスに必要な制御プログラムの作成、デバッグ、機器パラメータ設定、通信アドレス設定などのエンジニアリング作業が必要となる。エンジニアリング作業は、一般的に図2に示すような3つのステップで実施される。

#### ステップ1:バックオフィスでの作業工程

顧客仕様に基づき、弊社のエンジニアリングツール PC Engineering Tool for savic-net G5<sup>(1)</sup>(以下、エンジニアリングツール)を用いて、統合コントローラ、プライマリデバイス、セカンダリデバイスのエンジニアリングデータを作成し、各デバイス単体での制御動作確認を行う。

#### ステップ2:工場でのステージング工程

工場側において、ステップ1で作成したエンジニアリングデータを用い、現場のシステム環境を再現したステージング環境でシステム全体の動作検証を実施する。検証完了後、調整済みのエンジニアリングデータが現場へ送付される。

#### ステップ3:現場調整工程

現場において、統合コントローラ、プライマリデバイス、セカンダリデバイスが稼働可能な段階で、順次エンジニアリングデータを書き込み、実際の設備機器との単体動作確認を行う。すべての実機が稼働可能となった時点で、システム全体としての制御動作確認を実施する。

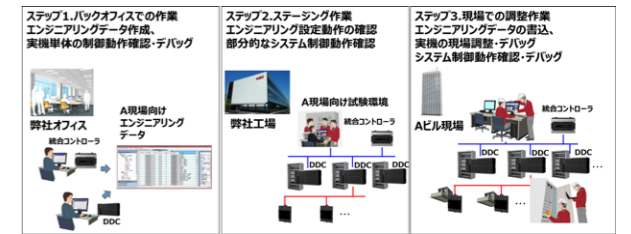


図2 エンジニアリングの全体フロー

近年、深刻な人手不足が続く一方で、顧客からの制御要求は年々複雑化・高度化している。その結果、ソフトウェアの作成や制御デバッグに多くの時間と工数を要する状況となっている。この問題を解決するためには、現行のエンジニアリングプロセスにおける二つの課題を克服する必要がある。

#### 3.1 工場ステージング作業における検証の限界

本来であれば、工場内に現場と同等規模のシステムを構築し、単体試験からシステム全体の制御動作までを事前に確認したうえで、検証済みのエンジニアリングデータを現場に送付することが理想である。しかし、使用可能な実機数や検証設備の設置スペースには制約があり、現場と同一規模のシステムを再現することは現実的に困難である。仮に同規模の環境を構築できたとしても、電源・配線・ネットワークなどの整備には多大な工数とコストを要する。そのため、実際の工場ステージングでは、システムを部分的に分割あるいは抜粋し、限られた実機環境を使い回して動作確認を行っている。しかし、この方法では、検証環境と実際の現場環境との間に差異が生じる可能性が高く、工場で正常に動作していた制御が現場では動作しないといった不具合を引き起こすリスクが存在する。

#### 3.2 現場調整作業における手戻りリスク

システム全体で協調して実現する制御や、複数デバイス間でデータ連携を行う高度な制御の確認・デバッグは、現場に納入された実機がすべて稼働した後にのみ実施できる。このような後工程で不具合が発見された場合、修正には多大な手戻りが発生し、作業工数の増加だけでなく、担当者の身体的・心理的負担も大きくなる。さらに、システム全体の動作を確認するためには多くの関係者間での調整が必要であるが、全員を同時に現場へ集めることは難しく、調整作業の遅延につながる要因となっている。

#### 4. エンジニアリング作業における課題解決の目標

前節で述べた二つの課題を解決するために、以下の価値提供を目指した。

##### 4.1 「工場ステージング作業における検証の限界」の対応目標

本課題の解決策として、図3に示すようなすべての実機の設定および制御動作を1台のPC上で確認できるシミュレータ環境を構築することを目指した。これにより、検証用スペースおよび実機の準備台数を削減できるとともに、配線・立ち上げ作業も最小限に抑えられる。さらに、シミュレータ上で実施可能な検証項目を増やすことで、より安定した品質のエ

エンジニアリングデータを現場へ提供できるようになる。ただし、実際の入出力動作を確認するには実機による検証が必要な場合もある。そのため、ステージング環境においては、実機と仮想デバイスをシームレスに接続可能であることが必須要件となる。

#### 4.2 「現場調整作業における手戻りリスク」の対応目標

本課題の解決策として、現場のシステム構成に即したシミュレータ環境を用い、早期段階から制御デバッグを実施可能とすることを目指した。これにより、システム全体の品質を安定的に確保し、現場での手戻りを最小化できる。さらに、シミュレータ環境を図4に示すようなクラウド上に構築し、リモートでの利用を可能とすれば、関係者が場所を問わず情報共有を行える。これにより、原因分析や修正方針の検討を迅速化し、作業効率の向上が期待できる。

これら二つの課題を解決するために求められるシミュレータ環境は、以下の要件1~5をすべて満たす必要がある。

- 要件1:実機デバイスの動作を忠実に再現できること
- 要件2:現場ネットワークを忠実に再現できること
- 要件3:複数デバイスを同一シミュレータ環境上で再現できること
- 要件4:シミュレータ環境がオンプレミスおよびクラウドの両方に対応していること
- 要件5:仮想デバイスと実機デバイスを混在させて動作可能であること

従来の仮想化技術では、要件1~3を完全に満たすことができなかった。そこで、これらの課題を克服し、現場構成に応じて savic-net™ G5システムを容易に再現可能とする「シミュレータ基盤技術」を新たに開発した。

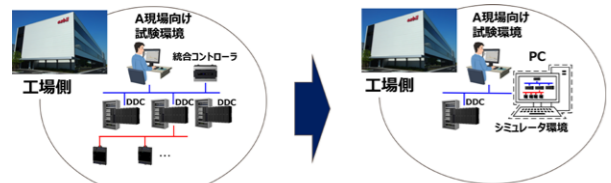


図3 「工場ステージング作業における検証の限界」の解決策

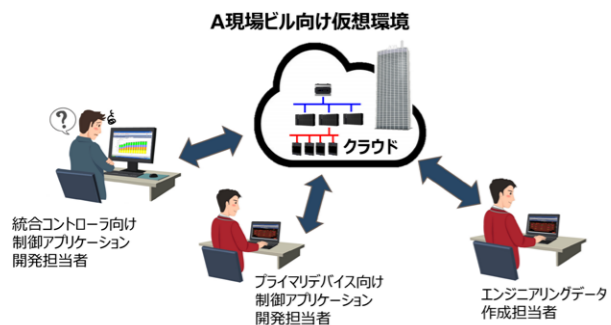


図4 「現場調整作業における手戻りリスク」の解決策

### 5. シミュレータ基盤技術「G5シミュレータ」

本技術「G5シミュレータ」は、「3. エンジニアリング作業における課題解決の目標」で示した5つの技術要件をすべて満たすことができる。本章では、その中でも特に特徴的な

3つの要素技術について、具体的な動作事例を基に説明する。

#### 5.1 デバイスの完全再現化技術

現場で稼働している実機デバイスを仮想デバイスとして動作させるためには、「物理世界での挙動」を論理的に再現する必要がある。ここでいう「物理世界での挙動」とは、図5に示すような実機内部の処理動作を指す。実機におけるこれらの重要な動作を仮想環境上で正確に再現することが、本技術「デバイスの完全再現化技術」である。従来の仮想化技術では、実機に搭載されたアプリケーションソフトウェアをクラウドやオンプレミスのホストPC上で動作させることが主であり、ハードウェアレベルの挙動再現は対象外であった。これに対し、本技術では「実機そのものをまるごと仮想化する」という新しい発想に基づいて開発を行った。しかし、実機の物理的挙動はハードウェアに強く依存しているため、その再現には多くの技術的課題が存在した。以下に、本技術の具体的な再現事例を示す。

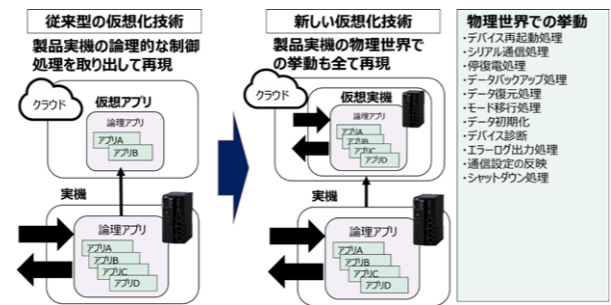


図5 従来型の仮想化技術と新しい仮想化技術の違い

##### 5.1.1 デバイスの再起動処理の再現

実機デバイスでは、再起動の原因となる物理的事象によって初期化（イニシャル）動作が異なり、この動作は単体制御のみならずシステム全体の制御動作にも影響を与える。したがって、制御動作を網羅的に検証するためには、再起動要因となる物理事象を完全に再現する必要がある。仮想デバイスでは物理入力を直接検出できないため、ユーザが指定した物理入力を仮想的に与える機構を開発し、実機と同一のイニシャル動作を再現可能とした。

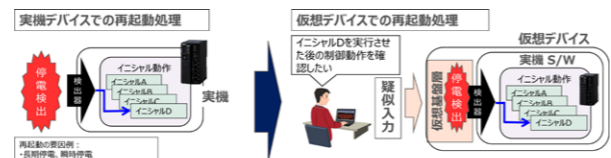


図6 デバイスの再起動処理の再現事例

##### 5.1.2 セカンダリデバイスとの通信処理の再現

savic-net™ G5システムでは、IP通信に加え、特殊な物理層を介した通信が行われている。一方、仮想環境では物理層が存在しないため、すべてをIP通信上で再現する必要がある。そこで、本技術では、実機で行われるシリアル通信をIP通信上で仮想的に再現する仕組みを開発した。この方式は通信プロトコルに依存せず、特殊物理層を用いるあらゆる

セカンダリデバイスとの通信に対応可能である。

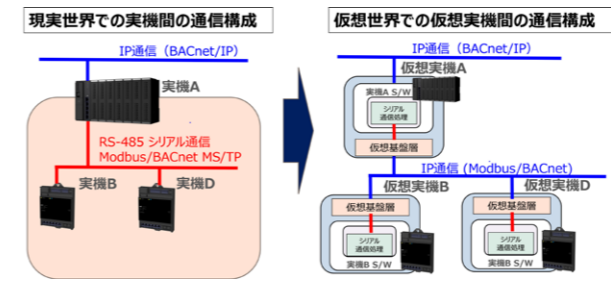


図7 セカンダリデバイスとの通信処理の再現事例

#### 5.2 ネットワークの完全再現化技術

「ネットワークの完全再現化技術」は、現場の物理ネットワーク構成を仮想環境上で正確に再現する技術である。

実際の現場では、コントローラの設置環境や役割によってネットワークシステムが階層化され通信経路や順序も複雑である。本技術を用いることで、図8に示すようなフラットな仮想環境上においても、物理ネットワークの階層構造、通信経路、通信順序を忠実に再現することができる。

本技術の動作事例として、「VAVコントローラのエンジニアリング」を以下に示す。現場では、図9に示すようにVAVコントローラとDDC (Direct Digital Controller) は特殊物理層の通信方式で接続されており、PC上のエンジニアリングツールからVAVコントローラへはDDCを経由してアクセスしている。本技術を適用することで、仮想環境上でも現場と同一のツールを使用してエンジニアリングおよび調整作業を実施でき、仮想環境で設定ミスを検出することが可能となる。さらに、エンジニアリング後のDDC-VAV間通信による制御動作も仮想環境上で確認できるため、現場での手戻り防止に寄与する。

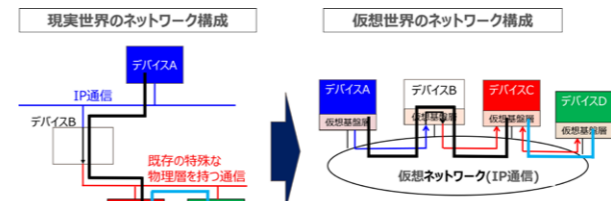


図8 ネットワークの再現化技術の概念

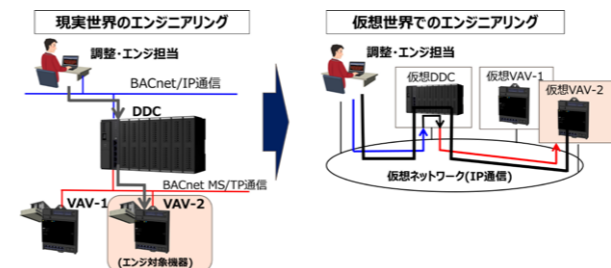


図9 VAVコントローラのエンジニアリングの再現事例

#### 5.3 マルチデバイス動作技術

「マルチデバイス動作技術」は、大量の仮想デバイスをホストマシン上で同時動作させるための技術である。システムを構成するすべてのデバイスを仮想化して同時稼働させる

ためには、CPUやメモリなどのリソース消費を最小限に抑えることが重要となる。

例えば、弊社が受注した超大規模案件では、プライマリデバイスおよびセカンダリデバイスを合わせて約10,000台の実機デバイスが稼働している。従来の仮想化技術では、一般的なPC環境で動作可能なデバイス数は約10台にとどまり、全システムを仮想化するには1,000台以上のPCが必要となる試算であった。

これに対し本技術では、大量の仮想コントローラを効率的に動作させるための新しいコンテナ型仮想化技術を利用した開発を行った。従来方式ではデバイスごとにOSが稼働しリソースを消費していたが、本技術では、図10に示すようにOSを統合化することでCPU・メモリの使用量を大幅に削減し、1台のPCで最大1,000台の仮想デバイスを同時に動作させることを可能とした。

この技術を実現するためには、実機で動作しているソフトウェアをLinuxコンテナとして動作させる必要があった。特にプライマリデバイスでは、組み込み機器に特化したリアルタイムOS (RTOS) 上で動作するアプリケーションおよび通信プロトコルスタックを、Linux環境上で再現することが課題であった。

本技術では、図11に示すようにLinux上でITRON仕様に準拠したリアルタイム動作を可能とするエミュレータを活用し、実機と同等のタスクディスパッチおよび割り込み処理を再現した。さらに、専用通信スタックとの互換性を確保するため、通信プロトコルを中継する「ブリッジプログラム」を新たに開発し、実機同様の通信処理を実現した。

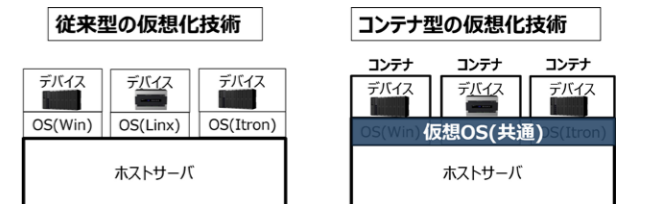


図10 従来型の仮想化技術とコンテナ型の仮想化技術の違い

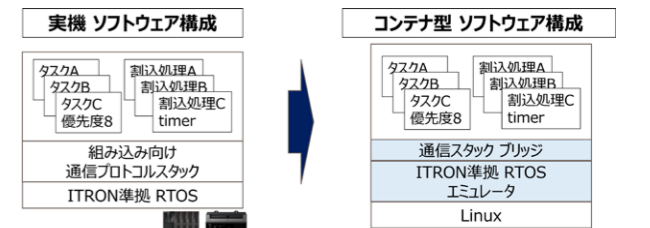


図11 開発したコンテナ型のソフトウェア構成

### 6. 「G5シミュレータ」導入による効果

本技術の導入により、以下の技術的效果及び業務改善効果が期待される。

- (1) バックオフィスにおけるデバッグ作業の効率化
  - 実機を物理的に使用せず、仮想環境内で複数系統の制御デバッグ作業を同時に実行することが可能となり、デバッグ作業全体の効率化を実現する。

(2) 工場における作業コストの削減および検証環境の省スペース化

仮想ステージング環境において、従来は実機で確認する必要のあったシステム制御動作を確認できるようになり、実機の立ち上げやネットワーク配線にかかる作業コストの最小化および検証環境の省スペース化が達成される。

(3) 現場調整前の事前確認による品質向上および手戻りの防止

バックオフィスや工場においては確認できなかった複雑で高度なシステム制御やデバイス間の連携動作を、現場での調整作業前に仮想環境内で確認することができ、安定した品質の作り込みが可能となる。これにより、後工程における現場での手戻りを効果的に防止する。

(4) クラウド環境におけるシステムの可視化および利害関係者間の情報共有の強化

仮想システムをクラウド環境上で可視化できることにより、地理的な制約を受けることなく、関係者間でシステム情報の共有が容易となる。これにより、利害関係者間での情報共有が一層強化され、問題解決の迅速化が期待される。

## 7. 今後の目標

本技術は、エンジニアリングにおける課題解決を目的とするだけでなく、BIM (Building Information Modeling) データを活用したデジタルツイン技術の中核基盤として、更なる発展が期待される。お客様のビルの設備構成情報を基にシミュレーションを行う「設備シミュレータ」や、ビルの室内環境を再現する「室内シミュレータ」との連携により、空調設備や熱源設備の構成に基づいて、消費電力やゾーンごとの熱負荷を予測・計算することが可能となる。また、ビルの設計図や躯体情報を基に、室内の気流や温度分布を再現することも可能となり、これにより建物全体のデジタルツインを実現するためのシミュレーション基盤の構築が期待できる。このデジタルツイン環境を活用することで、ビル全体の現在の制御状態の可視化に加え、ビル固有の構成に基づいた高精度なシミュレーション結果による将来の制御予測も可能になるのではないかと考えている。

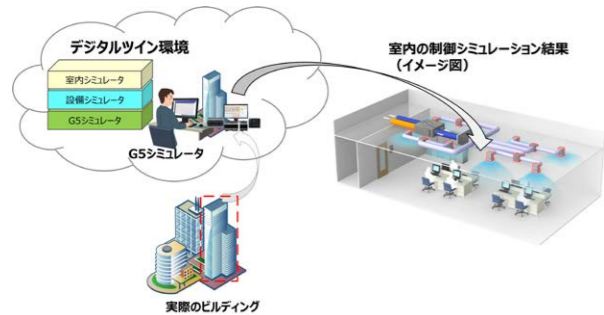


図12 デジタルツイン環境への活用

## 8. おわりに

本論文では、savic-net™ G5システムに基づく仮想化技術「G5シミュレータ」の技術的背景や具体的な特徴を示し、エ

ンジニアリング業務における課題解決にどのように貢献できるかを説明してきた。G5シミュレータは、デバイスの再現性、ネットワークの仮想化、複数デバイスの動作シミュレーションを実現する新しい仮想化基盤技術であり、お客様の施設に合わせたシミュレーション環境との柔軟な連携が可能である。この技術を活用することにより、より多様なシステムとの統合が進み、お客様のビル環境における高精度なシミュレーションを実現し、お客様の課題解決に貢献できることを期待している。

### <参考文献>

- (1) 小柳貴義, 勝見智行 他:ビルディングオートメーションシステムのエンジニアリング作業効率化に貢献する新しいエンジニアリングツール, azbil Technical Review, 2017年, pp.51-56, アズビル株式会社

### <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、富士フイルムビジネスソリューション株式会社の登録商標です。  
 Modbus is a trademark and the property of Schneider Electric SE, its subsidiaries and affiliated companies.  
 Linuxは、Linus Torvalds 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。  
 ITRONは、Industrial TRONの略称です。TRONは、The Real-time Operating system Nucleusの略称です。

### <著者所属>

東出 功一 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



azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2026年4月発行号

発行日 2026年4月1日(通巻67号)  
 発行責任者 高橋美加子(アズビル株式会社 コミュニケーション部広報グループ)  
 編集委員会 委員長：鹿島亨  
 委員：早川勲、野見山隆、衣笠静一郎、松崎亮佑、山縣謙一、久保田耕、宮崎禎子、田原鉄也  
 アドバイザー：梶田徹矢  
 事務局：高石知治  
 発行所 アズビル株式会社 コミュニケーション部広報グループ  
 〒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。  
<https://www.azbil.com/jp/corporate/pr/library/review/>

© 2026 Azbil Corporation All Rights Reserved. Printed in Japan  
 ●本PDFに掲載されている内容の全部または一部について、無断での転載、複製、改変、再配布(電子媒体を含む)を禁止します。  
 ●本PDFに掲載されている名称の中には、各社が商標または登録商標として使用している場合があります。