

アズビル株式会社

〒100-6419
東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル
<https://www.azbil.com/jp/>



azbilグループは環境に配慮した取組みを推進しています。

送付の取消し/変更 ▶



アンケート ▶

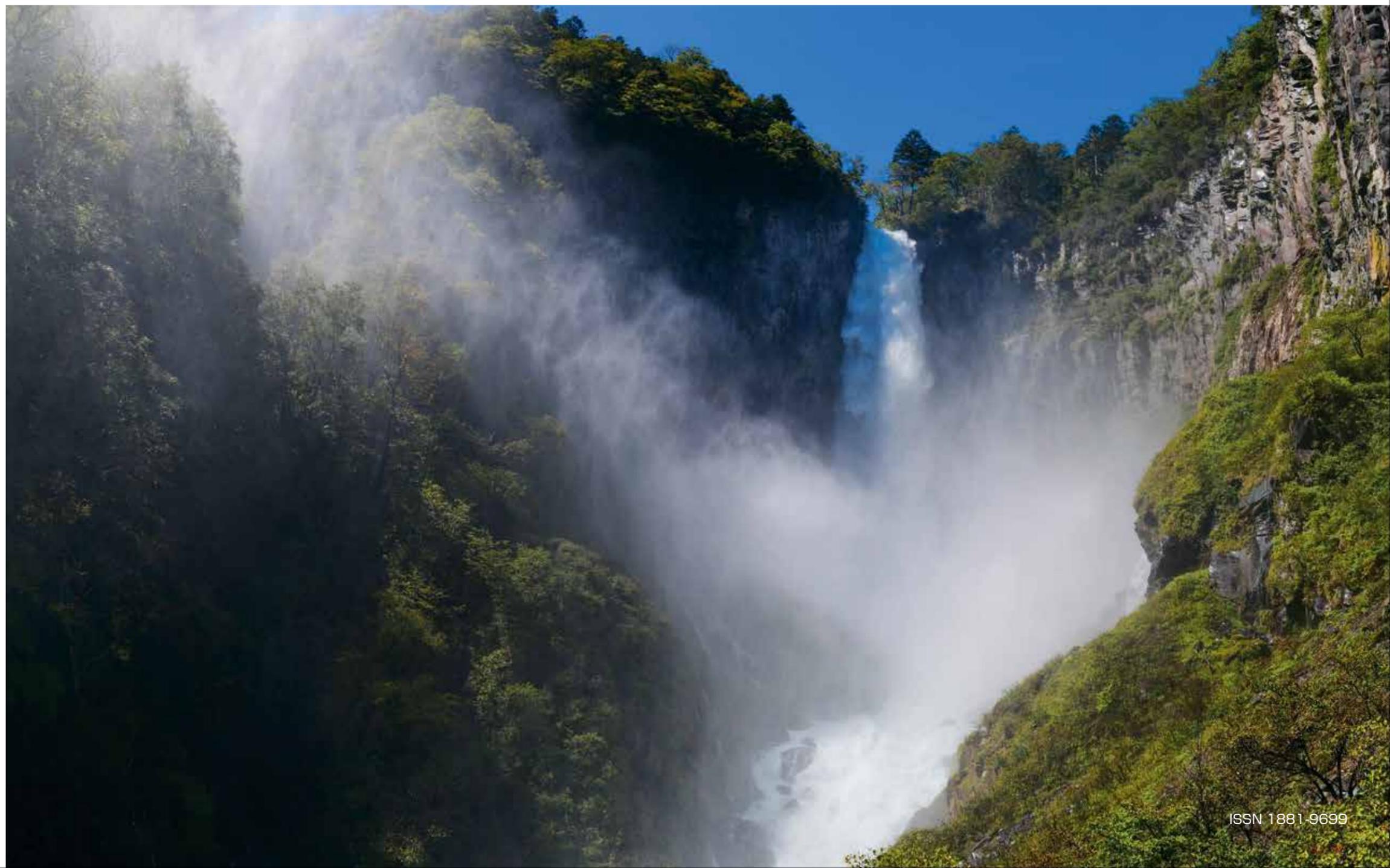


azbil

Technical Review

2024年4月発行号
azbilグループ技術研究報告書 azbilテクニカルレビュー

特集：持続可能な社会に貢献するオートメーション技術



表紙について

2万年前の溶岩の流れがつくった97mもの落差の「流れ」

華厳滝

栃木県北西部に位置する日光市。日光東照宮、日光二荒山神社、日光山輪王寺の二社一寺が世界遺産に登録されていて、世界中からたくさんの方が訪れる観光地としても有名です。長い歴史の中で育まれてきた寺社の重厚な建物は、訪れる人々の心を圧倒します。

しかし、日光の魅力はそれだけではありません。日光市街の北西側に位置する奥日光エリアには、山岳、森林、湖沼、湿原、滝など、豊かな自然の名所が密集しています。

奥日光の自然の中心を成しているのが、標高2486mの男体山です。男体山は2万2000年ほど前から活動を始めた火山で、最初期の溶岩は現在の日光市街まで流れていったこともあったようです。

中禅寺湖ができたのは2万年ほど前で、男体山から噴出した華厳溶岩が谷に堆積し、そこを流れていた川をせき止め、湖が形づくられていったと考えられています。中禅寺湖は深さが最大で163mにも及び、湖面の下にも男体山の山体が隠れています。

華厳滝ができたのは中禅寺湖と同時期です。華厳滝は水をせき止めていた華厳溶岩の壁から中禅寺湖の水があふれ出すこと

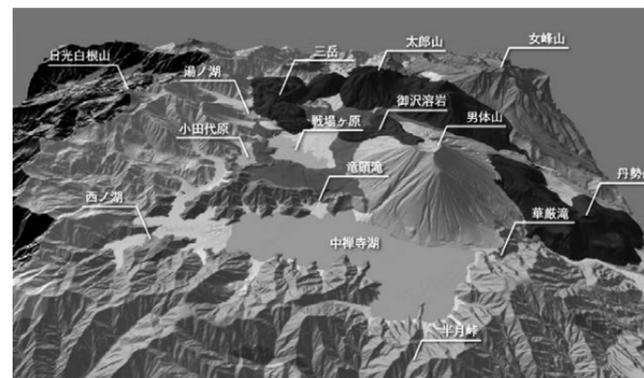
によって出現しました。渓谷につくられた滝らしく、幅約7mもの水流が97mもの落差を一気に落下します。その勇壮な姿から、和歌山県的那智の滝、茨城県の袋田の滝とともに、日本三大瀑布に数えられています。

中禅寺湖と華厳滝は日光開山の祖として名高い勝道上人によって発見されたと伝えられています。勝道上人は766年に現在の輪王寺の源流となる紫雲立寺を創建しました。翌年の767年に二荒山（男体山）の登頂を目指しましたが、残雪や霧に阻まれ断念しました。そのとき、周辺を散策し、中禅寺湖と華厳滝を発見したといわれます。男体山を中心とする奥日光の自然は、現在も信仰の対象として、大切にされています。

溶岩でできた地形は強度が弱いので、長い期間、水が流れ続けることによって浸食され、地形が変化します。華厳滝も2万年にわたって絶え間なく水が流れることによって、壁面が少しずつ削られていき、1年間で2cmほどの割合で中禅寺湖に近づいています。もっと時が進むと、この風景は大きく変わってしまうかもしれません。

文：荒松良孝 画像提供：北山建穂

■ 華厳滝周辺の地形



成層火山である男体山は円錐形で独立しており、大きな山体は日光火山群の中でも目立つ。華厳滝では毎秒平均でおよそ3トンの水が流れ落ちている。

出典：「栃木県の地球科学」、日光火山群とその周辺の3D地質図 CC BY
使用データは産総研地質調査総合センター「栃木県シームレス地質図」および国土地理院地図 陰影起伏図

Contents

特集：持続可能な社会に貢献するオートメーション技術

巻頭言：期待	1
早稲田大学総合研究機構 上級研究員・研究院教授	高橋 桂子
特集に寄せて	2
アズビル株式会社 執行役員常務 3つの成長領域担当	伊東 忠義

特集論文

DR・VPPのためのリソース割当計画の自動作成	
多彩な分散型エネルギーリソースの有効活用を支えるAI技術	3
アズビル株式会社 AIソリューション推進部	宇野 侑希 黒崎 淳
アズビル株式会社 サービス本部	畑野 隆文
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	中村 瑞 片桐 汐駿
新技術を「試し」「議論し」「育てる」ための新実験棟	9
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	太宰 龍太
予兆検知・診断技術の開発	
製造装置における製造ロス削減と省エネの取組み	16
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	丸野 智広 西澤 慶祐 保坂 儒人
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	21
アズビル株式会社 AIソリューション推進部	青田 直之
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	川瀬 健 日暮 優
関西電力株式会社 火力事業本部	小川 勇磨 藤原 圭佑
生成AIのアプリケーションへの導入に向けて	
技術検証と展望	26
アズビル株式会社 AIソリューション推進部	楓川 滉人
アズビル株式会社 IT開発本部	秦 楊(2023年12月退職)
オフィスのABW実装による効果検証法	31
アズビル株式会社 技術開発本部	衣笠 静一郎 梶田 徹矢
アズビル株式会社 AIソリューション推進部	鹿島 亨
慶應義塾大学大学院 理工学研究科	佐伯 爽 影山 乃愛
慶應義塾大学理工学部	伊香賀 俊治
東京工業大学 環境・社会理工学院	芳賀 恭平 海塩 渉
SUBLIME: Single-use battery-less wireless temperature sensor for lyophilization process	37
Azbil Telstar, S.L.U.	Joel Nuñez Sanz

一般論文

赤外線アレイセンサシステムの開発	
人検知・熱負荷空調制御の性能向上	43
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	本田 光弘
生産性向上の実現に向けたIO-Link™対応誘導形近接センサ用ICの開発	49
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	高宮 知広 川井 真一 尾身 知子

製品紹介

savic-net™G5コンパクトモデル	
ユーザビリティを強化した監視機能を提供する2万㎡規模以下建物向け中央監視システム	55
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	田中 義人 坂本 俊隆
空間の価値を高めるsavic-net™ G5 入退室管理システム	57
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	岡田 慧
小型デジタル指示調節計	
互換性を維持しながら性能向上した形 C1M, 高精度・高速制御を実現した形 C1A	59
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	長嶋 直紀

Contents

Special Issue : The automation technology contributing to a sustainable society

Preface : Great expectations	1
Senior Researcher・Professor	
Global Consolidated Research Institute for Science Wisdom, Waseda University	Keiko Takahashi
Introduction to the Special Issue	2
Managing Executive Officers, Three business fields to expand for sustainable growth, Azbil Corporation	Tadayoshi Ito

Articles on Special Issue

Development of automatic generation of resource allocation plans for DR/VPP: AI technology that supports effective utilization of diverse distributed energy resources	3
AI Solution Department, Azbil Corporation	Yuki Uno Atsushi Kurosaki
Service Headquarters, Azbil Corporation	Takafumi Hatano
Building Systems Company, Azbil Corporation	Mizu Nakamura Shiotaka Katagiri
New laboratory buildings for testing, discussing, and nurturing new technologies	9
Building Systems Company, Azbil Corporation	Ryota Dazai
Development of anomaly detection and diagnostic technologies: Efforts to reduce manufacturing losses and energy savings in manufacturing facilities	16
Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Chihiro Maruno Keisuke Nishizawa Yoshito Hosaka
Advancement of functionalities for an online anomaly detection system for large-scale plants	21
AI Solution Department, Azbil Corporation	Naoyuki Aota
Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Takeru Kawase Yu Higure
Thermal Power Division, The Kansai Electric Power Co., Inc.	Yuuma Ogawa Keisuke Fujiwara
Toward the implementation of generative AI in applications: Technical validation and prospects	26
AI Solution Department, Azbil Corporation	Hiroto Kaedegawa
IT Development Headquarters, Azbil Corporation	Qin Yang
Effectiveness evaluation scheme of ABW implementation for office	31
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation	Seiichiro Kinugasa Tetsuya Kajita
AI Solution Department, Azbil Corporation	Toru Kashima
Graduate School of Science and Technology, Keio University	Akira Saeki Noa Kageyama
Faculty of Science and Technology, Keio University	Toshiharu Ikaga
Department of Architecture and Building Engineering, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology	Kyohei Haga Wataru Umishio
SUBLIME: Single-use battery-less wireless temperature sensor for lyophilization process	37
Azbil Telstar, S.L.U.	Joel Nuñez Sanz

Articles on Other Subjects

Development of infrared array sensor system: Enhancing performance in people detection and thermal load air conditioning control	43
Building Systems Company, Azbil Corporation	Mitsuhiro Honda
Development of IO-Link inductive proximity sensor IC for improved productivity	49
Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Tomohiro Takamiya Shinichi Kawai Tomoko Omi

Product Introduction

savic-net G5 compact model: A central monitoring system for buildings of 20,000 square meters or less that provides monitoring functions with enhanced usability	55
Building Systems Company, Azbil Corporation	Yoshihito Tanaka Toshitaka Sakamoto
savic-net G5 access management system that increases the value of space	57
Building Systems Company, Azbil Corporation	Satoshi Okada
Compact single loop controller: Model C1M for improved performance while maintaining compatibility, Model C1A for high accuracy and high speed control	59
Advanced Automation Company, Azbil Corporation	Naoki Nagashima

期待



高橋 桂子
Keiko Takahashi

早稲田大学総合研究機構 上級研究員・研究院教授
Senior Researcher・Professor
Global Consolidated Research Institute for Science Wisdom, Waseda University

数年間の世界的なコロナ禍をなんとか乗り越え、明るい未来に歩みだす矢先に新たな戦争が始まり、それに伴う世界情勢の激変は現在も混迷を増しています。経済、産業、安全保障など我が国のみならず世界全体に関わるエネルギー、食糧、流通、サプライチェーンそして物価高騰などなどの課題は、ほんの数年前までの「全地球的な平和の実現が可能であり、そのために和平の努力が積み上げられている」と多くの人々が想定していた状況とは全く異なる形相になってしまいました。

科学技術立国として成り立たなければ将来は見通せないということが声高に叫ばれた時期は、既に50年ほど前となりました。また、10年ほど前には「モノづくり」復興の重要性が様々な場面で叫ばれましたが、最近では聞く機会は少なくなりました。しかしながら、資源が極めて少ない我が国が継続的に発展するためには、全世界的な協調と平和が必須の条件であるとともに、我が国が科学技術立国である必要があり、モノづくりが極めて重要であるという事実は、過去も、今も、これからも何ら変わることはないと考えます。

科学技術はモノづくりに直結しますが、我が国では「モノ」はハードを指向する場合が多く、データや情報の利用や仕組み・システム創りまでを指す場面が少ないことは残念です。「データや情報に準拠して、仕組みを識り、システムを創造する」という考え方は、欧米諸国の科学技術の成り立ちに深く根ざしています。このような背景は、科学技術が流行り廃りに翻弄されず裾野の広さをもって堅持され、人材が維持され、例えば第1次、2次を経て第3次AIブームへの急速な発展に寄与しているものと考えます。現在、我が国はこの分野において後塵を拝していますが、先行発展に対する洞察から、我が国の特性を活かした新たな仕組みやシステムを創造するチャンスを獲得できるかどうか、新たな段階への展開を大いに期待しているところです。

一方、科学技術の発展が有限な地球環境と切り離せないことも、これまでに得られた科学的知見から明らかになってきました。私たちは、人為的活動と地球環境との相互作用をそれほど意識せずに科学技術開発を続けてきたといっても過言ではないでしょう。人間のあらゆる活動を起源とする地球環境への影響の蓄積は、地球温暖化をはじめとする気候変動による様々な変化を介して人間社会へフィードバックします。この人為的活動と地球環境の相互作用を有するシステムの状態遷移が、今後どのような経緯をたどるかは未だ不明です。例えば、既に始まっているといわれる海洋中の植物プランクトンの進化は、二酸化炭素の取込み量を変化させており、海洋による二酸化炭素吸収総量を変化させ得ることが指摘されています。また、これまでの地球温暖化の速度を何らかの対策によって急速に遅

くした場合、システムがダウンする挙動可能性が数理的に示唆されています。つまり、私たちは未知の状態変化が起こりうるシステム上に生きているのです。

これらのことは、豊かな人間社会の継続的な発展には、対象とするシステムの個別問題のみの解決ではなく、対象システムを取り巻く環境との相互作用も念頭に置いた問題設定と解決が必要であることを示唆しています。問題の設定も、解決手法の選定も、これまでとは異なる発想と想像力が必要となるでしょう。AIなどの新しい技術の最大活用が望まれますが、あらゆる実データが圧倒的に不足している我が国の弱点を忘れてはなりません。その弱点克服をもふまえたうえで、計測し、識り、制御すべき今日の対象は、人間社会と有限な地球環境ひいては宇宙環境との相互作用を想定したシステムであり、その将来デザインを世界中の人々が求め、必要としています。

アズビルの実績が人間社会の基盤と地球環境をつなぐ強靱なパイプとなっていることは、多くの方々が認めるところであります。その意味から、アズビルの事業は今後ますますその意義と重要性を増すことになり、まさに「出番」なのだと思います。アズビルの理念である「人を中心としたオートメーション」が、これからの世界と我が国の「人と地球環境システム」のありようを力強く牽引いただけるよう、ますますの発展に大きな期待を寄せています。

略歴：
東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了、工学博士。花王(株)、英国ケンブリッジ大学、国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター長、経営管理審議役、横浜研究所長を経て、2021年4月より現職。国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)未来社会創造事業「健全化する社会課題の解決」領域 領域統括、「富岳」成果創出加速プログラム 領域総括、日本電信電話株式会社(NTT)リサーチプロフェッサ。日本学会会議会員、日本学会会議連携会員、文部科学省 科学技術・学術審議会の多数の委員を歴任。計測自動制御学会会長、可視化情報学会会長、日本応用数学会、日本流体力学会、日本応用数学会等の理事を歴任。International Federation of Automatic Control (IFAC) Technical Board member, Asian Network on Climate Science and Technology (ANCST) International Steering Committee member, アメリカ国立科学財団(NSF) Electronic Proposal Review member等を歴任。海洋と大気との相互作用と地球環境予測、超大規模シミュレーションおよび超並列・高速計算法の技術開発、超大規模データ処理技術開発を専門としている。「水大循環と暮らしⅢ-持続可能な水大循環を実現する-」(丸善プラネット, 2022年)、「水大循環と暮らしⅡ-流域水循環と持続可能な都市-」(丸善プラネット, 2019年)、「水大循環と暮らし-21世紀の水環境を創る-」(丸善プラネット, 2016年) など。

アズビル株式会社
執行役員常務
3つの成長領域担当

伊東 忠義

私たちazbilグループは、持続可能な社会へ「直列」に繋がる貢献により企業価値の持続的な向上を図り、2030年に売上4,000億円規模への成長を目指しています。この成長を支える重要な施策に「3つの成長事業領域(新オートメーション事業、環境・エネルギー事業、ライフサイクル型事業)」による成長があります。「人間の苦役からの解放」を理念として、創業者の山口武彦がオートメーション事業に取り組んで既に118年の月日が経ちました。その間オートメーション技術は飛躍的に発展し、当時人間が行っていた様々な作業、業務は機械化され苦役からの解放は大いに進んだと言えます。しかしながら、私たちは新たに「持続可能性」という課題に直面し解決を求められています。その解決に寄与する技術を「新オートメーション」として定義し、貢献する重要なテーマ、領域を「環境・エネルギー事業」としています。そしてその技術と領域においてお客様の事業をライフサイクルにわたって支え、貢献することによりazbilグループの企業価値を向上させ、成長していくことが「3つの成長事業領域」の施策になります。今回の特集テーマである「持続可能な社会に貢献するオートメーション技術」は、まさにこの施策の中心をなす技術となります。

ところで、従来のオートメーションと新オートメーションの違いは何でしょうか。新しい技術や高度な機能、精度を有する商品、サービスが新オートメーションなのでしょうか。今の新オートメーションは5年後、10年後には新オートメーションではなくなるのでしょうか。この問いに答えるものが「持続可能な社会への貢献」となります。2023年にazbilグループのSDGs目標の1つである「新オートメーション」に2つの定量目標を定めました。

- 新オートメーションで2030年に延べ8,000事業所で事業環境変化に強い状態を実現
- 新オートメーションで2030年に延べ600万人にストレスフリー、多様な働き方につながる環境を提供

これらの定量目標を設定するために、まずは新オートメーションを以下のように定義づけました。

「自動化や環境改善の進んだ生産現場・オフィスでも生産・就労の持続可能性を阻害する要因は多々存在している。新オートメーションは、それらの阻害要因を解決し、生産現場の内的・外的な事業環境変化への対応力を高め、さらにストレスなく多様な働き方に繋がる職場環境を実現する。これらにより、生産現場・オフィスで働く人の安全の担保・労働環境の改善・心的負担の削減、労働人口減少に対するリソースの確保、生産ロスの削減、無駄の削減などの生産性改善の成果が期待できる。このように新オートメーションは、持続可能な生産現場・職場環境の基盤創りに貢献している。」

前述にある持続可能性を実現するための課題としては

- オートメーションを担う装置・機器の故障による事故や生産ロス
- オートメーションを担う装置・機器のメンテナンスコストの増大
- これらの機器のトラブルにより、扱う作業員自体の心的負担の増大
- 就労人口の減少による作業員の多様化の進展と対応の必要性

等が挙げられます。機械化や自動化とは違い、従来は人が対応していたようなこれらの阻害要因に対する解決策を提供するものが「新オートメーション」となります。

生産現場の自律化により、装置や機器の異常予兆を検知し、故障の発生する前に点検やメンテナンスを行うことで、事故などのトラブルを回避につなげることが可能となります。あるいは、生産現場の自律化により、コンディションベースのメンテナンスを可能とし、整備の必要な機器を必要なタイミングで整備することで、コスト削減と稼働率改善につなげることになります。これらは同時に生産現場で働く人の心的負担を軽減し、多様性の実現にもつながっていきます。

持続可能性を強化する上でもう1つ重要なことが、生産現場やオフィスで働く人のウェルネスの進展になります。例えば、部屋の温度が20℃のとき、それを快適と感じる人もいれば寒いと感じる人もいます。暑いと感じる人もいます。AIを用いたウェルネスの進展により、働く人それぞれの感受性という有機質なセンサをもとに制御し、快適性を提供することも可能となってきます。この結果として働く人の生産性は向上し、エネルギーの使用も押さえられ省エネルギーにつながります。

今回のTechnical Reviewでは、従来のオートメーション技術だけでは対応できなかった、生産現場やオフィス環境の持続可能性を阻害する要因に対する解決策となる様々な技術が紹介されています。これらの技術はすべて、最初に述べたazbilグループの2030年に向けた長期目標を支える「3つの成長事業領域」施策に直結し、社会の持続可能性に貢献するものとなります。今号をお読みいただいている皆様に、それぞれの技術のすばらしさが伝わることを期待して、私の特集への寄稿とさせていただきます。

DR・VPPのためのリソース割当計画の自動作成

多彩な分散型エネルギーリソースの有効活用を支えるAI技術

Development of automatic generation of resource allocation plans for DR/VPP: AI technology that supports effective utilization of diverse distributed energy resources

宇野 侑希
Yuki Uno

黒崎 淳
Atsushi Kurosaki

畑野 隆文
Takafumi Hatano

中村 瑞
Mizu Nakamura

片桐 汐駿
Shiotaka Katagiri

キーワード
ダイヤモンドリソース, パーチャルパワープラント

再生可能エネルギーの導入量が拡大する中、発電量と消費電力量のバランスを維持し電力系統を安定化させることが求められている。このバランスを調整する電力の供給にDR・VPPの活用が期待されているが、需要家側エネルギーリソースから生成する調整力は、規模が小さく再現性が低いリソースも多く、有効に活用するためには工夫が必要である。本稿では、需要家側エネルギーリソースの調整力の集約に最適化手法を適用し、再現性が高いリソースから優先的に1つに束ね、有効活用できる調整力を生成するリソース割当計画の自動作成技術と、建物設備をエネルギーリソースとするそのシミュレーション検証結果について報告する。

As the amount of renewable energy introduced increases, it is necessary to maintain a balance between power generation and power consumption, in order to stabilize the power system. DR and VPP are expected to be used to supply power to adjust this balance, but the balancing power generated by customer-side energy resources is often small in scale and has low reproducibility, so some ingenuity is required to use it effectively. In this paper, we apply an optimization method to aggregate the adjustment power of consumer-side energy resources, prioritize resources with high reproducibility, and create a resource allocation plan that generates adjustment power that can be used effectively. This paper reports the simulation verification results using building equipment as energy resources.

1. はじめに

2050年カーボンニュートラル社会の実現に向け、再生可能エネルギーの主力電源化を目指し、日本では太陽光発電や風力発電の導入量が拡大している。これら一部の再生可能エネルギーは季節や天候により発電量が大きく左右されるので、発電量と消費電力量のバランスを維持し電力系統を安定化させるために十分な量の「調整力」を供給できることが重要になる。従来は電力会社が保有する大規模な火力発電所がこの調整力の主力となっていたが、CO₂排出量削減が叫ばれる中その代替として、分散型エネルギーリソースを適切に制御することで発電所と同等の機能を提供するVPP (Virtual Power Plant: パーチャルパワープラント)⁽¹⁾の活用が期待されている。

VPPの中でも需要家側エネルギーリソース (発電設備、蓄電設備、需要設備) を制御することで電力需要パターンを変化させ調整力として活用するDR (Demand Response: デマンドリソース)⁽¹⁾への期待は高い。DRは例えば既存の需要設備を、系統電力の不足時には使用を控え、余剰時には使用を増やすよう運用することで、通常運用時の電力需要パターンからの変化分を生み出し調整力とする。そのため発電機や蓄電池を保有していない需要家であっても、新たな設備を導入することなく設備投資コストを抑えてVPPを開始できるというメリットがある。しかし、需要家側エネルギーリソースの個々の設備は規模が小さく、運転状態により得られる調整力の再現性が低い場合が多いため、これらのエネルギーリソースを有効に活用するためには、そのままでは難しく工夫が必要である。そこで大きな規模を有しかつ再現性

の高い調整力として利用するため、複数のエネルギーリソースを束ねて(アグリゲートして)適切に制御することが必須となる。このようにエネルギーリソースをアグリゲートする事業者をアグリゲーターと呼ぶ。

アズビルはVPPのアグリゲーターとして、需要家側エネルギーリソースを一括管理し、電力会社等からのDR要請をトリガーに調整力を確保するDRサービスを提供している⁽²⁾。本サービスシステムは多くのエネルギーリソースを容易に扱えるよう自動化が進んでいる。本稿ではその自動化をさらに深化するために不可欠な機能として開発を進めている、個々のエネルギーリソースのDR発動有無を決める「リソース割当計画」をAI (Artificial Intelligence) により自動作成する技術について、建物設備をエネルギーリソースとした例をもとに報告する。

2. VPP事業を支えるAutoDR

アズビルはビルディングオートメーション事業において、主に建物設備をトータルに監視制御するBAS (Building Automation System) をお客様に導入してきた。さらに時代のニーズに合わせ、BASは建物のエネルギー管理を行うBEMS (Building Energy Management System) としての役割を併せもつよう進化した。近年、通信技術が発達して大容量通信が一般的になると、あらゆるものがインターネットに繋がり、収集したデータをクラウド上に蓄積し、それらのデータを利用した詳細な分析が実施できるようになった。BEMSにおいても同様、建物のあらゆる場所にセンサがあり、BEMSにより常時データを収集、さらにインターネットに接続してクラウド上でのデータ蓄積・詳細な分析といったソリューションも展開されている。また、その通信回線はデータ収集だけではなく、クラウドからBEMSを操作する「逆方向」の使い方も可能であるため、BEMSが導入されアズビルのクラウドと繋がってれば、どのような建物であっても安全に遠隔制御が可能となる。この一連のシステムは遠隔からDRを実行する際にも同様に機能し、この仕組みを活用してVPPを実現するために構築されたのがアズビルのAutoDRTMシステムである。このシステムは複数のシステムの集合体となっている。システム構成を図1に示す。

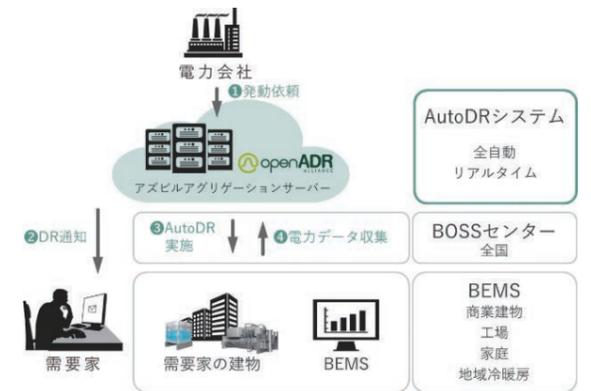
ここで図1にあるBOSSセンターは、アズビルが1980年代から提供している総合ビル管理サービスBOSS-24TMというビルの遠隔監視・遠隔制御ソリューションを担う監視センターであり、関東と関西の2箇所に設置され、24時間/365日専属オペレータが常駐している。BOSSセンターでは、監視や計測計量といった情報収集のみならず、機器の発停から設定値変更、制御モード変更など、あたかも現地で監視・操作を実施しているかのようなサービスを全国470以上の施設から請け負っている。

また、同じく図1にあるアズビルアグリゲーションサーバーは、クラウド上で運用されており、電力会社等からDRの発動依頼を受け取ることができる。依頼を受けるとDR要請された調整力を確保するために必要なエネルギーリソースを選択して割り当て、選ばれた各リソースに対して運転指示を出力、さらにDR終了後には電力データを収集して実際に得ら

れた調整力を算出する。これら一連の動作をすべて自動で実行する。

実際にDRを実行するには、DRのための国際標準通信プロトコルであるOpenADR⁽³⁾への対応も必要となる。OpenADRでは、DR指令発動側に「Virtual Top Node (VTN)」、DR指令受信側に「Virtual End Node (VEN)」とそれぞれサーバーを用意して通信する。AutoDRはOpenADR 2.0b準拠の認証を取得⁽⁴⁾しており、電力会社等が準備したOpenADRに対応したVTNに接続してDR発動依頼を受け取ることができる。

既に多くの建物にBEMSやBOSS-24が導入されており、国内全域にセキュリティを担保したアズビルの通信網が整備されていることと併せ、多くの建物がクラウド環境にあるアズビルアグリゲーションサーバーと接続して迅速にVPP事業へ参入することが可能である。



3. リソース割当計画の自動作成機能

3.1 課題

需要家側エネルギーリソースを利用したDRはその活用が期待される一方で、出力制御が容易な発電所の発電機とは異なり、その日の気象条件や対象設備の運転状態、その他の要因で得られる調整力が左右されやすい特性を持つため取扱いが難しい。またDR対応が可能な季節、時間帯など、リソースごとに特有の運用条件が存在するため、それらすべての条件を考慮した上でDRを実施しなければならない。

さらには安定した調整力の確保のために、複数のエネルギーリソースの中から同時に制御する対象リソースの割当てを考慮する必要がある。リソースの割当てについては、各リソースの制約条件をもとにどの時間帯でどの程度の調整力が得られるかの組み合わせ問題となり、1件当たりで得られる調整力が少ない建物設備をエネルギーリソースとするDR・VPPにおいては必要なリソースの数が必然的に多くなるため、組み合わせパターンもリソース数の増加に応じて膨大になる⁽⁵⁾。

これらの課題を解決するためにアズビルが独自開発した、AIを活用したDR対応リソースの最適割当機能 (以下、AIリソース割当機能) のイメージを図2に示す。AIリソース割

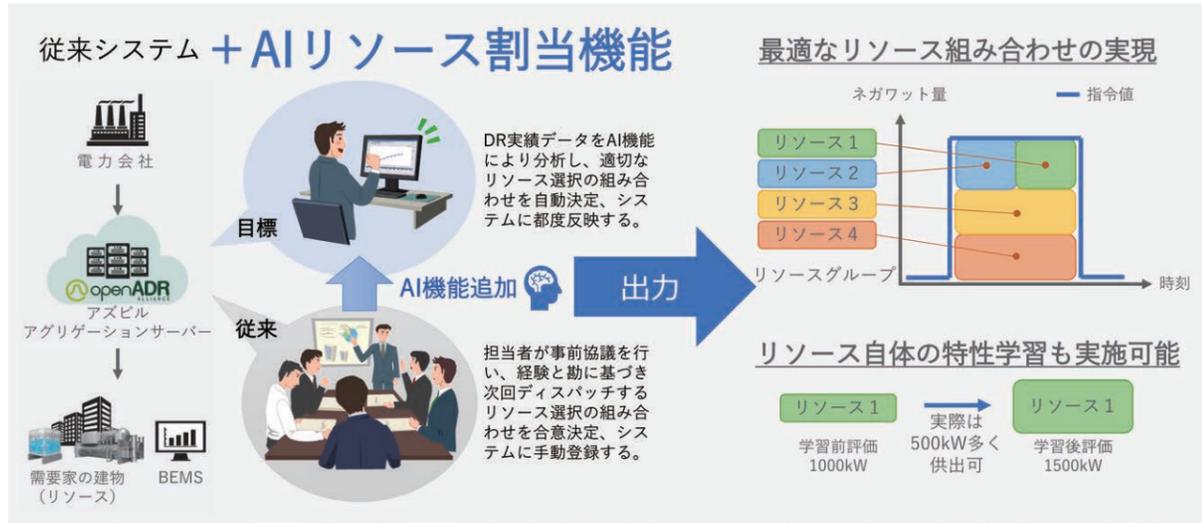


図2 AIリソース割当機能のイメージ

当機能はリソースごとに固有の制約や得られる調整力のパラメータを入力することにより、DRを実施するための最適なリソースの組み合わせとなる「リソース割当計画」を自動決定することができる。

3.2 提案手法

AIリソース割当機能では、DR可能な設備群のリソース割当計画を、混合整数線形計画法で作成するアプローチを採用⁽⁶⁾。混合整数線形計画法は設備の最適起動・停止問題によく用いられる最適化法として知られているが、DRの発動・非発動を取り扱うリソース割当計画においても有効に機能する。

次に、リソース割当計画最適化問題をどのように混合整数線形計画問題として定式化するかを示す。ここで、DR発動時の設備の消費電力変化量がそれぞれ独立した正規分布に従うと仮定し、その分布の分散の大小によって消費電力変化量の再現性の高低を表現することを考える。この仮定をおくと、目標とする消費電力変化量（以下、発電量）の残差を小さくするためには、発電量の平均が目標発電量と等しくなり、かつなるべく分散が小さくなるようなリソース割当計画であれば良い。そこで、最適化問題の目的関数を次のように定義する。なお、目標とする消費電力変化量（目標発電量）とは、調整力の買い手である送配電事業者等から事前に通告される目標消費電力と、DR可能設備群すべてについてDRを発動しない場合の予測消費電力との差である。

$$\underset{\xi_r, p_r}{\text{minimize}} \sum_{r \in R} v(r) \cdot p_r \quad \text{式(1)}$$

なお、 ξ_r はエネルギーリソース r の発動状態（発動は1、非発動は0）、 p_r は同 r の計画発電量、 $v(r)$ は同 r の単位発電量当たりの「発電量のばらつき（分散）」、 R はリソースアグリゲーターが指令可能なエネルギーリソースの集合を表す。

続いて、制約を次のように定義する。

$$\text{subject to } \sum_{r \in R} p_r = \hat{g} \quad \text{式(2)}$$

$$\xi_r \cdot p_r \leq \bar{p}_r, \forall r \in R \quad \text{式(3)}$$

$$p_r \leq \xi_r \cdot \bar{p}_r, \forall r \in R \quad \text{式(4)}$$

$$\xi_r \in \{0, 1\}, \forall r \in R \quad \text{式(5)}$$

なお、 \hat{g} は目標発電量、 \bar{p}_r はエネルギーリソース r の発動時の下限計画発電量、 \bar{p}_r は同 r の発動時の上限計画発電量を表す。

式(2)は、目標発電量と計画発電量が一致しなければならないという制約である。それ以外の制約は、DR非発動時に計画発電量が0に一致しなければならない、DR発動時に下限計画発電量 \leq 計画発電量 \leq 上限計画発電量を満たさなければならないという制約である。

この問題を混合整数線形計画問題用の解法アルゴリズムが搭載されたソフトウェアを用いて解けば、なるべく消費電力変化量の再現性が高いDRを発動しつつも、そうではないDRも必要に応じて発動するような、リソース割当計画を得ることができる。

なお、発電量やその分布の分散の大きさは、対象設備のスペックシートや知見から得られる情報により初期値を決定し、DRを発動して得られる実績データを学習することによりその値を改善することができる。このように学習により現実に近いリソース特性を混合整数線形計画問題に反映できるため、より正確なDRを実施できるようになる。

4. シミュレーション検証

4.1 概要

調整力が活躍できる場として、需給調整市場三次調整力②⁽⁷⁾を例にとると、「1. 指令値目標発電量」の変更への追従」「2. 指令値に対する制御量が、一定間隔以内での供出可能量の $\pm 10\%$ 以内の滞在」などの条件をクリアする必要がある。

各条件をクリアするためには、前もって様々なリソースの組み合わせで試験を実施する必要があるが、実際のリソースを何度も試験することは運用上難しい。そこでアズビルでは図3に示すように、仮想的にDR・VPPが実施できるシミュレーション環境を構築し、AIリソース割当機能の数値実験を実施した。

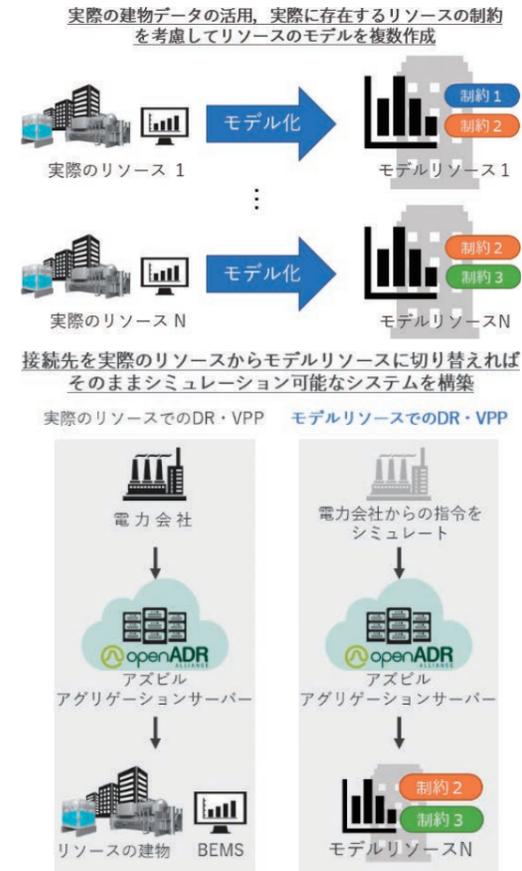


図3 シミュレーションシステムのイメージ

4.2 検証結果:目標発電量vs計画発電量

まず、目標発電量を満たすようなリソース割当計画が作成できているかを確認するため、少数のDR設備を用いた数値実験を行った。適当な想定発電量や発電量再現性（ばらつき、分散）を設定した12個の需要家（リソースID: 31001~31014）を設定し、すべてのDR設備の合計容量に対して20%、40%、60%、80%、100%の目標発電量を与えて最適化問題を解き、それぞれの需要家の想定発電量を図4に示した。図4は、横軸に目標発電量、縦軸に計画発電量をDR設備ごとに色を分けて描画したもので、それぞれ目標発電量に応じた解が得られており、目標発電量と計画発電量の差異が供出可能量の $\pm 10\%$ 以内という条件をクリアしていることが見て取れる。

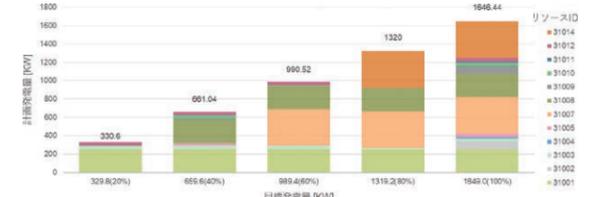


図4 目標発電量vs計画発電量

4.3 検証結果:目標発電量vs発電量の分散

次に、なるべく発電量の再現性が高いDRを発動するような振る舞いが見られるかを確認するための数値実験を行った。適当な想定発電量や発電量再現性（ばらつき、分散）を設定した100個の需要家を設定し、すべてのDR設備の合計容量に対して10%刻みで10%~100%の目標発電量を与えて最適化問題を解き、それぞれの需要家の目標発電量とその解における発電量のばらつき（分散）の関係を図5に示した。図5は、横軸を目標発電量、縦軸を発電量の分散として描画したもので、目標発電量が小さいほど目標発電量当たりの分散が小さい傾向が見て取れる。この結果から、なるべく発電量のばらつきが小さいDRから用いているが、目標発電量が大きくなるに応じて、発電量のばらつきが小さいDRだけでは目標発電量に到達できなくなると、発電量のばらつきが大きいDRも用いられるようになっていくことがわかる。

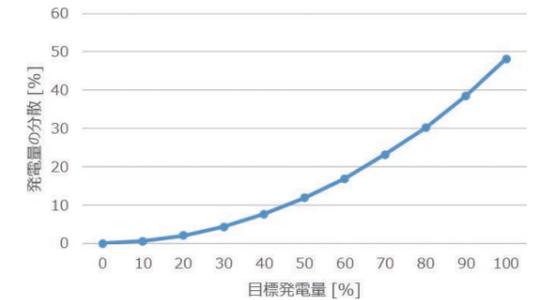


図5 目標発電量vs発電量の分散

5. 今後の課題

提案手法は、目標発電量（目標とする消費電力変化量）と計画量が一致するようにリソース割当計画を作成するものの、現実には目標量と実績量に誤差が生じてしまうことがある。誤差を0に近づけるためには、比較的高速に応答する設備を用いたフィードバック制御を併用すると良い。フィードバック制御は、提案手法の結果を初期操作とし、残差に応じて発電量を増減させることで、提案手法と併用することが可能である。誤差を0に近づけることを重視する場合は、比較的高速に応答する設備をフィードバック用の予備として相応量とっておくと良い。なぜならば、例えば、提案手法がすべての設備でDRを発動した状況で発電量が不足している場合、既にすべての設備がDRを発動中のため、フィードバック制御により発電量を増やすことができない。このように、フィードバックによる調整の余地が無くなることを避けるためには、提案手法が計画の対象とする設備に加えて、余分に、フィードバック制御用の（比較的高速に応答する）設備を事前に十分な量確保しなければならない。

また、提案手法において、設備の発電量の平均や分散の正確な予測は重要である。これらが現実と異なっている場合、発電量の目標と実績の差が大きくなる懸念がある。提案手法の最適化問題を求解する前に予測が完了する方法であればどのような予測方法を用いても良いが、設備に応じて適切な方法を用いることが求められる。

6. おわりに

DR・VPPのためのリソース割当計画を自動作成する技術について、最適化手法を適用してDRを発動するべきリソースを選択する方法を提案し、なるべく消費電力変化量の再現性が高いDRを発動しつつもそうではないDRも必要に応じて発動するという結果が得られていることを数値実験で確認した。

なお、この提案手法は、経済産業省VPP構築実証事業等において、現実の需要家側エネルギーリソースのDRによりVPPを構築する実証試験でも使用し、その有用性を確認している⁸⁾。

カーボンニュートラル社会へと向かい、将来的に再生可能エネルギーを大量導入して有効活用していくことが求められる中で、調整力の重要性は非常に高まってきている。本稿で報告したAutoDRやAIリソース割当機能は、このような社会要求に対する解決策の1つになると考える。また、これらの技術は建物設備だけではなく工場を含む様々なエネルギーリソースにも対象を広げ、需給調整市場だけではなく、需要家サイドに今後構築されていく様々なスタイルの地域マイクログリッドにおいても、電力需給調整を実現する上で大きく貢献する技術になると期待している。

<参考文献>

- (1) 資源エネルギー庁 VPP・DRとは、
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/about.html
(アクセス日 2024.1.30)
- (2) 黒崎淳, 宇野侑希, 畑野隆文: VPPに貢献する自律的なDRのためのAI, スマートグリッド, 2022年, Vol.63, No.6, pp.12-16, 大河出版
- (3) OpenADR Alliance,
<https://www.openadr.org/>
(アクセス日 2024.1.30)
- (4) 中村瑞, 水谷佳奈: デイモンドリスポンスシステムの開発とバーチャルパワープラント構築実証事業への適用, azbil Technical Review, 2018年, Vol.59, pp.50-55, アズビル株式会社
- (5) 市村健: 電力システム改革の突破口 DR・VPP・アグリゲーター入門, 2021年, pp.151-154, オーム社
- (6) 宇野侑希: デイモンドリスポンス設備のエネルギーリソースアグリゲーション, 自動制御連合講演会講演論文集, 2023年, pp.735-737, 計測自動制御学会
- (7) 送配電網協議会 需給調整市場とは,
<https://www.tdgc.jp/jukyuchoseishijo/outline/outline.html>

(アクセス日 2024.1.30)
(8) azbil ERAB アズビルの実績,
<https://www.azbil.com/jp/erab/results/>
(アクセス日 2024.1.30)

<商標>

AutoDR, BOSS-24はアズビル株式会社の商標です。
OpenADRはOpenADR Allianceの米国及びその他の国における商標です。

<著者所属>

宇野 侑希 アズビル株式会社
AIソリューション推進部
黒崎 淳 アズビル株式会社
AIソリューション推進部
畑野 隆文 アズビル株式会社
サービス本部グループクラウドサービス部
中村 瑞 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発3部
片桐 汐駿 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発3部

新技術を「試し」「議論し」「育てる」ための新実験棟

New laboratory buildings for testing, discussing, and nurturing new technologies

太宰 龍太
Ryota Dazai

キーワード

新棟建設, 2管式配管設備, 冷暖フリー-VAV制御, 太陽熱利用, 蓄熱, 温冷感空調, 照明空調連携, 赤外線アレイセンサ, 吹出口単位の個別空調, AR

2022年9月にアズビル藤沢テクノセンター内に竣工した新実験棟(第103建物)は、まだ完成していないアズビル最新技術を多く実装した建物である。そしてこれら技術は、この建物で運用しながら自ら体験し、見学に来ていただいたお客様と議論をしながら改良を重ねて、そしてその成果を発信していくことを目指している。本稿では、本建物で実施している特徴的な技術(スペース有効利用とコスト削減技術・省エネルギー技術・利便性向上技術など)を紹介する。

The newly completed laboratory building (Building 103) within the Azbil Fujisawa Technology Center, which was completed in September 2022, is a building that incorporates many of Azbil's latest technologies, including some still being developed. These technologies are meant to be experienced while operating the building, and improved through discussions with visiting customers, with an aim of publicizing our achievements. This article introduces the distinctive technologies implemented in this building, such as space-saving and cost-reduction technologies, energy conservation technologies, and convenience-improving technologies.

1. はじめに

アズビルでは、研究開発の拠点として、神奈川県藤沢市の藤沢テクノセンターに研究施設を集約している。2022年9月には、次の成長に向けた技術開発環境の整備・強化を目的に建設を進めていた新しい実験棟(第103建物⁽¹⁾)が完成した(図1)。

本建物は、実験室、会議室、食堂のほか、研究・開発の生産性・創造性を発揮するワークスペースも整備した建物である。また、建物そのものが、新しい技術を試す実験装置の役割を持っており、開発した技術はタイムリーにお客様に紹介、議論しながら、次の開発につなげていくことを目指している。

本建物に実装した技術は、本建物で初めて導入した技術など、試行中のものも多くあるが、それら技術は誰にも真似できない技術ではなく、本建物での試行後は、誰でも使うことができるものに仕上げていく予定である。本稿では、その中でも特徴的な技術を紹介する。

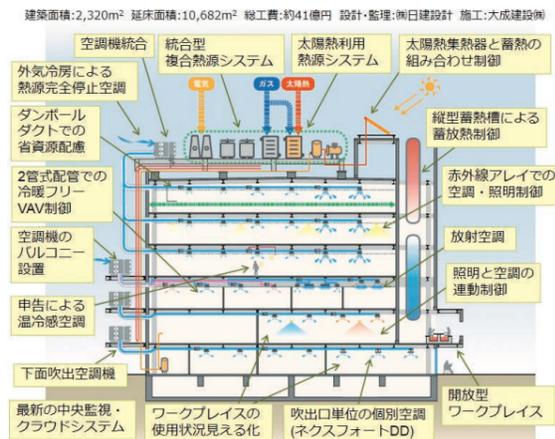


図1 第103建物ソリューションイメージ

2. スペース有効利用とコスト低減技術

本建物の空調設備は、快適な室内環境を小規模な設備で実現するため、様々な工夫がされている。ここではその技術を紹介する。

2.1 2管式配管設備と低温送水設計

建物の内周部(インテリアゾーン)では、冬期でも冷風を給気して室内環境を維持することも多く、冷水専用配管と温水専用配管で熱源設備と空調機をつなぐ4管式の配管設備が採用されることも多い。しかし夏期以外の季節は、冷涼な外気と気化式加湿器の加湿冷却効果があれば、冷水がなくても空調機で適切な冷風を生成することができる(図2)。そこで本建物では、冬期・中間期は冷涼な外気の活用を前提に、冷水と温水を季節で切り替える2管式の配管設備を採用し、コストを低減した(図3)。

また、本建物は熱源効率の高い7℃送水を設計基準とし、ピーク時には5℃送水とし冷却能力を向上させる計画としている。この計画により、通常空調機に持たせる余裕率・安全率等の各種係数を排除でき、配管径を小さくし、空調機コイル列数も削減した。冷凍機の出口温度を下げることで熱源効率は低下するが、5℃が必要となるピークの発生時間はわずかであり、ほかの時間帯は出口温度を緩和する制御で熱源効率を向上させている。

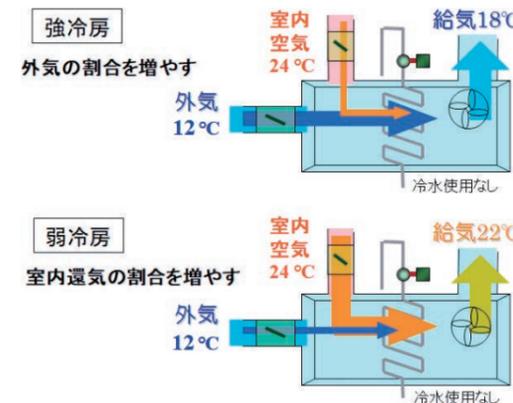


図2 外気を用いたコイルでの冷却なしの冷房

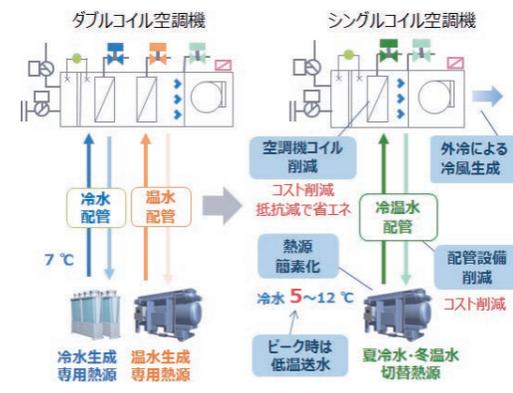


図3 2管式配管設備によるダウンサイジング

2.2 冷暖フリー-VAV制御

第103建物の3Fは、実験室と会議室が混在するフロアとなっており、それぞれの部屋ごとに空調機を設置すると、空調機台数が増え、その分のコストと設置スペースが必要となる。そこで、異なる負荷の部屋があっても同じ空調機で対応ができる制御(冷暖フリー-VAV制御)を本建物に実装し、空調機設置台数を少なく抑えた(図4)。



図4 3Fの各部屋と空調ゾーンの関係

VAV空調方式は、各ゾーンに設置された温度センサの計測値と温度設定の差分により、VAVユニットの風量を調節する一般的な空調方式である。しかしながら、各ゾーンへの給気温度は等しいため、同一空調機系統内で、冷風が必要なゾーンと温風が必要なゾーンが混在する場合は、どちらかの要求にしか対応できないという課題があった。そこで冷風と温風が同時に必要な場合は、冷風と温風を交互に切り替えて(15~20分ごと)、冷風を給気しているときは温風要求のVAVの風量を遮断し、温風を給気しているときは冷風要求のVAVの風量を遮断するようにした(図5)。このように制御すれば、各ゾーンでは、冷風、または、温風の間欠運転と同等となり、高負荷なゾーンがなければ、それぞれの異なる負荷を処理できる。温風が必要な時期は、外気温湿度が低く、換気に必要な外気取込みと気化式加湿器の加湿冷却効果のため、冷風給気時も空調機で加熱している場合が多い。そのため、冷風と温風を交互に切り替えても、空調機にとっては加熱を弱めるか強めるかの違いであり、エネルギーのロスにはならないのも特徴である。

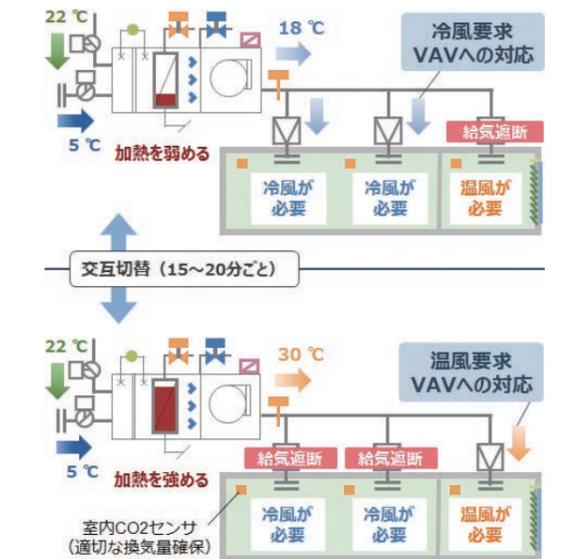


図5 冷暖フリー-VAV制御

2.3 異なるフロアの空調機統合

一般的には、空調機を各階の機械室に設置することが多いが、本建物ではバルコニーや屋上に空調機を設置し、室内は1,500m²弱の防火区画のない整形した部屋を確保している。そして屋上に設置している空調機では、フロアという単位にこだわらず、4階から6階の近い場所に給気する方法で、空調機を統合し、空調機設置台数を削減している。また各空調機は、他の空調機コントローラから各ゾーンへの給気情報を共有することで、各階のエアバランスを適切に制御している(図6)。

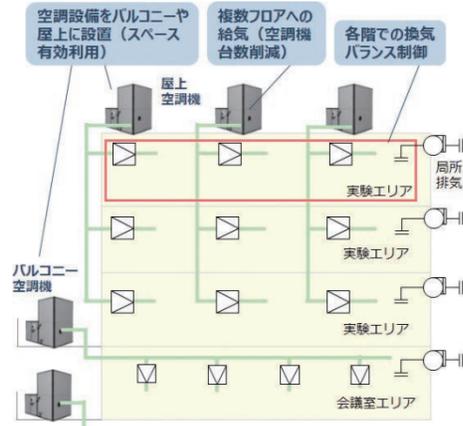


図6 屋外空調機による制御

3. 省エネルギー技術

本建物には多くの省エネルギー技術を採用した。ここでは、特徴的な技術を紹介する。

3.1 太陽熱と蓄熱槽利用

本建物の熱源システムは、太陽熱集熱器と縦型水蓄熱槽を組み合わせるのが特徴である(図7)。

太陽熱で生成した高温水は、空調と給湯に利用しているが、従来の太陽熱利用システムでは、建物を使用していないとき高温水の利用先がなく、生成した熱を大気中に捨てるしかなかった。しかし、本システムは、建物を使用していない休日なども生成した冷水や温水を蓄熱槽に蓄熱することで、太陽熱を無駄なく利用している。

蓄熱槽の活用方法では、従来の夜間蓄熱・昼間放熱のほか、昼間に空冷チャラーで蓄熱をしながら、蓄熱槽放熱交換器で同時に放熱するモードも用意した。このモードでは空調負荷に合わせた冷水供給は放熱熱交換器の役割となるため、空冷チャラーは空調負荷に左右されることなく、高効率な運転点での稼働を継続することができる。

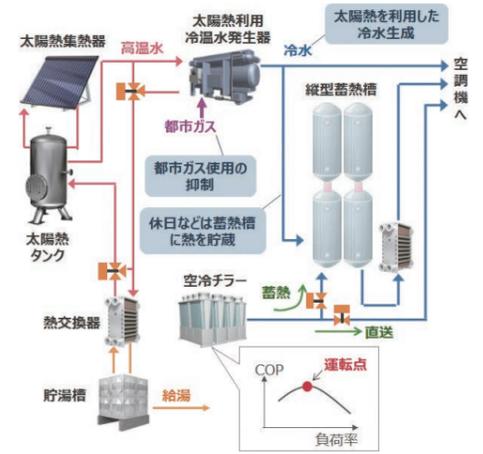


図7 太陽熱と蓄熱槽を利用した熱源システム

3.2 熱源完全停止制御

最近の建物は、断熱性能の向上により、外気温度が低くても室内の熱が外になかなか出ていかず、中間期や冬期も冷風が必要となる建物も多い。一方、図2で示したように、空調機では、中間期や冬期、冷涼な外気と還気の割合を制御することで、コイルで冷却や加熱をすることなく適切な冷風を生成できる時期が多くある。

このコイルでの冷却を必要としない空調制御の効果を最大限発揮するには、各空調機の状態を適切に把握し、熱源を搬送ポンプも含めて完全停止する自動制御が必要となる。現在の熱源台数制御は、負荷熱量、または、負荷流量で制御することが一般的であるが、搬送ポンプまで停止すると、負荷熱量・負荷流量の計測ができず、熱源が必要かどうか判断できない。そこで、熱源コントローラは、各空調機コントローラから、バルブ開度や室温など、制御に必要な情報を通信で取得し、負荷側で冷却や加熱が必要かどうかを判断する制御を構築した(図8)。この制御により、熱源を完全停止することも可能となり、本建物では、外気冷房が主となる時期は、熱源システムの運転時間を25%削減できている。

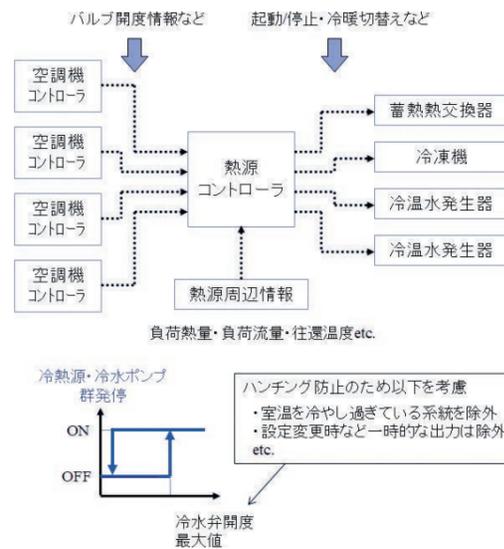


図8 バルブ開度を用いた熱源群自動発停制御

3.3 温冷感申告と冷暖2設定制御

人が寒いと感じる温度と、暑いと感じる温度には幅があり、その範囲に入っていれば、寒くもなく、暑くもないという温度幅が存在する。しかし従来の空調は、この温度幅をあまり意識せずに設定温度という「点」を目指して制御してきた。そして、その点を目指す制御が、人の快適性を悪化させ、さらにエネルギーも多く消費する場合もあった。例えば、冬期に21℃(ウォームビズ設定)に設定していたとする。この設定は、設定した人からすると、「21℃までは暖めてほしい」という要望であり、「21℃にしてほしい」という意味ではない。つまり、設定した人からすると、温度環境が24℃だった場合は、より暖かくて良い環境なのである。しかし、今までの空調制御では、24℃の暖かくて良い環境を、エネルギーを使って、21℃まで冷やそうとしてしまうこともあった。

そこで本建物では、「ここまでは暖めてほしい」という暖房設定と、「ここまでは冷やしてほしい」という冷房設定を別々に持っている冷暖2設定方式を採用した(図9)。この方式であれば、室温が冷房設定と暖房設定の間であるときは、積極的に冷暖房する必要がないため、省エネルギーとなる。そして在室者は、暑さ寒さを感じたとき、業務用PC、もしくはスマートフォンで「暑い」「寒い」を申告し、その申告により、システムが冷房設定と暖房設定を即時適切に変更する温冷感空調システムと組み合わせる(図10)。従来、冷暖2設定方式は、設定値が2つあるため、冷房設定と暖房設定のどちらを変更すれば良いかわかりにくいシステムであったが、温冷感空調システムと組み合わせることで、その課題を解決できた。

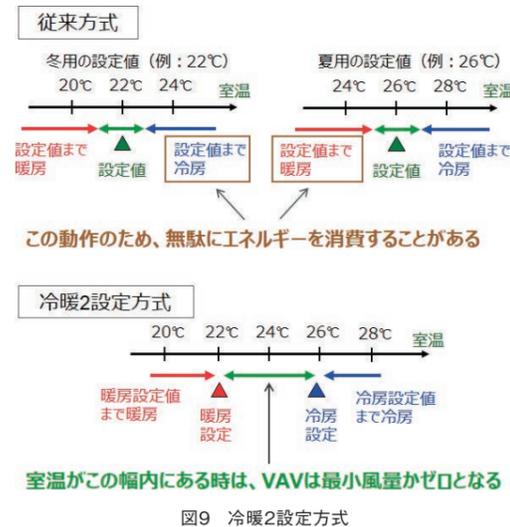


図9 冷暖2設定方式

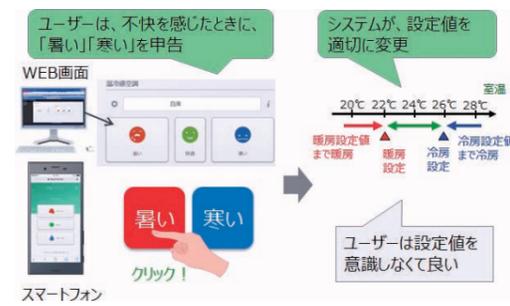


図10 温冷感空調システム

4. 利便性を向上させる技術

本建物は省エネルギーだけでなく、在室者の快適性や利便性を向上させ、より良い空間づくりに挑戦している。ここではその技術を紹介する。

4.1 ネクスフォードDD

本建物1Fには、カフェ型のワークスペースを設置し(図11)、集中して思考する場所と気分転換できる場所をバランスよく配置している。空調制御でも、在室者の快適性向上を目的に、従来のVAV制御のゾーンよりも細かい単位で制御が可能なセル型空調システム ネクスフォードTMDD(Damper on the Diffuser)を導入した(図12)。

本システムは、吹出口上部に設置する吹出口ダンパ、空調コントローラ、WP(ワークプレース)センサ、スマートフォン操作アプリで構成されている。WPセンサは執務者のデスク上に設置して温度・湿度・照度を計測できるセンサで、Bluetooth[®] Low Energy(BLE)通信を用いて吹出口ダンパに計測した情報を送信する。吹出口ダンパは、内蔵するBLE通信の受信機で最寄りのセンサを自動検知し、計測値を取得、吹出口の風量を制御する。在室者は、スマートフォン操作アプリで、最寄りの吹出口ダンパとBLE通信で接続し、自席にしながら、シンプルな操作手順で、空調のON/OFFや温度設定ができる。このシステムにより、VAV空調よりも細かいゾーンで制御し、負荷の偏在に対応でき、周囲よりも少し涼しい場所や暖かい場所を作り出すこともできる。吹出口個々に温度制御をしているので、レイアウト変更やテナント入退去時の計装工事がほぼ発生しないのも大きな特徴である。



図11 カフェ型ワークスペースとネクスフォードDD

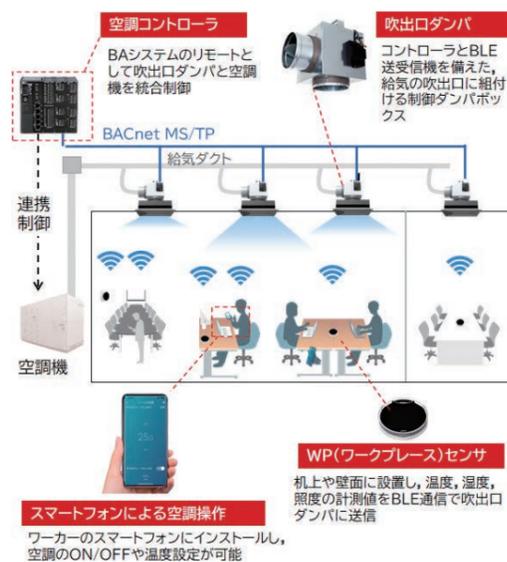


図12 ネクスフォートDDシステム

4.2 赤外線アレイセンサシステム

本建物は、赤外線アレイセンサシステムを用いて在室者の検知をしている。赤外線アレイセンサは、物体から放出する微小な赤外線の量から物体の表面温度を検出できるセンサで、センサ内部に赤外線検出素子を複数個配列し、各素子が違う箇所の表面温度を隙間なくとらえることで検出対象範囲の表面温度分布を把握することができる。人は周囲と温度差がある場合が多く、表面温度分布を解析すれば在室者を検知することができ、検知エリア内に人が複数いた場合でも人数やその座標も特定できる。

本建物ではこのシステムの特性を活かし、人のいないエリアを特定し、空調設定値や照明照度の緩和のほか、在室者の人数に応じた換気量制御も実施している。照明の制御では、人のいる箇所だけでなく、人のいる周辺エリア(隣接エリア)も区別して、ある程度の照度を確保することで、周りが暗いことで感じる在室者の不快感を軽減する制御も実施している(図13)。

また、カフェ型ワークスペースの各席の使用状況(図14)や、食堂の混雑状況(配膳の行列状況)(図15)を検知し、その状況を社員は自身の業務用PCで確認できるようにした。このシステムにより、社員は、今、自席から移動するべきかの判断に活用することができる。またこれらの情報は、新しいワークスペースの使い方の方の分析にも、今後活用していく予定である。



図13 照明の隣接制御

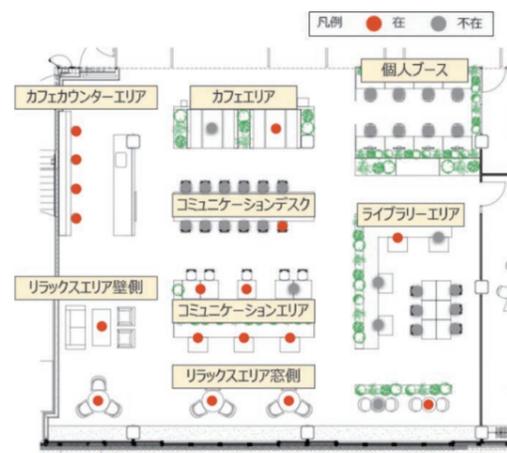


図14 席の使用状況の可視化画面



図15 食堂の混み具合(行列)検知の画面

4.3 照明と空調連動制御

本建物2Fの食堂は、食事の時間以外はワークスペースとして活用している。そして、このスペースは、温度設定の高い場所と、低い場所をあらかじめ作っておき、温度設定と照明の色温度を連携する制御を実施している(図16)。

人は、それぞれ好む温熱環境に違いがあり、ここでは空調が個々の好みに合わせるのではなく、人自身が温熱環境を目で見て把握し、自分の好む場所を選択してもらうようにしている。また、人は、温熱環境が同じでも、照明が暖色系の色であれば暖かく、寒色系の色であれば涼しく感じる効果もあり、その相乗効果で、より良い環境を実現している。



図16 照明と空調連動制御

5. 将来技術の試行

本建物では、通常の業務用ビルではまだ見ることのできない技術も実装し、お客様との対話を重ねながら今後の活

用方法の検討もしている。ここでは、その取組み事例を紹介する。

5.1 AR技術を用いた温度や風量の見える化

AR (Augmented Reality) とは拡張現実のことで、タブレットのカメラで読み取った画像に、デジタル情報を重ね合わせて表示する技術である。第103建物では、この技術を用いて、普段、目で見ることが困難な「温度」や「風量」の見える化に挑戦している。この見える化は、ネクスフォートDDの各吹出口の風量と温度、また縦型蓄熱槽内の温度分布を対象とした。

見える化のための情報は、タブレットの専用アプリケーションからインターネット経由でアズビルのクラウドシステムにアクセスし、中央監視システムから見える化に必要な現在情報を取得する(図17)。ユーザーはタブレットで特定場所を用意されたARマーカを読み込むことで、カメラで読み取った画像と取得した情報を重ね合わせて見ることができる(図18・図19)。そして、これらの画像をお客様に紹介しながら、今後の活用方法を議論している。

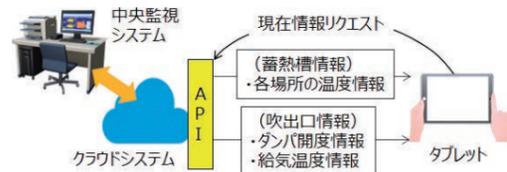


図17 ARによる見える化システム構成



図18 ARによる吹出口風量と温度の可視化



図19 ARによる蓄熱槽温度の可視化

5.2 水に触れることができるワークプレイス

自然の風など屋外の心地よさを感じることができ、テラス席には、足湯の機能もあり、今までにないワークプレイスとなっている。水の温度は制御可能であり、夏場は足水とすることで涼しさを感じることもできる。また照明の色も自由に変えることができ、例えば、夏は寒色系の色でひんやり感を、冬は暖色系の色でぽかぽか感を演出するようなこともできる。今後、このテラス席の効果も検証していきたいと考えている。



図20 屋外のテラス席での打合せ風景

6. エネルギー消費量

現在の建築物省エネ法(正式名称:建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律)では、基準値よりもエネルギー消費量の多い建築物は建設することができないため、建築物の確認申請時にエネルギー消費量見込みを計算し、提出することになっている。また、その計算値が基準値の50%以下となると、ZEB Readyの認証を受けることが可能となる。

本建物では確認申請時のエネルギー消費量は基準値の69%となっており、ZEB Readyの認証には届かない結果となった。しかし、実際の1年間のエネルギー消費量を評価すると、基準値の30%のエネルギー消費量となり、省エネルギー性能の高い結果となった(図21)。

これは、確認申請時に評価できる省エネルギー項目でなく、評価できないが効果の大きい施策を重視し、計画を立てた結果と考えられる。近年、ZEB認証のため、計算値を重視される傾向もあるが、実際のエネルギー消費に大きく寄与する施策を、本建物から多く発信していければと考えている。



図21 エネルギー消費の評価

7. おわりに

本稿では、新棟の特徴的なソリューションを中心に紹介したが、本建物では他にも多くの技術を導入している(表1)。また、これからも新しいソリューションを実装していく予定である。今後、中央監視装置に蓄積している運用データも活用し、今回紹介した技術含めて、分析・評価し、PDCAを廻して、価値ある技術を多く生み出していきたい。

表1 第103建物に導入したその他技術

導入技術	技術概要
VWT制御	熱源の出口温度設定を可変させて、熱源効率を向上
VWV制御	空調機のパルプ開度情報と連携して、搬送ポンプの圧力設定を下げて、搬送動力を削減
能力不足防止制御	猛暑などで建物設備能力の限界を超えそうなことを事前に把握し、事前予冷などで能力不足を回避
ディマンドリスポンス	電力削減の指令時に、電力使用機器からガス使用機器に切り替え電力消費を削減
空気式放射空調	放射パネルも用いた気流感の少ない空調制御を実現し、快適性を向上
厨房排気量制御	赤外線アレイセンサでコンロやフライヤーの発熱を検知することで、厨房の使用状況を把握し、排気量を制御し省エネルギーを実現
BIM活用	BIMと中央監視の連携を検討
照明色温度選択	好みの色温度を選択できる会議室で、知的生産性の向上を目指す
ダンボールダクト	ダンボールの素材のダクトを採用しCO ₂ 排出量削減に貢献

<参考文献>

- (1) 小澤諭, 明本学: アズビル藤沢テクノセンター第103建物, BE建築設備2023年5月号, pp.10-15, 一般社団法人建築設備総合協会

<商標>

ネクスフォートは、アズビル株式会社の商標です。
BACnetは、ASHRAEの商標です。
Bluetooth[®]はBluetooth SIG, Inc.の商標です。

<著者所属>

太宰 龍太 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー
マーケティング本部 IBシステム部

予兆検知・診断技術の開発

製造装置における製造ロス削減と省エネの取組み

Development of anomaly detection and diagnostic technologies: Efforts to reduce manufacturing losses and energy savings in manufacturing facilities

丸野 智広
Chihiro Maruno

西澤 慶祐
Keisuke Nishizawa

保坂 儒人
Yoshito Hosaka

キーワード

異常検知, 予兆検知, 状態基準保全, カーネル密度推定

製造装置を用いたプロセスでは、装置の異常に伴い製造ロスやエネルギーロスが発生する。製造装置の多くは自動化されており、同種の製造物に対する装置動作は繰り返し再現性があり、製造時の物理量を計測・比較することで装置動作の変化を可視化できる。これを利用して異常の発生や予兆を検知し、TBMからCBMへ移行することで、ロスを削減できる。今回開発した予兆検知・診断技術では、繰り返し再現性のある製造プロセスにおいて、基準データをもとに、異常やその予兆を検知する。そこで本稿では、この異常の予兆検知・診断技術の概要と、その有効性確認のために行った実証実験について述べる。

In processes using manufacturing equipment, manufacturing and energy losses occur due to equipment malfunctions. Most manufacturing equipment is automated, and equipment operation for the same type of product is repeatable and reproducible, and changes in equipment operation can be visualized by measuring and comparing physical quantities during manufacturing. This can be used to detect the occurrence of anomalies, or and signs of anomalies, and reduce losses by switching from TBM to CBM. The newly developed predictive detection and diagnosis technology detects anomalies and their predictive signs based on reference data in manufacturing processes that can be repeatedly reproduced. Therefore, this paper provides an overview of this anomaly sign detection/diagnosis technology and describes demonstration experiments conducted to confirm its effectiveness.

1. はじめに

持続可能な社会の実現に向けてカーボンニュートラルへの取組みは社会全体で求められている。ファクトリーオートメーションにおいても、その実現に向けて製造ロス削減やエネルギーロス削減への関心は高まっている。

近年使用されている製造装置の多くは自動化されており、同種の製造物を繰り返し製造する。これらの製造装置は長期にわたって運用され、安定した操業を維持するためには製造装置を保守点検し管理する必要がある。

従来、製造装置の管理はTBM (Time Based Maintenance: 時間基準保全) が主流とされていた。これは、あらかじめ規定回数や規定時間を設定し、その周期に合わせて点検する手法である。この保全により、製造装置の異常についてある程度の抑制が可能である。しかし、製造物や

製造装置には個体差があり、異常が発生するまでの回数や時間にはばらつきがある。規定回数や規定時間が、異常が発生する回数や時間に対して短すぎる場合、過剰な対応を行ってしまう可能性が高くなる。一方、規定回数や規定時間が長すぎる場合、異常な状態で製造を行ってしまう可能性がある。これらを見極めて適切な規定回数や規定時間を決めるのは難しい。

そこで近年では、CBM (Condition Based Maintenance: 状態基準保全) と呼ばれる手法が取り入れられている。この保全は、製造装置を特定の手法を用いてロットごとに状態を診断し、異常があれば対応するものである。これにより、TBMで発生していた規定期間内の異常に対応できるほか、過剰な対応を削減できるため、製造ロスや製造品の手直し、追加生産によるエネルギーロスを削減できる。

本稿では、繰り返し再現性のある製造プロセスにおける

異常の予兆検知・診断技術の概要と、実証実験による有効性の確認結果を述べる。

2. 課題

製造装置におけるCBMの手法の1つとして、センサ等を用いて装置内異常を自動検出する手法がある。これは、ロットごとに製造装置の異常検査を行い、異常があれば装置内の故障箇所を修繕する手法である。なお本稿では同じ条件で製造される製造物の製造数量の最小単位をロット、1つの製造物を製造するための製造プロセスをサイクルと表現する。これにより、もし装置が異常な状態で製造を行っても、その直後の検査により異常が発覚するため、製造品のロスは1つで抑えることができる。一方、ロットごとに装置の検査を行うためタクトタイムが長くなり、生産性が低下してしまう欠点が存在する。

この欠点を回避するために、製造中の動作を計測して装置内の劣化する箇所の状態を推定する手法が注目されている。状態推定に使用されるパラメータは多種にわたり、装置内の画像を撮影し異常を検知するものや、製造時の動作音から装置状態を推定するものなどが存在する。これらは適切な学習をすることにより、通常時との違いを検知でき、異常状態による製造を低減することができる。しかし、光や音などは測定条件に制約があるなど、利用にあたって高い障壁がある。

また、繰り返し再現性のある製造プロセスは同種の製造物に対するサイクルのみで、製造物が異なれば装置の動作は異なる。状態推定を行う前段階で、計測した物理量が同種の製造物に対するものかを識別する必要がある。

そこで今回開発した予兆検知・診断技術では、製造にともなって変化する物理量のうち、光や音などに比べて測定条件の制約が少ない電流や電圧といった電気信号を対象とし、その信号の推移を品種ごとに検査し異常を検知することを目指した。

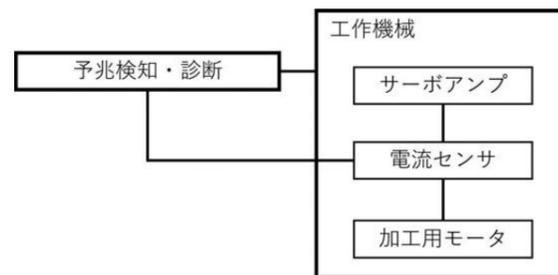


図1 システム構成例

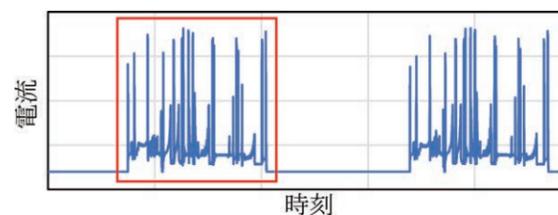


図2 電流値の取得例とサイクルの切出し

3. 診断対象・計測方法

繰り返し再現性のある製造装置の一例として、今回は旋削加工を行う工作機械を診断の対象とした。工作機械へ適用した予兆検知・診断技術のシステム構成例を図1に示す。工作機械内部のサーボアンプから加工用モータに接続されている三相電流ケーブルのいずれかに電流センサを設置し、電流値を計測する。計測した電流値情報をもとに、工作機械の加工用モータの負荷を推定する。工作機械がモータを低負荷で回転させる場合には機差が存在するが10 A程度の電流が流れ、高負荷で回転する場合には10 A~100 A程度の電流が流れるため、電流を計測することで加工用モータの負荷を推定できる。

今回は、1サイクル中に得られた加工用モータの負荷状況を複数回分取得し、正常時の基準データを生成する。基準データとして用いるサイクルの数は装置や製造工程に応じて異なるため、装置ごとに適切な回数に調整する。装置のこの基準データと現在の加工データを比較し、工具異常の予兆検知・診断を行う。

4. 異常の予兆検知・診断

今回開発した異常の予兆検知・診断技術は、基準データ作成ステップと検査ステップに分かれている。検査を行うには、製造する品種ごとの基準データが必要となるため、新品种を加工する場合や設計、加工条件が変更になった場合は、新たにモータ電流値を計測し、基準データを生成する必要がある。

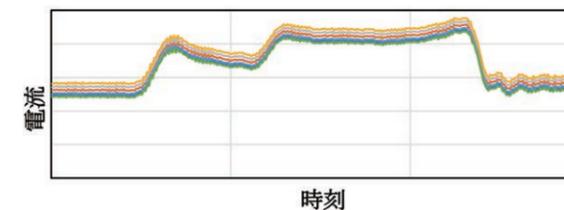
4.1 基準データ作成

基準データ作成は、使用者が今後加工する予定である任意の品種について行う。

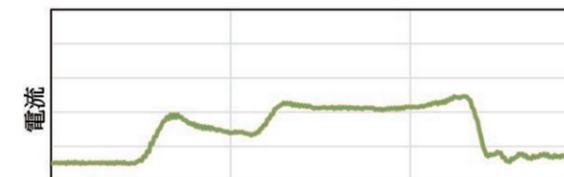
まず初めに、図2のようにセンサから得られる連続の電流値をサイクルごとに切り分ける。切り分けでは、取得した電流値が一定時間以上0でなかった部分をサイクルとする。

1サイクル切出しの完了後、オフセット補正とジッタ補正を行う。オフセット補正は、図3-aのようにサイクルごとに電流が異なる場合があるため、オフセット補正することで図3-bのようにサイクルによらない波形を取得でき、異常波形の検出を容易にする補正である。一方ジッタ補正とは、各工程のタイミングのずれを調整する補正である。図4-aのように同一品種の加工であっても外部要因により生じるサイクル内の各工程のずれを、1回目に取得したサイクルを基準として、図4-bのように補正する。これにより、加工タイミングのずれなどによる誤検知を低減することができる。

その後、オフセット補正とジッタ補正済みのサイクルの電流データについて規定回数分の取込みを行う。取込みが完了すると、サイクル内の加工区間の推定を行う。加工区間とは、サイクルのうち実際に加工が行われている区間、つまり工具が使用されている区間のことである。加工区間のみを診断の対象とすることで、工具の状態を精度よく推定することができる。材料の加工時には工作機械のモータの負荷電流が変動することを利用して加工が実施されていると予想

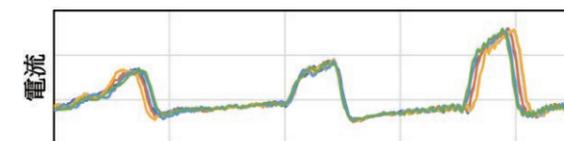


(a) オフセット補正前

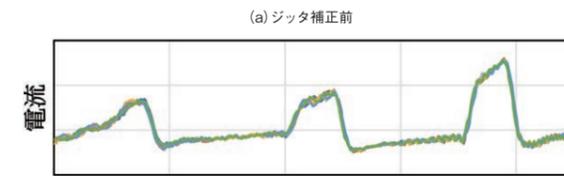


(b) オフセット補正後

図3 オフセット補正による電流の変化



(a) ジッタ補正前



(b) ジッタ補正後

図4 オフセット補正による電流の変化

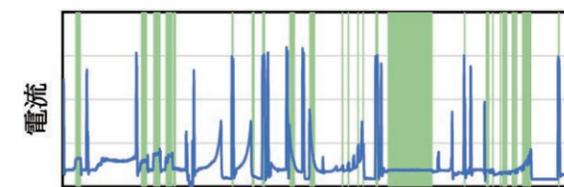


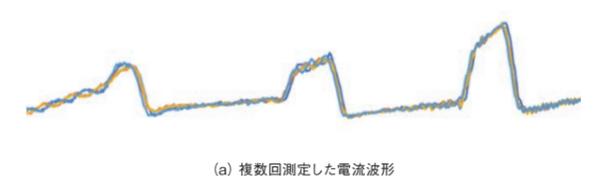
図5 加工区間切出し例

される区間を検出する。図5に、サイクルの加工区間切出し例を示す。

以上の工程により得られたデータを基準データとして記憶する。

4.2 検査

検査は、実際に加工する際に得られた電流波形を検査データとして、基準データ作成で得られたデータを参照し、その乖離度によって異常か否かの判定を行う。検査工程は主に、サイクル切出し、品種判別、オフセット補正、ジッタ補正、カーネル密度推定量の算出、スコアの算出、診断結果の出力の工程から成り立っている。



(a) 複数回測定した電流波形



(b) KDEで得られた推定正常範囲

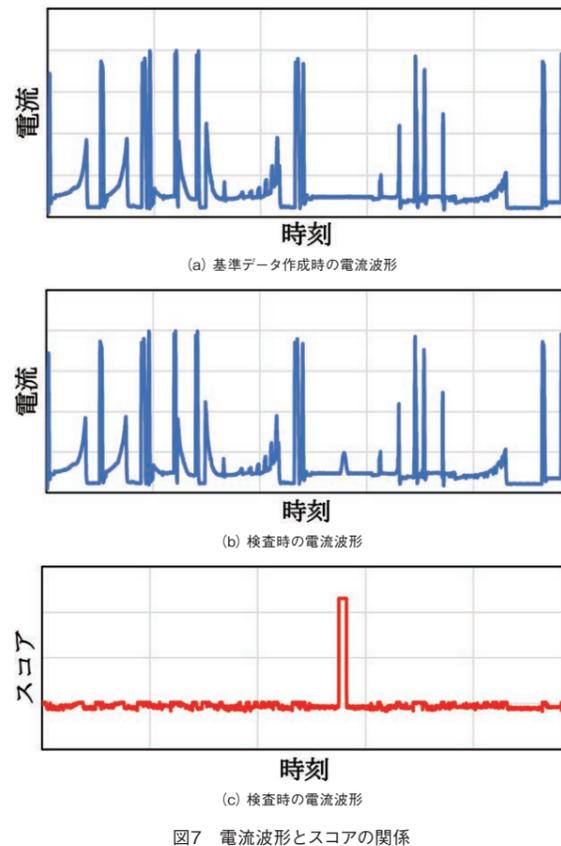
図6 測定した電流波形と得られた正常範囲

サイクルの切出しは基準データ作成時と同じアルゴリズムを利用する。その後、切り出された電流波形を参照し、加工された品種を判定する。品種の判定では、電流波形の形状を、生成済の基準データと照合して一番近いものを、当該の加工品種と判別する。なお、工作機械から信号入力により品種情報を得ている場合はこれを優先する。また、品種の自動判別機能を利用せず、使用者の判断で加工品種を設定することも可能である。

品種判別完了後、その品種の基準データを参照してオフセット補正とジッタ補正を行う。なお、補正手法は基準データ作成時と同じである。補正により成形された電流波形の出力後、KDE (Kernel Density Estimation: カーネル密度推定) を用いた異常判定を行う。KDEを用いた異常判定はオンライン異常予兆検知システムBiG EYES™にも取り入れられている⁽²⁾。図6にKDEによる推定正常範囲を導き出した一例を示す。KDEにより、複数回の電流波形から正常範囲を推定し、サイクル内の一点一点でこの範囲との乖離度合をスコア化する。これにより、サイクル内の各タイミングにおいてスコアが算出される。図7にその一例を示す。図7-aに示す基準データ作成時の電流波形に対し、図7-bに示す検査時の電流波形は赤枠部分の波形が大きく異なっている。図7-cにおいて、図7-bで囲われた赤枠のうち、特に差異が大きい部分については、スコアがサイクル内のいずれのタイミングに比べて上昇していることが分かる。

上記で得られたサイクルのスコア推移と、基準データ作成時に推定した加工区間範囲を参照し、その加工における代表スコア値を決定する。この代表スコア値が、しきい値を超えた場合はなんらかの異常が発生したとして、使用者に通知する。

以上により、各加工で代表スコアが算出される。この代表スコアは、工具が新品なほど小さく、使用回数が増えるほど大きくなる。これは摩耗などにより工具状態が変化するためであり、この代表スコアの推移を観察することで、工具の異常だけでなく摩耗状態を推定することも可能である。



5. 検証

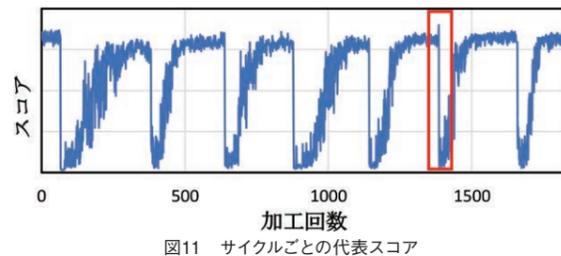
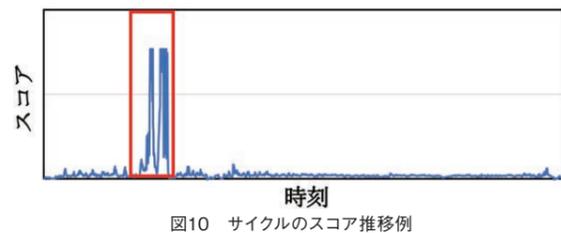
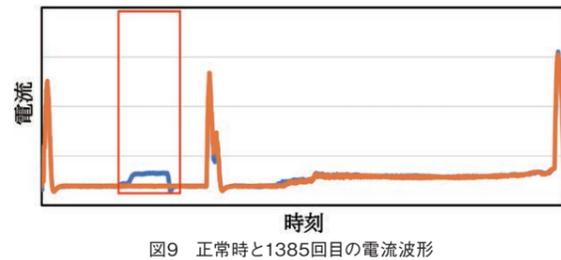
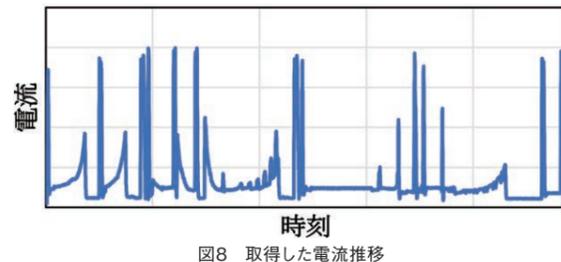
工具異常の予兆検知・診断機能の有効性確認のため、実験を行った。今回の検証では、一品種を加工し続ける工作機械の、加工用モータに接続されるサーボアンプのケーブル出力に電流センサを設置し、新品工具での加工を基準データとして取込んだ。その基準データをもとに検査を行い、適切な予兆検知が行われるかについて確認した。なお基準データ作成に用いるデータは工具を新品に変えた直後の15サイクルとし、品種判別は使用者による指定で行った。また、検査の対象は基準データ作成直後の加工から一定期間内に加工された全加工を対象とした。

6. 実験結果

図8に今回対象とした品種を加工した際の基準データの電流推移を示す。切削負荷により電流が上昇している部分が加工区間と推定されることが分かる。

この基準データをもとに、1818回の加工について検査を行った。図9に、基準データと異常と思われる加工(1385回目の加工)の電流波形を示す。基準データの波形と比較すると、赤枠部分の電流値が大きく異なっていることが分かる。

図10に示すサイクルのスコア推移を示す。1サイクル中のスコアは基準データ波形と異なるほど大きくなるため、特に赤枠部分の電流値が基準データと大きく異なっていたことが分かる。これをサイクルごとに算出し、それぞれについて代



表スコアを決定した。

図11に、サイクルごとの代表スコアを示す。図11より、一定周期ごとに代表スコアが下がっていることが確認できる。これは、一定の加工回数ごとに工具を新品のものに交換しているため、基準データの電流波形に近くなるためである。また図9で取り上げた1385回目の加工で代表スコアが上昇していることが見て取れる。

以上より、工具の異常発生時や、工具の摩耗傾向が観察できることが確認できた。

7. おわりに

繰り返し再現性のある製造装置の異常とその予兆を検知する技術を開発するにあたり、一例として、工作機械で使用している工具の状態を可視化し、工具の摩耗状態の推定や工具異常の検知について検証した。この技術により、現場の製造ロスやエネルギーロスの削減といった、市場の要求に大きく寄与できると考えている。

今後は、この手法をその他の事象に適用させ、様々な分

野での予兆検知を行えるようにしたい。

<参考文献>

- (1) 松村隆, 切削技術における動向と産学連携, 精密工学会誌, Vol.84, No.1, 2018, pp.33-37, 公益社団法人精密工学会
- (2) 鈴木毅洋, 西口純也, オペレータの意思決定を支援するバッチプロセス向けオンライン異常予兆検知手法の開発, azbil Technical Review, 2018年, Vol.59, pp.14-20, アズビル株式会社

<商標>

BiG EYESはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|--|
| 丸野 智広 | 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
戦略事業開発1部 |
| 西澤 慶祐 | 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
戦略事業開発1部 |
| 保坂 儒人 | 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
戦略事業開発1部 |

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

Advancement of functionalities for an online anomaly detection system for large-scale plants

青田 直之
Naoyuki Aota

川瀬 健
Takeru Kawase

日暮 優
Yu Higure

小川 勇磨
Yuuma Ogawa

藤原 圭佑
Keisuke Fujiwara

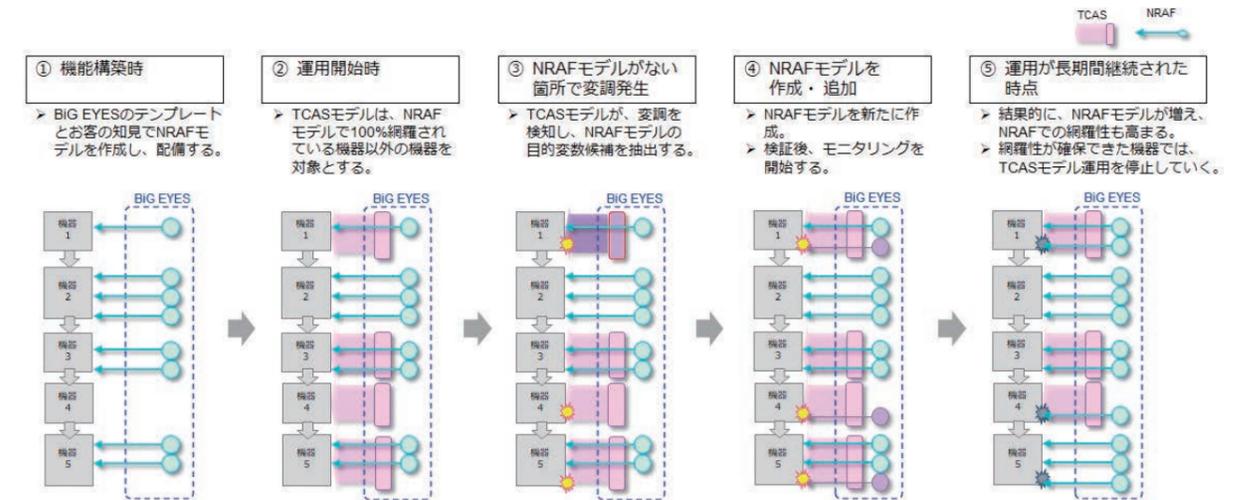


図1 TCASモデルの役割とライフサイクル

キーワード
AIによる異常予兆検知, 時系列クラスタリング, スパースモデリング

多くの製造業では、安全や安定操作のために異常検知システムの導入が進んでいる。最近では、異常予兆が検知できるかどうかという導入フェーズから、維持管理を効率的に行えるかという運用フェーズへと移行してきている。特に大規模なプラントを対象とした場合、多数の監視モデルを構築・配備する必要があるなどの課題が存在する。そこで、プラントを網羅的に監視し変調を検知するとともに、変調の原因となった変数を監視する新たなモデル構築を支援する技術を開発した。これにより、異常検知システムのモデル構築や運用を効率的に行えるようになる。

Many manufacturing industries have adopted anomaly detection systems for safety and stable operations. Recently, there has been a shift from the implementation phase, which focuses on whether abnormalities can be detected, to the operation phase, which focuses on whether maintenance and management can be carried out efficiently. There are issues such as the need to build and deploy a large number of monitoring models, especially for large plants. Therefore, we have developed the technology to comprehensively monitor plants to detect the unusual situation, and to support the construction of a new model to monitor the variables that caused the unusual situation. This will enable efficient model building and operation of the anomaly detection system.

1. はじめに

近年、カーボンフリーに代表されるように持続可能な社会の実現が企業活動に求められるようになってきた。国内に目を向けると少子高齢化、公共インフラの老朽化、働き方改革、ジェンダー平等など社会や企業が取り組むべき課題が山積している。これらの持続可能な社会の実現と心的豊かさの実現には、企業活動の飛躍的な生産性向上と場所や個人の属性に関係なく行動できる環境の実現が急務である。

アズビルでは、DXのバックボーンとなる新たなオートメーションとして「自律化システム」により、これら社会課題の解決を目指している。自律化システムとは、システムが能動的にPDCA(計画, 実行, 評価, 対策・改善)サイクルをまわし目標達成を目指すものである。生産領域での自律化システムのファーストステップとして、アズビルが開発販売しているAIを活用したオンライン異常予兆検知システムBiG EYES™では、障害発生への予測や予知により、トラブル回避やその影響

を最小化する役割を担っている。

BiG EYESの展開を進める中で、異常予兆検知システムにおけるお客様の関心は導入のフェーズ(異常予兆ができるかどうか)から、運用のフェーズ(いかに維持・管理を効率的に行えるか)へと移行してきているとらえている。製造現場の担当者がこのようなAIモデルを維持・管理していくことは負担となることが多いが、この維持・管理が適切に行われないと信頼に足る異常予兆検知ができなくなり、徐々に現場では異常予兆検知システムが使われなくなってしまう。

本稿では、連続プロセス向けBiG EYESを大規模プラントへ適用する際の課題を述べ、その課題解決として開発した技術TCAS (Time-series Correlation Analysis using Sparse precision matrix)と、それを搭載した連続プロセス向けBiG EYESのオプション製品であるBiG EYES plus™について報告する。なお、本開発は関西電力株式会社と共同で実施された。

2. 大規模プラントにおけるNRAFモデリングの課題

連続プロセス向けBiG EYESにはNRAF (Nonlinear Regression Analysis using FNN, FNN:Fuzzified Neural Network)が採用されている⁽¹⁾。NRAFでは、目的変数と説明変数との関係をFNNによる非線形重回帰により学習し、目的変数の推定値と実測値との乖離度合いに基づいて異常予兆を検知する。具体的には、異常発生時に一番最初に影響が現れる変数を目的変数(例えば温度)とし、制御的あるいは物質収支的など関連する周辺の変数(流量、弁開度など)との関係を現場の知見を基にモデリングする。

このようにして作られる回帰モデルは精度高く異常予兆検知が可能である一方、目的変数と説明変数の関係はプラント全体でみると局所的な関係を捉えているにすぎず、プラントの規模が大きくなると多数の監視モデルを構築・配備する必要がある。そのためには多大な工数を要するだけでなく、未知の異常に対しては目的変数の設定が難しい場合がある。また、当然ながら監視モデルを配備していない箇所の異常は検知することができないという課題がある。

そこで、NRAFほどの高精度なモデルではない代わりに、プラントを網羅的に見張り変調を捉えることを考える。なお、本稿で「変調」とは、異常とは断定はできないものの、想定された正常状態とは異なる状態を指すものとする。また、その変調を引き起こした変数を抽出し、それを目的変数として新たなNRAFモデルを構築することを考える。これにより、システムの導入当初は重要な箇所にNRAFモデルを配備し、NRAFモデルで網羅できていない機器に対してはTCASモデルを配備した状態で監視運用をスタートする。運用開始後、TCASモデルにて変調を検知し、抽出された目的変数候補からNRAFモデルを拡充していくことで、継続的にプラント全体の網羅的で強力な監視へと繋げていく運用が可能になる(図1)。

3. TCAS

3.1 概要

前章で述べたようにプラントを網羅的に監視する場合、事前に全ての異常を想定してAIモデルに学習させることは現実的ではなく、未知の異常を含め、これまでとは異なる状態を検知することが求められる。

そこで、正常な状態を基準状態として規定しそこからの距離を測るような、教師なし学習のアプローチを取るのが妥当と考えられる。例えば、ホテリングの T^2 ⁽²⁾やMT法⁽³⁾のような、マハラノビス距離を求めるものがある⁽⁴⁾。しかし、このような方法を採用するにあたっては以下に述べる2つの課題が存在する。

1つ目の課題は、基準状態をどのように決定するかである。通常プラントには運転状態によって複数の正常状態がある。そのため複数の基準状態を考える必要がある。この違いを無視して単一の正常状態を基準とすると極めて検知性能の低いモデルになってしまう。一方、運転状態ごとに基準を作る場合、学習用のデータを複数の運転状態ごとに切り出して準備する作業を人手で行うのは、非常に負担が大きいという課題がある。この課題に対しては、時系列データのクラスタリングを行い自動的に複数の運転状態ごとの学習データを切り出すことを考える。

2つ目の課題は、センサのノイズの影響にどのように対応するかである。プラントで計測・収集されるデータには少なからずノイズが含まれており、このノイズによって変数間の相関構造が容易に崩れることが知られている⁽⁵⁾。マハラノビス距離は変数間の相関を考慮した距離であるため、ノイズの影響を大きく受けることになる。参考文献(5)では、Graphical Lasso⁽⁶⁾というスパース構造推定を用い、本質的な相関構造を推定することでこの問題を解決している。

そこで、これら2つの課題を解決するために、TCASではスパース構造推定と時系列クラスタリングを同時に行えるTICC (Toeplitz Inverse Covariance-based Clustering)⁽⁷⁾というアルゴリズムを採用した。TICCにおけるクラスタリン

グは、スパース構造推定によって得られた精度行列(分散共分散行列の逆行列)を用いて多変量正規分布の尤度を求め、各サンプルがどのクラスタに所属するかを動的計画法(DP:Dynamic Programing)によって求める。クラスタリングが行われると、クラスタごとにスパース構造推定を行い疎な精度行列を求める。以上のクラスタリングとスパース構造推定を繰り返し計算し、クラスタメンバが収束するまで実行するアルゴリズムである(図2)。

TICCによって得られた精度行列を用いて各サンプルが

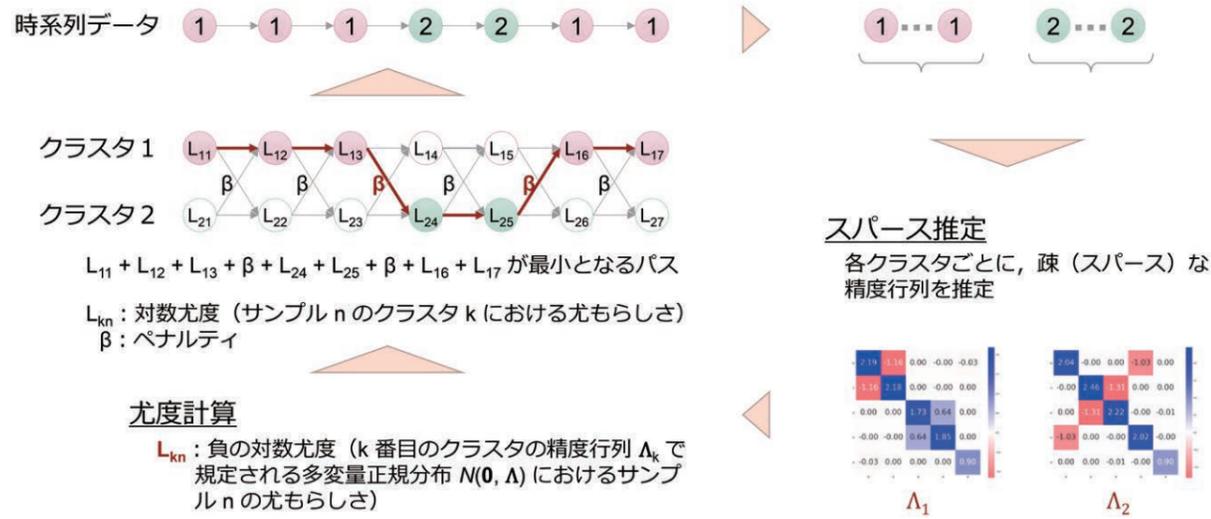


図2 TICCの動作

3.2 変調の検知

(1) 学習時

TCAS学習時のフローは以下の通りである。正常データ時系列に対し、TICCを用いてクラスタリングを行い、各クラスタの精度行列を取得しておく。この際、あらかじめクラスタ数を指定しておく必要がある。次に、学習データの各サンプルに対して所属するクラスタの精度行列を用いてマハラノビス距離を取得する。

$$MD^{(n)} = \frac{1}{p} (\mathbf{x}^{(n)} - \boldsymbol{\mu})^T \Lambda (\mathbf{x}^{(n)} - \boldsymbol{\mu}) \quad \text{式(1)}$$

ここでMD⁽ⁿ⁾はn番目のサンプル $\mathbf{x}^{(n)} \in \mathbb{R}^p$ に対するマハラノビス距離、 $\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^p$ は平均ベクトル、 $\Lambda \in \mathbb{R}^{p \times p}$ は精度行列である。なお、ここでのマハラノビス距離は変数の数(次元)によらず同程度の値となるよう変数の数pで除していることに注意されたい(MT法での定義)。

得られたマハラノビス距離の分布からそのクラスタにおけるしきい値を決定する。決定方法は、最大値やパーセンタイル値(たとえば99.99%)など、検知の感度設定に応じて決定される。

(2) オンライン監視時

オンライン監視時は、学習済みのTICCモデルを用いて新たなサンプルがどのクラスタに所属するかを推定する。そして、そのクラスタの精度行列を用いてマハラノビス距離を算出ししきい値と比較することで変調を検知する。

所属するクラスタからのマハラノビス距離を求め、所定のしきい値を上回ると変調と判断する。変調が検知されると、その変調に影響を与えた変数を求める。TCASではS/N比と、KL距離に基づく手法の2つの方法で変調を引き起こした変数を求めており、この変数をNRAFモデルの目的変数候補として出力する。

以下の節では、TCASの主要な機能である変調を検知する処理と、その変調を引き起こした変数を求める処理について述べる。

3.3 目的変数候補の抽出

検知された変調に対し、それを引き起こした寄与度の高い変数を求めることで、NRAFの目的変数の候補となることが期待できる。TCASではS/N比とKL距離の2種類の手法によって変調に対する各変数の寄与度を算出し、その上位3つの変数を目的変数候補として抽出する。S/N比では比較的短時間の変化を見ることができ即応的であるのに対し、KL距離はデータの蓄積が必要ではあるものの分布間の比較によって統計的に相関構造の変化を捉えることが可能となる。

3.3.1 S/N比

MT法における項目(変数)選択の手法として知られているもので、2水準の直交表に従って使用する変数の組み合わせを複数変えてマハラノビス距離を算出し、望大特性のS/N比を計算する。次に、変数ごとにその変数を使用している組み合わせでのS/N比の平均を求めることで、その変数の影響度合いを求めることができる⁽⁸⁾。

$$\bar{\eta}_i = \frac{1}{|S_i|} \sum_{s \in S_i} \eta_s, \eta_s = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{N_{sn}} \sum_{n=1}^{N_{sn}} \frac{1}{MD_s^{(n)}} \right) \quad \text{式(2)}$$

ここで $\bar{\eta}_i$ はi番目の変数の平均S/N比、 S_i はi番目の変数が含まれる組み合わせの集合、 $|S_i|$ は組み合わせの数、 η_s はs番目の組み合わせにおけるS/N比、 N_{sn} はS/N比算出のため

に使用されるサンプル数、 $MD_s^{(n)}$ はs番目の組み合わせにおけるn番目のサンプルのマハラノビス距離を示す。

3.3.2 KL距離

TICCの学習によって得られた精度行列を用いて多変量正規分布を規定することができる。当該クラスタの正常時の分布と、変調が起きているときの分布の2つの分布を考える。変調が起きているときの分布は、適当なサンプル数に対してクラスタ数1のTICCを用いてスパース推定し精度行列を求める。KL(Kullback-Leibler)距離は分布間の距離としてよく用いられるものの1つである。特定の変数に着目した場合、KL距離の期待値を求めることで、各変数の異常に対する寄与度を与えることができる⁽⁵⁾。

2つの確率分布、 $p_A(x)$ と $p_B(x)$ の間において、i番目の変数 x_i に着目すると、KL距離は以下のようになる。

$$KL_i^{AB} = \int p_A(\mathbf{z}_i) \left[p_A(x_i | \mathbf{z}_i) \ln \frac{p_A(x_i | \mathbf{z}_i)}{p_B(x_i | \mathbf{z}_i)} \right] dx_i d\mathbf{z}_i \quad \text{式(3)}$$

$$\mathbf{z}_i = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_p)$$

ここで \mathbf{z}_i は x_i を除いた残りの変数を表す。KL距離は数学的に厳密な意味では距離ではなく対象性が無いため、AとBを入れ替えた KL_i^{BA} を求め、最大値を寄与度として採用する。

$$KL_i = \max(KL_i^{AB}, KL_i^{BA}) \quad \text{式(4)}$$

4. BiG EYES plus

前章で述べたTCASを搭載したBiG EYES plusを開発した。本章では、BiG EYES plusの概要と、実データを用いて検証を行った例を示す。

4.1 概要



図3 BiG EYES plusシステム構成

BiG EYES plusは連続プロセス向けのオプション製品であり、BiG EYESと連動し、より広範なモニタリングとNRAFモデル構築の効率化を実現する。BiG EYES plusもBiG EYESと同様にサーバ、ビューア、コンフィギュレータの3モジュールで構成される(図3)。

コンフィギュレータはサーバに対し監視機能を定義するツールであり、データ収集からモデル構築、評価までの一連の作業環境を提供する。サーバはデータベースから作業データを取得し、TCASの学習、評価値の算出を実行し変調の有無を判定するとともに変調の原因となった変数の抽出を行う。ビューアは変調をユーザーに伝えるGUI(Graphical User Interface)であり、変調検知時にアラームを発報する他、マハラノビス距離のトレンド表示や変調原因の変数上位3つをそれぞれ表示する(図4)。異常予兆検知モデルの管理者は、ここで挙げられた変数を確認するとともにプロセスの知見を踏まえて目的変数を選択し、新たなNRAFモデルを構築することができる。

4.2 検証例

火力発電プラントの実データを用いてオフライン検証を行った結果について述べる。重原油ポンプの軸受が損傷したことによりポンプの振動や軸受温度が上昇し、DCSの警報によりオペレータが気づいた事例である。

正常時のデータをクラスタ数5で学習を行い、目視により適切に運転状態がクラスタに切り分けられていることを確認した。



図4 ビューア画面での変調原因変数の表示



図5 実データ検証時のBiG EYES plus画面

このモデルを用いて、上記異常が発生した付近のデータで検証した結果が図5である。画面上部のカラーバーにおいて、その時点がどのクラスターに属しているかを確認することができる。画面中央部にて、監視変数のトレンドグラフを確認できる。画面下部にて評価値を表示しており、クラスターごとに自動決定されたしきい値を一定時間（設定変更可能）連続で超えた際にアラーム（評価値が赤色に変化している箇所）で変調を検知したことをユーザーへ通知する。オペレータがポンプ振動や軸受温度上昇のDCS警報により気がついた時刻に対し、TCASが約4時間前に変調を検知できていることが分かる。また、変調の原因となった変数として、プロセス知見と合致するポンプの振動値を正しく抽出することを確認できた。その他、エンドユーザーである関西電力の実データを用いて様々な故障モードに対する検証を行った結果、TCASはオペレータによる異常発見タイミングと比べ、数時間から数日以上早く変調を検知でき、有用性を確認できた。

5. おわりに

本稿では、連続プロセス向けに新たに開発した変調検知手法TCASについて述べた。本手法は、複数の正常状態とセンサのノイズの影響を考慮し、プラントを網羅的に監視することができるという特徴を持つ。さらに、クラスタリングによって複数の正常状態の時系列データを自動的に切り出したり、変調を引き起こした変数を目的変数として新たにNRAFモデルを構築するフローを支援したりと、エンジニアリング作業やモデルの維持・管理といった異常検知システムの運用への寄与が期待できる。

今後は、ユーザーからのフィードバックを受けてより使いやすく効率的な運用が行えるような機能改善を行っていききたい。例えば、現在は人が設定する必要があるクラスター数などのハイパーパラメータの入力をなくし、自動あるいは半自動で決定できるような機能追加が考えられる。引き続き、BiG EYESが「安心・快適」で、自律的な生産空間の実現に貢献する製品として成長することで、より幅広い製造業で利用され、ユーザーの心的豊かさと持続可能な社会の実現の一助となれば幸いである。

<参考文献>

- (1) 木村 大作, 山縣 謙一:IoT時代のスマート設備管理を目指す操業ビッグデータを活用したオンライン異常予兆検知システムの開発, azbil Technical Review, 2016年4月号, pp.9-15, アズビル株式会社
- (2) H. Hotelling:Multivariate Quality Control Illustrated by Air Testing of Sample Bombsights, Techniques of Statistical Analysis, 1947, pp.111-184, McGraw-Hill
- (3) 立林和夫, 手島昌一, 長谷川良子:入門MTシステム, 2008, pp.53-57, 日科技連出版社
- (4) 井手 剛:入門 機械学習による異常検知, 2015年, コロナ社
- (5) 井手 剛:疎な相関グラフの学習による相関異常の検出, 人工知能学会第二種研究会資料, 2009, 2009巻,

DMSM-A803号, p.04-

- (6) J. Friedman, T. Hastie, and R. Tibshirani: Sparse inverse covariance estimation with the graphical lasso, Biostatistics, 2008, 9, pp.432-441
- (7) D. Hallac, S. Vare, S. Boyd, and J. Leskovec: Toeplitz Inverse Covariance-Based Clustering of Multivariate Time Series Data, Proc. ACM SIGKDD, 2017
- (8) 田口玄一:品質工学講座3 品質評価のためのSN比, 1988, 日本規格協会

<商標>

BiG EYESはアズビル株式会社の商標です。
BiG EYES plusはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|--|
| 青田 直之 | アズビル株式会社
AIソリューション推進部 |
| 川瀬 健 | 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
戦略事業開発3部 |
| 日暮 優 | 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
戦略事業開発3部 |
| 小川 勇磨 | 関西電力株式会社
火力事業本部 火力開発部門 |
| 藤原 圭佑 | 関西電力株式会社
火力事業本部 火力開発部門 |

生成AIのアプリケーションへの導入に向けて

技術検証と展望

Toward the implementation of generative AI in applications: Technical validation and prospects

楓川 滉人
Hiroto Kaedegawa

秦 楊
Qin Yang

キーワード

生成 AI, AI によるテキスト生成, AI による情報検索, 自然言語処理 (NLP)

生成AIは、テキストなどの新しいコンテンツを生成する技術で、アズビル製品への導入が期待されている。本稿では、生成AIのアプリケーションへの導入に向けて、より高精度な回答やより価値のあるコンテンツを生成するための具体的なシステム実現方法を検証した上で、適用ケースを明確にする。さらに生成AIの導入にあたり、セキュリティ等の課題についても考察し、今後の展望を示す。

Generative AI, a technology for creating new content such as text, is anticipated to be integrated into Azbil products. This paper reports on the validation of specific system implementation methods for producing more accurate answers and valuable content in preparation for the introduction of generative AI applications, clarifying applicable cases. Additionally, it discusses challenges like security in the implementation of generative AI and outlines the future.

1. はじめに

近年、「生成AI」⁽¹⁾と呼ばれるAI技術が飛躍的な発展を遂げ注目を集めている。テキストや画像などのコンテンツを手軽に生成できる生成AIは業務の効率化や新たなアイデアの創出などビジネス分野での活用が期待されている。しかし、このような最新技術の導入は、技術自体の理解や検証、アプリケーションへの導入手法をはじめ、そもそもどんな課題解決に適用するか、どのような効果を想定するかなど、検証すべき項目が多岐に渡り、導入までに期間を要することも少なくない。

今回扱う生成AI、特にOpenAIが開発したChatGPTは、高度な自然言語処理と大規模機械学習モデルを駆使するゲームチェンジャーとなりえる革命的なシステムと言われており、アプリケーションへの導入も、スピード感を持って検証を進め、アプリケーションをとおして、その恩恵をユーザーに提供することが望まれている。

本稿では生成AIのアプリケーションへの導入手法、課題および適用ケースについての検証結果を報告する。特に、ChatGPTをアプリケーションに導入する際の回答品質を向上するためのモデル適応への対応、曖昧または複雑な指示への対応、および指示や質問が長い場合への対応の技術開発についての調査結果を提供する。さらに、ChatGPTは

汎用的な知識しか持っていないため、自社が保有するナレッジを活かせない課題への対応技術にも焦点を当てる。

2. 生成AIの適用

生成AIはテキスト、画像、音声、音楽、動画、3Dモデルなど多種多様なデータ形式を扱える。だが、学習データや生成データの著作権については議論が続いている。テキストデータは変更の容易さ、パラフレーズや引用の可能性、文脈依存性といった特性から、他のメディア形式と比べて著作権問題が比較的少ないと考えられている。そのため、この検証では主にテキストデータを対象にする。

また、この技術検証をとおして以下のことを明確にし、今後の企画・開発に役立てる。

- ・アプリケーションへの導入手法(第3章)
- ・適用ケース(第4章)
- ・導入(システム実現)における課題(第5章)

3. 適用手法

3.1 検証内容の立案

近年、ChatGPTはAI分野における衝撃的な存在として大きな影響を与えている。この生成AIモデルは、大量のテキス

トデータに基づいて訓練され、言語のパターンや文脈を理解し、新しいテキストを生成する能力を持つ。ChatGPTをアプリケーションに導入する際、OpenAIが提供するAPIを使用することは一般的になっているが、APIを直接的に使用する手法とLangChain⁽²⁾などを通じて間接的に使用する手法がある。本検証では、「開発の簡単さ、API連携の柔軟性、そしてOpenAIが提供する最新機能への迅速なアクセス」を考慮し、OpenAIのAPIを直接使用する手法をアズビル製品現場でつくる作業記録サービス(AWS上で稼働するクラウドサービス(以下、RCD))に組み込むことにした。

具体的には、本検証の内容はOpenAIとAPI連携に欠かさないプロンプトエンジニアリング手法(AIに最適な質問や指示を設計するプロセス)とシステムの実現、特定情報(専門知識/最新知識等)を基にした回答のシステム実現、高度な情報検索に必要な情報の分割・ベクトル化(類似検索向け)・次元削減などの手法の確立、そして生成AIの適用ケースの検証とアプリケーションへの導入における課題の特定・考察である。適用ケースの検証は第4章、課題と考察は第5章にて説明する。

3.2 システム構成

RCDのシステム構成を基にした検証システムの構成の一例を図1に示す。この例では、RCD技術検証版はAzure OpenAI APIを介してChatGPTとシステム連携し、Azure AI Search APIを介して社内ナレッジを検索する(3.4節参照)。

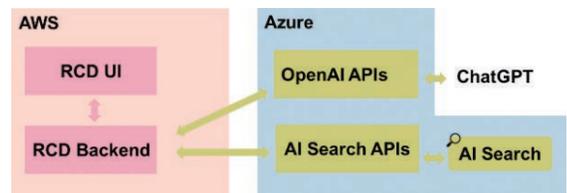


図1 RCD技術検証版のシステム構成例

3.3 プロンプトエンジニアリングのシステム実現

回答/コンテンツの質を向上させるために、システムは生成AIに対して最適化したプロンプト(指示や質問)を提供することが重要である。このプロンプトエンジニアリングについて以下のような課題があった。

- ・回答が汎用的であり、特定のタスクを達成することが困難。
 - ・曖昧または複雑なタスクに対する回答が、指示や質問に関連する内容を生成しているものの、タスクの解決に対する適切な内容となっていない。
 - ・指示や質問の内容が長い場合は使用コストが高く、またトークン(テキストを処理する際の最小単位)数の上限を超えるとエラーが発生する。
- これらの課題を解消するために、システム設計上で以下の手法を導入した。

3.3.1 特定タスクのモデル適応

各種製品やサービスに適応したモデルにチューニングする手法として、ファインチューニング(Fine Tuning、特定のタスクやデータセットに合わせて、既存モデルを再トレ

ニングする手法)、およびフューショット学習(Few-shot Learning、ごく少数の例を使って、既存のトレーニング済みモデルに新しいタスクを迅速に学習させる手法)がある。

前者の場合は、ファインチューニング可能なモデルが制限されたり、学習コストが高くなったりするデメリットが生じるため、本検証ではモデルの勾配更新を基本的に必要としない(トレーニングされたモデルが少数の例から新しいタスクや情報を素早く理解して適用するため、モデルのパラメータは基本的には変更されない)フューショット学習を採用した。

フューショットの場合は新しいタスクを学習するために特定のファインチューニングを必要とせず、提供された少量の事例からタスクの内容を理解し、高いパフォーマンスを発揮することができる⁽³⁾。RCDにおけるシステム実現手法について、タスクごとにプロンプトエンジニアリングによる「案内」(モデルにいくつかの例(ショット、問題と解答のペア)を提供する)手法を使用し、特定のタスクのパターンを理解させ、回答の精度を高めることを実現した。RCD技術検証版におけるシステム実現を図2に示す。

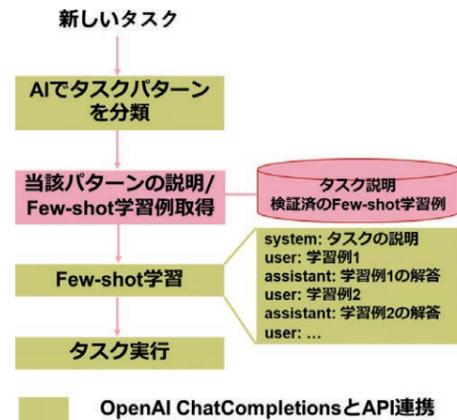


図2 特定タスクのモデル適応システム実現例

3.3.2 曖昧または複雑なタスクに対する回答精度の向上

曖昧または複雑なタスクでは、指示が不明確な場合や、タスクが多くステップで構成されていることが多い。回答の完成度/精度を高めるために、本検証では思考の連鎖手法(Chain-of-thought(以下、CoT))^(4, pp.38-42)を導入した。具体的なシステム実現手法は以下となる。

- インタラクティブタスク: AIにタスクの複雑度を判定してもらい、基準値より高いと判断された場合、システムはユーザーに追加情報を求める。
 - ユーザーがCoTを使用: ユーザーがタスクについて明確な理解を持つ場合、システムはユーザーにタスクを複数の誘導質問(思考プロセス)に分解してもらい、AIに問い合わせる。
 - AIがCoTを使用: ユーザーがタスクの全体像について明確に理解していない場合、システムは、AIにガイドラインに従ってタスクを分割してもらい、それぞれのサブタスクについてユーザーに追加情報を求め、タスクを解決する。
- 非インタラクティブタスク: システムはユーザーの介入がなく追加情報を求めることができないため、Zero-shot CoT

は有効な手段と考えられ、システムが指示や質問内容を加工(「ステップバイステップで考えてください」をつけるなど)してAIに問い合わせをする手法⁽⁵⁾を本検証に導入した。

RCD技術検証版におけるシステム実現を図3に示す。

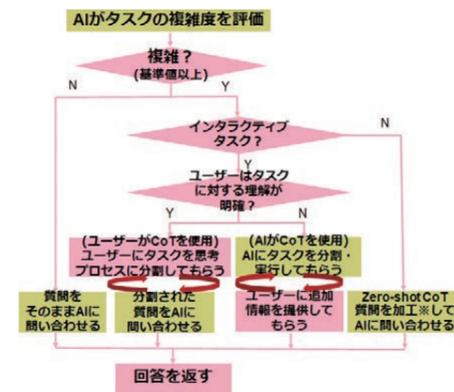


図3 CoTのシステム実現例

3.3.3 大量情報処理とコスト最適化

OpenAIの利用料金は使用モデルとプロンプト(Prompt、入力)/コンプリーション(Completion、出力)のトークン数で決まるため、モデル選択(精度とのトレードオフ)とトークン数の削減をシステム設計上で考慮する必要がある。

タスクの性質によって求められる精度が異なるため、本検証ではユーザーに精度を指定してもらい、システムは指定された条件に合わせてモデルを選択する。

プロンプトが極端に大きい場合、トークン数の上限を超えてしまい、トークン数超過エラーが発生するため、システムは使用モデルを低性能モデルに切り替え、再帰的要約(Recursive Summarization、コンテキストをチャンク(データブロック)に分割(分割手法は3.4.1(1)を参照)⇒チャンクごとに要約⇒処理結果をまとめて再度要約)手法^(4, p.44)を本検証に導入した。

RCD技術検証版におけるシステム実現を図4に示す。

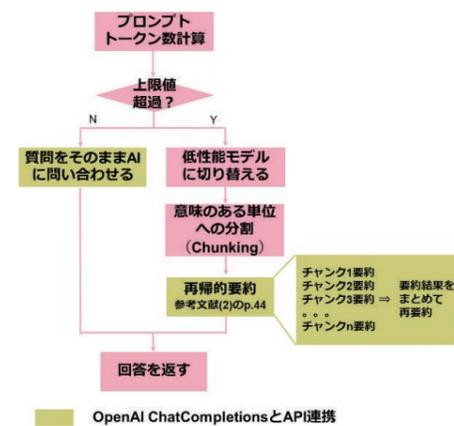


図4 大量情報処理のシステム実現例

3.4 検索強化生成(RAG)のシステム実現

本検証で使用しているChatGPTは汎用的な知識しか

持っていないため、自社が保有するナレッジを活かせない課題がある。

この課題の対策として、検索強化生成(Retrieval Augmented Generation、以下、RAG)というアプローチがある。RAGは、様々な形式の文書やデータベースからの情報を取得(retrieval)し、それを用いて新しいテキストを生成(generation)するプロセスを組み合わせたものである。

情報を取得するために、既存システムにおけるキーワード検索では、文章全体の関連性や文脈理解、検索精度、検索速度の面で課題が認識されており、これらの課題を解決するためにAIを活用した類似検索手法を取り入れた。

3.4.1 情報の前処理

類似検索を実現するためには、文章のベクトル化が必要であるが、計算効率や文脈の保持、意味の抽出を考慮して、ベクトル化の前処理として文章を分割することとした。RCD技術検証版におけるシステム実現手法は図5に示す。

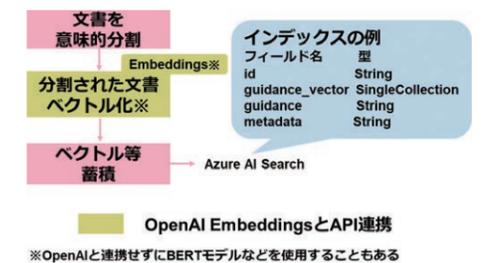


図5 検索対象の前処理例

(1) 情報の分割

情報の分割手法には固定サイズ分割と意味的分割の2つの手法がある。前者の手法では複数の意味を持つ文脈が1つのチャンクに含まれる場合や、1つの意味しか持たない文脈が複数のチャンクに分割されることがあるため、検索の精度が下がる。一方後者の手法でも、文章を章節ごとに分ける手法もあるが、意味が近い章節が複数存在したとしても別のチャンクに分割されてしまい、前述の課題を完全に解消することはできない。本検証では、文章や記録を句に分割し、意味が近い内容を1つのチャンクにまとめる手法⁽⁶⁾を導入した。具体的なシステム実現は図6に示す。

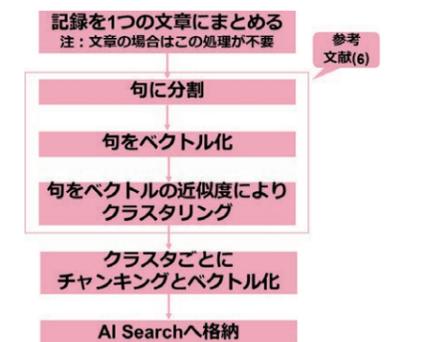


図6 文章チャンキング処理のシステム実現例

(2) 情報のベクトル化・次元削減

文章をベクトル化すると、その文章の意味的特徴を数値

形式(数値の配列)で表現することができ類似検索等に活用できるようになるが、ベクトルの次元の高低により以下の特徴がある。

- 次元が高いほどより多くの情報を保持できるため、理論的には検索精度が向上する可能性がある(高すぎると過学習(overfitting)となる)。

- 次元が低いほど検索速度や解釈性(可視化や分析をする場合の扱いやすさ)は向上し記憶容量も少なく済む。

図7と表1は、化学工場で使用されている点検ガイドラインをBERTベースモデルでベクトル化し、PCAによる次元削減後の検索速度とSTSベンチマークの評価結果の一例を示している。評価結果を見ると、ベクトル次元の増加により検索速度は低下するが、検索精度は必ずしも向上するとは限らず、ベクトル次元が検索パフォーマンス全体に与える影響は、複雑なものとなっている。

検索パフォーマンス全体を最適化するためには、タスクの目的に適した次元数を選択することが重要である。タスクの目的に合わせて次元数を切り替えるシステムの実現例を3.4.2項で説明する。

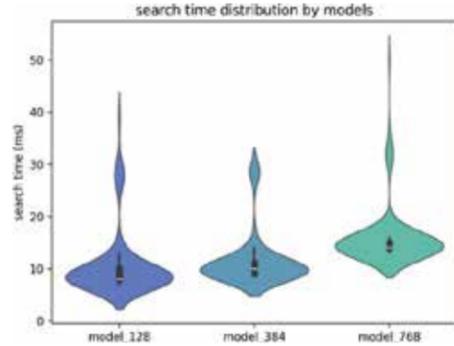


図7 次元ごとの検索速度計測結果例

表1 異なる次元数のモデルのSTSベンチマークテスト結果(スコア比較)例

次元数	コサイン類似度		ユークリッド距離		マンハッタン距離		ドット積	
	ピアソン	ピアソン	ピアソン	ピアソン	ピアソン	ピアソン	ピアソン	ピアソン
128次元	0.8596	0.8075	0.8484	0.8064	0.8307	0.8002	0.8334	0.7705
384次元	0.8615	0.8084	0.8440	0.8059	0.7950	0.7846	0.8424	0.7841
768次元	0.8616	0.8087	0.8426	0.8059	0.8426	0.8050	0.8439	0.7870

(3) ベクトルの蓄積

文章のベクトルデータは、Azure AI Searchに格納・蓄積する。ベクトルデータの蓄積は専用のデータベースを利用することが一般的であるが、本検証では既存システムとの連携性や様々なデータソースとの統合のしやすさ、システムの拡張性等を考慮しAzure AI Searchを使用することとした。

3.4.2 類似検索手法の実現例

本検証では、目的や用途に柔軟に対応できるように次元の異なる3種類のベクトルとそれぞれに対応する3本のAPIを用意し切り替えて使用することができる構成(図8)としている。システムはタスクの特性(リアルタイム性や検索精度における重視指標(コサイン類似度等))を判定し、タスクに適したベクトルを使用して検索を行う。

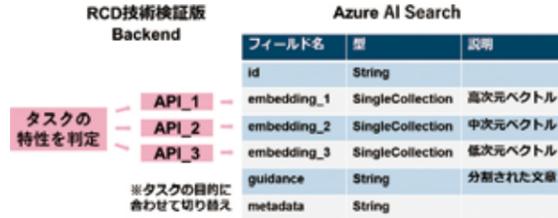


図8 タスクの目的に合わせて次元数を切り替えるシステムの実現例

3.4.3 特定情報との融合を可能とするシステム実現例

AIが持つ汎用知識と特定情報を融合したRCD技術検証版におけるシステム実現例を図9に示す。社内ナレッジ等の特定情報は予め分割・ベクトル化してAzure AI Searchに格納しておく。指示や質問を受け付けたら指示や質問をベクトル化した上でAzure AI Searchに類似検索をかけ、その結果を元にAIに問い合わせる。そうすることで、AIが持つ汎用知識と社内ナレッジ等の特定情報の両方に基づいた回答を得ることができる。

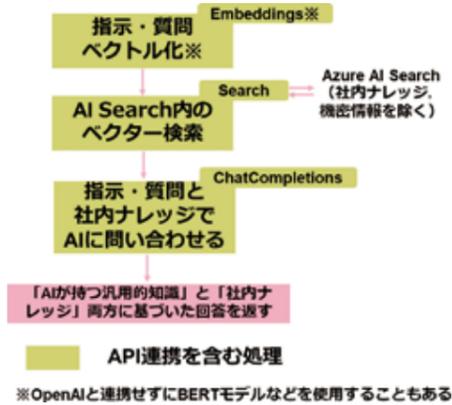


図9 「AIが持つ汎用知識」と「社内ナレッジ」両方に基づいた回答のシステム実現例

4. 既存サービスへの適用例と検証結果

第3章で説明した手法について、既存サービスへの適用可能性を検証するために、RCD技術検証版に表2に示す機能を実装した。

表2 RCD技術検証版への適用例

分類	機能	説明
テキスト→テキスト	文章作成	汎用的な知識と社内ナレッジの両方に基づく回答
	翻訳	
	要約	
テキスト→数値(スコアリンク)	判定、予知、傾向分析、提案	情報可視化のために、テキスト内容を多軸で評価(スコアリング)・数値化された情報はシステムが取り扱いやすくなる ・レーダーチャート等の図表作成によって情報を容易に分析できる
	レベル化、定量化、時系列化	
テキスト→その他	情報のクラスタリング	記録内容をカテゴリに分類⇒さらに集計可能 情報のベクトルにより、類似度の調整も可能(3.4.1節を参照)

※ 自然言語処理(NLP)を使用しているが、厳密には生成AIの範疇に含まれない

RCD技術検証版バックエンドからOpenAI API等を介することでRCDとChatGPTおよび関連システムとの連携は技術的には十分実現可能であり、HTTPを介した連携のためプログラム言語の種類に依存することなく連携できる。

5. 考慮すべきこと

5.1 既存システムとの互換性・統合

本検証で用いたシステム実現例ではHTTPを介した連携を前提としている。従ってオンプレミス型のシステムやHTTP通信が制限されるシステムとの連携はそのままでは実現できない。プロキシサーバを介して連携する、もしくは、ハイブリッドクラウドを利用するなどの対策を別途考える必要がある。

また、高性能なGPTモデルは、レスポンスに時間がかかるためリアルタイム性が求められるサービスとの連携の場合は、レスポンス要求に応えられない課題がある。キャッシュの利用や非同期処理の導入、データの連続的な処理を可能にするストリーミングの採用などの対策を別途考える必要がある。

5.2 セキュリティ・社内情報流出リスク

本検証では、技術的な実現可能性を中心に検証を行ったが、今後はセキュリティ強化と各種リスク低減のためのさらなる対策を検討する必要がある。

まずHTTPを介した連携では、データの傍受や改ざんのリスクがあるため通信の暗号化をする必要がある。

また、Azure AI Searchに保存された社内ナレッジをRAGモデルで使用する場合、プロンプトインジェクションによる情報の流出リスクが存在するため、データのフィルタリングなどのセキュリティ対策が必要である。

5.3 著作権と製造物責任

生成AIによるコンテンツの著作権と製造物責任に関する議論が現在進行中であるため、法律や政策の今後の動向に注目し、適切に対応する必要がある。

6. 今後の展望

今後、「人を中心としたオートメーション」の実現に向けて、以下の点に焦点を当てる。まず、この技術検証で確認された手法を活用し、生成AIを統合したAPIサービスを開発することでAPIエコノミーを構築する。この取り組みにより、アプリケーション開発者が生成AIを利用しやすくなる。次に、サーバーサイドレンダリング(SSR)技術と生成AIを組み合わせ、アダプティブデザインのUIを自動生成する仕組みを開発する。これにより、カスタマイズ可能でユーザビリティの高いUIが実現される。これらの取組みは、生成AIの幅広い活用と人を中心としたオートメーションの実現に貢献する。

7. おわりに

生成AI技術の技術動向を今後も引き続きキャッチアップ

し、さらなる適用可能性と技術評価を継続する。さらに、本検証で得られた成果を新たな製品企画に活かし、市場のニーズに応じた提案を行っていききたい。

<参考文献>

- Ben Lambert: "Introduction to Generative AI", Cloud Academy, November 27, 2023.
- LangChain, Inc.: Introduction to LangChain, LangChain Official Website, 2024年, https://python.langchain.com/docs/get_started/introduction.
- Brown, T. B. et al.: Language Models are Few-Shot Learners, arXiv preprint, 2020, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2005.14165>.
- 日本マイクロソフト株式会社: Azure OpenAI Services Developers Seminar [Seminar presentation], Presented at seminar conducted on Apr14th, 2023.
- Kojima, T., et al.: Large Language Models are Zero-Shot Reasoners, 2022, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2205.11916>.
- An, Y., Kalinowski, A., & Greenberg, J.: Clustering and Network Analysis for the Embedding Spaces of Sentences and Sub-Sentences, 2021, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2110.00697>.

<商標>

アマゾン ウェブ サービス (AWS) は、米国および/またはその他の諸国における、Amazon.com, Inc.またはその関連会社の商標です。
AzureはMicrosoft グループ企業の商標です。
OpenAI はOpenAI OpCo, LLCの商標です。
ChatGPTはOpenAI OpCo, LLCの商標です。
LANGCHAINは LangChain, Inc.の商標です。

<著者所属>

楓川 滉人 アズビル株式会社
AIソリューション推進部
秦 楊 アズビル株式会社(2023年12月退職)
IT開発本部開発2部

オフィスのABW実装による効果検証法

Effectiveness evaluation scheme of ABW implementation for office

衣笠 静一郎
Seichiro Kinugasa

鹿島 亨
Toru Kashima

梶田 徹矢
Tetsuya Kajita

佐伯 爽
Akira Saeki

影山 乃愛
Noa Kageyama

伊香賀 俊治
Toshiharu Ikaga

芳賀 恭平
Kyohei Haga

海塩 渉
Wataru Umishio

キーワード
ABW, ワーク・エンゲイジメント, オフィスレイアウト

国連が提唱した持続可能な開発目標の1つに「働きがいと経済成長」があり、ワーク・エンゲイジメントが重視されている。オフィス環境の工夫が生産性向上につながり、Activity Based Working (ABW)の実践がワーク・エンゲイジメントの向上に貢献する。我々の調査ではワーク・エンゲイジメントの主観評価とウェアラブルデバイスを用いた客観評価を行った。

The United Nations has advocated for the Sustainable Development Goals, emphasizing the importance of work engagement. Innovations in office environment design contribute to improved productivity, and the practice of Activity Based Working (ABW) contributes to creating organizations with fulfilling work. In this investigation, we conducted subjective evaluations of work engagement and objective evaluations using wearable devices.

1. はじめに

2015年に国際連合が提唱した持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals)の1つに、「働きがいも経済成長も」の目標がある。「働きがい」は「働く価値がある」とこととされ、「ワーク・エンゲイジメントという指標は、仕事に関連するポジティブで充実した心理状態」と定義している。ワーク・エンゲイジメントは、働く空間によって支えられ、生産性に大きな影響を与える重要な指標の1つとして注目されている。快適で心地よいオフィス環境が、ヒトのモチベーションを高め、創造的な思考を促進する。たとえば、自然光が豊富に入る空間や、温度や湿度等を適度に制御することにより、心地よい雰囲気を生み出し、ストレスを軽減することができる。また、オープンな空間とプライベートな空間を適度な均衡に保ったレイアウトは、コミュニケーションの促進と集中力の向上を両立させてくれる。反対に、騒がしく雑然とした環境や、機能性を欠いた空間は、ヒトの集中力を削ぎ、生産性の低下につながってしまう。空間の工夫によりワーク・エンゲイジメントを高めることが、ヒトが自分の仕事に熱中し、満足感を得られ、組織全体のパフォーマンスアップを実現する鍵となる。

この鍵の1つとして、Activity Based Working (ABW)が知られるようになった。ヒトの思い(成長、自己実現)に寄り

添う働きがいのある環境づくりが目指されている。オフィスにおいても、従来の固定席のオフィスではなく、仕事内容に応じて最も効率的に働くことができる場所を選択する。

こういったオフィス環境の変質が、将来の生産性向上にどのようなつながるのか。この視点に立ち、職場環境の変化が及ぼす影響の測定を行った。

この調査は2段階で行った。1つ目は、アンケートを活用したワーク・エンゲイジメントの主観評価を、2つ目は、ウェアラブルデバイスを装着してもらい、得られたセンシングデータからの評価を実施した。この2つの評価手法を中心に、報告する。

2. オフィス環境の変化

今回、オフィスABW化の評価を行ったアズビルの藤沢テクノセンターの執務空間の変化について説明する。2022年7月の改装前の風景を図1に示す。通路を十分確保した机配置となっていて、一様なオフィス風景である。2022年8月以降の改装により、執務環境に新たに、開放型の個人パーティション(図2)、カフェスタイルのデスクワーク場所(図3)、閉鎖型の個人パーティション(図4)のスペースが開設された。集合式環境での作業のほか、没入したいときは、パーティションを利用する、など自由に働く場所を選択できるようになった。

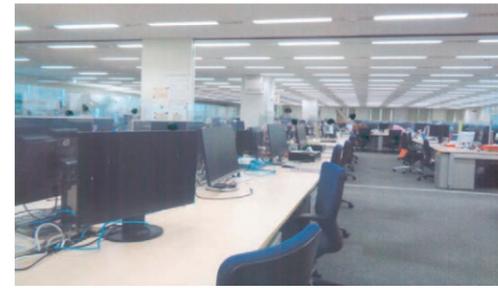


図1 改装前のオフィス風景例



図2 改装後の開放型の個人パーティション



図3 カフェスタイルのデスクワーク場所



図4 閉鎖型の個人パーティション

それまでの、クローズドな会議室の数量と比べれば、周囲からの騒音や視線を防げるパーティションは少ないが、利用頻度は高くなっている。

3. 執務室改装にかかわる主観評価

ワーク・エンゲイジメントに関するアンケート調査を、Web入力できるフォームをつくり実施した。

ワーク・エンゲイジメントとは、従業員が仕事に対してどれだけ熱意と情熱を持っているかを示す指標であるが、この測定には、仕事の満足度、熱意、没入感などの複数の側面を評価するための様々な質問を設定した。

作業内容に応じた多様なスペースの利用状況、集中力を要する個人作業からコミュニケーションを重視する協働作業の状況、リフレッシュさやカジュアルさ等、効率的かつ快

適な働き方が可能となっているかの主観評価を行った。「主観作業効率(0~100%, 最も作業効率が良い時を100%とする)」、「ユトレヒト・ワーク・エンゲイジメント尺度(UWES)^③」を用いて評価、WFunによる労働機能障害の評価のため、50程度の問いを設けた。

アンケート項目の一部を表1に示す。

表1 アンケート項目(抜粋)

項目	内容
1	仕事内容に合わせて場所を変えられるよう、多様な種類のデスクやスペースが用意されている。
2	オフィス内に、周囲の音・声に関わらず、1人で集中できる場所がある。
3	周囲の視線を気にしない、仕切りパネルなどで区切られた机になっている。
4	オフィスワーク中に、気軽に声をかけ合える距離感になっている。
5	周囲の雰囲気を感じながら仕事ができるような、オフィス環境になっている。
6	周囲を気にせず電話やビデオ会議をするための専用スペースがある。
7	少人数で共同作業する、適度なスペースがある。
8	上司・部下・同僚等と1対1で落ちついて会話ができる個室やスペースがある。
9	少人数でアイデア出しするのに適した情報整理・共有のための設備がある。
10	業務状況を、少人数で互いに共有し合える設備や会議スペースがある。
11	知識を共有し合うのに適したスペースがある。
12	利用しやすいリフレッシュスペースがある。
13	利用しやすい会話を促進するスペースがある。

個々の回答を尊重し、回答データの正確性と信頼性を確保することは不可欠である。それぞれの従業員が自分の意見や感じている経験を正直に報告できるような環境を整えなければいけない。また、アンケート調査を行う際には個人に関する情報の取扱いに特に注意が必要である。

従業員が自由に意見を述べられるよう、アンケートを、匿名形式で行うことが望ましい。今回の調査では、回答者個人が業務で使用するコンピュータにより個人コード(ID)を生成してもらい、アンケート回答時にIDを添えてもらった。ABW化前後に行ったアンケート回答内容に付されたID同士を照合し、一致したID同士の回答内容に基づいて、ABW化前後の変化を分析した。

4. アンケート調査に基づく効果検証

2022年6月28日から7月29日にわたり、改装前のオフィス勤務についてアンケート調査を行った。その直後より改装が始まり、定着した1年後の2023年7月3日から7月31日にわたり、オフィス勤務についてのアンケート調査を行い、ID同士のリンクができた238名について比較分析を行った。その前後の結果を、図5に示す。赤の実線は、「非常によくはてはまる」の点で改善したこと、赤の破線は「ややあてはまる」の点で改善したことを示す。

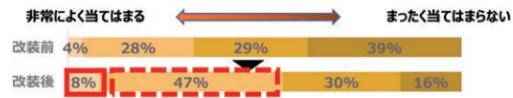


図5.1 仕事内容に合わせて場所を変えられるよう、多様な種類のデスクやスペースが用意されている

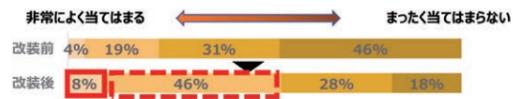


図5.2 周囲の音・声に邪魔されず、1人で集中できる場所がオフィス内にある

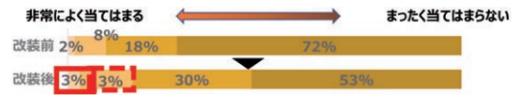


図5.3 周囲の視線を気にすることがないよう、仕切りパネルなどで区切られたデスクとなっている

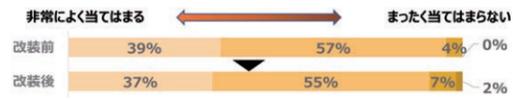


図5.4 デスクワーク中に、気軽に声をかけ合える距離感になっている

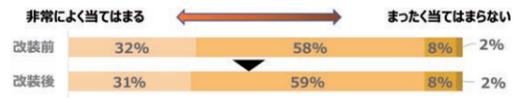


図5.5 周囲の雰囲気を感じながら仕事ができるような、オフィス環境となっている

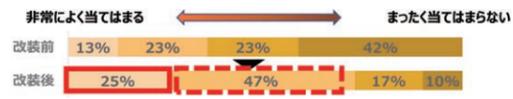


図5.6 周囲を気にすることがないよう、電話やビデオ会議をするための専用スペースがある

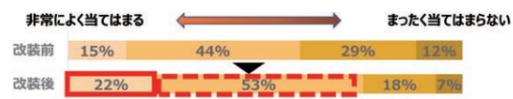


図5.7 2、3人でデータの編集や加工などの共同作業をするのに、丁度よいスペースがある

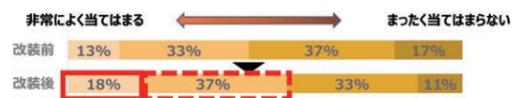


図5.8 上司や部下、同僚と1対1で落ちついて会話ができる個室やスペースがある

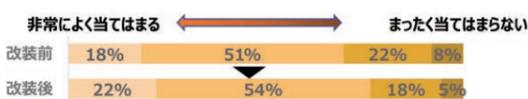


図5.9 ウェブサイトで情報を閲覧しながら、もしくは付箋やホワイトボードを活用して、少人数でアイデア出しをするのに適した設備がある



図5.10 大人数での勉強会や報告会などにより、知識を共有し合うのに適したスペースがある

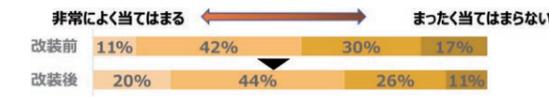


図5.11 知識を共有し合うのに適したスペースがある

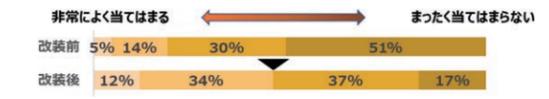


図5.12 利用しやすいリフレッシュスペースがある

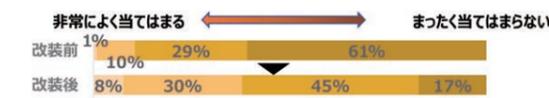


図5.13 利用しやすい会話を促進する空間がある (ホワイエ、ラウンジ等)

オフィス内に多様な執務スペースが設置され、働く場所の選択肢が増えたことによって、各項目の満足度は上昇したと思われる。しかし、満足度が少しは向上したものの、当てはまらない場合もある。有意な満足度の向上がみられない調査項目もあるが、この場合は、すでに周囲の執務者とコミュニケーションを取りやすい空間になっていて、改装後でもその満足度を保っていると考えられる。

4.1 ユトレヒト・ワーク・エンゲージメント尺度による評価

ワーク・エンゲージメント尺度の中でも広く用いられているのはユトレヒト・ワーク・エンゲージメント尺度と呼ばれる指標である。仕事に関して積極的に意欲を持って取り組んでいるかを測定する。「仕事をしていると、活力がみなぎるように感じる」や「仕事に没頭しているとき、幸せだと感じる」、「自分のペースで仕事ができる」など、短縮版であるが9種類の設問で構成した。これらを、「活力」「熱意」「没頭」というようなワーク・エンゲージメントを構成する要素で評価する。UWESでワーク・エンゲージメントがどの程度か測定するときには、各質問項目が以下の6種類のうちどれに当てはまるかで回答する。「全くない」「ほとんど感じない(1年に数回以下)」など、頻度に応じた点数を利用し、ポイント (pt) として表記する。

今回のABW化前後による結果では、アンケート回答者(238名)を対象にしたところ、ABW前後では、変化の程度が大きくはなかった。

4.2 労働機能障害の評価

労働生産性は、従業員の仕事の効率を反映する指標である。健康問題による出勤時の生産性低下(たとえば、従業員が体調不良ながらも職場に出勤する場合)として疾病出勤の解消は望まれるものの、解消されず生産性の低下に繋がる場合がある。従業員が病気やストレスなどで本来のパフォーマンスを発揮できず、作業の質や効率が落ちる。このような労働機能障害について、WFun (Work Functioning Impairment Scale) を用いて評価することとし、身体的、精神的な問題の影響を受けた労働能力の増減を評価した。疾病出勤と労働機能障害は相互に関連しており、どちらも労働生産性に悪影響を与える要因となる。健康管理と適切な

職場環境の提供により、これらの問題を解消し、生産性の向上を図ることが重要である。

WFunの尺度は得点により評価される。従業員の労働機能の障害の程度を測定するために、仕事におけるパフォーマンスへの影響を「問題なし」「軽度」「中等度」「高度」の 카테고リーに分類して評価する。「問題なし」とは、仕事において機能的な障害を感じておらず、職務を通常通りに遂行している状態を指す。「軽度」は、わずかながら仕事の遂行に困難を感じているものの、全体のパフォーマンスには大きな影響は出ていない状態であり、「中等度」は、明らかな仕事の遂行上の困難を経験し、パフォーマンスにも影響が見られる状態である。「高度」とは、仕事の遂行に重大な困難を抱えており、パフォーマンスが著しく低下している状態である。

今回、ABW化前後による結果を、アンケート回答者238名の尺度に応じた構成比を示すと、わずかながら変化した。「高度」が4%から2%に低下し、「中等度」が14%から16%に微増した。比率としては、仕事の遂行上のパフォーマンスに影響が出ている割合に変化はないが、「高度」の割合が減ったことは、わずかながら改善した可能性があることを示した。

5. 実測調査に基づく効果検証

人間の心理状態、生理状態は、オフィス勤務において、従業員のパフォーマンス、満足度に大きく影響する。心理状態はストレス、モチベーション、感情といった要素を含み、生理状態は睡眠の質、疲労度、健康状態を示す。また、これらは環境の状態(室温・湿度・明るさ・騒音等)も相互に作用し、従業員の日常の機能と労働生産性に影響を及ぼす。これらの要因を適切に測定し、影響度を理解することは重要である。

センサを用いた測定により、オフィス環境における生理的および環境的要因を、客観的かつ連続的なデータとして得られる。例えば、ウェアラブルデバイスは、まばたきの強さ、まばたきの間隔、目線の動き、頭部の動きの測定や、歩行・睡眠などの活動をモニタリングできる。従業員のストレスレベルや身体活動のパターンを把握するのに有用である。環境センサは、室内の照度、温度、騒音レベルを監視し、快適で生産的な労働環境を維持するための情報を得ることができる。

他方、日誌アンケートは自己申告に基づいたデータを提供し、心理状態や主観的な健康感を評価するのに適している。従業員が職場環境や自身の感情、ストレスレベルにどのように反応しているかを理解するのに役立つ。

本研究では、腕時計型センサデバイスと環境センサ、日誌アンケートを用いた、評価システムを構成し、実測を行った。

5.1 システム概要

システム概要を図6に示す。

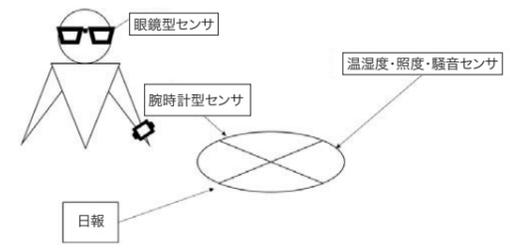


図6 システム構成図

腕時計型デバイスは、歩行や走行などの身体活動によって消費されるカロリーの推定を行う。歩行や走行などの活動をモニタリングし、これらの活動から消費カロリーを推定する。

質の良い睡眠は健康維持のもう1つの重要な柱である。このデバイスは、体の動きを分析することで睡眠パターンを推定し、入眠と起床の時刻を±15分の精度で特定する。

健康管理のための基本的な指標の1つである、脈拍測定も行える。腕時計型センサ本体裏面に内蔵された脈波センサからの信号を用いて脈拍数を測定する。身体を動かしている際にも測定することが可能であるが、激しく運動している間は、信頼性のあるデータを得ることが難しい場合がある。

会話検出機能は、本体に内蔵されたマイクを使用する。今回の試験は、夏季に行っており、半袖で作業することが多い。日常生活での一定以上の音量の会話を検出できるとした。

眼鏡型センサは、鼻パッドと一体化されたセンサモジュールとなっており、センサ(3点式眼電位センサ、3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ)からなる6軸モーションセンサを搭載しており、これによって着用者の目や身体の動きを計測する。無線素子、バッテリーなどのモジュールが内蔵されている。フレーム全体の重量は20g台で、センサモジュール部分は6g程度であるから、日常生活においては、重量バランスが著しく崩れることはない。満充電状態では最大約24時間の連続使用が可能で(ジャイロセンサ使用時は約11時間)ある。日常的に使用する場合は、就寝時に枕元に充電することとした。

眼鏡型センサを着用・使用するにあたり、勤務開始時と勤務終了時に、スマートフォンにインストールされているアプリケーションソフトで操作する。アプリケーション起動後は自動でデータを記録する。

環境センサは、室内の温度・湿度・騒音を測定する。設置後の操作は不要で、データは自動的に記録されていく。環境センサは、被験者の自宅と職場の作業席(デスク上)に設置し、また、温度や湿度を自動で記録するデータロガーを、各被験者により自宅の作業席と寝室(枕の近く)に設置していただいた。ABW前後を比較するため、前後のセンサ設置位置を、同じようにすることとした。

5.2 前後のオフィス勤務の働き方と生産性の評価例

改装前後の働き方の変化を図7に示す。オフィス勤務・在宅勤務等、働き方は様々である。就寝・起床時刻、勤務開始・終了時刻では、新棟竣工前後で働き方に大きな変化はないようであった。眼鏡型センサによるまばたきの測定結果を図8に示す。改装前後の有意な差は認められなかった。

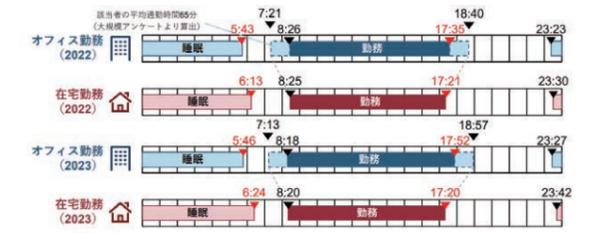


図7 改装前後での勤務態様の例

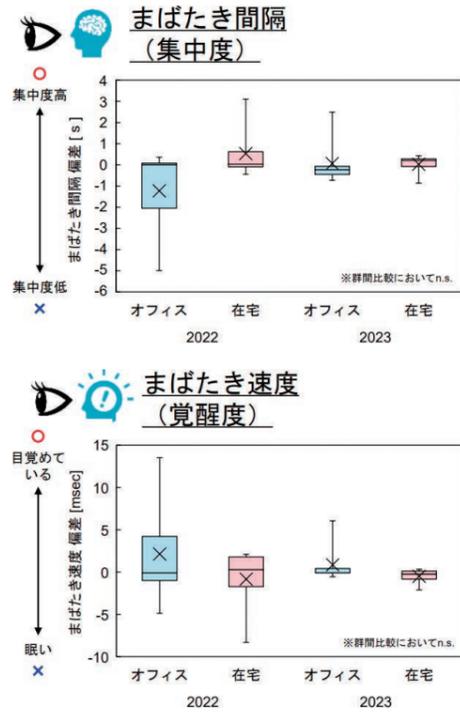


図8 オフィス勤務日と在宅勤務日のまばたきの指標上の変化

オフィスの生産性に着目すると、改装前後の調査で大きな差は認められなかった。午後に疲労度が高まること、覚醒度や集中度が低下すること(図9)等、同様の傾向ではある。ただ、温冷感については、改装前は午後に有意に温冷感が暖かい側に移行していたが、改装後は午前・午後ともに回答が中立寄りになっていた。改装により空間選択の自由度が高まったことにより、温熱環境的にも個人に適する場所を選択できていた可能性がある。

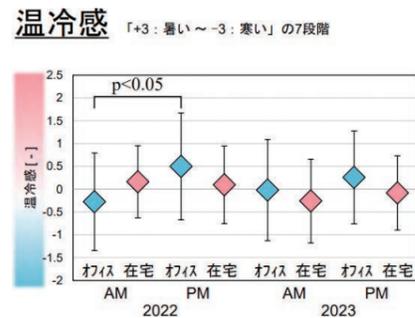
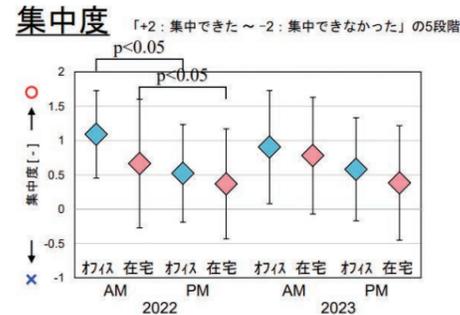
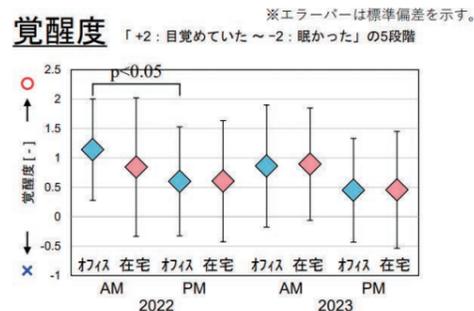
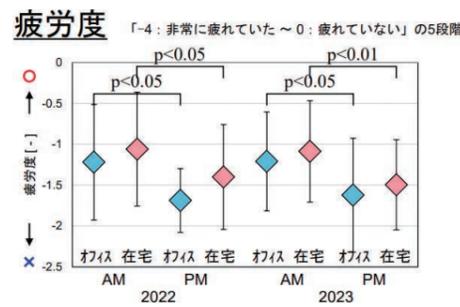


図9 オフィス勤務と在宅勤務の生産性(改装前後)

6. おわりに

今回の調査での回答者の半数は50歳以上と想定できた。職務従事者の年齢層は上昇しているところ、特に半分以上が50歳以上の職場は珍しくないとも考える。今後も世代構成は変化するだろうから、将来世代に向けた持続可能な職場環境の構築の機会を、今後もさぐっていく必要がある。

オフィス環境への満足度について、ABW化による効果が複数の項目で確認された。ABW化は執務者が働きやすい環境づくりに寄与している可能性が示唆された。一方で、執務者の生産性や健康性への影響は確認されなかった。今後、満足度の高いオフィスで働き続け、執務者がABW化したオフィスに慣れていくことで、効果が現れる可能性があるため、フォローアップは重要である。このフォローアップ調査により、長期的な視点で職場の活力を維持し、組織全体の生産性とイノベーションを促進することにつながると期待する。今回の調査が、1つの気づきとなれば幸いである。

<参考文献>

- 芳賀恭平, 海塩渉, 鍵直樹, 伊香賀俊治 他: オフィス勤務・在宅勤務時の眠気への影響要因の検討, 令和5年度空気調和・衛生工学会大会(福井)
- 平成27年度健康寿命延伸産業創出推進事業: 健康経営に貢献するオフィス環境の調査事業
- 厚生労働科学研究費補助金(労働安全衛生総合研究事業) 分担研究報告書

<著者所属>

衣笠 静一郎 アズビル株式会社
技術開発本部基幹技術部

- 梶田 徹矢 アズビル株式会社
技術開発本部
- 鹿島 亨 アズビル株式会社
AIソリューション推進部
- 佐伯 爽 慶應義塾大学大学院 理工学研究科
修士課程(調査当時)
- 影山 乃愛 慶應義塾大学大学院 理工学研究科
修士課程
- 伊香賀 俊治 慶應義塾大学理工学部
教授(調査当時) 博士(工学)
- 芳賀 恭平 東京工業大学
環境・社会理工学院
修士課程(調査当時)
- 海塩 渉 東京工業大学
環境・社会理工学院
助教 博士(工学)

SUBLIME: Single-use battery-less wireless temperature sensor for lyophilization process

Joel Nuñez Sanz

Keywords

Lyophilization, Freeze-drying, sublimation, Real time, Wireless probe, single-use, PAT tool, GMP, battery-less, wireless power

凍結乾燥プロセスにおける1次乾燥中の昇華面（未乾燥部と乾燥部の境界）での状態は重要なパラメーターであり、凍結乾燥レシピの開発、検証、および生産の堅牢性維持に与える影響は相当なものである。特に参考文献(1)に概説する新しい医薬品の製造管理および品質管理の基準（GMP）への対応のため、凍結乾燥プロセスが一層複雑になっている。本論文では、SUBLIMEという名称の新たなプロセス分析技術（PAT）ツールを取り上げた。本ツールは、バッテリー不要、使い捨て可のワイヤレスプローブを採用し、昇華面の温度をリアルタイムでモニタする。この革新的なツールは、凍結乾燥炉への自動搬入搬出システムを用いることで、これまで困難だった温度モニタの利用を簡略化しただけでなく、相互汚染リスクも軽減する。

The sublimation front's advance during primary drying in freeze-drying processes is a critical parameter with significant implications for cycle development, validation, and maintaining production robustness. Adherence to new Good Manufacturing Practice (GMP) conditions, particularly outlined in Reference [1], adds complexities to the lyophilization process. This article introduces a novel Process Analytical Technology (PAT) tool, named SUBLIME, which employs single-use battery-less wireless probes to monitor the sublimation front temperature interface in real-time. This innovative tool not only simplifies logistical challenges but also reduces cross-contamination risks, particularly in the context of automated loading and unloading systems.

Introduction

The pharmaceutical industry demands sophisticated technical solutions that align with stringent quality controls to ensure the safety, efficacy, and production of pharmaceutical products. The recent updates in GMP conditions, specifically outlined in Annex 1, emphasize the need to reduce or prevent manual interventions in the manufacturing processes. This requirement encourages the demand for automatic loading and unloading systems, as they play a pivotal role in minimizing the risk of cross-contamination.

Moreover, maintaining specific conditions for the product throughout the lyophilization process incurs substantial production costs. In this context, a PAT tool for continuous monitoring of critical parameters during lyophilization becomes imperative. This tool facilitates precise monitoring of the process, minimizing the risk of product damage or loss. The objective is to develop a solution that aligns with the latest GMP conditions, addresses the challenges posed by automated systems, and enhances the overall efficiency and reliability of the lyophilization process.

Background

Lyophilization, commonly known as freeze-drying, is a high-value drying process integral to the preservation of pharmaceutical and biological products. The process comprises three main phases: freezing, primary drying, and secondary drying. The primary drying phase involves placing the product under vacuum conditions, causing the solvent to sublime from a frozen solid state to a vapor state. This phase, particularly the advance of the sublimation front, is crucial for achieving proper drying and preserving the quality of the product.

The sublimation front is the region where phase change occurs, and maintaining the temperature at this interface below the critical temperature of the product is paramount. Failure to do so could lead to product damage and the loss of critical quality attributes (CQAs).

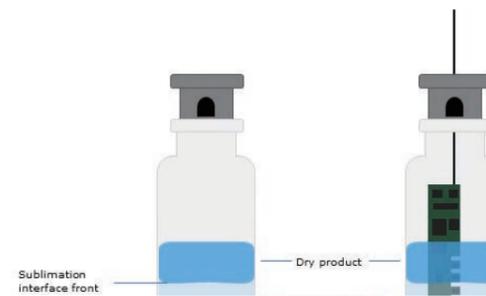


Figure 1. Sublimation interface front during primary drying

The product temperature during lyophilization is influenced by various factors, including the freeze-drying recipe, shelf temperature, chamber pressure, and other process parameters. While existing solutions, such as wired thermocouples or wireless temperature probes, can monitor product temperature, they often fall short in monitoring the sublimation front temperature due to the downward movement during the process.

Wired or battery-operated wireless probes are challenging to manage in systems equipped with automatic loading and unloading. Monitoring the sublimation front interface during production batches, especially during scale-up or optimization activities, becomes a complex operation when automatic systems are in place. The prevalence of such systems is increasing rapidly, with around 80% to 90% of new equipment for sterile applications incorporating automatic loading and unloading features. This necessitates addressing compatibility with GMP requirements, operating in strict aseptic conditions, and minimizing the risks of contamination and cross-contamination.

The challenges posed by automatic loading and unloading systems extend beyond GMP requirements. These systems must be robust, ensuring seamless operation and production continuity. The ability to address issues promptly and save production in case of failure is crucial. Introducing and retrieving wireless temperature probes into the freeze dryer feeding line automatically is another challenge, particularly when human intervention is minimized. Existing devices placed between the filling line and freeze dryers can insert sensors with minimal disruption to the loading process and retrieve them during unloading operations.

However, in the face of new GMP requirements, limited information during the lyophilization process, potential risks between products and operators, and the dedicated time required to manipulate existing temperature probes, there is a pressing need for a new solution. The traditional approach of adding product temperature sensors manually once the freeze dryer is

fully loaded is no longer viable. Thus, a new solution is imperative to address these challenges and enhance the efficiency and reliability of the lyophilization process.

Challenge resolution

In response to the evolving GMP requirements, the lack of information during the lyophilization process, potential risks between products and operators, and the extra time required for manipulating existing temperature probes, a new solution has been developed. This solution involves the introduction of a single-use battery-less wireless temperature probe capable of monitoring the advance of the sublimation front interface in real-time, ensuring accurate temperature tracking during the freeze-drying cycle.

This novel probe is designed as a single-use, disposable device with no built-in battery or internal power supply. The energy required for operation is harvested from an antenna placed inside the lyophilization chamber, connected to a Gateway platform positioned outside. This antenna serves a dual purpose, functioning as both the power generation antenna and the communication antenna. This design choice reduces the number of elements that need placement inside the chamber, streamlining the overall configuration.



Figure 2. Sublimation interface front temperature single-use wireless probe

When remotely powered from the gateway, the wireless probe measures the temperature using five different measurement points. These points are strategically positioned along the device in a single line with a pitch of 2.5mm, enabling the real-time monitoring of the sublimation front temperature during the drying phase. The absence of cables or batteries is made possible through a patented power transmission technology. The main body of the probe consists of a printed circuit board covered with an FDA-compliant coating.

The probe's electronic circuit incorporates a capacitor that collects the necessary power from the generator unit (in the gateway) through a carrier wave sent to the antenna inside the chamber. This design eliminates the need for an external battery, avoiding potential temperature variations caused by heat emission. Furthermore, it reduces mechanical interferences during loading and unloading processes, as there is no requirement for extra space to accommodate a battery.

Once sufficient power is harvested, the probe can read the product temperatures along the drying cake at the five measurement points. The information is then transmitted wirelessly back to the gateway via the integrated 2.4 GHz antenna. Notably, no pairing or connection between the probe and the gateway is required for data exchange. The configuration of power transmission and communication can be customized, allowing adjustments to the periodicity of measurements based on the lyophilization cycle's duration.



Figure 3. Correctly dried product after lyophilization cycle

The gateway features an internal CPU with a timer circuit that manages the measurement time interval, controlling both power emission and temperature reading duration. Beyond transmitting temperature measurements, various electrical statistics from the probe's electronic circuit module, such as voltage value obtained by the power generation unit and reception intensity at the wireless unit, are wirelessly sent back to the gateway. Additionally, the sensor interface circuit may transmit abnormal states, such as short circuits or disconnections, as additional data.

All the received data can be displayed at the freeze-dryer Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system via an OPC UA protocol. The SCADA interface provides a comprehensive overview of the freeze-drying process by merging temperature measurements from the probes with data from the freeze dryer, including shelf control temperature, shelves inlet and outlet temperatures, vacuum in the

chamber, condenser temperatures, and more.

Comparison with thermocouples and endpoint determination

In order to showcase the performance of Sublime probes and highlight their significant advantages over existing solutions for monitoring product temperature during lyophilization, a comparative analysis was conducted between Sublime sensors and thermocouples (both internal and external) positioned at the base of the product. Figure 4 illustrates the cycle trends of a sucrose lyophilization process, featuring an internal thermocouple (depicted in blue), an external thermocouple (depicted in grey), and the bottom measurement point of a Sublime sensor (also depicted in blue). All three sensors are strategically positioned in contiguous central vials.

Upon examination, notable differences in the data from the three sensors become apparent. The thermocouples consistently exhibit higher temperatures overall. Both internal and external thermocouples appear to measure the bottom temperature and detect the sublimation front less effectively than the Sublime sensors. This discrepancy may be attributed to the inherent difficulty in precisely positioning thermocouples at the exact center of the vial, resulting in their measurements incorporating a larger portion of the dry layer, which inherently possesses a higher temperature.

Despite the fact that all three sensors roughly indicate a similar sublimation endpoint by stabilizing at comparable times, the behavior of the product at the bottom of the vial appears to be more accurately represented by the Sublime sensor. The Sublime sensor's performance showcases a clear advantage in capturing the subtleties of the lyophilization process, particularly in comparison to thermocouples, thereby emphasizing its efficacy and precision in monitoring the critical phases of the freeze-drying cycle.

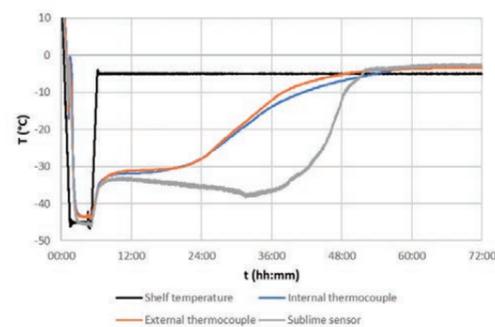


Figure 4. Sucrose 5% with 20R vials cycle trends with contiguous central sensors: int. thermocouple (orange), ext. thermocouple (blue), Sublime bottom measuring point (grey), shelf temperature (black)

Similar to thermocouples, Sublime sensors possess the capability to identify the conclusion of sublimation of the vial in which they are disposed. The stabilization of the bottom Sublime sensor temperature, nearing the shelf temperature, signifies the completion of sublimation in that specific vial. Another commonly employed method involves assessing the difference between a Pirani pressure gauge and a capacitance pressure gauge. When the reduction and stabilization of this gauge difference occur, it indicates the completion of sublimation (Tang & Pikal, 2004).

In Figure 5, the trends of a mannitol freeze-drying cycle are depicted, featuring pressure gauges, thermocouples, shelf temperature, and Sublime sensors. The thermocouple situated near the edge of the shelf (depicted in grey) stabilizes first, albeit by a small margin. A Sublime sensor positioned at the center of the shelf (depicted in blue) and a neighboring thermocouple (depicted in orange) both determine the endpoint at approximately the same time, slightly preceding the endpoint determination based on Pirani and capacitance gauges.

This aligns with the expected behavior, as the Pirani gauge signals the end of sublimation for the entire batch, whereas thermocouples or the Sublime sensor focus on the vial in which they are located. Vials positioned at the center of the shelf experience a slower sublimation process. Therefore, when determining the endpoint with temperature probes, it is recommended that the reference probe be centrally located, as demonstrated in this test. This strategic placement ensures a more accurate representation of the sublimation endpoint, particularly in scenarios where variations in sublimation rates exist across the batch.

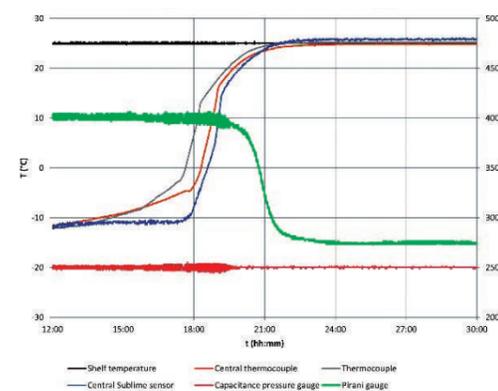


Figure 5. Mannitol 5% with 6R vials cycle trends: central thermocouple (orange), thermocouple (grey), Sublime bottom measuring point (blue), shelf temperature (black), Pirani (green), capacitance pressure sensor (red)

Batch homogeneity

The system also provides a visual representation of the disposition of temperature probes on the freeze dryer chamber shelves, positioned at various locations across the shelf stack. This feature enhances the representativeness and relevance of monitoring the sublimation front interface temperature. By seamlessly integrating temperature measurements from the wireless probes with freeze-dryer recipe variables, the sublimation process can be optimized, particularly during the critical primary drying phase. This optimization ensures that the product undergoes proper drying without surpassing its critical temperature, potentially leading to a reduction in overall drying time.



Figure 6. Vial loading shelves



Figure 7. Vial automatic loading system

In a batch process, where homogeneity is a crucial consideration, it is well acknowledged that differences may exist between vials within the same batch. Various factors,

such as the edge vial effect or the stochastic nature of spontaneous nucleation in the freezing phase, contribute to these variations. Vials placed at the edges, especially those near the door, receive more radiant heat, accelerating their sublimation process compared to vials positioned in the center.

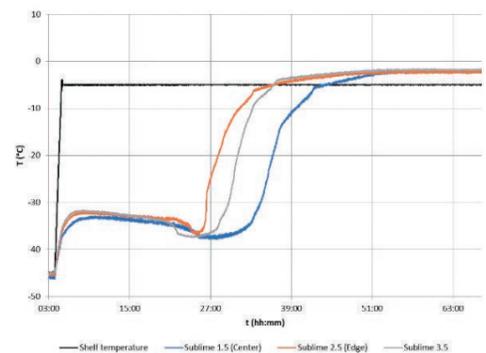


Figure 8. Sucrose 5% with 6R vials cycle trends with shelf temperature (black) and bottom measuring points of Sublime sensors: sensor 1 (central, blue), sensor 2 (edge, orange), sensor 3 (edge, grey)

Figure 8 illustrates the measurements obtained from multiple Sublime sensors in a freeze-drying cycle performed with a 5% sucrose solution. The shelf temperature, depicted in black, is set at -5°C during the primary drying phase. In this specific test, the central vial is monitored with probe 1, represented in blue. The remaining Sublime probes in the graph are positioned closer to the edge of the shelf, with sensor 2 being the nearest to the edge. As anticipated, the edge vials exhibit the fastest sublimation rate, with a notable difference of up to 10 hours between probe 2 at the edge and probe 1 at the center of the batch.

Sublime sensors play a crucial role in enabling the observation and monitoring of process differences within the same batch. This capability provides valuable insights into the dynamics of sublimation across various vials, allowing for a more nuanced understanding of the freeze-drying process and facilitating informed decision-making in optimizing product quality and drying efficiency.

Sublimation estimation rate

The sublimation process within a vial occurs primarily from the top to the bottom, with a lesser extent from the sides towards the center. Given the vertical movement of the sublimation front, the Sublime sensor offers a more direct observation of this phenomenon. Throughout the cycle, the sublimation front passes through each of the sensor's 5 measurement points, moving from the top to the bottom of the product (Pikalx, Roy, & Shah, 1984). This dynamic is illustrated in Figure 9, depicting the

freeze-drying trends of a 5% mannitol cycle alongside data obtained with a Sublime sensor.

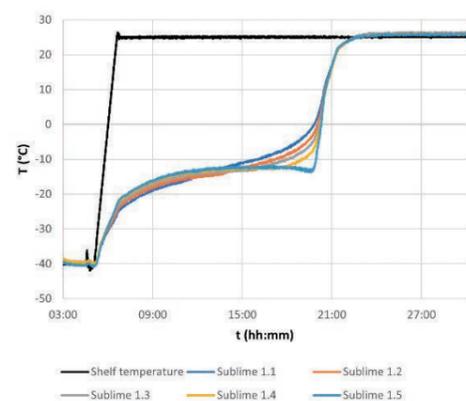


Figure 9. Mannitol 5% with 20R vials cycle trends with shelf temperature (black) and a central Sublime sensor: 1.1 (top point, deep blue), 1.2 (orange), 1.3 (middle point, grey), 1.4 (yellow), 1.5 (bottom point, light blue)

In Figure 9, the Sublime data distinctly indicates the moment when the sublimation front traverses each measurement point. Each point becomes the coldest among the five, and a significant increase in the slope of the temperature function is observed as the front passes through that specific measuring point. As anticipated, the sublimation front is initially detected in the top-most sensor and sequentially passes through each point until reaching the bottom one.

This novel configuration allows for the calculation of the sublimation rate as the process unfolds, using the time difference between the detection of the sublimation front in different points of the sensor (Jiang, Zhu, Kodama, 2018). The calculation for an aqueous solution is as follows:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{A_p \Delta h C_{water} \rho_{ice}}{\Delta t}$$

Where A_p is the cross-sectional area of the product using the inner diameter of the vials, Δh is the distance between the measuring points, C_{water} is the concentration of water in the solution, ρ_{ice} the density of ice and Δt the time difference between the detection of the sublimation front in different measuring points.

It's important to note that this calculation excludes sublimation from the edge of the vial to the center and the release of bound water, which occurs during the secondary drying phase. With the data from the cycle represented in Figure 6, the sublimation rate from the second point to the third (middle) is calculated as 0.70 g/h, while from the fourth point to the fifth (bottom), it decreases slightly to 0.68 g/h.

Conclusions

The multi-point configuration of Sublime sensors introduces a new dimension to process understanding, tracking the sublimation front throughout the cycle and enabling sublimation rate calculation during primary drying. Have demonstrated remarkable accuracy in monitoring product temperature during lyophilization processes. Their versatility spans applications from laboratory-scale cycle development to real-time monitoring in industrial production. Compared to other existing technologies, Sublime consistently provide comparable temperature readings, particularly excelling in capturing the behavior of the vial bottom, enhancing freeze-drying process understanding.

Moreover, this solution determines the sublimation endpoint from the center vial, aligning with results from Pirani and capacitance gauges. This highlights their ability to observe differences between vials in the same batch.

With a single-use, disposable design, reduce manipulation time and risks, eliminating the need for manual recovery, washing, and sterilization. The innovative design with five independent temperature measurement points enhances real-time monitoring of the sublimation front interface, ensuring correct drying parameters and preserving product quality, representing a significant advancement in pharmaceutical production, offering automatic introduction and retrieval with wireless communication technology.

In conclusion, the integration of evolving technology, as exemplified by Sublime sensors, signifies a significant leap forward in ensuring the integrity, efficiency, and reliability of pharmaceutical manufacturing processes.

References

[1] European Commission. (2022) The Rules Governing Medicinal Products in the European Union Volume 4 EU Guidelines for Good Manufacturing Practice for Medicinal Products for Human and Veterinary Use. (https://health.ec.europa.eu/system/files/2022-08/20220825_gmp-an1_en_0.pdf)

[2] Foerst, P., Melo de Carvalho, T., et al. (2019). Estimation of mass transfer rate and primary drying times during freeze-drying of frozen maltodextrin solutions based on x-ray μ -computed tomography measurements of pore size distributions

[3] Jiang, X., Zhu, T., Kodama, T., et al. (2018) Multi-point wireless temperature sensing system for monitoring pharmaceutical lyophilization

[4] Kuu, W., Hardwick, L., Akers, M. (2006). Rapid

determination of dry layer mass transfer resistance for various pharmaceutical formulations during primary drying using product temperature profiles.

[5] Nail, S., Jiang, S., Chongprasert, S., et al. (2002). Fundamentals of freeze-drying.

[6] Patel, S., & Pikal, M. (2013). Lyophilization process design.

[7] Nail, S., Jiang, S., Chongprasert, S., & Knopp, S. (2002). Fundamentals of freeze-drying. Pharmaceutical biotechnology, 14, 281-360.

[8] Patel, S., & Pikal, M. (2013). Lyophilization process design space. Journal of Pharmaceutical Sciences, 102(11), 3883-3887.

[9] Pikal, M., Roy, M., & Shah, S. (1984). Mass and Heat Transfer in Vial Freeze-Drying of Pharmaceuticals: Role of the Vial.

[10] Rambhatla, S., & Pikal, M. (2003). Heat and Mass Transfer Scale-up Issues During Freeze-Drying, I: Atypical Radiation and the Edge Vial Effect.

[11] Santafé, M. (2021). CASE STUDY Non-invasive product temperature monitoring as a recipe design and scaling up tool. (<https://www.telstar.com/es/non-invasive-product-temperature-monitoring-as-a-recipe-design-and-scaling-up-tool/>)

[12] Tang, X., & Pikal, M. (2004). Design of Freeze-Drying Processes for Pharmaceuticals: Practical Advice.

[13] Teagarden, D., & Baker, D. (2002). Practical aspects of lyophilization using non-aqueous co-solvent systems.

[14] Varshney, D., & Singh, M. (2015). History of Lyophilization. Springer New York.

[15] Ward, K., & Matejtschuk, P. (2019). Lyophilization of Pharmaceuticals and Biologicals New Technologies and Approaches.

[16] Wolkers, W. (2021). Cryopreservation and Freeze-Drying Protocols.

Author affiliation

Joel Nuñez Sanz
Azbil Telstar, S.L.U.

赤外線アレイセンサシステムの開発

人検知・熱負荷空調制御の性能向上

Development of infrared array sensor system: Enhancing performance in people detection and thermal load air conditioning control

本田 光弘
Mitsuhiro Honda

キーワード
赤外線アレイセンサ, カルコゲナイドレンズ, 人検知, 熱負荷空調制御

赤外線アレイセンサシステムは、非接触で表面温度分布を計測し、熱画像として表示するとともに、フィードフォワードで空調制御を行うシステムである。この空調制御を我々は、熱負荷空調制御と呼んでいる。また、人の位置を正確に検知することも可能である。この位置情報を利用すれば、様々なアプリケーションに活用できる。今回、製品の適用範囲を広げるため、人検知、熱負荷空調制御の性能を大幅に向上する技術を開発したため報告する。

The infrared array sensor system is a system that measures surface temperature distribution non-contact and displays it as thermal images, while also performing air conditioning control in a feed-forward manner. We call this air conditioning control thermal load air conditioning control. It is also possible to accurately detect the position of people. This location information can be used for various applications. In this instance, we are reporting the development of technology that significantly improves the performance of people detection and thermal load air conditioning control in order to expand the product's range of applications.

1. はじめに

アズビル株式会社が、オフィス向けの赤外線アレイセンサシステム(図1)を初めてリリースしてから5年が経過した。その間、展示会場向けの高解像度赤外線アレイセンサのリリー

スや海外販売への対応など当初から計画されていた開発を行ってきたが、同時に現場からのフィードバックも得られるようになってきた。本稿ではフィードバックから得られたいくつかの課題を紹介するとともに、それらを解決した技術について説明する。

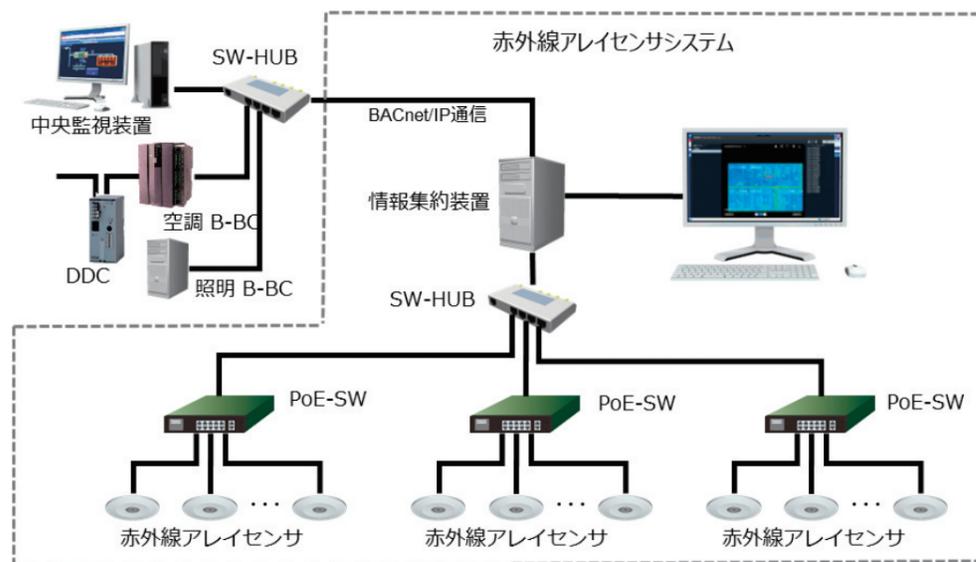


図1 赤外線アレイセンサシステム構成図

今回説明する最初の課題として、図2のようなスケルトン天井(設置高~4m)が流行し、現行のオフィス向け赤外線アレイセンサ(設置高~3mまで人検知可能)で対応できなくなったことが挙げられる。このようなオフィスでは、展示会場向けのセンサを使用するしかなく、高コストとなっていた。

また、2つ目の課題として、個室で赤外線アレイセンサを導入した現場では、人が机に一部隠れてしまって検知できない時間があり、設備を正しく動作させるのが難しいという問題が発生した。

3つ目の課題として、赤外線アレイセンサで計測した表面温度を使用したフィードフォワード空調制御、すなわち熱負荷空調制御は、原理上、室温設定が、主設定(1設定)しか対応できないことが挙げられる。省エネ効果のある冷暖2設定が主流であることから導入できる建物が限られていた。

次章からこれらの課題を解決する技術、カルコゲナイドレンズ、ルールベース、推定室温について述べていく。

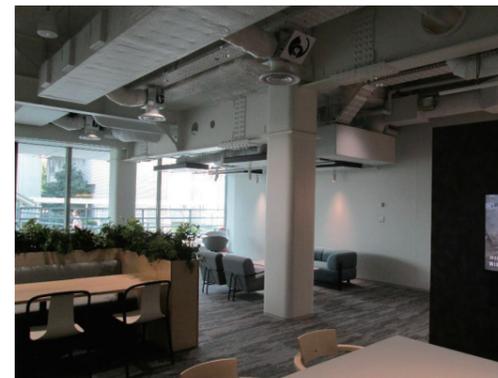


図2 スケルトン天井

2. カルコゲナイドレンズの採用

設置高3mまで人検知可能な現行のオフィス向け赤外線アレイセンサを設置高4mまでに対応できるようにし、スケルトン天井で利用できるようにするには、計測ノイズを抑える必要がある。オフィス向けの赤外線アレイセンサで採用しているレンズでは、計測ノイズが大きく、人が映ってもノイズに埋もれてしまい、背景との分離が難しい。センサを高い位置に設置することは人が小さく映ることになるため、よりノイズに埋もれやすくなる。

他社の類似の製品の中には、ノイズフィルタを用いて人検知を行うものもあるが、それだと移動している人を捉えにくくなる。本製品は、ノイズの除去は最低限にとどめ、移動している人も静止している人も検知できることが大きな特徴になっており、ノイズフィルタ以外の方法で解決を検討した。

ノイズの問題を解決する手段としては、単純に高性能なレンズに変更することが考えられる。しかし、高解像度センサほどではないが、コストが増加してしまう。そこで、レンズの素材を現行のゲルマニウムからカルコゲナイドに変更することにした。

カルコゲナイドレンズは、近年、金型成形により比較的安価に量産できるようになったレンズである。

さらに2重レンズを1重レンズにし、レンズの枚数を減らすことでコストを抑えることにした。しかしながら、1重レンズは、2重レンズより歪みが大きくなってしまふ。図3は、レンズの中心からの距離と計測ノイズの特性を示したものである。ゲルマニウム2重レンズは、熱画像中心からの距離に対して、計測ノイズが比較的フラットになっているのが特徴であるのに対して、カルコゲナイド1重レンズは、歪みが大きい影響で、中心から端にかけて計測ノイズの悪化が大きくなっていくのが特徴である。中心付近では、ゲルマニウム2重レンズよりカルコゲナイド1重レンズのほうが、ノイズが低いが、端のほうでは、やや高くなってしまふ。これでは設置高4mに設置しても、人が検知できるのは、センサ直下の中央付近だけで、センサから離れた場所で検知できなくなってしまう。結局、すべての視野で検知できるのは、せいぜい3mまでとなってしまう。

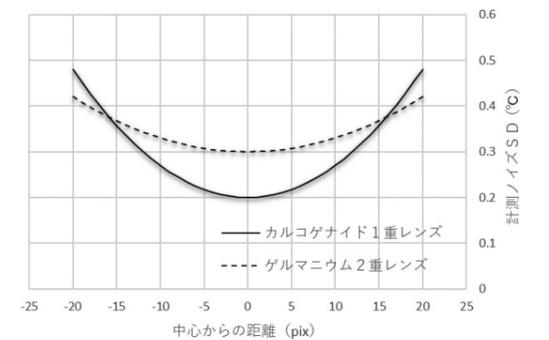


図3 レンズと計測ノイズの特性イメージ

この問題に対応するため、設置高に応じて測定範囲を制限することで対処する。

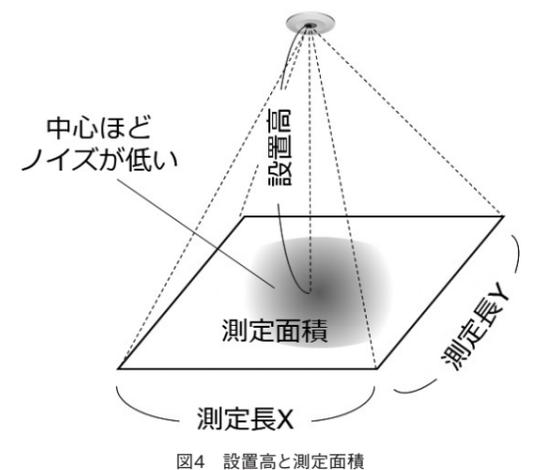


図4 設置高と測定面積

図4は、設置高と測定面積を示したものである。センサの設置が高くなると、視野角が一定であるため測定面積が広がっていく。表1は、現行の赤外線アレイセンサの具体的な設置高と測定範囲を示している。高く設置するほど、測定長、測定面積が大きくなるのがわかる。

表1 現行の赤外線センサの測定範囲

設置高[m]	測定長X[m]	測定長Y[m]	測定面積[m ²]
2.5	3.0	3.0	9.0
2.6	3.2	3.2	10.2
2.7	3.4	3.4	11.6
2.8	3.6	3.6	13.0
2.9	3.8	3.8	14.4
3.0	4.0	4.0	16.0

一方、カルコゲナイドレンズを採用した新しい赤外線アレイセンサの測定範囲を表2に示す。設置高3mまでは、同様に測定範囲が大きくなっていくが、設置高3m以上からは、測定範囲は変わらないように使用する視野角を制限する。

表2 新しい赤外線センサの測定範囲

設置高[m]	測定長X[m]	測定長Y[m]	測定面積[m ²]
2.5	3.0	3.0	9.0
2.6	3.2	3.2	10.2
2.7	3.4	3.4	11.6
2.8	3.6	3.6	13.0
2.9	3.8	3.8	14.4
3.0	4.0	4.0	16.0
3.1	4.0	4.0	16.0
3.2	4.0	4.0	16.0
3.3	4.0	4.0	16.0
3.4	4.0	4.0	16.0
3.5	4.0	4.0	16.0
3.6	4.0	4.0	16.0
3.7	4.0	4.0	16.0
3.8	4.0	4.0	16.0
3.9	4.0	4.0	16.0
4.0	4.0	4.0	16.0

これにより、設置を高くするほど計測ノイズのより良いところを使用できるようになり、4mの高さでの人検知を可能にすることができた。

スケルトン天井では、実際に設置されるセンサの高さが設計時にわからないことが多く、設置高3mとしてセンサの台数と接地場所を設計するため、設置高3m~4mで16m²以上をカバーする必要はない。

カルコゲナイドレンズを採用した赤外線アレイセンサを試作し(図5)、設置高4mで検証を行った。室温を18℃から30℃まで変化させ、オフィスを想定した様々な動作パターンに対して人検知を行った。



図5 試作した赤外線アレイセンサ

その結果を表3に示す。適合率とは、検知した人が実際に人であった確率である。再現率とは、人が実際にいるところを検知できた確率である。どちらか片方だけ上げるのは容易であり、両方の認識率が高いことが求められる。試作した赤外線アレイセンサが、適合率、再現率ともに良好な結果が得られていることがわかる。

表3 設置高4mでの人検知性能

条件	認識率	
	適合率	再現率
18℃	99.9%	93.8%
22℃	99.9%	96.8%
26℃	100.0%	98.4%
30℃	99.8%	98.7%

また、計測ノイズが低くなったことで、得られる熱画像も鮮明になり、室内の発熱体を管理者が確認しやすくなる。例えば、室内の消し忘れた機器などを発見しやすくなる。

図6は、ゲルマニウム2重レンズを用いた現行センサとカルコゲナイド1重レンズを用いた試作センサによる熱画像を示したものである。

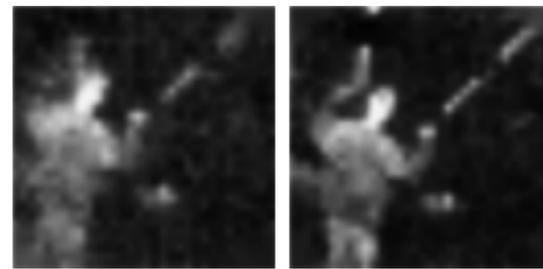


図6 熱画像の比較

2つの熱画像を比較すると人や背景に映る蛍光灯が、カルコゲナイドレンズのほうが鮮明なことがわかる。

3. ルールベースの採用

レンズを交換し、計測ノイズを抑えたとしても、人の一部が机やディスプレイ等の陰に隠れてしまえば、検知は難しくなる。一般的に誤検知しても照明や空調を制御できるよう、オフデイレイという仕組みが存在し、赤外線アレイセンサも採用している。オフデイレイとは、人が検知されなくなったときに、照明をOFFにしたり、空調の設定値を緩和したりする時間を遅らせることである。しかし、これでは従来狙っていた省エネ効果が得られない場合があるため、なるべく使用は控えていた。

特に個室での使用においては、設定器が近くに見えることが多いため、設定値が緩和されてしまったことに気づきやすく、クレームになることがあった。

そこで、従来の人検知アルゴリズムのままにルールを追加することでこの問題に対応することにした。これをルールベースと呼ぶ。

ルールベースとは、1980年代初期の人工知能で用いられ

た手法として知られている。1990年代以降に機械学習が主流になるまで、熟練した人の知識を再現するエキスパートシステムとして多用されてきた。ルールベースは、「もし~ならば~」といういわゆるIf-thenルールの集合によって構成される。ルールベースは、複雑なことができなかったり、与えたルールから新しいルールを新たに生み出したりといった、いわゆる汎化性能がないなどの問題があったが、単純で人間が理解しやすく実装もしやすいというメリットがある。

今回は課題が明確であるため、機械学習や確率論等で実現される第一の人検知アルゴリズムの結果そのままに、第2のルールベースでその結果を修正することが有効であると判断した。

従来の人検知アルゴリズムでは、まず、人が部屋に入ってきて、歩いて席にいくまでは、問題なく検知できている。そして席に座ると、体の一部が隠れて検知できなくなる。一部は映っているのにたまに検知されることもある。我々が採用している人検知アルゴリズムの特徴として、人が移動しているときの認識率は、人が着座しているときの認識率より高く、人を見失うことはほとんどない。

そこで、「出入口を経由せずに人がいきなり現れたり消えたりすることはない」ということを次の2つのルールで表現し、この問題を解決する。

<ルール1>

「もし、1つ前の時間の熱画像で検知された人が、現在の熱画像で検知されなかったならば、かつ、もしその場所が事前に登録された出入口でないならば、その場所にまだ人がいると判断する」

<ルール2>

「もし、現在の熱画像で検知された人が、1つ前の熱画像で検知されてなかったならば、かつ、もしその場所が事前に登録された出入口でないならば、その場所に人がいないと判断する」

このルールを図7に示す例で考える。①の例では、ルール1が適用され、現在の熱画像でも人がいることにする。④の例では、ルール2が適用され、現在の熱画像には人がいないことにする。②、③はどちらのルールも適用されない。

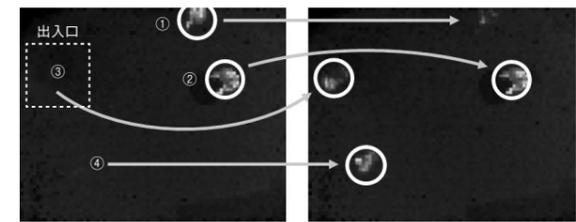


図7 熱画像の比較

表4にルールベース有り無しでの人検知アルゴリズムの認識率を示す。前章でも述べたが、適合率とは検知した人が実際に人であった確率で、再現率とは、人が実際にいるところを検知できた確率である。どちらか一方だけを改善するのは容易である。

表4 ルールベースによる認識率

ルールベース	認識率	
	適合率	再現率
無	19.20%	87.40%
有	91.70%	95.70%

例えば、すべての場所に常に人がいると判断すれば、再現率は100%にすることができる。しかし、適合率は、0%に近くなる。一方、確実なものだけを人と判断した場合、適合率は、100%に近づくが、再現率は0%に近くなる。通常、適合率と再現率のバランスは、人検知アルゴリズムのパラメータで調整できる。そのため、片方だけを見ることに意味はほとんどない。人の在/不在で空調や照明設備のOn/Off制御を行う場合、適合率を重視すれば省エネ性が向上し、再現率を重視すれば快適性が向上することになる。通常は、居住者を不快にすることは避けたいため、両立できなければ、再現率を重視することになる。そのため、表4のルールベース無しでは再現率に重みが置かれた結果、適合率が低くなっている。

ルールベース有りでは、適合率、再現率ともに適用前より高くなっている。特に適合率は、大幅に改善しており、これにより執務者を不快にすることなく省エネを達成できる。

4. 推定室温の採用

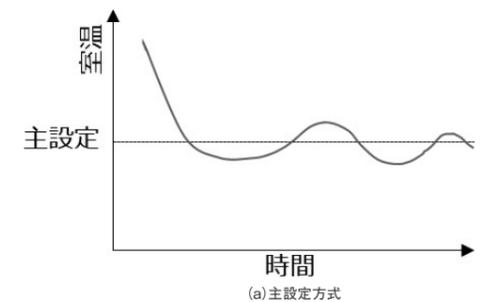
熱負荷空調制御は、赤外線アレイセンサが計測する表面温度を使ってフィードフォワード制御を行う独自の空調制御で、高い応答性と省エネ効果を実現する。

しかし、熱負荷空調制御は、室温設定が、原理上、主設定しか対応できないことが課題であった。省エネ効果のある冷暖2設定が主流であることから、熱負荷空調制御が導入できる建物が限られていた。

図8(a)は、主設定方式時の室温制御の振舞いを表したグラフである。設定温度を1つしか持たず、主設定値を挟んで空調による暖房と冷房を繰り返している。

一方、図8(b)が冷暖2設定方式を表したものである。設定温度を2つ持ち、その間を不感帯として空調を行わない。暖房、冷房の繰り返しを抑えて、省エネ効果が期待できるため、冷暖2設定方式のほうが用いられている。

赤外線アレイセンサシステムは、表面温度は計測するが、室温は計測できないため不感帯動作に入る判断が行えない。そこで、表面温度から室温を少ない計算量で簡易的に推定する技術を開発し、フィードフォワード制御でも、冷暖2設定による省エネ効果も得られるようにした。



(a) 主設定方式

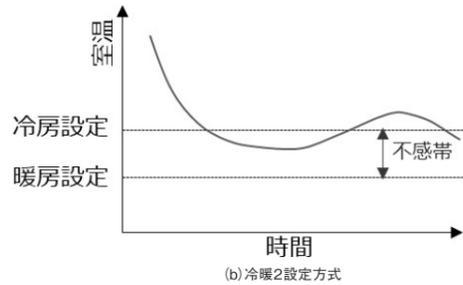


図8 設定方式による振舞いの違い

理論について説明する。エネルギー保存則により式(1)が与えられる。

$$C\rho V \frac{dT_r(t)}{dt} = C\rho W(T_s(t) - T_r(t)) + \sum_x K_{m,x} A_{m,x} (T_{m,x}(t) - T_r(t)) \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、 C : 空気の比熱 (通常 $1006\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$)、 ρ : 空気の密度 (kg/m^3)、 V : 部屋の体積 (m^3)、 W : 給気風量 (m^3/s)、 T_r : 室温 ($^\circ\text{C}$)、 T_s : 給気温度 ($^\circ\text{C}$)、 $T_{m,x}$: x 番目の面の平均表面温度 ($^\circ\text{C}$)、 $A_{m,x}$: x 番目の面の面積、 $K_{m,x}$: x 番目の面の対流熱伝達率 ($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) となる。

微分方程式を解くのは難しいため、まず定常状態、つまり時間 $t \rightarrow \infty$ で安定した状態を考えると、左辺の微分項はゼロとなる。その上で、室温 T_r について式を変形すると式(2)のようになる。

$$T_r = \frac{C\rho W T_s + \sum_x K_{m,x} A_{m,x} T_{m,x}}{C\rho W + \sum_x K_{m,x} A_{m,x}} \quad \dots \text{式(2)}$$

ここでいう室温は、定常状態における室温のため、現在の室温ではない。定常状態に達する時間もわからない。

そこで、部屋の空気が給気で完全に置き換わる時間を、定常状態に到達する時間とすることで、現在の推定室温を求める(式3)。

$$T_r'(t) = T_{r0} + (T_r - T_{r0}) \frac{Wt}{V} \quad \dots \text{式(3)}$$

ここで、 T_r' : 推定室温 ($^\circ\text{C}$)、 t : 経過時間 (s)、 V : 部屋の体積 (m^3)、 W : 空調機からの給気風量 (m^3/s)、 T_r : 時刻0で式(2)によって計算された定常状態での室温 ($^\circ\text{C}$)、 T_{r0} : 時刻0の際に計算された(=前回最後に計算された)推定室温($^\circ\text{C}$)となる。

推定室温の検証結果を図9(a)(c)(e)に示す。計測室温と推定室温は、定常状態で最大約 1°C の誤差に収まっており、空調制御を行う上で十分な精度であると考えている。計測室温は、壁に取付けられた室温センサであり、推定室温は、空間の平均温度を推定することから、両者は一致するとは限らず、推定温度を用いるほうが執務者の設定値要求を平均的に満たすことができる。計測室温は、近くのOA機器などの発熱に影響をうけて正しい執務者近辺の計測になっていないことがよくある。また、立ち上がり時に、推定温度のほうが、早く設定値に近づいていくが、これは計測室温の時

定数が大きいためであり、推定室温の方が優れた室温計測だと考えている。

推定室温を用いた冷暖2設定方式の検証結果を図9(b)(d)(f)に示す。冷暖2設定方式が正常に動作することが確認できる。また、給気温度のハンチングが抑えられていることがわかる。消費電力も減少していることを確認した。

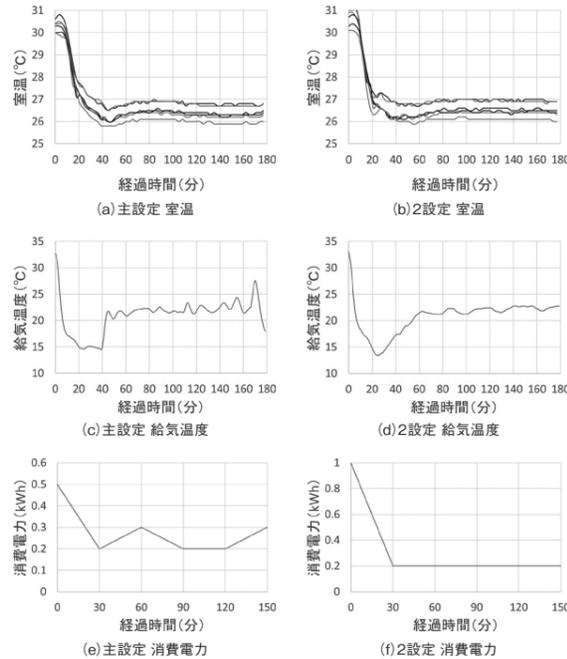


図9 主設定と冷暖2設定の比較

5. おわりに

赤外線アレイセンサの性能を向上させるための技術、カルコゲナイドレンズ、ルールベース、推定温度について説明した。

赤外線センサの技術は日進月歩で発展しており、今後も高性能化、低価格化が進んでいく有望な分野である。この技術の発展に伴って、行動認識などアプリケーションでできることも増えていくだろう。今後、赤外線アレイセンサが、より多くの建物で採用されていけば、価格も今よりも安価になっていくと思われる。室内の表面温度は、室温を決める支配的な要因であるため、赤外線アレイセンサで計測し、監視することは室温の理解に極めて重要であり、これがフィードフォワード制御も可能としている。空調制御の表面の温度計測の重要性はまだ一般的に認知されておらず、本稿を通じて少しでも理解が広まっていけば幸いである。赤外線アレイセンサが未来の建物で欠かせない技術になることは間違いのない。アズビルがこの分野で世界をリードしていることを誇りに思う。これからも開発を絶え間なく続け、世界の建物の発展に寄与していきたい。

<参考文献>

- (1) 本田光弘, 長嶋聖, 青山章一郎: 赤外線アレイセンサを中心としたスマートビルディング実現の基盤技術, azbil Technical Review, 2020年4月号, pp.3-9,

アズビル株式会社

- (2) 本田光弘, 長嶋 聖, 青山章一郎: 赤外線アレイセンサシステム, JETI, Vol.68, No.9, 2020, pp.70-77, (株)日本出版制作センター
- (3) 海老原克司: 快適な空調を実現するビル向け赤外線アレイセンサシステム, 建築設備と配管工事, Vol.58, No.14, 2020, pp.26-30, 日本工業出版(株)
- (4) 本田光弘, 長嶋 聖, 青山章一郎, 萬谷卓治: 赤外線アレイセンサシステム, R&M, pp.39-44, 2020年7月, (一社)日本鉄道車両機械技術協会
- (5) 青山 章一郎, 本田 光弘, 海老原 克司: 特集記事 赤外線アレイセンサシステムとその活用例, 電気設備学会誌 2022年42巻 pp. 417-420, (一社)電気設備学会
- (6) アズビル株式会社: 製品紹介 スマートビルディングの実現を支援する赤外線アレイセンサシステム, 計測と制御, 2022年61巻8号 pr. 611-612, (公社)計測自動制御学会

<商標>

BACnetは, ASHRAEの商標です。

<著者所属>

本田 光弘 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発2部

生産性向上の実現に向けた IO-Link™対応誘導形近接センサ用ICの開発

Development of IO-Link inductive proximity sensor IC for improved productivity

高宮 知広
Tomohiro Takamiya

川井 真一
Shinichi Kawai

尾身 知子
Tomoko Omi

キーワード

近接センサ, IO-Link, アナログ値出力, 予防保全, 遠隔監視, 生産性向上

一般的なON/OFF出力やIO-Link通信に対応した誘導形近接センサに用いる近接センサICを開発した。このICに含まれる発振回路は、温度特性が小さく検出体密着状態から検出体が無い状態までセンシング用コイルのインピーダンスに比例した発振振幅とすることができる。このことにより、IO-Link通信対応の近接センサで、予防保全や遠隔監視の観点から必要となる検出体の位置に応じたアナログ値を出力することができ、検出体に近い位置での検出や、調整精度を高めることが可能となった。また、専用ツールと組み合わせることで各種設定を行うことができ、装置の生産性向上の実現が可能となる。

We have developed a proximity sensor IC for use in inductive proximity sensors that supports general ON/OFF output and IO-Link™ communication. The oscillation circuit in this IC has small temperature characteristics and can generate an oscillation amplitude proportional to the impedance of the sensing coil from a state of close contact with the target object to a state of no target object. This enables the proximity sensor with IO-Link communication to output analog values according to the position of the target object, which is necessary from the viewpoint of preventive maintenance and remote monitoring, and to detect target objects near the sensor, and to improve adjustment accuracy. In addition, various settings can be made by combining the system with dedicated tools, making it possible to improve equipment productivity.

1. はじめに

人材不足を背景とした生産性向上の観点から生産設備のIoT化が急務となっており、そのような背景から近接センサなどの生産設備に使用されるセンサや、アクチュエータにおいて、IO-Link™対応製品が普及しはじめています。IO-Linkは産業用インターフェース規格で、センサやアクチュエータを上位ネットワークに接続することができる技術であり、生産設備のIoT化の実現に寄与することが期待できる。

近接センサは物体の有無や接近を検出するセンサである。近接センサの検出原理は超音波や光、静電容量など様々な媒体を使ったものがあるが、その中でも工作機械や自動車製造ラインなど、油がかかり、汚れた雰囲気となる環境では、センシング用のコイルから発生する高周波の磁場の電磁誘導により金属を検出する誘導形近接センサが使われる。

従来の誘導形近接センサは、1つのON/OFF出力のみを備えており、また製品仕様の動作距離は固定で数mmと短く、ネジの位置の調整やスペーサーなどによりドグ^{注1}検出位

置を調整する必要がある。そのため、調整作業に手間がかかり、検出が安定しないという問題があった。

IO-Link対応近接センサ 形 H3C (図1)は通信によりドグ検出位置を設定できるなどの利点があり、上記の問題を解決できる製品となっている。近接センサ用ICを開発するにあたっては、IO-Link対応近接センサでの使用に適した仕様とする必要がある。装置の生産性向上の実現、予防保全や遠隔監視の観点から、ON/OFF出力だけでなく、検出状態が分かる検出体の位置に応じたアナログ値出力が求められる。位置に応じたアナログ値出力を実現するためには、以下の事項が求められる。

- ・検出体密着状態から検出体が無い状態まで検出コイルインピーダンスに比例した発振振幅となること
- ・発振回路の温度特性が小さいこと
- ・発振振幅の調整が精度良くできること

注1 ドグとは、センサで位置検出するために設けられた物体



図1 IO-Link対応近接センサ 形 H3C

2. 発振回路の性能向上

2.1 従来ICの回路と課題

近接センサとは非接触で金属を検出するセンサである。磁路が開放されたコイルを高周波で発振させ金属を検出するもので、金属の接近で検出コイルのインピーダンス ($\omega^2 L^2 / r$:Lはコイルのインダクタンス、rはコイルの損失抵抗、 ω は角周波数)が変化する特性を利用している(図2)。このコイルはLC共振回路を構成していて、金属が接近するとインピーダンスが小さくなり(rが増える)、発振振幅が小さくなるのでその振幅変化を検出しON/OFF信号を出力する。

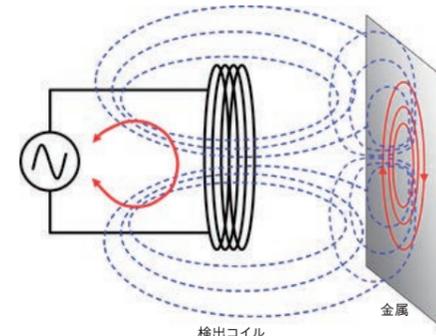


図2 検出原理

ポッティング樹脂の充填によって寄生容量が付くことによる動作点の変動量を考慮する必要があり、調整精度を高めることが困難である。

そのため、IO-Link対応近接センサで検出体の位置に応じたアナログ値を出力することが難しかった。

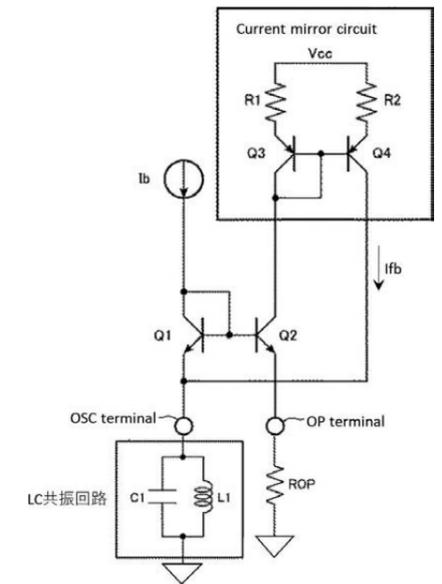


図3 従来ICの発振回路

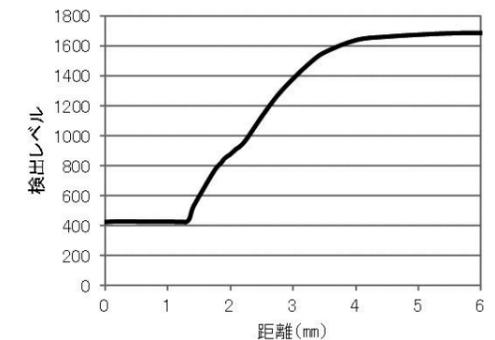


図4 従来IC 検出レベルの距離特性

従来の近接センサは図3のように、OP端子(OP terminal)に接続された抵抗の抵抗値ROPとカレントミラー回路によって、帰還電流(Ifb)が決まる。その電流がOSC端子(OSC terminal)に接続される共振回路に流れることで、正帰還され発振している。

この発振回路には次のような課題がある。

課題1:トランジスタQ3、Q4の非線形特性を利用して発振特性を実現しているため、発振振幅はコイルのインピーダンスに比例した振幅とはなっておらず、検出体に近い位置にある場合は発振させることができなかった。そのため、近接センサの検出レベルは図4のように、検出体に近い領域では変化しない特性となっている。

課題2:トランジスタQ3、Q4の非線形特性を利用しているため、IC製造時のプロセスばらつきによるデバイス特性の変化の影響を受けやすく温度特性が悪い。

課題3:OP端子に接続される抵抗で発振振幅を調整するが、抵抗には高周波電流が流れる。抵抗の調整は、周囲の

2.2 新ICの発振回路

今回、IO-Link対応近接センサで検出体の位置に応じたアナログ値を出力するため、新しいICを開発した。

新しい発振回路(図5)は、OSC端子に接続される共振回路、OP端子の電圧を決める電圧設定回路、帰還電流Ifbを流すタイミングを決めるコンパレータ回路、帰還電流Ifbを増幅するカレントミラー回路、OP電流を決める抵抗ROP、で構成される。

まず、発振回路が発振を維持するためには正帰還動作する必要がある。正帰還動作とするために、コンパレータ回路CMPは発振電圧(VOSC)と基準電圧(V1)とを比較し、発振電圧が基準電圧以上のときに帰還電流を流し、発振電圧が基準電圧以下のときに帰還電流を流さないようタイミングを生成する(図6)。

次に、カレントミラー回路について説明する。カレントミ

ラー回路にはスイッチを有している。このスイッチはコンパレータのタイミング信号により、帰還電流I_{fb}のON/OFFを切り替えている。カレントミラー回路によりミラー比を変え、帰還電流を設計的に増幅することで発振振幅を調整することも可能である。

カレントミラー回路における帰還電流I_{fb}を決めるための電流（OP端子における電流I_{op}）を、電圧設定回路により設定されるOP端子の電圧と抵抗ROPの抵抗値で割った電流で設定する。その電流I_{op}はコンパレータ回路の比較結果に基づいたタイミングで、カレントミラー回路で増幅され帰還電流I_{fb}となり、OSC端子に流れることになる。また、SG電圧は、発振回路における発振振幅の中心点となる電圧である。

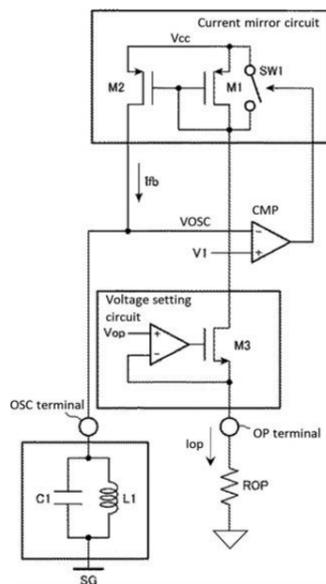


図5 新ICの発振回路

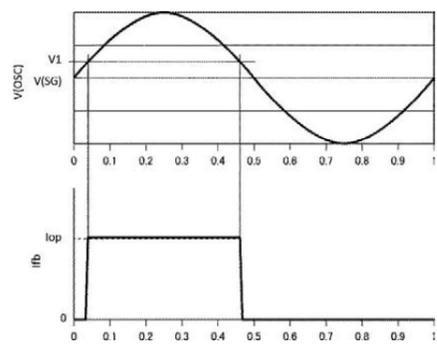


図6 帰還電流の動作タイミング

2.3 課題とその解決結果

新しい発振回路では従来ICの課題1~3を次のように解決可能となる。

課題1について、帰還電流I_{fb}がV_{op}と抵抗ROPの抵抗値で割った電流で設定され一定となる。よって、発振振幅は共振回路インピーダンス×帰還電流I_{fb}(一定)に比例した電圧となることから、並列共振回路のインピーダンスにほぼ比例する特性となる。また、検出体が近い位置にある場合でも

帰還電流I_{fb}を流すことができる回路構成としたため、発振させることが可能となった。

課題2について、帰還電流I_{fb}はOP端子における電圧（=V_{op}）を抵抗ROPの抵抗値で割った値となり、帰還電流が流れるタイミングは発振振幅と基準電圧との比較により決まる。また、V_{op}は新ICの内部回路であるバンドギャップリファレンスで生成され、温度特性の小さい安定した電圧である。そのため、温度特性を小さくできる構成とすることが可能となる。

課題3について、この発振回路では、OP端子における電圧が、電圧設定回路により出力され、これはDC電圧となる。よって、OP端子の周囲に充填剤等による寄生容量が付いたとしても、発振振幅への影響は非常に小さい。さらに、この発振回路では、設定電圧をDAC等でデジタル的に設定可能とすることで、動作点の調整がアナログ的に調整可能となる。よって、発振振幅のより精密な調整が可能となる。

以上より、IO-Link対応近接センサで検出体の位置に応じたアナログ値を出力することが可能となる。

2.4 新ICの仕様

今回開発したIC(表1, 図7)は0.4μmのBCD(バイポーラ・CMOS・DMOS)プロセスで集積している。パッケージサイズは3.055mm×2.055mmで、0.5mmピッチのWLCSP(Wafer Level Chip Size Package)を使用している。そのため、MPUなどの電子部品と組み合わせることで小型なIO-Link対応近接センサの製品化が可能となる。

表1 新ICの主な仕様

プロセス	0.4μm BCDプロセス
動作電源電圧	7~30V
絶対最大定格	40V
使用温度範囲	-40~93℃
パッケージ	WLCSP

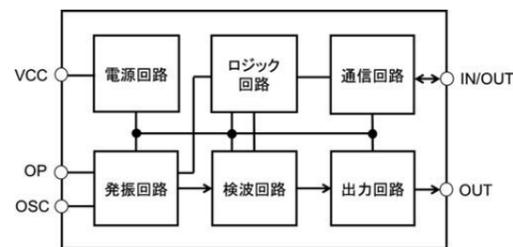


図7 ICブロック図

3. 新IC搭載IO-Link対応近接センサと設定ツール

3.1 IO-Link対応近接センサ

新ICを使用したIO-Link対応近接センサ形 H3CはIO-Link通信により、しきい値を自動で最適な値にティーチングすることが可能な近接センサである。

IO-Link対応近接センサのデバイス構成を、図8に示す。

構成としては、①センサ検出部(コイル/コア)②発振回路などの集積回路である専用IC③物理量を演算するMPU部

④IO-Linkインターフェースを含む外部との入出力をつかさどる入出力部(IO-Linkデバイス)からなる。

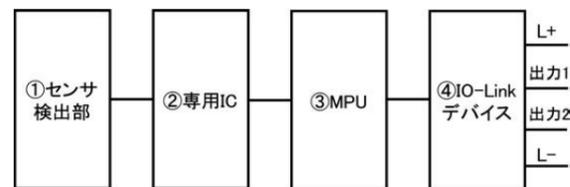


図8 IO-Link対応近接センサ形 H3Cのデバイス構成

3.2 専用設定ツール

IO-Linkマスタを介しパソコンで各種設定やティーチングを行うことができる専用設定ツールを提供している。

IO-Link通信により近接センサから検出体の位置に応じたアナログ値を出力、設定ツールにて近接センサから出力されたアナログ値の変化を見ながら各種設定やティーチングをグラフィカルに行うことを可能としている。

以下に設定ツールの設定画面例(図9)、アナログ値時系列データのグラフ化画面の例(図10)を示す。

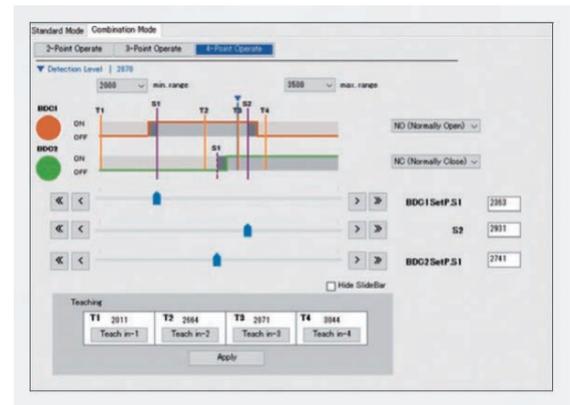


図9 設定ツール設定画面例

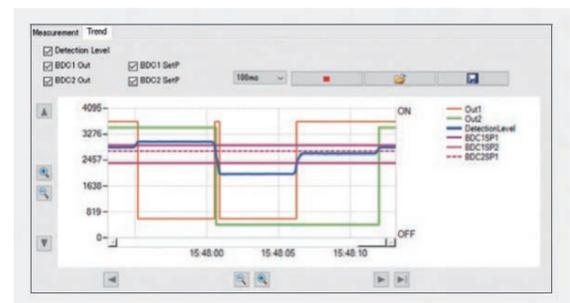


図10 アナログ値時系列データのグラフ化画面例

4. 生産性向上例

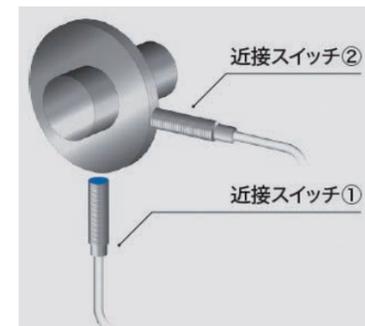
4.1 簡単調整・工数削減の実施例

工作機械の主軸ツールクランプ位置検出での例を紹介する。

従来のツールクランプは、ツールのクランプ状態に対応するドローパの位置を近接センサで検出していた。2つの状態

を識別するならば1つの近接センサ、4つの状態(アンクランプ、ミスクランプ、クランプ、空クランプ)を識別するならば2つの近接センサが必要である(図11)。また、作業者による細かい調整が必要であり、多大な時間がかかっていた。

形 H3C-Hでは、ドローパにテーパ形状のフランジ部を設けることにより図12のように4つの状態の位置を1つのセンサで検出することができ、またティーチング機能により各状態に対してティーチングを実施すれば簡単に3つのしきい値を自動で最適な値に設定することが可能であり、調整工数の削減、ライトトラブルが低減できる(図13)。



	アンクランプ	ミスクランプ	クランプ	空クランプ
近接スイッチ①	OFF	ON	ON	OFF
近接スイッチ②	OFF	OFF	ON	ON

図11 ツールクランプ例 従来の近接センサ



図12 H3Cによる4つの状態検出

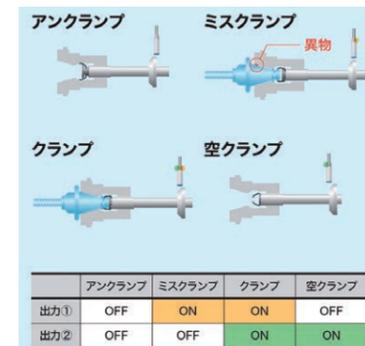
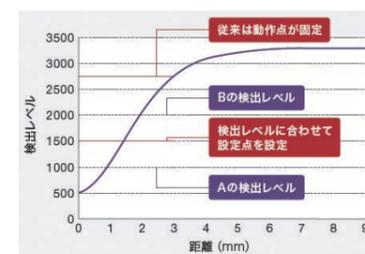


図13 簡単調整・工数削減結果

	アンクランプ	ミスクランプ	クランプ	空クランプ
出力1	OFF	ON	ON	OFF
出力2	OFF	OFF	ON	ON

4.2 簡単調整・予兆管理の実施例

次にマシニングセンタ・NC円テーブルの検知による予兆管理について紹介する。

図14において、円テーブルはブレーキで停止・固定(クランプ)し、ワークを加工し、ブレーキ解除(アンクランプ)で円テーブルを回転してワークの姿勢を変更している。

皿ばねが劣化すると、減圧してもピストンが回転ディスクおよび固定ディスクから離れにくくなる問題が生じ、その状態でテーブルを回転すると焼き付きのトラブルを誘発する可能性があったが、従来の近接スイッチではピストンのストロークが小さいため、ディスクの実体検知が困難であった。

今回開発したICは検出体密着状態からの微小なストロークでも発振振幅が変化するため、調整精度が良くなった。そのため、クランプ・アンクランプそれぞれの状態でティーチングでき、各位置の検出レベルの中央にしきい値を設定できる。さらに、設定値を調整することでピストンの中間位置停止を監視でき、皿ばねの劣化の予兆を図15のように検知できる。予防保全を行うことが可能となりダウンタイムを削減、さらには生産性向上につながると考えられる。

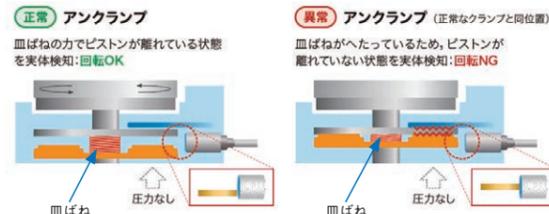


図14 NC円テーブルの焼き付きトラブル事例

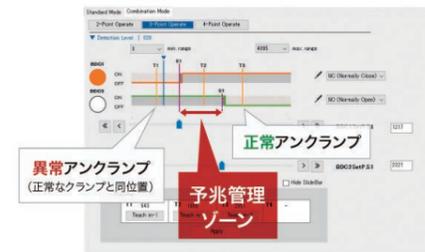
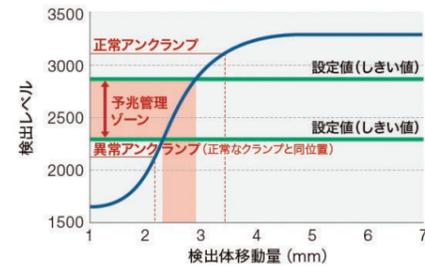


図15 予兆の検知と検出レベルの可視化

5. おわりに

近接センサの性能向上のため、新しいICでは、温度特性が小さく、検出インピーダンスに比例した発振振幅となる発振回路を開発することができた。これによりIO-Link対応近接センサで検出体の位置に応じたアナログ値を出力することが可

能となった。このセンサによってお客様、装置の予防保全・遠隔監視などに利用いただき、生産性向上につながることを期待している。

<参考文献>

- (1) Azbil Corporation, Adjustable proximity sensor model:H3C (in Japanese), Journal of SICE, Vol. 60, No. 9, pp.679-680, Sept. 2021, The Society of Instrument and Control Engineers
- (2) 特許出願公開番号 特開2021-19282 (P2021-19282A)

<商標>

IO-Linkは、PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.の商標または登録商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|-------------------------------------|
| 高宮 知広 | アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニーCP開発部 |
| 川井 真一 | アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニーCP開発部 |
| 尾身 知子 | アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニーCP開発部 |

savic-net™ G5コンパクトモデル

ユーザビリティを強化した監視機能を提供する2万㎡規模以下建物向け中央監視システム

savic-net G5 compact model: A central monitoring system for buildings of 20,000 square meters or less that provides monitoring functions with enhanced usability

田中 義人
Yoshihito Tanaka

坂本 俊隆
Toshitaka Sakamoto

1. はじめに

アズビルでは長年にわたり建物向け中央監視システムを販売してきた。一世代前までは、①シンプルな機能であるが低価格な管理点数500点以下向けのsavic-net™ FX mini、②壁掛けや自立盤組み込みにも対応した管理点数2,000点以下向けのsavic-netFX2compact™、③多彩な機能選択が可能な3万点以下向けsavic-net FX2といった3つのシステムを販売していた。①や②はサイズや低価格化を実現するために、機能や拡張性に様々な制約があった。

上記③の後継となる最新のシステムとしてsavic-net G5を販売、2023年3月からは上記①と②の後継となる2万㎡規模以下の建物向け中央監視システムであるsavic-net G5コンパクトモデルの販売を開始した。

このsavic-net G5コンパクトモデルは、製品サイズをコンパクトに抑えつつ、ソフトウェア面で機能の強化・操作性の向上を図ることでsavic-net G5と同等の操作性を実現した。

本稿では、直感的な操作で、知りたい情報に素早くアクセス可能としたユーザビリティ強化について述べる。

2. 製品概要



図1 savic-net G5コンパクトモデル 壁掛けタイプ

savic-net G5コンパクトモデルは、監視業務を行うためのユーザーインターフェースである表示部と、データの蓄積・管理のほか、監視・制御機能を集約した制御部が一体化されたコンパクトな製品である。

壁掛けタイプをはじめとして様々な設置場所に応じて選択可能な4つのラインアップを用意した(図1, 表1)。

表1 savic-net G5コンパクトモデルラインアップ

形態	壁掛けタイプ	自立盤組み込みタイプ
外観		
寸法 (mm)	500(W)×800(H)×100(D)	表示部:550(W)×398(H)×89(D) 制御部:444(W)×350(H)×81(D)
形態	ワゴンタイプ	サブパネルタイプ
外観		
寸法 (mm)	630(W)×580(H)×330(D)	320(W)×490(H)×150(D)

これにより従来製品であるsavic-net FX mini、savic-netFX2compactからの置換も容易となっている。

3. ユーザビリティ強化

3.1 マルチウィンドウ表示

複数の画面を整列表示できるようにした(図2)。

例えば、警報発生した場合に、グラフィック画面を起点として、対象ポイントの発生日時を確認し、ポイントの値を

時系列で表示。一時的な上昇か、累積的な上昇かを1画面で総合的に判断することができる。



図2 マルチウィンドウ表示

3.2 多彩なチャート機能の提供

円グラフ、散布図、ヒストグラムといった多彩な表示形式に対応した(図3)。

例えば、熱負荷データと消費電力データの分布状況解析や、消費エネルギーの内訳を割合として確認することができる。

基本的なエネルギー管理業務を本製品で実施でき、省エネルギー対策が可能となる。



図3 チャート表示

3.3 タッチ操作性の向上

グラフィック画面の拡大・縮小を、タッチ操作のピンチイン・ピンチアウトでできるようにした。また、ログ画面は、スワイプでスクロールできるようにした(図4)。

一般的な操作方法を採用することで、ユーザーは直感的な操作で監視できるようになり、操作マニュアルを見なくても操作ができるようになる。

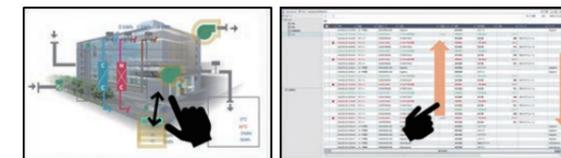


図4 ピンチアウト操作(左)とスワイプ操作(右)

4. おわりに

savic-net G5コンパクトモデルの開発により、2万㎡以下の建物向けにも、上位機種であるsavic-net G5と同等の操作

性を提供することができた。

今後も機能強化や改善により、お客様の監視業務効率向上に貢献できるような製品開発を行う所存である。

<商標>

savic-net, savic-net FX, FX2compactはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

田中 義人 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発4部

坂本 俊隆 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1部

空間の価値を高める savic-net™ G5 入退室管理システム

savic-net G5 access management system that increases the value of space

岡田 慧
Satoshi Okada

1. はじめに

アズビルは様々な建物にビルディングオートメーション（以下、BA）システムを提供するとともに、ビルセキュリティ事業に取り組み、入退室管理システムも提供している。

このたび、建物の省エネルギー・省CO₂を実現するオープンなBAシステムであるsavic-net G5に入退室管理機能を融合する開発を行い、販売開始した。savic-net G5入退室管理システム（以下、G5入退室管理システム）は入退室管理の機能を強化するとともに、人の情報を自動制御に活用して空間の価値を高めることを目指す。

2. 製品のビジョン

G5入退室管理システムは、「人とつながるBAシステム」ならびに「利用者・管理者双方の要望に柔軟に対応する入退室管理」をビジョンに掲げている。

「人とつながる」とは、人の情報を中心としたサービスにより、省力・省エネルギーに貢献するとともに、利用者1人ひとりの快適性向上や安全確保を支援することである。

人流や人の位置情報を活用し、設備を最適運転することで管理者の負担低減と省エネルギーに貢献するほか、位置情報を可視化して混雑緩和や災害時対応を支援する。また利用者の好みに応じた空気環境を提供できるようにし、快適性を向上するシステムを目指している。

3. 製品概要

このたび、ビジョンを達成するための足掛かりとして、入退室管理機能をsavic-net G5に融合する開発を行った。

3.1 システム構成

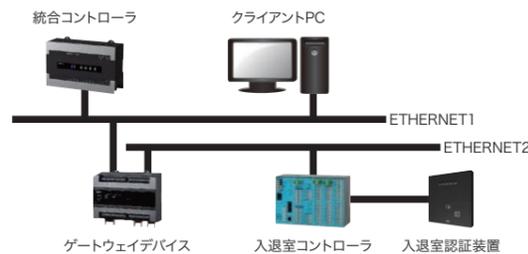


図1 G5入退室管理システムのシステム構成

G5入退室管理システムは、入退室管理機能を融合した統合コントローラと、電気錠を制御する入退室コントローラ、およびカードリーダー等の入退室認証装置で構成される。入退室コントローラおよび入退室認証装置としてsavic-net FX™セキュリティシステム（以下、FXセキュリティシステム）の製品を接続し、統合コントローラは同時開発したゲートウェイデバイスを介して入退室コントローラを監視、制御する。

FXセキュリティシステムでは自動制御と入退室管理を別々の機器が担っており、相互に連携した制御は限定的であった。G5入退室管理システムでは統合コントローラが両機能を併せ持つことで機能の融合が果たされ、連携した制御を実現しやすくなった。また入退室管理専用のPCと無停電電源装置を設置する必要があったFXセキュリティシステムに比べて、制御盤内の機器を削減できる。

3.2 機能

G5入退室管理システムの主な機能について紹介する。

3.2.1 入退室ユーザ管理

入退室する人の情報を登録し、入退室コントローラに情報を展開して入退室を制御する機能である。登録できる人の件数をFXセキュリティシステムの10万件から12万件に拡張した。登録した人の情報を一覧表示することができ、抽出機能を用いて一部の人だけを表示することもできる。ファイル入出力によって大量の情報を一括登録する機能を持ち、登録作業の負荷を軽減できる。

3.2.2 ルーム管理機能

入退室制御の対象とする部屋の情報を登録する機能である。部屋の情報を一覧表示し、抽出機能を用いて一部の部屋だけを表示することもできる。入退室ユーザ管理機能と組み合わせることで、個人を特定して入退室を制御できる。また、個人を特定せずに、部屋ごとの暗証番号のみによって入退室を制御することもできる。

3.2.3 入退室ログ管理機能

入退室の履歴を保管し、閲覧やファイル出力できる機能である。毎日の決まった時刻に、ファイル出力を自動で行うこともできる。設備の状態変化履歴と入退室の履歴をまとめて表示し、時系列に沿って確認することができる。抽出機能を用いて入退室の履歴のみを表示することもできる。

3.2.4 在室者管理機能

特定の部屋に在室している人の情報や、在室人数を表示できる機能である。退室操作を忘れて退勤してしまった人について、FXセキュリティシステムでは画面操作により退室扱いとすることができたが、G5入退室管理システムでは画面操作に加えて、所定の時刻に自動で退室扱いにすることもできる。

G5入退室管理システムでは、在室人数の情報をグラフィック画面に表示して監視することができる。在室人数の推移をグラフに表示したり、最大・最小・平均値を集計してレポート出力することもできる。また、在室人数を制御の入力値として利用し、人数に応じて設備の運転を切り替えることが可能となった。

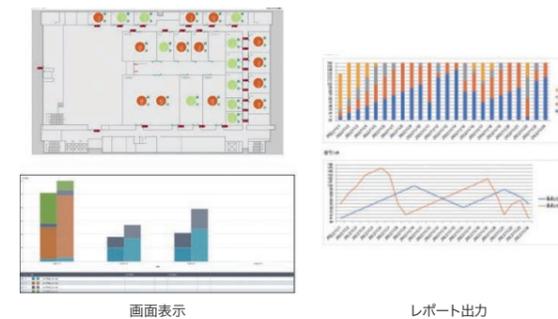


図2 在室人数の画面表示・レポート出力例

3.2.5 アンチパニック制御

定められた正しい経路で入退室を行わない場合に、入退室を禁止する機能である。経路を誤ったことは画面上に警報として通知できるほか、savic-net G5のオプション機能である警報Eメール機能を利用して外部に送信することもできる。

4. おわりに

今回開発したsavic-net G5入退室管理システムについて、機能を中心に紹介した。今後は機能を順次拡充し、自動制御と入退室制御の融合で新たな価値を創出していく所存である。

ある。

<商標>

savic-net, savic-net FXはアズビル株式会社の商標です。ETHERNETは富士フイルムビジネスイノベーション株式会社の日本または他の国における商標です。

<著者所属>

岡田 慧 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発3部

小型デジタル指示調節計

互換性を維持しながら性能向上した形 C1M, 高精度・高速制御を実現した形 C1A

Compact single loop controller: Model C1M for improved performance while maintaining compatibility, Model C1A for high accuracy and high speed control

長嶋 直紀
Naoki Nagashima

1. はじめに

2003年リリースの前モデルデジタル指示調節計SDC 形 C15は、多機能を小型筐体で実現し、PCツールを活用して装置設計や設定工数を削減するコンセプトが評判となりヒット商品となった。

20年の節目に、重要性指標である指示精度とサンプリング速度を向上させた形 C1A, 簡単にSDC 形 C15から交換でき、かつPV(Process Value:現在値, 測定値)表示が見やすい形 C1Mを開発した。

2. 製品概要

形 C1Aは、指示精度やサンプリング周期など基本機能の高性能化に加え、背面端子配線を外さずにケースから本体引き抜き可能なドローアウト構造、周囲温度の影響を低減した設計、ヒーター保守・監視機能、熱電対・測温抵抗体・直流電流/電圧入力に対応したフルマルチ入力などの要望に応え、高い保守性を実現した製品である。

形 C1Mは、SDC 形 C15との互換性(形番構成, 端子配列, パラメータ, 通信アドレスなど)があり、置き換えが容易である。またPV表示を大型化して視認性を高めた。

3. 製品特長

3.1 高精度・高速制御

正確な温度管理や制御を実現するため、回路構成やレイアウトの新規設計と全部品見直しを行い、指示精度(SDC 形 C15:±0.5% FS)を以下のとおり向上させた。

形 C1M:±0.2% FS(測温抵抗体, 直流電流/電圧入力)
±0.3% FS(熱電対入力)

形 C1A:±0.1% RD(熱電対, 測温抵抗体入力)
±0.1% FS(直流電流/電圧入力)

また、低ノイズ高分解能ΔΣ方式ADコンバータ採用とPV値取得タイミングの制御により、商用周波数ノイズ耐性維持と高速サンプリング(形 C1M: 50ms, 形 C1A: 25ms)を両立させた。なお、様々な装置事情に対応できるようにサンプリング周期は最大500msまで可変とした。

3.2 視認性・デザイン性

形 C1Mは、現場での視認性を高めるため、文字縦横比や線幅バランスが良く高コントラストな白色LCDの大型文字(文字高さ15.4mm)でPVを表示した。

形 C1Aは、情報量と視認性を両立させるため、4.5桁表示により高分解能対応し、マルチステータス表示灯など表示項目を増やし、文字間に十分なスペースを確保するとともに理想に近い縦横比の文字とした(図1)。



図1 前面表示(左:形 C1M, 右:形 C1A)

3.3 スマートローダパッケージ 形 SLP-C1F

無償エンジニアリングツール 形 SLP-C1Fには、パラメータ設定, 数値・トレンドモニタなどの従来機能に加え、省エネ効果や調整工数低減を目的としたPIDシミュレータを標準搭載した(図2)。

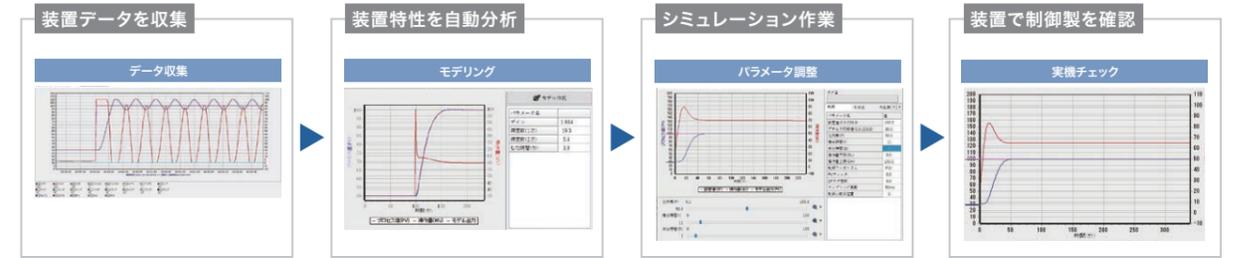


図2 PIDシミュレータの操作例

3.4 設定互換性

形 C1Mは、機種変更作業の負担低減を目的として、SDC 形 C15の形番構成, 機能, 設定パラメータ, 通信アドレス, 端子配列を踏襲した。また, 形 SLP-C1Fを用いて, SDC 形 C15のプロジェクトファイル, または直接通信で読み出したSDC 形 C15用パラメータを, シームレスに形 C1M用パラメータへ変換できる。

3.5 PLCリンク機能

形 C1M/形 C1Aが31台以下の小~中規模装置の新設や変更時エンジニアリングコスト削減のため, RS-485通信モデルにプログラムレスでPLCとのデータ授受を実現するPLCリンク機能を搭載した(図3)。



最大接続台数: 31台
最大通信量: 形 C1M 1台当たり 64ワード

図3 PLCリンク

3.6 ステップ運転・パターン運転

きめの細かい温度プロファイルで複数のレシピを実現できるよう, 形 C1Mは上位機種にのみ搭載していたステップ運転を搭載した。8ステップそれぞれに, SP値, PID組, 勾配, 保持時間の設定が可能である(簡易パターン運転の16セグメント相当)。

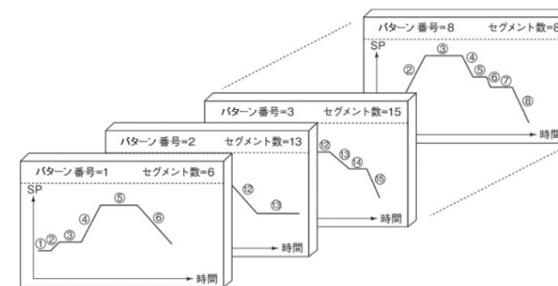


図4 形 C1Aパターン運転によるSP生成

形 C1Aの拡張データメモリモデルでは, 最大8パターン

×16セグメントのパターン運転機能を搭載している(図4)。各セグメントにはPID組番号, ガランティソーク, セグメントイベントを設定でき, 停電復帰機能により停電前のパターン番号, セグメント番号, サイクル残り回数, セグメント経過時間からの復電動作が可能である。形 C1M/形 C1Aともに勾配表示部によりランプ/ソーク状態を確認できる。

3.7 ヒーター保守・監視

ヒーター断線/短絡/過電流といった異常や電流値測定のため, 形 C1M/形 C1AではCT(カレントトランス)入力モデル, 形 C1Aでは10A以下の小容量ヒーターを対象とした微小CT入力モデル, ヒーター抵抗値監視が可能なCT/VT入力モデルを選択可能である。VT(ボルテージトランス)電圧とCT電流を真の実効値計測により得たヒーター抵抗値監視から電気炉のヒーター寿命劣化を診断できる。イベント機能や論理演算機能により, ヒーター抵抗値を条件とした警報出力も可能となる。

3.8 周囲温度の影響低減

装置の使用環境や設計制約緩和を目的に, アナログ入出力回路の温度特性を向上し, 基準温度条件(SDC 形 C15:23±2℃)を25±3℃, 動作温度条件(SDC 形 C15:0~50℃)を-10~+55℃へ拡張した。

4. おわりに

形 C1Mと形 C1Aの概要と特長を紹介した。装置設計や保守における深刻な人材不足・スキル不足といった課題に対し, 既設機種との互換性が高く, PLCリンク, SLP, ステップ運転・パターン運転, ヒーター保守・監視などの機能を持ち高性能な調節計は有効な解決手段となる。

<商標>

SDCはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

長嶋 直紀 アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニーCP開発部

問い合わせ先
アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニーCPマーケティング部
電話:0466-20-2278



azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2024年4月発行号

発行日 2024年4月1日(通巻65号)
発行責任者 高橋実加子(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：大澤義孝、百瀬修、衣笠静一郎、太田延樹、山田功、
久保田耕、小島宗隆
事務局：筒井宏明、高石知治、菅野裕子
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/>

- ©2024 Azbil Corporation All Rights Reserved. Printed in Japan
- 本誌から無断転載・複製はご遠慮ください。
- 本誌に掲載した名称の中には、それぞれの各社が商標として使用している場合があります。