

azbil

アズビル株式会社

〒100-6419
東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル
<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

2025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：広がる市場と多様な計測・制御技術



表紙について

地形や風の影響を受けた波の「流れ」がつくり出した景観

御輿来海岸

九州の北西部、有明海に面した熊本県宇土市の御輿来海岸には、干潮になると三日月形の模様がついたとても珍しい砂干潟が現れます。天気の良い日には対岸に長崎県の雲仙普賢岳の姿を見ることができます。干潮が夕暮れの時刻と重なると、砂干潟が夕日の色に染まり、より美しく、幻想的な光景が広がります。

御輿来海岸の名前は、景行天皇が九州遠征した際、あまりの美しさに御輿を止めたという伝説が由来となっていて、昔から日本でも有数の景勝地として知られている場所です。

熊本県の西部、熊本平野から伸びる宇土半島の北側の海岸には、御輿来海岸も含めて8kmほどの砂干潟ができます。しかし、模様が三日月形の美しい曲線を描くのは御輿来海岸の1～2kmほどだけです。日本の中でも、ここでしか見られない風景なのです。

御輿来海岸のある有明海は、宇土半島と島原半島に囲まれた九州最大の内湾で、水域面積が1700平方kmもあります。水域面積がとても大きいにもかかわらず、ほかの海とつながる湾口の幅がとても狭いので、海水の入れ替わりが少ない閉鎖性の高い海です。

そのため、干潮時と満潮時の潮位の差が日本で最も大きくなります。太平洋に面した東京湾では大潮のときでも干満の潮位差が2mほどなのに対し、御輿来海岸付近の潮位差は4mほどもあるのです。しかも、海岸沿いに広がる海は海底がなだらかな遠浅になっているおかげで、干潮時に海水がゆっくりと引いていきます。そこに風の影響も加わることで、海底の砂に凹凸ができます。

また、砂は泥よりも1つひとつの粒が大きく、水流が一定の大きさ以上にならないとその場に残りやすいものです。波の速度、風の影響、海底の砂の大きさのバランスによって、砂干潟に模様ができると考えられています。

この条件は宇土半島のほかの海岸でも同じはずです。しかし、御輿来海岸以外の場所では、海岸線と平行な模様となるのです。この違いを生む原因は、地形にあります。御輿来海岸の辺りは水面が陸地側に少しだけ入り込んだ入り江になっています。ちょっとした違いのように見えますが、干潮で有明海から出て行く海水がこの地形の影響を受けることで、御輿来海岸の砂干潟の模様は独特の三日月形になるのです。

文：荒船良孝 画像提供：宇土市観光物産協会

■ 御輿来海岸の位置



御輿来海岸で三日月形の砂紋が夕日とともに見られる日は、年に10日ほどしかありません。宇土市観光物産協会のWebページでは、御輿来海岸の干潮の時間帯と日の入り時刻を掲載しており、絶景が見られる日を案内しています。
<https://city-uto.com/archives/1>

Contents

特集：広がる市場と多様な計測・制御技術

巻頭言：シン・オートメーションの時代 1

一般社団法人次世代センサ協議会会長 東京科学大学名誉教授 小林 彬

特集に寄せて 2

アズビル株式会社 執行役常務 azbilグループ研究開発担当 石井 秀昭

特集論文

スマートフォンを用いた現場エンジニアリングの最適化 3

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 天野 和也 岡山 義孝

ビルシステムにおけるネットワーク構成と物理配置を統合した自動可視化技術の開発 7

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 太田 貴彦 西村 将雄
アズビル株式会社 技術開発本部 古賀 宏 福本 喬彦

熱画像カメラでの移動体鮮明化技術の開発 13

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 増田 将宣 西坂 晋

機械学習による製品品質影響因子の特定 AI品質ナビゲーションシステムへの適用 17

アズビル株式会社 AIソリューション推進部 渡邊 拓朗
アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー 平 昌和

パラメータ確率分布を用いたプラントモデル自動更新技術 25

アズビル株式会社 AIソリューション推進部 田原 鉄也 川越 貴啓

マルチセンサに最適化したインターリーブ型 $\Delta\Sigma$ A/D変換回路の開発 33

アズビル株式会社 技術開発本部 手島 紘明 加藤 太一郎 梶田 徹矢

一般論文

大規模言語モデルを基盤とした法務契約文書リスク評価手法 39

アズビル株式会社 デジタルそうぞう部 楓川 滉人
アズビル株式会社 法務・リスク管理本部 立川 雄一

製品紹介

個別エリア対応ユーザーミナル:ネオパネル2(QJ-1301) 47

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 吉川 まり子 下地 裕也

デジタル指示調節計 形 C2A/C2B/C3A/C3B機能拡充と汎用性向上 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 本橋 勇人

サファイア隔膜真空計(形V8)の開発 進化する半導体プロセス装置のニーズに合わせて、デボシフト課題の解決, 小型化, 高温化, 高速化に対応した隔膜真空計 51

アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー 小原 圭輔

電力スマートメーター対応水道用無線端末(型式:ENC UW-H8A0)の開発 55

アズビル金門株式会社 開発本部 田中 裕三

Contents

Special Issue : The expanding market and diverse measurement and control technologies

Preface : An era of Shin-automation 1

Chairman; Japan Society of Next Generation Sensor Technology (JASST)
Institute of Science Tokyo Professor Emeritus Akira Kobayashi

Introduction to the Special Issue 2

Managing Corporate Executive, azbil Group Research and Development, Azbil Corporation Hideaki Ishii

Articles on Special Issue

Optimization of on-site engineering using smartphones 3

Building Systems Company, Azbil Corporation Kazuya Amano Giko Okayama

Development of automated visualization technology that integrates network configuration and physical layout in building systems 7

Building Systems Company, Azbil Corporation Takahiko Ohta Masao Nishimura
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Hiroshi Koga Takahiko Fukumoto

Development of technology for enhancing the clarity of moving objects in thermal imaging cameras . . 13

Advanced Automation Company, Azbil Corporation Masanobu Masuda Susumu Nishisaka

Identification of factors affecting product quality with machine learning: Application to AI quality navigation system 17

AI Solution Department, Azbil Corporation Takuro Watanabe
Advanced Automation Company, Azbil Corporation Masakazu Taira

Plant model automatic update technology using parameter probability distribution 25

AI Solution Department, Azbil Corporation Tetsuya Tabaru Takahiro Kawagoe

Development of an interleaved delta-sigma A/D converter optimized for multi-sensors 33

Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Hiroaki Teshima Taichiro Kato Tetsuya Kajita

Article on Other Subjects

A risk assessment method for legal contract documents based on large language models 39

Digital Design Department, Azbil Corporation Hiroto Kaedegawa
Legal and Risk Management Headquarters, Azbil Corporation Yuichi Tachikawa

Product Introduction

Model QJ-1301 single-area user terminal 47

Building Systems Company, Azbil Corporation Mariko Yoshikawa Yuya Shimoji

Single Loop Controller Model C2A/C2B/C3A/C3B : Enhanced functionality and improved versatility 49

Advanced Automation Company, Azbil Corporation Hayato Motohashi

Development of Sapphire Diaphragm Gauge (Model V8) : A diaphragm vacuum gauge designed to meet the evolving needs of semiconductor process equipment by solving deposition shift problems and providing a compact design along with high-temperature and high-speed capabilities 51

Advanced Automation Company, Azbil Corporation Keisuke Obara

Development of a wireless terminal for water supply compatible with electricity smart meters (model : ENC UW-H8A0) 55

Research and Development Headquarters, Azbil Kimmon Co., Ltd. Yuzo Tanaka

巻頭言

シン・オートメーションの時代

小林 彬
Akira Kobayashi

一般社団法人次世代センサ協議会会長 東京科学大学名誉教授
Chairman; Japan Society of Next Generation Sensor Technology (JASST)
Institute of Science Tokyo Professor Emeritus



センシング技術から見たとき、機器計測化、見える化、情報化が遅れている、あるいはそれらがほとんど実施されてない領域・分野が数限りなく存在している。

SoTを意欲的に適用し、そのような未開拓分野を開拓し、予想できる膨大で潜在的センシングニーズを顕在化させる決断が必要である。それを実現するものはDXであり、SoT, IoT, AIの緊密な連携がその中核をなす。

SoTとは、Sensor of Thingsの略語で、所要の箇所にセンサを積極的に設置し、必要なデータをオンライン的に拾い上げる考え方であり、IoTに併行する新しい主張である。

SoTを導入し、未開拓分野の開拓によって実現される新しい時代は、一言で言えば、シン・オートメーションの時代ともいべき時代である。

かつて、オートメーションが目された時代、製造業(プロセス産業・自動車産業が中心)では、機器計測化、機械化、ロボット化、自動化等が進展し、生産技術開発における生産性向上(生産性向上1.0)が起きた。これに対し、シン・オートメーションの時代では、非製造業分野へ適用領域が拡大され、情報の見える化(視覚化)、見守り化、総合化(知能化)、多次元化(多様化)、安全・安心化(含:自然災害減災、交通安全)を念頭に、判断のための状況認知の支援／結果としての人的作業のリードタイム短縮(生産性向上2.0)が実現すると期待されている。

ここで「シン・オートメーション」の語は、聞くところによるとアズビル株式会社の登録商標とのことである。流石にアズビルの面目躍如という感に至るが、期せずして、企業も学際レベルも同じ方向性を抱えている点が強調されるべきである。その深い意味を社会的に共有して認識し、広く普及させ、膨大な新しい計測制御分野の開拓を目指し、その振興に努力する考え方が重要である。

期待されるシン時代においては、別次元の生産性向上がもたらされ、異なる分野ということ以上に、その分野にとっても新しい「もの・こと」が始められる。さらに、それによって世の中が変わって行くと言うことである。同時に、新しい機能が提供されたり、これまで以上の性能向上が図られたりすることでもある。

一方、新しい機能・性能を持つシステムの実現にあたり、そのことが真に実現されたかを客観的に確認・保証することも重要である。然るべき観点からの客観的評価が必須であり、この役割を公平かつ、公正に担えるものはセンシング技術以外にはない。

このことは結果としてセンシング技術が社会を変革する大きな原動力となり得ることを意味している。また、様々な人的作業のリードタイムを短くすることは「もの・こと」の変化のス

ピードそのものであり、ビジネスにおける競争の原点である。

シン・オートメーションにつきセンシング技術を活用する方法に大きく2つの側面がある。

一つは、既に多くの成熟したセンシング技術が存在するが、それらを計測機器の形でなく、デバイスの的に簡便に利用する方式の整備である。実現が技術的・期間的に容易なセンシングフレームワークを要望するニーズに応え、SoTを円滑に推進する方向である。この点、JASST(次世代センサ協議会)よりSUCS(ザックスと発音する)が提案されている。SUCSでは、センシング系はセンサ、AD変換部、通信部、電源の各ユニットの選択・組合せ・連結により構成され、さらにユニット連結標準化のためのガイドラインが整備され公表されている(SUCS1.0)。

二つ目は、集められた複数(多数)のデータを活用・評価する方法に関するもので、複合センシング系と称される新規開発を推進する方向である。ニーズの根本にある「もの・こと」を実現するための、新インデックスの創出と見える化、およびAI技術利活用によるセンシング系のマスカスタマイズの議論がポイントと考えられる。非製造業分野においても、様々な価値観が存在し、社会生活を円滑に進めるための、種々の判断基準(評価基準)がある。従って、そのような分野の自動化・システム化を進めるとなれば、人間の意思決定に付随する評価基準をアルゴリズム化しなければならずそれに対応するインデックスの創出が課題となる。新たな複合計測方式への最大の期待はここにある。

シン・オートメーションの「シン」には、アズビルが掲げる3つの成長領域で用いられる「新」の意味も勿論入るが、心、伸、真、清、親、振(振興)、深、診、信(信頼)、晋、等様々な意味が込められていると推察する。次世代センサ協議会での想いも同じである。自動化、システム化を進めるうえでの「シン・オートメーション」においてセンシング技術は、これからも進化、深化を遂げるであろう。その時に我々、次世代センサ協議会もその一助を担えれば光栄である。

略歴：

1964年東京科学大学(旧・東京工業大学)理工学部制御工学科卒。1969年同大学院博士課程修了。同年より東京科学大学工学部助手、1975年助教授、1987年教授となり、現在名誉教授。パターン計測用並列処理型インテリジェントセンサ、感覚計測、解領域法による信号処理の研究に従事。2015年より一般社団法人次世代センサ協議会会長に就任。計測自動制御学会学術論文賞受賞(1973年、1980年、1986年、2005年)、東京都科学技術振興功労者賞(1994年)、計測自動制御学会フェロー受賞(1996年)、経済産業省産業技術環境局長(2011年)他。

特集に寄せて

アズビル株式会社
執行役常務
azbilグループ研究開発担当

石井 秀昭

私たちazbilグループは、創業以来120年にわたって、「計測と制御」の技術力を主幹とし、高いオートメーション技術による製品・サービスを提供することで、社会・顧客の課題解決や価値創造に貢献するために存在していると考えています。新たな技術や社会・顧客課題が生まれる中、強みである「計測と制御」の技術力の強化により成長を続ける必要があり、その結果として持続可能な社会へ「直列」に繋がる貢献、企業価値の持続的な向上を図り、2030年に売上高4,000億円規模への成長を目指しています。

1906年の創業時の精神「人間の苦役からの解放」を原点とする「人を中心としたオートメーション」をグループ理念に掲げ、事業領域としては、主に大型建物の空調制御等を行う「ビルディングオートメーション事業」、製造業の生産に必要なシステム・機器等を提供する「アドバンスオートメーション事業」、ガスや水道等のライフラインに関連する「ライフオートメーション事業」と、社会・産業・生活の多分野に及んでいます。

この「ビルディングオートメーション事業」、「アドバンスオートメーション事業」、「ライフオートメーション事業」の領域では、様々な事業環境や技術動向の急激な変化が起きてきています。例えば、地政学的リスクをはじめ、エネルギー価格の高騰、グローバルサプライチェーンにおける部品調達難といった外部環境変化により、事業の見通しが不透明になっています。一方で、クラウドやIoT、生成AI、DXの進化による技術動向の進展や、カーボンニュートラル、サーキュラーエコノミー、ネイチャーポジティブといった新たな社会課題が生まれていくなかで、今後、「計測と制御」の重要性はますます高まると考えています。azbilグループが貢献できる機会を着実に捉え、成長の糧とするため、保有する技術力の強化に一層磨きをかけてまいります。

azbilグループが貢献できる機会としての社会・顧客の課題解決や新たな価値創造のためには、まず計測により問題の可視化をすることが重要です。次に、その計測結果に基づいて課題を認識し要因を特定するか、新たな価値を創造し、それを基に最適な状態へ制御するという総合的なソリューションの提供が必要となります。このソリューション提供は、先進技術を単に製品化するのではなく、“顧客のニーズを取り込んだ課題解決型の製品として開発する”、あるいは“顧客現場における価値創造・発掘、製品試用による新たな需要を創出し続け開発する”という考え方です。これまでの技術開発および商品開発において大事にしてきた基軸となります。

このプロセスはこれまでもこれからも変わらずに「計測と制御」の基盤であると考えています。そのために、azbilグルー

プでは、フィールド機器とシステムソリューションにおける計測・制御技術のさらなる強化に取り組み、フィールド機器で得たセンシング情報を管理・監視現場の制御計画や監視を行うシステムソリューションで集約、処理することで、最適運用可能なシステムの構築を目指してきています。また、この計測・制御技術の強化を支える基盤として重要な要素の一つが、現場でのエンジニアリングとサービスです。この基盤があるからこそazbilグループは長年にわたり、エンジニアリングとサービスの社員が顧客の現場で集めた声や収集・蓄積してきた各種機器の稼働データなどに基づいて開発することができています。その結果、実際の現場での計測情報を用いた分析、制御アルゴリズムの検証などにつなげることができ、商品や技術としての競争優位性につなげていると捉えています。

今後は、昨今急速に進歩するAI技術がさらに進化する中で、計測・制御技術においてもどう使いこなすかが肝となってくると考えています。一方で、どれだけAI技術が進化しても、そのインプットには計測、アウトプットには制御が重要な役割を果たします。AI技術との共創も視野に入れて、「計測と制御」の技術力に、より一層磨きをかけ、ソリューション型の商品・技術を提供し、社会・顧客の課題解決や価値創造に貢献してまいります。

このようなazbilグループにおける「計測と制御」の技術力を主幹とした事業成長、昨今の環境変化、商品開発・技術開発の基盤となる考え方やそれを支える現場情報の大切さを捉えていただき、今回のTechnical Reviewでの“拡大する市場に向けたアズビルの多様な計測・制御技術、建物や工場・プラントにおける情報処理技術”に関する論文をご覧くださいと思います。

“これまで”の計測・制御技術を新たな視点で着眼し直し、“これから”の計測・制御技術へと発展した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「商品力強化」施策となり、持続可能な社会へ「直列」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、それぞれの計測・制御技術の特徴そしてazbilグループ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。

スマートフォンを用いた現場エンジニアリングの最適化

Optimization of on-site engineering using smartphones

天野 和也
Kazuya Amano

岡山 義孝
Giko Okayama

キーワード
スマートフォン, エンジニアリングツール, savic-net G5

弊社のビルディングオートメーションシステムのフラッグシップであるsavic-net™ G5は様々な制御コントローラで構成され、各コントローラにはアドレス設定やパラメータ設定、試運転等の現場エンジニアリングが必要である。この現場エンジニアリングでは作業の効率化と機動性を重視したハンディタイプのエンジニアリングツールが求められている。今回、スマートフォンを活用した現場エンジニアリングツールを開発し、現場エンジニアリングの最適化を実現したので報告する。

Our flagship building automation system, savic-net™ G5, is composed of various controllers, each requiring on-site engineering such as address setting, parameter configuration, and trial operations. For these tasks, there is a demand for a handheld engineering tool that emphasizes efficiency and mobility. In response, we have developed a specialized tool that uses smartphones for on-site engineering, optimizing the process. This report presents the development and functionality of this innovative solution.

1. はじめに

弊社のビルディングオートメーションシステム（以下、BAS）のフラッグシップであるsavic-net G5は、様々な制御コントローラで構成される。図1のように、savic-net G5システムの制御コントローラは、統合コントローラを代表とするスーパーバイザリデバイス、アドバンスドコントローラやジェネラルコントローラといったプライマリデバイス、そして、VAVコントローラやFCUコントローラに代表されるセカンダリデバイスで構成される。

savic-net G5に接続されるプライマリデバイスやセカンダリデバイスの台数は、建物の用途や客先の要求により異なるが、大型の建物や高度な自動制御が求められる場合、プライマリデバイスは1000台規模になることがあり、さらにプライマリデバイス1台にセカンダリデバイスは最大50台接続される。

これらのプライマリデバイスやセカンダリデバイスにはアドレス設定、パラメータ設定、試運転等の作業が必要であり、主に客先の施工現場で実施される。これらの作業は現場エンジニアリングと呼ばれ、現場エンジニアが実施している。

現場エンジニアリングは、図2のように作業内容に応じて、大きく4つの作業に分けて進められる。

「機器単体動作試験」は、プライマリデバイスとセカンダリデバイスのアドレス設定、パラメータ設定を実施し、デバイス単体での動作試験を行う作業である。「制御項目動作試験」は、プライマリデバイスやセカンダリデバイスの試運転を実

施し、制御項目に対して動作試験を行う作業である。「中央監視動作試験」は中央監視装置に関連する統合コントローラや監視用PC等の立上げと設定を行い、プライマリデバイス、セカンダリデバイスとの接続試験を実施する作業である。「総合試運転動作試験」は建物全体で試運転による動作試験を行う作業である。

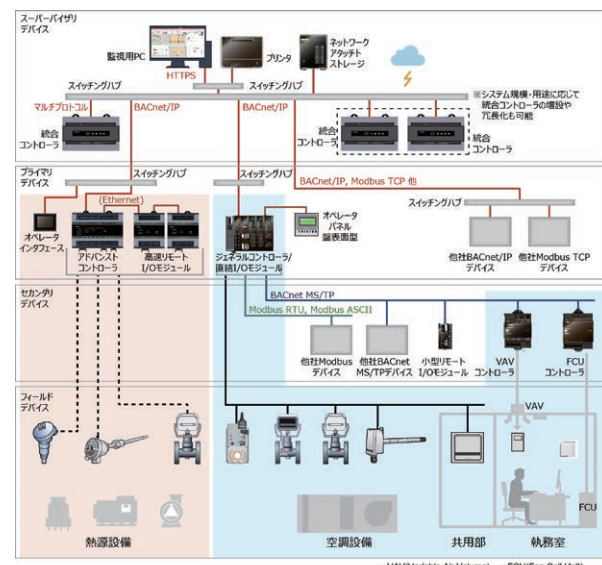


図1 savic-net G5システム構成

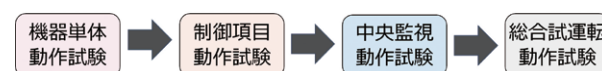


図2 現場エンジニアリングのフロー

2. 現場エンジニアリングの課題

現場エンジニアリングにおいては、現場エンジニアの労働力不足が重要な課題である。建物用途や客先要求が複雑化・高度化する中で、BASの規模やシステム構成が多様化しており、それに伴い現場エンジニアリング作業量が増加している。一方、短工期化が進む施工現場では現場エンジニアリング可能な時間は減少している。このため現場エンジニアリングには、作業の効率化が強く求められている。現在、savic-net G5の現場エンジニアリングには、PCで動作するエンジニアリングツール（PC Engineering Tool for savic-net G5）⁽¹⁾を使用している。しかし、現場エンジニアリングにおける「機器単体動作試験」や「制御項目動作試験」はプライマリデバイスやセカンダリデバイスが設置されている建物内の様々な場所で実施される。このことから、PCより機動性が高く各所で操作可能なハンディタイプの現場エンジニアリングのツールが求められている。

この課題を解決し現場エンジニアの要求を実現するために、スマートフォンを用いて現場エンジニアリングを可能とするツール（以下、本ツール）の開発を行った。

本ツールに対して、現場エンジニアリングを効率化する機能を技術開発することで、作業時間を削減し最適化を実現した。

本稿では、本ツールの概要と現場エンジニアリング時間の削減に寄与するいくつかの機能について説明する。

3. スマートフォンを用いたエンジニアリング

本ツールは、市販のスマートフォン上で動作するアプリケーションである（図3）。

本ツールの接続は、図4のように現場エンジニアリング時に無線LANルータを設置し、無線LANルータを経由してプライマリデバイスとセカンダリデバイスにアクセスする。本ツールは、プライマリデバイスやセカンダリデバイスに対して、「機器単体動作試験」や「制御項目動作試験」向けのパラメータ設定や動作試験のための入出力操作を実施可能にした。



図3 スマートフォンで動作する現場エンジニアリングツール

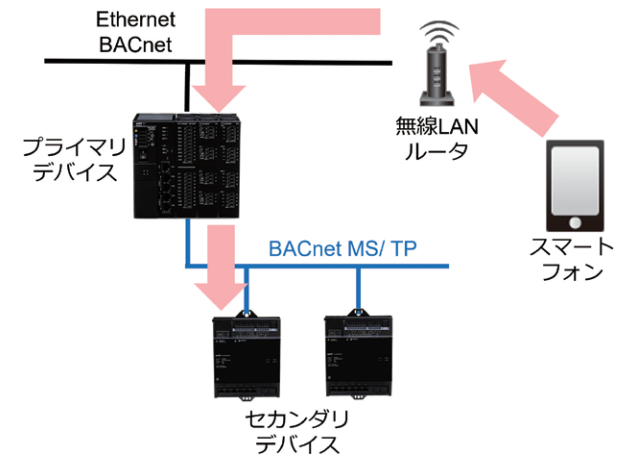


図4 接続構成

4. 現場エンジニアリングの最適化

現場エンジニアリングの時間削減に向けて、開発者と現場エンジニアで連携し、技術開発を行った。図5のように本ツールの試作品を現場エンジニアに提供し、その中で現場エンジニアリング時の課題を抽出し、課題解決するための機能を開発した。1〜2ヵ月の周期で繰り返し実施した。

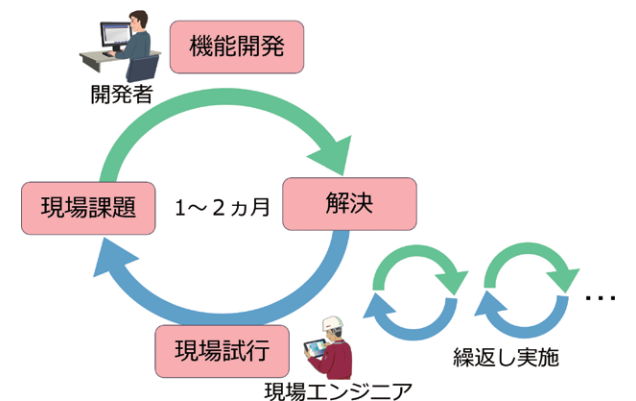


図5 現場課題の解決手法

4.1 エンジニアリング作業の診断

現場エンジニアリングの「制御項目動作試験」では、プライマリデバイスに対して一時的に設定値を変更する。動作試験後に変更した設定値を元に戻し、全体の作業完了時にそれを確認する必要がある。もし、現場エンジニアが元に戻し忘れた場合、クレームに発展する。

そこで、全体の作業完了時に確認すべき項目（診断項目）をまとめ、本ツールが自動で診断するようにした（図6）。

診断項目には、制御項目動作を試験する際のデバックモードの状態や入出力の強制操作状態、通信異常の発生有無等がある。

この診断機能を現場試行で確認したところ、プライマリデバイスの1台当たりの確認作業が18分から4.5分になり、13.5分削減することが確認できた。さらに設定ミスの防止によりエンジニアリング品質も担保できる。

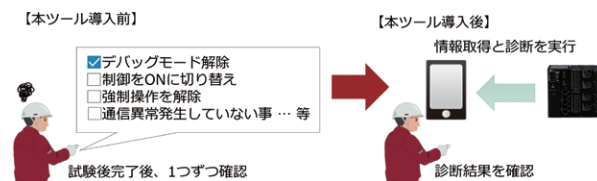


図6 エンジニアリング作業の診断

4.2 二次元バーコードによるパラメータID共有

1台のデバイスには、数千以上の膨大な設定項目があり、現場や作業ごとに設定や確認すべき項目も異なり、現場エンジニアが設定項目を検索するのに時間がかかっていた。また、設定項目を他の現場エンジニアと共有する手段がなく、同一現場内のそれぞれのエンジニアが設定項目を検索する必要がある。

そこで、現場エンジニアが作業ごとに必要な設定項目を事前に検索し、設定項目のID（パラメータID）を本ツールに登録できるようにした。さらに登録したパラメータIDの情報を他の現場エンジニアと共有することを可能にした。共有方法は、登録したパラメータIDを二次元バーコード化し、他の現場エンジニアが使用する本ツールのスマートフォンに搭載されるカメラで、二次元バーコードを読み取る方式である。設定項目をPCやサーバ等を介さずに他の現場エンジニアと容易に共有することを可能にし、複数の現場エンジニアが同時に並列作業をできるようにした（図7）。

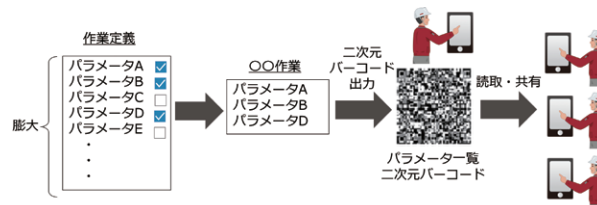


図7 二次元バーコードによるパラメータID共有

4.3 複数デバイスへの設定と操作展開

セカンダリデバイスは計装方法がパターン化しており、使用されるパラメータも同一である。しかし現場エンジニアリングにおいては、各セカンダリデバイスに対して個別にパラメータ設定と動作試験を実施しており、同様の作業を繰り返し実施していた。

そこで、1台のセカンダリデバイスに対して実施した設定や操作した情報を他の複数のセカンダリデバイスへ同時に展開できるようにした。これにより、複数のセカンダリデバイスに対して、個別に設定や操作を行う必要がないようにした。

この機能を現場試行で確認したところ、セカンダリデバイス1台当たりの設定・操作時間が、10分から7分に短縮した。

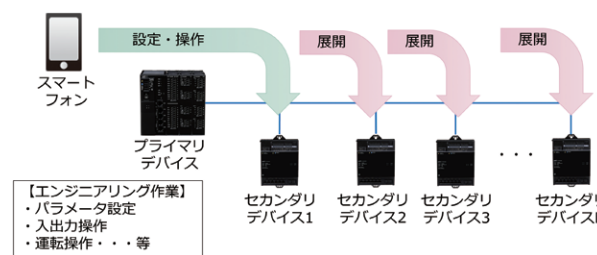


図8 複数デバイスへの設定と操作展開

4.4 現場エンジニア間のコミュニケーション

現場エンジニアは複数のメンバでコミュニケーションをとりながら現場エンジニアリングを進める。一般に現場エンジニア間のコミュニケーションは、携帯電話やトランシーバが使用される。しかし、施工現場では携帯電話が圏外であることが多い。また、トランシーバは相手との距離が遠くなると通信できない。遠距離でも通信を可能にするためには、高出力なトランシーバを用いる必要があるが、一定上の出力を伴うトランシーバを使用する際には免許が必要である。

そこで、savic-net G5のネットワークを活用して、本ツール同士でチャットによるコミュニケーションを可能にした（図9）。スマートフォン間をPeer To Peer (P2P)で通信することで、ネットワーク上にチャット用サーバの設置を不要にした。チャットにはテキストベースの文字による送受信だけでなく、写真や音声ファイル等のファイルの送受信を可能とすることで現場エンジニア間のコミュニケーションをより高度に実施できるようにした。

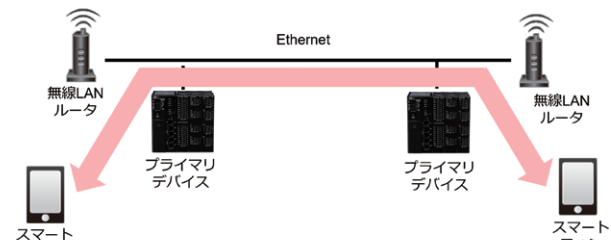


図9 現場エンジニア間のコミュニケーション

5. 効果検証

本ツールを導入した場合に、どの程度現場エンジニアリング時間を短縮できるか検証した。はじめに現場試行を通じて、現場エンジニアリングの各作業時間を導入前と導入後で計測した。次に計測結果からプライマリデバイスとセカンダリデバイス1台当たりの削減時間を計測した。最後にこの削減時間がBAS全体の現場エンジニアリング時間に対して、どの程度の影響があるのか算出した。算出には、プライマリデバイスが60台、セカンダリデバイスが170台のBASを用いた。

検証結果、図10のように現場エンジニアリング時間は1980.8時間から1781.7時間になり、199.1時間削減できた。本ツールを用いて現場エンジニアリングが行われる「機器単体動作試験」や「制御項目動作試験」に着目すると、削減割合は20.6%であった。



図10 現場エンジニアリング時間

6. おわりに

現場エンジニアの労働力不足に対する課題を解決するために、スマートフォンを用いた現場エンジニアリングツールを開発した。開発者と現場エンジニアが連携し、現場エンジニアリングツールの現場試行を行うことで現場作業での課題を抽出し、課題を解決するための機能開発を進めた結果、現場エンジニアリング作業時間を削減することを可能にした。本ツールを活用することで、作業時間だけでなくエンジニアリング品質を確保できることから、現場エンジニアの働き方改革を推進しWell-beingの実現につながると考えている。今後は、クラウドシステムと連携しデジタルツイン技術やAI技術等を取り入れ、現場エンジニアリングのさらなる最適化を目指したい。

<参考文献>

- (1) 小柳貴義, 勝見智行 他:ビルディングオートメーションシステムのエンジニアリング作業効率化に貢献する新しいエンジニアリングツール, azbil Technical Review, 2017年, Vol.58, pp.51-56, アズビル株式会社

<商標>

savic-netはアズビル株式会社の商標です。
BACnetはASHRAEの商標です。
ETHERNETは、富士フイルムビジネス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。
Modbus is a trademark and the property of Schneider Electric SE, its subsidiaries and affiliated companies.

<著者所属>

天野 和也 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部
開発企画部
岡山 義孝 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部
開発企画部

ビルシステムにおけるネットワーク構成と物理配置を統合した自動可視化技術の開発

Development of automated visualization technology that integrates network configuration and physical layout in building systems

太田 貴彦
Takahiko Ohta

古賀 宏
Hiroshi Koga

福本 喬彦
Takahiko Fukumoto

西村 将雄
Masao Nishimura

キーワード
ネットワーク可視化, セキュリティ, ビルシステム管理

ネットワーク探索技術をもとに把握したネットワーク構成情報と、スイッチングハブ（以下、スイッチ）から取得する物理的な配置情報を統合し、ITに不慣れなユーザが直感的にシステム全体を把握できる可視化技術を開発した。その技術をもとに、接続機器の断線、未許可機器の接続、通信量異常など様々な異常をリアルタイムで監視し、アラートをネットワーク構成ならびに物理配置を表したビュー上で表現できる自動監視システムを構築した。

また、このシステムに搭載した、スイッチのポート管理によるサイバーセキュリティ対応機能、ならびに新しい機器を追加する際の通信量の増加量、経路、機器への影響を事前に把握できるようにすることで、ネットワーク最適化に寄与する通信シミュレーションの実施例も紹介する。

Based on network discovery technology, we have developed a visualization technology that integrates network configuration information and physical layout information obtained from switching hubs, allowing users who are not familiar with IT to intuitively understand the entire system. Building on this technology, we have created an automated monitoring system that can monitor various anomalies in real time, such as disconnections of connected devices, unauthorized device connections, and abnormal communication volumes. Alerts are displayed on a view that represents both the network configuration and the physical layout. Additionally, we will introduce an implementation example of a communication simulation that contributes to network optimization. This is achieved by incorporating cybersecurity response functions through switch port management in the system. The simulation also allows for the prior understanding of the increase in communication volume, routes, and the impact on devices when adding new equipment.

1. 背景

近年、IoTやクラウドサービスの普及に伴い、ネットワークに接続する機器が増え、ネットワークの大規模化が進んでいる。また、ネットワーク機器のマルチベンダ化により、ビルシステムのネットワークが複雑化している。加えて、経済産業省からビルシステムにおけるサイバー・フィジカル・セキュリティ対策ガイドライン等が出されているように、ビルシステムのセキュリティ対策が重要になっている。

一方、日本は少子高齢化が進み、企業は人手不足である。そうした中、ビル内でネットワークを利用している多くの組織や企業では、大規模化、複雑化するネットワークの構築や運用、保守に、より多くの手作業が必要なのが課題となっている。例えば、ネットワークの新規構築では、ネットワークが設計図どおりに構築されているか、接続機器が物理的に

どこに配置されているかを目視や手作業で確認する必要がある。増改築時は、ネットワークの構成・物理的配置を変更した際に設計図の更新が必要となる。障害が発生した際には、原因特定のため設計図を参照し、目視や手作業による確認作業が必要となる。しかし、設計図が更新されていない場合は、さらに確認作業の時間を要する。

2. ネットワークシステム監視における課題

従来のネットワークシステム監視においては、IPv4ネットワークの場合、ネットワークアドレスの範囲内のすべてのアドレスに対してアクセスを試みる手法によりシステム内のネットワークに接続している機器を列挙して、監視するための機器の登録作業を軽減させていた。しかし、実際に構築したネットワーク全体を把握して監視するためには機器の列挙だけ

では不十分であり、スイッチの階層構造を含めて把握する必要がある。そこで3章で述べるネットワーク構成把握技術を用いることで、図1のようにツリー表現によりネットワーク全体を容易に把握可能としたが、ビルシステムの監視においては、以下に述べる理由から機器の物理的な配置情報が必要のため、十分とは言えない。

ネットワーク構成

全体構成

▼ 172.16.1.111

▼ [1]HUB0001

▼ 172.16.1.105

[1]172.16.1.100

▼ [1]172.16.1.100

[8]172.16.1.51

▼ 172.16.1.150

[1]172.16.10.21

▼ [4]172.16.20.150

図1 ネットワーク構成のツリー表現

例えばサイバーセキュリティの観点では、不正アクセスが検知された場合、その機器の物理的な場所（建物の何階のどの自立盤から不正アクセスされたか）を把握し、早急に現場を確認・調査する必要がある。ネットワークの障害復旧においては、どのスイッチの何番ポートに不具合が発生しているかを把握し、そのスイッチが設置されている場所を特定して交換することが求められる。このように、早期の原因究明と復旧のためには、ネットワーク構成情報以外にもビルのどこで問題が起きているかという物理的な場所を早期に特定することが非常に重要となる。

しかし、現状のビルシステム管理においては、機器の配置は手動作成された2D/3Dの図面により表現されており、この作成および更新には大きな労力がかかっている。そのため、労力をかけずに機器の物理的配置を表示する仕組みが求められている。

また、経済産業省から出されているビルシステムにおけるサイバー・フィジカル・セキュリティ対策ガイドラインによれば、不正機器の接続を防ぐためには、スイッチの空きポートを管理することが重要である。空きポートを物理的に塞ぐセキュリティポートロックが市販されているが、スイッチが大量にある場合はその設置に労力がかかるうえ、その鍵には単純な共通鍵が用いられているため、比較的容易に鍵を入手可能であるというセキュリティ面の問題がある。したがって、複数の空きポートを一括で使用できなくする簡易な手段とともに、外部の者が容易にポートの制限を解除できない仕組みが求められている。

3. ネットワーク構成把握

ネットワーク構成と物理配置を統合した可視化技術を説明する前に、最初にネットワーク構成の把握技術について説明する。

ネットワーク構成の把握技術では、ネットワーク上に接続されている全ての機器の把握に加えて、SNMP^{注1}対応スイッチと連携することで、スイッチの多段構成の把握も可能である。

これにより、通信量の可視化、異常個所の特定、ポート無効化、通信量変化のシミュレーションなどが可能となる。

ネットワーク構成を把握する基本的な仕組みを以下に述べる。ネットワーク上の全スイッチからMACアドレステーブル情報を収集して解析を行う。MACアドレステーブル情報からネットワークの末端となるスイッチを判定し、その上位に接続しているスイッチの探索を繰り返すことにより、ネットワーク構成を把握する。

詳細は以下の通りである。はじめに、ネットワークの末端にあるスイッチを探索する。各スイッチのMACアドレステーブルを参照し、図2の赤枠のような任意の1つのポートに自身以外の全スイッチのMACアドレスが登録されているものを、ネットワーク末端のスイッチと判定する。図2ではMACアドレステーブルのうち、スイッチに関する情報のみを抽出している。

次に、この末端のスイッチと直接接続している上位のスイッチを探索する。各スイッチのMACアドレステーブルを参照し、任意の1つのポートに末端のスイッチのMACアドレスのみが登録されているスイッチを、末端のスイッチに直接接続しているスイッチと判定する。接続が確定したスイッチの情報を、各スイッチのMACアドレステーブル情報から削除し、前述の上位スイッチの探索を繰り返すことで、ネットワーク構成を把握できる。

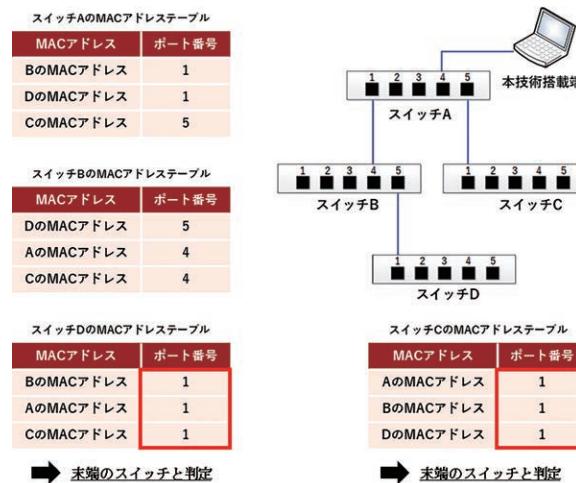


図2 末端のスイッチの判定

注1 SNMP (Simple Network Management Protocol) : ネットワークに接続された通信機器に対し、ネットワーク経由で監視、制御するためのプロトコル

4. ネットワーク構成情報と物理配置情報を統合した自動可視化技術

ネットワーク機器の物理配置情報があらかじめフロアマップ等の形で用意されている場合は、その情報を本システム内で利用できるが、ここではそのような情報が無い場合に、物理配置を自動描画する技術を紹介する。

ネットワークを構成するスイッチがSNMP対応であれば、あらかじめスイッチの設置階、位置、自立盤番号などのロケーションに関わる情報を書き込める。本システムの物理配置自動描画機能では、把握したネットワーク構成および複数のスイッチが持つロケーション情報を利用して、建物の何階のフロアのどの位置に存在する自立盤に設置されたスイッチであるかが分かるので、そこから建物の簡易的な外形および各階のフロア形状を推定する。さらにその上にスイッチを内蔵する自立盤を配置した物理配置図を生成する。

前章で説明したネットワーク構成把握技術により、スイッチの階層構造および、各スイッチに接続されている機器の有無を把握できるので、この建物図に重ねて、各機器の所在場所に応じて発見された機器のアイコンを配置する。

これらのアイコンを接続関係のあるもの同士「線」で結ぶことで、ネットワーク構成と物理配置とが融合した描画が実現する。

前述の物理配置図は、建物全体、フロア、スイッチといった表示範囲で作成することが可能であり、管理業務の目的に応じた粒度で表示レベルを切り替えられる(図3～5)。図中のグレーの四角形はスイッチが設置された自立盤を示している。

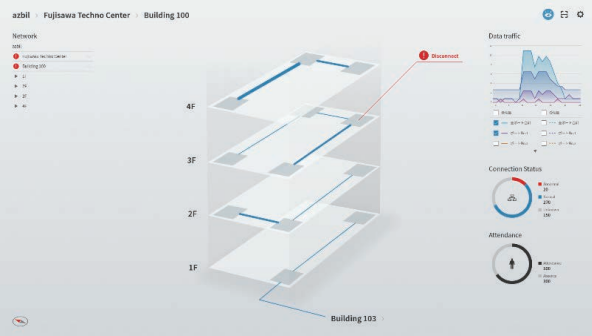


図3 建物全体図

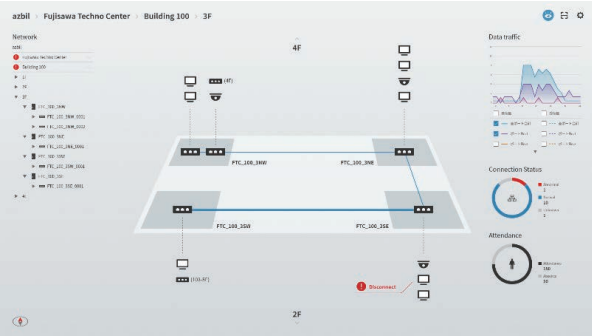


図4 フロア図

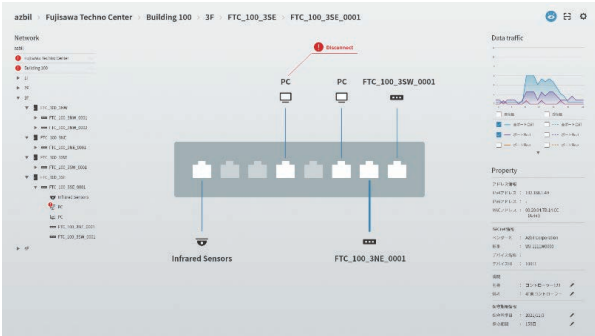


図5 スイッチ単体図

SNMPによる自動描画機能の利点は、スイッチを入れ替えたり新規に追加したりする場合に(各スイッチに正しくロケーション情報を登録することが前提ではあるが)、ネットワークスキャンし直すだけで、ネットワーク構成と物理配置情報が現実と一致した状態に即時にアップデートする点である。

5. 適用事例

以上に紹介した技術を利用したネットワーク監視システムの事例を紹介する。以下に示すようなデータ表現手法や機能を備えることで、本システムはリアルタイムでのネットワーク監視や情報システムのメンテナンスがしやすくなるとともにメンテナンス工数の削減、セキュリティ性の向上、トラブル時の早急な対応ができるようになる。

5.1 通信量の可視化表現

近年の防犯への要望の高まりから、ネットワークへの防犯カメラなどのデータ通信量が多い機器の接続が増加している。ネットワーク設計が最適化されていない場合は、通信の集中による通信障害が発生するリスクがある。

本システムでは、接続経路ごとの通信量の違いを、管理画面上に表現する機器同士をつなぐ「線」の太さにより表示できる。例えば、通信量が他の接続経路よりも多い経路については、太い線分により表示する(図6)。

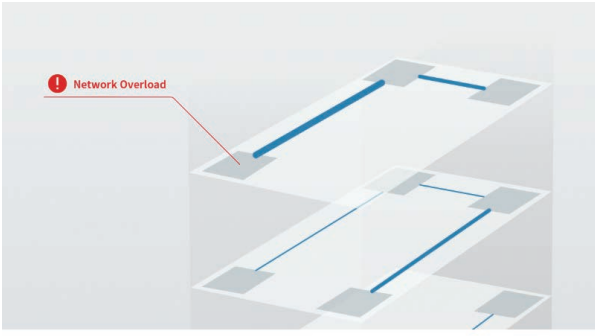


図6 線の太さでの通信量表現

あらかじめ設定した上限値を超えた場合には、アラート表示で知らせることもできる。これにより通信の混雑状況がひと目で分かるので、通信障害の未然回避に役立つ。

また、詳細情報として通信量のグラフを別の場所に表示することも可能なため、通信量の変化度合いを把握することも容易となる(図7)。

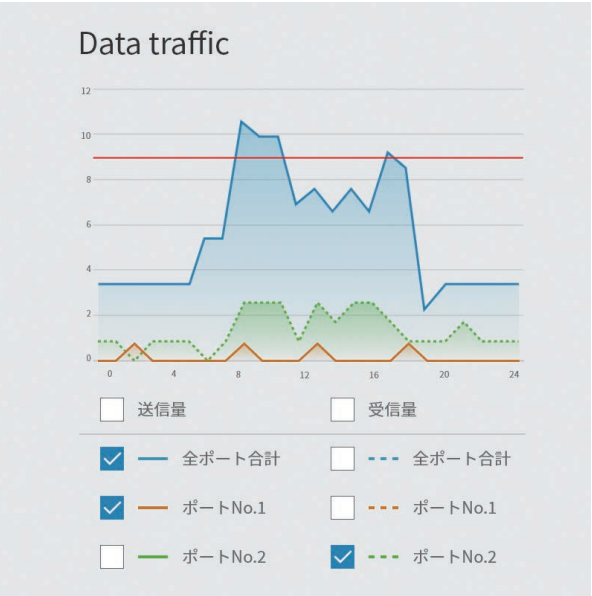


図7 通信量グラフ

5.2 異常箇所のハイライト表示

システムの通信状態を常に監視しているため、機器の通信が途絶えた場合や、事前に登録済みの機器以外のものがネットワークに接続された場合などは、システムに何らかの異常が発生したと判断し、管理画面上に異常表示を出す(図8)。これによりトラブルがあったことを早期発見でき、さらに物理配置情報を備えていることにより、現場に素早く駆け付けられるため、早期復旧につながる。

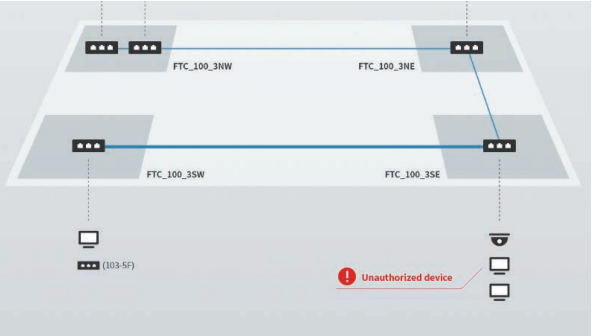


図8 異常箇所のハイライト表示

5.3 ポート無効化

近年、経済産業省が策定したビルシステムにおけるサイバー・フィジカル・セキュリティ対策ガイドラインの発行やハッキングニュースなどによって、ビルシステムにおけるサイバーセキュリティの要求が高まっている。

サイバー・フィジカル・セキュリティ対策ガイドラインには、スイッチのポートの管理が有効との内容が記載されている。具体的には、スイッチの空きポートにLANケーブルをつないでハッキングされることを防ぐために、空きポートを無効にすることで、悪意ある人が勝手に接続することを防止する方法である。

大規模ビルで空きポートを一つひとつ無効化しようとする膨大な工数がかかる。前述のネットワーク構成把握技術によりすべてのスイッチの未使用ポートを把握できるため、未使用ポートをまとめて一気に無効化できれば大幅な工数削減となる。

本システムでは、建物全体、フロアごと、スイッチごと、スイッチのポートごとといった複数の情報単位のビューを備え、それを用いて、未使用ポートの設定状況の確認および設定変更が容易にでき(図9, 10)、また、本ツール以外の方法で、無効化された空きポートの制限を解除することが容易でないため、必要なセキュリティ対策を確実にかつ効率的に実施できる。

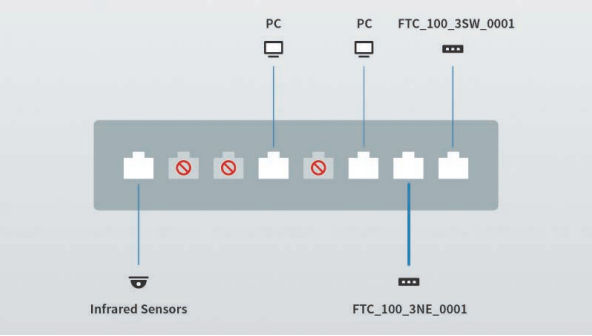


図9 ポートごとの無効化

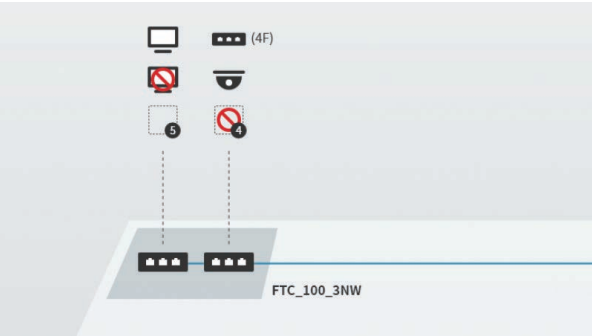


図10 機器ごとの無効化状態の表示

5.4 シミュレーション

既設のネットワークに、新しい機器を追加する場合、通信量増加によって、システム全体のパフォーマンスが低下し、他の機器の通信の不調をきたす可能性がある。それを防ぐために、ネットワークのどこにどのような通信量変化が生じるかをあらかじめ把握する必要がある。

通信量変化のシミュレーションのために、本システムで生成されたネットワーク構成図を元に、ユーザはどのような機器をネットワークのどこに接続するのか(図11)、どの程度の通信量なのか(図12)、通信相手がどの機器かを設定する。

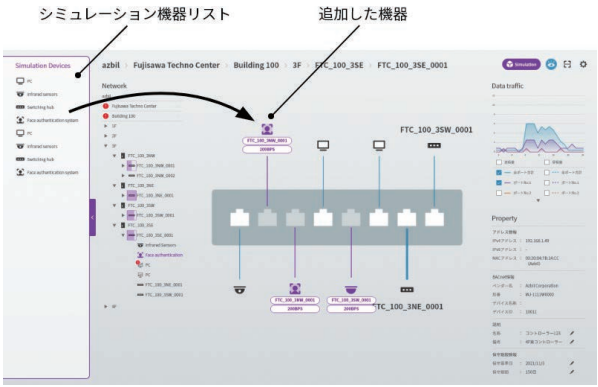


図11 追加する機器の設定



図12 追加デバイスごとの通信量設定

追加する機器を設定すると、ネットワーク構成把握技術によって、それにより影響を受けるネットワーク経路が特定できる。その経路に沿って追加する機器の通信量の増加分を自動算出し、算出された結果を構成図上にグラフィカルに表示する。またネットワーク構成上どの部分の通信量が問題になるかを一覧で表示することもできるため、追加機器の影響がどこにどの程度及ぶかがひと目で分かる(図13, 14)。

これにより、追加機器におけるネットワークトラブルを未然に防ぐことが可能になる。

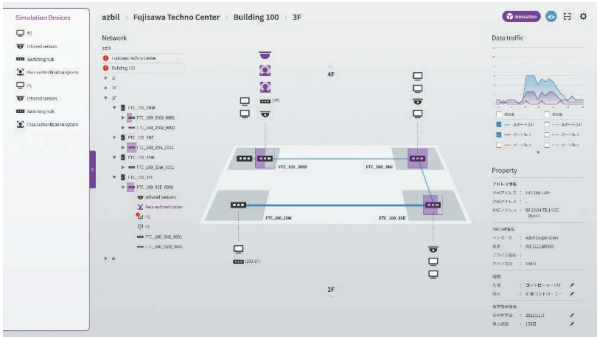


図13 通信量シミュレーション結果表示

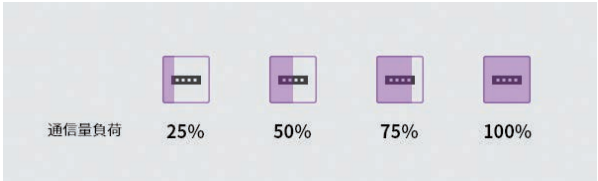


図14 追加機器の影響による通信量負荷の表現

6. おわりに

ネットワーク構成と物理配置を統合した自動可視化技術により、ITに不慣れなユーザでもビル内のネットワークシステム全体を直感的に把握できるようにした。この技術に基づいた適用事例として、リアルタイムでの異常監視やアラート表示、サイバーセキュリティ対策としてのスイッチのポート管理機能、通信シミュレーション技術等を紹介した。

これらの技術は、ネットワークの複雑化が進む現代において、管理者の負担を軽減し、システムの健全な運用を支える重要な役割を果たすことが期待できる。今後もさらなる発展と応用に向けて、開発を続ける。

<参考文献>

- (1) 太田貴彦, 神宮武志, ネットワーク構成把握技術の開発 azbil Technical Review, 2021年, Vol.62, pp.48-52, アズビル株式会社

<著者所属>

- | | |
|-------|---------------------------------|
| 太田 貴彦 | 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 |
| 古賀 宏 | アズビル株式会社
技術開発本部協働開発部 |
| 福本 喬彦 | アズビル株式会社
技術開発本部協働開発部 |
| 西村 将雄 | 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 |

熱画像カメラでの移動体鮮明化技術の開発

Development of technology for enhancing the clarity of moving objects in thermal imaging cameras

増田 将宣
Masanobu Masuda

西坂 晋
Susumu Nishisaka

キーワード
サーモグラフィ, 赤外線カメラ, 移動体撮影, 像流れ

移動体撮影時の像流れを抑制し、より鮮明な移動体の熱画像を取得することを可能となる赤外線サーモグラフィシステム形K2Tを開発した。K2Tは赤外線カメラ(形K2TS)と画像処理コントローラ(形K2TC)で構成される。これにより今まで対応できなかった製造ラインにおける熱画像を使ったインライン検査を適切に行えるようになり、検査品質の向上および生産性の向上に貢献できる。

We have developed the infrared thermography system model K2T, which suppresses image blur during the capture of moving objects, enabling the acquisition of clearer thermal images of such objects. The K2T system consists of an infrared camera (model K2TS) and an image processing controller (model K2TC). This system allows for effective inline inspections using thermal images on manufacturing lines where it was previously not feasible, thereby contributing to improved inspection quality and productivity.

1. はじめに

近年、赤外線カメラの性能向上と低価格化により様々な分野で熱画像の利用が進んでいる。COVID-19の影響から実際に街中で熱画像を目にする機会も増えている。産業分野においても適用範囲の広がりは見られ、従来の放射温度計が使われていた検査を赤外線カメラで置き換える試みや可視カメラでは検査が難しいアプリに対して熱画像を用いる事例も増えてきている。

今回開発した赤外線サーモグラフィシステム形K2Tは、赤外線カメラ形K2TSと画像処理コントローラ形K2TCによって構成され、赤外線カメラ形K2TSで取得した熱画像を画像処理コントローラ形K2TCで処理し、物体の表面温度から良否判定を行うものである。

赤外線カメラに使われる赤外線検出器は、一般に「量子型」と「熱型」の2種類に大別される。「量子型」の赤外線検出器は応答性や感度特性といった性能面に優れているが、冷却構造を必要とし運用性および価格の面で広く利用されるものではなかった。一方、「熱型」の赤外線検出器は、冷却構造を必要とせず量子型に比べて安価であるが、応答性・感度特性に劣るため、赤外線エネルギーの短時間の変化に追従することができない。

形K2TSで採用する赤外線検出器は、遠赤外線領域(波長領域8-14 μ m)に感度を有するマイクロボロメータ方式であ

り、「熱型」に分類され、前述の通り比較的安価であるが応答性・感度特性の面で性能に劣る。そのため、高速で移動する物体の撮影時には本稿3で説明する「像流れ」という課題から、物体形状や温度を取得することが難しかった。

今回、この課題および課題を解決する熱画像鮮明化技術とその効果について報告する。



図1 形K2T カメラとコントローラ

2. 赤外線カメラの動作原理

本稿1で述べた通り赤外線カメラ形K2TSはマイクロボロメータ方式の赤外線検出器を採用している。マイクロボロメータは半導体製造プロセスを利用して機械構造と電子回路を1つの基材の上に形成するMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術によりシリコン基板上に感熱素子を2次元格子状に形成して作られる。マイクロボロメータの感熱素子構造を図2に示す。

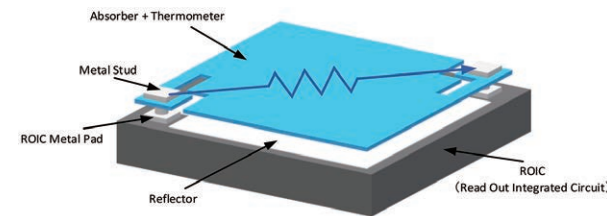


図2 マイクロボロメータの感熱素子構造

マイクロボロメータの感熱素子は、対象物からの赤外線のエネルギーに応じて薄膜の温度が変化し、あわせて薄膜の抵抗値が変化する。このとき、図2の電極間に定電圧を印可し、抵抗値の変化を電流変化として読み出す。この電流の変化を用いて赤外線のエネルギーを電氣的に読み出し可能とする。

2次元格子上に配列された各感熱素子の抵抗変化の程度は個々にバラつきが大きく、読み出した電流の変化をそのまま画像としても、感熱素子の特性のバラつきが支配的となり、対象物の形状を判別することが困難となる。そのため、既知温度を有する平面黒体炉を用いた補正を行い特性の均一化を行う。これにより、対象物の赤外線のエネルギーを温度換算可能なデータ(熱画像)として出力する。

3. 移動体測定における課題

図3は静止した高温物体を撮影した熱画像である。この高温物体が左から右へ通り過ぎる過程を、一般的なマイクロボロメータを用いた赤外線カメラで撮影すると、図4のような像流れ(画像のぶれ)が発生する。

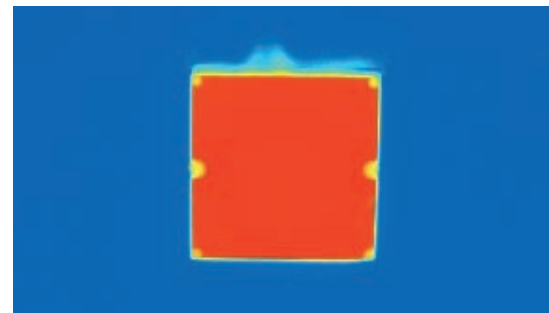


図3 静止状態での画像

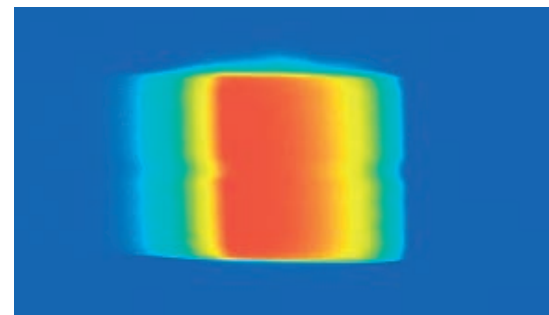


図4 像流れの発生した画像

像流れが発生すると、物体の形状が正しく判別できないだけでなく、検出される温度についても正しく測定できな

い。そのため、例えば段ボールなどの封かんに用いるホットメルト接着剤の塗布検査を考えた場合、ホットメルト接着剤の付着の有無の判別はできても、塗布量(面積)や塗布形状、塗布後の温度の測定は難しく、効果的な塗布状態の検査ができない。

ここで、像流れについて解説する。赤外線カメラに限らず可視カメラにおいても移動体の撮影ではブレ(ブラー)が生じる場合がある。これを低減するために外部のエネルギーを取り込む時間を短くすることが一般的である。これは、可視カメラにおいては露光時間を短くすることであり、赤外線カメラでは積分時間を短くすることになる。

しかしながら一般的な赤外線カメラは自由に積分時間を選択できず、連続的に撮影する画像と次の画像の間の期間が積分時間となるものが多い。

なお、この連続的に撮影した画像を一連の映像と見なし、ある撮影タイミングで取得した画像およびそのタイミング自体を「フレーム」、その次の撮影タイミングで取得した画像およびそのタイミング自体を「次のフレーム」と呼称する。また、1秒間あたりに撮影する画像数をフレームレートと呼称し、フレーム/秒として記載する。

議論を積分時間に戻す。一般的な赤外線カメラではあるフレームと次のフレームの間隔が積分時間となる。そのため、積分時間を短くすること、つまり高いフレームレートで撮影することで、像流れを低減可能なことは自明である。

ここで「量子型」の赤外線検出器を有した赤外線カメラは、積分時間約1 μ secという優れた応答性を有する。そのため最大フレームレートは、赤外線検出器の性能ではなく、読み出し回路の性能で決まるといってよい。

一方、「熱型」の赤外線検出器であるマイクロボロメータの感熱素子は、熱時定数(τ)が十数ミリ秒程度である。そのため、移動する対象物を高いフレームレートで撮影したとしても、感熱素子自体の応答が追いついておらず、その過渡状態を取り込む形となり、対象物の温度を正しくできない。

この課題にあたり、今回開発した赤外線カメラ形K2TSは、次に述べる鮮明化処理を実装することで、「熱型」の赤外線検出器であるマイクロボロメータを用いた赤外線カメラであっても像流れを抑えた鮮明な熱画像を撮影できる。

4. 画像鮮明化処理

画像鮮明化を目的とするマイクロボロメータの感熱素子の応答遅れに対する改善手法について述べる。感熱素子の応答性は、時間による検出温度の変化を表す式として、一般的に以下のように表される。

$$T(t) = (T_0 - T_1) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + T_1 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $T(t)$ は時間 t における検出温度、 T_0 は初期温度($t=0$ での検出温度)、 T_1 は最終温度($t=\infty$ での検出温度)、 τ は感熱素子の熱時定数を表す。

経過時間 $t+\Delta t$ における検出値 $T'(t+\Delta t)$ を加えた、検出温度の時間変化を図5に図示する。

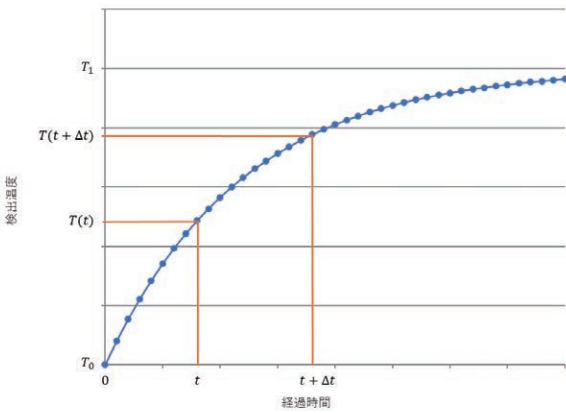


図5 検出温度の時間変化

ここで、 T_1 が一定であれば次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} T(t+\Delta t) &= (T_0 - T_1) \exp\left(-\frac{t+\Delta t}{\tau}\right) + T_1 \\ &= (T(t) - T_1) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) + T_1 \end{aligned} \quad \text{式(2)}$$

これは、 $T(t)$ を初期温度として最終温度を T_1 とした場合の経過時間 Δt の検出温度に等しい。従って、フレーム間隔 t_f で撮影する赤外線カメラについて当てはめると、現フレームの検出温度 T_n は、前フレームの検出温度 T_{n-1} を初期温度、最終温度を T_1 とすることで、フレーム間で最終温度 T_n に変化が無ければ、

$$T_n = (T_{n-1} - T_1) \exp\left(-\frac{t_f}{\tau}\right) + T_1 \quad \text{式(3)}$$

と考えられる。この時、最終温度 T_1 は現フレームの値 T_n と1つ前のフレームの値 T_{n-1} より、

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{T_n - T_{n-1} \exp\left(-\frac{t_f}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_f}{\tau}\right)} \\ &= k T_n + (1-k) T_{n-1} \\ k &= \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{t_f}{\tau}\right)} \end{aligned} \quad \text{式(4)}$$

と表せる。
現実的な実装において、フレーム間隔 t_f および感熱素子の熱時定数 τ は既知である。そのため式(4)に従い2つのフレームの熱画像から最終的な温度を推定することが可能となる。

5. 鮮明化による効果

今回開発した赤外線カメラ形K2TSは、VGAサイズ(640×480画素)で60フレーム/秒の撮影を行うことができる。加えて、読み出す画素数を制限する(画像のサイズを小さくする)ことでフレームレートの向上できる。例えば、QVGAサイ

ズ(320×240画素)では240フレーム/秒での撮影が可能である。以下に、QVGAサイズ240フレーム/秒で移動体を撮影した結果を次に示す。
既に示した移動体(像流れの例として図4)について画像鮮明化処理を用いて撮影した結果が図6である。

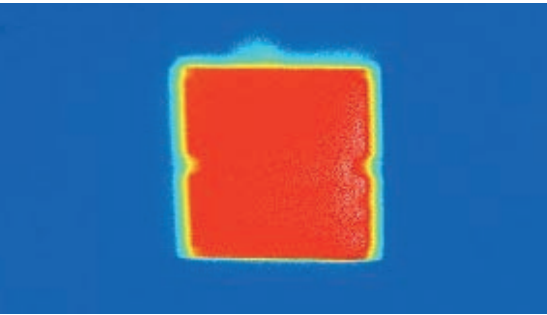


図6 移動状態(鮮明化あり)

図4と比較して明らかに像流れが抑えられており、図3に示す静止状態に近い熱画像が得られている。
次に図3、図4、図6の各熱画像の中央1ラインを横方向に切り出した情報を図7に示す。

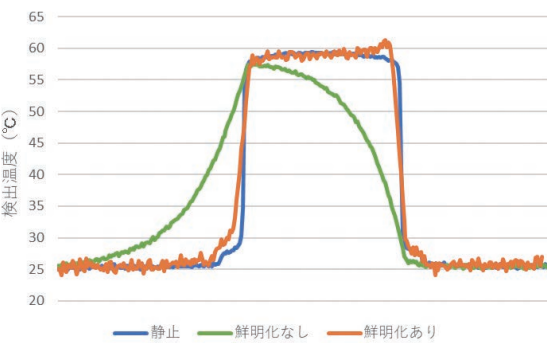


図7 鮮明化による検出温度の改善効果

検出温度についても鮮明化ありの場合には鮮明化なしに比べ、静止状態に近い値が取得できていることが分かる。
次に、これらの画像を用いた面積測定の結果を表1に示す。ここで、面積測定は画像処理コントローラ形K2TCが提供する検査機能の1つであり、ある温度以上(もしくは以下、もしくはある範囲内)という適合条件を満たす画素数をカウントし、その数値により合否判定するものである。

表1 鮮明化有無による検出面積(画素数)の違い

温度範囲	静止	移動体 鮮明化なし	移動体 鮮明化あり
55℃以上	9421	4374	9011
50℃以上	9842	7328	9515
45℃以上	10066	9423	9971
40℃以上	10287	11248	10485
35℃以上	10659	13392	11143
30℃以上	11787	16944	12692

ここでも、鮮明化ありの方が鮮明化なしに比べて静止状態に近い結果が得られることが分かる。鮮明化なしの場合、45℃以上と40℃以上の面積は静止状態に近い結果が得られてはいるが、他の温度範囲では大きくずれている。

最後に、45℃以上を適合条件とした面積測定において、移動体の移動速度が変わった場合の、鮮明化処理の効果について検証した結果を図8に示す。

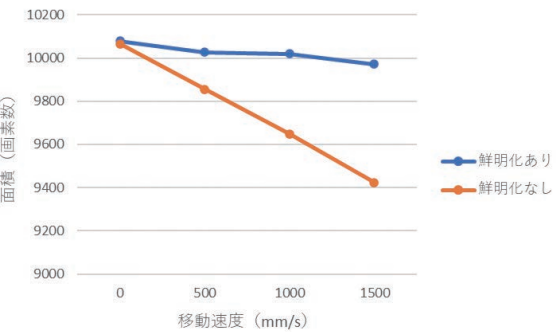


図8 移動速度による検出面積の変化

ここでも、鮮明化なしに比べて鮮明化ありの方が移動速度の影響を受けず、静止状態に近い結果を得ることができたことが分かる。
これらの結果が、実際のアプリケーションでどのような効果をもたらすかを考える。例えば、製造ラインでのホットメルト接着剤の塗布量検査を行う場合、熱画像のあらかじめ決められた温度範囲となる面積を測定することで塗布面積を確認することが考えられる。しかしながら鮮明化なしの画像では、検出する温度範囲の設定により面積が変化してしまうため、設定が困難である。また、移動速度によっても結果が異なってしまうため、常に一定の速度で移動させる必要があり、塗布量のしきい値を決める際にもラインを一定速度で移動させた状態で確認し決定する必要がある。それに比べ鮮明化ありの場合は、温度範囲の設定が容易であり、また、ラインの速度が変動しても安定した結果が得られるといえる。さらに、静止状態に近い結果が得られるため、ラインを止めた状態で撮影しながら塗布量のしきい値を決定することができる。
以上のように、ホットメルト接着剤の塗布量のような検査においては、検査設定が容易となり、結果についても検査精度の向上が期待できる。

6. おわりに

本稿では、主に「熱型」の赤外線検出器であるマイクロボロメータを用いた赤外線カメラにおける像流れを抑える画像鮮明化処理について述べた。この鮮明化技術を搭載した赤外線カメラ形K2TSおよび画像処理コントローラ形K2TCからなるサーモグラフィシステム形K2Tは、移動体の鮮明な熱画像を取得・演算することにより、生産ラインにおける熱画像での適切なインライン検査を行う事ができ、検査品質の向上や生産性の向上に貢献できる。
今後はさらなる性能向上に取り組むとともに、これまで熱画像を利用していなかったアプリケーションについても用途の拡大を検討していく。

<参考文献>
(1) 木股雅章, 赤外線センサ原理と技術, 2018年, 科学情報出版株式会社
(2) 越口一敏, 瀬戸新一朗, 金原圭司, サーモグラフィによる工程検査システムの開発, azbil Technical Review, 2016年, Vol.57, pp.54-58, アズビル株式会社

<著者所属>
増田 将宣 アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニー
IAP開発部
西坂 晋 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

機械学習による製品品質影響因子の特定

AI品質ナビゲーションシステムへの適用

Identification of factors affecting product quality with machine learning:
Application to AI quality navigation system

渡邊 拓朗
Takuro Watanabe

平 昌和
Masakazu Taira

キーワード

機械学習, 品質影響因子, 特徴量生成, 特徴量選択

デジタル化の進展に伴い、製造業においても様々なデータ分析の取組みが行われている。特に、操業データを分析し、品質に影響を与えている因子を特定することは、顧客の要求の高度化・多様化を背景に、より高い品質レベルやイノベーションが求められているため、重要性が増している。しかし、これを行うには製造プロセスに関する知見と大量の操業データを扱うためのスキルの両方が求められる。特に多品種を生産しているプロセスにおいては品種ごとに分析する必要がある、膨大な時間と労力を要する。そのため、それらの低減が課題となる。この課題に対応するため、操業データから運転の状態を表す特徴を抽出し、その中から品質影響因子を自動的に特定する技術を開発した。本技術を用いて、特に品質影響因子の自動特定が困難なバッチプロセスを対象に、品質影響因子の探索機能と傾向監視、および品質異常時の自動調査機能を備えた Deep Anchor™を開発した。

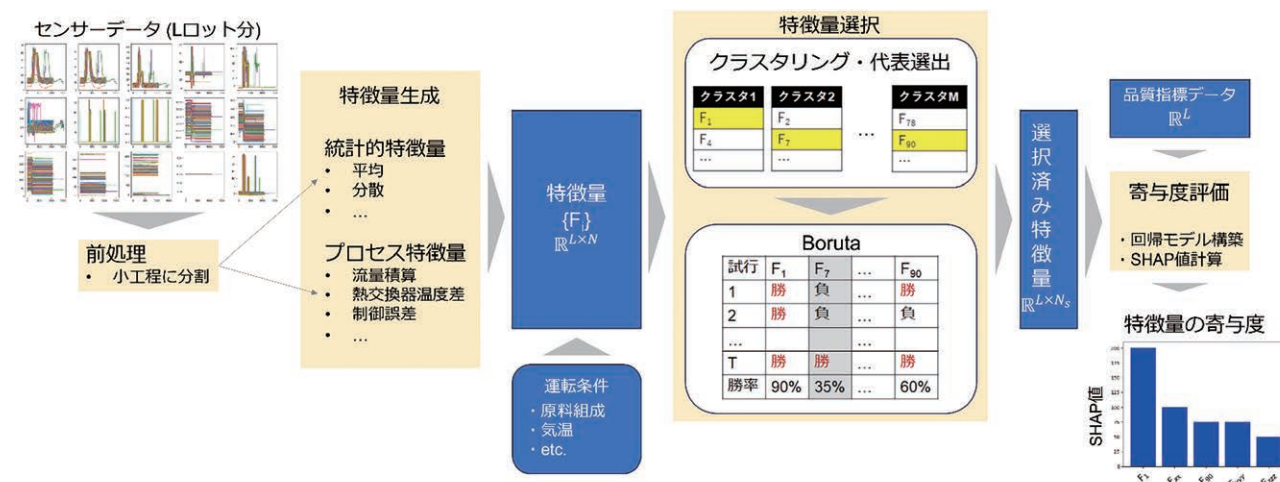
With the advancement of digitalization, data analysis has become widely utilized in the manufacturing industry. In particular, identifying quality-influencing factors that influence quality has gained importance due to the demand for high-quality products that meet the sophisticated and diverse requirements of customers. However, this requires expertise in both manufacturing processes and data analysis. In particular, in manufacturing processes producing a wide variety of products, analyzing data for each product individually demands considerable time and effort. A key challenge is to reduce this burden. To address this, we have developed a technology that extracts features representing operating conditions from operational data and automatically identifies quality-influencing factors. Using this technology, we have developed Deep Anchor™, which is equipped with functions for exploring quality-influencing factors, monitoring process condition, and automatic investigation of the causes of quality anomalies, specifically targeting batch processes where the identification of quality-influencing factors is challenging.

1. はじめに

今日の製造業には、高度化・多様化する顧客要求に対応するための高い品質レベルやイノベーション、競争力を維持するための製造コストの低減、カーボンニュートラルをはじめとした社会的要求への対応など、様々な要件を満たすことが求められている。そのため、適切に製造条件を変更していくことが必要であり、また同一条件下での製造においても、設備特性の経年変化などにより製造条件と品質の関係性も変化していくため、製造条件の見直しが必要となる。しかし、各条件が品質にどのように影響を与えているかは必ずしも明確ではなく、条件変更による影響の大きさを定量的に評価することは困難である。

これに対する一般的なアプローチとして、温度や圧力といったセンサデータや原料組成などの運転条件の操業データの解析があるが、多品種を生産している製造現場においては、品種ごとに分析を行う必要があり、特に分析の負荷が高い。加えて、操業データの解析には、製造知見に加えて、統計解析の知見が必要であり、人材の育成も課題となる。

この課題を解決するために、操業者が短時間で操業データに含まれる品質に影響を与える因子を特定し、その影響の大きさを定量的に評価する技術を開発した。本稿では上記技術と、この技術を用いて、品質影響因子の探索と傾向監視、および品質異常時の自動調査を行うDeep Anchorについて報告する。



2. 提案技術

本技術の目標は、バッチプロセス^{注1}において操業データと製品品質のデータとの関係性を自動的に分析し、品質管理の改善につながる情報を抽出することである。操業データは主に多数の物理量の測定値から成り、これらの変数の品質指標への影響を評価する。変数同士の関係性を分析する方法として、回帰分析に基づく方法が広く用いられている。操業データを入力、品質指標データを出力とするモデルを構築し、入力変数の推定への影響の大きさを評価することで、品質に大きく寄与する入力変数を特定できる。線形回帰⁽²⁾、非線形回帰⁽²⁾、多変量回帰⁽²⁾等多様なモデルから適切を選んで活用すれば、様々な関係性に対応できる点が長所である。センサデータ等時系列データを用いる場合、長時間の時系列データを入力とするのは難しいため、センサデータの特徴を表す特徴量を入力とする場合が多い。近年では、Auto Encoder⁽³⁾やTransformer⁽⁴⁾などの深層学習を用いて入力の特徴を学習し、精度の良い回帰モデルを構築する研究がなされている。ただし、バッチプロセスの品質推定に回帰分析を適用するには、下記2点の課題がある。

1点目は、限られたデータから、品質に関連する情報を適切に抽出することである。バッチプロセスの品質指標データは生産単位(ロット)ごとに1度しか取られないことがほとんどである。この限られた品質データのみが得られている状態で、品質と関係が強い特徴量を適切に抽出することは困難が伴う。

2点目は、解釈性の向上である。回帰分析では、品質推定への影響が大きい入力変数を特定する。この情報を製造プロセスの改善に生かすには、その入力変数のプロセス上での意味を解釈する必要がある。入力変数の意味が不明瞭では、品質に影響することが分かっても具体的な対策の立案は難しくなる。

特に前述した深層学習を用いた方法は学習に大量のデータを必要とし、出力される特徴量の解釈も難しいため、この

注1 製品の生産単位で製造プロセスを運転する生産方式。製造条件の調整をしやすいため、高機能製品の製造に広く用いられる。

目的での使用には問題が多い。

そこで、本技術では製造プロセスの知見と機械学習手法を組み合わせ、上記2点の課題に対応しつつ分析の自動化を目指す。まず、上記2点の課題を解決するため、操業データから、プロセスの知見に基づいた特徴量を生成する。人間が監視する際に注目するようなポイントに基づいた意味を持つ値を特徴量とすることで、効率よく品質に関わる情報を抽出できると期待される。この特徴量を回帰モデルの入力に用いると、少ないデータからでも精度よく品質との関連性を学習できると考えられる。また製造プロセス上、明確な意味を持つため、特徴量の解釈性も向上する。この分析を自動的に行うため、本技術ではまずプロセス知見に基づく典型的な特徴量を網羅的に生成し、その後、機械学習手法を用いて、品質に関係する特徴量のみを抽出する。

図1に、本技術の大まかな流れを示す。ロット分のデータが取得されているとする。ロット分それぞれに対し、一連の運転における各種センサの時系列データと原料組成などの運転条件、品質指標データが存在する。まずセンサデータに前処理を施し、その後は特徴量生成、特徴量選択、寄与度評価の3つの手順を実施する。次節以降ではこれら3つの手順について説明する。まず、2.1節ではセンサデータから特徴量を生成する方法について述べる。次に、2.2節にて生成した特徴量の品質への寄与の有無を判定し、寄与があるものののみを選択する手法を解説する。最後に、2.3節で選択された特徴量を用いて機械学習モデルを構築し、推定値への寄与を定量的に評価する方法について述べる。

2.1 特徴量生成

本節では、ロットごとにセンサデータの特徴量を生成する手順を述べる。まず、前処理として時系列データの分割を行う。一般に製造プロセスは原料仕込みや反応、乾燥といった複数の工程に分かれており、それぞれの工程での処理が製品品質に影響する。そのため品質に影響する因子を探索する際は、工程ごとに分けて分析することが望ましいといえる。そこで、各ロットのセンサデータを工程ごとに分割する。そして分割した各工程のデータに対して数理的な処理を施して、特徴量を生成する。数理的処理は大きく2種類に分けられる。

1つ目は、平均や分散、最大値といった一般的な統計量である。これらの特徴量は、データの一般的な性質を抽出する目的で用いる。

2つ目は、製造プロセスの知見に基づいて設定した本技術独自の計算処理である。製造プロセスで測定されるデータは温度、流量、圧力などの物理量ごと、計測対象の装置ごとに、それぞれ監視すべき観点が存在する。本技術では、これら物理量や装置の性質を考慮して特徴量を設計する。例えば、流量の積算値はその装置に流入、流出した流体の総量を示す。温度の傾きや極値は、化学反応における温度制御の精度に関連していると考えられる。また、複数のセンサデータを複合した特徴量も考えられる。例えば熱交換器の入口と出口の温度差は、冷却、昇温過程で出入りした熱量を示し、熱交換系の状態を表しているといえる。また変数の実測値と制御における目標値の偏差および偏差が十分小さくなるまでに要した時間を特徴量として、変数の制御性能を考慮している。

このようなプロセス操業の上で意味を持つと考えられる値は、様々な工業プロセスで共通して定義できる。本技術ではこれらを求める計算式をマスタとして保存しておき、実際に観測されたデータに適用して特徴量を生成する。その他、原料組成などバッチごとに決まる運転の特性値も特徴量として用いる。これらの特徴量のうちどの特徴量が品質に関連するかはプロセス次第であるが、この段階においては考えられる特徴量を網羅的に生成する。品質に関連のない特徴量が生成されても、後の処理で自動的に除去されるためである。

2.2 品質に寄与する特徴量の選出

前節で述べた処理では、品質に関連する可能性がある特徴量を網羅的に生成した。ただし、一般に品質へ明確な影響を持つ特徴量は一部のみである。入力変数が過剰に存在すると精度の良い回帰モデルは構築し難いため、まずは品質に関係がある特徴量のみを選出する。この特徴量選択の処理は大きく2つの手順に分けられる。以降、それぞれの手順について解説する。

2.2.1 クラスタリングによる冗長特徴量の除去

前述した特徴量生成処理では、プロセス上意味を持つ可能性がある特徴量を網羅的に生成する。そのため、結果として同じような挙動を示す特徴量が生成される可能性もある。それらの冗長な特徴量はモデル精度を悪化させることがあるため、一つに絞ってから次の手順に進むことで、モデルの精度向上を図る。本技術では階層型クラスタリング⁽²⁾を用いて類似した特徴量を分類し、各クラスから一つずつ代表を選出することで冗長な特徴量を削除している。各クラスタの代表は、品質指標との相関係数が最も高い特徴量とする。

2.2.2 Borutaによるスクリーニング

本項で解説する処理の目的は、品質に関連を持つ特徴量の抽出である。そのために、品質指標を出力とする回帰モデルにおいて、推定の精度向上に寄与できる特徴量を選択す

る。本技術では、寄与の有無を一貫した基準で判定できる特徴量選択手法として、Boruta⁽³⁾を採用した。Borutaは決定木⁽²⁾を利用した回帰モデルに基づく特徴量選択手法である。まず、決定木を利用したモデルについて、推定の原理と説明変数の寄与の評価法を述べる。決定木を用いたモデルの一種である、Random Forestのモデル構造を図2に示す。

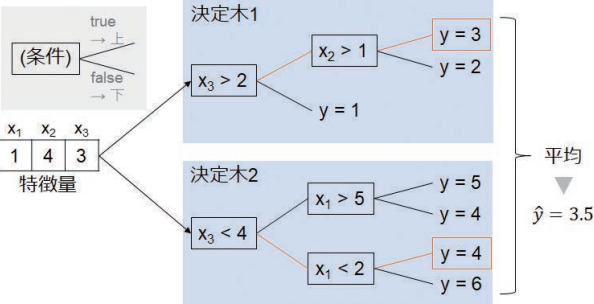


図2 Random Forestモデルの例

決定木は、入力された入力変数のうち一つの値を用いた条件分岐を繰り返し、分岐結果のパターンごとに推定値を割り当てるモデルである。Random Forestは乱数により使用するサンプルや変数を変えながら多数の決定木モデルを構築し、それらの推定値を統合して最終的な推定値を出力する。図2の例では2つの決定木モデルの推定値の平均を最終的な推定値としている。

決定木を用いたモデルには分岐への寄与を表すFeature Importance (FI)⁽²⁾という指標が提唱されており、各入力変数の寄与が数値化される点が特徴である。ただし、FIの値から寄与の有無を判断する定量的なしきい値は確立されていない。

Borutaでは上記問題に対応するため、寄与がない偽の特徴量との比較を行うことで、寄与の有無を一貫した基準で判断する。Borutaのアルゴリズムを図3に示す。

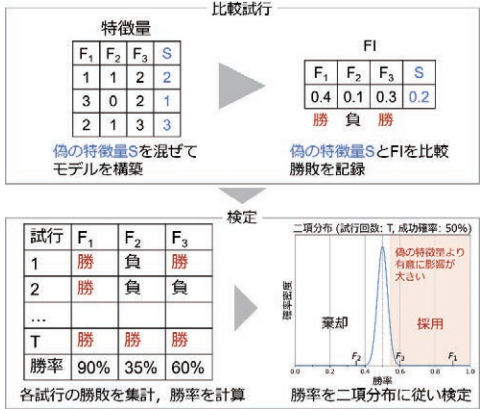


図3 Boruta概念図

まず、本質的には推定に寄与しない、偽の特徴量をランダムに生成する。その偽特徴量を本来の特徴量と混ぜてモデルを構築し、各特徴量の寄与の大きさを比較する。この処理を繰り返し試行し、偽特徴量と寄与の優劣を比較し、勝敗の結果(図3, 優: 勝, 劣: 負)を記録する。そして、「勝率(特徴量が偽の特徴量より寄与が大きい確率)は50%」という

帰無仮説の下で二項検定を行う。この帰無仮説は、特徴量と偽特徴量の間で寄与に優劣がない、つまり、特徴量に寄与がないことを示す。この仮説が棄却されるなら、特徴量は偽特徴量より有意に大きな寄与を持つといえる。この仮説を棄却できるか否かで特徴量を取捨選択することで、しきい値の設定等を行うことなく、寄与の有無を一貫した基準で判定できる。

2.3 寄与の定量的評価

本節では、前節で選出した特徴量を用いて品質を推定する回帰モデルを構築する手法、そのモデルを解析して品質推定における各特徴量の寄与の大きさを評価する方法について述べる。寄与の大きさの評価手法として、本技術ではTreeExplainer⁽⁶⁾を用いた。TreeExplainerは回帰木を用いたモデルに対してSHAP (SHapley Additive exPlanation) 値⁽⁷⁾を定式化した評価指標である。SHAP値は回帰モデルの推定値への各入力変数の寄与を定量化する手法であり、各サンプル(入力変数、出力変数の組。本技術では1ロット分の特徴量と品質指標の組)において、推定値の期待値からの変動を各入力変数の寄与として割り当てる。

まず、SHAP値の一般的な性質と本技術での解釈について解説する。SHAP値の概念を図4に示す。

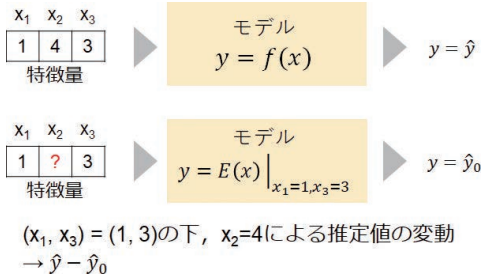


図4 SHAP値概念図

図4において、xは入力となる特徴量、yは出力となる品質指標、fは回帰モデル、Eはfの期待値を表す。SHAP値はモデルの特徴量の一つに注目し、その変数の値が未知の場合の推定値の期待値を基準として、その変数による推定値の変動量を示す値である。図4の例ではx2に注目し、x1とx3のみが与えられた場合の推定の期待値とx1, x2, x3全てが与えられた場合の推定値との差分を計算している。固定する変数の組み合わせを変えながらこの差分を求め、それを平均したものがSHAP値となる。

次に、TreeExplainerの詳細について述べる。回帰木は図2に示した通り、特徴量の値に応じた分岐を重ねた木構造を構築し、分岐の結果ごとに一つの推定値を割り当てる回帰モデルである。TreeExplainerでは注目している特徴量を用いた分岐全てについて、それぞれの分岐先へ進む割合を仮定して期待値を求める。その割合は、学習に用いたデータが実際にそれぞれの分岐先に進んだ割合とする。TreeExplainerにおける推定の期待値の考え方を図5に示す。図5の例ではx2に注目し、x2を用いた分岐(図中分岐A)を、各分岐先に進んだ学習データ数に基づいて重みづけする。

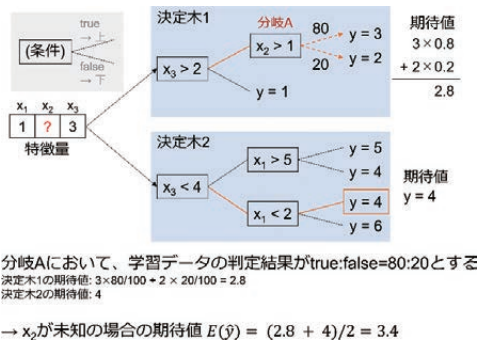


図5 TreeExplainerにおける期待値の考え方

いま、学習データが100サンプル存在するとして、学習時に分岐Aの上下分岐先に進んだサンプル数をそれぞれ80、20とする。この時、分岐Aにおける分岐結果を上記重みづけ分岐で置き換え、期待値を求める。図5の場合、推定の期待値は3.4となる。つまり、x2の値が未知の場合の推定の期待値は3.4となる。一方図2に示した事例では、x2=4としたときに推定値が3.5となっている。これらより、このサンプルにおいては「x2の値が4である場合に、期待値より推定値が0.1増加している」といえる。この変化の大きさが、このサンプルにおけるx2のSHAP値となる。

このように、SHAP値は各サンプルの特徴量に対して、それが推定値に及ぼした変化の大きさを評価する指標である。この値は特徴量の値そのものだけでなく、品質指標等にも依存して変動する。これらの値に対するSHAP値の傾向を分析することで、全体的な品質への影響の大きさだけでなく、ある条件下での局所的な影響も分析できると期待される。例えば「異常なロットにおいてSHAP値が大きい特徴量は、品質異常の原因に関わるため検査をする」、「ロット全体にわたってSHAP値が大きい特徴量は、品質に大きく影響する主要因子であるため特に注視する」というように、SHAP値の傾向に応じて適切なアクションを立案できる。

3. 品質影響因子発見システムDeep Anchor

前章で述べた技術を用いて、品質影響因子発見システムDeep Anchorを開発した。Deep Anchorは品質影響因子の探索と傾向監視、および品質異常時の自動調査を行うアプリケーションソフトウェア製品である。本技術により分析は自動化されているため、データ分析のための専門的なスキルは必要なく、製造プロセスの知見を有する製造部門や品質管理部門のユーザーが独力でモデル構築を行うことができる。

3.1 システム構成

Deep Anchorは、コンフィギュレータ、サーバ、ビューアの3種類のノードで構成される(図6)。コンフィギュレータでは品質推定回帰モデルの構築を行う。ユーザーは、モデルの設計・実装から評価までの一連の作業を、コンフィギュレータ上でワンストップで実行することができる。コンフィギュレータで構築されたモデルを使用し、サーバとビューアがオンラインで傾向監視と原因調査を行う。

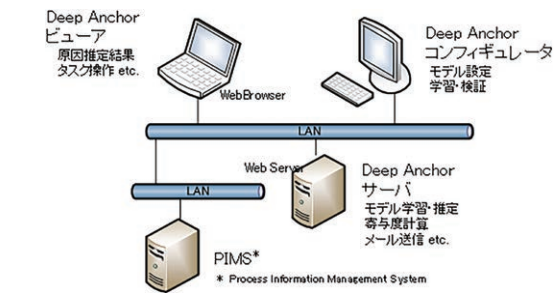


図6 Deep Anchor システム構成

3.2 主要機能と出力例

Deep Anchorは3つの機能を有する（図7）。以降、高機能樹脂製造プロセスにおける製品粘度の因子について出力した結果を用いて、各機能を解説する。

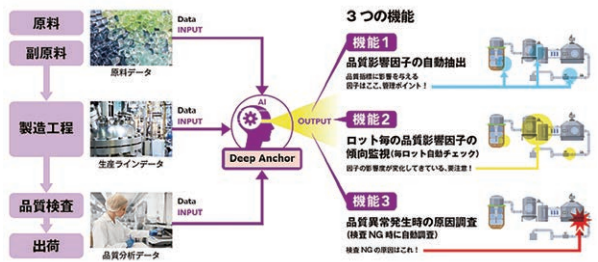


図7 Deep Anchor の機能

3.2.1 機能1(品質影響因子の自動抽出)

機能1は、品質影響因子の自動抽出である。過去の操業データおよび品質指標データから、品質に影響を与える特徴量を因子として示す。また各因子と品質指標の関係性を可視化することで、各因子の適切な範囲である制御推奨範囲を示す。これらの情報により、生産条件の確立までの時間を短縮し、新製品の早期市場投入に貢献する。

図8に、出力の一例を示す。図8左の棒グラフは抽出された因子の一覧である。棒グラフの長さは各因子の全ロットにおける平均SHAP値であり、各因子が品質指標に与えた全体的な影響を示している。この例では、粘度に最も影響を与えやすい因子が反応工程における反応槽温度であることが

わかる。図8右の散布図は粘度と上記因子のSHAP値を、全ロットに対してプロットしている。この例では、反応槽の温度が70℃を下回ると大きく粘度が落ちることを示している。

3.2.2 機能2(品質影響因子の傾向監視)

機能2は、品質影響因子の傾向監視である。機能1で抽出された因子の平均SHAP値や制御推奨範囲を、新たに運転されるロットにて監視することで、品質異常が起こる前に設備特性の経年変化等による変化を検知する。結果は画面上的アラーム、メールでユーザーに通知され、品質トラブルを未然防止、ロス（原材料、エネルギー、マンパワー）と廃棄品の低減に貢献する。

図9は実際に傾向監視のアラームが出力された例である。図内の棒グラフは、因子の一つである原料Aの投入にかかった時間（仕込み時間）の平均SHAP値が増したことを示している。右グラフの散布図は機能1と同様に、品質指標と選択した特徴量の平均SHAP値のプロットである。今回のロット（オレンジ）と前ロット（青）において、過去の製造実績より原料Aの仕込み時間が長くなっており、粘度も下がっている。このことから、仕込み時間の増大が粘度低下の原因となっていると推察できる。つまり粘度低下の異常を防ぐには、原料Aの仕込み時間増大の原因を調査し、対応をするべきと示している。

3.2.3 機能3(品質異常発生時の自動原因調査)

機能3は品質異常発生時の自動原因調査である。この機能は、品質異常ロットを含めたデータに対して、図1にて示した一連の工程を実施し、異常ロットに対する各特徴量のSHAP値を評価することで実現している。一般に、異常発生時の原因調査にはスキルと時間を要するため、担当者の負担も高く、調査完了までには時間がかかる場合が多いが、Deep Anchorは品質異常を検知すると15~20分程度で原因を推定してユーザーにメールで通知する。推定した異常の原因は2.1節にて述べたプロセスの知見を考慮した特徴量であり、さらにその意味が文章にて出力されるため、人から見て納得性が高い。



図9 品質影響因子の傾向監視

図10は品質異常時の出力結果である。棒グラフは各特徴量のSHAP値を表しており、棒が赤い場合は正、青い場合は負の影響を持つ。乾燥工程における温度制御の整定時間という特徴量が、粘度に対して大きな負のSHAP値を持つことを示している。この結果を文章で示すとともに、それがどの程度粘度を下げたのかを棒グラフで示している。右の青い5つのエリアは選択式になっており、Deep Anchorが示した異常原因に関する時系列データ、特定した因子の管理図、過去の類似トラブル情報など、品質異常を調査する際に必要になると考えられる情報をダイレクトに呼び出せるようになっている。

3.3 自律型・品質管理システムへ

当社はDX（デジタルトランスフォーメーション）の基盤として、自律化（Autonomy）の技術を確認し、現在の生産工場において人が管理して行われている各マネジメント領域（生産管理、品質管理、設備管理など）に自律化システムとして適用することを目指している。自律化システムは、ミッションを与えられたAIが、人の介入を最小限に抑えながら、人よりも迅速かつ正確に遂行する仕組みである。図11は自律化システムを品質管理領域に適用した自律型・品質管理システムの機能で、Deep Anchorは、この中の機能1, 2, 3を担う製品である。



図10 品質異常の原因調査

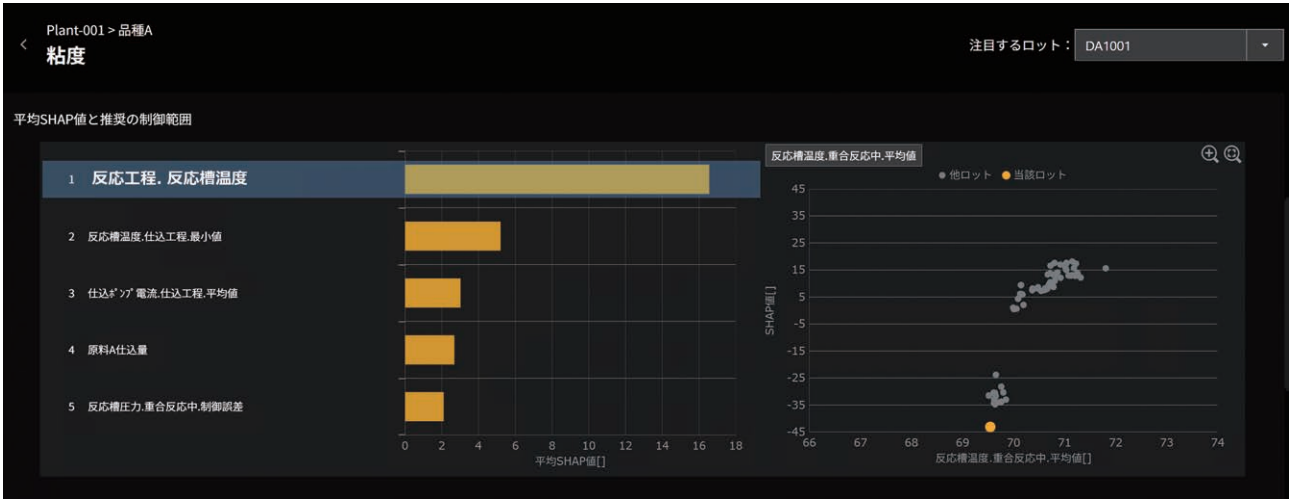


図8 品質影響因子と制御推奨範囲

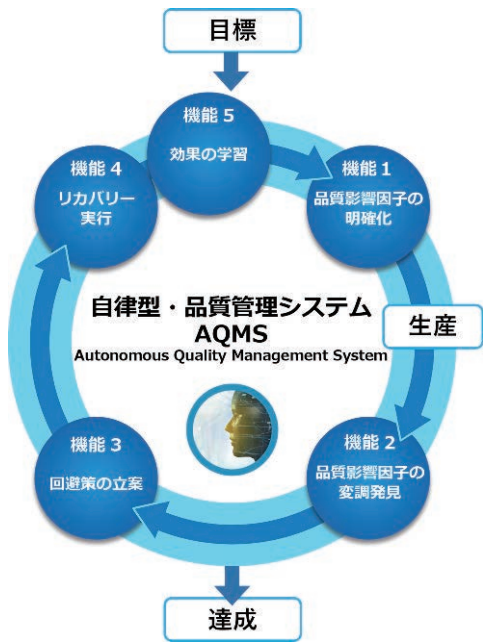


図11 自律型・品質管理システムの機能

4. おわりに

本稿では、操業データから品質影響因子を特定する技術と、その技術を適用した製品Deep Anchorについて述べた。Deep Anchorの持つ3つの機能は、新製品の早期市場投入による社会イノベーションの加速、廃棄品やロスを減らすことによる環境負荷低減、品質管理担当者の時間的および心的負担の低減に貢献する。今後、本技術・本製品の拡張や新技術を組み合わせることで、自律型品質管理システムを完成させ、飛躍的な生産性の向上と持続可能な社会の実現に貢献していく。

<参考文献>

(1) プラントにおける先進的AI事例集,
<https://www.kobe-kiankyo.jp/common/uploads/2021/06/20210611-news-021117-2.pdf>
(アクセス日 2024.10.25)

(2) Trevor H, Robert T, et al.:統計的学習の基礎 データマイニング・推論 予測, 2014年, 共立出版

(3) Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R.:Reducing the dimensionality of data with neural networks. Science, 2006年, Vol. 313 No. 5786, pp. 504-507.

(4) Vaswani, A.: Attention is all you need. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017年.

(5) Kursu, M. B., & Rudnicki, W. R.: Feature Selection with the Boruta Package. Journal of Statistical Software, 2010年, Vol. 36 No. 11, pp. 1-13.

(6) Lundberg Scott M., Erion Gabriel, et al.:From local explanations to global understanding with explainable AI for trees, Nature Machine Intelligence, 2020年, Vol.2, No.1, pp.56-67, Nature Publishing Group

(7) Lundberg Scott M., Lee Su-In:A Unified Approach to Interpreting Model Predictions, Advances in Neural Information Processing Systems 30, 2017年, pp.4765-4774, Curran Associates, Inc.

<商標>

Deep Anchorはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

渡邊 拓朗 アズビル株式会社
AIソリューション推進部

平 昌和 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

パラメータ確率分布を用いたプラントモデル自動更新技術

Plant model automatic update technology using parameter probability distribution

田原 鉄也
Tetsuya Tabaru

川越 貴啓
Takahiro Kawagoe

キーワード

制御特性変化把握, システム同定, 確率分布, 最適化, CO₂削減, SORTiA™

アズビルでは制御・最適化によるCO₂削減に取り組んでおり、制御高度化ソリューションSORTiA™もその一端を担っている。高度制御ではプラントの特性を表したモデルを用いるが、何らかの理由でプラントの特性が大きく変化した場合にモデルがそのままであると、その差異から制御・最適化の性能が低下し得る。この課題を解決するため、操業中のプラントのモデルを自動で推定して更新する技術を開発した。開発した技術は操業中のプラントデータからモデルのパラメータの確率分布を推定し、その分布に基づいてモデルの更新要否を自動で判断する。本技術はプラントへの特別な操作が不要で、モデルの維持が容易という特長がある。

Azbil is working to reduce CO₂ emissions through control and optimization, and its SORTiA™ advanced control solution plays a part in this effort. Advanced control uses models that represent plant characteristics; however, if these characteristics change significantly for some reason and the models remain unchanged, the performance of control and optimization may deteriorate due to the resulting differences. To solve this problem, we have developed a technology to automatically estimate and update the model of a plant in operation. The developed technology estimates the probability distribution of the model parameters from the data of the plant in operation and automatically determines whether or not the model needs to be updated based on that distribution. This technology does not require any special operations on the plant and is characterized by the ease of maintaining the model.

1. はじめに

アズビルは脱炭素社会の実現に向けて、お客様現場におけるCO₂削減に取り組んでいる。CO₂削減の手段は多種多様だが、その一つとしてエネルギーの最適化がある。当社は現場で培った知見と制御技術を結集した制御高度化ソリューションSORTiAを提供している⁽¹⁾。SORTiAの中核に位置する多変数モデル予測制御SORTiA-MPC (MPCはModel Predictive Controlの略称)は石油精製をはじめとする製造プラントや、様々な業界の動力装置に導入されており、制御・最適化による省エネルギーを通じたCO₂削減に貢献している。

高度制御の導入はCO₂削減やオペレーション負荷低減に大きな効果があるが、課題としてモデルの構築と維持がある。このモデルとは、制御・最適化の対象であるプラントの振る舞いを単純化して数式で表したものである。高度制御の性能はモデルによるところが大きく、価値を生み出すにはモデルがプラントの振る舞いの主要な部分を表現できる必要がある。そのような、制御・最適化に必要な精度を持ったモデルを導入時に構築し、導入後に維持することが、高度制

御適用における重要なポイントの一つとなる。

この導入後の維持に関し、プラントは経年変化の蓄積や装置の修繕・改造などによってその特性が変わり得るという課題がある。プラントの特性が変わるとその分、モデルの誤差（プラントとの差異）が拡大する。誤差が小さければ、SORTiA-MPCなどの高度制御はフィードバック制御によってその影響を抑制できる。そのため、モデルの小さな誤差が大きな制御性能劣化に直結することは無い。しかし、プラントの特性の変化が大きく、モデルの誤差がさらに拡大すると、性能に影響する場合がある。このような場合は、プラント側の変化にモデルの方を追従させることが、高度制御の効果を維持するために望ましいと考えられる。これがプラントモデルの更新技術が求められる背景である。

アズビルでは操業中のプラントデータから自動でモデルを推定し、更新する技術の開発を行っている。操業データは量的には豊富だが、その中でモデル推定可能な状態にある部分は限られており、その限られたデータを選別する必要がある。しかし、このデータ選別を人手で行うのは専門家でも大変な労力である。そこで、我々はモデルを表す数式のパラメータの確率分布を推定することでデータを選別し、モデル

を自動で推定・更新する手法を新たに開発した。本稿ではこの技術について説明する。

2. モデル自動更新実現の課題

本章ではプラントモデルとその自動更新について述べ、その実現における課題について説明する。

2.1 プラントのモデルと更新の必要性

ここで扱うプラントのモデルは、プラントに入力を与えた際の出力の振る舞い、すなわち入出力関係を数式で表した数式モデルである（図1）。高度制御で対象となるプラントは動特性を持つので、そのモデルも動特性を表現可能な伝達関数、状態空間表現、微分方程式などが用いられる。SORTiA-MPCでは伝達関数を用いている。

モデルは入力を与えられると、プラントの振る舞いについて数式を使って計算して模擬し、プラントとおおむね同じ出力を算出する。これを利用してプラントの出力を予測できる。また、望ましい出力を得るために必要な入力を逆算できる。これにより制御・最適化が可能になる。

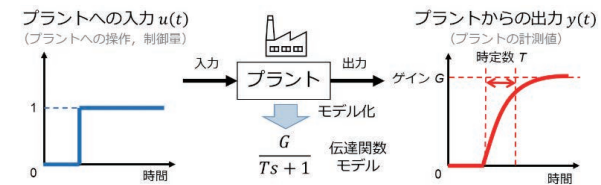


図1 プラントのモデル

モデルを利用した制御・最適化はプラントの特性が変化するとその影響を受ける。変化が小さい場合は、制御・最適化によってその影響がある程度吸収されるので、あまり問題にならない。一方、変化が大きくなると、モデルがプラントを必要な精度で模擬できなくなり、制御・最適化が本来の性能を発揮できなくなる。これを避けるには、プラントの特性が大きく変化したらモデルの方をプラントに合わせて更新し、両者の差異を性能に影響しないレベルまで小さくする必要がある。それにより高度制御の効果を維持することがモデル更新の目的となる。

2.2 操業中プラントデータによるモデル更新の狙い

モデル更新手法として、我々は通常操業中のプラントデータを用いる手法の実現を目指した。

実は、プラントモデルの推定はプラントの入力に試験用の摂動を加えると容易になる。そのため、高度制御導入時のモデル構築では試験用入力をプラントに与え、通常とは異なる操業状態にして行うことが一般的である。しかし、この方法は試験用の摂動を加えた時しか推定できない上、試験用の摂動が操業に与える影響に配慮する必要があり、モデル更新にそのまま適用することは適切でないと考えた。そこで本開発では、通常とは異なる特別な操業が不要なモデル更新手法を目指すことにした。

通常操業中の制御データは入手が容易なので、そのデータからプラントのモデルを推定できれば、広範な対象や状況に適用でき使いやすい手法になると考えた。

2.3 操業中プラントデータによるモデル推定の課題

本節では、通常操業中のプラントデータによるモデル推定の難しさと解決すべき技術課題について説明する。

プラントデータからプラントの数式モデルを推定することは、プラントの入出力関係を表す数式を推定することである。そのためには、入出力データが以下の条件を満たす必要がある。

- A) 入力に十分な変動があること
 - B) 出力には入力の変動に応じた変化が明確に現れており、外乱の影響が小さいこと
- 入出力関係を表す関数をデータから求めるには、入力是一定ではなく変動が必要である。また、外乱の影響で入出力関係が不明瞭になったデータからはモデルを必要な精度で推定できない。

上記条件は通常操業中にモデル推定する難しさを示唆している。高度制御が適切に運用されたプラントは入出力ともに変動が小さく安定していることが多く、条件A)を満たさない。また、プラントは様々な要因の外乱を受けるが、その影響が大きい場合は条件B)を満たさない。試験用の摂動を与える方法では入力の能動的操作が可能だが、目指す手法は操業中データが上記条件を満たす状況を受動的に待つ必要がある。ここが、通常操業中にモデルを推定する難しさになる。

一方、実際の操業中データを観察すると、上下限設定の変更などで入力に変化し、かつ外乱の影響が小さい区間があることに気付く。このような貴重な機会を捉えてプラントのモデルを推定すれば、目指すモデル自動更新が可能になると考えた。つまり、操業中データから前述の条件を満たす区間を自動で選別し、モデル推定に不向きな区間を除くことが、解決すべき課題となる。

3. 提案手法の考え方と手順の概要

本章では提案手法⁽²⁾の考え方と手順の概要について説明する。提案手法で鍵となるのが推定に適した区間の自動選別だが、これを実現するため、提案手法ではモデルのパラメータの確率分布を推定して利用する。

パラメータの確率分布とはパラメータがある値を取る確率を関数として表したものである（図2）。パラメータの確率分布はこれまでも信頼区間という形で推定値の信頼性評価に利用されてきた。提案手法ではこれを区間の選別に利用する。もし、ある区間で推定したパラメータの確率分布が狭い範囲に分布していれば、その区間で推定したパラメータは不確かさが小さく信頼性が高いと考えられるので、モデル推定に適した区間と判定する（図2実線）。逆に分布が広ければ、モデル推定に適さない区間と判定する（図2破線）。このように、パラメータの確率分布を利用してモデル推定に適した区間を選別し、モデル更新することが、提案手法の最大の特長である。

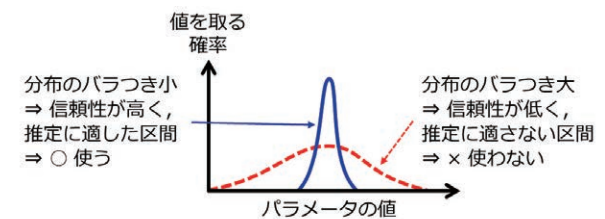


図2 パラメータの確率分布とモデル推定に適した区間

まず、3.1節で提案手法の問題設定について述べ、次に3.2節で提案手法の手順を説明する。

3.1 問題設定

プラントのモデルは既存のものがあり、モデルのパラメータは初期値が得られると仮定する。1章で述べた通り高度制御導入時には通常、プラントのモデルを構築するので、それを利用する。また、プラントの変化はモデルのパラメータの変化で表現可能と仮定する。これは、モデルの次数や構造は変わらないという仮定である。この仮定はプラントの変化の要因が経年変化の蓄積や装置の修繕、操業条件の変更であれば妥当だと考えられる。一方、プラントの構造が変わるような大きな改造の場合にはあてはまらないと考えられる。

以上の仮定のもと、プラントから定期的に入出力データを収集し、提案手法を実行する。

3.2 提案手法の手順の概要

提案手法は入出力データを区間に区切り、各区間でモデルのパラメータの確率分布を推定し、以下の3条件を満たした場合にモデルを更新する。

- パラメータの確率分布が狭く、推定に用いた区間がモデル推定に適していること
- 新たに推定したモデルから得られる出力の推定値が、現在使用しているモデルによる推定値よりもプラントの出力値に精度よく追従していること
- 新たに推定したモデルのパラメータが、これまで得られた確率分布から大きく外れていないこと

以下、提案手法の手順を順番に示す(図3)。収集した入出力の時系列データは、最初に同じ長さを持つ区間に分割する(図3では3つの区間に分割)。

- 分割された区間のデータを用い、プラントモデルのパラメータの確率分布を区間ごとに推定する(確率分布の推定方法は4章を参照)。
- 確率分布の分散を区間ごとに算出し、しきい値以下であればその区間は条件のA)を満たしたと判定して次の手順に進む。しきい値より大きい区間は使わない。
 - 区間1は外乱の影響で確率分布の分散が大きいので使わない
 - 区間2は入力の変動が小さいので使わない

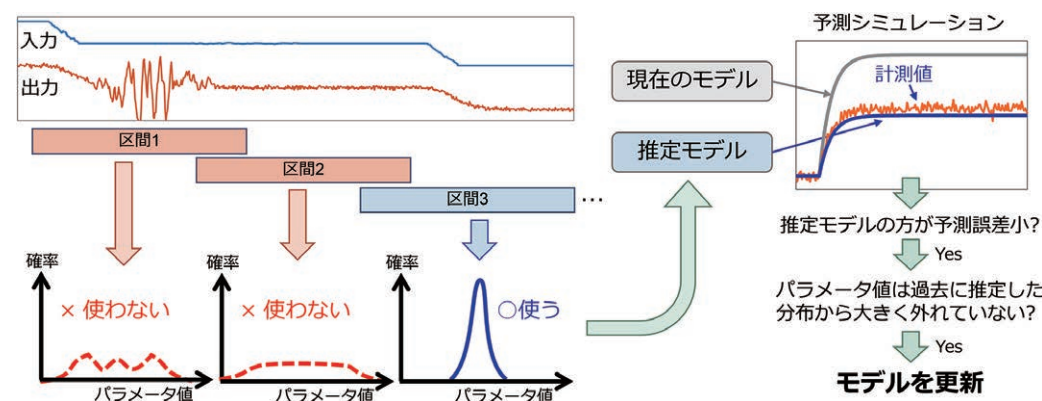


図3 提案手法の手順概要

- 区間3は入出力間の因果関係が分かるような明確な変動があり、外乱の影響も小さく、分散が小さいので、推定に用いる
- パラメータの確率分布の重みつき平均値を推定値としたモデルを生成する(ここでは区間3で推定した確率分布からモデルを生成)。
 - 現在制御に使っているモデルと、手順3で生成した推定モデルの両方にプラントの入力データを与えてそれぞれシミュレーションを行い、出力予測値の時系列を得る。そして、対応する実際のプラントの出力計測値との誤差を算出する。
 - 手順4で算出した誤差を両モデルで比較し、推定モデルの方における誤差が小さければ条件B)を満たしたと判定して次の手順に進む。
 - 図3では推定モデルの方が計測値によく追従しており、誤差が小さいので、条件B)を満たしたと判定される。
 - モデルの推定値を過去に推定した確率分布と比較し、大きく外れていなければ条件C)を満たしたと判定する。そして、条件A)～C)を全て満たしたらモデルを更新する。

4. モデルパラメータの確率分布推定手法

提案手法を実現するためには、動的モデルのパラメータの確率分布を推定する必要がある。本章では、このパラメータの確率分布を推定する方法について説明する。本章の記述は3章の手順1の詳細となる。

提案手法では、モデルのパラメータの確率分布を推定する手法としてベイズ推定を採用する。一般に、動的モデルのパラメータの確率分布を解析的に推定することは以下の理由から困難である。

- ある時点の情報がそれまでの過去の情報に影響されるため、直接計算することが難しい。
- 全体の振る舞いを捉えるためにはすべての時点の情報を考慮する必要があり、この計算が複雑になることが多い。

このことから、パラメータの確率分布を直接計算することは困難であるため、提案手法における確率分布推定ではマルコフ連鎖モンテカルロ法(Markov Chain Monte Carlo: MCMC)という手法を用いる。MCMCとは、乱数を用いて多

数の標本を生成し統計的な解析を行うことで、対象の分布を近似的に求める方法である。

本章の構成は以下の通りである。4.1節では離散時間の状態空間表現について、4.2節ではモデルのパラメータの確率分布を推定する手順について述べる。4.3節ではこの確率分布推定手法の背景について説明する。

4.1 モデル構造の離散時間状態空間表現

SORTiAでは、モデルを連続時間の伝達関数で表現している。一方、この確率分布推定手法では、離散時間の状態空間表現に基づくパラメータ推定手法を用いる。そのため、連続時間の伝達関数を離散時間の状態空間表現に変換する必要がある。本節では、この変換方法について述べる。

本報告書では、一入力一出力系を対象として説明する。例として、以下のようにむだ時間を含む1次遅れ系の伝達関数で表される系を考える。ただし、 G はゲイン、 T は時定数、 t_d はむだ時間、 $U(s)$ と $Y(s)$ はそれぞれ入力 $u(t)$ 、出力 $y(t)$ をラプラス変換したものである。

$$Y(s) = \frac{G}{Ts+1} e^{-t_d s} U(s) \quad \text{式(1)}$$

上式を逆ラプラス変換し、サンプリング周期 Δ_t で後退差分近似を施すと、以下の離散時間の状態空間表現が得られる。ただし、システムノイズ $v(t)$ と観測ノイズ $w(t)$ を考慮する。

$$x(t) = Ax(t-1) + Bu(t-t_d) + Hv(t) \quad \text{式(2)}$$

$$y(t) = Cx(t) + w(t) \quad \text{式(3)}$$

$$A = \frac{T}{T+\Delta_t}, B = \frac{G\Delta_t}{T+\Delta_t}, C=1, H = \frac{\Delta_t}{T+\Delta_t} \quad \text{式(4)}$$

ここで、 $v(t)$ と $w(t)$ は平均が0、分散がそれぞれ σ^2 、 β^2 の正規分布に従う乱数であると仮定する。推定するパラメータはゲイン G と時定数 T 、そして σ 、 β である。以下では、これらのパラメータをまとめて θ と呼ぶ。また、 x を内部状態と呼ぶ。

本報告書では、一入力一出力系に限定して説明したが、

多変数系についても同様に変換することが可能である。

4.2 パラメータ確率分布推定手順

提案するモデルのパラメータの確率分布推定手法では、離散時間の状態空間表現に基づくパラメータ推定方法として、SMC²という手法と同様のアプローチを用いる。SMC²とは、状態空間表現の対象に対して、パーティクルフィルタ(Particle Filter: PF)を用いてパラメータ θ と内部状態 x を同時に逐次推定する手法である⁽³⁾。PFとは、粒子(particle)と呼ばれる標本を用いて確率分布を推定する手法であり、逐次モンテカルロ法(Sequential Monte Carlo: SMC)の一種である。ここで、粒子一つひとつの位置は、推定対象である確率分布の確率変数に対応している。この粒子は重みを持っており、粒子を多数用いることで、その位置と重みによって確率分布を近似することが可能となる。PFは、それらの粒子の位置と重みを観測値に基づいて逐次的に更新することで、求める確率分布を推定するアルゴリズムである⁽⁴⁾。

本手法では、内部状態 x の推定にカルマンフィルタ(Kalman Filter: KF)⁽⁵⁾を用いる。SMC²や本手法の内部で用いられるMCMCについては次節で説明する。

以下、本手法の手順を順番に示す(図4)。例として、図4では、パラメータ θ の事前分布として一様分布を設定する。なお、以下の手順は分割された入出力の時系列データの一つの区間に対して適用される。

- 事前知識をもとに、パラメータ θ の事前分布を設定する。
 - 例えば、現在制御に使っているパラメータの値を中心とした一様分布を設定する。
- 事前分布に基づいて、初期の粒子の集合を乱数で生成する。それぞれの粒子に初期の重みを割り当てる。
- 以下の手順をある時刻の入出力値一組につき一回ずつ、反復処理として繰り返す。
- 粒子の位置や重みが一部に偏っている場合は、リサンプリングを行う。
- 乱数を用いて粒子の位置を更新する。
 - 更新量はチューニングパラメータで決まる。
- KFを用いて、各粒子の内部状態 x を推定する。
 - 粒子の位置と状態空間表現におけるパラメータ θ の値が一对一に対応する。

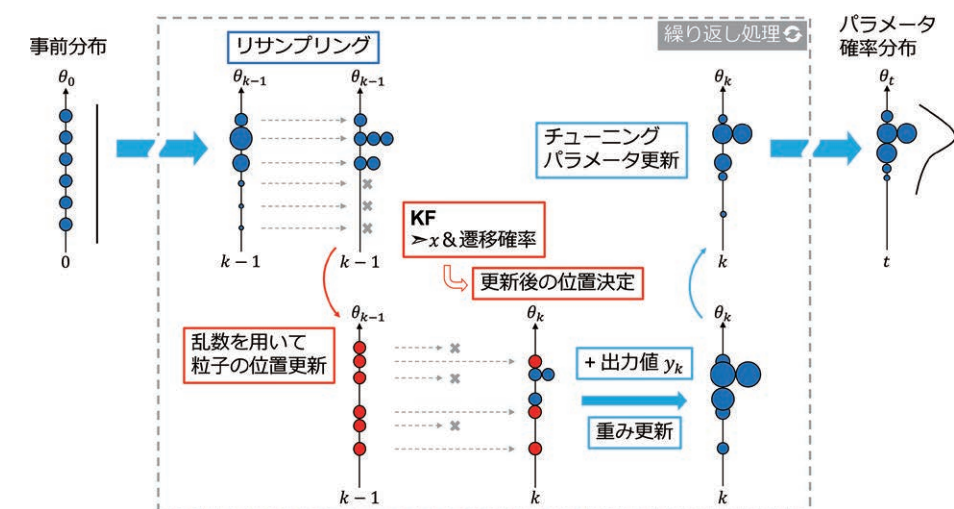


図4 パラメータの確率分布推定の概念図

- ・対応するパラメータ θ の値を用いて、その条件下での内部状態 x を推定する。
- 7. 粒子の位置の遷移確率を計算し、更新後の粒子の位置を決定する。
- ・各粒子の内部状態 x を用いて、それぞれの位置の遷移確率を計算する。遷移確率とは、粒子がある状態から別の状態に変化する確率である。
- ・確率が高い粒子は新しい位置に移動し、それ以外の粒子は元の位置に留まる。
- 8. 観測された出力をもとに、粒子の重みを更新する。
- ・推定した内部状態 x から出力 y を予測し、その予測値と実際の観測値の誤差を計算する。
- ・誤差が小さい粒子は重みが増え、誤差が大きい粒子は重みが減る。
- 9. 重みつき粒子を用いて、手順5のチューニングパラメータを更新する。
- ・粒子の位置と重みが集まっている場合は、更新量が少なくなるように調整する。

上記の手順を区間の最終時刻まで行うことで、粒子の位置と重みがパラメータの確率分布に漸近する。その結果、モデルのパラメータの確率分布が推定できる。

図5に、モデル推定に適した区間において、推定するパラメータ θ の一つであるゲインの重みつき粒子が遷移する様子を、ヒートマップで表した図を示す。縦軸はゲインの推定値を、横軸は区間内の時刻である。時刻が進むにつれ、粒子が広がった分布から徐々に粒子が集まり、信頼性の高い確率分布に収束する様子が確認できる。

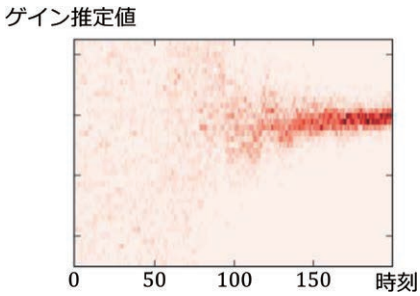


図5 重みつき粒子のヒートマップ

4.3 提案する確率分布推定手法の背景

本節では、前節で説明したパラメータ確率分布推定手法の各手順で使用されているアルゴリズムについて説明する。まず、本手法が参考にしたアルゴリズムであるSMC²について説明する。この手法は手順6において、内部状態 x の推定にKFではなくPFを用いる。PFを用いることで、より多くの対象に対してパラメータを推定できる。しかし、SMC²は二重にPFを構成するため、計算量がかなり多く、推定に多くの時間を要する。

そのため、本手法では、内部状態 x の推定をKFに置き換えることで計算時間の短縮を図っている。一般的には、PFをKFにそのまま置き換えることは難しいが、今回はパラメータ θ がある値に固定されているため、4.1節の離散時間状態空間表現に対してKFを適用できる。

つぎに、各手順で使用されているMCMCのアルゴリズムについて説明する。

手順5では、ランダムに粒子の位置を更新しているが、ここではMCMCの遷移カーネル m を用いて粒子の位置を更新している。本手法では、遷移カーネル m の設計手法として、MCMCの一種であるメトロポリス・ヘイスティングス (Metropolis-Hastings: MH) 法⁽³⁾と呼ばれる手法を用いている。

手順7で計算される遷移確率とはMH法で用いられるMH比である⁽³⁾。このMH比を用いて遷移した新しい標本を受け入れるか、却下して現在の標本を維持するかを決定する。この操作によって、求める分布により近い分布に従う標本を得る。

手順9では、重みつき粒子の分布に基づいて、提案カーネル $\hat{m}$ のチューニングパラメータであるガウス分布の共分散行列 Σ と遷移回数を更新する。重みつき粒子の分布が狭くなると、粒子の遷移距離が小さくなり、遷移が繰り返されることで、重みつき粒子が集まり信頼性の高い確率分布に収束する。

5. 数値シミュレーション

本章では、モデル予測制御で制御・最適化されているプラントのモデル更新を想定したシミュレーションにより、提案手法が通常操業中のプラントデータから動的モデルを推定できることを示す。

5.1 シミュレーション設定

対象の動的モデルは一入力一出力系として、1次遅れ系とする。対象であるプラントの変化により、プラントとモデルの間でゲイン G が異なっている状況を想定する。具体的なパラメータ値は表1のように設定した。

表1 パラメータの値		
	プラント	モデル
ゲイン G	-2.0	-1.0
時定数 T	20	20

このプラントに対してSORTiA-MPCによる制御・最適化を行い、目標値が変化して入力 (操作変数) が操作される状況をシミュレーションする。最適化の目的は入力値の最小化とする。最初、最適化により出力 (制御変数) は上限値付近にあるが、途中で出力の上限値を表2のように変更する。それにもなって入力が操作され、変化することで、モデルが推定可能になることを期待している。

このシミュレーションにより得られた入出力データを図6に示す。横軸が経過時間、縦軸が入出力の変数値である。出力値と入力値をそれぞれ実線で、出力の上限値を破線で示した。出力には平均0、分散0.09の白色性外乱を常時印加している。それに加え、大きな外乱の影響で推定に適さない区間を模擬するため、2:30～5:00の区間では平均0、分散1.0の白色性外乱を追加している。なお、制御周期は1分である。

表2 出力の上限値設定			
時刻	0:00～	3:20～	7:30～
上限値	48	50	54

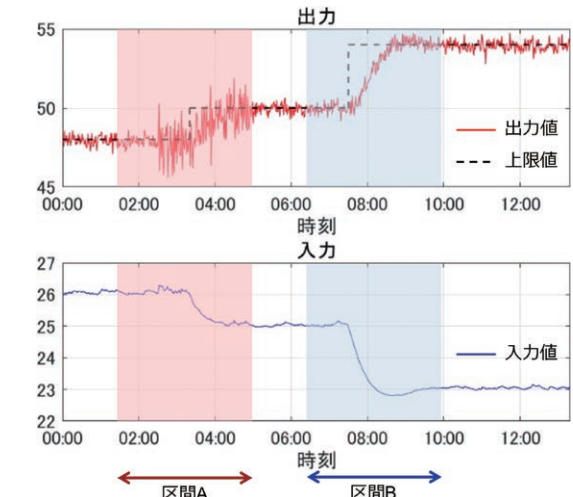


図6 シミュレーションの入出力データ

対象はモデル予測制御で制御されているが、プラントの実際のゲインより小さいゲインを持つモデルで予測、制御したため、操作入力が適切な量よりも過大になる。このため、出力値に9:00付近でオーバーシュートが発生し、出力値が上限値を一時的に違反している。ただし、SORTiA-MPCはモデル誤差に対してロバスト性があり、その影響を制御によって抑制できるので、違反は小さい量に留まっている。

なお、提案手法の設定は分割する区間の幅を200分、推定対象はゲイン G と時定数 T とする。推定に用いるデータのサンプリング周期は制御周期と同じ1分である。

5.2 シミュレーション結果

推定結果を表3に示す。推定は、01:40～05:00の区間 (以下、区間A) と06:34～09:54の区間 (以下、区間B) の2つの区間で行われた (図6参照)。どちらも出力上限値の変更にともなう入力操作が含まれる区間である。また、区間Aと区間Bで得られた推定ゲインと推定時定数の確率分布をそれぞれ図7、図8に示す。

表3 推定結果		
推定区間	区間A 01:40～05:00	区間B 06:34～09:54
推定ゲイン	-2.10	-2.03
推定時定数	15.2	20.6

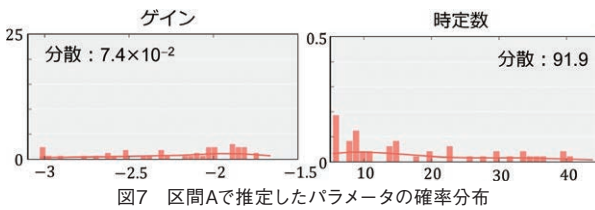


図7 区間Aで推定したパラメータの確率分布

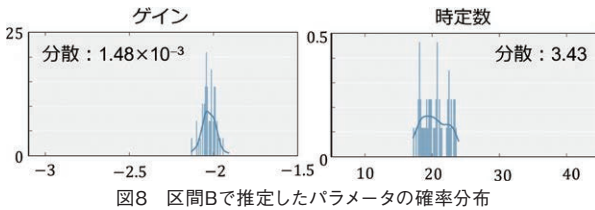


図8 区間Bで推定したパラメータの確率分布

区間Aでは、出力に大きな外乱が含まれており、入力操作による出力変化が不明瞭になっているため、パラメータの確率分布の分散が大きくなっている。一方、区間Bでは、外乱の影響が小さく、入出力間の因果関係が明確であるため、確率分布の分散が小さくなっている。すなわち、区間Bの方が得られた推定値の信頼度が高く、モデル推定に適した区間であることが分かる。なお、詳細は記述しないが、区間Bで得られた推定値を用いたモデルは、3.2節で挙げたモデル更新の3条件の残り2つ (条件B, C) も満たしている。

次に、区間Bで得られた推定値をモデルのパラメータとして設定し、表2と同じ設定でシミュレーションを行った結果を図9に示す。

なお、このシミュレーションでは、モデルの更新による制御性能の改善を確認しやすくするため、推定時 (図6) に2:30～5:00の区間で追加した分散1.0の大きな外乱は与えていない。

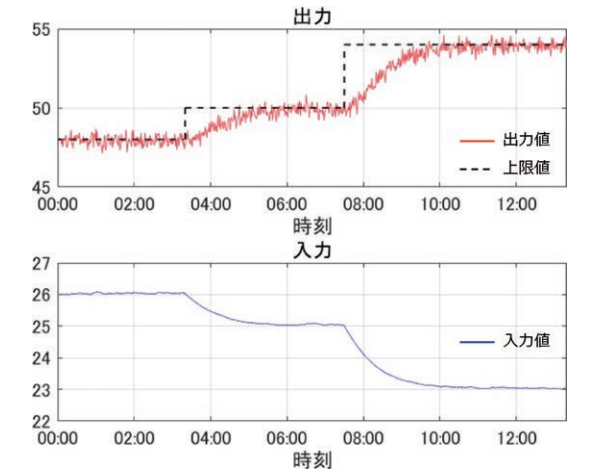


図9 推定パラメータを用いたシミュレーション

このシミュレーションではモデルのゲインがプラントの実際の値に近づいたことで、オーバーシュートによる上限値違反を起こすことなく目標値へと追従していることが確認できる。

以上のように、提案手法は制御・最適化された通常操業中のプラントデータからモデル推定に適した区間を選択し、モデルを推定することができる。これにより、必要な精度を満たしたパラメータ値でモデルを更新できる。また、それにより、制御性能を維持できることを示した。

6. おわりに

本報告では通常操業中のプラントデータからプラントのモデルを推定し、自動更新する技術について説明した。本技術はCO₂削減など高度制御による顧客価値の維持に有効だと考えられる。なお、この技術を用いたプラントモデル更新機能がSORTiAの新機能として開発済みであり、SORTiA-IMB (IMBはIntelligent Model Builderの略) として提供される。

通常操業中のプラントデータはモデル推定に適さない区間を多く含む。そのため、プラントの時系列データを複数区間に分割し、その中から推定に利用可能な区間を自動で選択する手法を新たに開発した。これは、モデルのパラメータ

の確率分布を推定し、分布の分散が小さい区間を選択することで実現している。本手法は通常操作中のデータがあれば適用可能なので、ユーザーの負担が小さい、プラント操業への影響が無いという利点がある。

本手法実現には、動的モデルのパラメータの確率分布を推定する手法が必要となった。これは、逐次モンテカルロ法的一种であるパーティクルフィルタに基づく手法により、パラメータをベイズ推定することで実現した。

また、モデル予測制御で制御・最適化されたプラントを想定した数値シミュレーションを行い、提案手法によりモデル更新に適した区間が選択されること、その区間で推定されたモデルを用いることで更新前より制御性能が改善されることを示した。

アズビルは、今後も制御・最適化技術を通じて、CO₂削減やオペレーション負荷低減に貢献していきたいと考えている。

＜参考文献＞

- (1) 田原鉄也, 藤江真也. “モデル予測制御に基づいた高度プロセス制御ソリューション”, azbil Technical Review, 2014年, Vol. 55, pp. 40-48, アズビル株式会社
- (2) S. Yamauchi, T. Watanabe, J. Nishiguchi. Recursive Process Model Update Based on Parameter Posterior Distribution, the 22nd IFAC World Congress, 2023
- (3) N. Chopin, O. Papaspiliopoulos. An Introduction Sequential Monte Carlo, Springer, 2020
- (4) 樋口知之, 予測にいかす統計モデリングの基本: ベイズ統計入門から応用まで, 2011年, 講談社
- (5) 足立修一, 丸田一郎, カルマンフィルタの基礎, 2012年, 東京電機大学出版局

＜商標＞

SORTiAはアズビル株式会社の商標です。

＜著者所属＞

- | | |
|-------|--------------------------|
| 田原 鉄也 | アズビル株式会社
AIソリューション推進部 |
| 川越 貴啓 | アズビル株式会社
AIソリューション推進部 |

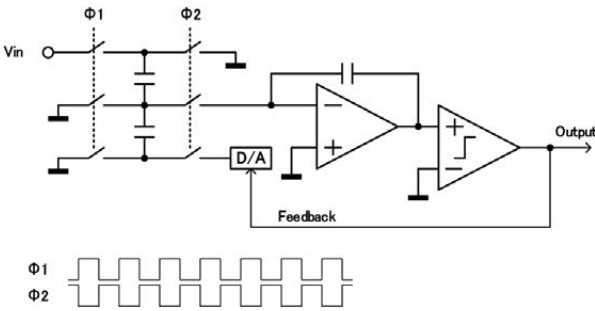


図7 従来型の $\Delta\Sigma$ 変調回路の回路図(上)とタイミングダイアグラム(下)

図7に示した回路は、スイッチトキャパシタと呼ばれる回路方式であり、アナログ電圧を容量への充電電荷として入力し、タイミングダイアグラムに示したタイミングでスイッチの状態をOpenとCloseとで切り替えて、電荷の充放電することで入力信号の積分を行う。従来型の回路では、オペアンプの反転入力端子と出力端子に接続した積分容量に、入力信号の積分値が電荷として保存される。

図8に提案する $\Delta\Sigma$ 変調回路の回路図を示す。

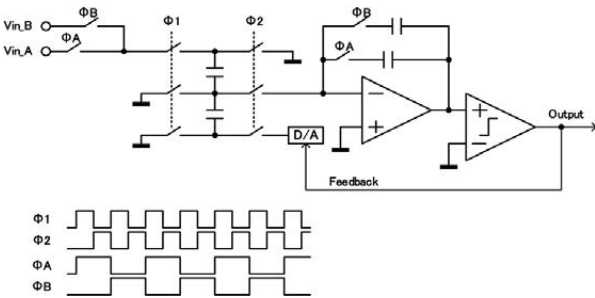


図8 新規設計のインターリーブ型 $\Delta\Sigma$ 変調回路の回路図(上)とタイミングダイアグラム(下)

新規設計の回路は、インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ 変調回路と呼称している。特徴は、複数の入力チャンネルの信号を切り替える選択回路と、入力チャンネル数と同数の積分容量を持つことである。例えば、チャンネルAの積分を行うときには、チャンネルAのスイッチをClose、チャンネルBをOpenにすることで、チャンネルAの入力信号が積分される。その間はチャンネルBの充電電荷、すなわち信号の積分値が保存される。図8のタイミングダイアグラムに示したように、入力チャンネルA、Bの選択を、積分動作1回ごとに切り替えることで、複数の入力チャンネルの積分動作を並列に行うことができる。

提案するインターリーブ型 $\Delta\Sigma$ 変調回路を持つA/D変換回路をインターリーブ型 $\Delta\Sigma$ ADCと呼称し、2入力の回路例での構成を図9に示す。

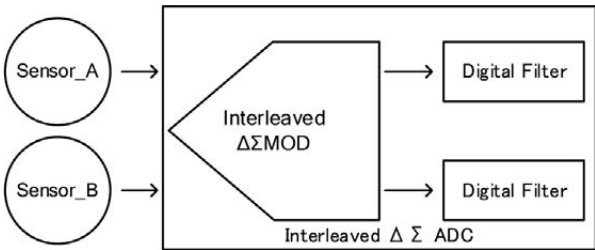


図9 インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ ADCの全体構成

インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ 変調回路から入力チャンネル2系統に対応する変調信号が並列に出力されるため、後段には2系統のデジタルフィルタを実装する。図9では簡易のためにデジタルフィルタを2系統並列に示しているが、内部の共通化により単純な並列実装ではない⁽⁴⁾。

2系統のデジタルフィルタで、量子化ノイズの除去とデシメーション(ダウンサンプリング)を行うことで、リセットを行わずに複数チャンネルをA/D変換することができる。このインターリーブ型 $\Delta\Sigma$ ADCのデータ更新タイミングを、図10に示す。

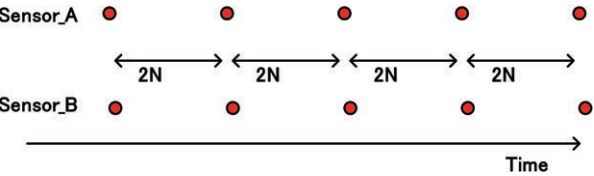


図10 インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ ADCのデータ更新のタイミング

入力チャンネル2系統の積分動作を交互に行うため、各チャンネルの変調信号N点を出力するには2N点分の時間がかかるが、デジタルフィルタのリセットが不要なので、図6で示したレイテンシが原理的に発生しなくなる。チャンネル間の時間差は、オーバーサンプリングを行う $\Delta\Sigma$ 変調回路のサンプリング周期程度であるため、入力信号の時間変化に対して十分に短い時間となる。

3.2 試作回路の設計

3.1で示したインターリーブ型 $\Delta\Sigma$ 変調回路を実際に検証するため、IC用の試作回路を設計し、評価によって動作確認を行った。図11に、試作を行ったインターリーブ型 $\Delta\Sigma$ 変調回路の回路図を示す。

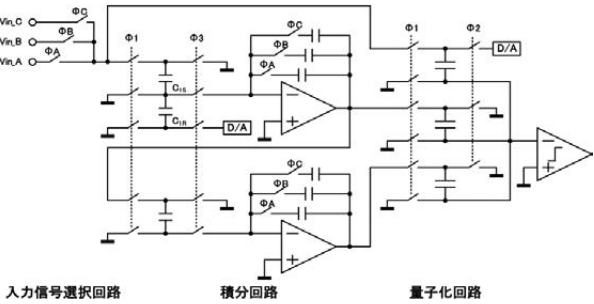


図11 試作版インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ 変調回路の回路図(一部を簡略化して記述している)

図11の回路は、2次 $\Delta\Sigma$ 変調回路⁽⁵⁾として設計しており、入力信号と出力の変調信号との差分の積分を2段階行う。後段の量子化回路で、入力信号と1段目、2段目の積分回路の出力を加算した信号をA/D変換して、変換結果を積分回路のD/A変換回路にフィードバックする。

また、図11では簡略化のためにシングルエンド入力の回路として記述しているが、実際の試作回路は、入力信号の共通モードノイズを抑制するために、差動入力型として設計している。

$\Delta\Sigma$ 変調回路のサンプリング周波数は100kHzとした。電

源電圧は3.3V、消費電流は230uA程度である。試作回路は、3チャンネルを並列でA/D変換する設計としており、入力信号の選択回路と積分容量は3チャンネル分搭載している。今回は、3系統の入力チャンネルA、B、Cに対して、チャンネルAを高精度が求められるメインセンサ用、チャンネルB、Cをサブセンサ用と定めて、チャンネルAの平均処理回数を高めるために、並列変換時のチャンネルの切り替え順を、チャンネルA→B→A→Cの順とした。これにより、チャンネルAのサンプリング周波数が、チャンネルB、Cの2倍となり、2.1で示したオーバーサンプリングによる雑音の低減の効果が大きくなる。1回の入力信号のサンプリングと積分動作の時間が10us(100kHz)となるようタイミング制御を行うため、各チャンネルのサンプリング周期は、チャンネルAが20us(50kHz)、チャンネルB、Cが40us(25kHz)となる。

3.3 試作回路の実装と評価

インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ ADCの機能実証のため、図11で示した回路を搭載したICを試作し、A/D変換の機能評価を行った。IC内部の試作回路を図12に示す。試作回路は、180nm世代のCMOSプロセスで設計した。

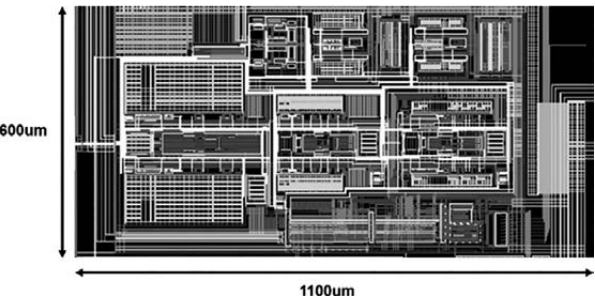


図12 試作ICのマスクパターン図(インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ ADC周辺)

次に、この試作回路の評価について以下に示す。

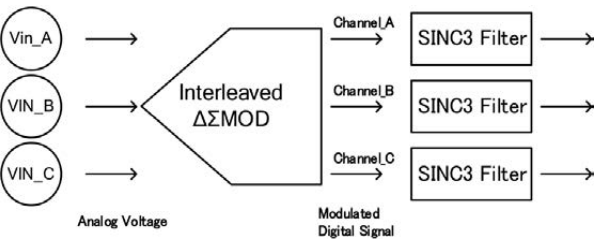


図13 インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ ADCの評価

インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ ADCの3チャンネルの入力端子にそれぞれDC電圧を入力し、出力された変調信号に対してSINC3フィルタを用いて雑音除去とダウンサンプリングを行い、A/D変換値を取得した。概略は図13に示す。

評価においては、各チャンネルに与えた入力電圧とA/D変換値が対応しているかを確認し、複数チャンネル並列のA/D変換機能を検証した。A/D変換値の平均値と標準偏差を求め、その平均値と入力電圧との関係からゲイン(感度)を導出し、標準偏差をA/D変換回路の雑音とした。

同じ入力信号帯域での比較を行うため、各チャンネルのSINC3フィルタの平均長Nは、それぞれのデータ更新周期を

10msになるよう、チャンネルAは500、チャンネルB、Cは250とした。

図14に、各チャンネルのA/D変換値を示し、図15に、チャンネルAのA/D変換値の偏差を拡大した図を示す。また、表1に解析結果を示す。

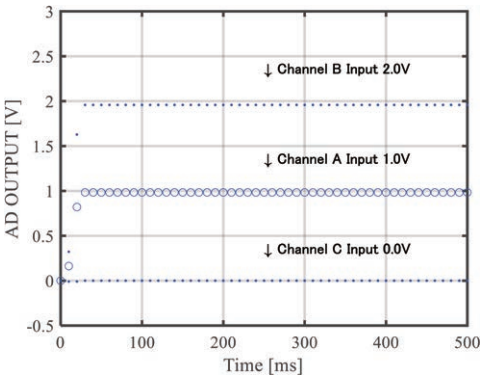


図14 DC電圧入力時のA/D変換値

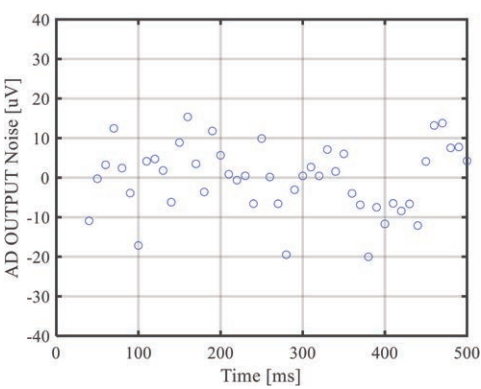


図15 チャンネルAのA/D変換値の偏差

表1 DC電圧入力時のA/D変換値の平均値と標準偏差

入力チャンネル	入力電圧	平均長N	A/D変換値平均値	A/D変換値標準偏差
チャンネルA	1.0V	500	0.983V	8.6uVrms
チャンネルB	2.0V	250	1.958V	14.7uVrms
チャンネルC	0.0V	250	0.001V	10.0uVrms

図14、図15および表1に示した評価結果からの考察を以下に示す。

各チャンネルの入力電圧と表1のA/D変換値の平均値を比較すると、1.7%程度の誤差があるが、傾向としては入力電圧と一致している。インターリーブ型 $\Delta\Sigma$ 変調器を用いた複数チャンネル並列のA/D変換動作は想定通りに動作していると考えられる。1.7%の誤差については、入力電圧の絶対値が大きい条件で誤差が大きいことから、入力電圧に対するゲイン(感度)誤差が発生していると考えられる。この誤差は、図11のスイッチトキャパシタ回路において、入力信号用の容量と出力の負帰還用の容量とがミスマッチを起こしたことが原因であると考えられる。IC回路内の寄生素子抽出を行った結果、寄生容量が原因で前述の箇所の容量ミスマッチが起こっていたことが分かった。ゲイン誤差はキャリブレーション等で補正できるので大きな問題ではないと考えている。

次に、表1のA/D変換値の標準偏差をA/D変換時の雑音として解析を行う。A/D変換値の標準偏差は8.67～14.7uVrms程度であり、雑音のピーク幅は標準偏差の6倍として、52～88uV程度となる。

雑音とフルスケール電圧との比からノイズフリーで使える実効的な分解能を導出する。試作回路は、差動入力型かつ基準電圧3.3Vであるため、入力電圧の範囲は-3.3Vから+3.3V、フルスケール電圧は6.6Vとなる。雑音のピーク幅とフルスケール電圧の比は216～217程度であるため、実効的な分解能は16～17bit程度となる。

また、チャンネル間で雑音を比較すると、チャンネルAの値がチャンネルB、Cと比較して小さい。3.2に記載した通り、チャンネルAはメインセンサでの使用を想定して、他のチャンネルよりオーバーサンプリング比を上げる設計にしていたため、雑音をより低減できたと考える。

最後に、今回の試作で課題とした、A/D変換時のセンサ間のレイテンシの低減と、消費電力の低減について考察する。

レイテンシについては、複数チャンネル並列でのA/D変換動作を達成できたことから、入力チャンネルの切り替え時に生じるレイテンシは低減できた。複数チャンネル間のA/D変換の時間差は、ΔΣ変調回路のサンプリング周期である10～20us程度であり、10ms程度のデータ更新周期に対して十分に小さい値である。複数チャンネルごとのA/D変換器を用いないため、その消費電力も市販品を使う場合に比べて削減できる。

4. おわりに

本報告により、複数チャンネルを並列でA/D変換可能なインターリーブ型ΔΣADCの試作と評価を行い、実際に複数チャンネル並列でのA/D変換動作を確認できた。精度に関しても、データ更新周期10msで16bit以上の精度を実現できることから、産業用計測機器の用途としても幅広く利用できる と考える。

今回の報告を通じて、ディスクリートの部品では解決が難しい設計課題に対して、カスタムICが有用であると示せたと考える。さらに回路の消費電力を最適化することや、寄生容量由来のゲイン誤差の対策等の性能改善など、更なる性能向上を今後のテーマとして取り組み、今後も弊社製品の性能強化改善に向けたIC設計技術を継続的に強化・発展させていきたいと考えている。

<参考文献>

(1) J. C. Candy and G. C. Temes, Oversampling Delta-Sigma Data Converters. IEEE Press, 1992.
(2) S. R. Norsworthy, R. Schreier, and G. C. Temes, Delta-Sigma Data Converters. IEEE Press, 1997.
(3) Schreier and G. C. Temes, Understanding Delta-Sigma Data Converter. Wiley-Interscience, 2005.
(4) Hideki Kuribayashi and Tetsuya Kajita, “Area-Efficient Decimation Filter with 50/60Hz Power-Line Noise Suppression for ΔΣA/D Converters”,

SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 10, No. 3, pp. 165-169, May 2017.

(5) J.Silva, U.Moon, J.Steensgaard and G.C.Times, “Wideband low distortion delta sigma ADC topology,” Electronics Letters, vol.37, no.12, pp. 737-738, June 7 2001.
(6) Hiroaki Teshima, Taichiro Kato, and Tetsuya Kajita, “No-Latency Interleaved Delta-Sigma ADC for Multiple-Sensor Interfacing Circuits”, Proceedings of SICE Festival 2024 with Annual Conference, pp.833-837.

<著者所属>

手島 紘明	アズビル株式会社 技術開発本部基幹技術部3グループ
加藤 太一郎	アズビル株式会社 技術開発本部基幹技術部3グループ
梶田 徹矢	アズビル株式会社 技術開発本部

大規模言語モデルを基盤とした 法務契約文書リスク評価手法

A risk assessment method for legal contract documents based on large language models

楓川 滉人
Hiroto Kaedegawa

立川 雄一
Yuichi Tachikawa

キーワード

大規模言語モデル (LLM), 自然言語処理 (NLP), 生成AI, 検索強化生成 (RAG), AIによる情報検索, AI良否判定

本稿は, 大規模言語モデル (LLM) と検索強化生成 (RAG) を基盤とした法務契約文書のリスク評価手法を提案する。従来の手法では, 自社基準への適応や複雑な文脈を持つ長文条項への対応に課題があり, リスク評価の精度に限界があった。本手法は, RAGを活用した参考情報の統合に加え, 偽陰性削減と動的ウィンドウサイズ調整を組み合わせることで, リスク評価と修正案生成の精度を大幅に向上させた。これにより, 法務契約文書のみならず, 他分野の専門的文書への応用可能性も期待できる。

This paper proposes a risk assessment method for legal contract documents based on large language models (LLMs) and retrieval-augmented generation (RAG). Traditional methods have struggled in adapting to company-specific standards and addressing lengthy clauses with complex contexts, which limited the accuracy of risk assessments. The proposed method significantly improves the accuracy of both risk assessment and the generation of revision proposals by integrating reference information using RAG and combining false negative reduction with dynamic window size adjustment. This approach is expected to be applicable not only to legal contract documents but also to specialized documents in other fields.

1. はじめに

法務部門では, コンプライアンス強化に伴い契約書のリスク評価やチェック業務が増加し, 業務負担の軽減と効率化が急務となっている。

一方, 人工知能 (AI) 技術の進展により, 自然言語処理 (NLP) 分野では大規模言語モデル (LLM: Large Language Model) が注目を集めている。LLMは膨大なテキストデータを用いて訓練され, 文章の生成, 要約, 質問応答など, 人間の言語処理を模倣する高度な能力を持つ⁽¹⁾。代表的なモデルにはGPTやBERTなどがあり⁽²⁾, それぞれ異なる特性を活かして様々なタスクに適用されている。また, 生成AI (Generative AI) はデータを学習して新しいコンテンツを生成する技術である。その応用の一つである検索強化生成 (RAG: Retrieval-Augmented Generation) は, 外部データベースから関連情報を検索し, 生成タスクに組み込むことで, 従来のAIモデルよりも精度の高い回答生成を可能にする。

本稿では, LLMとRAGを組み合わせた法務契約文書リスク評価手法を提案する。RAGを活用した参考情報の統

合に加え, 偽陰性削減と動的なウィンドウサイズ調整を通じて, リスク評価と修正案生成の精度向上を目指す。

2. 既存AIリスク評価サービスの課題

既存AIリスク評価サービスを自社に導入する際には, 以下の課題があると考えられる。

- ・自社基準に対応できない: 汎用的な評価が多く, 自社基準や独自の運用要件に適合しない。
- ・評価結果の説明が不十分: 評価の理由が明確でなく, 活用が難しい。

3. システムの仕組み

本システムは, 法務契約文書を解析し, 最新の法律および自社の法務実務経験・ガイドラインに基づき, 契約文書全体の文脈を考慮した各条項のリスク評価 (4段階) と修正提案を生成する (図1)。また, 利用者からのフィードバックを反映し, 継続的な精度向上と進化を実現する仕組みを提供する。

条項名	条項内容	リスク度	コメント	修正案
第2条 (請負業務の内容及び範囲)	第2条 (請負業務の内容及び範囲) 本契約は、請負業務の内容及び範囲を明確に定めており、特定のリスク要素は含まれていないと判断されます。したがって、リスクレベルは1と評価します。	1		修正不要
第3条 (基本契約と個別契約)	第3条 (基本契約と個別契約) 本契約は個別契約に関する事項について適用する。ただし、別途甲が定めて	2	この条項は、基本契約が個別契約に適用されることを定めています。甲が別途定めた事項については乙が了承する必要があります。これは、甲が一方的に契約内容を変更する可能性を示しており、乙にとってはリスクがあると考えられます。また、乙が了承しなかった事項の具体的な範囲や内容が明示されていないため、予見性が低くなっています。	「ただし、別途甲が定めて乙が了承した事項についてはこの限りでない。」という文意を削除し、個別契約に関する事項はすべて本契約に基づくことを明確にするか、乙が了承すべき事項の具体的な範囲や内容を明示することを提案します。
第4条 (個別契約の成立)	第4条 (個別契約の成立) 個別契約は、注文書その他注文内容を明示した文書又は電磁的方法による甲からの申込みに対し、次の各号のいずれ	3	この条項は、甲が乙に対して注文を行った場合、乙が7日以内に該当の通知を戻しなかった場合には個別契約が成立すると規定している	「甲が申込みを履行した日から7日以内に乙が該当の通知を戻しなかったとき」の部分を変更する

図1 評価結果例-条項ごとにリスク度評価と修正提案

本章では, 図2に示すシステム構成を基に, 各処理や技術の役割について説明する。

- ・3.1節: システム全体の構成と各要素の相互関係を示す。
- ・3.2節: RAGによる動的情報検索と統合, Few-shot学習を活用した評価手法を説明する。
- ・3.3節: 各LLMの特性を活かし, 情報検索と評価プロセスに適用する方法を説明する。
- ・3.4節: 検索精度を高めるための参考情報の前処理手法を説明する。
- ・3.5節: ベクトル検索とプロンプト設計手法を説明する。

3.1 システム構成図

システム構成図を図2に示す。白色部分は一般タスク処理, 灰色部分は参考情報関連処理, 黒色部分はリスク評価処理である。

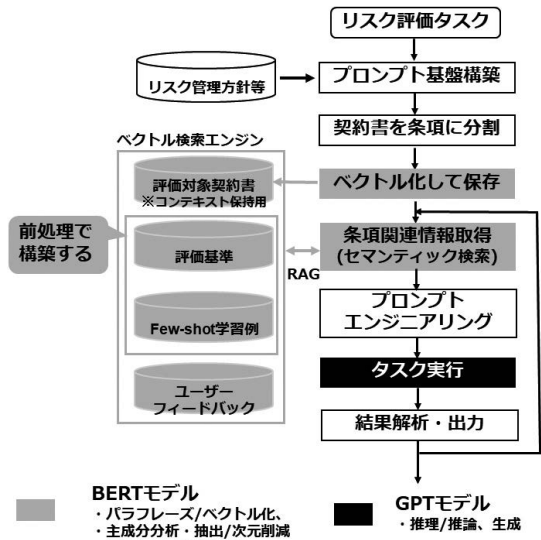


図2 システム構成図

3.2 RAGによる動的情報統合とFew-shot学習

自社基準や運用要件に特化したリスク評価を実現する一般的な手法として, モデルのFine-tuningがある。しかし, 大量のデータや学習時間を要し, 運用コストが高く, 最新情報を迅速に反映するのが難しい課題がある。本システムでは, RAGを活用した動的情報統合とFew-shot学習による柔軟な適応を組み合わせ, これらの課題を解決している。

RAGは, LLMの生成能力と動的検索を統合した技術である⁽³⁾。これにより, 外部データベースや社内ナレッジベースから最新の法令や基準, ユーザーフィードバックを検索して評価タスクに反映する。この仕組みにより, トレーニングで未学習の情報も動的に利用可能となり, 常に最新の状況に基づいたリスク評価を提供できる。また, RAGで一般的に用いられるベクトル検索は, 意味的類似性を精度高く捉える柔軟性を持ち, 法務契約文書のような文脈解釈が重要なタスクで特に効果を発揮する。

Few-shot学習では, プロンプト (指示・質問・例示) に少量の自社事例や運用要件を入力するだけで, モデルの再学習を行わずに高精度なリスク評価やコメント生成が可能となる。本システムは, RAGによる動的情報統合とFew-shot学習による柔軟なカスタマイズを組み合わせ, 迅速かつ精度の高いリスク評価を実現し, 業務効率を向上させている。

3.3 言語モデルの選定

近年, LLMの開発が進み, 高度な自然言語処理能力を持つモデルが数多く登場している。代表的なモデルには, OpenAI社のGPTモデルやGoogle社のBERTモデルがある。

表1 GPTモデルとBERTモデルの性能比較⁽²⁾

Method	CoLA		SST-2		MRPC		STS-B		QQP		MNLI		QNLI		RTE		GLUE avg.
	Acc.	Acc.	Acc.	F1	Prec.	Spem.	Acc.	F1	m.	mm.	Acc.	Acc.	Acc.	Acc.	Acc.	Acc.	
BERT-base	56.4	88.0	90.0	89.8	83.0	81.9	80.0	80.0	82.7	82.7	84.0	70.0					79.3
BERT-large	62.4	96.0	92.0	91.7	88.3	86.8	88.0	88.5	82.7	88.0	90.0	82.0					85.4
RoBERTa-base	61.8	96.0	90.0	90.6	90.2	89.1	84.0	84.0	84.0	88.0	92.0	78.0					84.7
RoBERTa-large	65.3	96.0	92.0	92.0	92.9	91.1	90.0	89.4	88.0	90.7	94.0	84.0					87.8
ChatGPT	56.0	92.0	66.0*	72.1*	80.9	72.4*	78.0	79.3	89.3*	81.3	84.0	88.0*					78.7

Table 2: Overall comparison between ChatGPT and fine-tuned BERT-style models on GLUE benchmark. The results in green denote that ChatGPT surpasses the BERT-base model by a clear margin ($> 2\%$ (1) score), while the red results denote ChatGPT under-performs BERT-base ($> 2\%$ (1) score). More specifically, *** means that the performance difference between ChatGPT and BERT-base is larger than 10%.

本システムでは, 法務契約文書の複雑なリスク評価タスクに対応するため, BERTモデルとGPTモデルの特性を活かして組み合わせて活用している。各モデルの役割は以下の通りである。

- ・BERTモデル: 表1に示すように, パラフレーズ (paraphrase) や類似性 (similarity) の評価に優れるので, 本システムではベクトル化やセマンティック検索で活用する。BERTモデルには法務分野に特化したLegal-BERTも存在するが⁽⁴⁾, 主に英語で学習されており, 日本語契約文書への適用には言語的な制約が生じる可能性がある。本システムでは, この制約を考慮し, 通常のBERTモデルを採用している。
- ・GPTモデル: 表1に示すように, 推論 (inference) や推理 (reasoning) の能力に優れている。また, CoT (思考の連鎖) やFew-shot学習をサポートする特性を持つため, 本システムではリスク評価, コメント, 修正提案の生成を担当する。

このように, BERTモデルの検索能力とGPTモデルの生成能力を補完的に活用し, 高精度かつ柔軟なリスク評価を実現している。

3.4 法務参考情報の前処理

3.4.1 参考情報の構造化

RAGの参考情報には、PDF、Excel、画像など多様な形式のデータが含まれる。これらのデータをそのままベクトル化したり、LLMに与えたりすると、文脈の理解や検索精度が低下する可能性がある。そのため、本システムでは、データをJSONやXML形式に変換して統一的に構造化している(図3)。

JSON形式を利用することで、階層的な構造を通じて情報間の関係を明確化でき、また、メタデータ(例:作成日時、出所など)を付加してLLMに与える場合、応答生成に信頼性や背景情報を加えることができ、回答のトレーサビリティを確保できる。また、この構造化により、システム処理が効率化され、モデルが情報を正確に理解しやすくなる。これにより、検索結果の精度が向上し、LLMを活用した高度なリスク評価や修正提案の生成が可能となる。

```
},
  "所有権移転": {
    "移転時期": [
      {
        "情報種類": "参考事例",
        "契約内容": "代金完済よりも早いタイミング（例：検査合格時）で所有権が移転する。",
        "リスク度": 2,
        "コメント": "*****",
        "修正ポイント": "*****",
        "関連情報": ["*****", "*****", "*****"],
        "タグ": ["所有権", "移転", "時期", "*****"],
        "メタデータ": {
          "作成日時": "2021-06-01T00:00:00",
          "出所": "*****"
        }
      }
    ]
  }
},
"所有権移転の条件": [
```

図3 データ構造化(JSON形式)例

3.4.2 参考情報のベクトル化・次元削減

(1) 参考情報のベクトル化

参考情報に付与されたタグ(例:["所有権", "移転", "時期", ...])をスペースで連結し、テキストシーケンスとしてBERTモデルの入力データとする。このシーケンスをBertJapaneseTokenizerでトークナイズし、生成されたトークン列をBERTモデルに入力してベクトル化を実施する。BERTモデルの隠れ層は768次元で構成されているため、各参考情報は768次元のベクトルで表現される。このベクトルは検索や類似度計算に使用される。

(2) 主成分分析(PCA)による次元削減

PCAは、情報の重要な要素を保持しつつベクトルの次元を削減する手法であり、計算効率の向上やメモリ使用量の削減が期待される。図4に示す本システムの参考情報では、タグのベクトルを32次元に削減した場合、累積分散比が95%に達することが確認された。これにより、検索精度をほぼ維持しながら処理効率を向上させる可能性が示唆される。一方、評価対象である条項部分は未知の内容を含むため、次元削減が累積分散比や検索精度に与える影響は評価対象ごとに異なる可能性がある。そのため、次元削減の適用には精度と効率のトレードオフを考慮し、適切な運用が求められる。

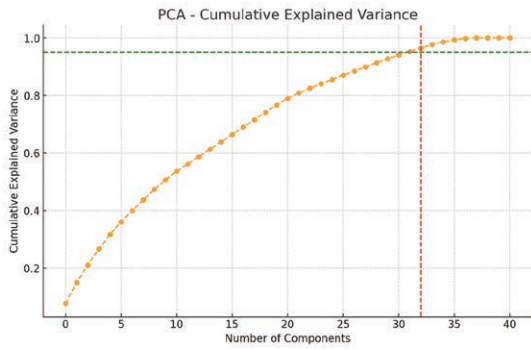


図4 PCAによる次元削減と累積分散比の関係

3.4.3 参考情報の前処理結果格納

前処理で生成された参考情報のベクトルや、構造化された参考情報内容をベクトル検索エンジン(例:Azure AI Search)に格納する。図5は、本システムにおけるAzure AI Searchインデックスの構造例を示しており、RAG参考情報の検索と効率的な取得を支える基盤である。

フィールド名	型	説明
id	String	参考情報id
refer_vector	SingleCollection	参考情報ベクトル
reduced_vector	SingleCollection	参考情報ベクトル (次元削減)
refer_info	String	参考情報内容 (構造化済)
risk_level	Int32	リスク度 (リスク事例: 1~4、その他参考情報: 0)
metadata	String	メタデータ

図5 Azure AI Searchインデックス例

3.5 LLMによるリスク評価

3.5.1 コサイン類似度によるベクトル検索

法務契約条項をベクトル化し、それを使用して、参考情報のタグのベクトルをコサイン類似度で検索する(図5のインデックスを使用)。この検索プロセスでは、評価対象と参考情報の間の類似性を評価し、関連情報を抽出する。

コサイン類似度は、ベクトルの長さに影響されず、ベクトル間の方向性を基に高次元ベクトル間の意味的な類似性を効率的に評価できる手法である⁽⁵⁾。これにより、契約条項やタグのようにデータの長さが異なる場合でも、検索精度を維持しつつ契約文書の文脈的関連性を的確に評価可能である。

本システムでは類似度が0.8を超えるFew-shot学習例を含む関連情報を抽出し、リスク評価に活用する。

3.5.2 プロンプト設計による業務適応

本システムでは、systemロールとuserロールを活用して情報を役割ごとに整理している。図2に示すように、プロンプト基盤構築では、systemロールに自社のリスク管理方針などの全体ルールや指示を、プロンプトエンジニアリングでは、userロールにFew-shot用事例などの具体的な参考情報を設定する。これにより、プロンプトが自社の判断基準や運用要件へ柔軟に適応する設計が可能となる。

また、評価結果を構造化形式(例:JSON)で生成する指示

を加えることで、後続プロセスの効率化を図っている。

4. 偽陰性削減によるリスク検出強化

リスク評価においては、偽陰性(リスクの見逃し)の削減が重要な課題である。本章では、リスク検出度を高める手法を説明する。

4.1 リスク関連参考情報の拡充

過去の法務実務や類似契約事例を基に、リスク要素を軸として事例を体系的に分類し、参考情報のタグを具体化・階層化してベクトル検索の精度を向上させる(図2の前処理構築部分)。また、ユーザーフィードバックを組み込む動的更新の仕組みを導入し、参考情報を迅速に補強することで、検出網羅性を高める。

4.2 プロンプト設計によるトレードオフ

(1) リスク検出優先指示と根拠提示

図2のプロンプト基盤構築では、systemロールへリスク検出を最優先とする方針を明示し、誤検出を許容するよう指示する。また、検出結果には参考情報と類似度スコアを提示させることで、誤検出(偽陽性)時の人間対応の負担を軽減する。

(2) コサイン類似度の動的しきい値調整

参考情報(リスク事例、図5)のリスク度 R_c (1~4)に基づき、類似度しきい値を以下の式で動的に調整する。

$$T = T_b - \beta (R_c - 1) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 T_b は基準しきい値(例:0.8)、 β は調整係数(例:0.05)である。事例のリスク度が高い場合にはしきい値を低く設定し、リスク事例を広く抽出することでリスク検出の網羅性を高める。

5. リスク重要度と文脈分散度に基づく動的ウィンドウサイズ調整

ウィンドウサイズはLLMが一度に処理するテキストの範囲(評価対象)を指す。本章では、動的にウィンドウサイズを調整する手法により、リスク評価の精度向上を目指す方法について説明する。

5.1 動的ウィンドウサイズ調整の必要性と仕組み

5.1.1 ウィンドウサイズと検索・評価精度の関係

主流のLLMはTransformer構造を基盤とし⁽⁷⁾、自己注意機構(Self-Attention)でテキストを処理するが、不適切なウィンドウサイズにより次のような問題が発生する。

(1) ウィンドウサイズが大きい場合

長文をベクトル化すると文脈が平均化され、特定の用語やリスク要素に関連する情報が埋もれる(情報の希薄化)。これにより検索精度が低下し、評価精度にも影響を与える。また、ウィンドウサイズの大きさによりモデルが重要情報に

十分な注意を割けず、評価精度が低下する(注意分散)。さらに、トークン数が増加すると自己注意機構内の誤差が累積し、特に文脈が複雑な場合には評価精度がさらに低下する(累積誤差の増加)。

(2) ウィンドウサイズが小さい場合

文を細かく分割すると文脈が分断され、文章の前後関係が失われる(文脈損失)。これにより検索精度が低下するだけでなく、評価の一貫性も損なわれる。

5.1.2 法務契約文書の特性とウィンドウサイズ設定

法務契約文書は、以下の特性を持つため、一つの条項をそのまま処理する場合や固定的なウィンドウサイズで処理する場合には、検索および評価精度が低下する。

(1) 条項ごとのリスク重要度の多様性

損害賠償や情報提供など、条項ごとにリスクの重要度が異なる。リスク重要度の高い条項では詳細な分析が必要なため、小さいウィンドウサイズが適する。一方、リスク重要度の低い条項では、大きなウィンドウサイズを適用して効率を優先できる。この特性を考慮しない場合、リスク要素を見逃したり、過小評価したりする可能性がある。

(2) 長文条項

一つの条項をそのまま処理したり、大きいウィンドウサイズで処理したりすると、情報の希薄化、注意分散、累積誤差の増加により、検索および評価精度が低下する。

(3) 複雑な文脈構造

文脈が絡み合う条項では、小さい固定的なウィンドウサイズで処理すると文脈が分断される(文脈損失)。

5.1.3 本手法の仕組み

(1) リスク重要度に基づく調整

条項別のリスク重要度の違いに対応するため、以下のよう

- ・リスク重要度が高い条項:小さいウィンドウサイズを適用し、詳細な分析を可能にすることで重要なリスクを見逃さない。
- ・リスク重要度が低い条項:大きなウィンドウサイズを適用し、処理効率を向上させる。

(2) 文脈分散度に基づく調整

文脈分散度は、文同士の関連性の強さを示す指標であり、分散度が高い場合は文脈が広範囲に分散していること、低い場合は文脈が一貫していることを意味する。

- ・文脈分散度が高い場合:小さいウィンドウサイズを適用することで、分散した文脈を個別に扱い、関連性の低い内容の平均化(情報の希薄化)を防ぐ。また、局所的な文脈や条件間の依存関係を正確に捉えることが可能になる。
- ・文脈分散度が低い場合:大きなウィンドウサイズを適用して処理効率を優先する。この場合、文脈の一貫性が強い

5.2 ウィンドウサイズ動的調整プロセス

本手法は、評価対象のリスク要素(リスク特性に基づく重

要度)と文脈分散度に応じてウィンドウサイズを動的に調整する。そのプロセスは次のようになる(図6)。

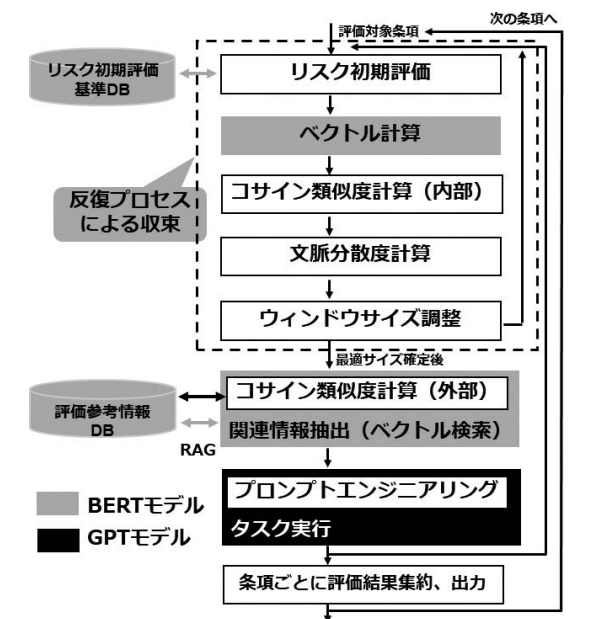


図6 動的ウィンドウサイズ調整手法

5.2.1 評価対象のリスク初期評価

(1) 初期評価リスク度 R の設定
評価対象に含まれるリスク要素に応じて、リスク特性に基づく重要度を示すリスク度 R を設定する。重要項目(例: 損害賠償, 責任範囲)は高く, 低リスク項目(例: 情報提供)は低く設定する。

- ・リスク事前評価基準: 条項全体リスク $R_{article}$ と個別リスク R_{indi} を, リスク要素名とリスク度 (1~4) でリスク事前評価基準DBに登録する。
- ・リスク度計算:
 - a. 総合リスク R' を計算:

$$R'=R_{article} \times \prod_{i=1}^n R_{indi}$$
 式(2)

ただし, $R' > R_{max}$ の場合, $R'=R_{max}$ とする。
b. スケーリング: R' を 0.5~1 の範囲にスケーリング:

$$R=R_{scaled}=0.5+0.5 \times \left(\frac{R'-R_{min}}{R_{max}-R_{min}} \right)$$
 式(3)

ここで, R_{min} = 1 とする。
(2) ウィンドウサイズの初期設定と初期評価
評価対象の条項に対し, トークン数を初期ウィンドウサイズ $W_{initial}$ に設定する。以下の制約を設ける。

$$W_{min} \leq W_{initial} \leq W_{max}$$
 式(4)

- ・最低トークン数: 文書の適切なコンテキスト保持のため W_{min} = 50 を設定。
- ・上限トークン数: 情報希薄化を防ぐため W_{max} = 300 を設定。

- ・条項のトークン数が W_{min} 未満の場合, $W_{initial}$ = W_{min} 。
- W_{max} を超える場合は $W_{initial}$ = W_{max} とする。

5.2.2 文脈分散度計算

本手法では, 文脈分散度は評価対象各文同士のコサイン類似度を基に計算し, 0~1 の値を取る。
a. 類似度の計算: 各文をベクトル化し, 全ての文ペア間でコサイン類似度を計算する。
b. 平均類似度の計算:

$$avg_cos_sim = \left(\frac{\sum_{i < j} cos_sim(v_i, v_j)}{n(n-1)/2} \right)$$
 式(5)

ここで, $cos_sim(v_i, v_j)$ は文 i と文 j のコサイン類似度。
c. 文脈分散度の定義:

$$cd_score = 1 - avg_cos_sim$$
 式(6)

5.2.3 動的ウィンドウサイズ調整

ウィンドウサイズは初期評価リスク度と文脈分散度に基づき, 次の式で動的に調整される。

$$W_{new} = W_{current} \times (1 + \alpha \cdot (1 - R) \cdot (1 - cd_score) - \beta \cdot R \cdot cd_score)$$
 式(7)

W_{new} : 調整後のウィンドウサイズ
 $W_{current}$: 現在のウィンドウサイズ
 α : 拡大係数 (ウィンドウサイズ拡大時に使用する係数。
例: 0.3~0.5)
 β : 縮小係数 (ウィンドウサイズ縮小時に使用する係数。
例: 0.3~0.5)
 R : 初期評価リスク度 (0.5~1)
 cd_score : 文脈分散度 (0~1)

この式は, Transformer の自己注意機構の原理を基に構築されている⁽⁷⁾。これにより, リスク重要度と文脈分散度に応じた動的なウィンドウサイズ調整が可能となる。リスク重要度や文脈分散度が高い場合には小さいウィンドウサイズを適用して詳細な分析を行い, 低い場合にはウィンドウサイズを拡大して処理効率を向上させる。

5.2.4 反復プロセスの収束

(1) 収束条件
反復プロセスは以下の条件を満たした場合に終了する。

$$|W'_{new} - W_{current}| < W_{current} \times \varepsilon$$
 式(8)

ε : 収束しきい値 (2~3% が妥当)
(2) 文単位でのトークン数調整
最適トークン数 W'_{new} 前後で最も近い文の終わりを特定し, W_{new} を決定する。必要に応じて文脈変化位置の特定手法も併用可能である。

6. 評価・考察

6.1 評価結果

評価結果を表2~表4に示す。RAG構成には以下の3つのパターンがある。

- ・パターンA: 偽陰性削減対策および動的ウィンドウサイズ調整を未実施
- ・パターンB: 偽陰性削減対策を実施, 動的ウィンドウサイズ調整は未実施
- ・パターンC: 偽陰性削減対策と動的ウィンドウサイズ調整を両方実施

表2 リスク度に基づく各手法の精度比較

リスク度 (4段階評価)	GPT	RAG構成 (BERT+GPT)		
		パターンA	パターンB	パターンC
正解率 (%) $R_s = R_e$	34	70	71	80
過大評価率 (%) $R_e > R_e$	51	18	22	17
偽陽性率 (%) $R_s > 1 \wedge R_e = 1$	48	18	21	16
過小評価率 (%) $R_s < R_e$	15	12	7	3
偽陰性率 (%) $R_s = 1 \wedge R_e > 1$	7	10	4	2

R_s : システムのリスク評価値
 R_e : 専門家のリスク評価値

表3 リスク検出有無(2値分類)に基づく各手法の精度比較

リスク検出有無※ Binary Classification	GPT	RAG構成 (BERT+GPT)		
		パターンA	パターンB	パターンC
正解率 (%) $(TP + TN) / N$	44	72	75	82
適合率 P (%) $TP / (TP + FP)$	20	37	44	54
再現率 R (%) $TP / (TP + FN)$	59	50	82	91
F値 (%) $(2 \times P \times R) / (P + R)$	30	42	57	68

※リスク度=1: リスクなし リスク度=2~4: リスクあり
 TP : 真陽性 TN : 真陰性 FP : 偽陽性 FN : 偽陰性 N : 全データ数

表4 修正案に基づく各手法の精度比較

修正案の正確性※	GPT	RAG構成 (BERT+GPT)		
		パターンA	パターンB	パターンC
完全一致率 (%)	9	36	45	73
部分一致率 (%)	55	14	36	18
不一致率 (%)	36	50	18	9

※リスクありの条項について, 修正案を法務専門家が提示する修正案と比較し, 一致率を計算

6.2 分析・考察

表2~表4の評価結果から, RAG構成 (cl-tohoku/bert-base-japanese (Hugging Face Transformersライブラリ v4.41.2) +GPT-4o) を用いることで, GPT-4o単独と比較して法務契約文書のリスク評価と修正案生成の精度が大幅に向上することが確認された。特に, パターンCではリスク度の正解率80%(表2), リスク検出有無の再現率91%(表3), 修正案の完全一致率73%, 部分一致率18%(表4)に達し, リスク検出と修正案生成の両面で最も優れたパフォーマンスを示した。一方, GPT-4o単独ではリスク度の正解率34%(表2), リスク検出有無の再現率59%(表3), 修正案の完全一致率9%, 部分一致率55%(表4)と低く, RAG構成の重要性が明確となった。適合率の一部低下は偽陰性削減を優先した結果であり⁽⁸⁾, 業務要件に応じた調整が必要である。また, RAG構成に動的ウィンドウサイズ調整を組み合わせることで, さらなる精度向上

が実現された。

7. 今後の展望

提案手法は法務契約文書のリスク評価と修正案生成に有効であることが確認されたものの, さらなる改善が必要である。本手法を補助的ツールとして活用しつつ, 法務部署では判定基準や事例の精査・詳細化, リスク事例の追加が求められるほか, 特定の契約について法務を介さずに契約チェックを行う運用方法の検討も重要である。一方, 開発部署では, 現場での適用性を評価し, 法務以外の文書への応用可能性を探ることで, 本手法の汎用性を高めることが期待される。

8. おわりに

本システムは, RAG構成を採用し, 外部情報を動的に統合することで, 大規模なトレーニングを必要とせず, 最新情報を迅速かつ低コストで反映可能な法務契約文書リスク評価手法を実現した。さらに, Few-shotを活用し, 偽陰性削減と動的ウィンドウサイズ調整を組み合わせることで, 評価精度の向上を達成した。これらの成果は, 参考情報の拡張や精査を通じ, 他分野の専門文書への応用基盤となると考えられる。

<参考文献>

- (1) Qiu, X., et al.: A Survey on Pre-trained Language Models, 2020, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2003.08271>.
- (2) Zhong, Q., et al.: Can ChatGPT Understand Too? A Comparative Study on ChatGPT and Fine-tuned BERT, 2023, Retrieved from <https://arxiv.org/html/2302.10198>.
- (3) Lewis, P. et al.: Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks, 2020, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2005.11401>.
- (4) Chalkidis, I., et al.: LEGAL-BERT: The Muppets straight out of Law School, arXiv preprint arXiv:2010.02559, 2020.
- (5) Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J.: Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space, 2013, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1301.3781>.
- (6) Holtzman, A., et al.: The Curious Case of Neural Text Degeneration, 2020, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1904.09751>.
- (7) Vaswani, A., et al.: Attention is All You Need, 2017, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1706.03762>.
- (8) Manning, C., Raghavan, P., & Schütze, H.: Introduction to Information Retrieval, 2008, Cambridge University Press.

＜商標＞
Microsoft Azureは、Microsoft Corporation の商標または登録商標です。
OpenAI は、OpenAI OPCO, LLCの商標です。
GPTおよびChatGPTは、OpenAI OPCO, LLCの商標です。
BERTは、Google LLCの商標です。

＜著者所属＞
楓川 滉人 アズビル株式会社
デジタルそうぞう部
立川 雄一 アズビル株式会社
法務・リスク管理本部

個別エリア対応ユーザーミナル:ネオパネル2(QJ-1301)

Model QJ-1301 single-area user terminal

吉川 まり子
Mariko Yoshikawa

下地 裕也
Yuya Shimoji

1. はじめに

ユーザーミナルとは、オフィスやホテル等にて利用者自身が空調機器の発停や設定温度変更等の操作を行うことができる端末である。アズビルでは、1996年から個別エリア対応のユーザーミナルであるネオパネル™ (QY7205, QY7215, QY7225)を販売している。その後継機種としてデザインを一新したネオパネル2 (QJ-1301)のデザインと機能を紹介する。

2. 製品概要

ネオパネル2は、個別空調装置のエリア内の壁に設置され、空調機器の発停や温度設定、風量設定などの空調機器の各種操作を行うための操作端末である。またネオパネル2は、温度センサを内蔵しており、温度センサを別途設置することなく、室内温度が計測できる。

3. 製品デザインの特長

ネオパネル2のデザインの特長を説明する。図1にネオパネル2と従来製品のネオパネルの外観を示す。

3.1 空間となじみやすい外観

現代のオフィスやホテルの持つクリーンで洗練されたインテリアとの調和を目指し、空間へ静かになじむことをコンセプトとしたフラットなデザインを採用した。そのためネオパネル2では、静電容量式タッチセンサを採用することで表面をフラットに仕上げて空間となじみやすくした。

3.2 見やすい液晶表示

ネオパネル2では、従来製品より文字やアイコンサイズを大きくし、見やすくした。そのため、従来のネオパネルから製品サイズは変更せず、液晶 (H×W)を22mm×42mmから50mm×40mmと大きくした。

3.3 ボタン削減によるデザイン性の向上

従来のネオパネルでは、機能ごとにボタンを用意し、設定変更を行っていた。ネオパネル2では、液晶に機能メニューを表示し、機能を選択し設定変更を行うようにした。これによりボタンの数を削減し、操作性を向上させるとともに、シンプルなデザインを実現した。

3.4 選択可能なカラーバリエーション

従来のネオパネルでは標準色は白のみだが、ネオパネル2では、白と黒を標準色として用意した。これにより設置される室内環境に合わせて選択することが可能となった。



図1 製品比較

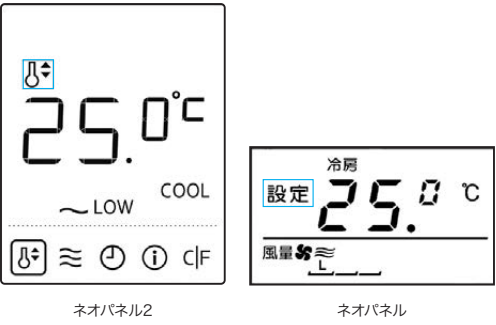
4. 機能の特長

ネオパネル2の機能の特長を説明する。

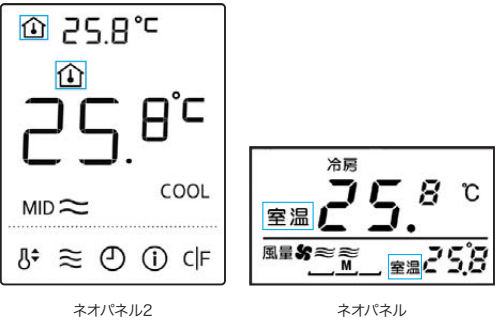
4.1 わかりやすい表示内容

表示にピクトグラムを採用することで従来のネオパネルより視覚的にわかりやすく直感的な操作が可能となった(図2)。

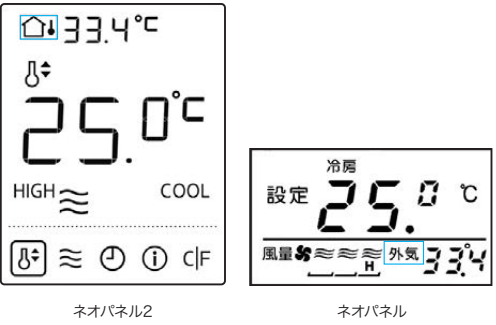
(1) 室温設定表示 (設定→設定)



(2) 室内温度表示 (室温→室温)



(3) 外気温度表示 (外気→外気)



(4) 空調停止表示 (停止→停止OFF)

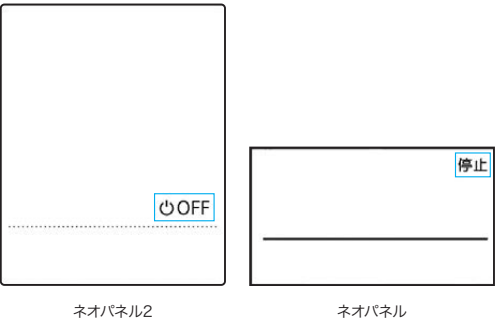


図2 表示内容

4.2. 従来製品からの容易な置き換え

従来のネオパネルからネオパネル2への置き換えを容易にできるように、設置方法を互換とした。また、既存製品の横形のネオパネル (QY7215)が設置されている場合は、専用のアタッチメントを用いることで空間になじむデザインを実現しつつ、ネオパネル2への置き換えを可能とした (図3)。

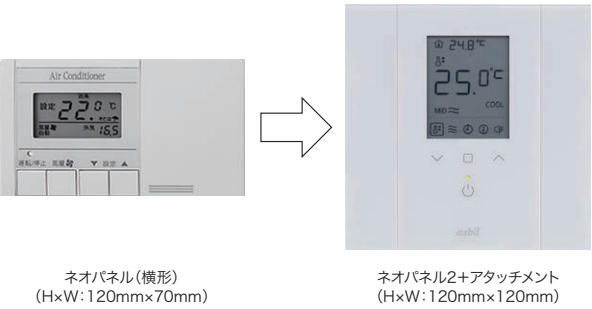


図3 横形ネオパネルからネオパネル2への置き換え

4.3. 内蔵した温度センサによる温度計測

ネオパネル2は、内蔵した温度センサにより室内温度の計測ができる。また、計測した温度が設置状況により壁面温度の影響を受ける場合は、専用のサーモプレートを用いて壁面温度の影響を軽減できる。

5. おわりに

今回開発したネオパネル2のデザインと機能を紹介した。デザインを一新したネオパネル2は、質の高いインテリア環境を求めるお客様のニーズに応える製品となっている。今後のユーザーミナルの開発においては、機能性の拡充、ユーザビリティの向上を追求していく所存である。

<商標>

ネオパネルは、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

吉川 まり子	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
下地 裕也	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

デジタル指示調節計 形 C2A/C2B/C3A/C3B 機能拡充と汎用性向上

Single Loop Controller Model C2A/C2B/C3A/C3B:
Enhanced functionality and improved versatility

本橋 勇人
Hayato Motohashi

1. はじめに

2023年にリリースした高精度・高速の小型デジタル指示調節計 形 C1Aに続き、機能の拡充と汎用性を向上した形 C2A/C2B/C3A/C3B (以降、本器という)を開発した。本器は、SDC 形 C25/26/35/36 (以降、従来器という)の後継製品である。

2. 製品概要

形 C2A/C2Bは、絶えず進化するお客様装置のニーズに応えるため、従来器に比べ精度やサンプリング周期などの基本性能を向上させ、背面端子配線を外さずにケースから本体を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、時間によりSP (Set Point)を変化させるパターン運転、プログラムレスでPLC (Programmable Logic Controller) とのデータ授受を実現するPLCリンク通信などの高い機能性を実現した。

形 C3A/C3Bは、形 C2A/C2Bの基本性能と機能性をさらに高めた上位モデルで、モータ駆動リレーモデルやRSP (Remote Set Point) 入力モデルなどの豊富なラインナップを持ち、広いアプリケーションで利用可能である。

形 C2A/C3Aは横48mm×縦96mm、形 C2B/C3Bは横96mm×縦96mmの前面サイズとなっている(図1)。

3. 製品特長

3.1 外形

表示部は、限られた表示領域で可能な限り大きく、かつ誤認しにくいセグメント文字を設計し、離れた場所からの視認性を向上させた。

操作部は、表示部と明確に分けた上で、最大限の大きさの操作キーを設計し、操作性を向上させた。

本器は、制御状態を伝える情報インターフェースでもあり、視認性と操作性を向上させることで、製品の性能と信頼性を体現した。

また、ドローアウト構造を採用することで、保守作業における配線間違い防止と迅速な交換を可能とした。



図1 本器コンソール (上:形 C3A, 下:形 C3B)

3.2 性能

本器は、PV(Process Value) 入力の回路設計、及び、測定手法を改良し、指示値の高安定性・高精度・高速サンプリングを実現した(表1)。

また、PVを含むアナログ入出力の温度ドリフトを低減させ、従来器の課題であった基準条件温度範囲を23±2℃から25±3℃へ、動作温度範囲を0～50℃から-10～+55℃へ拡張した。

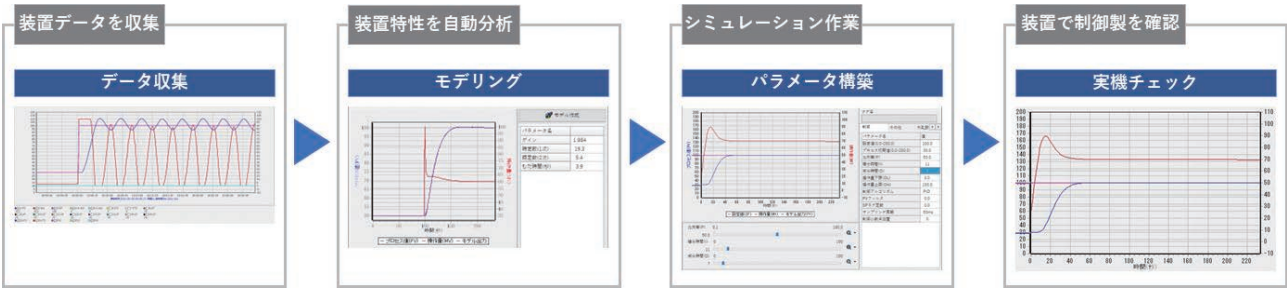


図2 PIDシミュレータの操作例

表1 PV指示精度とサンプリング周期

形番	熱電対 (*1, *2, *3)	測温抵抗体 (*1, *2)	直流電圧/電流 (*1, *2)	サンプリング周期
C2A/C2B	±0.2%FS	±0.2%FS	±0.2%FS	最小50ms
C3A/C3B	±0.1%RD	±0.1%RD	±0.1%FS	最小25ms
C25/C26	±0.3%FS	±0.3%FS	±0.3%FS	300ms固定
C35/C36	±0.1%FS	±0.1%FS	±0.1%FS	100ms固定

*1:例外レンジあり, *2:±1 digitは省略, *3:端子温度補償精度を除く
RD:読み取り値誤差, FS:フルスケール誤差

3.3 機能

本器の機能の主な特長を列挙する。

- ・形 C3A/C3Bのモータ駆動リレー出力モデルは、コントロールモータ駆動用のMFB (Motor Feedback) 入力、推定位置制御、位置比例自動調整などを備えた「位置比例制御機能」を搭載した。
- ・形 C3A/C3BのRSP入力モデルは、アナログ制御信号をSPとして取り込む「RSP機能」に加え、通信でRSPを取得する「仮想RSP機能」を搭載した。RSPの変化によるMV (Manipulated Variable)の急変を低減するPV微分型PID演算(PID-B)を選択可能。
- ・補助出力モデルは、最大2点の制御出力に加え、電流、または、連続電圧のアナログ出力1点を追加可能。
- ・16セグメントの「パターン運転機能」を搭載した。形 C3A/C3Bの拡張データメモリモデルは、16パターンまで拡張可能。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、経過時間からの復電動作可能。パターン番号、セグメント番号、SP、セグメント残り時間を1つの運転画面で認識可能。
- ・形 C3A/C3Bは、任意のモニタ値を第1～3表示部に表示する運転画面を最大8画面作成できる「ユーザー運転画面機能」を搭載した。
- ・形 C3A/C3Bは、内部接点機能による自動切り替え、または、通信／コンソールからの直接切り替えで最大8組のMVを生成する「固定値出力機能」を搭載した。組の切り替わり時のMVに傾斜を持たせるランプ動作可能。

3.4 スマートローダパッケージ

弊社Webサイトで無償提供しているエンジニアリングソフトウェア 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、制御応答の机上シミュレーションによる省エネ効果の確認やPID調整工数の低減を目

的としたPIDシミュレータを標準搭載した(図2)。

本器との接続には専用ローダケーブル (有償)を使用し、形 SLP-C1Fを実行するパソコンからのUSB給電によっても設定パラメータの読み出し／書き込みができる。

また、従来器用のSLP-C35の設定プロジェクトファイルを読み出し、本器用の設定プロジェクトファイルに変換して設定パラメータを書き込むため、従来器からのリプレースが容易である。

4. おわりに

本器の概要と特長を紹介した。豊富な製品ラインナップ、高性能、優れた視認・操作性、従来器からのリプレース簡易性などの特長を持った本器は、計装における有効な解決手段となる。

今後も、お客様の課題解決へ向けた調節計を開発していく所存である。

<商標>

SDCは、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

本橋 勇人 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
CP開発部

サファイア隔膜真空計(形V8)の開発

進化する半導体プロセス装置のニーズに合わせて、デポシフト課題の解決、小型化、高温化、高速化に対応した隔膜真空計

Development of Sapphire Diaphragm Gauge (Model V8):
A diaphragm vacuum gauge designed to meet the evolving needs of semiconductor process equipment by solving deposition shift problems and providing a compact design along with high-temperature and high-speed capabilities

小原 圭輔
Keisuke Obara

1. はじめに

半導体の成膜やエッチングプロセスで使用される隔膜真空計には、耐食性や耐熱性が求められる。アズビルは、サファイア基材のMEMSセンサチップを開発し、10年以上にわたり隔膜真空計を市場投入してきた。しかし、半導体プロセスは日々進化しており、高温化、高速化などの新たなニーズも高まっている。これらの変化に対応するため、設計や機能を抜本的に見直し、「新たなサファイア隔膜真空計(形V8)」を開発した。

2. 形V8のラインナップ

開発した形V8の外観写真を図1に示す。現行品(形SPG)と同じセンサと計測回路が一体になった一体形(形V8C)と、センサと計測回路を分離した分離形(形V8S)の2つのモデルを開発した。

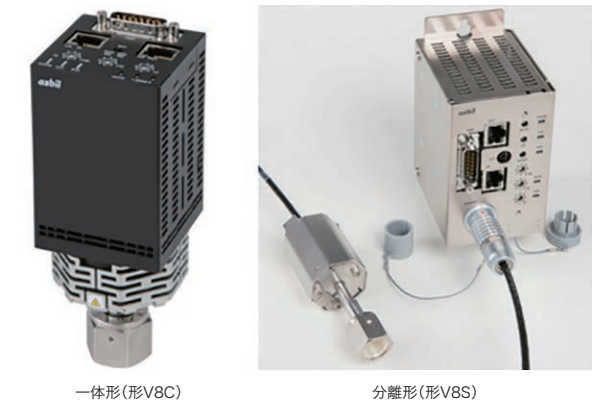


図1 形V8 外観

3. サファイア真空計の概要

3.1 サファイア材料

表1にサファイアと他材料との耐熱性、耐食性の比較を示す。サファイアはシリコンだけでなく、他の耐食性セラミックスと比較しても耐食性、耐熱性に優れた材料である。半導体のプロセスガスで使用されるフッ素や塩素といった腐食性の高いガスにも耐性を持ち、高温環境下でもその性能を維持することができる。

表1 サファイアの耐熱性、耐食性比較

		耐熱性	耐食性	
		大気中 上限可使用温度 (°C)	耐酸性	耐アルカリ性
サファイア (Al ₂ O ₃)		1950	◎	◎
シリコン (Si単結晶)		～400	△	×
石英ガラス (SiO ₂)		1200	△	△
セラミック	Al ₂ O ₃	1400-1750	○	○
	SiC	1600	○	△
	Si ₃ N ₄	1200	○	△

3.2 サファイアセンサチップ

図2にサファイアセンサチップの模式断面図を示す。感圧ダイアフラムと、コンデンサを形成するためのキャビティを持つ台座で構成され、どちらもサファイアが構成材料である。ダイアフラムと台座は耐食性、耐熱性を維持できる直接接合により接合されている。センサの大きさは約10mm角、ダイアフラムの直径は約8mmである。
ダイアフラムと台座には対向した金属電極が形成され、感圧容量C_Xと参照容量C_Rの2つの容量を構成している。感圧容量はダイアフラムの内側に形成され、圧力により容量値が変化する。感圧容量C_Xと参照容量C_Rを、式(1)を用いることにより材料の熱膨張による温度特性をキャンセルすることができ、誤差の少ない圧力計測ができる。

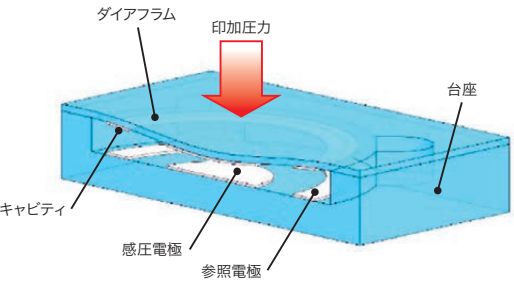


図2 センサチップ模式断面図

$$\frac{C_X - C_R}{C_X} = \frac{\frac{\epsilon F S}{d(1-aP)} - \frac{\epsilon F S}{d}}{\frac{\epsilon F S}{d(1-aP)}} = aP \quad \text{式(1)}$$

ϵ : Permittivity in Cavity
 F : Thermal expansion coefficient of sensor material
 S : Area of electrode
 d : Distance between electrodes
 a : Deflections coefficient of diaphragm
 P : Applied pressure

3.3 センサパッケージ

図3にセンサパッケージの構造を示す。耐食性と耐熱性を確保するため、サファイアセンサチップは金属リングに拡散接合で接合している。また、ケミカルゲッターポンプを用いて基準真空室を高真空に維持している。圧力導入部には平板バッフルを装備し、配管からの固形物に対してセンサチップを保護している。

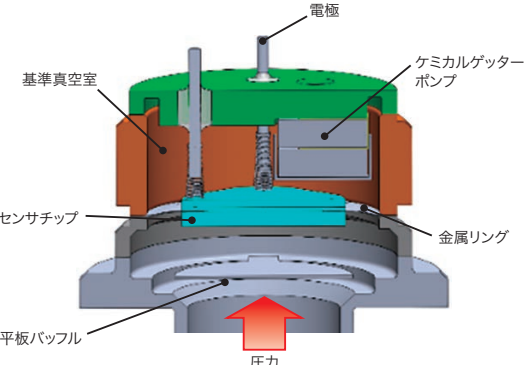


図3 センサパッケージ

4. 製品の特長

4.1 デポシフト課題の解決

半導体製造で使用する真空計では、成膜やエッチングプロセス中に生成される副生成物がダイアフラムに付着し、ゼロ点がずれるという課題がある。形V8は、MEMS加工技術を用いて、4.1.1および4.1.2で示す2つの対策構造を持つダイアフラムを開発し、耐デポ性能を現行品(形SPG)より大幅に向上させることに成功した⁽¹⁾。

4.1.1 微細凹凸構造

図4に示すように、ダイアフラムに幅約6μmの微細な溝を形成した。典型的な成膜プロセス中のガスの平均自由行程はおおよそ50μm程度であるため、これよりも狭い幅約6μmの空間にガス分子が侵入する確率は非常に低くなる。この効果により溝内に堆積が起きにくくなることを利用して堆積膜を分断して、ダイアフラムへの影響を抑制する。

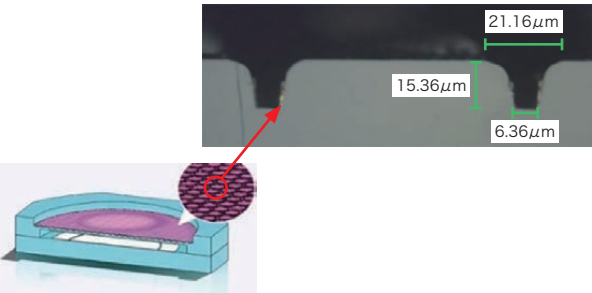


図4 凸凹センサダイアフラム、断面図

図5に、SiO₂-CVDプロセスにおけるデポシフトの評価結果を示す。従来のフラットダイアフラムに対して、微細凹凸構造は、デポによるシフト量を1/10以下に低減することができた。この構造は主にCVDプロセスで発生するような以下の特徴を持つ膜のデポに対して効果が期待できる。

- ・膜が粘性分をもつもの
- ・膜中の分子の結合が弱いもの
- ・比較的不均一に成膜されるもの

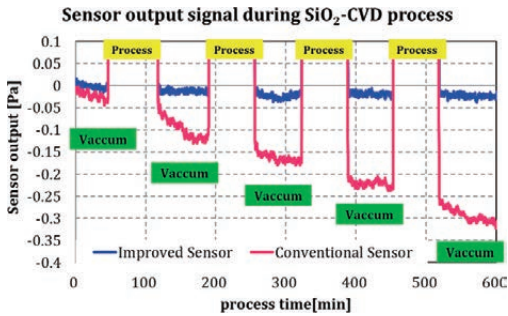


図5 SiO₂-CVDプロセス中のゼロ点挙動比較

4.1.2 フラットダイアフラム

シミュレーションを活用して、堆積膜によるダイアフラムに生じる応力に対して、力学的に変形を抑制する対策を講じた。図6に示すように、ダイアフラムの接ガス側の半径(R)を固定部半径(R₀)より拡大すると、膜応力による変位を抑えられる。

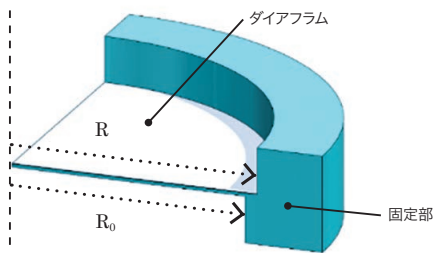


図6 モーメントバランス構造

本構造による耐デポ効果を実験で実証した。Al₂O₃のALDプロセスを模して、TMA（トリメチルアルミニウム（CH₃）₃Al）とH₂Oを交互に導入し、その前後でゼロ点を連続的に計測した。図7aにモーメントバランス構造をとらないセンサチップ、図7bにモーメントバランス構造のセンサチップの場合の結果を示す。モーメントバランス構造のセンサチップの場合は、プロセス前後でゼロ点シフトが抑えられていることが確認できる。

この構造は主にALDプロセスで発生する以下の特徴を持つ膜のデポに対して効果が期待できる。

- ・膜が固いもの
- ・膜中の分子の結合が強いもの
- ・均一に成膜されるもの

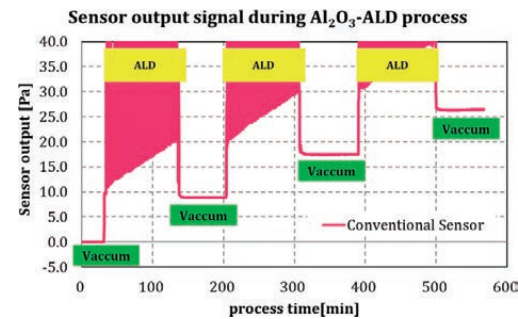


図7a Al₂O₃-ALDプロセス後のゼロ点挙動
(モーメントバランス構造なし)

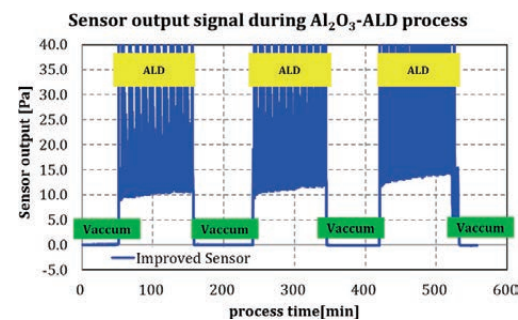


図7b Al₂O₃-ALDプロセス後のゼロ点挙動
(モーメントバランス構造あり)

4.2 分離形(形V8S)による高温化対応

半導体プロセスの発展に伴うガスの材料高温化により、より高温に対応した隔膜真空計が要求されている。

センサと計測回路を分離して、かつ、センサを耐熱部品で構成することで、10～250℃まで対応した分離形モデル（形V8S）を開発した。

図8a、図8bに、形V8Sのセンサ温度特性の計測結果を示す。アズビル独自の温度補正アルゴリズムにより、10～250℃の広い温度範囲で誤差の少ない計測を可能にした。

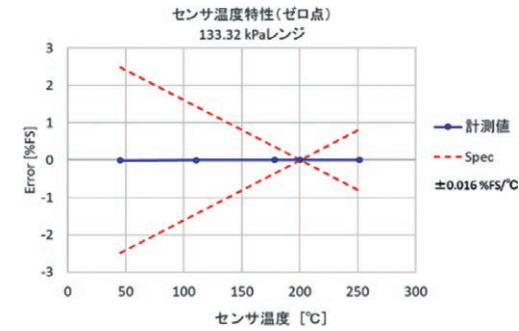


図8a 分離形(形V8S)のセンサ温度特性(ゼロ点)

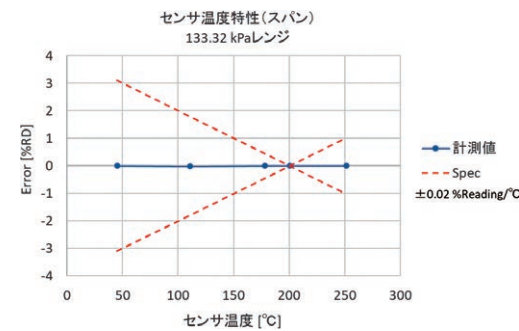


図8b 分離形(形V8S)のセンサ温度特性(スパン)

4.3 一体形(形V8C)

4.3.1 製品サイズ

図9に、現行品（形SPG）と一体形（形V8C）の真空計を示す。形V8Cは製品の高さを低くするために、従来の円筒形から四角形に変更し、計測回路のスペースを効率的に確保している。設置面積は現行品と同じであるため、置き換えが容易である。

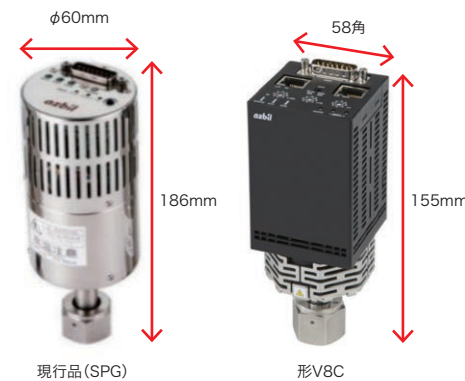


図9 形V8C製品サイズ（現行品との比較）

4.3.2 自己加熱温度設定機能の追加

一体形（形V8C）に、各通信、接点入力によりセンサの加熱温度を45～200℃の範囲で自由に変更できる「自己加熱温度可変機能」を追加した。

成膜工程やクリーニングプロセスなど、プロセスに合わせて自己加熱温度を変更できる。また、お客様は自己加熱温度ごとに予備品を確保する必要がなくなり、在庫数が削減し管理も容易になる。

図10a、図10bに自己加熱可変タイプの一体形（形V8C）の

センサ温度特性を示す。45～200℃の広い温度範囲で誤差の少ない計測が可能である。

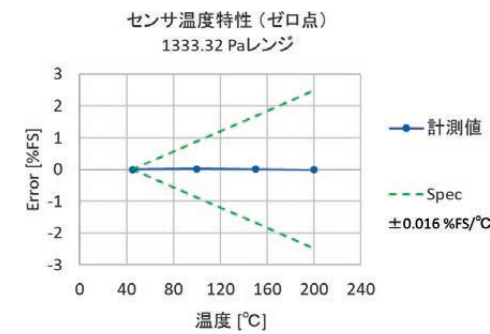


図10a 自己加熱可変形番のセンサ温度特性(ゼロ点)

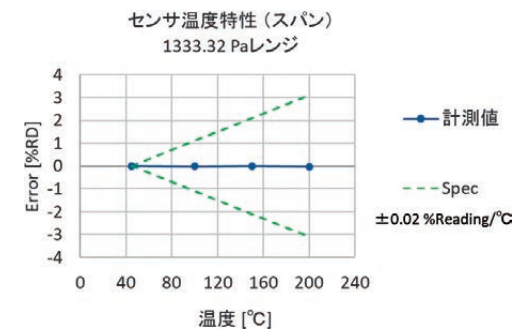


図10b 自己加熱可変形番のセンサ温度特性(スパン)

アズビルのPID温度制御技術を活用することで、温度変更に対して素早い追従性、および、制御性を実現した。図11にセンサ温度制御特性の測定結果を示す。

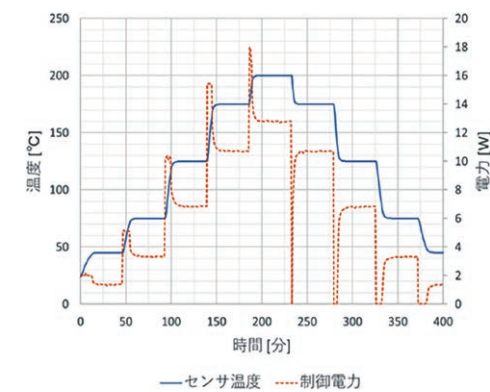


図11 自己加熱可変形番のセンサ温度制御性

4.4 応答速度の高速化

ALD、ALEプロセスは、チャンバー内の圧力をmsオーダーで切り替える必要があり、その圧力を計測する真空計にも応答速度の高速化のニーズが高まっている。

計測回路、信号処理を高速化することで、応答速度（63%応答）、1ms以下、圧力更新周期0.27msに対応した。高速基準器に対する現行品（形SPG）と形V8の応答速度の比較を図12に記す。現行品（SPG）では応答速度は63%応答にて40ms以下であるのに対して、形V8は、1ms以下の応答であることが分かる。

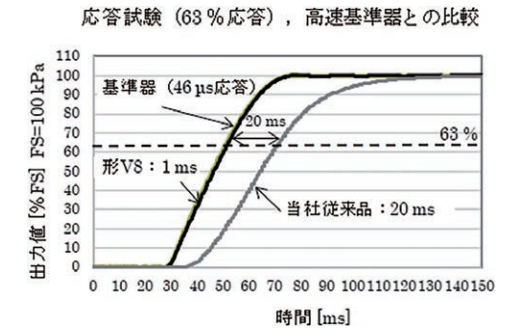


図12 応答試験結果(応答基準器との比較)

5. おわりに

サファイア隔膜真空計（形V8）は、進化する半導体プロセス装置のニーズに合わせて価値提供できる製品を目指して開発した。今後、更に特長ある製品を開発し、お客様に価値を提供していきたい。

<参考文献>

- (1) 石原卓也; 小型化、プロセス耐性を高めたサファイアリニューアル真空計の開発, azbil Technical Review, 2023年, Vol.64, pp.9-15. アズビル株式会社

<著者所属>

小原 圭輔 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

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
戦略事業開発1部
電話: 0466-20-2374

電力スマートメーター対応水道用無線端末 (型式:ENC UW-H8A0)の開発

Development of a wireless terminal for water supply compatible with electricity smart meters (model:ENC UW-H8A0)

田中 裕三
Yuzo Tanaka

1. はじめに

アズビル金門株式会社では、今までに各種の通信方式を採用した水道検針用の無線端末を製品化してきた。今回、アズビル金門として初めて、電力スマートメーターネットワークに対応した、電力スマートメーター対応水道用無線端末(型式:ENC UW-H8A0)について、説明する。

2. 製品概要

この度製品化した無線端末の主な特徴について以下に記す。

- ・共同検針用の無線端末として、上位装置である電力スマートメーターと通信する。
- ・電力スマートメーターとの無線通信規格には、「920MHz帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備」(ARIB((社)電波産業会)STD-T108)を採用している。また、共通規格化が進められている「IoTルートApplicationインタフェース仕様書」に準拠した通信方式を採用している。
- ・電子式水道メーターとの通信には、東京都水道局電文仕様Ver2.6a仕様に準拠した8ビット電文方式を採用し、水道メーターから1時間ごとに指針値を読み出し、1日に1回、1日分の指針値を電力スマートメーターに通知する。指針値は無線端末内部に7日分を記憶して、後から読み出すことが可能である。
- ・水道メーターが検知したアラーム情報は即時に上位に伝達される。
- ・豪雨などによる水没にも耐えうる、IP68仕様の防水性能を備えている。
- ・製品外部からの磁石操作により起動/停止が可能で、動作状態を示すLED表示も備えている。
- ・アズビル金門製の水道メーターとの接続に関しては、メーターのケーブルを製品内部に引き込むことで、外部に防水用具を用いることなく接続が可能である。

・製品外観



図1 ENC UW-H8A0外観

・製品仕様

表1 主な製品仕様

無線仕様	
一般規格	920MHz帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備 (ARIB ((社)電波産業会)STD-T108)
空中線電力	20mW以下(キャリアセンスあり)
アンテナ	本体に内蔵
メーター接続部仕様	
接続対象メーター	8ビット通信機能付電子式水道メーター
入出力電文形式	8ビット電文(2線式:A1…黒, A2…白) (東京都水道局電文仕様Ver2.6aに準拠)
ケーブル長さ	約1.5m
伝送距離	最大200m
その他	
使用温度範囲	-10℃~60℃
ケース材質	ASA樹脂, PC樹脂
外形寸法	107(H)×117.5(W)×47.6(D)mm
構造	防水構造(IP68)
質量(重量)	約320g

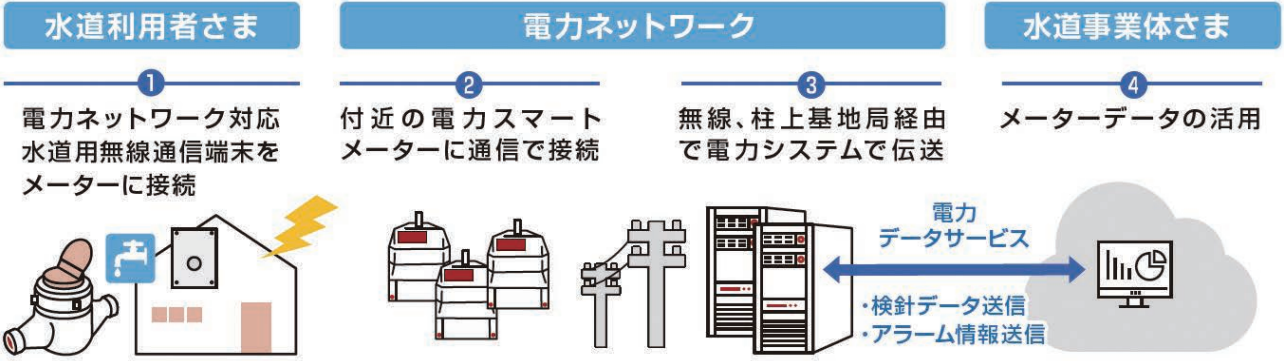


図2 電力スマートメーターネットワークを利用したシステム例

3. 電力ネットワークへの対応について

今回の無線端末は、東北電力ネットワーク株式会社様の電力スマートメーターネットワークに対応している。同社では、水道・ガス事業者様が抱える人材不足や難検針への対応をはじめとした様々な課題の解決に向け、電力スマートメーターネットワークを活用した共同検針の取組み「自動検針サービス」を2023年よりスタートしている。電力スマートメーターネットワークを活用するメリットとして、安定・安心・安価(3つの「安」)を掲げており、宮城県名取市様へのサービス開始を皮切りに、同社のサービスエリアである東北6県および新潟県で導入が進みつつある。安定:電力スマートメーターは水道メーターの近傍に設置される可能性が高く、最適な電波経路を自動選択するため、安定した通信環境が期待できる。安心:スマートメーター専用の通信でセキュリティは万全、24時間365日の体制で監視している。安価:既存のインフラ資産を活用し、安価な料金でサービスを提供する。

4. 共同検針インタフェース標準化について

本製品が準拠している「IoTルートApplicationインタフェース仕様書」は、NPO法人テレメータリング推進協議会において、標準化が進められている。現在、認証の開始に向けて、規格類の整備や試験手順の整備、さらにはプレ認証試験などが実施されている。電力スマートメーターの認証試験に続き、2025年春には無線端末の認証試験も開始される見込みである。今後は、無線端末と電力スマートメーターの両方が標準化された認証を取得することにより、複数の企業の端末間での相互接続性が確保され、利便性の向上が期待される。

5. おわりに

今回、新たに開発した「電力スマートメーター対応水道用無線端末」は、共同検針用の水道用検針端末として、2023年より市場に導入されている。

アズビル金門株式会社では、つなぐ×ひろがるをキーワードに、今後も、
・共同検針向けの都市ガス/LPガス向け通信端末の開発
・共同検針向けのクラウドサービスの開発
を予定している。
共同検針向け都市ガス用通信端末は2025年春に商用リリースの予定である。

<著者所属>
田中 裕三 アズビル金門株式会社
開発本部製品開発部デバイスグループ



azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2025年4月発行号	
発 行 日	2025年4月1日(通巻66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：早川勲、野見山隆、衣笠静一郎、太田延樹、田原鉄也、 久保田耕、宮崎禎子 アドバイザー：梶田徹矢 事務局：筒井宏明、高石知治
発 行 所	アズビル株式会社 コミュニケーション部広報グループ 〒100-6419 東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル TEL.03-6810-1006
本誌掲載の論文は下記サイトでご覧いただけます。 https://www.azbil.com/jp/corporate/pr/library/review/	
© 2025 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。	