

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 ▶

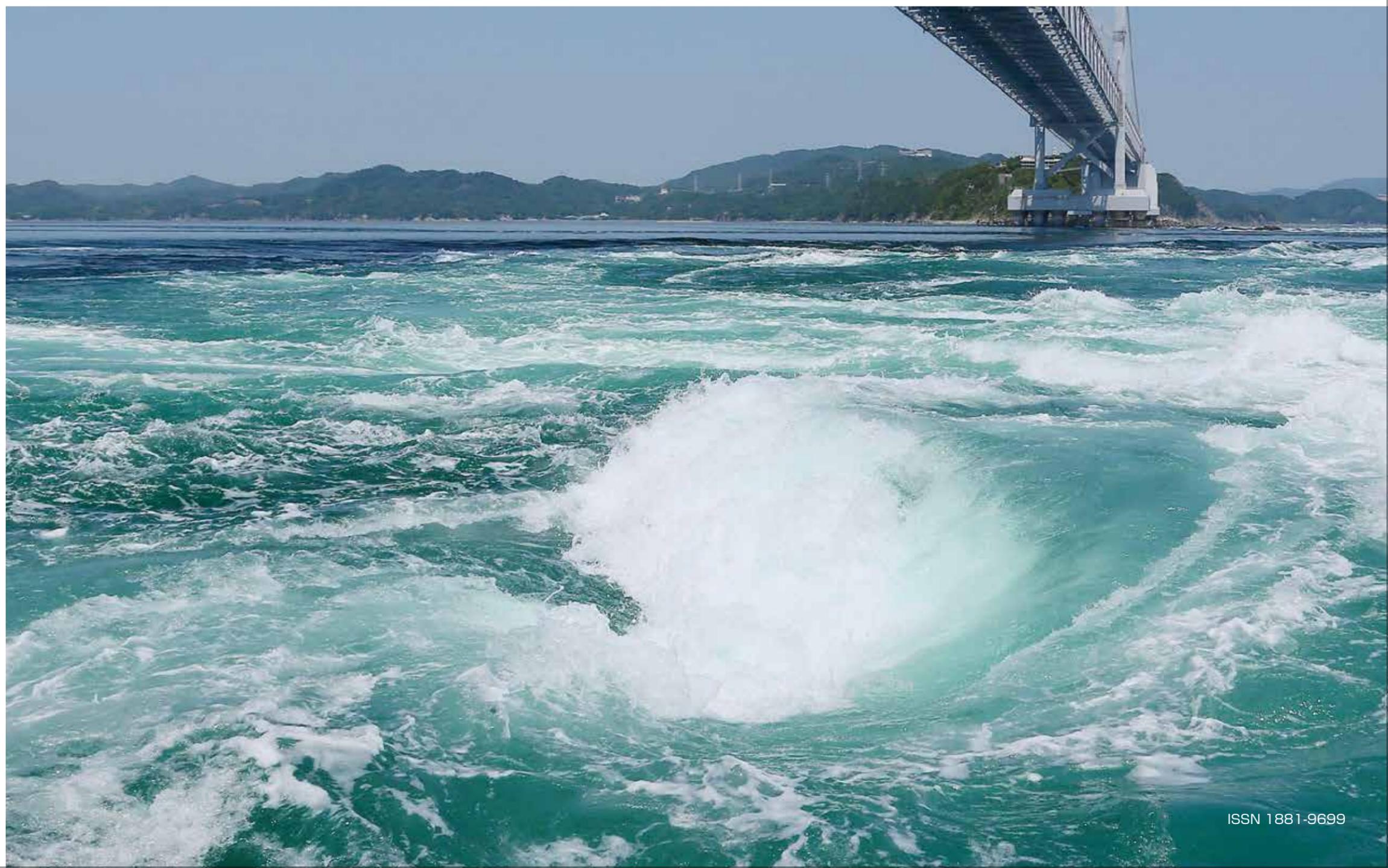


azbil

Technical Review

2023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：高性能センシングデバイスを実現するアズビルのMEMS技術
— 高機能・高精度・高信頼性の追求



表紙について

潮の満ち引きと地形によって生み出される「流れ」

鳴門の渦潮

本州と四国を隔てる瀬戸内海は日本で最も大きな内海です。その東側、兵庫県の淡路島南部と四国の北東端に位置する大毛島^{おおげ}の間に鳴門海峡があります。鳴門海峡は瀬戸内海の播磨灘と太平洋の紀伊水道を結び、鯛やわかめなどの海の幸にも恵まれています。

鳴門海峡は昔から四国と近畿地方を結ぶ最短ルートとして知られ、海上交通の要衝として発展してきました。しかし、同時に日本有数の海の難所でもあります。その象徴的な存在が鳴門海峡に現れる「渦潮」ではないでしょうか。

鳴門の渦潮は満潮と干潮の前後の時間帯のみに現れるため、1日のうちで数時間しか見ることができません。渦の大きさはそのときどきで違いますが、春と秋に大きな渦ができ、最大で直径20m以上と、世界最大級の大きさになります。その豪快な姿は多くの人々を惹きつけます。

鳴門の渦潮はなぜ発生するのでしょうか。その秘密は、潮の満ち引きと独特の地形にあります。陸地に対して海の高さ(潮位)は常に一定ではありません。地球の自転の影響もあり、潮位が最も

高い満潮と最も低い干潮が約6時間ごとに繰り返されます。

満潮時は太平洋の紀伊水道から播磨灘へと海水が流れ込みます。しかし、鳴門海峡は幅が1.3kmほどとても狭いために、ほとんどの海水は大阪湾を経由して、淡路島の北側に位置する明石海峡を通るのです。そのため、播磨灘が満潮になる時間帯は紀伊水道付近が満潮になってから5～6時間後となります。

つまり、播磨灘が満潮になる頃は、紀伊水道付近では干潮となり、鳴門海峡の北側と南側では最大で1.5mほどの水位差が生まれます。そして、水位の高い方から低い方へと海水が鳴門海峡に一気に流れ込みます。このとき、陸地に近い端の方よりも海峡の中央部分の方が海水の速度が速くなり、その速度の差によって潮が渦を巻くようになります。

播磨灘の満潮時と干潮時では海水の流れが逆になります。その影響で、渦潮が多く発生する場所が淡路島側と大毛島側で交互に入れ替わります。渦潮が発生することで、鳴門海峡の海水がかき回され、川からの栄養分をまんべんなく行き渡らせ、魚介類を育てているのです。

文：荒松良孝 協力・画像提供：南あわじ市

■ 渦が発生する仕組み



- ① 紀伊水道に入った潮波は淡路島の南側で鳴門海峡と大阪湾の2方向へと進んでいく。
- ② 大阪湾に向かった波は明石海峡を抜けて播磨灘に入り、約5～6時間かけて鳴門海峡に達する。
- ③ その頃、紀伊水道側は干潮となり、水位が下がっている。
- ④ 播磨灘と紀伊水道で水位差が生じ、海面の高い満潮側から低い干潮側へ一気に海水が流れ込み、渦が発生する。

出典：大鳴門橋架橋記念館エディ

Contents

特集：高性能センシングデバイスを実現するアズビルのMEMS技術 — 高機能・高精度・高信頼性の追求

巻頭言：センサなどの製作に用いられる半導体微細加工技術:MEMS 1
東北大学シニアリサーチフェロー（マイクロシステム融合研究開発センター）兼 株式会社メムス・コア CTO 江刺 正喜
特集に寄せて 2
アズビル株式会社 アドバイザー 西本 淳哉

特集論文

アズビルMEMSの歴史と今後の展望 3
アズビル株式会社 技術開発本部 函師 信彦 米田 雅之
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 9
アズビル株式会社 技術開発本部 石原 卓也
MEMS技術を駆使して過大圧保護機構を集積化した超高耐圧差圧センサの開発 16
アズビル株式会社 技術開発本部 徳田 智久
オイルフリー高感度圧力センサの開発と応用検討 21
アズビル株式会社 技術開発本部 瀬戸 祐希
ユーザビリティを向上させたマスフローコントローラの開発 25
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 大貫 量孝
MEMSセンサの能力を最大限に発揮させるセンサパッケージング技術 31
アズビル株式会社 プロダクションマネジメント本部 関 宏治 アズビル株式会社 技術開発本部 片桐 宗和
新クリーンルームの設計コンセプト 独創的MEMSセンサの効率的な市場導入促進に向けて 37
アズビル株式会社 技術開発本部 中野 正志 アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー 黒澤 敬 技術開発本部

一般論文

savic-net™ FX/G5におけるサイバーセキュリティ対応 42
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 畔柳 賢吾
個別快適ニーズに対応するための空調ゾーン細分化技術 46
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 羽場 照芳 水高 淳 井波 太郎 三枝 隆晴
クラウドMESを活用した生産現場におけるIT基盤の構築とDX推進 52
アズビル株式会社 IT開発本部 玉置 順久
Pharmanage™ V 顧客固有の業務プロセスのシステム化を容易にする 医薬向けMESの開発 57
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 染谷 知則 松井 夏美 小山 英聡

製品紹介

マルチエリア対応ユーザーミナル(QJ-1201) savic-net™ G5システムに接続可能な最大8エリア対応の表示設定器 63
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 戸崎 裕太 小野寺 淳也

Contents

Special Issue : The MEMS technology driving Azbil's high-performance sensing devices:In pursuit of advanced functions, high accuracy, and high reliability

Preface : MEMS semiconductor microfabrication technology used to manufacture sensors and other devices 1
Senior research fellow, Micro System Integration Center (μ SIC) in Tohoku University and concurrently CTO in MEMS Core Co., Ltd. Masayoshi Esashi
Introduction to the Special Issue 2
Advisor, Azbil Corporation Jyunya Nishimoto

Articles on Special Issue

The history and future prospects of Azbil's MEMS technology 3
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Nobuhiko Zushi Masayuki Yoneda
Upgrading a sapphire-based capacitance manometer for reduced size and enhanced anti-deposition characteristics 9
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Takuya Ishihara
A differential pressure sensor with ultra-overpressure resistance and an integrated overload protection system utilizing MEMS technology 16
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Tomohisa Tokuda
Design and application study of an oil-free high-sensitivity pressure sensor 21
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Yuki Seto
Improving mass flow controller usability 25
Advanced Automation Company, Azbil Corporation Kazutaka Ohnuki
Sensor packaging technology maximizes MEMS sensor capabilities 31
Production Management Headquarters, Azbil Corporation Koji Seki Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Munekazu Katagiri
A new cleanroom design concept for bringing original MEMS sensors to market efficiently 37
Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Seishi Nakano Advanced Automation Company, Takashi Kurosawa Technology Development Headquarters, Azbil Corporation

Articles on Other Subjects

Cybersecurity measures for the savic-net FX/G5 building management systems 42
Building Systems Company, Azbil Corporation Kengo Kuroyanagi
Air conditioning zone segmentation technology to meet individual comfort needs 46
Building Systems Company, Azbil Corporation Teruyoshi Haba Jun Mizutaka Taro Inami Takaharu Saegusa
Using a cloud MES to build IT infrastructure at production sites and promote production DX 52
IT Development Headquarters, Azbil Corporation Yorihsa Tamaoki
Considerations in the development of Pharmanage V, a MES for pharmaceuticals that facilitates systematization of the user's manufacturing processes 57
Advanced Automation Company, Azbil Corporation Tomonori Someya Natsumi Matsui Hidefusa Koyama

Product Introduction

Model QJ-1201 multi-area user terminal : Display and configuration of up to 8 areas in the savic-net G5 BMS 63
Building Systems Company, Azbil Corporation Yuta Tozaki Junya Onodera

センサなどの製作に用いられる 半導体微細加工技術:MEMS

江刺 正喜
Masayoshi Esashi



東北大学シニアリサーチフェロー（マイクロシステム融合研究開発センター）兼（株）メムス・コア CTO
Senior research fellow, Micro System Integration Center (μ SIC) in Tohoku University and concurrently CTO in MEMS Core Co., Ltd.

高密度集積回路 (LSI) の製作に用いられる半導体微細加工を進展させてセンサなどの製作に使う技術はMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれ、システムの鍵を握る要素として広く使われている。2022年9月にはアズビルで新クリーンルームの竣工式が行われたとのことで、今後のさらなるMEMS関連事業の展開が期待できる。

情報処理などに用いられるLSIの素子数は微細化により10年で100倍程の割合で指数関数的に進歩し、1970年から2020年の50年間で100億倍程になり、これは高集積化の流れでMore Mooreと呼ばれる。直径30cm程のシリコンウェハ上に1兆個（各チップに100億個）程のトランジスタが載っている。この異常な進歩は、光によるフォトマスクパターンの一括転写、標準化と大量生産による設備投資の回収による。1964年に米国のテキサスインスツルメンツ社の社長であった Patrik E. Haggerty氏は集積回路の将来について、「ほんの数社（五つ程度）が工業の必要全需要の90%かそれ以上を供給する」と述べている（フレデリック サイト、ノーマン アインシュブラッハ『シリコンの物語』内田老鶴圃（2000年））。

これに対しシステムの入出力などに使われるセンサ・MEMS技術は売り上げで毎年13%の割合で進歩し、多様化の流れでMore than Mooreと呼ばれる。高付加価値ではあるが、多品種・少量で開発がボトルネックになり、MEMSビジネスは多くの場合に困難に遭遇してきた。著者がSEMI通信（2020年6月30日）に執筆した「MEMSビジネスにはダイバーシティが大切」*1にあるように、ビジネスとしてどう発展させればよいか、それぞれの状況下で工夫されている。

MEMSは自動車あるいはスマートフォンなどに使われる量産タイプのものから、プリンタヘッドやビデオプロジェクタ用ミラーアレイのように量産・高付加価値のもの、また製造・検査や医療などに使われる高付加価値のものなど多様である。日本ではミスターセンサと呼ばれて世界中から敬愛されていた豊田中央研究所の五十嵐伊勢美氏が、ピエゾ抵抗型の圧力センサを開発し、1980年代に自動車のエンジン制御に使用して排気ガス対策に貢献した。この他自動車では1990年代にエアバック用に加速度センサが、2000年頃から角速度センサ（ジャイロスコープ）などが安全走行用に使われている。米国ではテキサスインスツルメンツでLarry J. Hornbeck氏がLSI上に100万個程の可動ミラーを形成したDMD (Digital Micromirror Device) を1977年から20年程かけて開発した。これは1999年にStar Wars :Episode I (George Lucas監督)の初上映で使われてから、フィルム映画に取って代わることになった。

開発がボトルネックになるMEMSでは試作設備が課題である。

東北大学の「西澤潤一記念研究センター」では、移設した半導体工場をベースに寄付された設備などを活用し、1,800m²のクリーンルームにある「試作コインランドリ」*2で、会社から派遣された人が自分で操作し、4インチや6インチ、一部8インチのウェハで試作開発ができるようにしている。2010年より戸津健太郎教授が中心になって運営し、ここで作られたデバイスを市販させてほしいとの要望に応え、東北大学が文部科学省や経済産業省と交渉し、2013年より製品製作が認められた。2022年6月までのユーザーは364機関（企業300社）、毎月延べ1,000件ほど使われ、年間予算3億円ほどで利用料により独立採算に近い形で運営されている。建物はモノづくりのベンチャー企業などにも利用され、また「プロトタイプラボ」*3が2022年4月から始まった。これは完成度の高いハードウェアを試作できるオープンな開発環境で、多くの部品などを整理しExcelでキーワード検索をできるようにするのが私の仕事である。

MEMS技術は様々な知識を必要とするため、いかにして多様な知識にアクセスするかが大きな課題である。シーズから書いた江刺正喜『はじめてのMEMS』森北出版(2011年)、ニーズから書いた江刺正喜、小野崇人『これからのMEMS - LSIとの融合 -』森北出版(2016年)のほか、入門書の江刺正喜『半導体微細加工技術 MEMSの最新テクノロジー』アナログウェア No.13 (トランジスタ技術2020年11月号別冊付録) CQ出版社 (2020年)、専門書のM. Esashi ed. *3D and Circuit Integration of MEMS*, Wiley VCH (2021年)を参照していただきたい。1,000冊ほどの文献ファイルをExcelでキーワード検索できるようにしたり、4部屋の展示室*4を整備し、サンプルなどを直接見ていただけるようにもしている。

MEMSで多様な製品を世に出すことは容易でない。しかし高付加価値で値崩れも少なく、技術者は新しい価値を生み出す夢を追うことができる。例えば本格的な遠隔手術や無人工場なども夢ではなくなる。

略歴:

1971年東北大学工学部電子工学科卒。1976年同大学院博士課程修了。同年より東北大学工学部助手、1981年助教授、1990年教授となり、現在名誉教授。半導体センサ、マイクロマシニングによる集積化システム、MEMSの研究に従事。電子通信学会業績賞(1980年)、SSDM Award(2001年)、第3回産学官連携推進会議文部科学大臣賞(2004年)、紫綬褒章(2006年)、IEEE Andrew S. Grove Award(2015年)、IEEE Jun-ichi Nishizawa Medal(2016年)、応用物理学会業績賞(2022年) 他

*1 <https://www.semi.org/jp/blogs/technology-trends/mems-business>
*2 <http://www.mu-sic.tohoku.ac.jp/coin/index.html>
*3 <https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2022/04/press20220420-01.html>
*4 <http://www.mu-sic.tohoku.ac.jp/nishizawa/>

アズビル株式会社
アドバイザー

西本 淳哉

イノベーションはどのようにして生まれるのでしょうか。世の中では今もビジネスモデルとして、あるいは技術的に、従来の延長線上にないイノベーション（破壊的イノベーション）が起こっています。イノベーションが産業構造を変え、社会を変革します。

身近な例でいうと、レコードがCDに変わったときにレコード針は不要になりました。最近ではレトロブームで一部マニアの間で復活しているようですが、往年のような規模は望むべくもありません。ところが、昨今ではCDも不要になりました。データは半導体メモリに収納すればよくなりました。これも永遠にあるわけではなく、今や、メモリに収納するよりも、通信でリアルタイムに外から提供するようになっていきます。このような中で、レコードを販売するビジネスからネットでコンテンツを配信する時代となり、ビジネスモデル自体が激変しました。

このように、好むと好まざるにかかわらず、誰かがイノベーションを起こし、それが潮流となって産業構造が変わります。我々はその潮流に飲み込まれるわけにはいきません。我々開発者はその潮流をいち早く捉えて、他者に先駆けて挑戦し、自ら変わっていかなくてはなりません。望むらくは潮流を起こす側にならねばなりません。

イノベーションは身の回りで起こっています。羽根のない扇風機が登場したとき、なぜそれを思いつかなかったのか、開発者として悔しくありませんでしたか。ロボット掃除機が登場したとき、してやられたと思いませんでしたか。自動運転の車が登場したとき、我々も挑戦したいと思いませんでしたか。我々開発者は既存領域に安住することなく、新技術や新しい取組みに、常に感覚を研ぎ澄まさなければなりません。リスクを恐れず挑戦しなければなりません。

昨年9月、藤沢テクノセンターに2棟の新棟が竣工しました。竣工した新棟の1つはMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 開発棟です。アズビルはわが国でも早く、1980年代半ばにMEMS開発に着手した企業の1つです。このとき建設されたMEMS開発棟は今も健在です。ここから、マスフローコントローラや差圧・圧力発信器、サファイア隔膜真空計など、多数のMEMS搭載機器が生み出されてきました。

アズビルは、ビルや工場、プラント等に様々な制御システムを提供しています。ここにも高度な制御技術やAIなどの先端技術が導入されています。またアズビルは、インターネットが世に出る前の1984年に通信回線でビルを遠隔監視、制御するサービスを開始しており、ネットワークでソリューションを提供するビジネスモデルの先駆者です。

技術は日進月歩であり、停滞は許されません。新たな技術に挑戦し、新製品を創出し、事業の幅を広げ、成長しなければなりません。

ばなりません。停滞は後退と同じです。今、計測制御を取り巻く環境はIoT、DXなど様々な呼び方で表現されるような大きな潮流のただ中にいます。また、計測制御への社会的期待も、地球環境、エネルギー、ウェルネスなど、従来の枠組みを超えて、大きく広がっています。我々はこれらに応じて新たな計測制御の世界を切り拓かなければなりません。イノベーションを巻き起こさなければなりません。

今般竣工したもう1つの新棟には、イノベーションを起こす仕掛けが工夫されています。コロナ禍を経て働き方が変わりました。我々は、世界中から瞬時に、何百人でも連携し、共同して開発を進められるということを知りました。組織横断的な取組みが容易にできるということを経験しました。また、リモートワークが常態化したときに、人と人との出会いやフェイス・ツー・フェイスのコミュニケーションが実は重要であることも実感しました。コロナ禍を経て、このような、広がりのあるネットワークで開発できる環境が整いつつあります。

開発は開発者の専売特許ではありません。クラウドアプリの開発などは、営業でもサービスでも施工でも、少しの素養とセンスがあれば、誰もが開発者になり得ます。外の世界からも挑戦を受けるでしょう。開発者は大競争時代に突入しています。開発者は自身の専門知識を極めながら、それと同時に広い視野を持って次世代の製品やサービスの開発に取り組まねばなりません。

新棟を用いて、このような要請に応える取組みがすでに始まっています。組織を越えて緩やかに人が交流することで新たな発想が生まれます。我々開発者は、個人の自己実現と企業成長のベクトルが同じ方向を向くような取組みを目指さねばなりません。新しいことに挑戦し、新分野を切り開き、技術で社会に貢献する企業でなければなりません。

今回の特集ではMEMS技術に焦点を当てました。MEMS技術はナノの領域へと微細化が進み、動作原理も電波、超音波、磁界など大きく広がっていきます。ここからアズビルの飛躍を担う、社会に貢献する新たなMEMS技術が続々と生み出されてくることをご期待ください。

アズビルMEMSの歴史と今後の展望

The history and future prospects of Azbil's MEMS technology

図師 信彦
Nobuhiko Zushi

米田 雅之
Masayuki Yoneda

キーワード
MEMS, 圧力センサ, ピエゾ抵抗式, サファイア, マイクロフローセンサ, MR センサ, 耐食性

「計測と制御」の技術を活用し、「人々の安心、快適、達成感の実現」と「地球環境への貢献」を追求しているアズビルにとって、センサはキーコンポーネントの1つであり、MEMSは高性能で付加価値の高いセンサを実現する上で非常に重要な基幹技術である。早くからその有用性に注目して、1980年代半ばにはクリーンルームの建設とMEMSセンサの研究開発を開始し、これまでに様々なMEMSセンサを自社開発して多くの製品に搭載してきた。今回は主要なMEMSセンサの歴史や技術、特長を紹介するとともに、今後の展望について述べる。

For Azbil, in its mission to provide people with safety, comfort, and fulfillment and to preserve the environment by utilizing measurement and control technology and following its philosophy of "human-centered automation," sensors are a key component, and microelectromechanical systems (MEMS) are a very important core technology for realizing high-performance, high-value-added sensors. Azbil noticed this early on, and in the mid-1980s began constructing a cleanroom and developing application technology for MEMS sensors. This paper looks at the history, technology, and features of major MEMS sensors and discusses future prospects.

1. はじめに

MEMSとはMicro Electro Mechanical Systems(微小電気機械システム)の頭文字をとった略称であり、電子デバイ

スの中に電気的な要素だけではなく、3次元的な加工を活用するなどして機械的な要素を組み込んだデバイスであり、近年はセンサへの応用が盛んである。

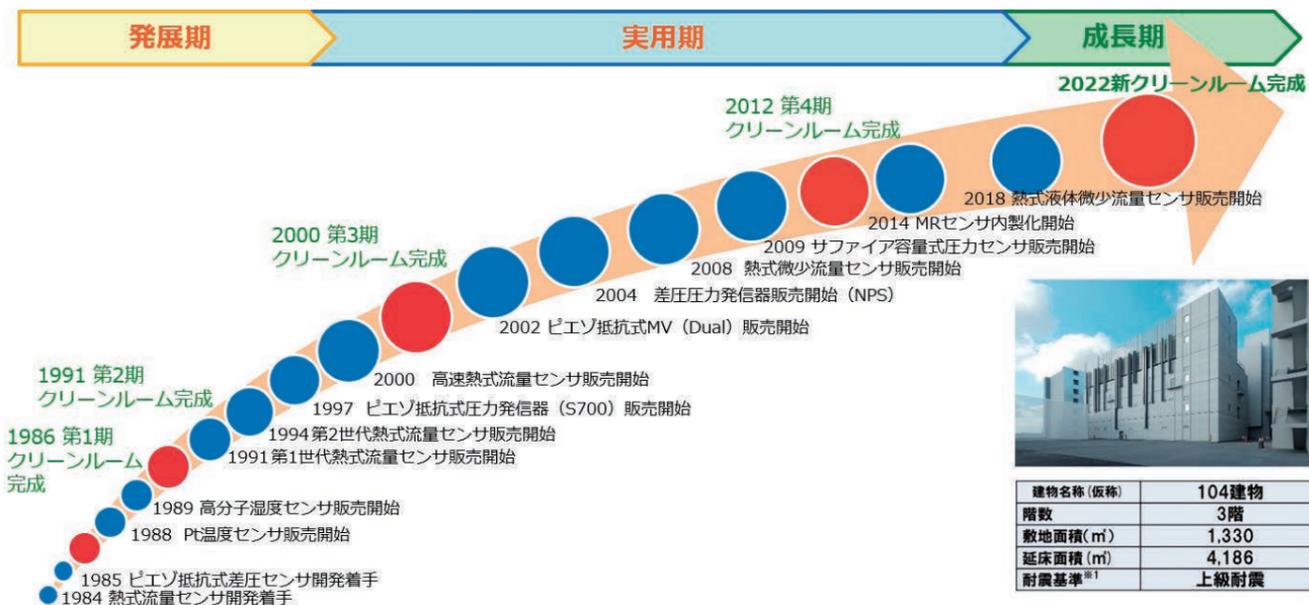


図1 MEMS開発の軌跡



建物名称(仮称)	104建物
階数	3階
敷地面積(m ²)	1,330
延床面積(m ²)	4,186
耐震基準 ^{※1}	上級耐震

MEMSが研究され始めたのは1950~1960年代といわれており、国内では1960年代に自動車関連の企業からMEMS式の圧力センサが発表された。アズビルは、1980年代半ばにエレクトロニクス関連の研究開発テーマを検討する中で、事業内容とのマッチングが良く、少量多品種で差別化が可能と考えられるセンサに的を絞ってMEMSの研究開発に注力する戦略を選択した。アズビルが得意とする工業市場向けのセンサは、高精度、高信頼性、長寿命、低消費電力、長期にわたる安定供給等、様々な項目において高いレベルで求められるために、市販品では対応が困難なものも多い。自社製品用にカスタマイズしたMEMSセンサを開発して、製品に大きな差異化要素や付加価値を付ける必要があった。当初はクリーンルームもなく、まさにゼロからのスタートであったが、それから37年余りが経過し、様々なMEMSセンサが開発され自社製品に搭載された。上市して30年以上になるマイクロフローセンサTMを筆頭に、現在も生産を継続しているセンサが多数ある。MEMSセンサはその材料や構造、製作プロセスなどが一品一葉であり、開発に非常に多くの時間と労力を要するが、一方でその特殊性や困難性、市場規模などから比較的高い参入障壁があり、ひとたび開発されたセンサは長期にわたり高い競争優位性を有するものが多い。図1にアズビルにおけるMEMS開発の軌跡を示す。

2. 主要なMEMSセンサ

これまでにMEMS技術を活用して開発したマイクロフローセンサ、ピエゾ抵抗式差圧・圧力センサ、サファイア静電容量式圧力センサ、MR (Magneto Resistive)センサの4種について、歴史や技術の独自性、今後の展望などについて述べる。

2.1 マイクロフローセンサ

1984年に気体向けのMEMS型フローセンサの研究開発に着手し、1994年に給湯器の空燃比制御用の空気流量センサとして量産が開始された。その後、高流速向けや微小流量向けなどセンサチップのラインアップを拡充し、適用する流速や流量域を拡大するとともに、制御バルブを組み込んだマスマフローコントローラーも製品化した。さらに2017年には気体用で培ったMEMS技術を応用して、微小液体向けのフローセンサを開発した⁽¹⁾。これまでのフローセンサの累計販売台数は600万台を超えた。図2にマイクロフローセンサ応用製品例を示す。



図2 マイクロフローセンサ応用製品例

2.1.1 センサの構造と独自技術

フローセンサチップは、1.7mm角のシリコン基板上に厚さ約1μmの窒化シリコン製ダイアフラムを形成し、その中央に白金薄膜で形成したヒータおよび上下流温度センサを配置している。ダイアフラム下部は異方性エッチング技術を利用して中空構造となっているために、流速検知部分の熱容量が極めて小さく、高感度、高速応答、低消費電力などの特長をもつ。

フローセンサを製作する上で重要になるのがダイアフラムとなる窒化シリコンの膜質である。厚さが1μmに対してダイアフラムの対角線長は1mmを越えており、非常にハイアスペクトな構造であるため、膜の内部応力が大きいと平坦なダイアフラムが形成できない。ダイアフラムの撓みはセンサ出力のバラツキやシフト、信頼性などに影響を与えるために、極めて低い応力の膜が必要となる。一方で、この窒化シリコン膜は流速検知部のヒータや温度センサの白金薄膜を保護する役目も担っており、段差被覆性が良く、長時間の異方性エッチングにも耐えるように緻密でなければならない。一般的に緻密な膜は内部応力が高くなるが、独自の成膜プロセスを開発し、低応力でありながら所望の段差被覆性、耐薬品性、緻密性を満たすことに成功した。さらにこの膜は高温、低温、高湿度等の様々な環境下においても応力変動が極めて小さく、ゼロ点や感度などの特性シフトが極めて少ないフローセンサの実現に貢献している。図3にダイアフラムの平坦性が分かるようにセンサチップを切断した電子顕微鏡写真を示す。

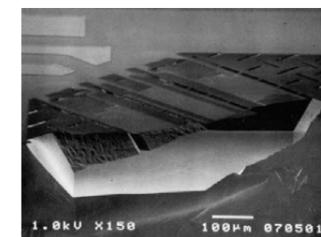


図3 切断したセンサチップの電子顕微鏡写真

2.1.2 フローセンサラインアップ

最初に開発したフローセンサは搭載製品の特長から低流速域を精度良く計測するものであったが、様々な流量域の製品を拡充する中で、高流速までの広い流速域を計測するニーズが高まった。熱式のフローセンサは、ヒータと上下流の温度センサの距離により流速感度が調整できるため、高流速向けのセンサチップを開発した。その後、新たに微小流量域の計測ニーズが顕在化した。そこでMEMS技術を駆使して幅1mm、高さ0.5mmの微小な流路を製作し、それをセンサチップの表面に貼り付けた流路一体型構造のフローセンサを開発した。これら3種類のセンサチップラインアップにより、5mL/minの微小流量から2500L/minまでの広い流量域をカバーしている。図4にフローセンサチップラインアップを示す。

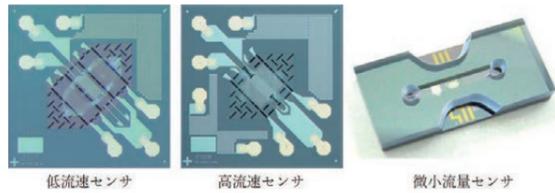


図4 フローセンサチップラインアップ

フローセンサの開発は気体向けにとどまらず液体向けにも対象を広げている。熱式の特長を活かすために微小流量域を中心として、精度や応答速度の向上、流量レンジや適用液種の拡大等を目指して製品開発を続けている。

2.2 ピエゾ抵抗式差圧・圧力センサ

ピエゾ抵抗式センサの歴史は古い。応力により抵抗率が変化するピエゾ抵抗効果は1950年代に発見されており⁽²⁾、1962年にHoneywell社⁽³⁾で、国内では1964年に株式会社豊田中央研究所⁽⁴⁾で圧力センサとして発表され、安価な民生機器や自動車向けを中心にその応用範囲を広げてきた。

その後、1983年に工業用途としてHoneywell社からスマート形差圧/圧力発信器ST3000が販売された。1985年に当時は山武ハネウエルであった当社は、パッケージのコストダウンを提案し、さらに1986年には微差圧センサの共同開発を開始し、本格的に圧力センサの開発に着手した。1991年にはイオン注入機や酸化拡散炉を導入し、完全内製の開発体制を整え、まずはHoneywell社にないラインアップの製品化を進めてきた。1995年には圧力計BravolightTM⁽⁵⁾を開発し、2002年には、センサチップを差圧計測用と静圧計測用に2個使用して質量流量が計測可能なマルチバリアブル型のセンサ⁽⁶⁾の開発を行った。これ以降、マルチバリアブルセンサとしては、工場のエア管理用フローメータAIRcubeTM、蒸気流量計STEAMcubeTM、温度・圧力補正型差圧発信器の開発、販売へと続いた。2004年には、主力製品である差圧・圧力発信器Model GTXに繋がる高精度なセンサを開発し、近年、生産台数累計100万台を突破した(図5)。



図5 ピエゾ抵抗式圧力センサの製品ラインアップ

2.2.1 ピエゾ抵抗式圧力センサの特長的な独自技術

これらの産業用途で使われる圧力センサは、精度や性能だけでなく高度な信頼性も要求され、製品寿命は非常に長

い。次に、この高精度、高信頼性を実現させた独自の高度な内製技術について紹介する。図6に最も代表的な差圧圧力発信器のチップとパッケージを示す。

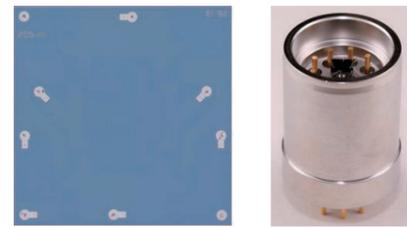


図6 ピエゾ抵抗式圧力センサのチップとパッケージ

Siチップと電氣的絶縁のために使用しているガラス台座やパッケージのボディとして使用しているステンレスといった異種材料との界面では、温度変化や静圧により歪が発生する。これはすべてノイズ成分となるため、接合部における面積やその接合形状について、構造解析を駆使しピエゾ抵抗素子までは伝わらない構造を採用している。温度センサや静圧センサも別途搭載し、それぞれに補正を行っているが、ノイズ成分を徹底的に排除することを追究し、高精度化を実現している。

次に安定性、信頼性については、ピエゾ抵抗素子を形成する不純物濃度プロファイルを独自に最適化したことに加え、表面Si酸化膜層のNa⁺等のイオン性不純物の耐性を向上させたことで、精度保証範囲外である限界動作条件下の125℃においても12000時間以上で0.01%FSの精度を達成し、極めて高度な安定性、信頼性を実現している⁽⁷⁾。なお2000時間以後は、過酷な試験環境下を続けたことで、先に恒温槽が故障してしまい試験の継続断念を余儀なくされたが、この時点でセンサは完全に正常な状態を保っていたことを付け加えておく。

2.2.2 今後の展望

ピエゾ抵抗式圧力センサは、既に非常に高い完成度を持っているが、今なお進化を続けている。差圧センサにおける耐圧力について、現時点でもチップの裏側加圧となるLow Pressure側の耐圧力には、例えば測定圧力100kPaレンジでは、その約70倍の7MPaを達成している。この耐圧力は今後も圧倒的に高いレベルで更新するべく追究を続けている。

2.3 サファイア静電容量式圧力センサ

工業用途の圧力センサにはシリコンを基材としたものが多く用いられているが、耐食性を確保するために金属のバリアダイアフラムを備えたオイル封入構造となっているものが多い。そのために封入オイルの性能が1つの制約となり、高温や超絶真空の計測が困難であるとともに、オイル漏出を嫌う食品や医薬品、半導体製造分野などからは敬遠されがちである。これらの問題を解決するために、耐食性や耐熱性が高いサファイアという材料に注目して圧力センサへの応用技術開発を進め、オイル封入が不要なサファイア静電容量式圧力センサを2009年に開発した⁽⁸⁾。現在の主な用途は半導体製造装置のプロセスチャンバー内の圧力計測で

ある。様々な腐食性ガスが利用されるために、サファイアの耐食性が活かされ、MEMSによる小型化メリットもある。図7にセンサチップとパッケージの模式図を示す。

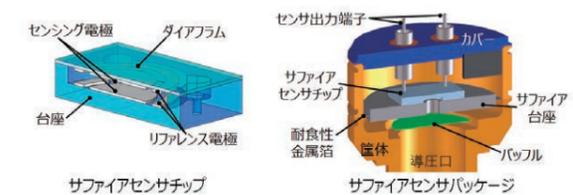


図7 サファイアセンサチップとパッケージ模式図

2.3.1 サファイア圧力センサの特長的な独自技術

センサチップの製作プロセスにおいて、異種材料を介在させずにサファイア同士を接合する直接接合技術を開発した。サファイア製のキャピティ部基板とダイアフラム部基板に表面清浄化処理を施して、位置合わせと加圧接着を行い、さらに加熱処理することでサファイア同士が強固に接合されセンサの感圧部が形成される。断面TEM (Transmission Electron Microscope) 像から原子レベルで接合されていることが分かる(図8)。

また、センサチップをパッケージ筐体に固定する際に、耐食性の確保と機械的・熱的応力の低減が求められる。この方策として両者の間に耐食性金属の薄板を介在させて応力低減を図るとともに、その接合には拡散接合を適用した。必要な強度、耐食性、耐熱性、気密性を有しており、TEM像によると原子レベルでの接合を確認することができる(図9)。

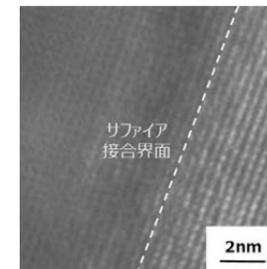


図8 サファイア直接接合部の断面TEM像

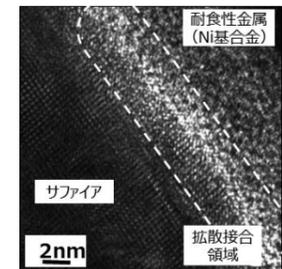


図9 拡散接合部の断面TEM像

2.3.2 サファイアの耐食性

サファイア自体の耐食性が高いことは周知の事実であるが、半導体プロセスで使われる腐食性ガスに対する耐食性には不明な部分が多い。そこで大阪大学と共同研究を実施してサファイアの耐食性に関する共同研究を進めている⁽⁹⁾。評価時の帯電問題があるために、サファイアの代わりに酸化アルミニウム多結晶膜(Al₂O₃)を利用して、ArおよびF、Clのイオンビーム照射に対するエッチング速度を計測したところ、耐食性金属のインコネルよりエッチング速度が遅く有利なことが明らかになった。図10に各種ガスにおける材料別のエッチング速度比較を示す。今後はサファイアでの実験を進めて行く予定である。

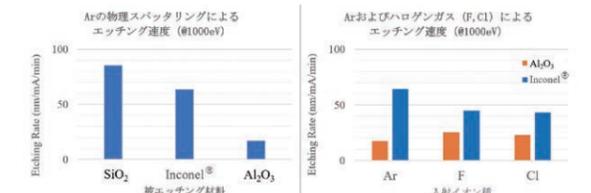


図10 各種ガスにおける材料別エッチング速度比較

2.3.3 今後の展望

進化が著しい半導体プロセスのニーズに応えるために、サファイアという材料の優位性を活かしながら、現行製品のセンサ構造を大きく改良し、小型化、高耐圧化、低コスト化などを図ったりリニューアルモデルを開発している。さらに、半導体プロセスで課題となっている、センサ表面への反応生成物堆積に起因した特性シフトの対策や⁽¹⁰⁾、新たなプロセス用材料ガスに対応するための動作温度高温化など様々な施策を進め、サファイア圧力センサの応用範囲拡大を図っていく。

2.4 MR (Magneto Resistive) センサ

MRセンサはバルブ位置検知用センサとして、スマート・バルブ・ポジション300シリーズおよび700シリーズに搭載されている。このセンサは、それまでは社外から調達していたが、供給メーカーの事業撤退を受け、長期にわたり安定的に入手する必要性から、2009年から内製開発を開始し、2013年に開発が完了して製品への搭載を開始した。製品適用から9年以上経過し、累計生産数は55万台に達したが、フィールドでのセンサ起因の故障は1件も報告されておらず、非常に信頼性の高いセンサとなっている。

2.4.1 センサ構造と独自技術

MRセンサは強磁性金属薄膜の異方性磁気抵抗効果(AMR効果)を利用したものである。薄膜に印加する電流と外部から印加した磁界の相対角度θによって電気抵抗がR変化し、温度が一定であれば式(1)のように表される。

$$R = R_0 - \Delta R \cdot \sin 2\theta \quad \text{式(1)}$$

R₀: 無磁界中の電気抵抗値

センサチップは2mm角のガラス基台に強磁性体のNiFe膜をつづら折り形状にして、パターン長手方向を90度回転させた4つの抵抗でブリッジを形成している。角度センサ(ポテンショメータ)として動作させるために、回転するローターにネオジム製マグネット2個でセンサチップを挟むように固定して磁界を印加する構造になっている(図11)。

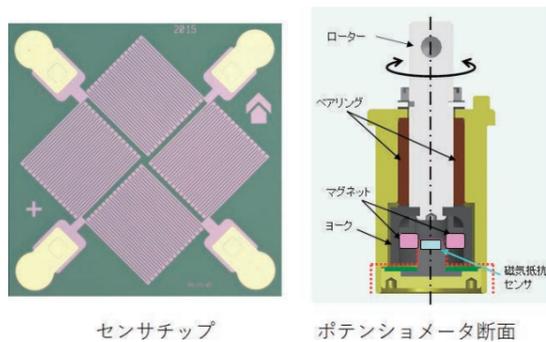


図11 センサの構造

バルブポジションは産業用機器であり、高精度、高信頼性、長寿命、低消費電力等が要求される。低消費電力については4-20mAの計装電流のみで他に搭載された電気回路を含めて駆動させる必要があり、センサは10kΩと高い抵抗値が求められた。磁気特性も鑑みてNiFeの膜厚は30nmと非常に薄い膜厚を採用している。

NiFe膜は外部から印加される磁界以外にも、応力が加わると抵抗値が変化して計測精度が悪化するため、応力低減に配慮している。NiFe膜の表面に形成するパッシベーション膜には、マイクロフローセンサで培った低応力で緻密な窒化シリコン膜を利用しているが、成膜条件によって特性のシフト量が変化するため、MRセンサ用に特性シフトが少なくなる成膜条件の最適化を行った。ほかにはチップを固定する接着剤や表面コーティング剤の硬化応力にも敏感に反応するため、硬化後のヤング率が低くセンサチップに応力を与えない

接着剤やコーティング剤を選定し、塗布量や塗布条件なども最適化した。

また、センサチップの中心と磁界の回転中心がずれると、センサの出力が理想のsinカーブから外れて計測精度が悪化する。この課題に対しては、磁気シミュレーションの活用と実験により許容位置ズレ量を明確にして、各 부품の公差設計を行った。特にセンサチップを搭載するセンサホルダという部品には、樹脂成型の寸法精度が高い熱硬化性樹脂を採用するとともに、センサチップを搭載する際に、位置ズレが許容範囲以内になるようにアライメント機構を組み込む工夫を行った。

2.4.2 今後の展望

バルブポジション向けのMRセンサ開発で磁気センサの要素技術を獲得したが、我々がビジネスを行っているフィールドでは、バルブ以外にもポジションを検知したい対象物は数多くある。磁気センサは非接触でのポジション検知が可能であり、耐環境性や信頼性の面で非常に有利であるとともに、消費電流も小さく低コストである。この技術を活用して計測対象の位置検出を推進していくとともに、位置情報のデータ解析などを加えて異常の予兆検知や寿命予測などに繋げていきたい。

3. おわりに

ここまでアズビルのMEMS技術を使ったセンサについて述べてきた。今後もMEMSは図12に示す潮流のとおり、単

純な量の計測から質の計測への転換、AIとの融合やDXとの相乗効果、オートメーションにおける自律化やモノからコト売りといった進化で、確実にその応用範囲を広げていく。こういった状況の中で、当社のコアコンピタンスである計測と制御において、MEMSは計測デバイス、フィールド機器の核として、MEMS技術のさらなる深耕を推進するとともに、新たな挑戦からその柱となる技術を増やし、SDGsを道標として持続可能な社会へ「直列」に繋がる貢献を目指していく。

<参考文献>

- (1) 池信一ほか: 微小流量向け熱式流量センサの開発, azbil Technical Review 2011年1月号
- (2) C.S.Smith: Phys. Rev. Vol.94, No.1, p42-49, 1954
- (3) O.N.Tufte, P.W.Chapman, D. Long: J. Appl. Phys. Vol.33, No.11, p3322-3327, 1962
- (4) 五十嵐伊勢美: 自動車技術, 18(9), p706, 1964
- (5) 米田雅之: ピエゾ抵抗式圧力センサの最適設計, Savemation Review, 2000年8月号
- (6) 末高聡: CNGディスプレイ用流量計向けマルチバリアブル圧力センサの開発, Savemation Review, 2002年8月号
- (7) 徳田智久: 世界最高水準の精度と安定性を有するピエゾ抵抗式圧力センサの開発, azbil Technical Review, 2009年12月号
- (8) 関根正志ほか: サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発, azbil Technical Review 2011年1月号
- (9) Hojun Kangほか: "Experimental and computational study on aluminum oxide surfaces exposed to halogen containing plasmas" [PO16PM-071], XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 10th International Conference on Reactive Plasmas, (Center for Atomic and Molecular Technologies, Osaka University, Azbil Corporation)
- (10) 石原卓也ほか: 原子層堆積法向けサファイア隔膜真空計の開発, azbil Technical Review, 2014年4月号

<商標>

マイクロフローセンサ, DSTJ, SuperAce, Bravolight, AIRcube, STEAMcube, GasCVDはアズビル株式会社の商標です。
InconelはSpecial Metals Corporationの商品名であり、商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|-----------------------------|
| 関師 信彦 | アズビル株式会社
技術開発本部マイクロデバイス部 |
| 米田 雅之 | アズビル株式会社
技術開発本部マイクロデバイス部 |

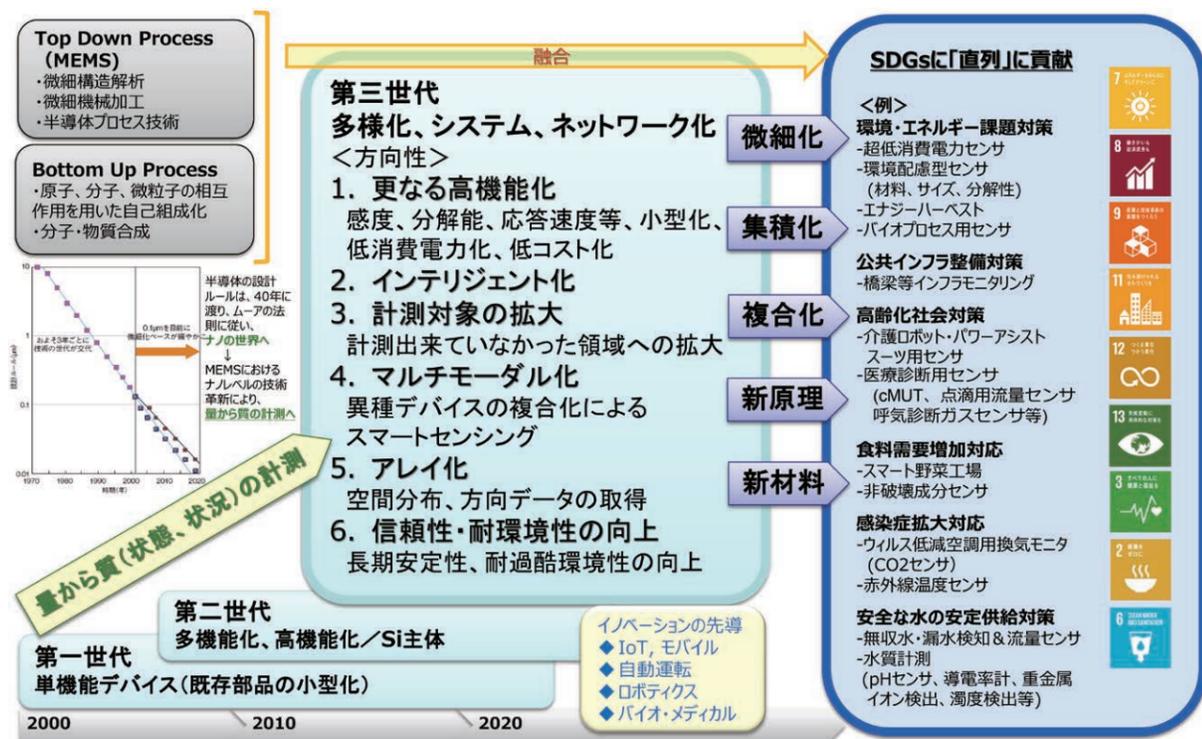


図12 MEMSの潮流

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

Upgrading a sapphire-based capacitance manometer for reduced size and enhanced anti-deposition characteristics

石原 卓也
Takuya Ishihara

キーワード
静電容量式圧力センサ, MEMS, サファイア, 半導体製造プロセス, キャパシタンスマノメータ

半導体製造プロセス用に開発された先行モデルである静電容量式真空計（形 SPG□□）を抜本的に改良した新たな真空計を開発した。センサチップおよび周辺のパッケージ構造も抜本的に変えて小型化および低容積化、高耐圧化を実現するとともに特殊なダイアフラムの構造により耐デポ性能も著しく改善した。さらにセンサ部と計測回路を分離する構造により動作可能温度を従来の200℃から250℃まで上げ、日々進歩が著しい半導体製造プロセスの様々な客先ニーズに対応できるようになった。

We have developed a new vacuum gauge that dramatically improves our previous sapphire capacitance diaphragm gauge model (SPG), which was developed for use in semiconductor manufacturing processes. The sensor chip and the peripheral package structure have been thoroughly reworked for compact size, smaller volume, and high pressure resistance. The specially designed diaphragm structure now has significantly improved resistance to deposition. Also, by separating the sensor element from the circuit boards we have been able to raise the operating temperature from 200℃ to 250℃, allowing us to meet a great variety of customer needs related to continuously developing semiconductor manufacturing processes.

1. はじめに

半導体製造プロセスの成膜、エッチングプロセスにはガス依存性がない全圧真空計である静電容量式の圧力センサ、いわゆるキャパシタンスマノメータがその圧力監視および制御に一般的に用いられている。このプロセスで使用されるガスはハロゲン系のガスのように反応性に富み、腐食性をもつものが多く、センサの構成材料は耐食性があるものが必要である。また、副生成物の真空計内部への付着を防ぐために100℃～200℃に加熱された状態で用いられることが多く、計測圧力レンジは13Paフルスケールの極微圧から大気圧付近の133kPaまで幅広い。

アズビルではガスの種類、動作温度範囲、レンジ範囲、それぞれ幅広く対応が必要な半導体製造プロセスに適用すべく、耐食性・耐熱性に優れたサファイアを基材としたMEMSセンサチップを搭載したサファイア隔膜真空計、形 SPG□□（以下、形 SPG）を開発した⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。図1に形 SPGの外観を示す。市場に投入してから10年以上がたち、客先で発生する様々な課題が明らかになってきた。特にプロセス副生成物のセンサ内部、具体的には感圧ダイアフラム上への堆積による

出力への影響をいかに抑制するかが大きな課題となっており、形 SPGでも様々な改良をセンサ構造に施してきた⁽³⁾⁽⁷⁾。また、お客さまと対話していく中でより小型で場所をとらないものや真空計の内部容積を小さくして応答速度を早くしたもの、さらには次世代向けの材料に対応するため、より高温で動作するものが求められていることが分かってきた。このような要求を満たし従来の形 SPGのセンサ構造を流用するには、構造や大きさに限界があるため、センサチップの構造からパッケージ、さらには計測回路まで抜本的に見直した新たなサファイア隔膜真空計 形 V8（以下、形 V8）の開発に着手した。



図1 形 SPGの外観図

2. 圧力センサ概要

2章では形 V8のセンサチップおよびパッケージの構造を形 SPGと比較し、その特長を説明する。

2.1 センサチップ構造

センサチップは基本的に形 SPGの構造⁽¹⁾⁽⁴⁾を流用しており、センサの動作原理は図2のようにダイアフラムとよばれる薄板の撓みによる静電容量の変化を出力として感知するものである。基本的にこの圧力を受けて撓むダイアフラムの測定媒体側の反対側に設置したキャピティといわれる空孔の上下にコンデンサーを形成する電極を配置し、信号は裏面から取り出す構造である。

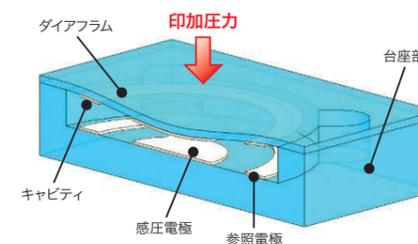


図2 センサ動作原理

図3に示すように、形 SPGから形 V8への改良で大幅に変更したのはセンサチップの外形が単純な正方形ではなく、角部にR形状をつけたことである。これにより過大圧印加時にパッケージの金属板（図4）への負荷を減らし、破壊圧力を従来の1.5MPaから3MPa以上と2倍まで向上させることができた。特にプロセスチャンバーのガスの供給側に設置される真空計にはこのような高い破壊耐圧が要求される。

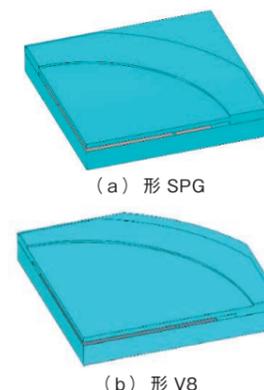
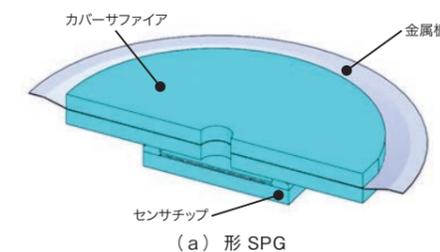


図3 センサチップの形状比較

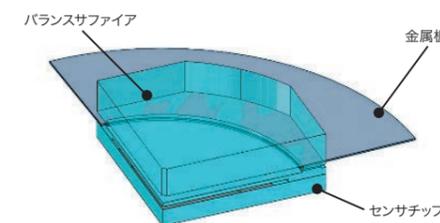
2.2 1stパッケージ

1stパッケージはセンサ素子を金属管体に橋渡すための部材である金属薄板にセンサ素子を接合し、裏面の電極取り出しを行う工程である。サファイアの線膨張係数7～8×10⁻⁶ 1/Kは管体材料であるニッケル基耐食合金の12～14×10⁻⁶ 1/Kと比べると大きな乖離があり、サファイアのセンサチップをこのような金属に接合するとセンサの温度特性、温度ヒステリシスなどに大きな悪影響を及ぼす

だけでなく、接合材として接着剤やロウ材、低融点ガラスなどを用いるとセンサ全体の耐食性を損なうことになる。形 SPGでは直接センサチップを金属に接合することを避け、カバーサファイアといわれる一種の干渉材を間に挟むことにより上記特性の悪化を防いだ。また、金属とサファイアの接合には介在物を必要としない熱拡散接合法を採用した。この接合方法は2枚のサファイアに金属薄板を挟む構造で接合することにより、接合で生じる熱応力のバランスをとるものである⁽¹⁾。今回形 V8ではこのカバーサファイアを使用せずにセンサチップ同様ウエハから製作したバランスサファイアという部材とセンサチップでニッケル基合金の薄板で挟むことによりパッケージすることを目指した。当然、線膨張係数の異なる材料を直接センサチップに接合するので何らかの対策を打たないと前述のように温度関係の特性は悪化することが予想される。



(a) 形 SPG



(b) 形 V8

図4 1stパッケージの構造比較

各種シミュレーションを行った結果、接合部の内径をダイアフラムの可動部の径よりも大きくすることにより温度特性が改善されることが判明した。図5にその計算結果を示す。横軸に接合部の内径を、縦軸に温度を変化させたときの出力の変化をダイアフラム可動部の径と接合部の内径（φ7.5）が一致したときの値を100%としてプロットしたものである。

いずれのレンジのセンサにおいてもセンサの接合部内径を広げることによりこのような異種材料間の接合による影響を抑制することができる。これは異種材料接合に起因する変形の中立面にダイアフラムを配置することで全体が変形してもダイアフラムが変形しないという原理に基づいている。

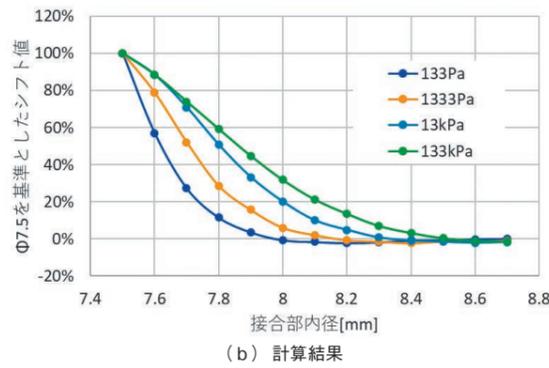
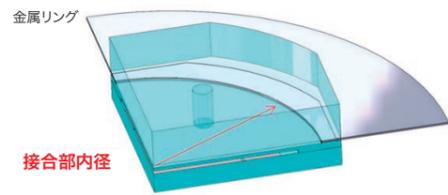


図5 温度特性のシミュレーション結果

また、実際の1333Paレンジセンサの温度特性を図6に示す。45~200℃の温度特性はφ7.5のものに比べてφ8.1まで拡張したものは1/100以下に改善されている。

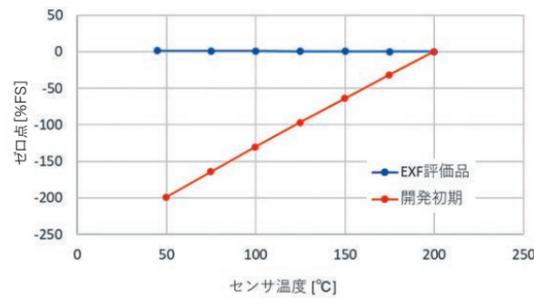


図6 温度特性

併せてセンサチップのところで説明した耐圧のシミュレーション結果を図7に示す。ここではセンサに1MPa印加したときの各部位の応力を材料非線形モデルで計算し、使用した金属板の破壊応力である540MPaに達するかどうかを検討した。四角いチップの場合、角部が金属板に接触する箇所最大応力を生じ、約0.8MPa印加したときに破壊応力に達する。これに対し、Rをつけた場合は1MPa印加しても応力は497MPaで破壊応力には達しないという結果になり、耐圧を向上させることができることが分かる。

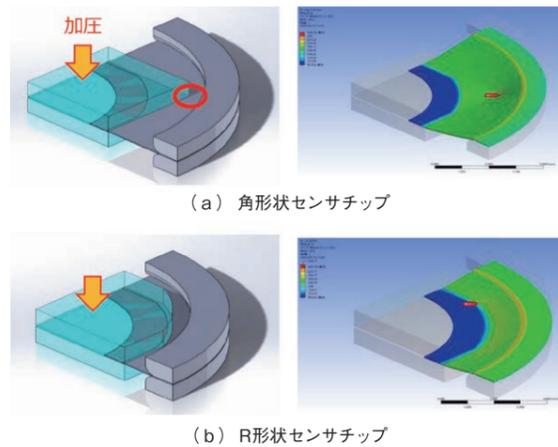


図7 過大圧印加シミュレーション結果

このように各種特性を維持しながらカバーサファイアをなくした1stパッケージを実現することによりセンサ全体の大きさを小さくするとともに圧力応答に大きな影響を与えるセンサ内部容量も大幅に減らすことが可能となった。

2.3 2ndパッケージ

2ndパッケージは1stパッケージを信号の取り出しを行うガラスハメチックシール部や堆積防止用のパッフルとともに金属筐体に溶接し、最後に真空封止を行う工程である。真空封止後にはアクチベートされた活性金属からなるゲッター材料が、真空基準となるリファレンス室の真空度を超高真空(〜 10^{-10} Pa)に維持し、絶対圧を計測できるようになる。ここの形 SPGとは基本コンセプトを変えず、ダウンサイジングした1stパッケージに合わせて筐体設計を行った。図8に形 SPGの構造と形 V8の構造を比較したものを示す。大きな変更点は形 SPGで設けたハメチックシールの信号線のシールド部をなくしたところである。容量計測は外部の電気ノイズに敏感であるので信号線はシールドする必要があるが各種試験の結果、ハメチックシール部にはなくてもノイズ耐性上問題がないことが分かったので構造を簡略化することとした。

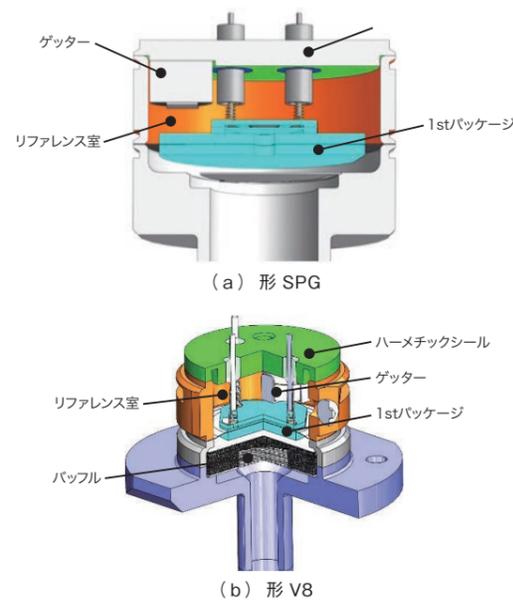


図8 形 SPGと形 V8の2ndパッケージ構造比較

2.4 製品パッケージ

2ndパッケージ以降、製品完成までの工程である製品パッケージは用途によって構造および工程が変わってくる。製品をプロセスチャンパーに取り付ける継手部の形状はもちろんのこと、今回形 V8の開発にあたっては計測回路を分離した分離型モデル(図9b)も新たに開発した。このモデルは一体型モデル(図9a)とは異なり、自己加熱ヒーターをもたず、装置側の配管と一体で加熱することになる。一体型では回路がセンサの近傍にあるため200℃以上には上げることができないが、このモデルでは250℃までの加熱が可能である。このようなセンサが必要とされるのはプロセスチャンパー本体ではなく、ガス供給側のラインである。近年ALD (Atomic Layer Deposition) という成膜プロセスで様々な液体材料や固体材料を気化、あるいは昇華させてチャンパー側に供給する必要があるため、より高温で動作する圧力センサや流量計、バルブのニーズが高まっているということが背景にある。

製品のパッケージが完了したら次は組み込んだ計測回路でセンサのキャラクタリゼーションを実施し、特性検査を行って出荷することとなる。計測回路も大幅に見直し、応答速度を上げるなどの改良を実施した。

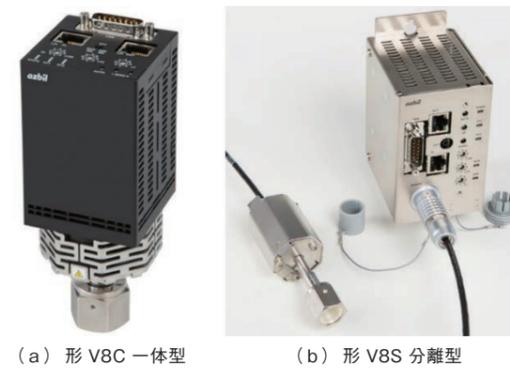


図9 分離型と一体型

3. センサ特性

この3章では1000Paレンジセンサの特性の評価結果の代表的なものを示す。

図10は複数のセンサの圧力感度を示したもので縦軸が容量値変化、横軸が印加圧力である。センサの製造公差から規定した規格値に収まっていることが分かる。

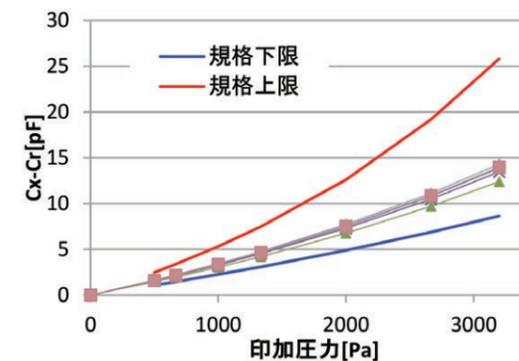


図10 圧力特性

図11はサーマルヒステリシスの測定結果でセンサ温度を150℃から一旦230℃に上げ、もう一度150℃に下げたときのおよびスパン点のずれを示したものである。スパン点は圧力を印加したときの出力から圧力ゼロのときの出力の差分である。

ゼロ点は0.5%フルスケール以下、スパン点はほとんどずれない結果となり、広範囲に温度を振っても特性は安定している。

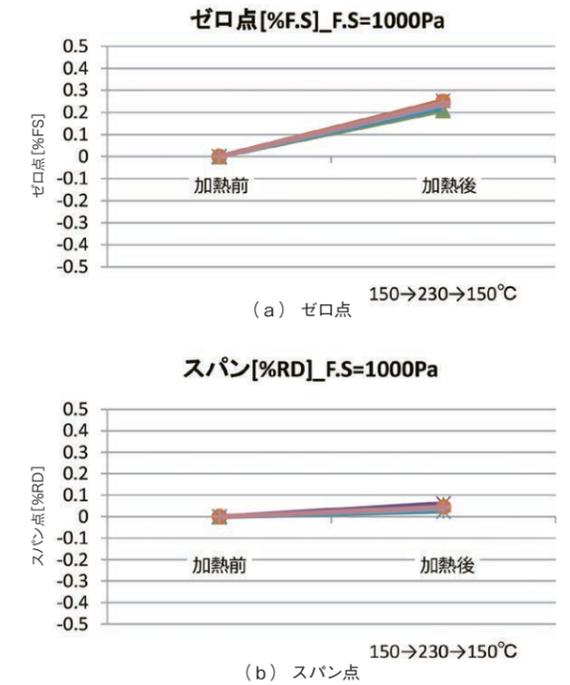


図11 サーマルヒステリシス

図12はゼロ点の230℃における長期出力変動を評価したものである。180時間後も0.1%フルスケール以下で推移しており、極めて安定している。

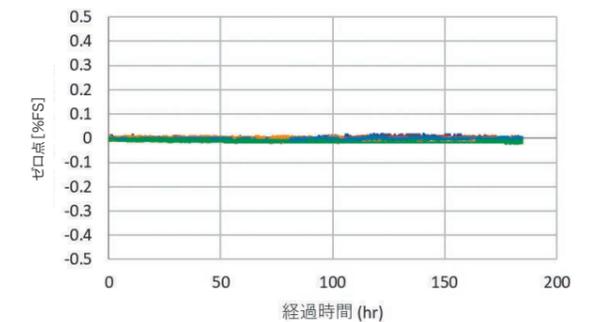


図12 230℃ゼロ点ドリフト

図13は-20℃と80℃間の気相熱衝撃試験の結果を示したものである。ゼロ点は0.1%フルスケール、スパン点は0.02%RDであり、試験前後で大きな動きはない。

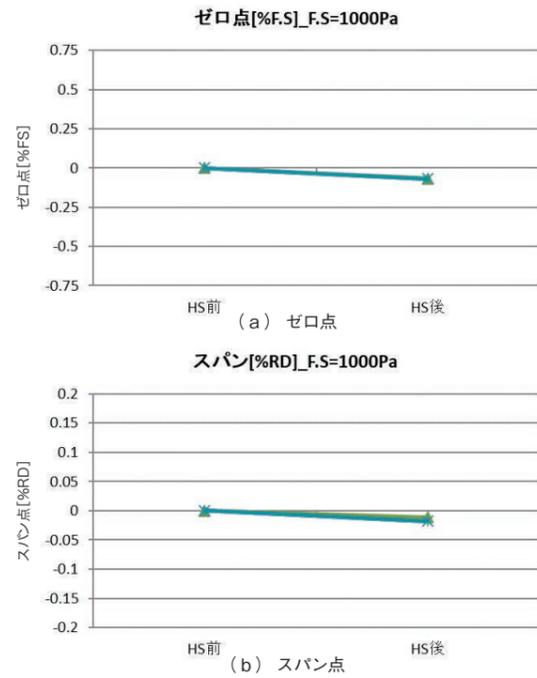


図13 気相熱衝撃試験

図14は許容圧力印加試験で、230℃で300kPaを250回印加後にゼロ点とスパン点の変化を示している。いずれも大きな変化はなく、チャンパー大気開放などの過大圧印加後も特性に大きな変化がないことが分かる。

これらの結果は今回開発した形 V8センサの特性が非常に優れたものであることを示している。

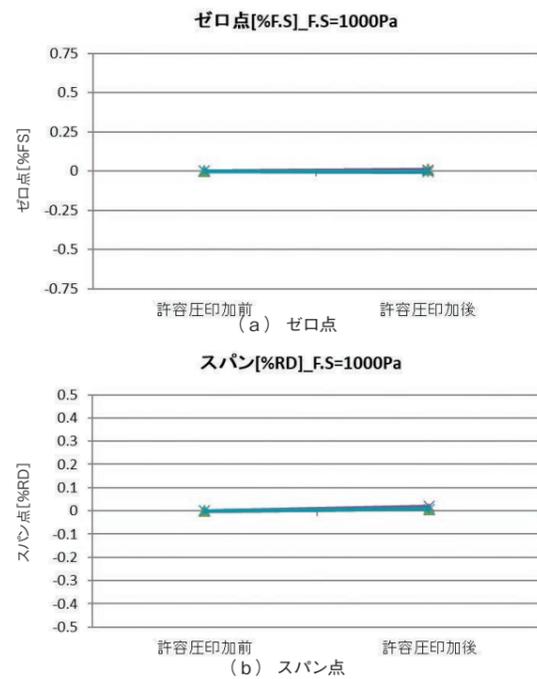


図14 許容圧印加試験

4. 耐デポ性能

半導体製造プロセスに使用される真空計は内部にプロセス副生成物が堆積することがあり、これが原因でゼロ点のシフトが発生するため装置を止めてゼロ点の調整を行ったりセンサを交換したりする必要が生じる。これをいかに防ぐかが「耐デポ性能」であり、装置メーカーに採用されるかどうかの最も大きな判断基準であるといえる。実際、センサを加熱するだけではこの問題を防ぐことができず、形 SPGでは様々な対策を実施したがプロセスそのものが副生成物を発生させやすいALDのようなものが主流になってきたり、ウエハのスループットを上げるためにガスの供給量を増やし、副生成物の量が増えたりしたことなどもあって不十分なものとどまっていた。その代表的なものの挙動を図15示す。これはCVD (Chemical Vapor Deposition)のプロセスで使用したあとの1333Paセンサを社内で再評価したものでありゼロ点が13Paシフトしているだけでなく、加熱や圧力印加に伴ってシフトやドリフトが生じるのが特徴である。このような挙動を示しているということは何等かの粘性をもった材料がダイアフラム上に残存していることを意味しており、対策が必須である。

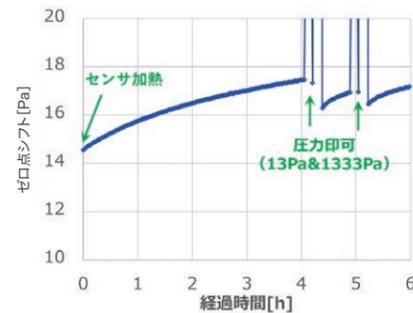


図15 CVDプロセス後のセンサ挙動

4.1 形 V8のデポ対策の基本コンセプト

形 V8の開発にあたってはこのようなデポが起きてもゼロ点のシフトなどを起こさない、ある程度汎用性がある対策を講じることとした。その原理は堆積した膜を物理的に分断することができれば各個で応力が発生しても全体ではダイアフラムを撓ませるモーメントを生じることはない、というものである。図16にその原理をシミュレーションで検証した結果を示す。モデルは一次元の梁の上に堆積物を設置し、それに応力を与えて梁を撓ませたものである。膜にはスリットを入れて分断し、その効果を確認した。この計算結果では膜を200個に分断すれば分断しない場合に比べて梁の最大撓みは1/10程度まで減らすことができることが示されている。

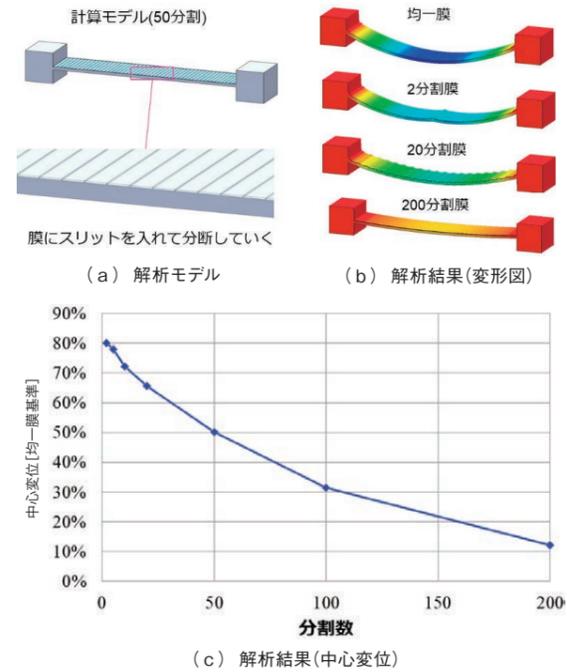


図16 1次元モデルによる堆積膜の分断効果シミュレーション

さらに実際の形状に近い3次元の円板モデルで計算した結果を図17に示す。膜を分断したモデルの変位は、しないものに比べて1/12になることが分かる。

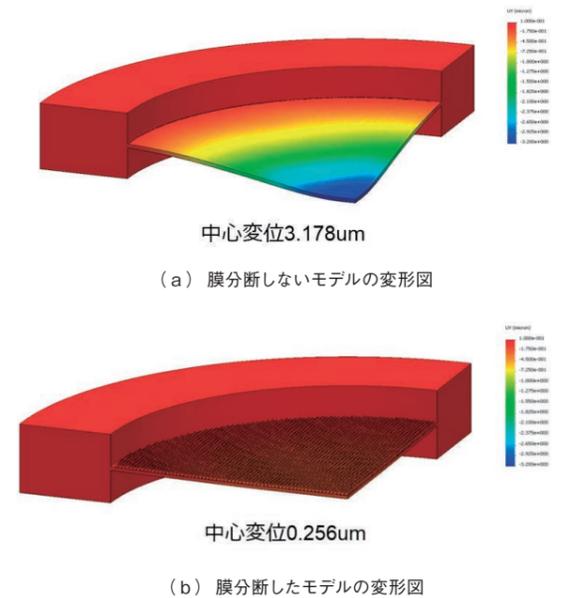


図17 3次元モデルによる堆積膜の分断効果シミュレーション

以上の結果からシミュレーション上はセンサダイアフラム上に堆積膜が形成されても、その膜が細かく分断されていればダイアフラムへの応力影響を抑制することができる。

4.2 デポ対策の凹凸ダイアフラム

次はいかにして膜を分断する構造を実現するかである。今

回はMEMS加工技術を活用してセンサダイアフラム上に微細な溝を形成し、成膜時のガスの侵入しやすさに差異を設けることで堆積膜が分断されることを狙うこととした。成膜プロセス中のガスの平均自由行程、すなわち他のガス分子と衝突せずにガスが飛行できる距離は温度、圧力から計算するとおおよそ50um程度である。これよりも狭い空間にガス分子が侵入する確率は急激に下がる。その結果、堆積する膜の量は溝の外と中で差異ができ、このことを分断に利用する。具体的にダイアフラム表面に加工した構造を図18に示す。

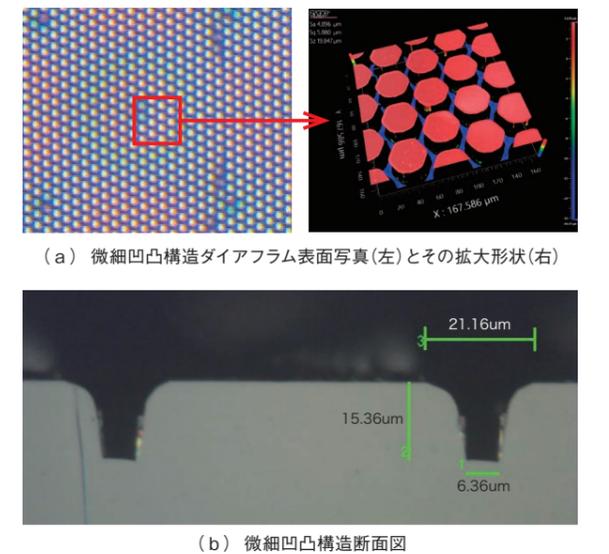


図18 微細凹凸構造

さらに希薄流体シミュレーション (DSMC:Direct Simulation Monte Carlo)を用いて堆積のシミュレーションを行った結果を図19に示す。溝の外と底でおよそ3:1の吸着量の差が発生しており、この溝をハニカム状に配置した構造が分断に寄与することが分かる。

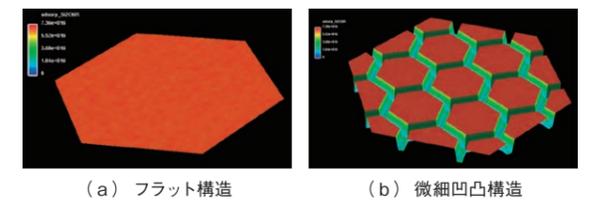


図19 DSMCによる堆積シミュレーション

4.3 デポ対策の効果

最後に凹凸ダイアフラムによる耐デポ効果を実験で実証した効果を下記に示す。図20は熱CVDによるSiO₂成膜プロセスの後段に単純なフラットなダイアフラムチップと微細凹凸ダイアフラムチップをそれぞれ搭載した真空計を配置し、プロセス前後でゼロ点を連続的に計測したものである。レンジは1333Paでそれに対してシフト値はフラットチップで0.3Pa程度と小さいが明確な差異が確認された。

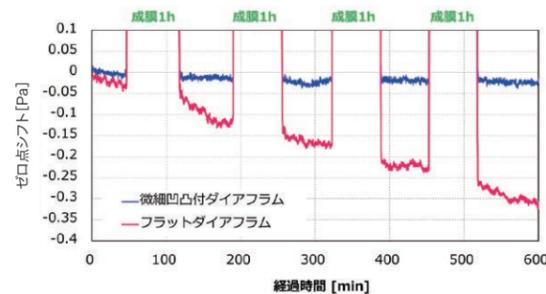
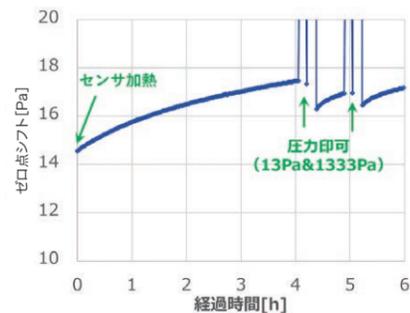


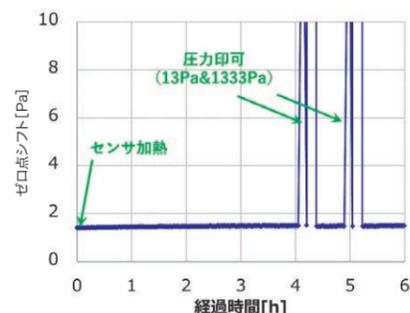
図20 SiO₂-CVDプロセス後のゼロ点挙動比較

次に図21にポリシリコンCVD成膜プロセス後のセンサ挙動をフラットなダイアフラムチップと微細凹凸ダイアフラムチップで比較した結果を示す。

図から明らかなようにポリシリコンではSiO₂の場合と異なり、微細凹凸チップでは大幅に改善されていることが明らかになった。まずフラットチップでは14.5Pa (1%強に相当)のゼロ点シフトが発生しさらに加熱後のドリフトや圧力印加後にシフトが起きていることが分かる。これに対し、微細凹凸チップではゼロ点シフトは1.4Pa(0.1%に相当)にとどまり、さらに加熱後や圧力印加後は直ちに0に復帰し、フラットチップで見られたようなドリフトやシフトは起きない。この2つのセンサは同時に成膜評価を実施しているので相対的ではあるが明確な耐デポ効果が確認された。



(a) フラットダイアフラムチップ



(b) 微細凹凸ダイアフラムチップ

図21 ポリシリコン-CVDプロセス後のゼロ点挙動比較

5. おわりに

デバイスの微細化や3次元化に伴い、半導体製造プロセスで用いられる工法や材料が日々進歩しており、その圧力制御に用いる真空計に対しても求められる機能が拡大してい

く傾向にある。特に耐デポ性能はエンドユーザーの装置稼働状況に直接影響を与える重要な特性であり、今回評価したSiO₂やポリシリコンのCVDだけでなく、プラズマプロセスなど幅広く対応していく必要がある。今後はこの形 V8を基盤として顧客ニーズを取り込み、随時機能を強化したモデルを開発・リリースしていく予定である。

<参考文献>

- (1) 関根, 差波, 石原, 谷: サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発, azbil Technical Review, 2011
- (2) 吉川, 原田, 市原, 長田, 山口: サファイア高温隔膜真空計の開発, azbil Technical Review, 2011
- (3) 石原, 関根, 栃木: 原子層堆積法向けサファイア隔膜真空計の開発, azbil Technical Review, 2014
- (4) 石原, 長田: 高温型サファイア隔膜真空計の開発, 第23回センシングフォーラム, 2006, pp.130-135
- (5) S. Kimura, Y. Ishikura, T. Kataoka, M. Soeda, T. Masuda, Y. Yoshikawa, M. Nagata: Stable and Corrosion-Resistant Sapphire Capacitive Pressure Sensor for High Temperature and Harsh Environments, Transducers' 01, 2001, pp. 518-521
- (6) M. Soeda, T. Kataoka, Y. Ishikura, S. Kimura, Y. Yoshikawa, M. Nagata: Sapphire-Based Capacitive Pressure Sensor for High Temperature and Harsh Environments Application, 2002, Proceedings of the IEEE Sensors 2002 conference, pp.950-953
- (7) 栃木: 原子層堆積法向けサファイア隔膜真空計の開発, 第30回センシングフォーラム, 2013, pp.125-130

<著者所属>

石原 卓也 アズビル株式会社
技術開発本部マイクロデバイス部

MEMS技術を駆使して過大圧保護機構を集積化した超高耐圧差圧センサの開発

A differential pressure sensor with ultra-overpressure resistance and an integrated overload protection system utilizing MEMS technology

徳田 智久
Tomohisa Tokuda

キーワード
差圧センサ, 過大圧保護機構, Bosch プロセス, 表面活性化接合, グレースケールフォトリソ

グレースケールフォトリソグラフィ, ウエハレベル表面活性化接合, Bosch/Non-BoschコンビネーションプロセスといったMEMS技術を駆使することで、センサチップレベルで使用差圧の約630倍の高耐圧化を実現する画期的な構造を有する差圧センサを開発した。さらにこのセンサは1チップで差圧と静圧を高精度に検出可能であり、差圧レンジを超える過大圧印加時にも差圧・圧力の計測が可能である。

Utilizing MEMS technology, including grayscale photolithography, wafer-level surface activated bonding (SAB), and a combination Bosch and non-Bosch processing technique, we have developed a differential pressure sensor with a revolutionary structure capable of resisting differential pressures approximately 630 times higher than those used at the sensor chip level. Additionally, this single sensor chip can make high-precision measurements of both differential pressure (DP) and static pressure (SP), and can measure differential pressure and pressure even when pressure exceeding the DP range is applied.

1. はじめに

差圧・圧力発信器は圧力、流量、液位などの計測に使われる汎用性の高い工業計器であり、世界中で広く採用されている。このような差圧・圧力発信器においては、印加される静圧が測定する差圧の数百倍もあるような非常に過酷な環境下で使用されることがあるため、相応の耐圧が要求される。一方で、搭載される差圧センサは差圧感度と耐圧がトレードオフの関係にあり、使用差圧に対して耐圧としては高いものでも数倍から数十倍程度である。そのため差圧・圧力発信器にはセンサを保護するための過大圧保護機構が搭載されるが、それによる性能の低下、製品サイズ・重量のアップ、コスト高等のデメリットがある。そこでアズビルが保有するMEMS技術を駆使することで、センサチップレベルで使用差圧の約630倍の高耐圧化を実現する画期的な構造を有する差圧センサを実現した(図1)。さらにこのセンサは1チップで差圧に加えて2方向の静圧をそれぞれ独立して検出可能である点についても特筆すべき点である⁽¹⁾。



Φ7.5×5.52mm in size and 0.3g in weight.

図1 超高耐圧センサの外観写真

2. センサ概要

2.1 ピエゾ抵抗式圧力センサの測定原理

まずセンシング方式としてはピエゾ抵抗式を採用している。測定原理としては、図2に示すとおり、圧力印加時にセンサチップに形成されたダイアフラムの撓みにより発生する応力を、センサ表面に形成したピエゾ抵抗の抵抗値変化としてブリッジ回路で検出する方式を採用している。発生応力、抵抗値変化率、およびブリッジ出力電圧の関係を表式(1)に示す。

$$V_{out} = 1/2 (\sigma_l - \sigma_t) \pi 44 \cdot V_0 = \Delta R / R \cdot V_0 \quad \text{式(1)}$$

($\pi 44$: <110>のピエゾ抵抗係数)

この式が示すように、ダイアフラムの径方向に発生する応力 σ_l と接線方向に発生する応力 σ_t との差である $\sigma_l - \sigma_t$ に比例する抵抗値変化率 $\Delta R/R$ に伴う電圧 V_{out} が出力される⁽²⁾⁽³⁾。

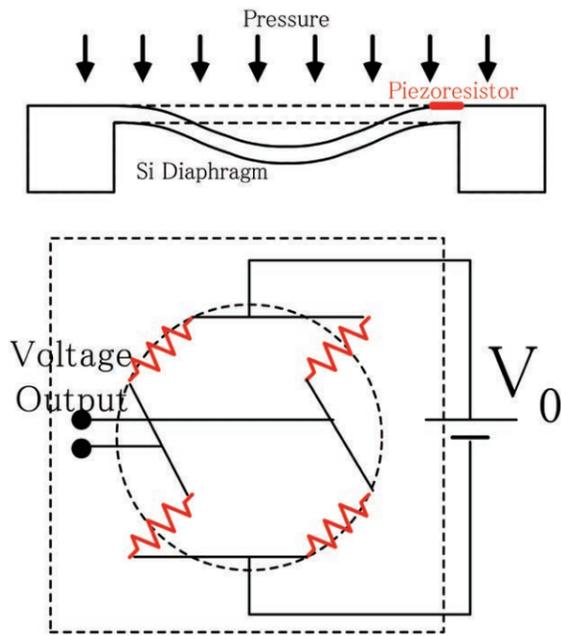


図2 ピエゾ抵抗式圧力センサ測定原理

2.2 過大圧保護機構の構造とコンセプト

センサ過大圧保護の1stコンセプトを図3に示す。センサ素子はピエゾ抵抗素子が形成されたセンサダイアフラムを2つの非球面ストッパーでサンドイッチし、さらにその上下にガラス台座を接続した構造となっている。使用条件範囲内ではダイアフラムが非球面ストッパーに接触することはないが、過大圧が印加された場合はセンサダイアフラムが非球面ストッパーに着底することでセンサダイアフラムの変形が抑制され、過剰な応力の発生が抑制されることでダイアフラム破壊が防止される。

そのため、非球面ストッパーは使用圧力以上のある圧力(着底圧)が印加された際のセンサダイアフラムの変位に沿った形状をしており、ダイアフラム着底時に異常変形を起こさないようになっている。さらに図4に示すように、非球面表面には、ハニカムパターンが形成されており、ダイアフラム着底時のスティッキングを防止するようになっている。しかしながら、このような構造では、ダイアフラム変形時に、非球面ストッパーとセンサダイアフラムの接合部に応力が1点集中してしまうことが分かっている。さらには上下の非球面でズレが生じると発生する応力が著しく増加してしまう。そこで我々は図5に示すように50 μ m幅の未接合部分を選択的に形成することで過大な応力一点集中を防いでいる。これにより少なくとも50%程度に発生応力を低減することに成功している。

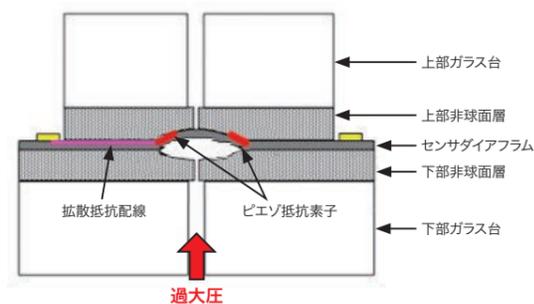


図3 過大圧保護機構の1stコンセプト

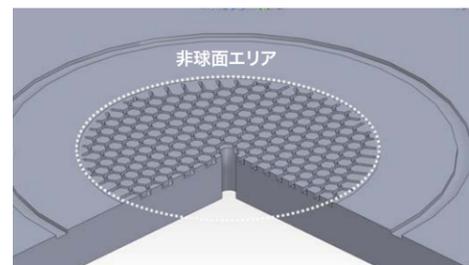


図4 非球面上のハニカムパターン

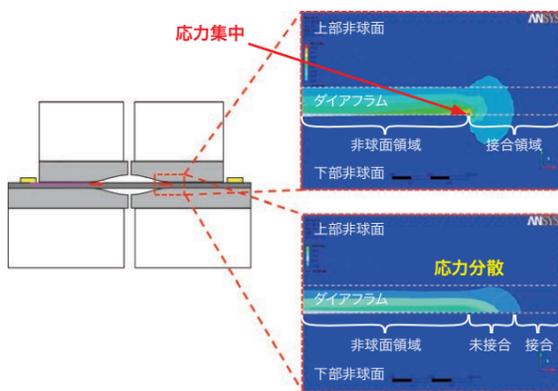


図5 選択接合による応力分散(FEM解析結果)

しかし、その後さらに圧力が上昇すると、ストッパーごとセンサチップ全体が変形してしまう。その場合、非球面とダイアフラムの支持部に過大な引張応力が1点集中してしまい、センサ破壊に至ってしまう(図6)。

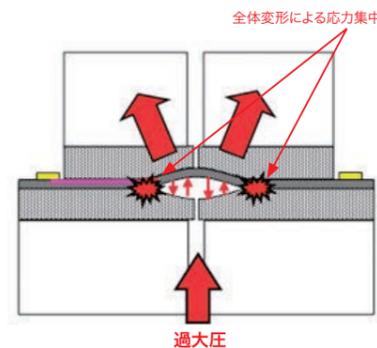


図6 1stコンセプトの課題

そこでこれを防ぐための2ndコンセプトが必要となったため、我々は図7に示す構造を実現している。このセンサ素子

は、センサダイアフラム、2つの非球面ストッパー、2つのシリコンコンベース、2つのガラス台座で構成されている。

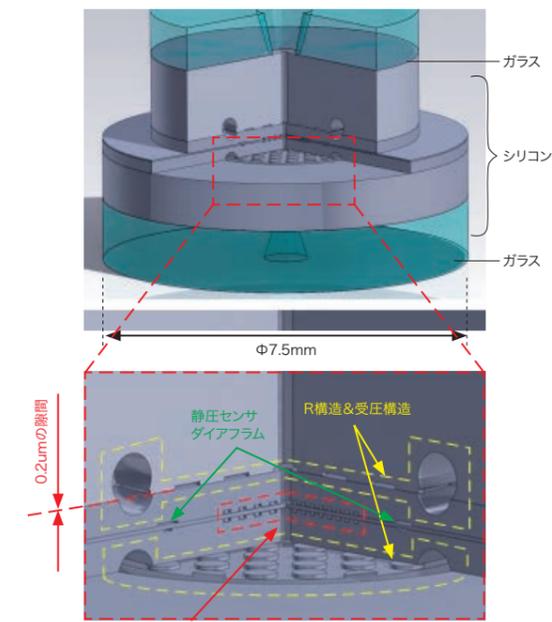


図7 2ndコンセプトの基本構造

1stコンセプトに加えて、非球面の裏側に接続されるベース層に非球面よりも広い受圧面を形成することを目的として、非球面との間に0.2 μ m程度の微小な隙間を形成し、そのエリア内に貼り付き防止と圧力伝達オイルの流動性確保のための柱構造を配置している。さらに受圧面の端にはストッパー層とベース層で形成される特長的なR構造を形成している。この構造により、1つの差圧センサと2つの独立した静圧センサを有するマルチバリエブルセンサとなっている。

図8に2ndコンセプトによる過大圧保護を示す。このセンサ素子に下側から過大圧が印加されるとベース層に形成された受圧エリアの方が非球面エリアよりも広いため、上向きの力が下部ストッパー層に発生する。上部ストッパー層は柱に接触して変形が抑制されるので、1stコンセプトモデルで過大な引張応力が発生し、破壊の起点となっていた箇所には引張ではなく圧縮応力が発生する。その代わりに過大な引張応力は受圧エリア外周に形成されたR構造部に発生するが、分散・緩和される。

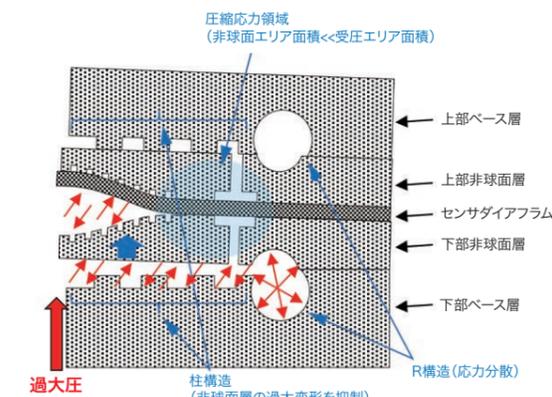


図8 2ndコンセプトによる過大圧保

図9にR構造による応力分散効果のFEM解析結果を示す。ここに示す特長的な構造は、FEMによる応力分散と小型化における最適化の結果である。以上が2ndコンセプトである⁽⁴⁾。

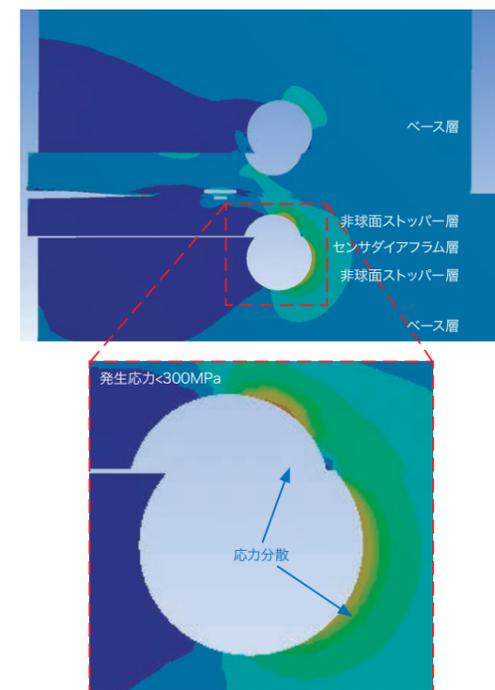


図9 過大圧印加時のR構造における応力分散(FEM解析結果)

3. 作製方法

ストッパー層作製プロセス模式図を図10に示す。まず、(a) 厚さ 250 μ mの(100)面シリコン基板からなるストッパー層上に非球面形状をグレースケールフォトリソグラフィと Reactive Ion Etching (RIE) による等方性エッチング(Non-Boschプロセス)を利用して形成する。次に、(b) 同じ表面に、異方性エッチング(Boschプロセス)を利用して静圧(SP)用ダイアフラムを形成するための深さ20 μ mのリング状トレンチ構造を形成する。(c) に示す同じ表面に、ウエハ接合時に反対側のセンサ電極の干渉を避けるためにBoschプロセスを利用して、深さ100 μ mのリング状のトレンチ構造を形成する。裏面(d)は、深さ約130 μ m、幅約345 μ m、曲率約360 μ mのリング状トレンチ構造をNon-Boschプロセスで形成する。

図11に示すように、このエッチングプロセスは2つのステップで実行される。第1ステップはSF6ガスのみを利用したエッチングを行うが、第2ステップはSF6ガスとC4F8ガスを利用したエッチングを行う。これにより、エッチング形状の深さは浅いま曲率を大きくすることが可能である。

最後に、(e) Boschプロセスを利用して、差圧(DP)および静圧(SP)センサダイアフラムへの圧力導入開口としての貫通孔を形成する。

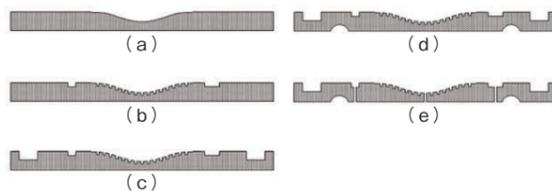


図10 非球面ストッパー層作製プロセス

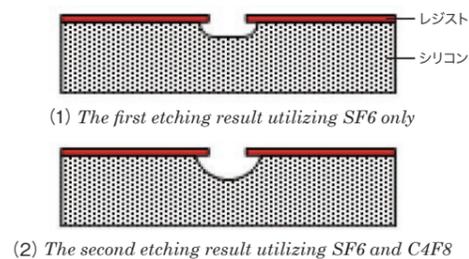


図11 2ステップエッチングプロセス

ベース層の製造プロセスの概略図を図12に示す。まず、(a) 厚さ1500umの(100) Si基板からなるベース層上に深さ0.2um以下の受圧部をRIEにより形成。その後、(b) 同じ領域に深さ20umの柱状構造を、Boschプロセスを用いて等間隔に形成する。次に、(c) BoschプロセスとNon-Boschプロセスを組み合わせた技術を用いて受圧部外周のR構造を形成する。このエッチングプロセスは、図13に示す2つのステップで実行される。

最初のステップをBoschプロセス、2番目のステップをNon-Boschプロセスの順で連続して実行する。これにより、エッチングされた部分がスリットから円形の穴に変化し、深さが約300um、開口部の寸法が約315um、曲率が約385umのユニークな構造が実現する。最後に、(d) Boschプロセスを利用して、受圧部への圧力導入口となる貫通孔を形成する。

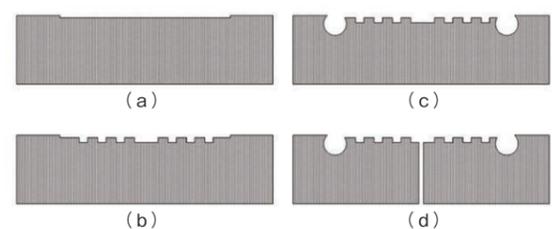


図12 ベース層作製プロセス

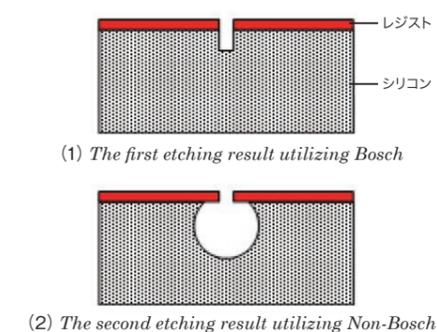


図13 2ステップエッチングプロセス

積層接合プロセスの概略図を図14に示す。2枚のストップパーウエハ、2枚のベースウエハ、およびピエゾ抵抗を備えSOIウエハで作製されたセンサウエハは、ウエハレベルSABを利用して接合される。まず、(a) 上ベース層と上ストップパー層を接合する。次に、(b) 第1の接合ウエハとセンサウエハを接合する。その後、(c) BoschプロセスによりSOIウエハの基板層を完全に除去し、BOE (Buffered Oxide Etch) プロセスを利用してSOIウエハのBOX (Buried Oxide) 層も完全に除去する。第3に、(d) 下部ベース層と下部ストップパー層とを接合する。最後に、(e) 下部接合ウエハと上部接合ウエハを接合する。

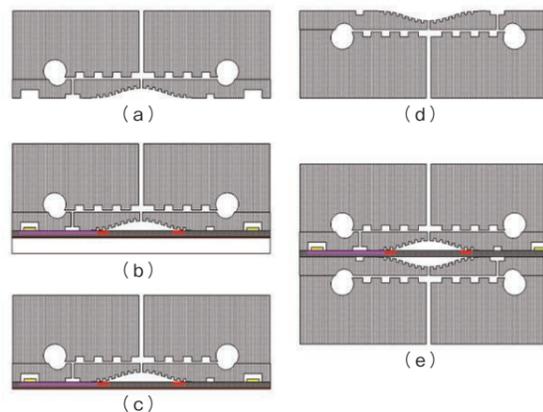


図14 積層接合プロセス

作製したセンサチップの断面イメージを図15に、上面からのIR顕微鏡観察結果を図16に示す。この構造により、過大差圧が直接チップにかかった場合でも差圧 (DP) センサを保護することができ、どちらの方向からの静圧 (SP) もそれぞれ独立して測定することが可能である。

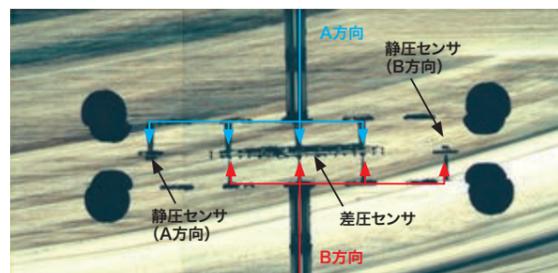


図15 顕微鏡による断面観察結果

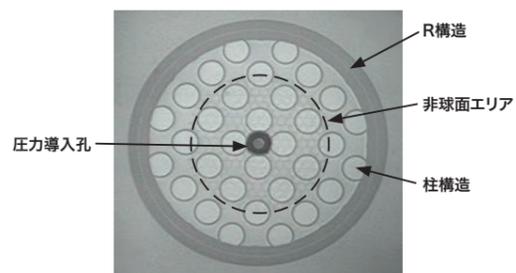


図16 IR顕微鏡による観察結果(上面図)

4. 実験結果

低差圧レンジと高差圧レンジでのセンサ出力特性を、それぞれ図17と図18に示す。1チップで高圧側/低圧側の両方向から差圧と2方向の独立した静圧の測定値を得ることができた。この構造により、標準使用圧力範囲の600倍以上の圧力に対して十分な耐圧性能(従来センサの10倍以上)を有していること実証した。

また差圧ダイアフラムそのものが保護される一方で、センサチップには圧力が印加されるため、2方向の独立した静圧センサの出力により圧力計測が可能であることも実証した。

さらに、繰り返し耐圧評価においては、42MPa、50,000回の耐圧性能を実証した。

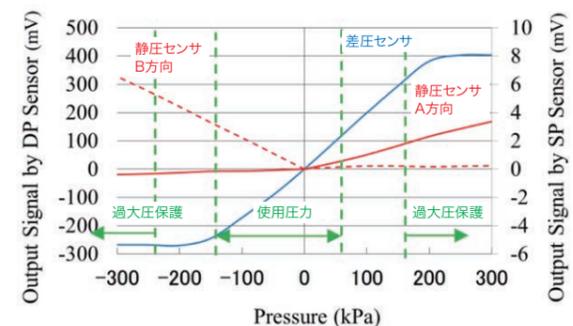


図17 低差圧レンジにおけるセンサ特性

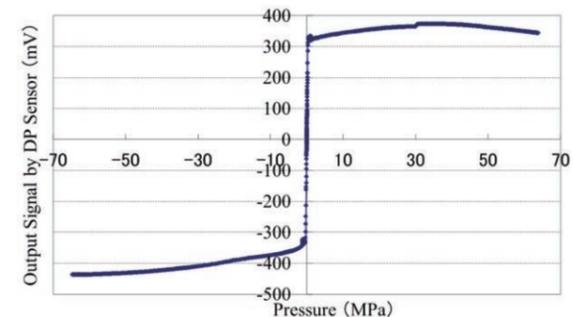


図18 高差圧レンジにおけるセンサ特性

5. おわりに

アズビル独自のMEMS技術を駆使することで他に類を見ない画期的な構造で超高耐圧性能を有する過大圧保護機能付差圧センサを実現することに成功した。

一方で今回の構造は非常に複雑、かつプロセス難易度が高いためセンサの量産が困難である。そこでこの技術をさらに応用し、よりシンプル、かつ量産に適した構造で同じ機能を有する新しいセンサを実現することで新製品を創出し、顧客に対して新たに耐久性向上による安心、安全、小型軽量化による快適といった価値提供を行う所存である。

<参考文献>

- (1) 間々田浩一: 差圧・圧力発信器の高性能、高機能化技術, azbil Technical Review, December, 2008, pp. 24-29.

- (2) 米田雅之: ピエゾ抵抗式圧力センサの最適設計, Savemation Review, Vol.18, No.2, 2000, pp.2-11, 山武
- (3) 徳田智久: 世界最高水準の精度と信頼性を有するピエゾ抵抗式圧力センサの開発, azbil Technical Review, December, 2009, pp.28-33.
- (4) Tomohisa Tokuda, A NOVEL PRESSURE SENSOR WITH BUILT-IN OVERPRESSURE PROTECTION UTILIZING THREEDIMENSIONAL ETCHING AND WAFER-LEVEL STACKING TECHNOLOGY, The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2016, pp.222-225.

<著者所属>

徳田 智久 アズビル株式会社
技術開発本部マイクロデバイス部

オイルフリー高感度圧力センサの開発と応用検討

Design and application study of an oil-free high-sensitivity pressure sensor

瀬戸 祐希
Yuki Seto

キーワード

ピエゾ抵抗式, オイルフリー, MEMS, 歪センサ, サニタリー向け圧力センサ, トルクセンサ

差圧・圧力発信器に搭載されているピエゾ抵抗式圧力センサが大気中だけでなく高湿度下においても高い安定性を有する特長を活かし、サニタリー仕様の圧力センサへの応用を検討した。サニタリー仕様ではいくつかの要求事項があるが、特にオイルフリー要求に対して性能面で満足する製品は、現状世の中に存在しない。そこで、独自設計したMEMSセンサ素子を金属受圧ダイアフラムに接合し、ダイレクトに歪を検出することで、オイルフリーで液封型同等レベルの高精度な圧力センシングが可能であることを実証した。さらに、本技術を「ロボットアームおよびロボットハンド用の力覚センサ」への応用を視野に入れ技術検証を行ったので報告する。

The piezoresistive pressure sensor in our pressure and differential-pressure transmitters ensures high stability not only in atmospheric conditions but also in high humidity. Taking advantage of this characteristic, we decided to test whether it could handle the stress placed on a pressure sensor under sanitary specifications. Products for sanitary use must meet a number of requirements, and there are currently no sensors that satisfy the requirement for oil-free operation in particular. We welded a MEMS sensor element of our own design to a metal pressure-receiving diaphragm to directly detect strain. We were able to demonstrate that such a device could provide high-accuracy pressure sensing rivaling that of a liquid-filled sensor even without the use of oil. We also report on the technical verification of this technology with a view to applying it to force sensors for robot arms and hands.

1. はじめに

アズビルの主力製品である差圧・圧力発信器は、汎用性の高い工業計器であり、世界中で広く使用されている。内部には、ピエゾ抵抗式のMEMS圧力センサ素子⁽¹⁾が搭載されており、プロセス流体と接触する金属バリアダイアフラムで受圧した圧力を内部に封入されたシリコンオイル等の封入液を媒体として圧力伝達し、センサ素子内に形成したSiダイアフラムで検出する仕組みとなっている。圧力検出部は封入液で満たされており、常に安定した状態を保つことができるため、長期的に信頼性の高い製品となっている。

ところが、食品分野においては安全性の面から封入液を使用しないオイルフリー圧力センサが求められている。しかし、オイルフリー圧力センサは封入型と比較して性能面、品質面で劣っており、全面切替えに至っていないのが現状である。今回、独自プロセスで製作した圧力センサにおいて、60℃/ドライ環境と60℃/90%RHの高湿度環境でそれぞれドリフト試験を行ったところ、既存製品(図1)に搭載されている封入型圧力センサ素子と同等の高い安定性を有してい

ることが判明した(図2)。そこで、封入液を使わない新しいピエゾ抵抗式圧力センサの開発を目指した。



図1 圧力センサBravolight™ (形 PTG60S, 形 70S)

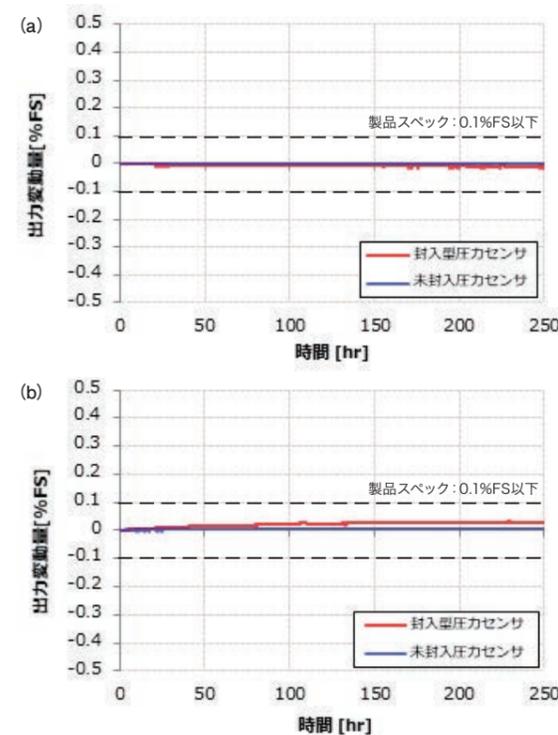


図2 (a)ドライ環境下での圧力センサ出力ドリフト比較、(b)高湿度下での圧力センサ出力ドリフト比較

2. 圧力センサ概要

2.1 サニタリー仕様の圧力センサ

衛生的な配慮が必要な食品市場等の製造ラインで用いられるサニタリー向け圧力センサは、以下のような要求事項がある。

- (1) 耐食性
圧力の測定対象の流体が接触する接液部分にステンレス鋼、セラミックス、およびチタン等の耐食性の高い材料を用いる必要がある。
 - (2) 清浄性
定期的な高温蒸気による洗浄が行われるが、洗浄残りがなく、できる限り凹凸のないダイアフラム構造が求められるとともに、蒸気洗浄に対する耐熱衝撃性が必要となる。
 - (3) 信頼性
封入液を使用しないオイルフリーであること、および剛性の高いダイアフラムで破れないことが求められる。
 - (4) 汎用性
脱着可能なフェール継手が一般的に用いられており、クランプバンドで締め付けられたときの、センサのゼロ点オフセットが生じないことが要求される。
- これらの要求事項がセンサ性能に影響するため、高精度化が容易ではないといえる。特に、剛性の高い金属ダイアフラムの微小な歪を金属薄膜の歪ゲージを貼り付けて検出する方式では、低感度かつ複数の歪ゲージの貼り付け精度がセンサ特性に影響を与えるため、ばらつきが大きいといった課題がある。

2.2 開発したオイルフリー圧力センサ

当社では前述の要求事項を考慮した上で、ダイアフラムのマイクロメートルレベルの微小な変形を高感度にセンシング可能なSiピエゾ抵抗式の歪センサを搭載したオイルフリー圧力センサを開発した。

図3に示すように、ピエゾ抵抗ゲージを形成したシリコン層の下に3本のガラス柱が接合されており、ダイアフラム中央と外側の変形差をシリコン層に伝達する構造である。例えば、直径Φ23mm、厚さ0.5mmのステンレスダイアフラムが圧力1MPa印加時に、ガラス柱の中央と外側に生じる変形差は10um程度と微小であるが、効率よくSi層に変形伝達することで、同ダイアフラムに貼り付けた歪ゲージ式と比較して、約80倍の感度を実現した。また、温度変化による出力変動を極力抑制するために、ステンレスダイアフラムとセンサ素子の線膨張係数の違いによる出力変動が発生しない位置に抵抗ゲージを配置することで、高SNな特性を実現している(図4)。

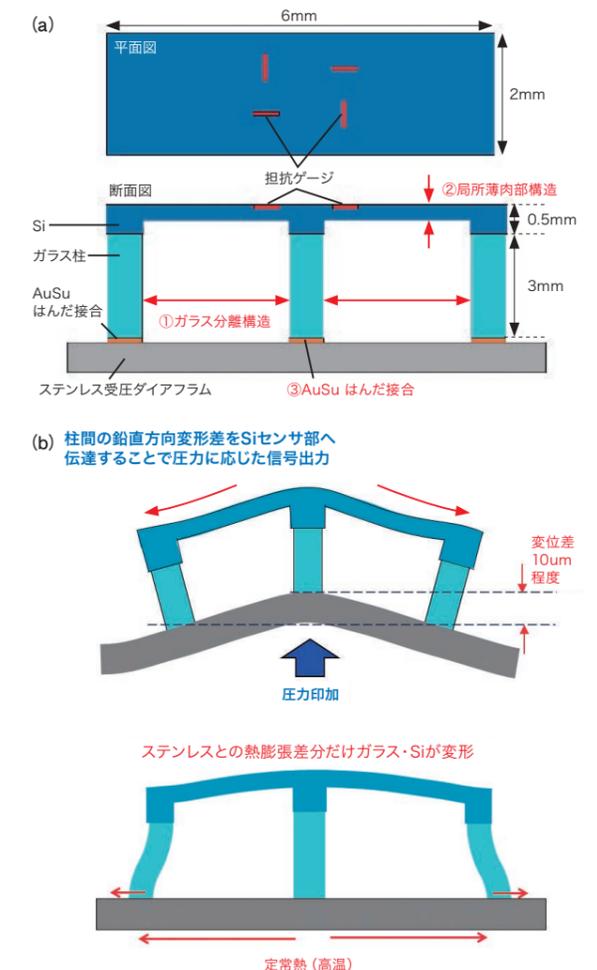


図3 (a) オイルフリー圧力センサ素子模式図、(b) オイルフリー圧力センサの動作原理

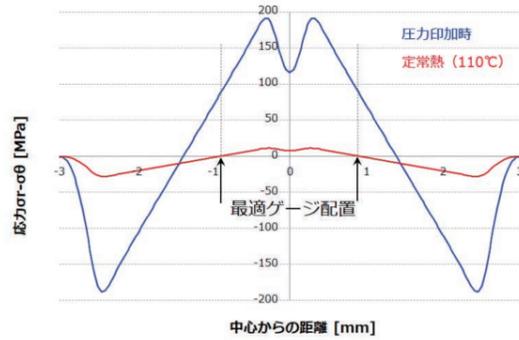


図4 圧力・熱印加時のSi表面応力分布

2.2.1 設計のポイント

高感度を実現するためには、ステンレスダイアフラムの微小変形をいかに効率的にSi層に伝達できるかが重要である。そのために以下3項目を採用している(図3)。

- ① ガラス分離(柱)構造
- ② Si層の局所薄肉部構造
- ③ AuSnはんだ接合

①については、柱間で生じた変形差をSi層に効率よく伝達することができ、ステンレスダイアフラムとの接合面積を極小化できることがメリットである。またガラス柱を長くすることで、蒸気洗浄時のSi表面の温度上昇を抑制し、かつステンレスとの線膨張係数の差をガラス柱が変形することで吸収する利点がある。②では、Si層が厚いと剛性が高くなり、変形伝達時にガラス柱や接合部に負担がかかり破損のリスクがある。そのため、Si層を局所的に薄肉化することで、変形を阻害することなく伝達することができる。また薄肉部を局所的に形成することで、応力発生箇所を極小化するため素子サイズを小さくすることも可能となる。③のセンサ素子の接合では、接着剤で試したものの求める感度が得られなかったため、より剛性が高く、かつ接合温度が低いAuSnはんだ接合を採用した。ステンレスダイアフラムとガラス柱の底面にはスパッタリングやめっきにより金を成膜しておき、AuSnはんだリボン材を挟み、炉内で溶融させて接合している。センサ素子を長手方向に拡大すれば、伝達する変形量が大きくなるため、さらなる高感度化は可能であるが、はんだ接合時の応力増大やチップ素子コストアップとなるため、使用温度範囲や圧力レンジなどの要求仕様に応じて最適な設計が求められる。

2.2.2 耐熱衝撃特性

高圧蒸気による定期的な配管洗浄は、圧力センサ接液部の受圧ダイアフラムも洗浄の対象となる。接液部に蒸気が接するとダイアフラム表面が瞬間的に高温になり大きな熱分布が生じるためダイアフラムが変形する。さらに時間の経過とともにハウジング全体に熱が伝達していき、それに伴って圧力センサの出力変動が生じる。工場によっては、出力変動量が大きいとインターロックがかかってしまう場合があり、変動量をできる限り抑制する必要がある。液封型の場合、受圧ダイアフラムからセンサ素子までの間に封入液があり、さらに距離が離れているため、ほとんど熱衝撃の影響を

受けない。一方、受圧ダイアフラムに直接センサ素子を貼り付けた場合、その影響は大きいことが想定される。そこで、我々はまず図5の蒸気熱流体解析モデルを作成し、蒸気洗浄時の温度変化をシミュレーションにより解析した。その結果を過渡伝熱と構造の連成解析シミュレーションに境界条件として与えてやることで、計算コストを抑えた効率的な応力分布の解析手法を実現した。

本手法で設計した圧力センサにて、蒸気接液時のセンサ出力変動量を±3%FS以下(従来比:1/10以下)に低減し、大幅な耐熱衝撃特性の向上を達成している(図6)。

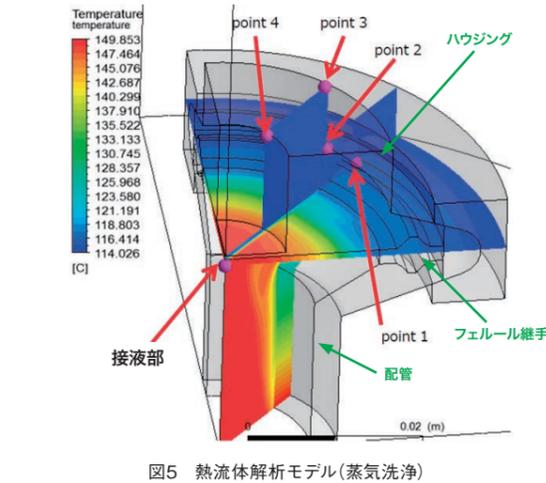


図5 熱流体解析モデル(蒸気洗浄)

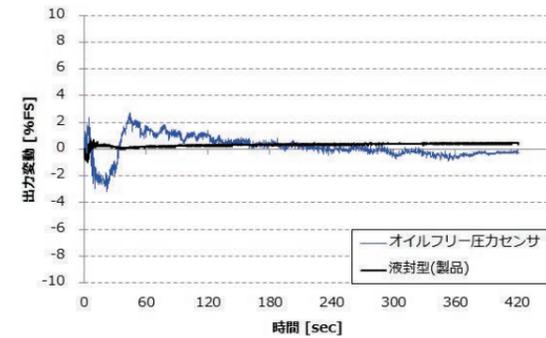


図6 蒸気接液時のセンサ出力変動

2.2.3 今後の展望

従来のオイルフリー圧力センサに対して大幅な高感度化を実現し、液封型同等レベルの精度達成見込みが得られた。今後は、食品・飲料市場で求められている要求仕様・顧客価値を調査し、国内仕様だけでなく、グローバルスペックの達成を目指す。

3. ロボット用力覚センサ応用

当社では上述した高感度歪センサ技術を内蔵した次世代スマートロボット⁽²⁾を開発した。これは協調型のロボットアーム(図7)で、ロボットの各関節に搭載した力覚(トルク)センサで、アームの高精度制御、さらには人がロボットに接触し

たことを高感度に検知することが可能となっている。また先端のハンド部にも同様に力覚(曲げ)センサを搭載することで繊細なハンドリングを可能とし、卵やカステラといった柔らかいものも把持することを実現した。



図7 アズビルスマートロボットイメージ

3.1 トルクセンサ

トルクセンサは起歪体と呼ばれる歪を発生させる部品に歪センサ素子を搭載したものと定義する(図8)。センサ素子は圧力センサと構成は同じで、ガラス層が分断されていないところが異なっている。トルクが印加されると応力分布図で示すようにセンサ素子表面に45°方向の応力分布が生じる。この応力を効率良く検出するために、4つの抵抗ゲージを45°の向きで中央に配置することで高感度かつ、温度特性の良好なセンサを実現した(図9)。本センサは、一般的な歪ゲージと比較して2桁以上の感度を有し、ヒステリシスを±0.5%FS以下に抑制できている。図10にトルクセンサ特性を示す。図10を見ると、直線性・再現性に優れた特性であることが分かる。

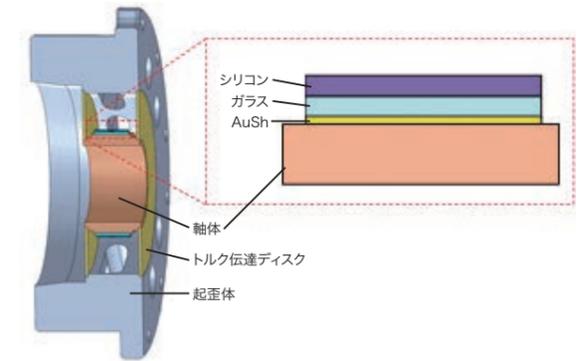


図8 トルクセンサ外観(起歪体/センサ素子)

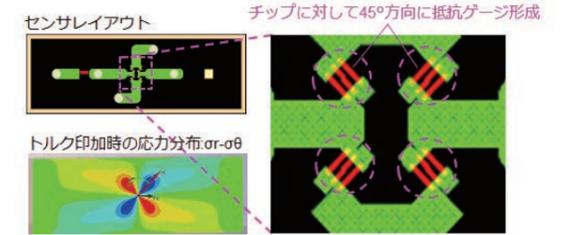


図9 高感度歪センサ抵抗ゲージ配置

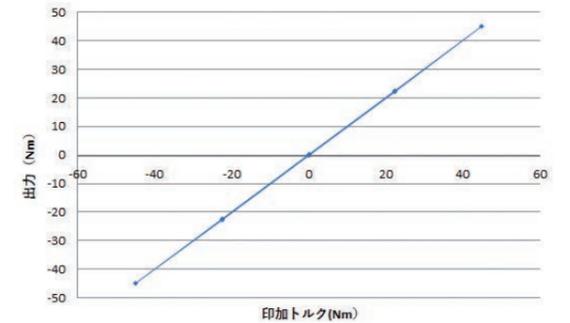


図10 トルクセンサ特性

4. おわりに

高感度歪センサは、センサ素子単体ではその効果を検証することができず、ダイアフラム等の起歪部と合わせて最適化していく必要がある。現時点で、センサ素子に発生する応力は、Siの母材強度に対して1/50以下のため、材料としてのポテンシャルを活かしきれておらず、さらなる高感度化、高精度化の余地があると考えている。今後、様々なアプリケーションの検討を行い、技術の成熟化を目指す。

<参考文献>

- (1) 徳田智久: 世界最高水準の精度と安定性を有するピエゾ抵抗式圧力センサの開発, azbil Technical Review, 2009年12月号
- (2) 原田豊, 田原鉄也, 岩下純久: 次世代スマートロボットの開発, azbil Technical Review, 2018年4月号

<商標>

Bravolightはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

瀬戸 祐希 アズビル株式会社
技術開発本部マイクロデバイス部

ユーザビリティを向上させた マスフローコントローラの開発

Improving mass flow controller usability

大貫 量孝
Kazutaka Ohnuki

キーワード
マイクロフローセンサ, マスフローコントローラ, 流量制御, F4Q, ユーザビリティ向上, MEMS

機械・電気・半導体などの市場では、熟練作業者の減少や要求品質の高まりにより、マスフローコントローラでの制御自動化が進んでいる。近年では、増加する計測器を限られた作業員で管理しているため、素早い状態把握手段と簡単に扱える操作手段が求められるようになってきている。今回、UI (User Interface) デザインを一新するとともに、使用条件への適合性を改善することで、従来品より多くのアプリケーションで最適な制御を提供し、市場要求にも応えたマスフローコントローラを開発を行ったので、その概要を紹介する。

Due to a decrease in the number of skilled workers and stricter quality requirements in the mechanical, electrical, semiconductor, and other markets, automation of control involving mass flow controllers is progressing apace. Since an increasing number of measuring instruments are being managed by a limited number of operators, there is a growing demand for a quick means of ascertaining their status and for easy-to-use operating methods. By redesigning the user interface and providing better adaptability to various operating conditions, we are able to offer a mass flow controller that satisfies market demands and provides optimal control for more applications than existing products.

1. はじめに

マスフローコントローラは、主に半導体産業の前工程（ウエハ生成）におけるプロセスガスの流量制御用として使用されてきた。近年では、自動車、機械、電気、電子など一般産業でも市場が拡大しており、市場要求も多様化してきている。マスフローコントローラは、この市場要求に対応して機能を拡張⁽¹⁾してきたが、状態把握と機器設定にかかわる操作性や、配管方向と圧力条件を含む使用条件への適合性などといったユーザビリティ要求⁽²⁾までは対応できていなかった。

アズビルでは、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を活用した熱式質量流量センサであるマイクロフローセンサTMと比例バルブを組み合わせた、マスフローコントローラ 形 MQV□□□□ (以下、形 MQV)、形 F4H、形 MPC□□□□ (以下、形 MPC) を販売している。当社製品で搭載している表示は、7セグメントLEDと粒LEDによる表示であるため情報量が制限され、提供できる操作性に限界があった。また、センサの特性から、センサの向きが変わると正しく計測できず、配管の向きが限定される等、使用条件への適合性についての課題を抱えていた。

これらの課題を解決するため、UIを一新し、新たな機能

を追加したマスフローコントローラ形 F4Q(図1)を開発した。本稿では、その開発内容について報告する。



図1 形 F4Q外観

2. マスフローコントローラ製品概要

当社では、既存製品の形 MQV、形 MPC、形 F4Hと今回開発した形 F4Qを販売している。製品の例としてデジタルマスフローコントローラ 形 F4Q0002の概略仕様を表1に示す。本章ではこれらの当社製マスフローコントローラについ

て概要を説明する。

表1 マスフローコントローラの概略仕様

形番	F4Q0002
表示部	フルドットLCD (96×96 dot)
バルブ方式	比例ソレノイドバルブ (ノーマルクローズ)
制御範囲	0.02~2.00 L/min (1~100%)
対応ガス種	空気/窒素、酸素、アルゴン、炭酸ガス、13A、プロパン、メタン、ブタン
応答性	設定±2%FS以内に0.3s (Typ.)
精度 (Q:流量)	±1%SP (15≤Q≤100%FS) ±0.15%FS (1≤Q<15%FS)
繰り返し性 (Q:流量)	±0.25%SP (15≤Q≤100%FS) ±0.0375%FS (1≤Q<15%FS)
動作差圧範囲	50~300kPa
耐圧	1MPa (gauge)
動作温度範囲	-10~+60°C
通信	USB2.0, RS-485
電源	DC24V, 消費電流最大300mA
取付姿勢	水平取付または垂直取付
質量	約1.2 kg

2.1 計測原理

当社で使用しているセンサの構造は図2のとおりである。ヒーターによって雰囲気ガスを加熱し、上流側温度センサと下流側温度センサを使用することで、センサ表面の温度分布を測定する。センサ表面を流体が移動することにより、図3のように温度分布が変動し、センサ信号に現れる。そのセンサ信号を流量信号として変換することで流量を計測している⁽³⁾。図2に示すとおり、チップサイズが小さく、熱的な絶縁を施されたダイアフラムを使用することで、過渡的な熱の出入りが抑えられ、高速な応答性を実現している。

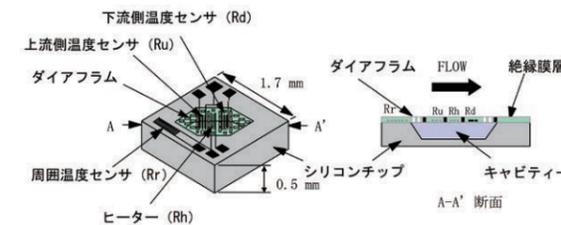


図2 マイクロフローセンサの構造

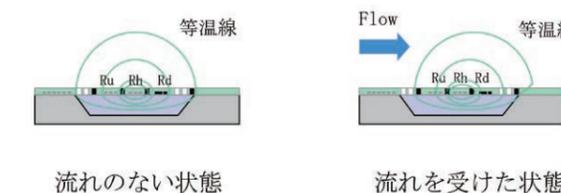


図3 マイクロフローセンサの温度分布

2.2 システム構成

当社マスフローコントローラの構成は図4のようになっており、整流用金網、前述のマイクロフローセンサおよびノーマ

ルクローズタイプの比例ソレノイドバルブを使用している。製品はそれぞれインターフェースをもっており、表示部、操作部、I/OおよびRS485通信などを備えている。インターフェースの構成は製品のコンセプトによって異なる。

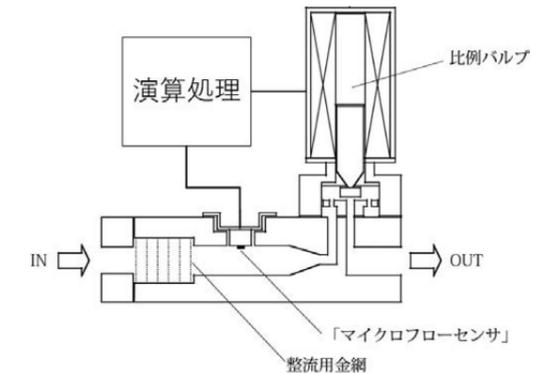


図4 マスフローコントローラのシステム構成

2.3 特長

当社製マスフローコントローラは、高速制御、低差圧動作や単一電源動作などの特長をもつ。

2.3.1 高速制御

制御にかかわるセンサおよびバルブは応答性の早いマイクロフローセンサとソレノイドバルブを使用し、演算処理で実施するPID制御の制御周期は5ms以下(形 MQV、形 MPC、形 F4Hは5ms、形 F4Qは1.5ms)で高速制御を行っている。これにより、全閉状態から制御開始をしたとき、制御中に制御流量を変更した時や圧力変動などの外乱による流量変動が発生したときなどに、設定流量に整定するまでの時間を短くすることができる。

2.3.2 低差圧動作

2.1で示したような計測原理を使用しているため、流量計測における圧力損失がほとんど発生せず、主に継手や整流などによる圧力損失が支配的になる。この特長を活用し、ガスの供給圧力が低い、パーナのアプリケーションなどにおいても適用可能な形番を備えている。

2.3.3 単一電源動作

全形番DC24Vの単一電源で設計されており、安価な汎用電源が使用でき、他の機器との電源共有化も可能である。また、形 MPCを除き、ACアダプタが接続できる電源ジャックを用意しているため、実験用などの簡易的な用途では、電源配線の手間を省き簡単に対応ができる。

3. UIデザイン

今回、現場における異常の早期発見と短時間での対処を可能とし、安定操業・品質管理に大きく貢献できる製品を目指し、UIの開発を行った。現行品のUIを示し、開発したUIの外観を図5に示す。本章では、今回開発を行ったUIについて、その特長や目的などを説明する。

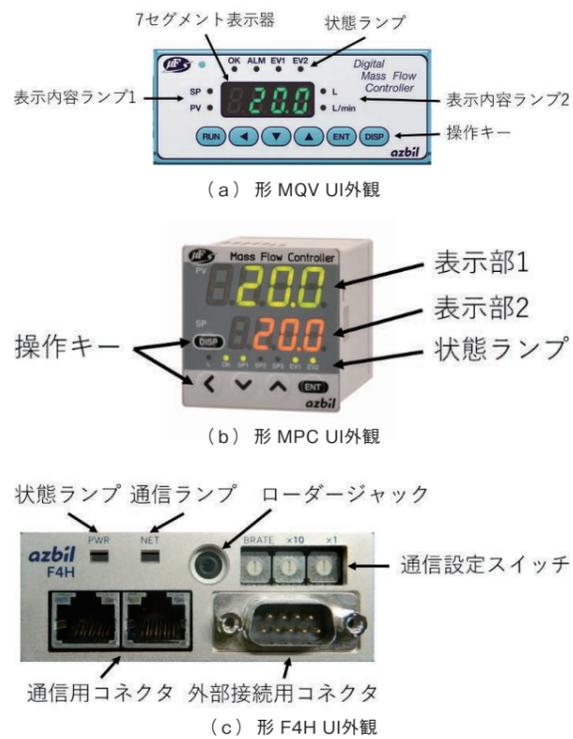


図5 従来品のUI外観



図6 形 F4Q UI外観

3.1 操作性

操作性を向上させるため、UIにはフルドットのLCDと十字に配置したスイッチを使用している。表示部のLCDはフルドットにすることで、これまでの画面遷移から大幅に改善し、ユーザーに提供できる情報量を格段に向上させた。LCDの表示内容例を図7に示す。通常時に表示されるメイン画面では、表示領域を3分割し、それぞれ「ステータスバー」「上段表示」「下段表示」としている。ステータスバーは制御状態やイベントの発報状態等を表示させている。この領域は常に表示されており、たとえ設定

中であっても機器の状態変化を読み取ることができる。今まで確認できなかった制御状態を一目で確認できるため、異常発生時の制御状態変化にも素早く対応できる。

上段表示と下段表示には、いくつかのパラメータを分けて表示している。上段表示には流量値やエラーコードなどを表示し、下段表示には設定値、ガス種設定やバルブ操作量などを表示できる。下段表示はユーザーが任意に設定でき、任意のパラメータを流量表示と同時に確認することができる。確認頻度の高いパラメータを設定して工数の削減をしたり、バルブ操作量や流量設定値を表示させて供給元の圧力変化やバルブの噛み込みなどの異常に気付きやすしたり、ユーザーの用途に合わせた運用が可能となる。

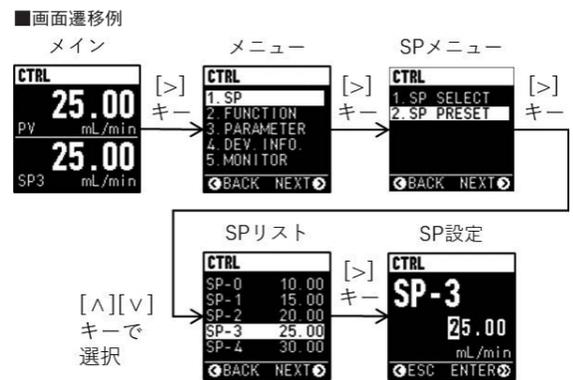


図7 表示部表示内容

ステータスバーを除く表示領域は、方向キーを操作することにより画面遷移させることができる。画面遷移の例として、図7にSP-3の設定値を変更する場合の画面遷移を示す。画面下部にキー操作ガイドを備え、操作することにより画面遷移することで、製品を扱い始めて間もないユーザーでも簡単に設定を変更できる。

操作部には図6に示す通り、十字に配置した4つの方向キーと、色を変えて強調されたバルブ制御キーを使用している。

方向キーは前述の画面遷移と併せることで、感覚的に操作できるUIを実現している。

操作頻度が高いバルブ動作モードを変更するキー(従来品のRUNキーに相当する)を方向キーとは別に用意し、配色を変更して目立つようにしている。このキーを押すことで図8に示すウィンドウをポップアップする。任意の動作モードを選択することで、動作モードを変更できる。

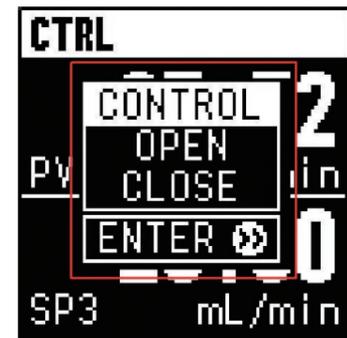


図8 バルブ制御キー押下時のポップアップ

従来品では、7セグメントLEDと粒LEDによる表示であるため、機器を扱うにあたり、一定の習熟が必要であった。今回開発したUIではフルドットのLCDと操作キーを組み合わせることで、ユーザーに豊富な情報を分かりやすく伝え、現場での状態把握や操作性を大幅に向上させた。

3.2 視認性

筐体の上部に大型のステータスランプ、フルドットLCD、方向キーを備えることで、配管向きが変わっても高い視認性を提供する。

異常状態やバルブの制御状態を通知するステータスランプ(図6)を長方形とし、サイズを大きくすることで、より遠方からでも本器の状態を一目で把握することができる。表2に示すとおり、流体制御にかかわるような異常が発生した際には赤く光るため、異常の早期発見に貢献する。

表示部は設定を変更することにより、90°ごとの向きを任意に選択可能となっている。今回開発したUIでは、表示部を正方形とすることで、図9のようにどの向きに設定しても変わらない情報を提供する。操作部についても画面の向きに連動して、方向キーが割り付けられるように設計されている。これにより垂直設置においても高い視認性と操作性を提供することができる。

このUIはマスフローコントローラ本体と離れた位置にある制御盤などに設置できるモデルも考慮されており、UI向き変更は、制御盤設計における自由度を向上させる。

表2 ステータスランプと通信ランプの表示内容

名称	表示内容
ステータスランプ	・消灯 :電源切
	・緑点灯 :正常(制御)
	・緑点滅(低速) :正常 (全閉または全開)
	・緑点滅(高速) :ワーニング
	・赤点滅(高速) :アラーム
	・赤点灯 :エラー
通信ランプ	・消灯 :通信待機中
	・緑点滅 :通信中
	・橙点灯 :縮退運転

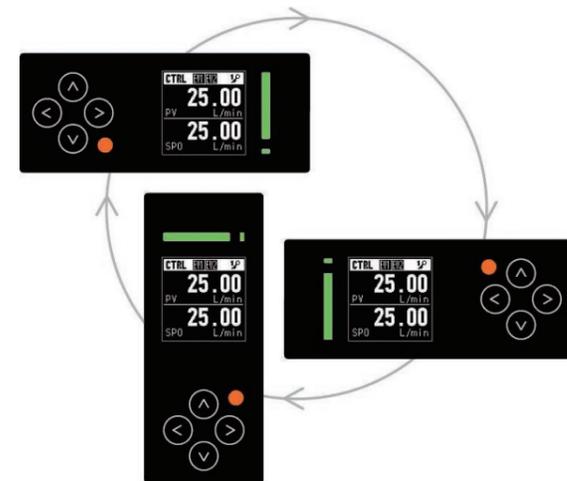


図9 UIの向き変更

従来品では、エラー表示の手段が粒LEDであったため、遠くからでは見落としてしまう可能性があった。表示の向きについては、変更できたとしてもUI部を一度本体から取り外して回転させる必要があり、その回転は180°に限定されていた。そのため、垂直配管の際は、表示部や操作部が横向きになり、視認性や操作性を損ねていた。今回開発したUIでは、大型のステータスランプによって遠方からでも機器の状態を確認できる。また、表示部と操作部を設定変更のみで90°ごとに回転できるようにすることで、常に高い視認性を確保した。

4. 使用条件への適合性を改善する機能

一般産業におけるユーザーアプリケーションの使用条件は多岐にわたる。今回、使用条件の異なるアプリケーションでも最適な制御を行うことで、品質の安定に貢献できる製品を目指し、機能の追加・改善を行った。本章では追加・改善した機能のうち、垂直設置補正とユーザー設定PID、高速制御の3つについて報告する。

4.1 垂直設置補正

垂直設置による制御精度への影響を低減するために、設置姿勢・圧力補正機能を実装した。

センサの向きが垂直になると、ヒーターによって温められた流体の密度変化により、図10のような温度分布を形成する。このとき自然対流は発生しない⁽⁴⁾。

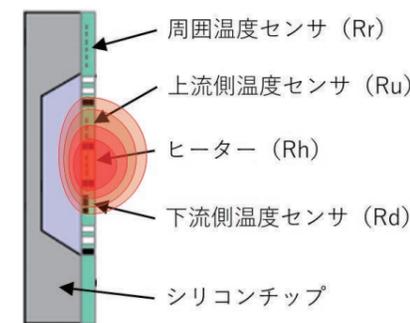


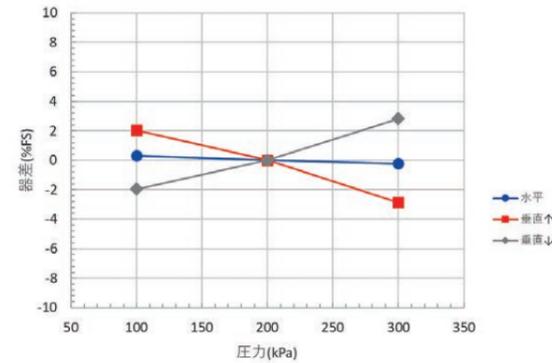
図10 垂直配管による温度分布イメージ

垂直方向の温度分布に偏りができてしまうため、センサ出力が水平時から変わってしまう。この温度分布が密度に影響を受けるため、気体の圧力条件によって影響度が変わる。また、流量があれば影響度も変わるため、式(1)に示すような関数によって補正する必要がある。

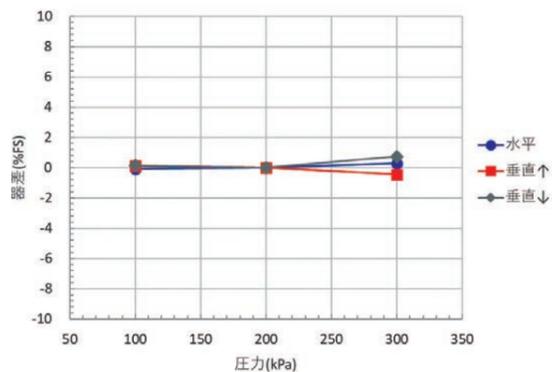
$$Q = Q_n \times f(v, p) \quad \text{式(1)}$$

※Q: 流量, Q_n : 補正前流量, v: 流速, p: 圧力

今回実機評価にて影響度の検証を行い、補正式を考案した。この補正式の有無について比較したところ、図11の結果を得ることができた。示したグラフは5Lモデルの100%FS点における評価結果である。垂直設置における器差が大幅に改善され、設置向き条件を拡張できることを確認した。



(a) 補正前 圧力影響 (SP=100%)



(b) 補正後 圧力影響 (SP=100%)

図11 圧力特性補正前後

4.2 ユーザー設定PID

PID制御におけるパラメータをユーザーが設定できるように開放することで、多岐にわたるユーザーアプリケーションで、最適な制御を可能とする。

形 MQV, 形 F4H, 形 F4Qでは、ユーザーのアプリケーションに合わせて制御を改善できるよう、応答性重視、標準、安定性重視のPIDを選択できるようになっている。このPIDパラメータは当社で定めた3通りの条件においてそれぞれチューニングした値になるため、圧力や直管長、配管径など、ユーザーが使用する条件と異なる場合や、ユーザーが重視する制御結果が異なる場合には最適な制御とはならない。

そこで今回はPIDのパラメータをユーザーが変更できるようにすることで、ユーザーアプリケーションに合わせた制御を行うことができるようになった。

4.3 高速制御

制御性のさらなる改善のため、インターフェース関連と計測制御関連を別のCPUで行い、制御周期の高速化を実現した。

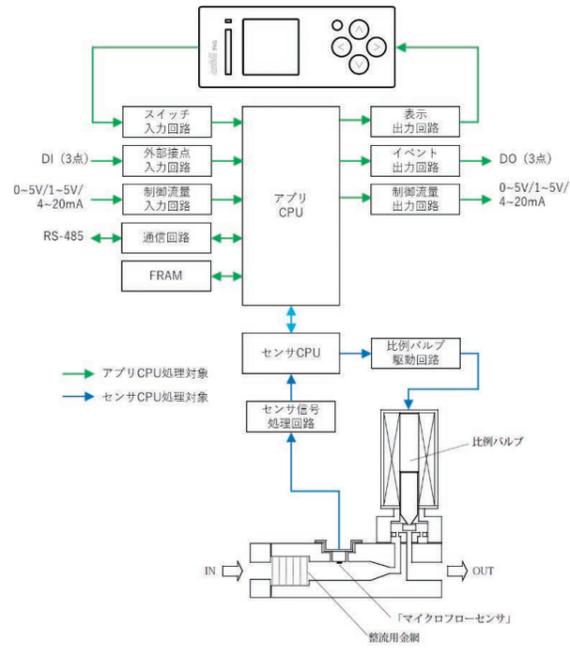


図12 形 F4Qのシステム構成

システムを図12に示すように構成し、計測と制御以外をアプリCPUに処理させ、センサCPUに計測と制御に専念させることで、従来品では5msだった制御周期を1.5msに短縮した。マイクロフローセンサの応答性能をさらに引き出すことができたといえる。

制御性の確認を行うため、圧力変動特性について、現行品との比較を行った。評価は図13に示す評価系にて、実際に流量制御を行わせたときの制御性を測定した。

圧力変動特性は制御中に1次圧を変動させたときの評価対象による制御結果を記録したものである。制御結果は評価対象が出力する流量値をアナログ信号にて取得する。評価結果は図14のとおりとなった。現行品MQV0002の応答に対して、F4Q0002の応答はピーク値が小さく、整定時間が短くなっている。

以上の結果から、制御周期の短縮により、制御性がさらに改善されたといえる。そのため今まで以上に圧力変動が発生するアプリケーションや流量を頻繁に変更する装置などでも安定した品質に貢献することができるようになった。

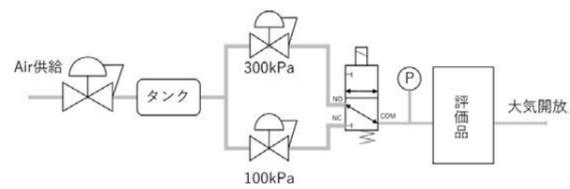


図13 圧力変動特性評価系

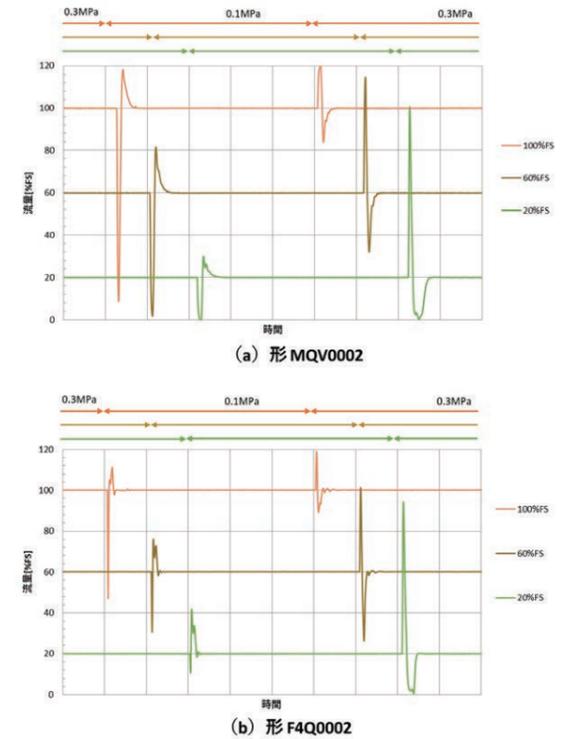


図14 圧力変動特性

5. おわりに

今回の開発では、UIデザインの一新と機能の追加・改善により、操作性・視認性の大幅な改善と最適な制御を可能とする使用条件の拡張を実現した。今回開発した製品により、拡大する市場要求に応え、現場の安定操業・品質管理に大きく貢献できると考えている。

今回開発した形 F4Qでは、そのデザインが認められ、iF DESIGN AWARD 2022および、グッドデザイン賞2021を受賞している。グッドデザイン賞では特に、表示部の90℃回転と、それに連動した操作キーにより、常に高い視認性が確保できていることが評価されての受賞となった。

今回はユーザビリティの向上を実現した。今後、開発予定の製品機能としては、ユーザー設定PIDのパラメータチューニング支援や、異種ガスにおける制御精度などが挙げられる。デザインに関しては、他製品へ水平展開することにより、当社FA向け流量計製品の操作性統一を進めていきたい。

<参考文献>

- 百瀬修, 伊勢谷順一: デジタルマスフローコントローラ CMQシリーズの開発, Savemation Review, 2001.1, pp.74-81
- アズビル株式会社, 現場の課題を解決するマスフローコントローラ形F4Q, 計測と制御61巻6号, pp.460-461
- 上運天昭司: マイクロフローセンサを用いた流量測定, Savemation Review, 2001.1, pp.28-35
- 上運天, 永代, 元祐, 本阿弥: マイクロフローセンサと制御回路のSPICEを用いた電気-熱連成解析, 電気学

<商標>
マイクロフローセンサはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>
大貫 量孝 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

MEMSセンサの能力を最大限に発揮させる センサパッケージング技術

Sensor packaging technology maximizes MEMS sensor capabilities

關 宏治
Koji Seki

片桐 宗和
Munekazu Katagiri

キーワード
MEMS センサ, センサパッケージング, 計測と制御

アズビルは計測と制御の技術の要となるMEMSセンサ開発において、MEMSセンサチップ開発技術とセンサパッケージング技術の両者を保有することにより、他社が容易に追従できない優れた計測制御機器の開発を可能としている。センサパッケージングにおいては、ウエハ面内の膜厚のパラッキや金属と異なる線膨張率を有するといった製品化を行う上で不利となるMEMSセンサチップの特性を補完し、さらにMEMSセンサチップの材料が有する優れた特性を活かすことが重要である。本稿では、アズビルのセンサパッケージング技術について報告する。

For the development of MEMS sensors, which is essential measurement and control technology, Azbil possesses both the MEMS sensor chip technology and the sensor packaging technology required. These capabilities enable Azbil to develop superior measurement and control devices not easily emulated by competitors. Sensor packaging must compensate for the characteristics of the MEMS sensor chip that are disadvantageous for commercialization, such as variations in film thickness across the wafer and a thermal expansion coefficient that is different from that of metals, while at the same time fully utilizing the superior characteristics of the MEMS sensor chip materials. In this paper, we report on Azbil's sensor packaging technology.

1. はじめに

計測と制御の技術の要となるMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)センサの開発において、センサパッケージングに特化した工法開発、生産設備開発を行い、安定した生産工程を実現させる生産技術はアズビルのコアコンピタンスの1つである。MEMSセンサチップはシリコン、ガラス、サファイアなどの材料に微細な機械的構造や電気回路を形成することで、圧力や流量などの物理量を精度よく計測することを可能とするが、そのためには材料のもつ機械的、熱的特性が計測精度へもたらす影響を最小限に抑制することが必要である。MEMSセンサチップは図1に示すような円盤状の薄板であるウエハ状態に加工された材料に一度に多量生産するため、ウエハ面上に施された金属膜や絶縁膜などの面内部位におけるわずかな厚みの違いにより、個々のセンサチップの特性に変化を生じさせてしまうことがある。MEMSセンサチップに安定して高い計測精度を発揮させるためには、この材料特性の影響およびセンサチップ個々の特性の差異を吸収、調整し、一定の性能に整えた上で計測機器に搭載することが重要である。

また、MEMSセンサのチップの材料の一種であるサファイアを使用したMEMSセンサチップでは、高耐熱性、高耐食性のように優れた材料特性を損なうことなく計測能力を発揮させることで、これまで計測が困難な環境下への適用が可能になるなど特徴的な計測機器を実現することができる。

アズビルではMEMSセンサチップやマイクロデバイスを物理的、電気的に計測機器製品の電気回路に接続しセンサモジュールにする技術をセンサパッケージング技術と呼んでいる。アズビルのセンサパッケージング技術は単に電気回路に接続させるだけでなく、製品化を行う上で不利となるMEMSセンサチップの特性を補完し、優れた特性を活かす計測機器の「センサ」としてモジュール化することを特徴としている。

MEMSセンサの開発において、MEMSセンサチップ開発技術と、このセンサパッケージング技術の両者を保有していることが、他社が容易に追従できない優れた計測制御機器の開発を可能としている。

本稿ではアズビルの保有するセンサパッケージング技術の一部について紹介する。

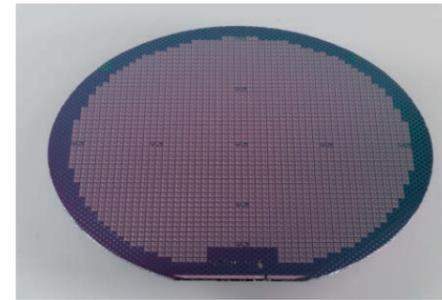


図1 シリコンウエハに形成したセンサチップ群の一例

2. MEMSセンサチップの製品適用における課題

センサパッケージング技術はMEMSセンサチップを均一な特性に整え、物理的、電気的に計測機器製品と接続することのできるセンサモジュールにする技術である。アズビルのセンサパッケージング技術の主な特徴である製品化を行う上でMEMSセンサチップの不利となる特性を補完し、優れた特性を活かす2つのケースを、実際の製品での課題をもとに説明する。

2.1 ピエゾ式圧力センサにおける課題

ここでは、ピエゾ式圧力センサを例にとり、2つの課題について説明する。

2.1.1 MEMSセンサチップの特性のウエハ面内分布の影響

プロセス流体の流量計測には、差圧式の流量計が最も多く用いられている。差圧式の流量計は、流体の流路にオリフィス（絞り弁）を設置し、圧力損失を故意に発生させ、オリフィスの上流・下流の圧力差、つまり差圧を検出して流量を演算する方式であり、液体、気体、高温・高圧流体など様々な流体の計測が可能であり、さらに故障しづらいなどの多くのメリットがある。差圧計測のためには、2台の圧力センサを使用する方法が最も簡単であるが、2台の圧力センサを使用する際の圧力差の計測は、ウエハ面内分布に起因するセンサチップの特性の個体差により高い計測精度を得ることが困難という課題がある。

2.1.2 熱応力による温度特性の影響

シリコンウエハ上に形成されるピエゾ式圧力センサは高い分解能と安定した計測を可能とする。製品に搭載するためには、図2に示すようにセンサチップをステンレス等の金属材料と接合することが必要であるが、熱膨張率の違いによる熱応力が発生し、計測精度に影響を与えてしまう。この影響を緩和する方法として、センサチップと金属部品の間の中間部材に熱膨張率の異なるガラス等を接合する手段を採用している。中間部材を接合したセンサを金属部品に接着剤で接合するが、設計上の制約により中間部材が応力緩和するための十分な長さを確保できない場合や、接着剤の硬化時に発生する応力が新たな課題となる場合もある。

従来の接着工法は、エポキシ系接着剤を使用して、135℃で加熱硬化させたあと、硬化時の応力を緩和させるために徐冷を行っている。エポキシ系接着剤は、硬化時に分子の重

合により体積収縮を生じるが、表層部と樹脂内部に温度差が生じると硬化時の体積収縮差による残留応力が大きくなるため、徐冷により表層部と樹脂内部の温度差を小さくし、応力緩和を図っている。徐冷を行うことで従来の構造では十分な緩和効果が見られていた。

図3に示した流量計測制御機能付電動二方弁ACTIVAL™に搭載されている圧力センサでは、センサモジュール小型化の要求により中間部材の長さを従来製品から2mm短くしている。従来製品より2mm中間部材を短くした新しい構造では同様の徐冷を行っても、図4に示すような無印加時の出力電圧の変化が発生し、応力緩和効果が不十分であることが分かった。小型化と同時に高い計測精度が得られるセンサモジュール構造を実現するセンサパッケージング技術の確立が必要となった。

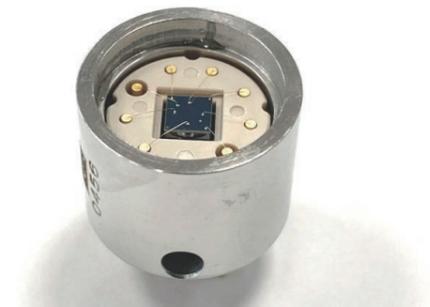


図2 ピエゾ式圧力センサモジュールの例



図3 流量計測制御機能付電動二方弁ACTIVAL

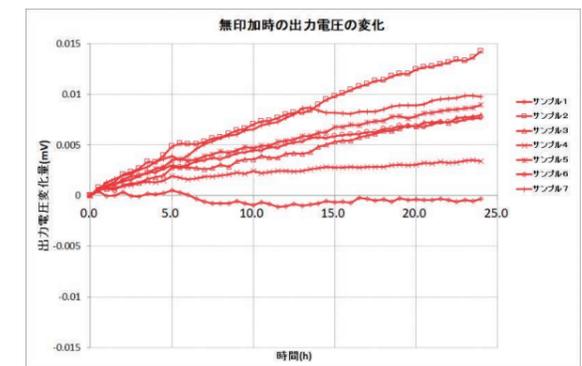


図4 24時間放置時の無印加時の出力電圧の変化

2.2 サファイアセンサにおける課題

次に、隔膜真空計にサファイアの高い耐熱性、耐食性という優れた特性を活かす上での課題について説明する。

2.2.1 サファイアセンサチップの高気密接合工法の確立

サファイア隔膜真空計に使用されるサファイア容量式圧力センサは材料であるサファイアの高い耐熱性、耐食性を活かし、半導体製造装置のプロセスで使用される腐食性ガス雰囲気など過酷な環境下での圧力計測に適用することができる。同真空計の外観を図5に示す。

しかしながら、このサファイアの優れた材料特性を損なうことなく製品のセンサモジュールとするためには、サファイア同様に高い耐熱性、耐食性を持った金属材料と接合するセンサパッケージング技術の開発が必要となる。

サファイア隔膜真空計では金属材料として高い耐熱性、耐食性を有するNi基合金を採用することとした。

サファイアセンサチップとNi基合金では熱膨張率が異なるため接合による熱応力の影響を緩和するために図6に示すようなセンサチップを薄膜状のNi基合金製のリングと接合させる構造を採用した。

接合には拡散接合が用いられるが、約1000℃の高温、高真空下で一定の圧力を接合面に均一に印加できる接続工程の確立が求められた⁽¹⁾。



図5 サファイア隔膜真空計外観

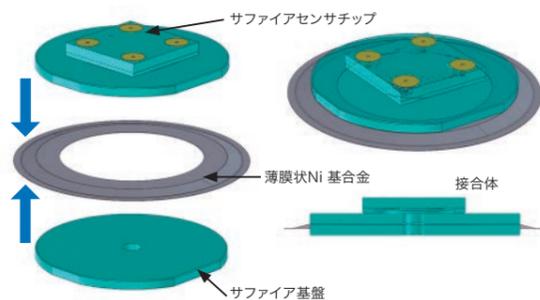


図6 サファイアセンサチップ接合体の断面模式図

2.2.2 高気密性接合の検査工程の確立

サファイア隔膜真空計はその名の通り真空に近い極めて低い圧力の計測に適用される計測機器である。

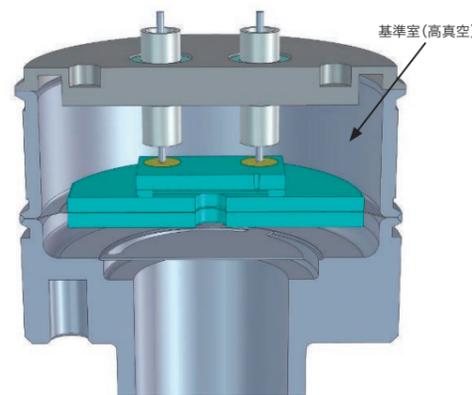


図7 サファイアセンサモジュールの断面模式図

図7に示す通りサファイアセンサチップを内在した基準室を高真空に保ち、測定雰囲気との差圧を計測することで圧力を計測している。当然基準室の一部を形成するセンサチップとNi基合金の接合体には高い気密性が必要となる。後工程に不適合品を流さないためにも、拡散接合されたサファイアチップとNi基合金との接合面の気密性を基準室に組み付ける前に検査できる工程開発が求められる。

基準室に組み付けられたあとに気密性が確保できていない場合は、測定雰囲気の圧力とサファイアセンサチップの出力にミスマッチが発生するため、検査することは容易である。しかしながら基準室に組み付けられたあとに不具合判定されると、サファイアセンサチップだけではなく基準室およびセンサパッケージを構成するすべての部品を廃棄しなければならない。生産コストを圧迫させないためにも拡散接合後の気密検査工程の確立が求められた。

このように検査工程も含めて生産品の品質を担保することをアズビルではセンサパッケージング技術と定義している。

3. 課題解決への取組み

2章で述べたMEMSセンサチップの製品適用における課題への取組みとして、製品化を行う上で不利となるMEMSセンサチップの特性を補完し、計測制度を向上させた事例を3.1で説明する。

一方、MEMSセンサチップのもつ優れた特性を損なうことなく、製品に搭載するためのセンサパッケージング工程、その検査工程の確立について、3.2で説明する。

3.1 ピエゾ式圧力センサにおける課題解決

ここでは、ピエゾ式圧力センサを例にとり、2つの課題解決について説明する。

3.1.1 センサへの差圧印加構造によるウエハ面内分布の排除

差圧計測において2台の圧力センサを使用するとセンサチップの特性の個体差により、高い計測精度を得ることができないため、1台の圧力センサでセンサチップの両面に圧力が印加される構造をとることにより精度向上を図っている。圧力センサモジュールの構造を図8に示す。2枚の受圧用

ダイアフラムを有し、受圧部で受けた圧力がセンサチップに印加されるように圧力伝搬経路をパイプで繋ぎ、空間内に圧力伝搬用の液体を封入する構造となっている。

圧力伝搬用のパイプに太いパイプを使用すると、熱応力や圧力印加時の応力により、接合部が破損する恐れがあるため、外径:φ0.45mm、内径:φ0.23mmの極細パイプを使用して連結している。パイプを直接ボディには接合せず、ワッシャと呼ばれる部材を中間に配置し、それぞれを溶接する構造をとることで接合の信頼性を確保している。

パイプ、ワッシャの溶接には、ファイバレーザを用いており、十分な溶け込みを確保しつつ、パイプ内を塞がない条件で照射を行っている。

ワッシャとボディは、湿度などによる劣化をさけるために接着ではなく抵抗溶接で接合しており、長期的な使用にも耐えられる構造となっている。圧力伝搬用の液体中に気泡が混入すると、圧力印加時の応答の遅れや温度影響によるセンサ出力の異常が発生するため、高真空化で液体の封入、封止を行うことで、気泡の混入を防止する工程を確立している。

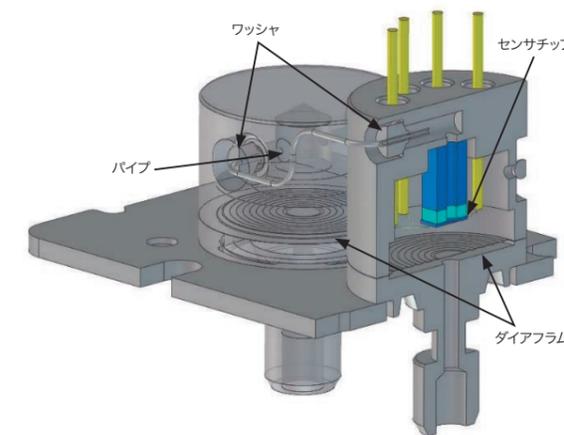


図8 圧力センサモジュールの断面模式図

3.1.2 センサチップへの熱応力排除

熱硬化型接着剤の硬化過程の体積は、加熱による温度上昇により液相状態で膨張し、硬化反応により樹脂の2次元的架橋が始まり、収縮を伴いながらゲル化点に到達する。ゲル化点で熱硬化型接着剤は液体から固体としての挙動に移行する。次に3次元的架橋に移行し、これの終点である硬化点に到達する。さらに冷却過程を経て室温に戻る。この過程の中で、固体化するゲル化点の体積と冷却後の体積との差が熱硬化型接着剤硬化時の応力へとつながる⁽²⁾。

接着剤での発生応力の低減を図るために、加熱硬化温度に着目した。図9において、液体から加熱された際に熱膨張しながら、つまり体積が膨張しながらゲル化点まで向かうことが示されているが、硬化温度が低くなれば硬化後までの体積変化量も低くなり、収縮応力を小さくすることができる。従来の硬化温度135℃に対して、硬化温度を95℃とした際の無印加時の出力電圧の変化を図10に示す。硬化温度を下げることで硬化時の応力を緩和させ、無印加時の出力電圧の変化を低減できることが分かる。

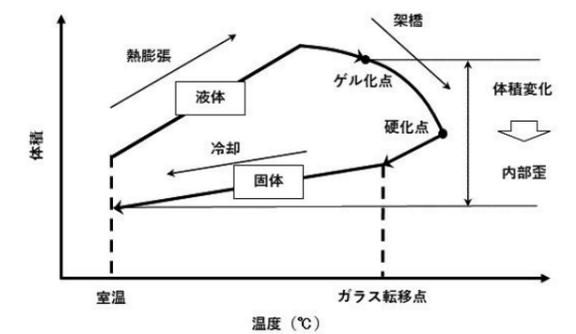


図9 接着剤硬化時の体積変化

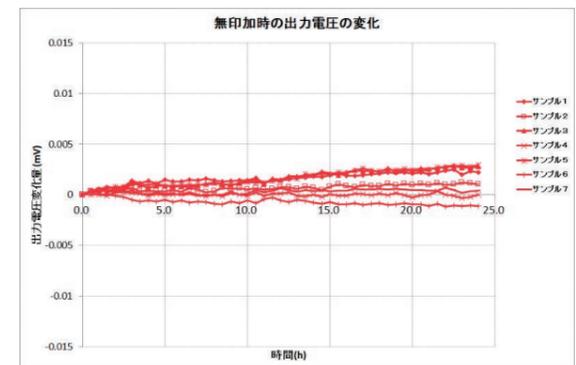


図10 24時間放置時の無印加時の出力電圧の変化

3.2 サファイアセンサにおける課題解決

次に、サファイアセンサにおける2つの課題解決について説明する。

3.2.1 高耐食性金属であるNi基合金との拡散接合

サファイアセンサチップとNi基合金の接合に用いられる拡散接合とは、同種または異種材料同士を材料の融点以下に加熱し、加圧することで双方の接触面に生じる拡散現象を利用して接合する方法である⁽³⁾。MEMSセンサの接合方法として広く使われる技術として知られている。

サファイアセンサチップとNi基合金の金属箔との良好な拡散接合を行うためには以下の3つの主要機能を兼ね備えた接合装置の開発が必要であった。

(1) 1.0×10^{-5} Pa以下の真空度で材料を保持できるチャンバを持つこと

拡散接合は接触面に発生する拡散現象を利用することから接触面に不純物等があると拡散現象が阻害される。特に加熱時に材料表面に発生する酸化物は重大な阻害要因となるこのためNi基合金の金属箔の酸化を抑制するために高真空下での加熱処理ができる真空チャンバの具備が不可欠となる。

(2) 接合面に一定の圧力を均一に印加できるプレス機構を兼ね備えていること

サファイア隔膜真空計では高い気密性に加え、サファイアセンサチップにひずみなどの影響を与えないために接合面に発生する応力の不均一さを極限まで抑制することが要求される。本装置は生産設備として使用されるため、一度に複

数のセンサチップを接合することが必要であり、1つひとつのセンサチップに同一の圧力が印加できる金型も併せて開発された。

(3) 1,000℃以上で熱処理ができる加熱機構を持つこと
 サファイアセンサチップとNi合金の金属箔の拡散接合を生産工程として実現するために、各種の要素技術の開発を進め、この3つの機能を兼ね備えた接合設備を完成させることができた。図11は拡散接合装置の外観を撮影したものである。



図11 拡散接合装置

拡散接合装置には適正な状態で接合が行われているかを監視する各種のモニタが備わっている。熱処理温度や加圧力はもちろんのこと、前述のように拡散接合の阻害要因となる不純物、コンタミの混入監視を行うガス分析装置が取り付けられており、プロセス中に本来検出されるべきではない元素が検出されていないか、また材料起因の元素もしくは検出されることが妥当である元素であってもプロセスの工程で許容される量を超えての検出がないかを図12のように常時モニタリングしている。これにより拡散接合装置のプロセスが設定された条件どおりに実行されていることを確認することができる。

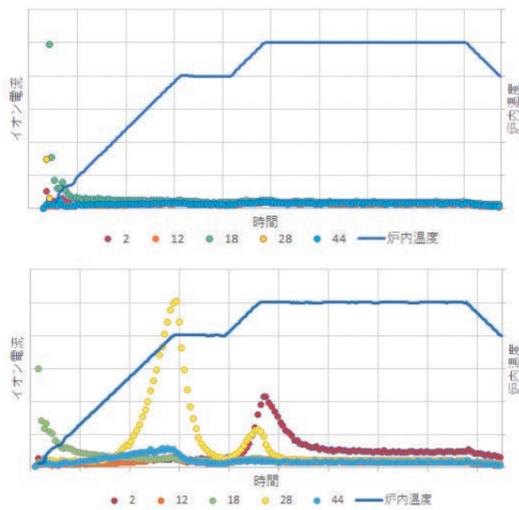


図12 プロセス時のガス分析結果(上:正常時, 下:異常時)

3.2.2 高気密性接合の検査工程の確立

拡散接合のプロセス監視により適正な条件下で接合が行われていることを確認できるが、実物での品質検査も不可欠であると考えている。

一般的に高い気密性を検査する方法としてはヘリウムリークディテクタが用いられることが多い。ヘリウムリークディテクタは压力容器などの内部空間をターボ分子ポンプなどによって真空状態にし、外部からヘリウムを吹きかけ、内部に侵入したヘリウム量を測定することで、リーク量を定量的に計測、評価する方法である。

一方、サファイアセンサチップとNi合金の金属箔の接合部分は解放された領域の接合であるためヘリウムリークディテクタを使用するためには図7のようなセンサチップを格納する容器となるセンサモジュールまで組み上げる必要がある。しかしこの状態で気密性に不具合が発見された場合は、サファイアセンサチップはもちろんのことセンサパッケージを構成するすべての部品を廃棄しなければならない。生産工程において不具合品を後工程に流出させないということは言うまでもなく鉄則である。

つまり拡散接合工程のあとには、接合の健全性を担保する検査工程を確立することが求められた。ここでアズビルが着目したのは接合部分の光の反射状態の違いである。接合面に光を当て特殊な顕微鏡で観察することで、接合されている部分と、接合されておらず界面にわずかな隙間のある部分では、輝度が異なっているため識別することができる。その一例を、図13に示す。

接合部分を撮影し、その画像データを処理することによって、リークパスの検出だけでなく十分な接合領域が均一に得られているかという接合の質も評価することが可能となった。



図13 拡散接合面の画像処理による接合評価

この技術開発によって、センサモジュールとして組み上げることなく接合面の気密性検査を行うことができるようになった。

さらにアズビルのセンサモジュール生産工程では、実際の使用環境で長期間使用されても品質を維持できるようにもう1つの検査工程を設けている。この検査は図7のようにセンサモジュールとして組み上げたあと、一定の圧力を持ったアルゴン雰囲気下で一定期間暴露させセンサの出力を計測することで、センサモジュール内部へのアルゴンの侵入がないことを確認している。

この検査では拡散接合面だけではなくNi合金からなる筐体のすべての接合部分の気密性も確認している。もしわずかにでも気密性が失われた箇所があればセンサパッケージ内部に侵入したアルゴンの影響を受け、サファイアセ

ンサの出力に異常を確認することができる。アズビルがアルゴンエイジング工程と呼ぶこの工程を経ることで、お客様の過酷な環境下でも長期にわたり安心して使用していただけるサファイア隔膜真空計を提供できている。

このようにセンサパッケージングでは接合などの要素技術の開発だけでなく、その工程の品質を担保するための検査工程の開発も併せて行っていくことが重要である。

4. 成果

ピエゾ式圧力センサ、サファイアセンサでの成果について報告する。

4.1 製品化を行う上で不利となるMEMSセンサチップの特性を補完するセンサパッケージング技術

センサへの圧力印加機構の開発により、センサチップの個体差の影響を受けないセンサパッケージングが可能となり、製品仕様を満足する圧力センサの提供が可能となった。

また、接着剤硬化時のプロセス制御による応力除去により、無印加時の出力電圧の安定性を得ることが可能となった。

4.2 MEMSセンサチップの優れた特性を活かすセンサパッケージング技術

サファイアセンサチップの持つ優れた耐食性を活かすために必要なNi合金の金属箔との良好な拡散接合を行うための要素技術開発、装置開発を行った。

さらには拡散接合の健全性を担保し、次工程に不具合品を流出させないためのプロセス監視、画像処理を活用した接合状態の検査工程に加え、長期使用でも接合品質が維持できることを確認できるアルゴンエイジング工程を確立した。センサパッケージングの要素技術開発と並行して開発されたこれらの複数に重ねられた検査工程によって、過酷な環境下でも長期にわたり使用できるセンサの提供が可能となった。

5. おわりに

アズビルのコアコンピタンスの1つであるMEMSセンサチップのセンサパッケージング技術について報告を行った。

アズビルでは、さらに高感度、高精度なMEMSセンサチップの開発を進めている。それと同時に製品化を行う上で不利となるMEMSセンサチップの特性、優れた特性といった特徴を把握し、それを補完する、また活かすセンサパッケージング技術を開発することにより、アズビルのMEMSセンサチップの持つ優れた特性を最大限に引き出せるように生産技術開発にも取り組んでいる。今後も優れた計測制御機器をお客さまに提供できるように継続的に開発を強化していく。

<参考文献>

- (1) 関根正志, 石原卓也, 差波信雄, 谷武夫: サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発, azbil

- Technical Review 2011年1月発行号, 2011, pp.28-33
- (2) 伊奈治, 石川智則, 成田量一, 竹中修: エポキシ樹脂注型品の硬化プロセス解析技術の開発, デンソーテクニカルレビュー, Vol.4, No.1, 1999, pp.94-100
- (3) 益本功, 玉置維昭, 寺井清, 永井義夫: 拡散接合の最近の進歩, 日本金属学会会報, 9巻, 10号, 1970, pp.653-665

<商標>

ACTIVALはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|---------------------------------|
| 關 宏治 | アズビル株式会社
プロダクションマネジメント本部生産3部 |
| 片桐 宗和 | アズビル株式会社
技術開発本部マイクロデバイス部 |

新クリーンルームの設計コンセプト

独創的MEMSセンサの効率的な市場導入促進に向けて

A new cleanroom design concept for bringing original MEMS sensors to market efficiently

中野 正志
Seishi Nakano

黒澤 敬
Takashi Kurosawa

キーワード
クリーンルーム, MEMS, MEMS センサ, 開発, 開発効率, 生産性, 安全

2022年9月、アズビルは藤沢テクノセンターにMEMSセンサの開発拠点として地上3階建3フロアの新たなクリーンルームを竣工させた。このクリーンルームは独創的なMEMSセンサを効率的に開発し、開発完了後は速やかに量産に移行することを目的としている。順次導入される各種装置群により、今後のアズビルの計測と制御を担う技術開発の基盤となると同時にクリーンルーム建設と装置導入に携わることで成長した若手技術者達とともに、今後も長期にわたりアズビルの新時代の事業を担っていくことが期待できる。

As a development base for MEMS sensors, Azbil completed the construction of a new cleanroom at its Fujisawa Technology Center in September 2022. The cleanroom's purpose is to efficiently develop MEMS sensors and to support their mass production. The cleanroom, along with the young engineers who have grown through their involvement in its construction and equipment installation, is expected to be a long-term foundation for the development of technology for Azbil's sensing and control business.

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) という呼称が生まれる前の1986年に、神奈川県藤沢市にある藤沢工場(現:藤沢テクノセンター)で産声を上げたアズビルのMEMS開発は、クリーンルーム竣工によりMEMS実現の要素技術を獲得し数年でビルシステム向け温湿度センサの生産を開始した。1990年代前半にはマイクロフローセンサ^{TM (1) (2)}、ピエゾ抵抗式圧力センサ^{(3) (4)}、ビル空調向け湿度センサ⁽⁵⁾と生産拡大を目的としたクリーンルームの拡張を実施し、その後、サファイア圧力センサ^{(6) (7)}、磁気角度センサ等の品種追加、さらにはMEMSセンサ特有のウエハプロセス以降のパッケージングプロセス拡充のためクリーンルームを順次拡張してきた。

一方、以前より市場ニーズは堅調だったMEMS関連市場も近年のブームとも呼べるIoT、DXの取組みに対して種類、量だけでなく、一層独創性のあるMEMSセンサが求められるようになってきている。アズビル事業の根幹とも呼べる分野でより早期に、より高品質の製品の供給を実現できる開発環境を整備する必要性が、現在量産中のMEMSセンサの生産能力の向上および装置の更新と併せて高まってきた。

また、東日本大震災、度重なる強烈な台風の上陸、集中

豪雨などこれまでの想定を超える自然災害の発生に対しても、事業継続ができるクリーンルーム機能の確保が不可欠となってきた。

以上の背景により、アズビルMEMSセンサの開発・生産拠点として、今後長期にわたり市場に製品を継続的に供給できる施設の獲得を目的に、新クリーンルームの建設に踏み切ることとなった。

2. 独創的な新MEMSセンサの効率的市場導入のための課題

アズビルは、ビル市場と工場市場向けを中心に、計測と制御を基軸としたソリューションを提供してきた。計測機器のキーコンポーネントであるMEMSセンサの供給源であるクリーンルームも市場ニーズに合わせた拡張を行ってきた。しかし、MEMSセンサも近年各ユーザーのDX推進のため、従来にない計測と多岐にわたる計測データの提供が求められるようになってきており、様々な用途に合わせた仕様でかつ短納期での開発要求が高まっている。世界のMEMS市場は2021年から2026年までに8.7%の年平均成長率を記録し、189億米ドルに達するという予測もある⁽⁸⁾。その高まる要求

に応えるため、既存の製品群においては高品質を維持したまま拡大する需要に対応するために増産を続け、なおかつ新製品においては効率的に短期間で開発していく必要がある。さらに開発した新製品は短期間で安定生産に移行する必要がある。これらの課題を解決し、市場ニーズに対応するために新規クリーンルームを保有することが必須となった。

3. 課題を達成するための目標と実現結果

3.1 新MEMSセンサ開発環境の整備

アズビルは1980年代後半にMEMS開発に着手して以来、新規MEMSセンサ開発を継続してきた。開発および生産の拡大に伴い現在のクリーンルームは拡張を繰り返してきたが、これ以上の拡張が困難となり、また今後の新規MEMS開発に必要な装置の設置環境の整備、設置スペースを十分に確保する必要がある。

今回アズビルが開発・生産用として建設したクリーンルーム棟は建築面積1,336m²、3階建て延べ面積4,217m²を確保し、クリーンルームの設置できるエリアを2F、3Fの2フロアに確保した。まずは2Fフロアからクリーンルーム化を行い、優れたMEMSセンサを開発・製造する装置を順次導入設置していく。3Fには今後の動向に合わせてフレキシブルにクリーンルームがレイアウトできるよう、また順次最適な装置を導入設置できるよう将来スペースとして確保している。1Fには、クリーンルーム稼働に必要なユーティリティ設備を設置し、さらにセンサをはじめとした計測機器の校正等を担う計測標準室を準備した⁽⁹⁾。図1にクリーンルーム棟の外観、図2に断面イメージを示す。

計測標準室では、空間のクリーン度管理に加え温度、湿度、気圧の精密制御をアズビルの空調技術により実現している。



図1 新クリーンルーム棟の外観写真

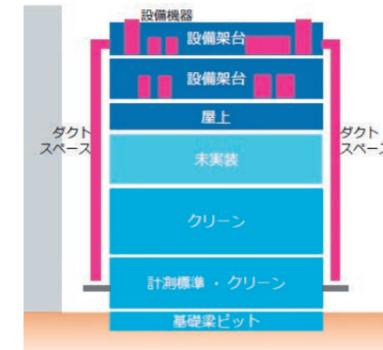


図2 新クリーンルーム棟の断面構成イメージ図

3.2 既存量産製品の発展的継続

産業用途を柱に商品・サービスを提供しているアズビルのMEMSセンサ(図3)は、一度採用されると長期間にわたり供給し続けることが求められる。アズビルのMEMSセンサ搭載製品は対象市場の動向に合わせ非常に使用期間は長く、例えば、産業向けの計測の基本である圧力発信器などは既に約半世紀、比較的新しいといえるマイクロフローセンサもすでに約30年にわたり市場への供給を続けている。同じ製品群でも長期に供給し続ける間に新たなアプリケーションが生じるケースも稀ではなく、全体として生産量は一般的なMEMS市場同様に増加傾向になっている。それに対応するためには、開発効率だけでなく、量産性の向上の面でも製造装置を刷新する必要がある。

	高分子 静電容量式 湿度センサ	熱式 流量センサ	ピエゾ抵抗式 圧力センサ	サファイア 静電容量式 圧力センサ
センサ チップ	 6.8×6.3mm	 1.7mm×1.7mm×0.5mm	 3.2mm×3.2mm×0.25mm	 9.85mm×9.85mm×0.665mm
センサ PKG				
製品	 湿度センサ ネオセンサ TM	 気体流量計 形F4Q, 等	 差圧・圧力発信器 AT9000 SuperAce TM	 隔膜式真空計 SPGシリーズ

図3 アズビルMEMSセンサと製品群

現在MEMSセンサ搭載製品の需要拡大に対応し安定供給を行うため、生産性がさらに向上し、量、質ともに安定した生産を可能とするアズビルのMEMSプロセスに適合した装置を選定し導入を開始した。従来装置で課題となっていた機能を抽出し、メンテナンス性も含め要求仕様へ反映している。特に搬送時のウエハ汚染を防止するための搬送機構やオペレータの操作設定ミス可能な限り防止するマンマシンインターフェースを具備していることも重視し装置選定を行っている。

3.3 ニーズにマッチした製造装置の計画的導入

3.3.1 装置導入方針

MEMSセンサの製造プロセスは、半導体製造プロセスの応用として捉えることができる。しかしながら、MEMSセンサプロセスは半導体プロセスに要求されるクリーン度、微細加工だけでなく、シリコンの3次元加工技術や材料の機械特性を利用するアスペクト比の高い加工、異種材料の高精度な接合等MEMS特有の加工プロセスがある。このような技術を実現できる装置の活用が短期間での開発と量産化の鍵となる。また、長期にわたり開発・生産を継続できる装置を選定することも必須である。これら特有の機能を実現できる装置の選定を行い、順次導入を開始している。

3.3.2 開発効率、生産性の向上

作業効率、品質向上の観点からウエハのハンドリングは

オートローダーを基本とする。製造プロセス条件の設定においては、1条件の実施に数時間を要するプロセスも多い。実験効率の向上には複数条件を同時に設定し、連続自動プロセスが可能な観点で装置を選定している。

3.3.3 EES(Equipment Engineering System)の有効活用

高品質な製造プロセス実現にはプロセスデータのオンライン活用が有効な手段となる。プロセス装置の不具合は発生前の予兆段階で検知し対処することでダウンタイムを最小限に抑制することが可能となる。そのためには各プロセスでの加工データはオンラインで自動収集、分析、出来栄状態の推定がなされ、次工程にフィードバックする必要がある。

アズビルは2000年代から工業市場の顧客向けに実績を積んできたEES⁽¹⁰⁾を有効に活用できる仕組みもノウハウも蓄積している。

近年は、主として時系列プロセスデータが中心になるEES領域で、従来の人手による特徴量抽出手法に加え、Dynamic Time Warping (DTW)を適用した製造プロセスの出来栄推定も可能になった⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

さらに、早くからセンシングした信号をできるだけ迅速に、その場で加工し利用するローカルコンピューティング⁽¹³⁾の概念を導入し有効性を実証してきた。センサの信号から直接異常信号を検知できる試み⁽¹⁴⁾もその1つであり、サンプリングレートの高い音響や振動データに対するオンラインでの周波数解析⁽¹⁵⁾の活用も実現している。

3.4 耐震性の強化と浸水対策

新クリーンルームは神奈川県藤沢市にある藤沢テクノセンター内に建設した。長期の安定稼働を実現するためには、首都圏直下型地震や巨大台風、局地的な豪雨を想定した備えが当然ながら重要となる。

まず耐震性については、建物の耐震グレードとして最新技術の「上級」を採用した。このグレードの採用によりクリーンルーム新棟は震度6強程度の大規模地震があっても、甚大な被害を回避でき、高い事業継続性を実現できた。

次に浸水対策については、地震による大津波発生への対策だけでなく、近年の局地的集中豪雨による近隣河川氾濫による被害も想定しておく必要がある。このため、主力の製造プロセス装置が設置されるクリーンルームのフロアは2F以上とし、1Fのグランドレベルについても防潮設定レベルT.P.+7.48とした⁽¹⁶⁾。これにより、現在想定し得る水害からの被災を回避することが可能となった。

3.5 動線の効率化と開放的で安全な作業環境の実現

1980年代後半に開発をスタートし、新技術の獲得、量産性の向上両面からこれまでのクリーンルームは拡張を繰り返してきた。その結果、クリーンルーム内の人の動線、室内の物品の流れが複雑化してしまい、余計な運搬作業等による品質低下の懸念も高くなってきている。新クリーンルームでは、このような課題を一掃するため、動線を効率化するとともに、閉空間を極力少なくする環境の実現にも配慮した。

クリーンエリアの壁/扉を可能な限り削減するとともに、気流の制御を工夫することでエリアごとの必要なクリーン度を

確保できるようにした。この結果、動線がシンプルとなり使い勝手を大きく改善できた。



図4 クリーンエリアの壁を削減

クリーンルーム内は気密性を確保する必要があるため、基本的には密閉空間となる。そのため機械音、空調音等がオペレーターの身体的、心理的なストレスとなりがちである。少しでも作業者の心理的な解放感を満たすため、直接外が見える窓を設置するなど、業務中の充足感を高められるようにしている。また、クリーンルーム外から内部の様子を確認できる窓の設置にも配慮し、安全面だけでなく社外のお客さまの見学場所としても活用できるようにした。



図5 クリーンルーム内に設置した窓

クリーンルーム内では、危険な薬品、高圧ガスを使用した作業を伴う。常時作業者の安全を確保するため、約40台のカメラを設置し、死角がないよう作業者の状態を確認できる自動監視システムを構築した。また非常時の避難経路確保や装置搬入時に稼働している設備への影響を極力少なくする必要があるため、共通通路は広さと直線性を十分に確保した。



図6 避難経路、装置搬入両面を考慮した通路確保

3.6 SDGsに沿った省エネルギーの実現

アズビルは、SDGsを道標に脱炭素社会の実現に向け自社の事業活動における環境負荷低減に取り組んでいる。新クリーンルームは藤沢テクノセンター内で比較的大規模な施設となるため、施設全体としてグループ目標に沿った省エネルギーを実現する必要がある。

ビルシステム事業で実績のある空調制御コントローラを採用し、よりフレキシブルに管理ポイントを設定し、エリア単位でのエネルギー管理が可能になるように設計した。また非稼働時間帯におけるエネルギー消費を必要最小限に抑えられるよう工夫した。具体的には特に電力消費が大きい空調をはじめとする各ユーティリティ設備の運転状態を常時モニタリングし、過去のノウハウを活かしエネルギー消費を削減できるようにした。

3.7 若手技術者の育成

クリーンルームの建設、それに伴う付帯設備の選定から導入、さらに各種製造プロセス装置の選定から導入を経験することは、数十年に一度の恰好の技術者育成の機会となった。これまでアズビルのMEMS技術を担って来たベテラン技術者と今後を担う若手技術者とが手を取り合い、知恵を絞ってこの一大プロジェクトを成功へ導いてきた。今回の経験が若手技術者達の糧となり、今後の新技術による独創的なMEMSセンサの開発推進につながっていくことが大いに期待できる。

4. 今後の課題

DX推進が進められる中、アズビルにおけるMEMSセンサの開発から生産におけるITを活用したDXについては発展途上の部分がある。それぞれの製品の生い立ちや歴史、製品の提供先の市場特徴等がその一因である。幸い、アズビルは半導体市場向けのソリューション、特にEESの実現に関しては、前述したように2000年代から国内市場向けに実績を積み重ねている。現在でも活用可能な社内リソースがあり、社外からの最新情報も入手しやすい。これらの利点を活かし、今後はAIを活用した設備・装置の異常検知技術⁽¹⁷⁾を推進していく。さらに製造プロセスデータの高度な有効活用の仕組みを構築して開発効率をレベルアップし、短期間での高品質生産への移行を実現していく。

これまで供給してきたMEMSセンサの品質は、その開発されたセンサの世代ごとに確立してきた手法によって高品質を維持してきたが、世代間で採用している手法にばらつきが残っている。上述した技術の新クリーンルームの生産プロセスの立ち上げ、その後の稼働に活かすことで、より高いレベルに生産品質を向上させていくことが期待できる。

5. おわりに

藤沢テクノセンターに建設した新クリーンルームのコンセプトと得られた成果について述べた。今回のクリーンルーム建設により、アズビルの計測技術の次世代を担う独創的な

MEMSセンサを開発し、その成果を順次世に送り出していく、かつ既存MEMSセンサを発展的に拡大していくための基盤が整った。さらに今回のクリーンルーム建設を経験し、ベテランからバトンを引き継いだ若手技術者が今後さらなる成長を遂げ活躍するフィールドも整備できた。今後MEMSセンサ技術を1つの軸として、アズビルの新時代を切り開いていくことが期待できる。

6. 謝辞

本稿執筆にあたり本クリーンルームの建設に携わった皆さまに心から感謝申し上げたい。

<参考文献>

- (1) 田中秀一
azbil Technical Review 2001年5月
「マイクロフローセンサTM」チップ製作技術
- (2) 池信一
azbil Technical Review 2011年1月
微小流量向け熱式流量センサの開発
- (3) 米田雅之
azbil Technical Review 2000年8月
ピエゾ抵抗式圧力センサの最適設計
- (4) 徳田智久
azbil Technical Review 2009年12月
世界最高水準の精度と信頼性を有するピエゾ抵抗式圧力センサの開発
- (5) 矢野樹史, 杉山正洋
azbil Technical Review 2021年5月
湿度センサエレメント小型化によるセンサユニット化技術の開発
- (6) 関根正志, 石原卓也, 差波信雄, 谷武夫
azbil Technical Review 2011年1月
サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発
- (7) Masaru Soeda, Masashi Sekine, Mitsuhiko Nagata
APC conference XXX 2018 Austin, Texas
Sapphire MEMS based smart capacitance manometer with fault detection function using heat flux of inlet gas
- (8) Mordor Intelligence
<https://www.mordorintelligence.com/ja/industry-reports/mems-market>
- (9) アズビル株式会社 ニュースリリース2022年9月2日
- (10) 山縣謙一, 黒澤敬, 村上栄治
azbil Technical Review 2011年1月
製造データの超効率的解析による高収益生産への挑戦
- (11) Junya Nishiguchi, Takashi Kurosawa, Masaru Soeda
AEC/APC Symposium Asia 2019, Tokyo
Endpoint Prediction for ICP Etching Process

with Smart VM Method

- (12) 黒澤敬, 西口純也
電気学会 ものづくり研究会 2019年3月
時系列プロセスデータを活用した高感度な設備・プロセス状態変化の検知手法の検討
- (13) Eisuke Toyoda
AEC/APC Symposium Asia 2015, Tokyo,
Tutorial Speech
The new direction for providing effective data for EES from sensors and digital controllers
- (14) Masaru Soeda, Takuya Ishihara
AEC/APC Symposium ASIA 2017 Tokyo
Highly durable smart capacitance manometer with fault detection functions
- (15) 黒澤敬, 笹岡秀毅
電気学会 ものづくり研究会 2020年10月
ローカルコンピューティング階層での2段ウェーブレット変換による設備・装置の異常検知
- (16) 国土交通省港湾局
平成23年7月22日 第3回防災部会資料(平成23年7月6日開催)
- (17) 鈴木毅洋, 西口純也
azbil Technical Review 2018年特集
バッチプロセス向けオンライン異常予兆検知手法の開発

<商標>

マイクロフローセンサ, ネオセンサ, SuperAceはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- 中野 正志 アズビル株式会社
技術開発本部マイクロデバイス部
- 黒澤 敬 アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニー
SSマーケティング部
技術開発本部マイクロデバイス部

savic-net™ FX/G5におけるサイバーセキュリティ対応

Cybersecurity measures for the savic-net FX/G5 building management systems

畔柳 賢吾
Kengo Kuroyanagi

キーワード

savic-net FX, savic-net G5, ホワイトリスト型ウイルス対策ソフト, ファイアウォール, 公開鍵暗号方式

アズビルではこれまで、ビル空調システム内の各構成機器に対して、公開鍵暗号方式によるプログラム改ざん防止やファイアウォールによるネットワーク経由の攻撃への対策を講じてきた。今回、さらなるセキュリティ強化を図るため、悪意をもった攻撃者がビル空調システム内の構成機器上で不正なプログラムを動作させようとした場合に、あらかじめ用意された、動作を許可する実行ファイルリスト(ホワイトリスト)に存在しないプログラムの動作を防ぎ、また不正アクセスを検出した際にオペレータに通知できる警報機能を備え、不正アクセス検出時の調査を迅速に行える機能を実現した。

To protect each component of its building air-conditioning systems, Azbil has been using measures such as public key cryptography to prevent tampering with programs, and firewalls to foil attacks through the network. In order to further tighten security, we have now implemented functionality that prevents malicious attackers from running unauthorized programs on the component equipment of the building air conditioning system (programs that are not on a white list of allowed executable files) and that warns operators with an alarm when an unauthorized access attempt is detected.

1. はじめに

今日、サイバーセキュリティをめぐる状況はめまぐるしく変化してきている。無差別型のマルウェア^{注1}が猛威をふるい、制御システムを狙った高度な標的型攻撃も報告されている。そのような状況の中、経済産業省による、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⁽¹⁾⁽²⁾が策定され、ビル空調システムにおいても十分なセキュリティ対策が求められるようになってきた。

ビル空調システムのセキュリティ対策は「ウイルスを持ち込まない運用」の徹底が主であった。しかし、世の中のセキュリティ意識の高まりもあり、既に稼働中の建物も含めてより高いセキュリティ対策が求められている。

2. サイバー攻撃の対象と侵入経路

本稿では、アズビルのビル空調システムにおける不正アクセス対策について紹介する。ビル空調システムは、図1に示す通り、監視用PCと複数の統合コントローラなどで構成されている。統合コントローラで温度や湿度などの情報を収集・蓄積し、火災や機器故障などの異常がないことを、オペレータが監視用PC上で日々監視している。

注1 不正かつ有害な動作を行う意図で作成された悪意のあるソフトウェアや悪質なコードの総称

サイバー攻撃は大きく分けて、過失操作を悪用した無差別型のサイバー攻撃と、悪意をもった攻撃者からの標的型のサイバー攻撃に分かれ、その侵入経路は、①監視用PC経由②外部ネットワーク経由③不正な端末機器経由が想定される。ネットワーク構成図と、想定される侵入経路を図1に示す。

また、ビル空調システムにおけるサイバー攻撃の中で、攻撃を受けたときの影響が特に大きいのが統合コントローラである。統合コントローラが攻撃を受けてシステムダウンすると、空調設備や防犯設備、電気設備などの制御が効かなくなったり、火災や機器故障などの監視ができなくなったり、データの収集ができなくなるなどの被害が出る。

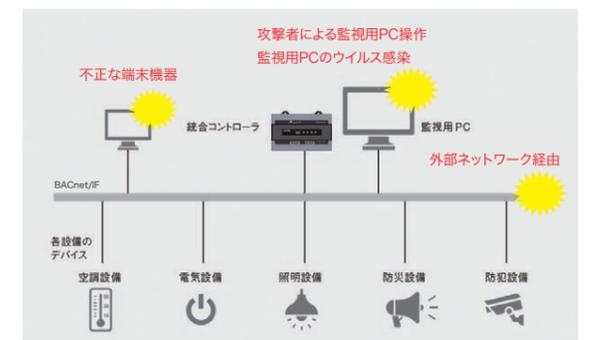


図1 ネットワーク構成図と侵入経路

3. 従来のセキュリティ対策

アズビルのビル空調システムであるsavic-net FXおよび、savic-net G5では、統合コントローラに対する対策として、RSA(暗号を活用した) 公開鍵暗号方式を利用したプログラム改ざん防止の仕組みを導入している。また、統合コントローラの不要なポートを閉じることで、ネットワーク経由で不正にアクセスされたり、DoS攻撃によりシステムダウンしたりするリスクを排除している。

しかし昨今、攻撃手法はより高度化しており、特に、明確な目的を持った悪意のある攻撃者による統合コントローラへの不正アクセスを防ぐ仕組みが従来技術では不十分であった⁽³⁾⁽⁴⁾。

4. さらなるセキュリティ対策

そこで、ビル空調システムに対するさらなるセキュリティ対策を検討した。ビル空調システムの特徴として、日々の運用が比較的固定化される点、また外部ネットワークに接続せずローカルなネットワーク構成で構築される点が挙げられる。ローカルなネットワークであるためセキュアである一方、システム構成機器に対してウイルス対策ソフトを導入し、パターンファイルを常に最新に更新する運用が難しい。

こういったビル空調システムの特徴を踏まえて、より強固なセキュリティを求めお客様向けに、あらかじめ用意された、動作を許可する実行ファイルリスト(ホワイトリスト)に存在しないプログラムの動作を防ぐ、ホワイトリスト型ウイルス対策ソフトを導入することにした。表1に、ビル空調システムに対して考えられる攻撃の種類とその影響、および対策について示す。

表1 攻撃種別ごとの対策

攻撃種別と影響 (手段・侵入経路・影響)	対策
インターネットサイト経由や持ち込みUSB経由で、監視用PCがウイルス感染し、警報の監視ができなくなる。	インターネット接続をしない、監視PCのUSBポートをふさぐ、などの物理的な対策により、過失によるウイルス感染を防ぐ。
監視用PC経由で悪意のあるオペレータや第三者により、統合コントローラが不正アクセスを受け、データ収集や警報の監視ができなくなる。	監視用PCに対するホワイトリスト型ウイルス対策ソフト導入により、監視用PC上での不正プログラムの起動を抑制し、統合コントローラへの攻撃を防止する。
ネットワークに不正に接続された端末機器や外部ネットワーク経由で、統合コントローラが不正アクセスを受け、データ収集や警報の監視ができなくなる。	統合コントローラに対するホワイトリスト型ウイルス対策ソフト導入により、統合コントローラ上での不正プログラムの起動を抑制し、統合コントローラへの攻撃を防止する。

4.1 ホワイトリスト型ウイルス対策ソフトとは

ホワイトリスト型ウイルス対策ソフトは、動作を許可する実行ファイルをリスト(ホワイトリスト)に登録し、そのリストを元に実行ファイルの起動、変更、削除を制御するタイプのウイルス対策ソフトである。表2にその特徴をまとめた。

表2 ホワイトリスト型ウイルス対策ソフトの特徴

機能	詳細
ウイルス実行の防止	ホワイトリストに登録されていない実行ファイル(拡張子:exe/dll/bat などの)の起動は、保護機能によりブロックされる。
改ざんの防止	ホワイトリストに登録された実行ファイルは、保護機能により変更、削除がブロックされる。
変更管理	実行ファイルの変更、削除を行う場合は、対象ファイルを事前にホワイトリストから除外する必要がある。
ウイルスのネットワーク内侵入防止	保護機能有効時、外部ドライブ(CD/DVDドライブやUSBメモリなど)から、実行ファイルを直接起動することはできない。
運用中の保護	保護機能有効時、アプリケーションのインストールや更新はできない。

パターンマッチング型ウイルス対策ソフトでは、新しいウイルスが発生するたびにウイルス定義ファイルを更新しなければならぬのに対し、ホワイトリスト型ウイルス対策ソフトでは新しいウイルスが発生してもウイルス定義ファイルを更新することなく運用できる。図2に両者の違いを示した。

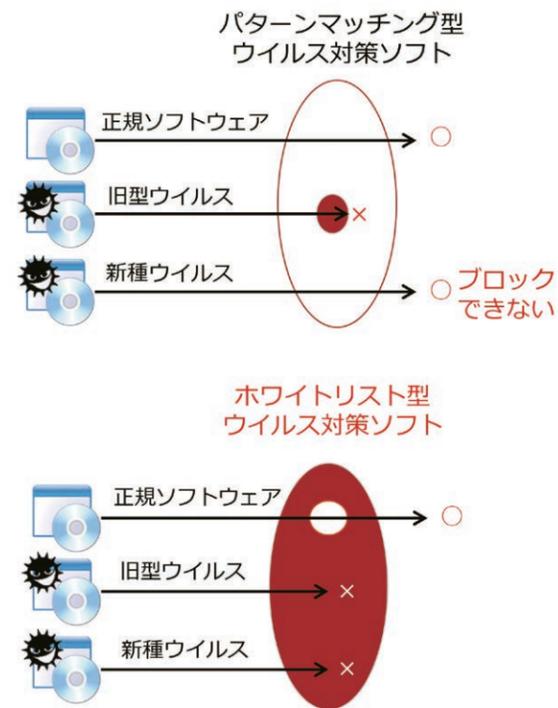


図2 パターンマッチング型ウイルス対策ソフトとホワイトリスト型ウイルス対策ソフトの違い

4.2 監視用PCへの対策

savic-net FXおよび、savic-net G5の監視用PCに対し、ホワイトリスト型ウイルス対策ソフトを導入し、監視用PCを経由した統合コントローラへの攻撃を防止した。

運用開始後はホワイトリストの更新は不要とし、お客様の都合でプリンタドライバやExcelなどのソフトウェアをインストールしたい場合に限り、許可された作業担当者が、一時的にホワイトリスト型ウイルスソフトを無効化してホワイトリストの更新ができるようにした。

4.3 統合コントローラへの対策

ネットワークに不正に接続された端末機器や、外部ネットワーク経由の攻撃への直接的な対策として、savic-net G5の統合コントローラに対してホワイトリスト型ウイルス対策ソフトを導入した。その特徴を本章で紹介する。

4.3.1 オペレータ操作画面

ホワイトリスト機能の操作は、統合コントローラごとにデバイス詳細画面より行うことができる。画面イメージを図3に示す。



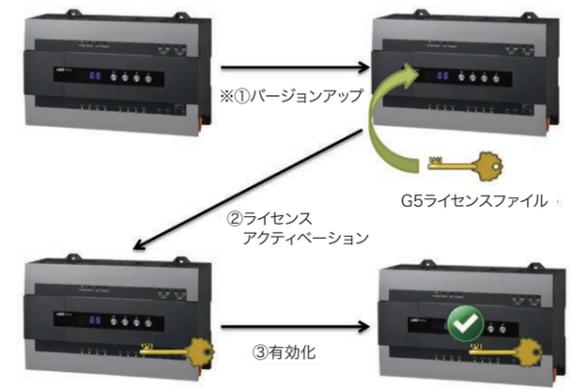
図3 画面イメージ

ホワイトリスト機能の有効・無効操作、ライセンス認証(以下、アクティベーション)、操作時の事象ログ、警報など、監視システムの既存の仕組みにホワイトリスト機能を取り込むことにより、特定の権限をもったオペレータが監視業務の中で操作できるようになっている。

4.3.2 ライセンス管理

ホワイトリスト型ウイルス対策ソフトを導入するためには、お客様にライセンスの費用負担が発生する。そのため、お客様の求めるセキュリティレベルによって、ホワイトリストの導入可否を選択できる仕組みを導入した。ホワイトリスト型ウイルスソフトを使用したい統合コントローラのみライセンスを購入し、有効化できる設計とした。

新規の建物向けには、工場でアクティベーションしてリリースする。また、運用中にホワイトリスト型ウイルス対策ソフトが必要になった場合でも、ライセンスを購入すると即座にアクティベーションおよび、機能の有効化が可能な設計とした。運用中の建物向けのライセンスアクティベーションの流れを図4に示す。



※ホワイトリスト機能導入前のバージョンからのバージョンアップ時のみ

図4 運用中の建物向けのライセンスアクティベーションの流れ

4.3.3 既存機能への影響について

savic-net G5には、運用中にオペレータが自由に拡張アプリ^{注2}を作成できる機能がある。運用中に自由にアプリを開発できる便利な機能であるが、その特性がゆえにホワイトリスト型ウイルス対策ソフトとの相性が悪い。

ホワイトリスト型ウイルス対策ソフトを導入した場合、統合コントローラ内のプログラムを変更する際に、ホワイトリストの更新が必要となる。つまり、拡張アプリを作成するたびにホワイトリストの更新による待ち時間が発生するため、お客様の利便性を損ねてしまうという問題があった。

そこで、待ち時間の改善のため、運用中に更新されないプログラム(基本ベースライン)と、運用中に更新される拡張アプリで管理を分け、最終的にマージを行う仕組みを作成した。このように効率的にホワイトリストを更新する仕組みを導入することで、更新にかかる時間を90秒から10秒程度まで大幅に短縮化した。図5にその仕組みを記載する。

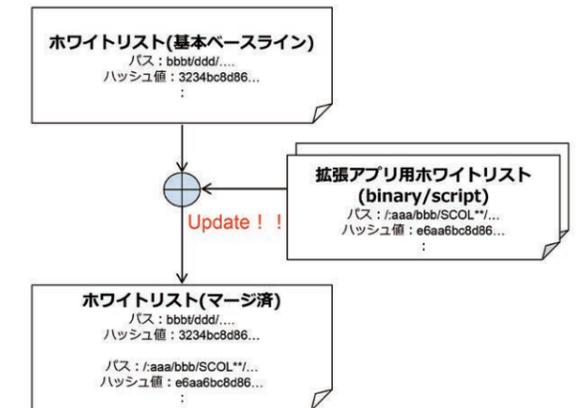


図5 ホワイトリスト更新の効率化

また、拡張アプリによる意図的な書き換えと、悪意をもった書き換えを区別して管理する必要がある。

拡張アプリ機能を実現するため、統合コントローラではDockerコンテナと呼ばれる仮想化技術を使用している。コンテナアプリを起動する際、アプリケーションが動作するコンテナレイヤが動的に生成されるため、ホワイトリストに登録されたファイルパスとの整合性が取れなくなる問題があった。そこで、動的に生成されたファイルに対してもホワイトリストの制御下となるよう、ホワイトリストの定義を行った。

4.3.4 不正アクセス検出時のオペレータへの通知

不正アクセスを防止する仕組みがあっても、それをオペレータに通知する仕組みがないと、攻撃を受けているにもかかわらずその状況を放置してしまうことになりかねない。そこで、統合コントローラへのホワイトリスト型ウイルス対策ソフトでは、不正アクセスを検出した際に警報が発報される仕組みを開発した。不正アクセス検出時のフローを図6に示す。

注2 統合コントローラで動作する制御系アプリケーション

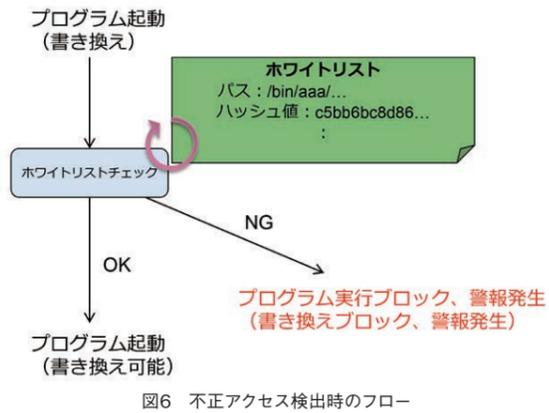


図6 不正アクセス検出時のフロー

オペレータが、統合コントローラに対する不正アクセスがあったことを即座に認識できるため、迅速な初動対応が可能である。画面イメージを図7に示す。



図7 不正アクセス検出時の警報表示

4.3.5 不正アクセス検出時の調査

実行ログとセキュリティイベントログを記録しているため、不正操作検出後の調査が容易となる。いつ、どこかのファイルが起動されたのか、アクセス権限、ファイルハッシュ値(改ざんされたかの検証用)がログで追跡できるため、不正操作検出後の調査が可能となる。調査フローを図8に示す。

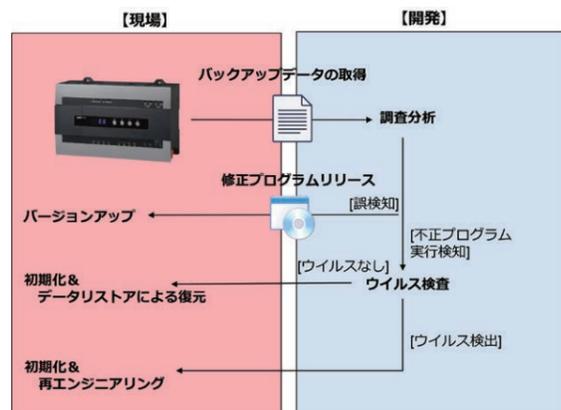


図8 不正アクセス検出後の調査・処理フロー

5. おわりに

セキュリティの提供が当たり前品質として求められるようになってきている状況において、すべての建物に対しての最低限のセキュリティレベルの提供と、より高度なセキュリティレベルを求めるお客さまに向けたソリューションの提供を可能とした。

アズビルでは、世の中で日々報告される膨大な脆弱性情報を一元管理し、迅速に製品に適用していくための組織体制を構築している。世の中の動向を注視しつつ、建物ごとの運用に合わせたセキュリティ対策を実施している。脆弱性対策の製品適用までのリードタイムの短縮化により、建物のセキュリティインシデントを防止し、より一層の顧客満足度の向上を図っていくことが今後の課題である。

<参考文献>

- (1) 経済産業省
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第1版(2019.6)
https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190617005/20190617005_01.pdf
- (2) 経済産業省
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(個別編:空調システム)第1版
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sangyo_cyber/wg_seido/wg_building/pdf/20221024_1.pdf
- (3) 「産業用制御システム向け侵入検知製品の実装技術の調査」調査報告書
<https://www.ipa.go.jp/files/000101403.pdf>
- (4) 制御システムのセキュリティリスク分析ガイド 第2版
<https://www.ipa.go.jp/files/000080712.pdf>

<商標>

savic-netはアズビル株式会社の商標です。
DockerはDocker Inc.の商標です。
Excelは米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。

<著者所属>

畔柳 賢吾 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発1部

個別快適ニーズに対応するための空調ゾーン細分化技術 Air conditioning zone segmentation technology to meet individual comfort needs

羽場 照芳
Teruyoshi Haba

水高 淳
Jun Mizutaka

井波 太郎
Taro Inami

三枝 隆晴
Takaharu Saegusa

キーワード

セントラル空調, セル型空調システム, ネクスフォートDD, 吹出口ダンパ, WP (ワークスペース) センサ, アシスト制御, 連成シミュレーション

吹出口単位 (6~12㎡単位) に細分化された空調制御を実現するため、吹出口ごとに風量を調整するダンパ機構を設けた吹出口ダンパとこれを制御するコントローラを開発した。また、空調単位の細分化による吹出口間の干渉を解決するための制御機能を実現した。これら開発した技術により、吹出口変風量システムであるセル型空調システム ネクスフォート™ DDとして製品化したので、その特長を説明する。

また、今回開発した制御技術をシミュレーションにより検証し、環境実験室にてPredicted Mean Vote (PMV:予測温冷感) を指標として効果を評価したので、その内容を報告する。

To subdivide air conditioning control into diffuser units covering from 6㎡ to 12㎡, we developed diffuser dampers with a mechanism to adjust airflow volume, along with a controller to modulate the dampers. We also implemented a control algorithm to resolve air interference between diffusers arising from the subdivision into air diffuser units. These new technological developments were applied in the diffuser's variable air volume control as the commercially available cell-based air conditioning system; Nexfort damper for diffuser. After the control algorithm was verified in simulations, we evaluated its effectiveness in an environmental laboratory based on the Predicted Mean Vote (PMV) index.

1. はじめに

ニューノーマル時代の社会的背景を反映して、オフィスのワークスペースへの要望は、全体を空調することから個別の要望(ニーズ)に合わせて空調するというように、より細分化へと進んでいる(図1)。

従来のVariable Air Volume (VAV) システムによるセントラル空調では100㎡程度を単位として行っている、風量設定や発停を含む空調制御を、計測制御技術とInformation and Communication Technology (ICT) を組み合わせるこ

とで、6~12㎡というより細分化された吹出口単位で実現した。実現した空調制御を、今回はセントラル空調システム用のセル型空調システム ネクスフォートDDとして製品化したので、その概要とシステム構成機器の特徴およびその導入効果を2章で説明する。

空調単位を細分化すると、吹出口間の干渉という新たな課題が発生する。この課題を解決するために開発したアシスト制御と、従来の機能を改良した新しいグループ機能を3章で、制御技術の確認時に採用したシミュレーション技術、および環境実験室で評価した結果を4章で報告する。

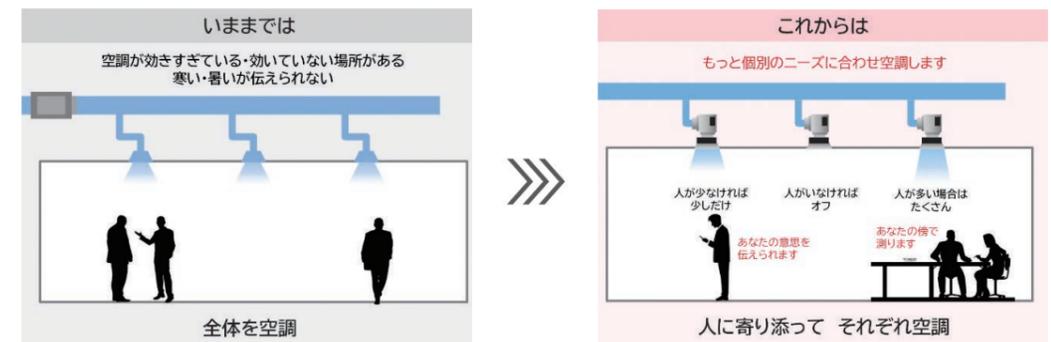


図1 細分化ニーズの概念

2. システム構成

ネクスフォートDDのシステム構成を示す(図2)。

(1) 吹出口ダンパ

コントローラとBluetooth®Low Energy (BLE) 送受信機を備えた、吸気の吹出口に組付ける制御ダンパボックス

(2) WP(ワークプレース)センサ

机や壁面に設置し、温度、湿度、照度の計測値をBLE通信で吹出口ダンパに送信

(3) スマートフォンによる空調操作

ワーカーのスマートフォンにインストールし、空調のON/OFFや温度設定を行う

(4) 空調コントローラ

BAシステムのリモートとして吹出口ダンパと空調機を統合制御

また、主な機器の特長を以下に記述する。

2.1 吹出口ダンパ

施工性に配慮し、給気上流側の直管部を不要とするために、風速センサを使わない制御方式を採用している。

最も大型のΦ200タイプで重量5kgと、軽量化を実現するとともに、ボックス内部にグラスウールを内貼して、現場における保温と騒音の対策を不要としている。

Bluetooth® Low Energy (BLE) 送受信機を内蔵し、温度センサと操作端末をワイヤレス化し、調整時において脚立を使った天井裏へのアクセスを不要としている。

2.2 WP(ワークプレース)センサ

風量制御用室内温度のほか、湿度と照度の計測値をBLE通信で出力する、ワイヤレスセンサであり、配線工事が不要

なので、レイアウトに合わせて容易に移設、増設できる。

吹出口ダンパが最寄りのWPセンサを自動選択するため、アドレス設定など紐づけのエンジニアリング作業が不要である。

ソーラーセルによる発電により内部蓄電池(交換不要)に蓄電された電力により動作する。

内蔵する照度センサで、送信周期を明るい時は2秒発信、暗い時は60秒発信に自動的に切り替え、応答速度と低電力消費を高い次元で両立させている。

2.3 スマートフォンアプリ

ネクスフォートDDシステムで機器の操作を行うためのアプリケーションである。このアプリをオフィスワーカーの手持ちのスマートフォンにインストールしてもらうことで、吹出口ダンパの操作を感覚的に行える機能を提供する。

吹出口ダンパ操作時には、内蔵のLEDを点滅・点灯させることで応答確認ができるなど、ユーザビリティにも配慮している。

2.4 空調コントローラ

細分化された空調制御を実現するための機器である。ネクスフォートDDの吹出口ダンパを管理・制御するために、3章でその詳細を述べる新しい技術を採用している。

さらに、従来の空調制御である空調機ファン変風量制御と給気温度ロードリセット(室内負荷に合わせて給気温度を適切に自動で変更する)制御の最適化も行っている。

従来の汎用Direct Digital Controller (DDC)同様、BAシステムと連携しながら多様な制御と監視も実現している。

2.5 ネクスフォートDDの導入効果

以下に、ネクスフォートDDを導入した場合の効果について記述する⁽¹⁾。

2.5.1 オフィスワーカーのウェルネス向上

空調ゾーンの細分化が熱負荷の偏在や個室の設置に伴う温冷感の問題を解決して、オフィスワーカーのウェルネスの向上を推進する。

ESG投資原則に沿った「環境性能・ウェルネス(快適性・健康)に優れた不動産」評価のための建築物の環境性能評価ツールポイント付与に貢献する。

2.5.2 オフィス運用のフレキシビリティ向上

吹出口ダンパの組合せを「発停」「温度設定」「温度計測」の各グループにまとめて管理することにより、テナント入退去やレイアウト変更に合わせて空調ゾーンを容易に組替えることができる。

2.5.3 温室効果ガス排出量の削減

適正風量・温度設定値緩和・空調停止の細分化が、空調設備の省エネルギーに貢献する。

また、レイアウト変更の際に発生する空調工事を削減するため、「作る」「捨てる」を減らすことにつながり、温室効果ガスの排出量削減にも寄与する。

3. 新しい制御、管理機能

空調単位を細分化すると空調単位である吹出口間の干渉という新たな課題が発生する。その課題を解決するための、新しい制御を以下で説明する。

また、本システムでは、汎用VAV空調システムに対して改良した管理機能を実現したので、その管理機能についても以下で説明する。

3.1 空調ゾーンの細分化に伴う吹出口ダンパ間の干渉を抑制するアシスト制御⁽²⁾

空調ゾーンが細分化されると、隣り合った吹出口ダンパ間で給気が干渉し合い、吹出口ダンパの室温偏差が収束しないことがある。

ネクスフォートDDではこれを解決するためにアシスト制御を開発し、近隣の吹出口ダンパに対して設定値を増減するように連携させることで、各吹出口ダンパの室温偏差を収束させた。以下にその詳細を述べる。

空調機系統に存在するすべての吹出口ダンパの間で室温設定:SP_{sd}と室温:PVの偏差が極端に大きいものを減らすため、さらにそれぞれの吹出口ダンパにおいてPVのSP_{sd}への追従性を上げるために、吹出口ダンパがそれぞれ単体で温度制御をしながら、過不足がある場合には周辺の吹出口ダンパと給気を援助(アシスト)し合う。

アシスト制御は、空調コントローラが各吹出口ダンパのSP_{sd}とPVの偏差に定数(アシストゲイン)を乗じて、周囲の吹出口ダンパの偏差に重畳し、上下限処理を加えて実現される。アシスト制御の概念を示す(図3)。

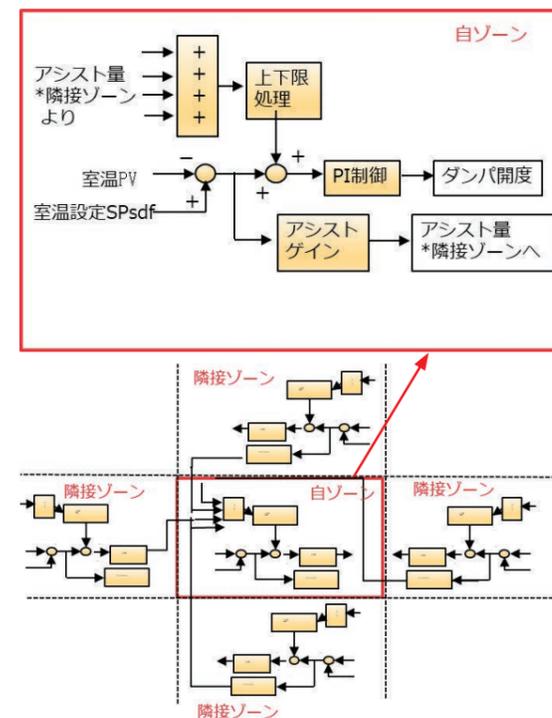


図3 アシスト制御の概念

なお、停止中の吹出口ダンパについては、温度制御の対象外であり、過剰なアシストを減らすため、周囲吹出口ダンパ間におけるアシストはゼロとする。

また、専用のタブレット調整ツールで間仕切り設定した場合には、間仕切りにより干渉がなくなり、アシストが不要となるため、隣接する吹出口ダンパ間のアシストはゼロとする。

3.2 吹出口ダンパグループ管理機能

ネクスフォートDDではレイアウトに合わせた吹出口ダンパの管理を容易に設定できるよう、これまでの汎用VAVコントローラのグループ機能を拡張し、吹出口ダンパを「発停」「温度設定」「温度計測」のそれぞれの単位でまとめられるようにした。

3.2.1 「発停」グループ

吹出口ダンパの発停を、後述する温度設定グループよりも細かい単位で行うためのグループ設定である。

これにより、より小さい範囲で吹出口ダンパを発停することができ、人が不在である場所の吹出口ダンパを停止することができ、省エネ性を高めることも可能となっている。

3.2.2 「温度設定」グループ

「温度設定」グループとは、管理する温度設定値SPを共有するグループであり、組織ごとや配置の方向ごとなど、負荷傾向が似たエリアにある複数の吹出口ダンパをグループとしてまとめることで、温度設定管理の効率向上ができる(図4)。

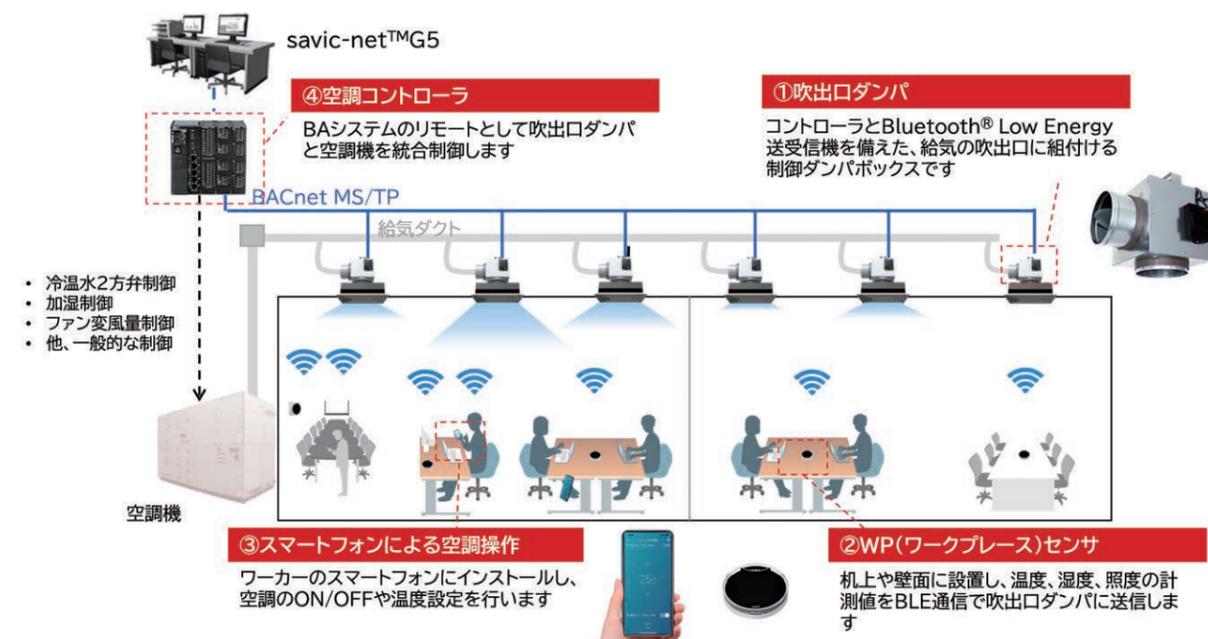


図2 ネクスフォートDDのシステム構成

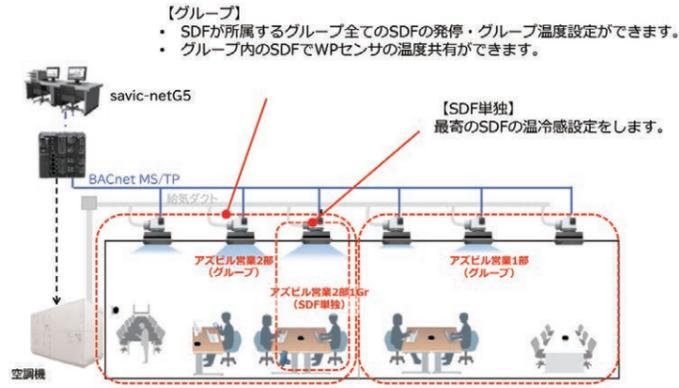


図4 温度設定グループの概念

3.2.3 「温度計測」グループ

「温度計測」グループは、WPセンサの温度を共有する単位を構成するグループである。このグループ内の吹出口ダンパは、それぞれの周囲に設置されたWPセンサの測定温度を共有する。そのため、ある1つの吹出口ダンパが、ワイヤレスであるWPセンサからの温度計測値を受信できなくても、温度計測値の欠落を防ぐことが可能である。

4. 制御の検証

開発した制御に関して、計算機によるシミュレーションと、環境実験室での測定で検証したので報告する。

4.1 シミュレーションによる制御の検証

制御機能開発時には、ロジックやパラメータを決定するために制御シミュレーションを用い、制御性をトライアンドエラーで確認した。なお、検討期間を短縮するため、連成解析シミュレーションを利用した。連成解析とは、2つ以上の物理現象が相互に及ぼす影響を考慮した解析のことを指し、ここでは、室内気流を分布系(メッシュ)として解析するComputational Fluid Dynamics (CFD)と各部の温度や風量といったプロセス量や制御ロジックを微分方程式として解析する制御シミュレーションを連成した(図5)。

なお、シミュレーション環境を実動作に近づけるために、以下2点が再現できていることを確認した。
 (1) 汎用吹出口の等速線図の再現
 CFDの妥当性を検証するために、市販の吹出口の等速線図を再現させ、ほぼ同等の線図となっていることを確認した(図5)。
 (2) 部屋における複数吹出口設置時の制御の再現
 3章で述べている新しい制御機能に関して、意図する機能が実現できていることを、吹出口の気流ベクトルと高さ110cmの室温等高線図の結果で確認した(図5)。

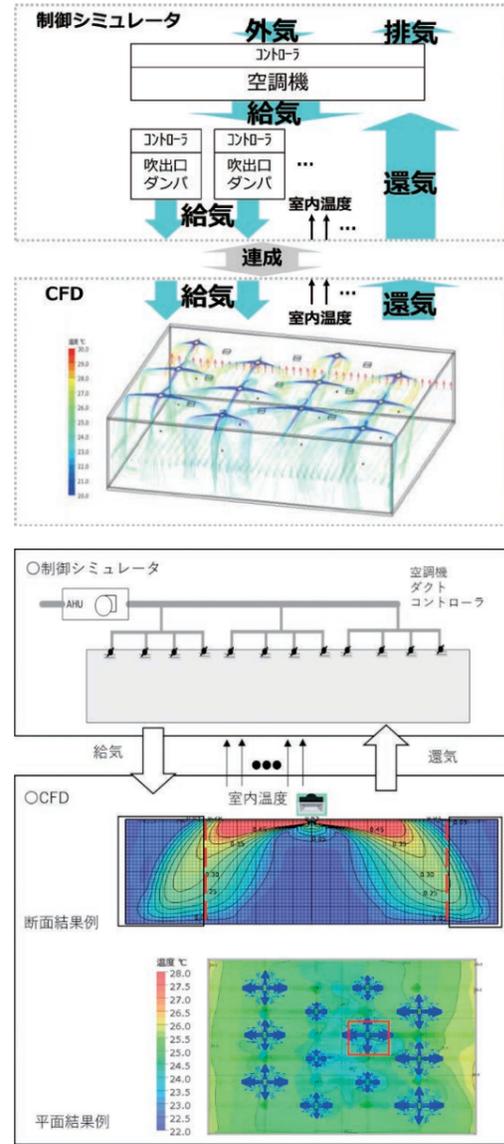


図5 連成解析シミュレーションの概念と実施例

4.2 環境実験室における評価

熱負荷を部分的に上げて偏在させた場合に、汎用VAV空調システムと比較し、ネクスフォートDDにどの程度の快適性の差が出るかを、温熱環境を評価する指標の1つであるPMV¹⁾の値(-3から+3の範囲の数字で示され、0なら暑さや寒さを感じない熱的に快適な状態を意味する)で検証したので報告する。なお、評価の際の計測は、アズビル社内の設備である環境実験室(延べ床面積約94㎡)で行った。

以下に詳細を述べる。

注1 PMV(予測温冷感)は温熱環境を評価する指標の1つで、空気温度や相対湿度、気流、放射温度という物理的な要素に、人側の要素である代謝量と着衣量を加えた6要素を基に算出する-3から3の値であり、0が熱的に最適であることを示している。

4.2.1 計測設備の構成(図6)

- VAV空調システム
 - VAV: 1台
- ネクスフォートDD
 - 吹出口ダンパ: 8台
- 熱負荷
 - 2台: 500Wと1,000Wを切替
 - 2台: 500W固定
- 温度計測
 - 熱電対8本(高さ110cmに設置)

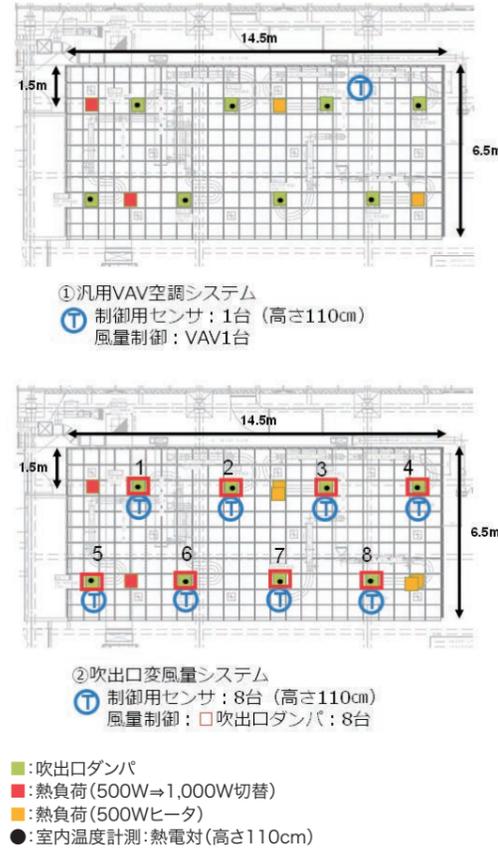


図6 社内環境試験室の構成

4.2.2 評価条件および対象

- 評価条件
 - 夏場のオフィスでのデスクワークを想定し、熱負荷を部分的に500Wから1,000Wに増加させ、居住者近傍のPMVのばらつきを比較する。なお、設定温度はPMV=0となる24℃とした。評価要素は以下のとおりである。
 - PMVの要素
 - 室内温度
 - 放射温度
 - 熱電対計測値
 - 相対湿度
 - WPセンサ計測値
 - 相対気流: 0.2m/s(固定値)
 - 着衣量: 0.7(固定値)
 - 活動量: 1.1(固定値)

4.2.3 結果

熱負荷を切り替えたあとの各吹出口でのPMV値の変化は以下ようになった(図7)。
 汎用VAV空調システムの場合、熱負荷UP後90分間の吹出口でのPMV時間平均値で0.60となった吹出口があった。一方、ネクスフォートDDの場合、各吹出口のPMV時間平均値は0.17~-0.25となり、汎用VAV空調システムに比較してPMVが理想値である0により近くなり、ネクスフォートDDにより温熱環境が改善されたことが確認できた(図7)。

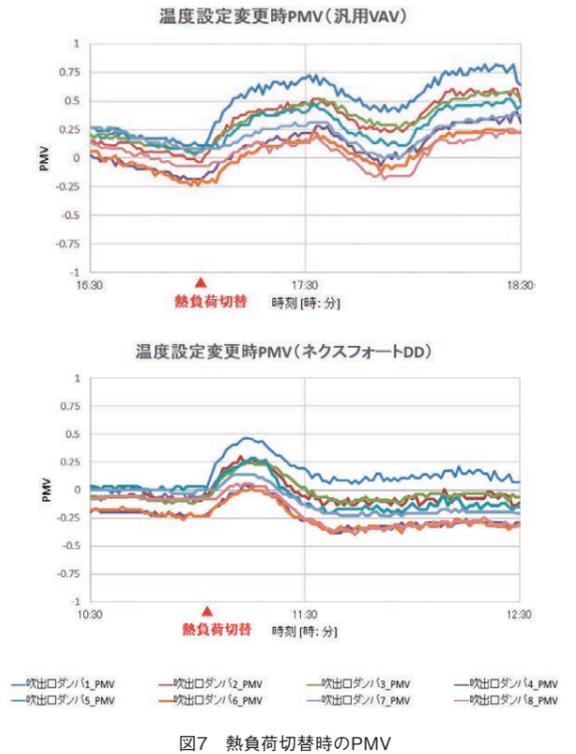


図7 熱負荷切替時のPMV

5. おわりに

本稿では、ネクスフォートDDの概要、およびシステム構成機器の特長を述べるとともに、課題解決のための制御技術、改良したグループ機能、機能確認のためのシミュレーション技術を説明し、実験室レベルでの改善効果を報告した。

今後は、ネクスフォートDDの実納入現場におけるオフィスワーカーの温冷感と知的生産性の評価を進めていく予定である。

<参考文献>

- 水高, 吉田, 大曲, 森田, 齋数, 伊藤, 小谷: 吹出口変風量システムによるオフィスワーカーのウェルネス向上の推進(第1報)システム概要と実験室における環境実験室における評価, 空気調和・衛生工学会2022/09/14大会報告書, 2022, pp.1-2
- 水高, 吉田, 大曲, 森田, 齋数, 伊藤, 小谷: 吹出口変風量システムによるオフィスワーカーのウェルネス向上の推進(第1報)システム概要と環境実験室における

評価, 空気調和・衛生工学会2022/09/14大会報告書, 2022, p.3

<商標>

Bluetooth®はBluetooth SIG, Inc.の商標または登録商標です。

BACnetはASHRAEの商標です。

savic-net, ネクスフォートはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- 羽場 照芳 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
- 三枝 隆晴 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
- 井波 太郎 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発4部
- 水高 淳 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニーマーケティング本部
プロダクトマーケティング部

クラウドMESを活用した生産現場におけるIT基盤の構築とDX推進

Using a cloud MES to build IT infrastructure at production sites and promote production DX

玉置 順久
Yorihisa Tamaoki

キーワード 生産 DX, 情報活用, データレイク, クラウド, MES, 作業記録デジタル化

従来、生産領域においては、情報システムが工場（製造ライン）ごとに必要とされる生産情報を取り入れて発展してきたために情報活用が困難となってきた。クラウドMESは、複数の工場を一括管理できるため、サーバやソフトウェアなどの情報システムを自社で管理するシステムでは困難であった物理的に異なる現場に共通の情報として管理できるため、個人の知見が、組織内の多様な意見と融合し、情報の共通基盤としてKKD（勘・経験・度胸）から脱却し、より客観的な情報を利活用した強い現場づくりとデジタル・トランスフォーメーション(DX)の推進が行える。

In the manufacturing industry, since information systems are often installed for individual factories and production lines, it is difficult to utilize production information for overall production optimization. A cloud-based manufacturing execution system can collectively manage multiple production sites and collectively handle production information that is common to multiple sites. This allows the production-related knowledge of individuals to be combined with the diverse opinions and ideas of other members of the organization, strengthens manufacturing based on a common data foundation rather than KKD (in Japanese, kan 'intuition', keiken 'experience', and "dokyō 'courage'), and promotes digital transformation (DX).

1. はじめに⁽¹⁾

アズビルの生産の強みは、多品種少量生産である。この強みを下支えしているのは、生産計画～調達～製造～出荷に及ぶ業務で様々な生産系の情報システムであると言っても過言ではない。一方でアズビルでは生産系の情報システムは改修を重ねながら、20年以上使い続けられ老朽化している。別の言い方をすれば、長く使い続けられているということは、先代の英知が詰まったアズビルの生産現場に適合した情報システムであるとも言えるが、この英知を情報システムのノウハウとして残すため、市販パッケージソフトウェアの採用は見送られ、現状のシステムを継続利用していた。

近年のIT技術は、ハードウェア、ソフトウェアともに更新スピードは非常に早く、強くなっているセキュリティ脅威に対してソフトウェアの保守期限を延長して対応している。しかしハードウェアの寿命には逆らえず、動作可能なハードウェアの入手が困難になることで、現状の情報システムを使い続けることはできなくなる可能性がある。また、改修を重ねて使用してきた経緯により、個別最適、属人化、データが分断された状態のサイロ化などは、技術的負債となっている。この

ため、今後長年にわたる情報システムの安定稼働、事業環境の変化へ迅速に対応することが困難になっており、BCPの視点からも危険な状態と言える。

この課題をDX推進のきっかけと捉え、全社的な情報システムにおいて、図1に位置づけられるMES (Manufacturing Execution System: 製造実行システム)として、クラウドMESを開発、導入した。生産領域におけるIT基盤を一新し、当社の強みをさらに進化させるIT基盤であるクラウドMESを説明する。今回は、azbilグループの会社の導入事例であるが、今後は、導入成果を確認し、得られる価値を精査して、お客さまへ提供することを目指している。

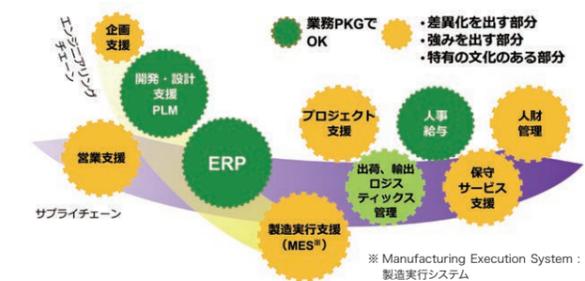


図1 社内の情報システムとMESの位置づけ

2. 現状の課題整理と解決目標の設定

本章では、本プロジェクトにおける解決目標の設定までの流れについて述べる。

2.1 現状の課題整理

生産にかかわる情報システムのアップデートは、一般的に現場を中心とした「カイゼン」という考えに基づいて、それぞれの現場が主体となり企画・構築・導入および運用を行っている。そこで得られた情報を扱うシステムの改修を重ね、システムを成長させてきた歴史から生産業務を行っている会社では、当社と同様に以下のような課題があると考えられる。

(1) 複数の製造拠点、製造ラインを持っている会社では、情報管理と実績評価は、製造場所、製造品、製造方法の違いがあり、共通の基準で評価ができていない。

(2) 製造業務では自動収集できず、人が記録している情報が多々ある。この情報が、紙で記録された状態でデジタル化されておらず、データ活用ができていない。

(3) システム導入され、記録が電子化された現場でも、情報が個人所有されている、保管場所(サーバーフォルダ、データベースなど)が容易に検索できない、など、情報が分散し、サイロ化されている。このため、製造部門の実績を数値で可視化できておらず、実績情報から改善に繋げるサイクルが確立されていない。

(4) システム導入、更新には、多くの人手、期間を要し、構築されたシステムを維持するためにIT人材を製造拠点ごと

に配置する必要がある。このため、多くのIT人材がシステム保守業務に多くの時間が割かれ、新規案件に対応できていない。

会社、製造現場により、課題の程度に違いはあるが、歴史の長い会社ほど、上述の状況が多い傾向にある。当社、当社グループ会社でも同様な状況であった。

上記の内容を整理すると、大きく2つの課題に集約されると考えられる。

- (1) 現場ごとに個別の情報システムを利用(個別最適)
- (2) 複数の情報システムの維持管理工数

2.2 解決目標の設定

2.1の課題に対して、IT基盤を複数拠点に導入することによって、同じ仕組みで情報を管理し、運用保守要員の集約が可能にするシステムを検討した。その結果、クラウドMESならば、ハードウェア障害対応、ロケーションが限定されないため、前節の課題解決に有効であると考えられる。オンプレミスのMESでは製造拠点に1つのサーバを配置することが常識であった。しかし、計画的な停電工事、ハードウェア/ソフトウェアのトラブル対応などを考慮すると、物理的に離れた場所のサーバで運用することは困難であった。そこでサーバをクラウド上で稼働させることにより、図2で示すようにロケーションを意識しないシステム構築、運用が可能になると考えた。さらに2.1で記述した個別最適への対応は、業務の棚卸と標準化を進める中で、個別最適必要性、全体最適への可能性を精査することとした。

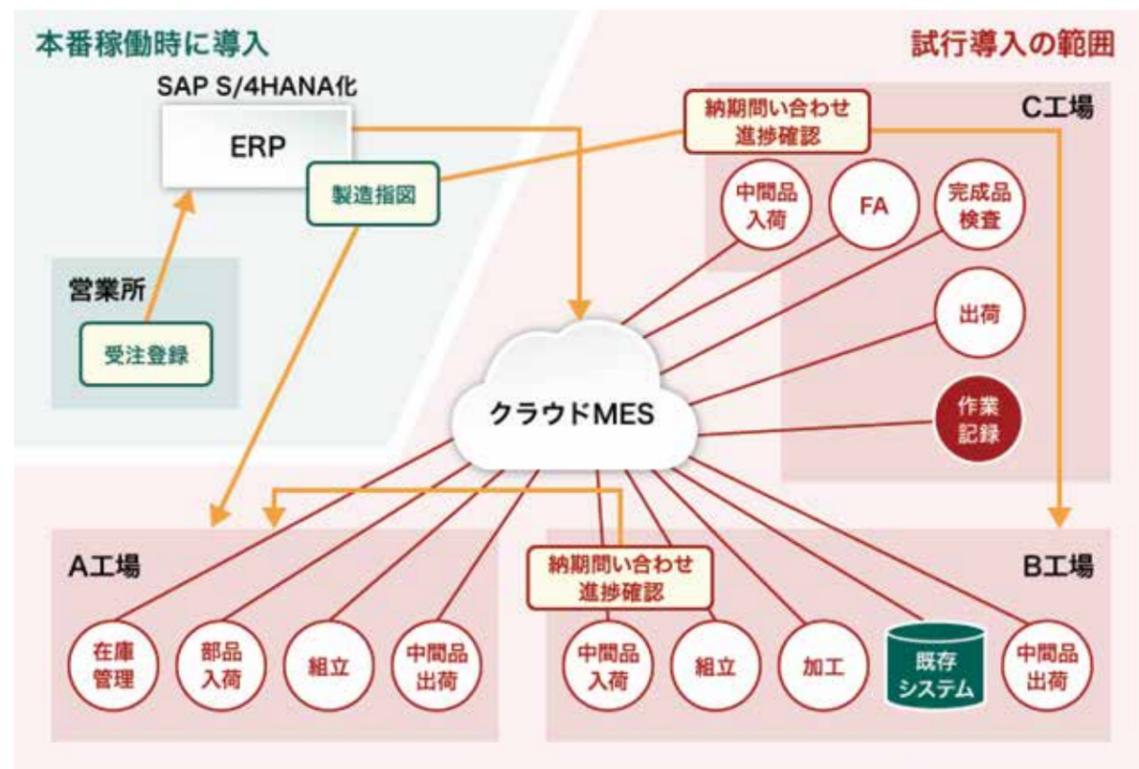


図2 複数製造拠点とクラウドMESの関係

3. システム導入ポイントの抽出

2章で述べた目標設定に基づき、システム導入の対象範囲を検討した。導入先グループ会社の業務分析を実施し、課題と留意点を確認した。

3.1 azbilグループ会社の業務分析

当社グループ会社で、基幹システム更新プロジェクトが計画されており、業務を刷新できるタイミングでもあった。MES導入も検討に含まれていたため、該当のグループ会社の生産部門で現状業務分析を実施し、5カ所ある製造拠点(工場)のすべての生産業務を確認した。

図3は、該当グループ会社におけるシステム更新前の課題例である。2章で検討した仮説以外に、在庫管理精度の低さとその結果による一斉棚卸の実回数が多い、特定の人に依存したスケジューリング業務、紙で記録しているため転記作業や現場進捗が現場に行かないと見えない状況など、この該当グループ会社に固有の課題も存在していた。本プロジェクトでは、2章の仮説検証と導入される会社の課題対応の双方にソリューションを提供する必要があった。

製造部門での課題	その他業務での課題とねらい
入出庫記録や作業実績時間記録を手作業で実施、作業工数低減と在庫管理精度向上を行いたい。	工場ごとに存在する個別システムの刷新を順次進め、業務の標準化
生産停止を要する一斉棚卸を見直し、棚卸の実施工数や生産停止による出荷を減らしたい。	主に紙で運用している業務をシステムでデータ連携し、作業の効率化と品質向上
個人化しているスケジューリング業務を、誰でも行える体制にしていきたい。	製造状況(生産進捗、在庫など)をリアルタイムで可視化し、リモート管理の実現
紙による作業日報やトレーサビリティを電子化し、追跡/請求の迅速化、転記作業を削減したい。	リモート環境で新しいプロジェクト導入方法の試行と実施
生産進捗や不適合数をリアルタイムで可視化し、工程改善を推進したい。	クラウド環境により、稼働後の運用管理レベル向上させ、運用作業の効率化

図3 azbilグループ会社における製造部門の課題例

図3で示した課題の背景として、以下のような状況もあった。

- (1) 既存の基幹システムが活用されておらず、マスター情報と業務に乖離があり、受払業務における継続記録ができていなかった。このことにより、原価計算が棚卸計算で行われ、四半期ごとに製造ラインを止めて、棚卸を実施していた。
- (2) 各種の業務でExcelツールが利用されており、既存の基幹システムでカバーできていない業務領域の補填をしていた。

3.2 システム導入時の留意点

情報システムは、人が業務を遂行するための道具であり、情報システムの導入は目的ではない。そこで、以下を留意点とした。

- (1) 製造現場を共通基準で可視化するため、ロケーションにとらわれない情報基盤を構築し、複数の製造現場の情報を管理できるようにする。
- (2) 情報基盤が構築できても、そこに情報が入ってこなければ、ただの器にしかならない。自動収集できる情報だけでなく、人による登録に頼らざるを得ない情報が存在してい

る。情報登録が作業員(人)の負担になり、正確な記録ができない、または、運用ができない、などがないように、人の負担に配慮した仕組みを構築する。

(3) 蓄積された情報をユーザー(システム管理者以外)が活用できる仕組みを準備し、ユーザーが情報を分析することで、情報から次のアクションを考えられるようにする。

(4) 情報基盤を維持運営するためには、人的リソースが必要になる。限られたIT人材を有効活用するため、リモートでの導入、サポート、改修を可能にして、メンテナンス要員の集約・効率化する。

4. システム導入プロジェクトの実施

3章で述べた業務分析結果と留意点を基に、システム導入のプロジェクトに移行した。システム導入には、工場ユーザーとIT導入メンバーが協調しつつ、工場ユーザーが主体となってプロジェクトを遂行することが重要である。

4.1 プロジェクト実施時の留意点

製造業に従事すると、「我々は特殊だから」という言葉をよく耳にする。しかし、どこが特殊であるかを問うと明確な回答が出てこないことが多い。他の会社、他部署の業務の内容を理解できていないということもあるが、自分たちの業務を正しく可視化できていないことが原因であると考えた。このため、工場ユーザーとIT導入メンバーがプロジェクトに参画し、一緒に業務分析を行って可視化した。システム導入プロジェクトの場合、IT導入メンバーが主体となることが多いが、工場ユーザーを初期段階から参画させて、理解を深めることにより、システム稼働後の活用、さらには、システムを利用したユーザーが主体となってDXが推進される。

4.2 プロジェクトメンバーの合意形成

業務を可視化して、工場ユーザーとIT導入メンバーでコンセンサスを形成するため、業務フローを作成した。最初の業務フローは、IT導入メンバーがヒアリングを基に作成し、それをテンプレートとして、次に工場ユーザーが主体となって、それ以降の業務フローを作成した。作成された業務フローを工場ユーザーから、IT導入メンバーへ説明し、業務の流れと必要な情報に矛盾がないことを確認しながら、メンバー間の認識を共有した。

4.3 業務の標準化

製造拠点、製造ラインが異なる場合、業務が異なる場合でも、業務フローに落とし込むことで標準化できる部分が見えてくる。すべての業務を標準化することはできないが、共通する管理項目を他工場と合わせることで洗い出すことができる。工場のレイアウト、人員配置、作業区分などの違いによる個別の管理項目を明確にすることによって、共通する部分は、共通のIT基盤で管理し、共通化できない部分は、できる限り少なくし、工場固有の仕組みで対応するが、IT基盤から情報の統制をかけた。この作業により、副次的な効果として、複数拠点の工場ユーザー間で、コミュニケーションできる機会が増え、今までメール、電話のやり取りでは生

まれなかった信頼関係が構築され、より一層の情報の共有化がなされた。

4.4 業務負荷の考慮

管理項目をデジタル化して記録する際は、作業者の負荷を考慮する必要がある。作業フローの見直し、作業の流れの中で記録が取られることを確認し、記録するための手順が追加されても生産リードタイムに影響が出ないような仕組みとした。

蓄積された情報は、利活用されなければ、その価値が生まれない。ユーザーが利活用できるようにするため、将来的には、現場情報のデータレイク^{注1}(以下、仮称:フィールドデータレイク)を構築し、蓄積した情報を可視化/分析するためのツール(BIツールなど)へデータ連携することを構想している。生産現場では、検査画像情報、製造装置のログ情報など、構造化されていない関連情報が多々ある。一般的なデータレイクでは、これらの扱いが困難であることが想定でき、フィールドデータレイクの構想は、次のステップとして位置付けた。

4.5 クラウド利用と保守効率化

複数の工場の情報を一元管理し、運用保守作業を集約化する課題に対しては、クラウド上にシステムを配置し、業務の標準化の結果、複数工場共通する部分を一箇所でリモート管理することにより、保守要員の配置を効率化した。

5. 導入結果

IT基盤であるクラウドMESを当社グループ会社の製造拠点に、2021年5月に導入し、運用を開始した。約1年半が経過して、成果が見え始めている。

異なる評価基準で製造していた複数の製造拠点が、同じ評価基準(同じ価値観)で、共通の目標に対して評価が可能になり、今まで工場もしくは、担当者に閉じていた知見が、全工場の会議などで組織の知見となり、現場の改善意識が向上している。

システム移行は、ユーザーにとっては大きな変化となる。混乱なく移行するためにシステム切替の3カ月前に1カ月間の操作教育と並行運用を実施した。これにより、システム移行は大きな混乱なく予定通り完了している。システム切替えに伴う工場の稼働停止は、4月末から5月の連休期間中に実施することにより、実働2日間の停止であった。導入当初は、運用に慣れていないため、記録の漏れなどが発生したが、製造実績から登録漏れを検知する確認ツールを作成し、運用が安定化するまで、IT導入メンバーが登録漏れを確認するレポートを発行して、第一四半期(6月末)までに運用安定化を促進させた。

図4は、プロジェクト開始前に抽出された課題例に対する成果である。定量的に効果計測ができていないため、定性

的な表現にとどまっているが、作成した業務フローが適用され効果が確認できている。一例ではあるが、これまで製造計画立案者が現場を確認しなければ分からなかった情報を自席のPCで確認できるようになったことで、翌日以降の製造の段取り時間が30分~1時間短縮できている。

システム管理者は、リモートから複数の製造拠点を監視することが可能になり、本社からすべてのシステムを監視し、IT人材が効率的に活用することが可能になる。これによって、運用管理のための活動が減少し、今後は、新規案件の対応へシフトできる見込みである。

一方で新たな課題も確認できている。管理レベルの向上により、さらに細かい情報の記録を工場ユーザーから要求されている。また、営業部門との情報連携の強化などの要求も上がっている。これらは、機能改修が必要な項目のため、投資対効果を確認して、今後、実施判断を行う予定である。

成果

出入庫記録や作業実績時間記録を手作業で実施、作業工数低減と在庫管理精度向上を行いたい。	効果あり
生産停止を要する一斉調整を見直し、稼働の実施工数や生産停止による損出を抑えたい。	着手準備中
雇人化しているスケジューリング業務を、誰でも行える体制にしていきたい。	残課題
紙による作業日報やトレーサビリティを電子化し、追跡/新求の迅速化、転記作業を削減したい。	効果あり
生産進捗や不適合数をリアルタイムで可視化し、工程改善を推進したい。	効果あり

図4 azbilグループ会社における導入成果

6. 今後の取組み

IT基盤は構築でき、2章で記載した以下の課題は、解決できていると評価できる。今後、定量的な評価を実施していきたい。

- (1) 現場ごとに個別の情報システムを利用(個別最適)
- (2) 複数の情報システムの維持管理工数
しかし、カバーできている業務領域は、まだ限られている。生産DXを進めていくためには、必要十分なIT基盤とは言えず、今後、以下の内容を進めていく予定である。
- (3) 現状、想定できていない事業環境の変化に対応するためには、管理項目を変化させていく必要がある。その変化に追従できる仕組みを検討していく。
- (4) 新しいデバイスを採用して、情報入力を簡素化し、人の負荷を増やさずに蓄積できる情報を増やしていく。また、当社が得意とする制御システム、コントローラの情報を人が記録した情報と融合させて製造現場における統合情報へ発展させる(図5)。

- (5) 作業員、管理者、経営者では、情報に対する視点、粒度が違う。さらには、作業員においても、品質担当、設備担当、製造担当で違う。この違いに対応するために、情報のクレンジング、分類、階層化、など、情報解析のための前処理を行い、会社のデータレイクへ連携できるフィールドデータレイクへ成長させる。

(6) 現状では、蓄積された情報を簡単に活用できる分析ツールも準備できていないので、可視化ツール、分析ツールへ容易に情報を提供できる機能を追加することで、作業員が主体的に情報を使って、自らの業務を変革できる情報基盤を目指す。

(7) 今回、業務分析を行い、個別の部分とした内容は、Excelツールとして業務の中に残っており、工場ユーザーによるメンテナンス作業がある。残存している古いツールのIT基盤へ取込みを順次進めていく。

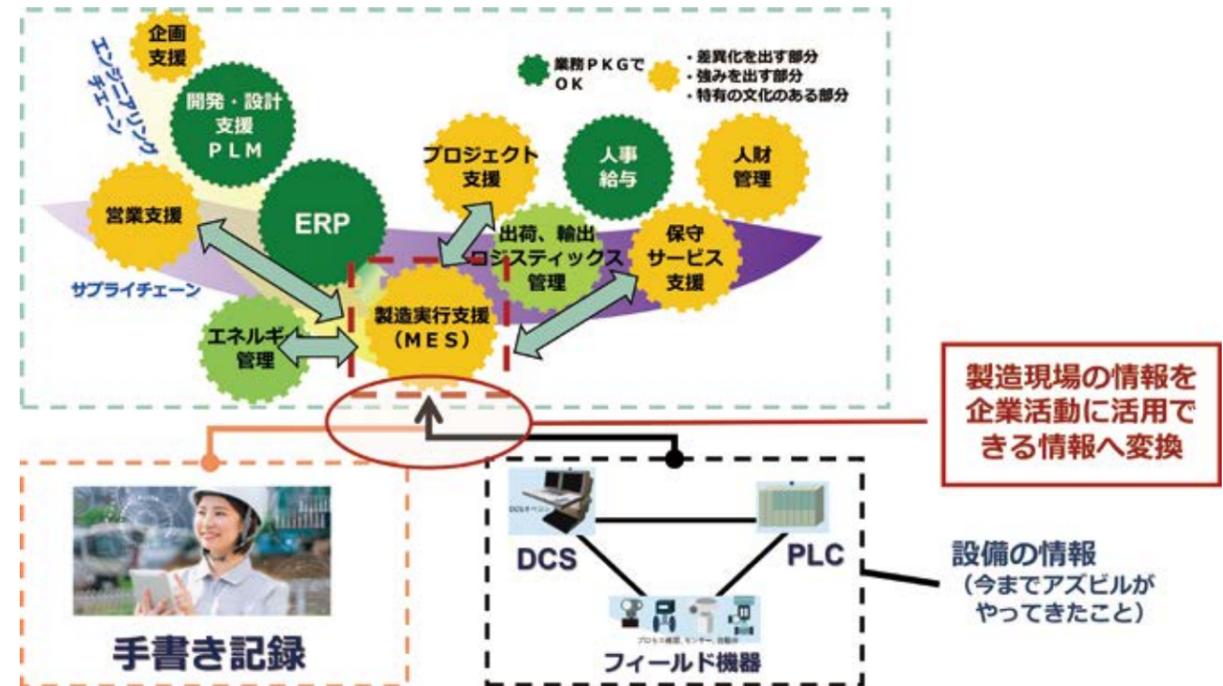


図5 クラウドMESの今後の拡張

7. おわりに

DXが謳われる昨今だが、ものづくりの現場は、いまだに人による作業が多く、製造業のDXは遅れていると言われていいる。経済産業省のDXレポート2では、DXを以下のように説明している。「DXは、デジタルイゼーション、デジタルライゼーション、デジタルトランスフォーメーションという3つの異なる段階に分解する。デジタルイゼーションは、アナログ・物理データの単純なデジタルデータ化のことであり、典型的には、紙文書の電子化である。デジタルライゼーションは個別業務・プロセスのデジタル化であり、さらに、デジタルトランスフォーメーションは全社的な業務・プロセスのデジタル化、および顧客起点の価値創造のために事業やビジネスモデルを変革することである」⁽²⁾。

今回の活動は、デジタルイゼーションからデジタルライゼーションの段階に該当していると考えている。今後、データ利活用、製造部門以外とのデータ連携に対する機能を拡張することによって、デジタルライゼーションからデジタルトランスフォーメーションへ進む価値提供を考えている。ものづくりの現場を情報で語る事ができれば、暗黙知として埋もれている知見が形式知となり、個人の知見を組織の知見へと昇華させることができる。クラウドMESは、その手段の1つであり、重要な位置づけにあると認識できた。製造部門で発生する様々な情報のHUBとして活用することで、さらに価値が高ま

ると考えられる。

また、DXは文化とも言われている。文化は、人がつくり出す考え方、価値基準の体系で、今回導入した当社グループ会社でも文化が変わっていると感じる。

まずは、azbilグループ生産拠点で実証し、同じ課題に直面している製造業のお客さまへアズビルの文化を提供できることを目指して活動していきたい。

<参考文献>

- (1) 経済産業省/一般財団法人エンジニアリング協会、国内工場におけるMES(製造実行システム)導入動向調査、2022年2月
- (2) 経済産業省/デジタルトランスフォーメーションの加速に向けた研究会、DXレポート2、2020年12月28日

<商標>

SAP S/4HANAは、SAP SEのドイツおよびその他の国における商標または登録商標です。Excelは、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標または商標です。

<著者所属>

玉置 順久 アズビル株式会社
IT開発本部開発2部

注1 データレイクとは、構造化データや、文書データ、画像ファイル、動画ファイル、装置の動作ログのような非構造化データなど、あらゆる情報を格納する領域で、アズビルでは、データ蓄積~利活用ができるまでの範囲としている。

Pharmanage™ V 顧客固有の業務プロセスのシステム化を容易にする医薬向けMESの開発

Considerations in the development of Pharmanage V, a MES for pharmaceuticals that facilitates systematization of the user's manufacturing processes

染谷 知則
Tomonori Someya

松井 夏美
Natsumi Matsui

小山 英聡
Hidefusa Koyama

キーワード
最適化, Pharmanage, MES, 医薬, GMP, 製造, カスタマイズ, 在庫管理

近年、新薬の開発が盛んに行われ、医薬品製造においては市場への速やかな安定供給に向け、業務プロセスに適合するMES (Manufacturing Execution System:製造実行システム)の導入が求められている。このため、顧客固有の業務プロセスに柔軟に適合するための仕組みを備え、システム導入を容易にした新たな医薬向けMESパッケージソフトウェアPharmanage Vを開発した。

In recent years the rapid pace of new drug development has spurred demand for a manufacturing execution system (MES) for pharmaceutical manufacturing that is adaptable to manufacturing processes in order to ensure prompt and stable supply to the market. Therefore, we have developed a new MES for pharmaceuticals, Pharmanage V, which has a mechanism for adapting flexibly to the user's manufacturing processes, facilitating systematization.

1. はじめに

Pharmanageはアズビルが提供している医薬向けMESパッケージソフトウェアである。

MESは、製造現場における様々な業務とリソースを人や製造機器と連携して管理・実行するシステムであり、品質や生産性の向上を目的に導入される。医薬向けMESは、一般的なMESの要件に加え、GMP (Good Manufacturing Practice:医薬品及び医薬部外品の製造管理及び品質管理の基準に関する省令)の順守を目的とし、誤作業防止や品質保証などの要件を満たした製造を実現する。

MESの導入では、医薬向けMESの要件を満たした上で、顧客固有の業務プロセスにシステムを適合することが求められる。

Pharmanageにおいて業務プロセスは、例えば造粒工程や打錠工程など一連の製造を表すシステムの管理単位である。業務プロセス単位で指示に基づいた製造が行われ、実績が記録される。

Pharmanage Vでは、使用する設備・機器・生産品目とその配合・作業手順などを定義することによって様々な業務プロセスを表現できる。これに加えて以下の特長を持たせることで、システムが顧客固有の業務プロセスに適合できるよう

にしている。

(1) 機能拡張・カスタマイズが容易に行えるシステム

システムがPharmanageの定義変更だけでは顧客固有の業務プロセスに適合できない場合、顧客の業務プロセスに対応したプログラムの変更が必要になる。この様な場合においても、品質・コスト・納期への影響が少なく、機能の拡張やカスタマイズが容易に行えるシステムとする。

(2) 業務プロセス構築・変更の作業性が高いシステム

システム導入後であっても、生産品目の追加や工程・設備の改善により、業務プロセスの追加や変更が発生する。この場合、製造業務を実施しながら製造計画に間に合うように定義の構築や変更を行わなければならない。このため、業務プロセスの構築や変更の作業性が高い(編集中でも定義の整合性が保持される)システムとする。

本稿では、これらの特長を実現するために構築した仕組みを説明する。

2. 開発方針

Pharmanage Vの特長を実現するための開発方針を記述する。

2.1 機能拡張・カスタマイズが容易に行えるシステム

機能の拡張やカスタマイズは、追加・変更対象となる箇所が明確で、変更量が少なく、影響範囲が狭いことにより容易となる。

このため、Pharmanage Vでは、業務プロセスを構成する個々の業務を部品として構築・組替えができる「業務実行フレームワーク」を開発した。さらに、業務に共通するリソース操作の機能を業務部品と分離した上で、その変更が各種業務部品に波及しないようにする「伝票モデルリソース管理」も開発した。

2.2 業務プロセス構築・変更の作業性が高いシステム

Pharmanageでは、マスターデータと呼ばれる業務定義によって業務プロセスの構築や変更を行う。

業務プロセスの構築や変更の作業性は、実施中の製造業務に影響を与えない変更作業や、特定の設備や業務とそれぞれに関連する各種マスターデータ式の並行した変更作業を実現することにより高めることができる。

このためPharmanage Vでは、変更用のマスターデータを複数管理し、実施中の製造業務に影響を与えないようにする「差分モデルマスターデータ管理」を開発した。

3. 業務実行フレームワーク

Pharmanage Vでは、人との主な連携手段としてブラウザで動作するインタラクティブなUI (User Interface)を使う。UIは図1に示すとおり、業務やリソースを表示・検索するための一覧表と選択行に関する各種業務のデータ入力・処理実行のための操作領域で構成される。

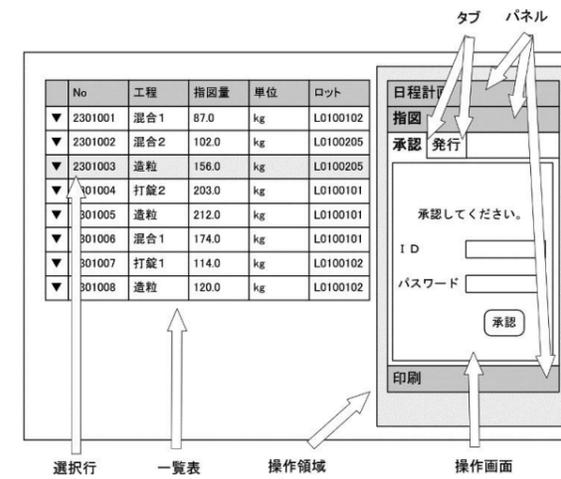


図1 画面構成

操作領域に表示される操作画面は業務の種類ごとに要件が異なり顧客ごとの違いも大きい。このため操作画面の実装は、開発方針に則り、機能拡張やカスタマイズが容易な形とする必要がある。

本開発では、操作画面を個々の業務と捉えて部品として構築するために、AO (Application Object) と名付けたフレームワークを開発した。AOは業務を表現する独立性の

高いオブジェクトの実行環境であり、業務の実装をオブジェクトの定義に集約することで独立性と拡張性を確保するフレームワークである。

3.1 言語の特長

AOは業務の実装 (操作画面など)をオブジェクトの定義に集約する。オブジェクトの定義はAO専用のオブジェクト指向言語で記述される。AO専用言語は課題解決のために変更容易性を高めるべく、以下の特長を持つ言語として開発した。

(1) 迅速な開発・修正

動的にロードされるスクリプト言語であり、コンパイルを必要としないため、開発・修正後すぐに確認することができる。

(2) 理解しやすい記述

オブジェクトの振る舞いは状態遷移モデルで定義するため、処理の抜け漏れに気が付きやすく処理の構造が理解しやすい(3.2.3参照)。

(3) リレーショナルデータベース(RDB)との親和性

図2に示すとおり、データソースとしてRDBのテーブルを定義することで、レコードの情報に基づいたオブジェクトを検索・生成できる。このオブジェクトは基になったレコードにデータを反映することもできる。

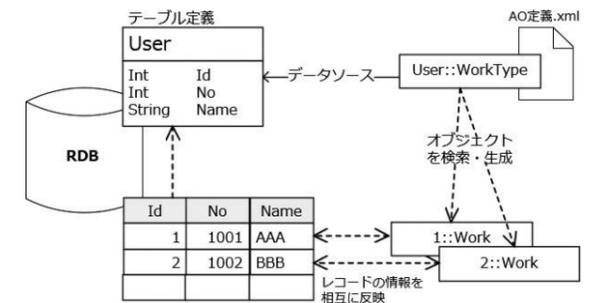


図2 RDBとオブジェクトの関係

(4) 言語自体の拡張性

オブジェクトの定義はAO専用言語によるオブジェクト指向における型 (AO型情報)の記述である。AO型情報は働きの異なる複数の種類の「データソース」や「属性」「振る舞い」によって構成される。これらの要素は図3に示すとおり、必要に応じて追加することができる構造となっており、要素を追加することで言語自体を拡張することができる。例えばRDBのほかにCSVファイルやAOのオブジェクトを対象とする「データソース」を拡張可能な構造によって実現している。

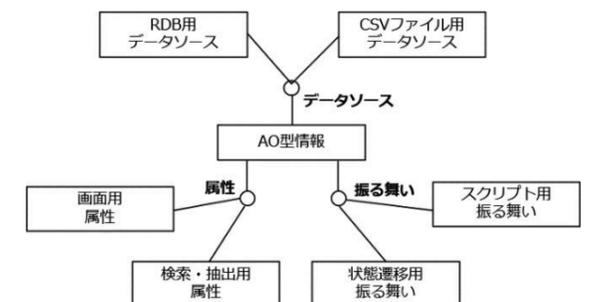


図3 拡張可能な構造

3.2 操作画面の実現

画面を実現する場合、一般に以下のような実装が必要となる。

- (1) フロントエンドの実装
(表示制御, 入力検証, イベント処理など)
- (2) インターフェースの実装
(通信オブジェクト・通信処理・APIなど)
- (3) バックエンドの実装
(トランザクション制御・RDBアクセスなど)

これに対して, AOにおける実装はオブジェクトの定義に集約されており, これらの実装は不要である。オブジェクトの定義はAOの仕組みの上で実体化され, クライアントではフロントエンドとして, サーバーではバックエンドとして動作することで操作画面を実現する。

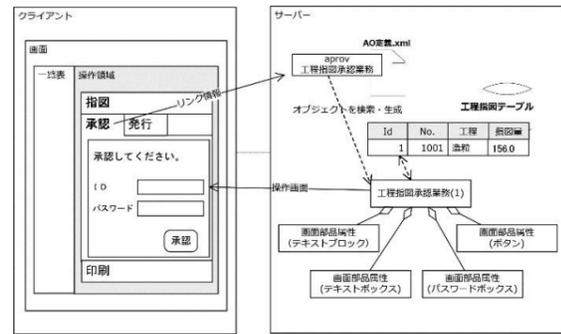


図5 操作画面の表示

3.2.3 イベント処理

操作画面でボタンを押すなどの確定操作を行うと, 処理が実行され, 結果が表示されるなど操作画面が変化する。この処理は図6に示すとおり, 以下のように実現している。

- (1) AOは入力されたデータや押されたボタンのイベント名を内包する操作画面用のオブジェクトをサーバーに送信する。
- (2) サーバー上では操作画面用のオブジェクトがイベントを受け取り, 状態遷移モデルに従って状態遷移とそれに伴う処理(Exit process・Entry process)を実行する。
- (3) 状態や処理が扱う入出力は属性であるため, 透過的にデータソースであるRDBへの読み書きも行われる。
- (4) 状態遷移が終わったオブジェクトはクライアントに返送される。返送された操作画面用のオブジェクトは画面部品の表示判定などが変化しているため, 表示される操作画面も変化する。

3.2.1 メニュー表示

一覧表で特定の行を選択すると, 選択行に関連する各種業務を操作するための操作メニューが操作領域に表示される。この処理は図4に示すとおり, 以下のように実現している。

- (1) AOは一覧表の種類と選択行を特定するキー情報からメニュー用のオブジェクトをサーバー上に生成する。
- (2) メニュー用のオブジェクトは属性として個々の操作画面のリンク情報を持っており(リンク属性), 業務名と業務用のオブジェクト定義名のほか, 業務の分類や操作権限などが定義されている。
- (3) 生成されたオブジェクトはクライアントに返送され, 属性の業務の分類と業務名を基にパネルとタブからなる操作メニューとして表示される。

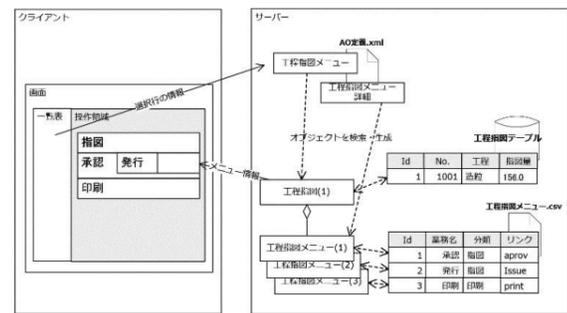


図4 メニューの表示

3.2.2 操作画面表示

操作メニューでタブを選択すると, 対応する業務の操作画面が表示される。この処理は図5に示すとおり, 以下のように実現している。

- (1) AOはタブに紐づいたオブジェクト定義名と選択行を特定するキー情報から操作画面用のオブジェクトをサーバー上に生成する。
- (2) 操作画面用のオブジェクトは属性として画面部品情報を持っており(画面部品属性), 画面部品の種類(テキストボックス・ドロップダウンリスト・ボタンなど)やレイアウト情報, 表示条件, 編集条件などが定義されている。
- (3) 生成されたオブジェクトはクライアントに返送され, レイアウト情報に従って画面部品が配置された操作画面としてタブの中に表示される。

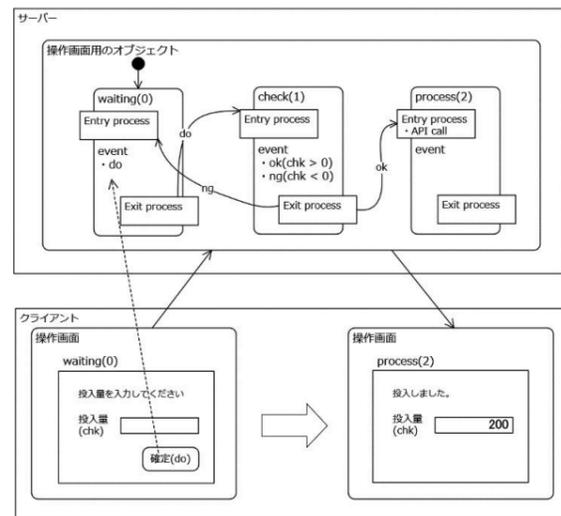


図6 状態遷移と画面の例

4. 伝票モデルリソース管理

Pharmanageは, 医薬品製造で使用する原材料・容器・装置・機器などのリソースを扱い, 品目・ロット・保管場所などの単位で管理される管理対象の現在の在庫量と, 検査結果や有効期限などの現在の状態を管理する。

Pharmanage Vにおけるリソース管理の開発では, 開発方針に則り以下の要件を定めた。

- (1) リソース操作の機能を業務部品と分離する。
 - (2) リソース操作時に管理単位ごとの集計を行わない(参照時に集計する)。
 - (3) データベースの構造を変えずに管理単位の追加や変更ができる。
- このため, リソース操作の機能を業務部品と分離し, 現在の在庫量ではなく受払量を伝票形式でモデル化した仕組みを開発した。

4.1 伝票モデル

現在の在庫量をデータベースに記録する方式(実体モデル)の場合, 図7に示すとおり, 同じ管理対象の操作は同じ場所に読み書きすることになる。

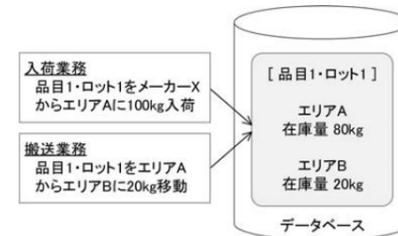


図7 実体モデルにおける現在データの記録

それに対して伝票モデルは, 図8に示すとおり, 発生した受払量をそのままデータベースに記録し, 現在の在庫量は集計により動的に作られる。このため, 在庫量を記録する場所が必要なく, 管理単位を追加・変更できる。

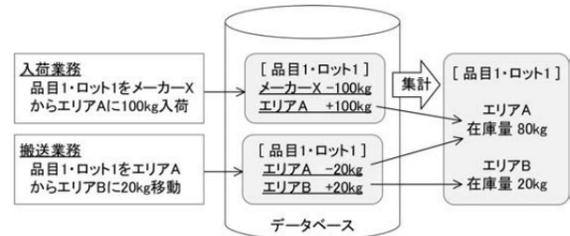


図8 伝票モデルにおける受払データの記録と集計

4.1.1 伝票モデルのデータ形式

伝票は 以下のように5W1Hのデータを保持している。

- (1) When:いつ … 操作日時, 計上日時
 - (2) Where:どこで … 操作端末, 計上エリア
 - (3) Who:だれが … 操作者, 計上者
 - (4) What:なにを … 受払データ(予定/実績)
 - (5) Why:なぜ … 指図キー, 操作理由
 - (6) How:どのように … 伝票種別, 計上種別
- なお, 「How:どのように」の処理ごとに部品(API)化し, 必要に応じて処理を追加できる仕組みにしている。

4.1.2 伝票モデルのデータ構造

伝票モデルのデータは, 図9に示すとおり, 5W1Hの中で「What:なにを」以外の基本データと, 複数の「What:なにを」を表現する受払データから構成される。ここでは伝票モデルの核となる受払データについて詳細を記述する。

個々の受払データは, 「なにを」「どこから」「どのくらい」移動するかを表すデータである。「なにを」は在庫の品目・ロット・現品などのキー項目, 「どこから」は様々なレベルの保管場所を表す複数の項目(以降, 管理項目), 「どのくらい」は受払量である。複数の管理項目にどの保管場所の組み合わせが記録されるかは, その組み合わせを分類する定義(以降, 管理区分)で決まる。

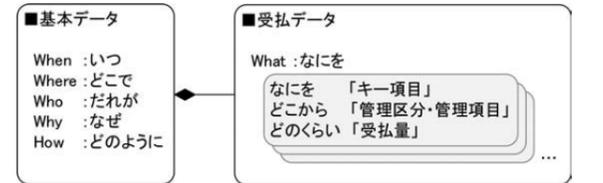


図9 基本データと受払データ

例えば, 以下の2つの伝票が発行されたとする。
 入荷: 品目1・ロット1の原料をメーカーXからエリアAに20kg在庫生成(入荷指図α)
 搬送: 入荷した原料をエリアAからエリアBに10kgエリア変更(搬送指図β)
 管理区分にERP(Enterprise Resource Planning)とエリアAを割り当てると, 受払データは表1のように記録される。

表1 受払データ/在庫生成とエリア変更

指図キー	伝票種別	予定/実績	受払種別	受払量	受払データ		
					在庫キー項目	管理区分	管理項目
入荷指図α	入荷	実績	払	-20k	品目1	ロット1	メーカーX
		実績	受	+20k	品目1	ロット1	エリアA
搬送指図β	搬送	実績	払	-10k	品目1	ロット1	エリアA
		実績	受	+10k	品目1	ロット1	エリアB

この受払データを管理項目で集計すると, 管理項目ごとの在庫量を集計することができる(この集計を在庫集計と呼ぶ)。表1の例では, 原料(品目1・ロット1)がエリアAに10kg, エリアBに10kg集計される。

また, 指図キーと伝票種別で集計すると, 指図ごとの実績量を集計することができる(この集計を指図集計と呼ぶ)。このように集計方法を変えると, 在庫と指図の両方の情報を得られる(なお, メーカーXの原料-20kgは, ERPでメーカーXに原料20kg計上したものと捉えることができる)。

4.1.3 伝票モデルの特長

伝票モデルは, 物品の入荷・出荷・生産・消費・移動のような物理的な操作を表現できるほか, 予定から実績への変更, 伝票の取り消しのような論理的な位置付けの変更も記録することができる。

ここでは, 論理的な位置付けの変更の1つである予定から実績への変更(以降, 実績振替)について記述する。

実績振替は, 予定を表す受払データを実績に変更する処理である。

例えば, 入荷指図αに対して以下の3つの伝票が発行され

たとする。

入荷予定:品目1・ロット1の原料をメーカーXからエリアAに20kg予定在庫生成
 計上振替:入荷予定の計上を予定から実績に振替
 在庫振替:入荷予定の在庫を予定から実績に振替
 管理区分にERPとエリアを割り当てると、受払データは表2のように記録される。

表2 受払データ/予定在庫生成と実績振替

基本データ		受払データ					
指図キー	伝票種別	予定/実績	受払種別	受払量	在庫キー項目	管理区分	管理項目
入荷指図 a	入荷予定	予定	払	-20k	品目1	ロット1	メーカーX
		実績	受	+20k	品目1	ロット1	エリアA
入荷指図 a	計上振替	予定	払	+20k	品目1	ロット1	メーカーX
		実績	受	-20k	品目1	ロット1	メーカーX
入荷指図 a	在庫振替	予定	払	-20k	品目1	ロット1	エリアA
		実績	受	+20k	品目1	ロット1	エリアA

計上振替は、入荷予定の払と同量の実績受と、払の打ち消し行を記録することで予定(払)を実績に振替えている。
 在庫振替は、入荷予定の受と同量の実績受と、受の打ち消し行を記録することで予定(受)を実績に振替えている。
 なお、計上振替で作られた実績は、ERP送信用のデータとして利用される。
 また、計上振替と在庫振替が分かれていることにより、それぞれ別のタイミングで実施することができる。

5. 差分モデルマスターデータ管理

Pharmanage Vにおけるマスターデータ管理の開発では、開発方針に則り以下の要件を定めた。

- 分岐やマージによって複数のマスターデータの変更差分を管理する。
- マスターデータの変更が製造に適用されるタイミングを制御できる。
- マスターデータの作成や検証を実システム以外で行える。

このため、マスターデータの差分を管理することによって、編集用のマスターデータを複数持ち、製造に適用されるタイミングを制御できる仕組み(マスターデータリビジョン管理)と、マスターデータの作成や検証のための別システムとの間で変更を共有するための仕組み(システム間同期)を開発した。

5.1 マスターデータリビジョン管理

図10に示すとおり、リビジョンとは、リビジョン番号で識別される、ある時点での全マスターデータのことであり、リビジョンは継承元になるマスターデータからの差分を管理しており、リビジョンの発行によって確定される。また、同じリビジョンを継承元として複数のリビジョンを作成し、分岐することもできる。

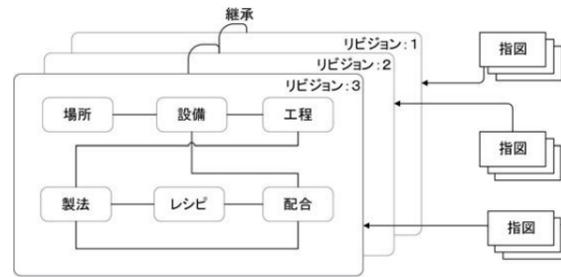


図10 リビジョン管理

5.1.1 リビジョンの作成

リビジョンは、特定のリビジョン(継承元)のコピーとして作成される。リビジョンは継承先を複数持つことができるため、リビジョン全体はツリー構造となる。
 マスターデータの追加・変更は、リビジョンが継承されている場合、ツリー構造をたどって未発行かつ未変更の継承先リビジョンのマスターデータにも反映される。

5.1.2 リビジョンの発行

リビジョンは開始日時を持つ。発行され、開始日時が過ぎると、図11に示すとおり、現行リビジョンとして製造に使用できるようになる。

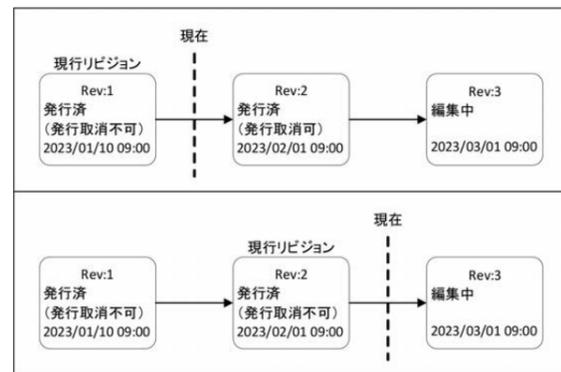


図11 リビジョンの発行と開始日時

さらに、リビジョンは図12に示すとおり、発行済と編集中のステータスをもつ。編集中の場合、マスターデータの追加・変更ができる。マスターデータの追加・変更が終了したら発行を行い、リビジョンのステータスを発行済にする。また現在日時が開始日時前ならば発行取消を行うことができる。

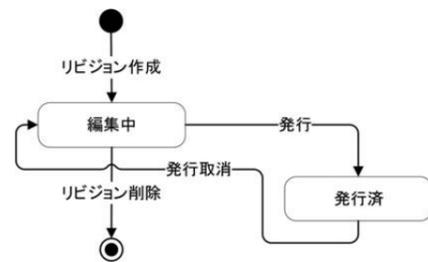


図12 ステータス遷移

製造指図を作成する際に使用されるリビジョンは、発行済かつ最も近い過去の開始日時のリビジョンである。以後、指図の記録と紐づくマスターデータは作成時のリビジョンで固定され、マスターデータの変更は指図の記録に影響を与えない。

5.2 システム間同期

Pharmanage Vは、図13に示すとおり、実システム以外にマスター検証用システムとマスター定義用システムを用意している。

これらは、マスター定義用システムでマスターデータを定義し、マスター検証用システムでマスターデータが正しく動作するかを検証後に実システムに取り込むことを想定している。これにより、マスターデータの間違った変更による実システムのトラブル発生(製造停止)を防ぐことができる。

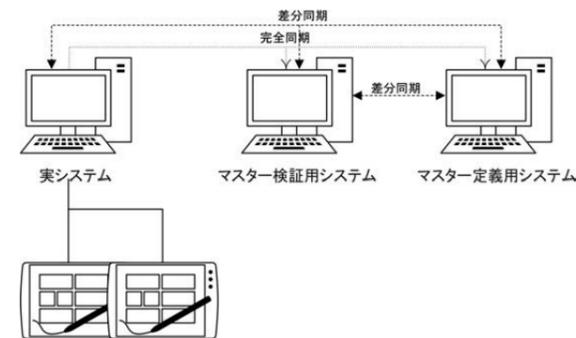


図13 システム構成

これらシステム間のマスターデータのやり取りには差分同期と完全同期がある。

5.2.1 差分同期

指定されたリビジョンが管理するマスターデータの変更差分を、ファイルを通じて、別システムの編集中のリビジョンに反映させる機能である。
 この機能により、同時に複数のリビジョンを検証し、任意のタイミングで実システムに取り込みマージすることができる。

5.2.2 完全同期

指定されたリビジョンのすべてのマスターデータを、ファイルを通じて、別システムの新しいリビジョンとして作成する機能である。
 完全同期で作成されたリビジョンは、継承元のリビジョンを持たないため、全データがこのリビジョンで作成されたデータとして扱われる。

6. おわりに

今回開発した、機能拡張やカスタマイズを容易にする仕組みと、システム上の業務プロセス構築や変更の作業性を高くする仕組みによって、顧客固有の業務プロセスを変更することなくPharmanage Vを導入することができる。

今後は、各種作業をタスクで表現したTo-Do管理ベースのインターフェースを追加することで、人・設備・指図それぞれの視点で作業負荷の見える化を進めたい。
 さらに、システムで蓄積されたデータをAIで活用し、製造実績の品質基準からの逸脱予兆検知や業務プロセスの改善提案を実現することで、医薬品製造の安定供給における課題解決に貢献していきたい。

<商標>

Pharmanageはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- 染谷 知則 アズビル株式会社
アドバンスドオートメーションカンパニー IAS開発部
- 松井 夏美 アズビル株式会社
アドバンスドオートメーションカンパニー IAS開発部
- 小山 英聡 アズビル株式会社
アドバンスドオートメーションカンパニー IAS開発部

マルチエリア対応ユーザーミナル(QJ-1201)

savic-net™ G5システムに接続可能な最大8エリア対応の表示設定器

Model QJ-1201 multi-area user terminal: Display and configuration of up to 8 areas in the savic-net G5 BMS

戸崎 裕太
Yuta Tozaki

小野寺 淳也
Junya Onodera

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、1993年から最大4エリア対応のユーザーミナルであるネオターミナル™(QY7209)を販売しているが、今回大幅にリニューアルを行った。本稿では、最新のオフィスやホテル空間に調和するデザインに刷新し、最大8エリア対応となったマルチエリア対応ユーザーミナル(QJ-1201)について紹介する。

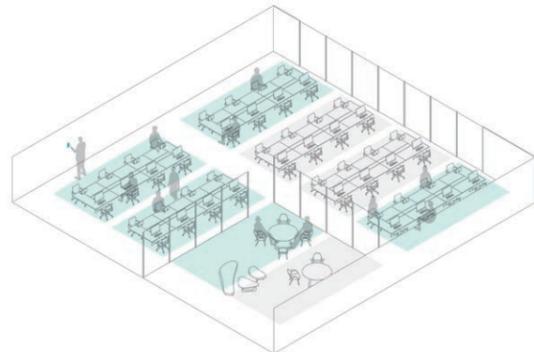


図1 一つの部屋を8エリアに分割した例

2. 製品概要

マルチエリア対応ユーザーミナルは、最大8エリアの空調機器や照明の状態表示ならびに発停、設定値変更をするための操作端末である。さらに、複数エリアの同時発停操作や中央監視装置で設定されている空調機の発停スケジュールの延長・予約操作が可能になっている。

2.1 デザイン

マルチエリア対応ユーザーミナルの開発にあたり、最新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イメージとの調和を目指し、空間へ静かに馴染むことをデザインのコンセプトとした。

操作方式としては、静電容量方式のタッチキーを採用することで画面やキーに凹凸のないフラットな表面を実現した。また、全体の色使いによって存在感を強調することなくスッキリとしてシンプルな印象を与えるデザインに仕上がっている。さらに、従来よりも小型にすることで、空間に調和する製品となった。



マルチエリア対応ユーザーミナル
HxWxD: 120mm×70mm×15mm

ネオターミナル
HxWxD: 120mm×120mm×15mm

図2 製品の外観比較

2.2 機能

マルチエリア対応ユーザーミナルの主要な機能を表1に示す。

機能	マルチエリア対応ユーザーミナル	ネオターミナル
操作エリア数	最大8エリア	最大4エリア
発停操作	○	○
温度設定・表示	○	○
湿度設定・表示	○	○
CO ₂ 濃度設定・表示	○	×
延長操作	○	○
予約操作	○	×
日英表記	○(切替可)	×

2.2.1 操作エリア数の拡大

マルチエリア対応ユーザーミナルでは、操作エリアを最大8エリアに拡大したことで、より多くの設定器を1台に集約でき、壁面をシンプルにできる。



図3 複数の設定器を1台に集約

2.2.2 予約・延長操作

中央監視装置で設定されたスケジュールを変更することができる機能である。マルチエリア対応ユーザーミナルでは、当日延長運転操作に加えて7日間の空調機器の予約操作が可能となったことでフレキシブルな働き方に対応できる。

2.2.3 CO₂濃度設定・表示機能

マルチエリア対応ユーザーミナルで追加されたCO₂濃度表示機能により、室内が適切な換気状態にあることを確認できる。また、ユーザーが設定値を変更することにより、ユーザーの要求に合わせた換気制御が可能となった。

2.3 ユーザビリティ

使用シーンに合わせた表示と画面遷移により、ユーザーが必要とする要素をシンプルかつ明快に示すことで、視覚的な分かりやすさと直感的な操作を目指した。また、複数エリアを対象とする端末として全エリア状態の一覧表示画面や一括操作画面、使用エリア数に応じた表示画面(1, 4, 8エリア)も用意し、使いやすさに繋げている。

また配色やアイコン、文字等のビジュアル要素については、空間へ静かに馴染むというデザインコンセプトを実現するユーザーインターフェースデザインとした。

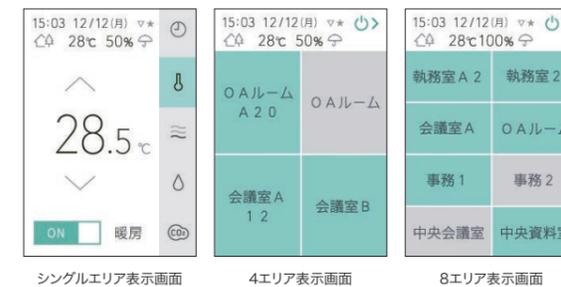


図4 使用エリア数に応じたホーム画面

3. おわりに

今回開発したマルチエリア対応ユーザーミナルについて、従来製品から拡張した機能・デザインを中心に紹介した。今後の表示設定器の製品開発においては、さらなるユーザービリティの向上を追求していく所存である。

<商標>

savic, savic-net, ネオターミナルはアズビル株式会社の商標です。
BACnetは、ASHRAEの商標です。

<著者所属>

戸崎 裕太 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
小野寺 淳也 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



azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2023年4月発行号

発行日 2023年4月1日(通巻64号)
発行責任者 高橋美加子(アズビル株式会社 コミュニケーション部広報グループ)
編集委員会 委員長：鹿島亨
委員：大澤義孝、百瀬修、衣笠静一郎、北條達也、山田功、
久保田耕、小島宗隆
事務局：筒井宏明、菅野裕子
発行所 アズビル株式会社 コミュニケーション部広報グループ
〒100-6419 東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル
TEL.03-6810-1006

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

©2023 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。