

azbil

azbil Technical Review

Technical Review

2015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： azbilグループが提供する産業システムの安全

azbil

アズビル株式会社

2012年4月1日、株式会社 山武はアズビル株式会社へ社名を変更しました。

〒100-6419

東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル

<http://www.azbil.com/jp/>



azbilグループは環境に配慮した取組みを推進しています。

PR-1106J(1504-5K-TS)

2015年4月発行号

$\vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA}$

azbil Technical Reviewは、azbilグループの技術を広くご理解いただくために、毎年発行するazbilグループの技術研究報告書です。

表紙について



イカからロケットへの道のり

イカが海中をすばやく遊泳する様子は、射込まれた矢のように鋭い迫力を感じさせてくれます。イカは筒状になった胴体と頭部・内臓を覆う二重の外殻膜(軟体動物の体を覆う体壁)に、外套腔と呼ばれる隙間を持っています。この外套腔を広げて体外から海水を取り込んで、弁(バルブ)により体外との隙間を閉じ、同時に腔を圧縮して水圧を高めます。そして、細い噴射管(ノズル)から勢いよく海水を放出し、その反動によりハイスピードで泳ぐことができるのです。また、海中を泳ぐだけでなく、その推進力を使った水面上の飛行行動も確認されています。

水を吸い込み、それを推進力として吐き出すことで、飛ぶように海中を疾駆するイカの移動原理は、ニュートンが解明した「作用・反作用の法則」そのものです。「作用・反作用の法則」とは「一つの物体が、第二の物体に力を及ぼすと、必ずこの第二の物体は大きさが等しく反対向きの力を第一の物体に及ぼす」というもの。つまりイカが噴出する水とは反対向きの力が、イカを鋭く前進させるわけです。

イカにすばやい遊泳力をもたらす「作用・反作用の法則」は、現在の最先端科学技術であるロケット打ち上げの原理でもあります。ロケットは打ち上げ時に高温・高圧のガスを爆発的な勢いで噴射します。その「作用」に対する「反作用」…反動がロケットに反対向きの力を加えます。このようにして、ロケットにはとてつもなくパワフルな推進力が与えられ、宇宙空間に向けた打ち上げが成功するのです。そう言えば、イカが海中を飛泳する姿は、どこことなくロケットを連想させるものがあります。

Contents

巻頭言：産業システムが提供する安全と安心 1

電気通信大学情報理工学研究科 教授
技術研究組合制御システムセキュリティセンター 理事長 新 誠一

特集に寄せて：azbilグループが提供する産業システムの安全 2

アズビル株式会社 取締役 執行役員常務
アドバンスオートメーションカンパニー社長 岩崎 雅人

特集論文

進化 状態基準保全を支援する調節弁診断アプリケーションの開発 3

アズビル株式会社 技術開発本部 飯田 洋介 大塚 賢司
佐藤 洋平 尾形 知美
アズビル株式会社 サービス本部 山崎 史明

進化 燃焼安全ソリューションを支えるソフトウェア安全設計 11

アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー 山田 晃 中田 知也

進化 機械アプリに合わせた安全機器の展開 17

アズビルトレーディング株式会社 大竹 桂司

進化 ICSのサイバーセキュリティへの取組み 今、生産制御システム(ICS)が狙われている! 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 木内 誠 田中 良則
関 英信 黒木 亮
アズビル株式会社 技術開発本部 小森谷 良明

進化 制御システムに侵入したマルウェアの活動を検出する技術の開発 33

アズビル セキュリティフ라이デー株式会社 有元 伯治 佐内 大司

自在 風量・室圧制御用ベンチュリーバルブによる安全性と長寿命化を両立させた室圧補正制御技術の開発 39

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 大村 林太郎 大沢 信雄

自在 水中細菌のリアルタイム検出技術の開発 45

アズビル株式会社 技術開発本部 小原 太輔 古谷 雅
増本 新吾 松浦 友朋
地下 久哉 細居 智樹

一般論文

自在 静音性・メンテナンス性に優れた新型高圧ガバナの開発 51

アズビル金門株式会社 山本 健一郎 齋藤 英明

自在 湿度センサの耐環境性能向上技術の開発 57

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 杉山 正洋

自在 クランプオン超音波気体流量計の開発 63

アズビル株式会社 技術開発本部 佐々木 宏 林 智仁

5つの戦略技術領域

azbilグループは事業を取巻く環境変化に対応し普遍的な価値を提供すべく、5つの戦略技術領域を定め研究・開発を進めています。

融合 = 人間・機械融合システム技術

調和 = 環境調和計測制御技術

自在 = 自在計測制御技術

快適 = 快適空間計測制御技術

進化 = わかる化プロセス情報技術

Preface: Industrial Systems That Provide Safety and Peace of Mind 1

Professor, Graduated School of Informatics and Engineering,
the University of Electro-Communications
President, Control System Security Center

Seiichi Shin

Introduction to the Special Issue: Safety Solutions for Industrial Systems Provided by The Azbil Group 2

Executive Director, Managing Executive Officer
President of Advanced Automation Company, Azbil Corporation

Masato Iwasaki

Articles on Special Issue

Evolution through IT Diagnostic Software Supporting Condition-Based Maintenance of Control Valves 3

Technology Development Headquarters, Azbil Corporation

Yousuke Iida Kenji Otsuka
Youhei Satou Tomomi Ogata

Service Headquarters, Azbil Corporation

Fumiaki Yamasaki

Evolution through IT Software Safety Design to Support Combustion Safety Solutions 11

Advanced Automation Company, Azbil Corporation

Akira Yamada Tomoya Nakata

Evolution through IT Selecting Appropriate Safety Equipment for Machinery 17

Azbil Trading Co., Ltd.

Keiji Otake

Evolution through IT Cybersecurity for Our Industrial Control System, Which is Now a Target for Attack 25

Advanced Automation Company, Azbil Corporation

Makoto Kiuchi Yoshinori Tanaka
Hidenobu Seki Ryo Kuroki

Technology Development Headquarters, Azbil Corporation

Yoshiaki Komoriya

Evolution through IT A Technique for Detecting Malware Activity in Industrial Control Systems 33

Azbil SecurityFriday Co., Ltd.

Michiharu Arimoto Daiji Sanai

Freedom of Time and Place A Technique for Use with Venturi Valve Control of Airflow Volume and Room Pressure That Provides Both Long Equipment Life and Safety at Research Facilities and Hospitals 39

Building Systems Company, Azbil Corporation

Rintaro Omura Nobuo Osawa

Freedom of Time and Place Technology for Real-Time Detection of Microbes in Water 45

Technology Development Headquarters, Azbil Corporation

Daisuke Obara Masashi Furuya
Shingo Masumoto Yuho Matsuura
Hisaya Jige Tomoki Hosoi

Articles on Other Subjects

Freedom of Time and Place A New Type of High-Pressure Gas Regulator with Low Noise and Good Maintainability 51

Azbil Kimmon Co., Ltd.

Kenichiro Yamamoto Hideaki Saito

Freedom of Time and Place Technology for Improvement of Humidity Sensor Durability 57

Building Systems Company, Azbil Corporation

Masahiro Sugiyama

Freedom of Time and Place Development of a Clamp-on Ultrasonic Flowmeter for Gas 63

Technology Development Headquarters, Azbil Corporation

Hiroshi Sasaki Tomohito Hayashi

Five Strategic Technology Areas

In response to changes in the business environment, the azbil Group will focus its research and development on five strategic technology areas that have been identified as having the potential for far-reaching value.

Biomimetic Production = Machine Systems with Humanlike Abilities

Harmony with the Environment = Systems Enabling Us to Live in Harmony with Nature

Freedom of Time and Place = Flexible Measurement and Control

High-Quality Living Space = Individualized Environmental Comfort Systems

Evolution through IT = Advanced Technology that Clarifies Complex Systems

巻頭言

産業システムが提供する安全と安心



電気通信大学
情報理工学研究所
教授
技術研究組合
制御システムセキュリティセンター
理事長

新 誠一

安全と安心は現在の大きなキーワードである。そして、安全は客観、安心は主観である。もちろん、安全が確保された上での安心である。

産業システムは世界に安全と安心を提供してきた。中でも内閣サイバーセキュリティセンターが定義している電力、ガス、石油化学などの重要インフラは国民の命を支えている。これらライフラインの重要性が恒常化している災害が起こるたびに声高に唱えられている。しかし、平常時には重要性が忘れられている。残念なことである。

産業システムではリスク解析の結果に基づいて被害を最小化するために安全計装という概念が確立されている。そして、この概念に基づいた機器の設置やアラーム（警報）管理がなされている。頼れる縁の下の方力持ちである。

もっとも、21世紀、インターネットの時代。サイバー攻撃という新しい脅威にも配慮する必要がでてきた。サイバーセキュリティが担保された上での安全、安心である。2010年のイランのウラン濃縮工場へのサイバー攻撃、2011年の東日本大震災を受けて、2102年3月に制御システムセキュリティセンター（CSSC）という経済産業省の枠組みの技術研究組合を設立した。アズビル株式会社も創設メンバーとして、防御技術の開発、重要インフラ関連のサイバー防御教育に力を尽くして頂いている。

2014年4月からは、EDSA（Embedded Device Secure Assessment）認証という国際標準IEC62443に基づいた新たな事業をCSSCは開始した。通信ポートへのサイバー攻撃、出来上がったソフトウェアのセキュリティ解析、そしてソフトウェアの開発環境までも含める本格的な認証である。この認証を受けることで、産業システムに使われている制御機器が一定レベルの堅牢性を保持していることを客観的に保証するものである。認定を受けた機器を重要インフラに用いることで、安全と安心を国内だけでなく世界中に提供してもらいたいと思っている。

もっとも、産業システム全体の安全性はデバイスだけでは保証できない。デバイスを繋げて出来上がったシステムのレベル、そしてそれを運用するマネージメントレベルの認証も必要である。IEC62243もデバイスレベルと合わせて三層のレベルのセキュリティ基準で構成されている。

マネージメントレベルの認証は日本情報経済社会推進協会がCSMS（Cyber Security Management System）認証を進めている。システムレベルについては、SSA（System Secure Assessment）認証という形でCSSCが計画 중이다。

CSMSは世界で日本だけ、EDSAはCSSC以外では米国だけ、SSAは日本のみ計画中ということで、日本が突出した対策を進めている。そのため世界中が注目している。米国、欧州、中東、アジアの各国からの見学者がCSSCへ来訪している。もちろん、IEC内でも注目されている。

考えてみればわが国ほど安全安心な所は少ない。この安全安心を世界に広げていきたい。もっとも、国内では安全安心の価値とそれを支える技術者の評価が十分ではないように思える。複雑化した産業システムを分かりやすく紹介していく活動が必須である。このような観点から、セキュリティ面も含めた産業システムの高度化と並行して産業システムの見える化や社会における重要性の啓蒙を行ってきたい。アズビルの皆様、本誌の読者の皆様からもご支援をお願いしたい。

著者紹介：

1980年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年、同大学工学部計数工学科助手。1987年工学博士（東京大学）。同大学講師を経て、1988年筑波大学電子・情報工学系助教授。1992年東京大学工学部助教授。2001年同大学情報理工学系研究科助教授。2006年電気通信大学教授。計測自動制御学会論文賞竹田賞、技術賞、電気学会優秀技術活動賞技術報告賞、情報セキュリティ大学院大学情報セキュリティ文化賞など受賞。制御理論を中心に広く工学全体に興味を持つ。計測自動制御学会フェロー、前会長。（財）製造科学技術センター評議員、日本能率協会 GOOD FACTORY 賞審査委員長、技術研究組合制御システムセキュリティセンター理事長。

著書：

図解カーエレクトロニクス最前線、工業調査会、(2006)
無責任体制の終焉—さらば文系、さらば理系—、名著出版(1997)
たまごっち学術考—イラストで語る商品開発、オーム社(1997)
ハロー！PHS—マンガとイラストで語るマルチメディア革命、オーム社(1995)

状態基準保全を支援する 調節弁診断アプリケーションの開発

Diagnostic Software Supporting Condition-Based Maintenance of Control Valves

アズビル株式会社 技術開発本部	飯田 洋介 Yousuke Iida	アズビル株式会社 技術開発本部	大塚 賢司 Kenji Otsuka
アズビル株式会社 技術開発本部	佐藤 洋平 Youhei Satou	アズビル株式会社 技術開発本部	尾形 知美 Tomomi Ogata
アズビル株式会社 サービス本部	山崎 史明 Fumiaki Yamasaki		

キーワード
調節弁, メンテナンス, 診断, 状態基準保全

プラントの安定操業を図るうえで重要な保全対象である調節弁のメンテナンスを支援するPLUG-IN Valstaffを開発した。PLUG-IN Valstaffは、当社のスマート・バルブ・ポジションの新機種700シリーズの診断機能を活用して、劣化や異常の兆候を早期に発見することが可能である。また、当社が提供するバルブ診断解析サービスにより、メンテナンスタイミングの適正化とともに期間・コストを効果的に削減することができる。

To improve the stability of plant operation we developed PLUG-IN Valstaff, an application supporting the maintenance of control valves, which occupy an important place in plant maintenance operations. PLUG-IN Valstaff makes use of the diagnostic functions of Azbil's new Smart Valve Positioner 700 series, enabling the advance detection of the symptoms of deterioration or abnormality. In addition, an analysis service for diagnostic data allows users to plan an appropriate maintenance schedule and effectively reduce maintenance costs and maintenance time.

1. はじめに

調節弁はプロセス流体を直接制御することから、異常が起きた場合の操業に対する影響が非常に大きい。そのため、プラントの安定操業を図るうえで、調節弁は重要な保全対象の一つである。その一方で、グローバル競争や業界再編などの経済状況の変化により、設備に対する保全コストの削減要求も強く、プラントの保全部門では、メンテナンス効率の向上が求められている。

一般に設備の故障率はバスタブ曲線と呼ばれる経時変化を示すといわれており、故障は、「初期故障期」、「偶発故障期」、時間の経過とともに故障率が増加していく「劣化故障期」に分類される⁽¹⁾。調節弁のメンテナンスにおい

ては、劣化故障を予防するために、稼働時間に基づいて定期的にメンテナンスを行う時間基準保全(Time Based Maintenance)を適用することが一般的であるが、故障率を下げるために保全周期を短くすると、保全コストやメンテナンス直後の故障のリスクが高まるという課題が存在する。

このような時間基準保全の課題を解決するために、機器の状態をモニタリングして異常の兆候を発見し、計画的に処置するという状態基準保全(Condition Based Maintenance)の適用が求められる。状態基準保全は、設備が安定してその性能を発揮している間は不要なメンテナンスを実施しないため、メンテナンスタイミングの適正化と設備の信頼性の両立が図れるとともに、保全コストの削減に寄与できる。

特集に寄せて

azbil グループが提供する産業システムの安全

アズビル株式会社
取締役 執行役員常務
アドバンスオートメーションカンパニー社長
岩崎 雅人

2013年よりazbilグループの新中期経営計画がスタートし、2016年の最終年まで残すところ2年となりました。当計画での成長領域の定義は以下の通りです。

【3つの成長事業領域】

1. 生産および執務居住空間での次世代ソリューション
2. エネルギーマネジメントソリューション
3. 安全・安心ソリューション

今回の特集は、安全・安心ソリューションを取り上げました。ここでは、産業システムという広い概念の中で、azbilグループの工業向けソリューションについて概要を紹介します。

(1) プロセスオートメーション分野

高温高压流体を原材料とし、複雑なプラント装置の24時間連続運転を基本とするプラント操業では、安全操業こそ絶対の価値です。

ここでは、二つの視点があります。
(A)プラント運転状態が、非安定に移行していることを未然に察知して、安定状態を継続するために、オペレーション操作する。

(B)プラント操業の限界を見極め、安全に停止する。
(A)については、日常巡回点検を含めた保全作業、運転状態を常時監視し定常状態との差異を発見する予防保全オペレーションが該当します。azbilグループでは、これを可能にするリモートメンテナンスを含めた日常保全活動、オペレーション操作を支援する各種支援ソリューションソフトウェアの開発をお客さまとの協働で実施しています。

(B)については、地震計と安全計装を組み合わせたソリューションを提供し、お客さまの震災対応からBCPまでを広くカバーするために協働しています。

(2) 炉の燃焼安全計装分野

ガスを燃料とする工業炉での安全を担保するためには、燃焼の不具合が引き起こす可能性のある不完全燃焼などの環境影響を含め、安全設計の重要性は極めて大きいものがあります。ISO規格にもこの燃焼安全に関する、安

全性を重視した施策がうたわれています。azbilグループでは、長年経験してきた現場での課題解決のため、燃焼安全計装という分野の国内第一人者として、火災監視からインターロック、緊急遮断弁を含む計装装置をトータルで提供しています。

(3) 機械安全分野

プラントや工場では、危険場所(ハザード)が定義され、特に機械や設備への人のアクセスに関しては、十分な注意を払わなければなりません。azbilグループは日本電気制御機器工業会(NECA)のメンバーとして、機械安全に対するキースイッチ、センサなどのデバイスの提供にとどまらず、セーフティアセッサ資格制度を奨励し、グループ会社も含めた安全人材教育に力を入れています。

(4) 新たな脅威への対応

今号の巻頭言で電機通信大学の教授が指摘しているように、安全を脅かす新たな脅威として、ネットワーク社会における産業システムへのサイバー攻撃があります。azbilグループは、技術研究組合制御システムセキュリティセンター(CSSC)の活動に理事会社として参画し、2014年にはazbil製のDCSコントローラが、CSSCにてEDSA認証*を取得しました。加えて、当グループには、ソフトウェアのウイルスに関する研究開発・商品販売を実施するアズビル セキュリティファイダーがあり、マルウェアの検出ソフト技術で、お客さまのネットワークの安全に貢献しています。

今回の特集に関して、簡単にazbilグループの取り組みを紹介しました。

「人を中心としたオートメーションで、人々の安心、快適、達成感を実現するとともに、地球環境に貢献します」という企業理念の下、産業システムの安全において技術をさらに進化させることでお客さまに価値を提供し続けてまいります。

*制御機器のセキュリティ保証に関する認証制度

そこで当社では、調節弁の診断機能を備えたスマート・バルブ・ポジションナ300/700シリーズを開発し、さらにその診断機能を活用した状態基準保全を支援するためのメンテナンスサポートシステムPLUG-IN Valstaffを開発している。PLUG-IN Valstaffは、プラント稼働中に収集した履歴データに基づく長期的な劣化診断を支援する機能や、プラント停止時のメンテナンス（以降、定修と略す）後の初期故障の予防に寄与する調整・テスト機能を備えている。本稿では、プラントの定修時および稼働中において状態基準保全を支援する機能について述べる。また、PLUG-IN Valstaffで収集したデータに基づいて提供する当社のバルブ診断解析サービスについても説明する。

2. スマート・バルブ・ポジションナ 300/700 シリーズの調節弁診断機能

当社のスマート・バルブ・ポジションナは調節弁の状態を監視し、異常や不安定動作の傾向を早期につかむための調節弁診断機能を備えている。そのため保全員はメンテナンスの最適なタイミングの判断が容易になる。

300シリーズでは開度データから調節弁の異常や劣化の傾向を把握するための診断指標を算出し、診断指標がしきい値を超えた際にアラームを発生させて異常の早期検出を支援している⁽²⁾。

一方700シリーズでは、診断機能を強化するために新たに圧力センサを搭載し、供給空気圧力、ノズル背圧、ポジションナ出力空気圧力を監視し、これらを活用した締切り異常、操作器異常、摩擦異常などの新たな診断機能が追加されている⁽³⁾。

3. PLUG-IN Valstaff 開発の背景

3.1 機器管理システムによるフィールド機器の監視

プラントの規模が大きくなるにしたがい、フィールド機器数増加や設置範囲の拡大により、個別にフィールド機器を管理することが現実的ではなくなってくる。近年、HARTやFOUNDATION Fieldbusといった通信プロトコルを使用したフィールド機器とのデジタル通信が可能になり、それらをホストコンピュータ上で一元的に管理する機器管理システムが普及しつつある。機器管理システムは、プラントに接続されたフィールド機器の状態を常時監視しており、異常が発生した場合は保全員に通知することができる。また、フィールド機器が持つパラメーターにアクセス可能であり、保全員はフィールド機器の内部状態や設定値を確認・変更することができる。

3.2 PLUG-IN Valstaffによる状態診断

フィールド機器は、ハードウェアの制約から長期間にわたるデータの蓄積や外部データを利用した演算処理に向いておらず、高度な診断を機器自身で行うことが難しい。一方、機器管理システムはデータ蓄積や演算には向いているが、多種多様なフィールド機器を対象としているため、特定の機器固有の診断機能を機器管理システム本体でサポー

トするのは容易ではない。

このような背景から、PLUG-IN Valstaffは、プラントの安定操業において重要な要素である調節弁の保全を支援するために、当社製のスマート・バルブ・ポジションナのもつ調節弁診断機能を最大限に活用するためのアプリケーションとして開発された。PLUG-IN Valstaffは、機器管理システムの機能を拡張するプラグインソフトウェアであり、当社製デバイス・マネジメント・システムInnovativeField Organizer™または横河電機株式会社製 統合機器管理パッケージPRM (Plant Resource Manager) 上で動作する。

4. 状態基準保全支援機能

PLUG-IN Valstaffは、当社のスマート・バルブ・ポジションナの診断機能を活かした、オンライン診断とオフライン診断を提供している。

オンライン診断は、プラント稼働中の調節弁動作から算出された診断指標値を収集し、経時的な劣化傾向を確認する機能である。一方、オフライン診断は、プラント停止中に開度範囲を限定せずに調節弁の動作テストを行い、潜在的な不良を検出する機能である。

本章では、これらの診断機能の活用方法を、定修時(定修前の計画も含む)とプラント稼働中という、典型的な利用場面に分けて説明する。

4.1 定修時における診断結果の活用

本節では、プラントの定修時に、調節弁の状態に基づいて保全計画を策定するために診断機能を活用する方法について説明する。メンテナンスすべき調節弁、特に開放点検を実施する調節弁を選定することは非常に重要であり、PLUG-IN Valstaffを活用することで裏付けとなる診断データをもとに優先順位付け、選定を行うことができる。また、オンライン診断のデータを定修に先立って分析することにより、メンテナンス作業の事前準備(スケジュール策定・資材の調達)を実施でき、定修期間の短縮や確度の高いメンテナンスコストの算定が可能となる。

4.1.1 オンライン診断に基づく調節弁の選定

ここでは、オンライン診断データを調節弁保全に利用する方法について述べる。

調節弁の優先順位付けのために、すべての調節弁についてオンライン診断の指標値やアラーム回数の一覧レポートを出力する(4.2.3参照)。調節弁をオンライン診断の指標値の大きさやアラーム回数に基づいて順位付けすることで、指標値に対応した故障リスクの高い調節弁を選定することができる。以下に、三つの視点と着目すべき診断指標、推定される異常について述べる。

a. 摺動距離

摺動距離積算や反転動作回数が多い調節弁は摺動部の部品が長い距離を動き、より多くの負荷にさらされていることを示す。したがって、このような調節弁は摺動部の部品であるグランドパッキンの摩耗によるプロセス流体の漏れ

や、操作器のダイアフラムの破れによる調節弁制御不良などの故障が発生する可能性が高くなっていると言える。

b. 流体漏れ

スティックスリップ(弁軸の停止と滑りが繰り返される現象)診断のアラーム回数が多い調節弁は、グラント部などの摩擦が大きくなった結果、弁軸の動きが悪くなっていることが予想される。グラント部の大きな摩擦力はグラントパッキンに加わる負荷が大きいことを示しており、グラントパッキンが構造的に破壊され、プロセス流体が漏れている可能性がある。またゼロ点开度比較診断のマイナス方向のアラーム回数が多い調節弁は、シートリングの摩耗が発生している可能性が高い。もしシートリングの摩耗の原因がエロージョンであれば弁体の摩耗も予想され、プロセス流体の漏洩の故障リスクが高いといえる。さらに温度アラームの回数が多い調節弁は、プロセス流体の温度がバルブポジションナ内部まで伝熱している可能性があり、調節弁のどこか(グラント部や弁体)からプロセス流体が漏れていると推測できる。

c. 供給空気配管の異常

供給圧力アラームが発生している調節弁は、ポジションナへ供給されている圧縮空気の圧力が、初期の調整時と比べて低下していることを示している。調節弁を含めた周辺の空気配管の漏れ点検が推奨される。またポジションナ空気回路アラームが発生している調節弁は、供給空気の汚れが原因でポジションナ内部の空気回路に詰まりが発生している可能性がある。

以上のような複数の視点による順位付けで上位になる調節弁は状態が劣化していると予想され、メンテナンスの対象となりうる。反対にどのような視点でも上位にならない調

節弁は診断結果が良好で故障リスクが小さく、メンテナンスを見送る候補となりうる。

なお故障が重大な事故につながるような重要調節弁に関しては、上記の診断結果だけではなく、メンテナンスの必要性を総合的に判断すべきである。

4.1.2 オフライン診断に基づく調節弁の選定

ここでは、オフライン診断を調節弁保全へ利用する方法について述べる。前項で説明したオンライン診断はプラント稼働中の診断であり、その運転条件により調節弁の開度範囲は限定されるケースが多い。そのためオンライン診断では検出が難しい潜在的な調節弁の不良を見つけ出すのが、オフライン診断の役割である。

はじめに、プラント停止後に、ステップ応答テスト(全開全閉、5点チェック)とバルブシグネチャ(調節弁をゆっくりと全閉→全開→全閉と動作させ、開度と操作器圧力の関係から行う診断)を実施する。続いて、すべての調節弁に対して、ステップ応答テスト診断サマリレポート(図1)とバルブシグネチャ診断サマリレポート(図2)を出力する。

これらの診断サマリレポートの判定欄を確認することで、診断結果に問題のある調節弁を容易に選別することができる。

以下では、ステップ応答テストとバルブシグネチャの診断内容について説明する。

(1) ステップ応答テスト

a. 全閉全開テスト

全閉全開テストは、調節弁の全閉位置から全開位置までをポジションナによって操作するテストである。

調節弁が開度0%から100%までのストロークを出せない重大な故障や、作動速度が遅くなっていることを検出でき

PLUG-IN Valstaff レポート
印刷日時: 2014/12/14 18:47:24

判定理由	A	判定理由	D	判定理由	S	判定理由
連続動作	2	圧力変動	4	温度変動	5	異常検出
E	オーバーシュート/アンダーシュート判定	T	作動速度判定	H	履歴比較判定	

デバイスタグ	テストステーション	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		結果	診断結果	判定理由	履歴比較結果
		実施日	実施回数												
AP12FV001	Small_25STEP	2014/12/13	1回	2014/12/12	1回	2014/12/11	1回	2014/12/10	1回	2014/12/09	1回	合格			
AP12FV001	Small_ON-OFF	2014/12/13	1回	2014/12/12	1回	2014/12/11	1回	2014/12/10	1回	2014/12/09	1回	合格			
AP12FV002	Small_25STEP	2014/12/13	1回	2014/12/12	1回	2014/12/11	1回	2014/12/10	1回	2014/12/09	1回	合格			
AP12FV002	Small_ON-OFF	2014/12/13	1回	2014/12/12	1回	2014/12/11	1回	2014/12/10	1回	2014/12/09	1回	合格			
AP12FV003	Small_25STEP	2014/12/13	1回	2014/12/12	1回	2014/12/11	1回	2014/12/10	1回	2014/12/09	1回	異常	E		
AP12FV003	Small_ON-OFF	2014/12/13	1回	2014/12/12	1回	2014/12/11	1回	2014/12/10	1回	2014/12/09	1回	合格			
AP12FV004	Small_25STEP	2014/12/13	1回	2014/12/12	1回	2014/12/11	1回	2014/12/10	1回	2014/12/09	1回	合格			

図1 ステップ応答テストの診断サマリレポート(全開全閉および5点チェック)

PLUG-IN Valstaff レポート
印刷日時: 2014/12/14 18:48:52

判定理由	判定理由	判定理由			
1	シーティング/フェース研磨時	4	スプリングテンション調整時	7	動作速度異常
2	異常検出	5	ばね調整/スプリングテンション調整		
3	異常検出	6	ステップアップ/ダウン時		

デバイスタグ	テストステーション	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		結果	判定理由	履歴比較結果
		開始時刻	結果											
AP12FV001	自由	2014/12/10 19:30	合格	2014/12/09 19:30	合格	2014/12/08 19:30	合格	2014/12/07 19:30	合格	2014/12/06 19:30	合格			
AP12FV002	自由	2014/12/10 19:36	合格	2014/12/09 19:36	合格	2014/12/08 19:36	合格	2014/12/07 19:36	合格	2014/12/06 19:36	合格			
AP12FV003	自由	2014/12/10 19:42	異常	2014/12/09 19:42	合格	2014/12/08 19:42	合格	2014/12/07 19:42	合格	2014/12/06 19:42	合格			
AP12FV004	自由	2014/12/10 19:48	合格	2014/12/09 19:48	合格	2014/12/08 19:48	合格	2014/12/07 19:48	合格	2014/12/06 19:48	合格			
AP12FV005	自由	2014/12/10 19:54	合格	2014/12/09 19:54	合格	2014/12/08 19:54	合格	2014/12/07 19:54	合格	2014/12/06 19:54	合格			
AP12FV006	自由	2014/12/10 20:00	合格	2014/12/09 20:00	合格	2014/12/08 20:00	合格	2014/12/07 20:00	合格	2014/12/06 20:00	合格			

図2 バルブシグネチャの診断サマリレポート

る。このような現象は、摺動部のなんらかのかじりが原因である可能性や供給空気圧の低下の可能性があり、調節弁の開放点検が望ましい。

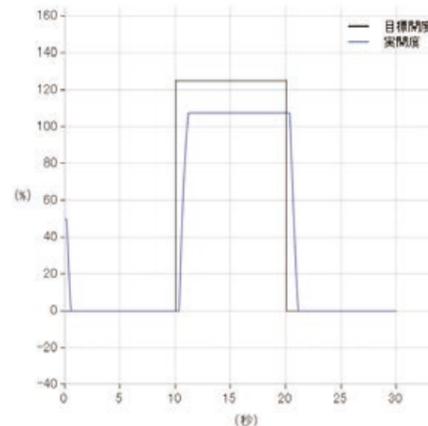


図3 全開全閉テストの結果

b. 5点チェック

5点チェックは、調節弁の目標開度を0→25→50→75→100→75→50→25→0%とステップ状に制御するテストである。各目標開度における偏差、整定時間、オーバーシュートなどの指標値を判定する。これらが大きくなる原因は調節弁の摩擦要素がポジション調整時より大きくなったことによる制御特性の劣化が予想される。ポジションの制御パラメーターの設定を見直すか、調節弁のグランドパッキンを交換するなどのメンテナンスを行うことが望ましい。

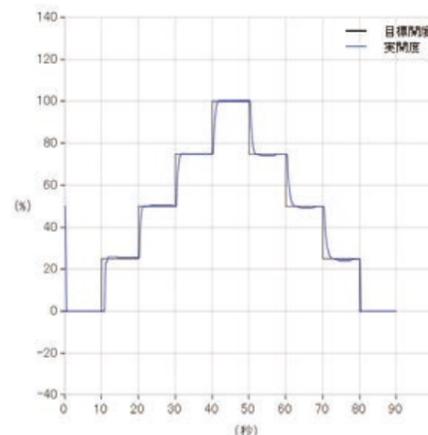


図4 5点チェックの結果

(2) バルブシグネチャ

ステップ応答テストは主に調節弁の動的な性能が劣化していることを検出するものであった。バルブシグネチャは文字通り調節弁のサイン (Signature) を表現しており、調節弁の静的な特性劣化にフォーカスした診断である。

バルブシグネチャは、調節弁の開度を全閉位置から全開位置までゆっくりと動かし開き切った後、再び全閉位置までゆっくりと戻す手順のテストである。

このテスト中に収集したデータを、横軸に操作器への供

給圧力、縦軸に開度を取ったプロットを図5に示す。このプロットから以下で説明するような項目を算出し、調節弁の故障を検出する。

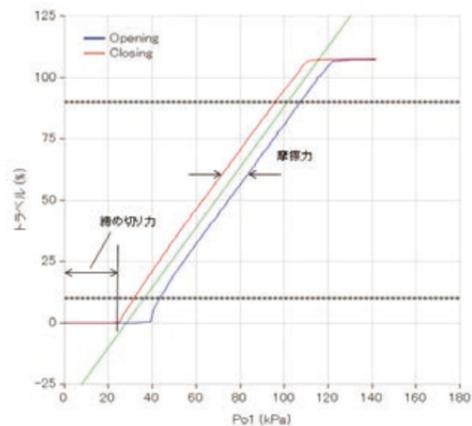


図5 バルブシグネチャの結果

a. シーティングフォース

シーティングフォースは、調節弁のプラグがシートを押さえる力であり、締め切り時にプロセス流体のシート漏れ量をIECなどでの規定以下に抑えられているかを評価するものである。シーティングフォースは、図5に示した締め切り力から、想定される流体反力を差し引くことで計算される。この値がしきい値に満たない場合、規定を上回るシート漏れ量があると判断できる。シーティングフォース不足の原因は、操作器のバネ倒れ、供給圧力不足などが想定される。あるいは、調節弁の仕様選定が不適切である可能性も考えられる。

b. 摩擦力

調節弁は主にグランドパッキン部分に弁軸の摺動に応じた摩擦力が生じる。バルブシグネチャでは、開方向と閉方向の操作器への供給圧力の差(図5のOpeningとClosingのラインで囲まれた部分の幅)によって摩擦力を算出する。摩擦力がしきい値を超えると、グランドパッキンの摺動特性が低下し、グランドパッキンへ加わる負荷が大きいことを示している。そのままプラントの運転を再開すれば、グランドパッキンが構造的に破壊され、グランド部からのプロセス流体の漏れにつながるおそれがある。グランドパッキンの交換などの対応が必要である。

c. スティックスリップ

調節弁の摺動部に不良があると、スティックスリップ現象が生じることがある。バルブシグネチャ中においてもオンライン中と同様にスティックスリップ診断を実行している。スティックスリップ診断の指標値が高く、設定したしきい値を超える調節弁は、摺動部の劣化傾向があると見てよく、故障リスクが高いといえる。

以上のように、ステップ応答テストとバルブシグネチャを実施し、結果サマリレポートを出力することで、容易に潜

在的な異常を持つ調節弁を選定することができる。

ただし、バルブシグネチャはあくまでもプラント停止後の調節弁の静特性であることに注意が必要である。故障が発生するのはプラント運転時であり、プラント停止後とはいくつかの条件が異なる。そのため、700シリーズでは出力空気圧力妥当性(以降Po Validity)と最大摩擦力(以降Max Friction)というオンライン診断機能を搭載している⁽³⁾(4.2.1参照)。

4.2 稼働中における診断機能の活用

本節では、プラント稼働中の調節弁の保全を支援するために診断機能を利用する方法を説明する。

ポジションは診断指標と設定されたしきい値に基づき、診断アラームが発生させることができる。ユーザーは、機器管理システムのユーザーインターフェースを通じて発生通知を確認し、調節弁の状態や原因の推定を行い、対応を検討することになる。また、アラーム発生しなくても調節弁の状態や傾向変化を定期的(例えば月に1回)に確認する運用を行うこともある。

PLUG-IN Valstaffでは、ユーザーのこれらの作業を支援するための表示機能やレポート出力機能を有している。

4.2.1 診断アラームの原因推定

ここでは、アラーム発生を受けてPLUG-IN Valstaffのオンライン診断の画面も用いて調節弁の状態や原因の推定を行う例を、Po Validityのケースで説明する。

前節で述べたように、バルブシグネチャはプラント稼働中の調節弁の静特性を知ることができない。プラント稼働中にバルブシグネチャを測定するオンライン診断機能として、Po Validity と Max Friction が用意されている。プラント停止中の診断であるバルブシグネチャでは捉えられないプロセス流体の反力と温度の影響を受けた調節弁特性をオンラインで把握することができる。以下では、Po Validity のアラーム発生時の調節弁の状態を把握する方法を説明する。

Po Validity のアラームが発生したときには、図6の画面を開き、過去のアラームの状況とバルブシグネチャの視点で調節弁の状態確認が可能である。

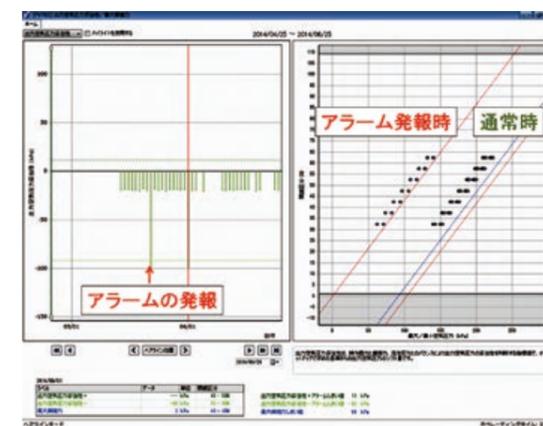


図6 Po Validity 画面

図6の左側はPo Validity 指標の時系列変化である。過去に1度、Po Validity (このケースはマイナス方向)が大きくなり、アラームが発生した形跡が見てとれる。また常にアラームが発生しているわけではないため、異常は一過性であったことが推測できる。図6の右側はバルブシグネチャと同じように、横軸に操作器圧力、縦軸に調節弁開度をとったプロットである。通常時が右側の帯状のデータで、アラーム発生時はプロットが左側によっている。これは操作器への出力空気圧が妥当でないこと、このケースでは操作器の力が不足していることを表している。このケースでは現象が一過性であることから、プロセス流体の反力が一時的に大きくなったことが原因と予想されるため、調節弁のサイジングの見直しを計画することが必要になる。もしPo Validityの指標が継続的に大きい場合は、操作器の故障が考えられるため、操作器の保全を計画する必要がある。

4.2.2 診断指標の可視化による状態監視

バルブ・ポジションが算出する診断指標データをより有効に活用し、ユーザーがプラント稼働中の異常傾向の早期発見や開放点検要否の判断を行えるよう、PLUG-IN Valstaffでは様々なデータの表示機能を提供している。700シリーズへの対応に伴い、新たに追加された圧力センサ情報に基づく診断に対応しただけでなく、指標データの可視化方法を強化し、指標データの経時変化をより認識しやすくする改良を行った。以下に代表的な例を示す。

(1) 使用頻度の高い開度領域の可視化

開度別頻度分布画面では、弁軸の全閉位置から全開位置までを分割した各区分の使用比率を示す開度別頻度指標データを表示している。最も使用頻度の高い開度領域を知ることで、弁サイジングの適切さや低開度運転によるトリムダメージを予測するための指標データである。

この開度別頻度データの経時変化を確認することで、配管の閉塞傾向やシート・プラグ部の摩耗、プロセスの稼働状態の変化を推測することができる。指標データをヒートマップ表示にすることで、長期間の変化を一目で把握できるようにすると同時に、700シリーズで細分化された開度区分の情報を分析しやすくしている(図7)。

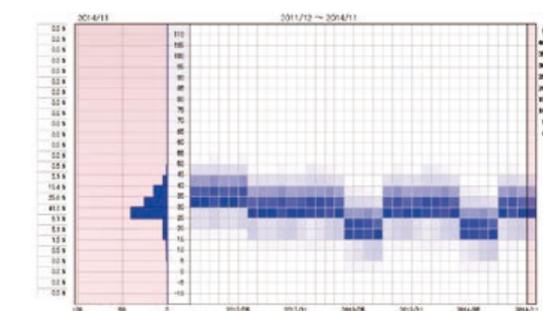


図7 開度別頻度分布

(2) スティックスリップ指標の可視化

スティックスリップ画面では、指標値を2種類のグラフで表示することで、スティックスリップ動作の発生状況を可視

化している。X,Yの散布図(図8左)では、長い期間の指標値の分布を直観的に把握できる。Y/X値の時系列プロット(図8右)では、指標値がしきい値を超えたタイミングを詳細に確認できる。

並べて表示した二つのグラフにおいて、カーソルの表示位置が連動表示するだけでなく、任意の期間に含まれるデータのハイライト表示(図8の黄色で示された範囲およびデータ)を連動させることにより、散布図にプロットされたデータの経時変化を確認しやすくしており、スティックスリップ動作の発生傾向を確認できる。

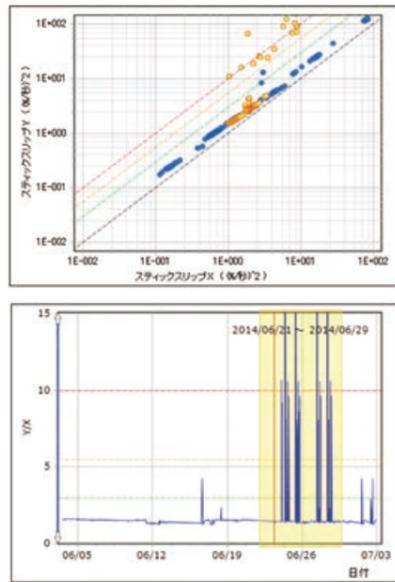


図8 スティックスリップ指標値の可視化

(3) 積算データの経時変化の可視化

摺動距離積算、全閉回数、反転動作回数といったプラント稼働中に単調増加する指標値は、指標値が大きくなるほど増加する傾向変化が見えにくくなる(図9)。診断画面では、指標値の時系列プロットと共にその変化量(1日当たりの指標値の増加量)を表示させることで(図10)、指標値の増加傾向の変化をユーザーに認識しやすくし、調節弁動作の変化や異常傾向を分かりやすくしている。

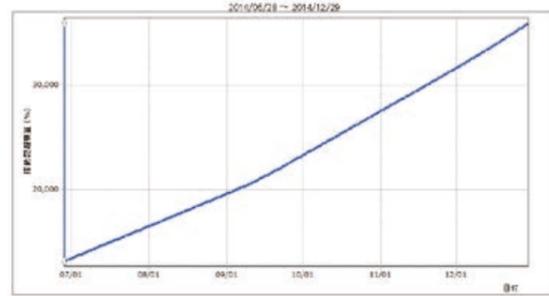


図9 積算データの経時変化の可視化



図10 積算データの変化量の可視化

4.2.3 オンライン診断レポートによる傾向監視

プラントが安定して稼働している状況下でも、早期に劣化傾向や状態の変化をとらえるためには、定期的に調節弁の診断状態を確認することが重要である。オンライン診断レポートを活用することで、プロセス内に多数ある調節弁の状態変化を効率的にとらえることができる。

以下に、オンライン診断レポートによる傾向監視について説明する。

デバイス別診断レポート(図11)では、積算値(摺動距離積算、全閉回数、反転動作回数)、各種アラーム(スティックスリップ/ポジション空気回路/偏差/ゼロ点開度比較/供給圧力/温度)の発生回数を調節弁別・月別に集計・一覧表示することで、各種指標値の経時変化を把握することができる。

FV702	スティックスリップアラーム (回)			摺動距離積算 (回)	全閉回数 (回)	最大作動速度 (%/秒)		反転動作回数 (回)
	高	中	低			+	-	
2014/05	7	11	13	4236912.00	101	9.44	-7.68	103
2014/04	6	11	12	4234678.00	96	76.11	-67.97	101
2014/03	5	10	11	4236912.01	91	78.92	-23.80	81
2014/02	5	9	11	4234678.01	86	-49.51	-55.02	70
2014/01	4	9	10	4236912.02	81	87.13	-62.18	70
2013/12	4	8	10	4234678.02	76	22.23	-34.86	61

ポジション空気回路アラーム (回)		偏差アラーム (回)		ゼロ点開度比較アラーム (回)		供給圧力アラーム (回)		温度アラーム (回)		収集日数 (日)	開度別発生分布				
+	-	+	-	+	-	高圧	低圧	高温	低温		1位	割合 (%)	開度区分	割合 (%)	2位
11	19	30	37	39	48	48	47	60	66	30	85% - 90%	84	-5% - 0%	8	
10	18	26	32	36	44	41	42	50	56	31	85% - 90%	84	-5% - 0%	2	
9	18	25	28	34	38	34	37	45	49	28	85% - 90%	73	-5% - 0%	10	
7	16	22	24	32	32	30	32	42	41	31	85% - 90%	88	-5% - 0%	7	
7	13	20	21	30	29	28	25	36	31	31	85% - 90%	92	-5% - 0%	6	

図11 デバイス別診断レポート

デバイスタグ	しきい値到達予測日	摺動距離積算 (回)					
		2014/05	2014/04	2014/03	2014/02	2014/01	2013/12
FV302	2096/08/13	176138.38	176138.38	148996.29	126934.96	111281.21	104508.17
FV702	2090/04/03	253589.99	253589.99	235532.89	231857.99	217668.67	180544.05
FV703	2062/02/13	365142.45	365142.45	325105.30	282144.32	233668.34	220320.56

図12 摺動距離積算診断レポート

デバイスタグ	アラームタイプ	判定	スティックスリップアラーム (回)					
			2014/05	2014/04	2014/03	2014/02	2014/01	2013/12
FV302	---	増加	6	5	5	4	4	4
FV702	高	増加	40	38	32	26	25	22
FV702	中	増加	29	26	23	23	23	22
FV702	低	増加	34	31	28	23	20	19
FV703	高	増加	21	20	17	13	12	10
FV703	中	増加	10	15	12	11	10	9
FV703	低	増加	13	12	11	10	10	8

図13 スティックスリップ診断レポート

摺動距離積算診断レポート(図12)では、摺動距離積算値を調節弁別・月別に集計し、一覧表示する。積算値の傾向から算出した「しきい値到達予測日」も表示され、故障リスクの高い調節弁の特定やメンテナンスタイミングの判断に活用できる。

スティックスリップ診断レポート(図13)では、スティックスリップのアラーム回数を調節弁別・月別に集計・一覧表示することで、複数調節弁のアラーム回数の経時変化が把握できる。アラーム回数が増加傾向にある調節弁に対しては、判定欄に増加と表示され、アラーム回数が増加傾向にある調節弁を容易に特定することができる。

働していることから、予期せぬトラブルが発生した場合に生産設備の停止や災害を誘発させてしまう可能性がある。

一般にバルブの保全では、時間基準の保全計画に基づいた適切なメンテナンスを行うことでトラブルを発生させない取組みがされている。当社では、そのような従来方式のメンテナンスに「バルブ診断解析」を加えた状態基準保全である「エキスパートメンテナンスサービス」を推進している。

バルブ診断解析とは、Valstaffによって収集された診断指標値を、当社のノウハウと組み合わせて解析し、バルブの状態を予測する手法で、調節弁のみならず、あらゆる弁に適用可能である(例:ON-OFF弁)。

5. バルブ診断解析サービスの今後の展開

5.1 azbilグループが推進するバルブメンテナンスサービス

これまで述べた調節弁を含めた工業用バルブは、可動部を持ちプロセス流体を直接制御しながら24時間365日稼

5.2 エキスパートメンテナンス

エキスパートメンテナンスとは、従来の時間基準メンテナンスのサイクルに加え、バルブ診断解析で得られた知見や引取時のオフライン診断を基にして状態基準保全を実現する高付加価値メンテナンスである。

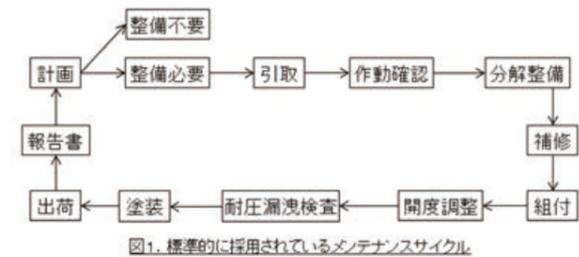


図13 標準的に採用されているメンテナンスサイクル

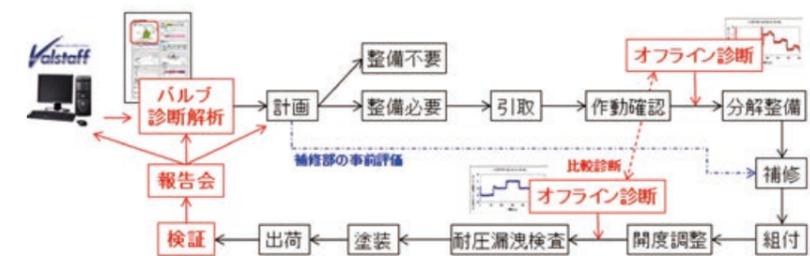


図14 標準的なメンテナンスサイクル(上)とエキスパートメンテナンス(下)

図14(上)に、プラントの定修時に標準的に採用されているメンテナンスサイクルを示す。この場合、バルブを分解して初めて補修箇所が発見されるため、補修の程度や補修部品の手配状況によっては、決められた定修の期間内に補修ができないことがある。また、バルブ出荷時の作動状態の確認は目視に依存することが多く、初期不良と納入後の作動不良との切り分けが難しいため、装置稼働遅れの原因の一つとなっている。

図14(下)に、当社が推進するエキスパートメンテナンスの保全サイクルを示す。

- ①保全計画にバルブ診断解析の情報を加えることで、データに基づいた保全計画を策定
- ②補修部を予測評価することで、事前に部品を準備し工期遅れを予防
- ③バルブ分解前後の動作結果比較により品質を確保
- ④バルブ診断解析結果と分解状態を検証
- ⑤検証結果を基に顧客への報告会を開催
- ⑥報告会の議論に基づいて診断指標値の閾値設定や今後の保全計画を再確認

データに基づくバルブ診断解析結果と、実際の分解状態を比較検証することで、バルブ固有特性を把握することが可能となった。このことにより、プラント稼働中におけるバルブの挙動を把握し、トラブルを未然に防ぐ効果がある。

このエキスパートメンテナンス技術を採用することにより、高品質で適切なメンテナンスを構築することができる。今後も、診断技術を発展させながら、エキスパートメンテナンス方式による付加価値の高い状態基準保全サービスを提供していく予定である。

6. おわりに

診断機能を強化したスマート・バルブ・ポジショナ700シリーズに対応した調節弁診断アプリケーションPLUG-IN Valstaffを開発した。Valstaffは、プラントの稼働中および定修時に調節弁の状態を診断する機能を備えており、故障・劣化の兆候の早期発見を支援する。また、Valstaffが収集したデータの解析に基づいて提供されるバルブ診断解析サービスにより、点検対象の特定や補修部品の事前準備などが可能となり、メンテナンスの適正化に貢献できる。

これまで説明した状態基準保全を支援する機能とサービスを提供することで、顧客の適正なメンテナンスを実現するとともに、プラントの安全・安心、さらには社会の安全・安心に貢献していく。

<参考文献>

- (1) 工場電気設備の診断・更新に関する課題と将来展望調査専門委員会：工場電気設備の診断・更新，技術電気学会技術報告，2001，Vol.831，電気学会
- (2) 福田稔：調節弁メンテナンスの最適化，高効率化に向けたサポートシステム，計装Vol.58，No.6（2008）
- (3) 福田ほか：安心・安全操業を実現するバルブ・ポジショナ，Azbil Technical Review，2014，2014年4月発行号，pp.54-61

- (4) IEC60534-4-1999, Industrial-process control valves - Part 4:Inspection and routine testing

<商標>

PRMは、横河電機株式会社の商標です。
HARTは、HART Communication Foundationの商標です。
FOUNDATIONは、Fieldbus Foundation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商標です。
Valstaff, InnovativeField Organizerは、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

飯田 洋介	技術開発本部商品開発部
大塚 賢司	技術開発本部商品開発部
佐藤 洋平	技術開発本部商品開発部
尾形 知美	技術開発本部商品開発部
山崎 史明	サービス本部サービス技術2部

燃焼安全ソリューションを支える ソフトウェア安全設計 Software Safety Design to Support Combustion Safety Solutions

アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニー

山田 晃
Akira Yamada

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

中田 知也
Tomoya Nakata

キーワード

燃焼安全, バーナコントローラ, 燃焼安全規格, ソフトウェア

工業用燃焼炉の技術革新と安全に対する要求により、燃焼安全計装に求められる機能に変化している。この変化に対応するためバーナコントローラは機能拡張しソフトウェアの重要度が増してきた。しかし、ソフトウェアにはハードウェアとは性質の異なる故障要因が存在し、従来の技法では安全を担保できない問題があった。そこで今回新しいバーナコントローラは機能安全の設計手法を導入した燃焼安全規格に適合するための独自アーキテクチャの採用を行い、安全性を確保している。

Technical innovations in industrial combustion furnaces and the demand for safety have changed the functionality requirements for combustion-related safety instrumentation. In order to address these changes, the functionality of burner controllers has been enhanced and the importance of their software has increased. However, due to the intrinsic differences between software and hardware, the causes of software failure differ from the failure factors for hardware. As a result, conventional techniques have become unable to secure safety. Against this background, we have developed a novel burner controller with a unique architecture that guarantees that the controller is safe to use, in order to comply with combustion safety standards that cover design methods for functional safety.

1. はじめに

工業用燃焼炉(以下工業炉)を取り巻く社会情勢は地球温暖化防止や省エネルギーを要求する世論などにより変化してきている。多大なエネルギーを消費し一度事故が発生すれば重大災害に繋がりがねない工業炉では、より高効率に、そして、より安全に運用することが社会から求められている。

工業炉を設計・製造するメーカーでは、高効率・省エネ化に対応すべくCO₂排出量の少ない燃料への転換や高性能工業炉などの新規技術を盛り込んだ工業炉の導入を進めている。新規技術導入に伴い制御は高速化・複雑化しており、多くのシステムにおいてソフトウェア(コンピュータ)の使用が前提となっている。

このため、ソフトウェアをベースとした際の安全構築とリスク低減が課題となっているが、新規技術とソフトウェアの利用という技術的变化により、従来行ってきた経験ベースの

安全対策だけでは安全を担保し切れなくなっている。

そのため、事故が起こる前に予期して防ぐ努力をしなければならぬという考えが世の中に広まってきており、それに合わせて燃焼安全規格も変わりつつある。ここでは、リスクアセスメントに基づいた本質安全設計が求められており、検証と妥当性確認による工数増大や設計を行う人・組織のスキル不足などの課題が存在している。

2. 工業炉を取り巻く安全規格

工業炉やボイラなどの熱源機器においてはISO12100:2010 (JIS B9700:2013)を基本とした製品安全規格の整備・改訂が進められている。

2008年には工業用燃焼炉の安全通則(JIS B8415:2008)が改訂された。これにより工業炉を設計・製造するメーカーや使用するユーザーは、設備のリスクアセスメント実施など

これまでと異なる考え方の導入により従来設備の安全見直しを行わねばならなくなった。特に設備への影響の大きい要素としては汎用プログラマブルロジックコントローラ (Programmable Logic Controller, 略称:PLC)の安全機能部(インターロック処理など)への使用禁止、中継リレーの原則使用禁止、火災の個別監視などが挙げられる。

また、2014年には機能安全の設計手法が導入された工業炉および関連するプロセス設備に関する安全規格ISO 13577シリーズの一部が発行され、将来的には工業炉の安全関連部は一般の制御と分離して、センサ、ロジックソルバ、最終要素からなるプロテクティブシステムと呼ばれるループを構築する必要が出てくる。

これにより、形成されたループで使用する機器は個別製品安全規格(例:IEC60730-2-5, EN298など)に適合しているか、SIL3(Safety Integrity Level 3)/PLe (Performance Level e) Capable相当の能力を有する必要があり、かつ、形成されたループ全体として安全上の検証と妥当性の確認が求められることとなる。

バーナコントローラや火災センサに適用される個別製品安全規格も変わってきている。従来までは満たすべきタイミングや電気的特性といった製品に対する要求がまとめられていた。しかし、前述の安全に対する考え方の変化によりこの個別製品安全規格にも機能安全ベースの要求が追加され、リスクアセスメントや検証と妥当性確認が求められるようになった。

一例として、EN298は2012年に改訂され、その際に機能安全規格IEC61508の流れをくむ要求「EN298:2012.6.6 Protection against internal faults for the purpose of functional safety」が新たに追加されている。

3. ソフトウェアのリスク

ハードウェアは、故障モードが比較的容易に判別できる。この特性によりFMEAやFTAなどの技法を用いて的確に安全検証を行うことができる。さらに部品の故障率などからリスク発生を定量的に把握できるので適切な保守作業によりリスク軽減を行うことができる。

ソフトウェアは偶発故障や摩耗故障がなく、設計ミスの対処のみが必要になる。安全仕様の不備やバグなどのソフトウェアの設計ミスは、条件が揃えば100%顕在化するものであり、これらは冗長設計などのハードウェア的なリスク抑制策では対処できない。

したがって、設計段階で、設計ミスを作りこまないようにすることが必要になってくるが、ソフトウェアの設計ミスの発見と除去は非常に困難である。

ソフトウェア設計を難しくしている理由として複雑さの問題がある。単純なシステムなら完全なプログラムを設計することはできるかもしれないが、現在稼働しているシステムは多くの制御要素がありソフトウェアの規模は大きなものとなっている。適切な管理が行われないソフトウェア開発においては、設計が進むにつれて複雑さは増し、人の手に負えなくなり、多くの設計ミスが入り込むだけでなく、それを見つけたことも困難にしている。また、全ての入力やパラ

メータの組み合わせは無限に存在し、全てをテストすることは不可能である。

ソフトウェアは容易に変更が可能である。よってシステムの稼働後も頻繁に仕様変更が行われる。通常、生産性が優先されるので、ちょっとした変更は短時間で言うことが求められ、十分なリスク検証が行われない場合がある。ソフトウェアのモジュールは相互に依存関係があり、設計者の意図しないところで影響が波及する場合がある。このようにシステムが寿命を迎えるまで常にソフトウェアの変更リスクが付きまとう。

ソフトウェアのリスクに対する規格の要求事項はあいまいな点が多く理解することが難しいが、基本的には、定められた設計プロセスの中で、適切に設計、検証が行われていることが求められる。さらにコーディングルールや形式化手法などの数百に及ぶ設計技法の使用の要求や、推奨がされている(表1)。

表1 技法例：設計およびコーディング基準

技法 / 措置	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4
コーディング基準の使用	HR	HR	HR	HR
動的オブジェクトなし	R	HR	HR	HR
動的変数なし	—	R	HR	HR
動的変数追加時のオンラインチェック	—	R	HR	HR
割込みの使用制限	R	R	HR	HR
ポインタの使用制限	—	R	HR	HR
再帰の使用制限	—	R	HR	HR
高級言語のプログラム内に非構造化制御フローがない	R	HR	HR	HR
自動変換を行っていない	R	HR	HR	HR

HR: 強い推奨。不使用には根拠が必要
 R: HRより低い推奨
 —: 推奨も反対もしない
 NR: 積極的に推奨しない。使用には根拠が必要
 SILn: 安全度水準。4が最高水準

近年になって、ソフトウェア開発をサポートする有用なツールが出てきているが、残念ながらソフトウェアの課題を解決する万能薬はない。現在においては適切なプロセス管理により、リスクを正しく認識し、設計の複雑さ、あいまいさを排除し、確実な検証を行うことが現実的なアプローチとなっている。

4. 燃焼安全計装の変遷と課題

4.1 従来計装の問題点

安全規格、ソフトウェアのリスク以外の問題点として、従来の燃焼安全計装の問題点が存在する。

従来のバーナコントローラはハードウェアを主体とした安全設計で、機能も単体のバーナ制御および燃料遮断のみを受け持つといったシンプルな構成だった。そして装置の制

御だけでなく、インターロックの取込みといった安全機能までも汎用PLCで行われる場合が多かった(図1)。

しかし、汎用PLCでは安全性が保障されないことより、工業用燃焼炉の安全通則(JIS B8415)では安全関連部への汎用PLCの使用を禁止した。

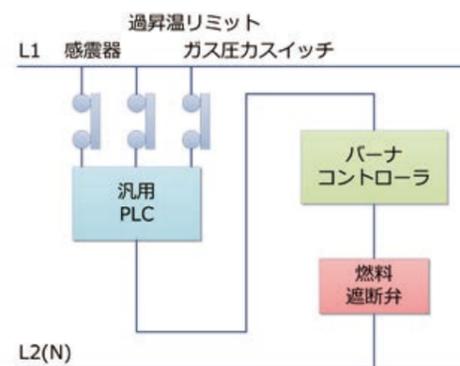


図1 汎用PLCを中心とした従来計装

インターロックについては、従来の負荷電源直切り(図2)は本質的に安全であるが、設備の要求に満足できなくなってきている。ある条件下で監視が必要なインターロックや、接点のチャタリングを防止するためにフィルタが必要な場合がある。また、システムの異常により同時に複数のインターロックが作動する場合があります。異常のメカニズムを正しく認識するには、どのような順でインターロックが作動したのかを知る必要がある。これらの点についてハードワイヤリングによるインターロック構成は限界にきており、ソフトウェアによるインターロック監視が必要になってきている。

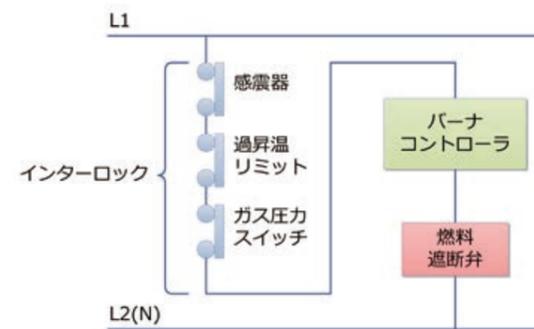


図2 インターロック構成

これらの問題を解決できる機器として、安全PLCまたはazbilグループが新規開発を行ったバーナコントローラが挙げられる。

4.2 安全PLCの課題

安全PLCは汎用PLCとは異なり、ハードウェアの多重化、安全関連部品の自己診断、アプリケーションの多重化演算といった安全機能を有しているのが特徴と言える。ラダーやファンクションブロックダイアグラムといった言語で組んだソフトウェアアプリケーションを自ら構築することができるため、制御における柔軟性は高く、前述の設備の多様

化・多機能化にも対応することが可能である。

しかし、このように作成したアプリケーションはソフトウェアのため、製品開発を行う場合と同様の検証・妥当性確認を実施する必要がある。もし燃焼安全機能に関してのアプリケーションを構築するのであれば、その部分は個別製品安全規格に対応して検証と妥当性確認を行う必要がある。

燃焼関連に関しては、メーカーより認証済みファンクションブロックが提供されていれば、その部分についての検証と妥当性確認を省くことができるが、周辺ファンクションブロックとの接続や他の安全関連アプリケーションについては検証と妥当性確認が必要なことには変わりがない。

このアプリケーション適合を行うためには、専門技能を有する人材の確保や多くの工数がかかるため、安全PLC導入における大きな負担になると考える。

4.3 新バーナコントローラによる解決

これまでに述べた課題に対応すべく、当社では従来製品と同等の安全性を確保しつつ制御性を高めたバーナコントローラRXシリーズを2010年に、BC-Rシリーズを2013年にリリースした。

新たなバーナコントローラは安全機能の実装においてもソフトウェアの占める割合が高くなっている。ソフトウェアも含めて製品開発段階で個別製品安全規格のEN298に適合しているため、バーナコントローラ導入時にソフトウェアのアセスメントを行う必要がないのが利点である。

次項では、バーナコントローラRXシリーズと汎用PLCを用いた燃焼安全ソリューションについてまとめる。

5. azbil が提案する燃焼安全ソリューション

工業炉の技術進歩に伴い、システムの高速度化や高精度化が進んでいる。一方、安全に関する規制は年々厳しくなる傾向がある。一般的に、制御性と安全性はトレードオフの関係にあると言われる。制御スピードを上げると安全性が損なわれ、逆に、安全性を重視すると制御性が悪くなる傾向がある。制御性と安全性をうまく調和させることが求められるが、これを実現したモジュールタイプのバーナコントローラRXシリーズを使用した計装を図3に示す。工業炉の中でも規模の大きい加熱炉や熱処理炉では、複数の燃焼室(マルチゾーン)で構成される場合が多い。このような炉を含む生産システムにおいては、原料(ワーク)の搬送、エアー設備など燃焼以外の関連設備があり、これらは汎用PLCによって制御されている。また効率良く生産を行うためにシステム全体を監視する分散制御システム(Distributed Control System, 略称:DCS)も利用されている。

(1) 制御系と安全系の分離

システムの安全設計として制御系と安全系を完全に分離することが必要である。バーナコントローラなどの安全機器のみがインターロックや燃料遮断弁を接続することができる。本例に示すように汎用PLCなどのプログラマブルコントローラで実行される制御系と、バーナコントローラが担当す

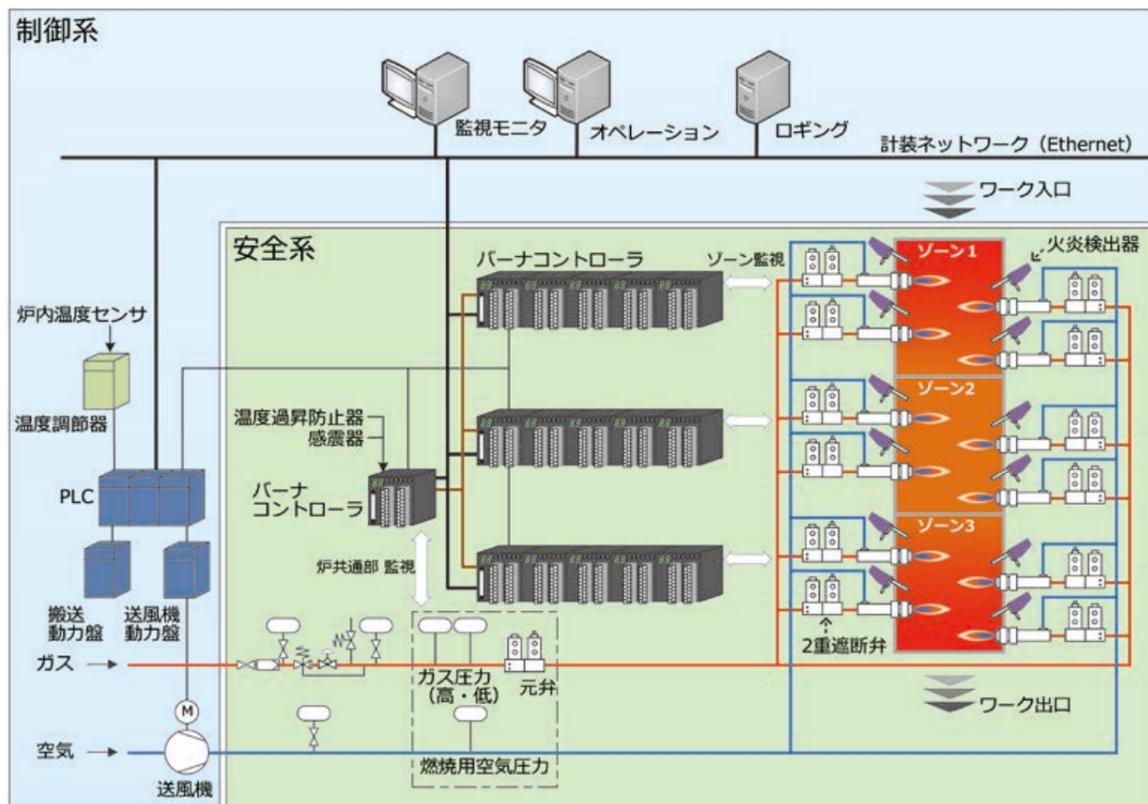


図3 ソリューション事例

安全系は、明確に分離されていることが必要である。通常は、制御系(汎用PLC)が炉全体の運転シーケンスを実行し、その運転指令に基づき安全系(バーナコントローラ)は燃焼装置の制御を実行する。安全系(バーナコントローラ)では、燃焼安全に関わる必要最小限の制御を行い、制御系(汎用PLC)の設計自由度が高くなるように配慮している。

(2) 階層化されたインターロック監視

安定的に生産を行うために、生産ラインを冗長化するなどの工夫が行われる。そこでは一部のインターロックが作動してもシステム全体を止めることなく、該当する燃焼炉のみを停止させることができる(一方、感震器などシステム全体を停止させるインターロックもある)。

モジュールタイプのRXシリーズは、インターロックの対象範囲を階層化し、システムに応じてフレキシブルに安全設計を行うことができる。

(3) ソリューションの効果

従来製品では、多くのリレーやタイマなどの外部回路を組み合わせてシステム構築を行っていた。配線は膨大となり複雑化していたため安全検証が困難あるいは不可能な状況にあった。当社のバーナコントローラ、火炎検出器、燃料遮断弁を組み合わせることで、省配線/省スペースを実現できる。また、プログラムレスであらかじめ作り込まれている安全機能を選択するだけで機能実現でき、ユーザーにおけるソフトウェアの設計・検証のためのエンジニアリング工数やリスクを大幅に低減できるものとなっている。



図4 azbil 燃焼安全計装ソリューション

6. バーナコントローラ RX・BC-R の開発

6.1 安全性の確保

前述の通り、新たなバーナコントローラはソフトウェアの占める割合が高くなりリスクも増大しているため、独自の安全アーキテクチャを導入することと、個別製品安全規格のEN298およびIEC60730-2-5で規定されているCPUおよび関連ハードウェアとそのソフトウェアの障害対策に適合することにより安全性の確保を行っている。

6.2 安全レベルの要求

バーナコントローラは爆発を防ぐための機器であり、万が一の事故が発生した場合は人命を損なう可能性があるため、EN298ではソフトウェアクラスCという一番厳しい安全レベルを満たすことと位置づけられている。また、EN298

が参照するIEC61508に当てはめると、安全度水準はSIL3を満たす必要がある。

そのため、規格認証においても厳格なチェックが求められる。

6.3 安全アーキテクチャ

燃焼安全機器として求められる安全レベルを満足するために当社では、1oo2D(診断機能付デュアルチャンネル)のアーキテクチャを採用した(図5)。

入力部はシングルチャンネルとなるが、ロジックと出力部はデュアルチャンネルとなり、各チャンネルの出力結果が一致しないとアクチュエータは駆動できない構成となる。

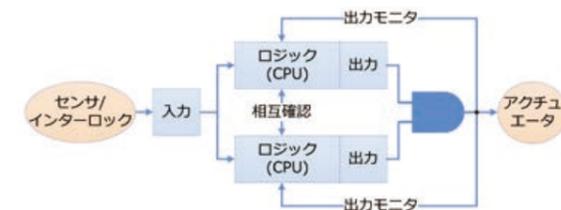


図5 安全アーキテクチャ

診断として、出力モニタ、ロジック(CPU)のセルフチェックおよびロジック(CPU)間の相互チェックが行われる。入力信号、出力信号および出力モニタなどの安全関連部の信号はパルス信号(ダイナミック信号)を基本とする。これにより診断系も含めて部品の危険側故障を検出することができる。規格上二つまでの故障に対して安全確保が求められる。二つ目の故障は一つ目の故障から1時間経過後に発生するものとしていることから診断周期は1時間未満が求められると思われたが、認証機関の審査官によるとデュアルチャンネルにしたことでCPUの診断周期として24時間以内で良いとされている。シングルチャンネルに比べて診断周期の時間制約や高度な診断手法は要求されないことで、ソフトウェアの構造はシンプルな設計とすることができる。割り込み処理も必要最小限とし、OS(オペレーティングシステム)を使用しないなど、ソフトウェアの複雑さを極力排除することを心掛けた。デュアルチャンネルのアーキテクチャであってもCPUの全ての構成要素は、可能な限り診断しなければならない。以下に診断の内容について示す。

- ・演算/制御結果について自己および相互チェック
- ・安全パラメータの自己および相互チェック
- ・プログラム実行順のチェック
- ・内蔵RAM、レジスタの固着チェック
- ・CRCコードによるFlashROM、EEPROMのチェック
- ・割り込み処理層のデッドロックチェック
- ・スタックレジスタのチェック
- ・命令コードの動作チェック
- ・タイマ割り込み処理の周期チェック
- ・CPU間通信のフォールト抑制

6.4 独自の安全アーキテクチャ

規格に適合するだけではなく独自のアーキテクチャを採

用することでさらなる安全性の追求を行っている。設計の一例として、クロックの相互チェックと多様化について示す。シーケンスタイミングを守ることは安全上重要なことであり、シーケンスの実行周期は厳密にチェックされる。図6に、シーケンス処理とタイミング監視の構成を示す。デュアルチャンネルの各CPUにおいてソフトウェアは三つの処理層(二つのタイマ割り込みとバックグラウンド処理)をもつ。シーケンス実行部は20msタイマ割り込み処理に含まれる。処理層は相互にタイミングをチェックし、CPU間は基準クロックを交換しタイミングをチェックすることでシーケンス実行周期の正しさを保障する。

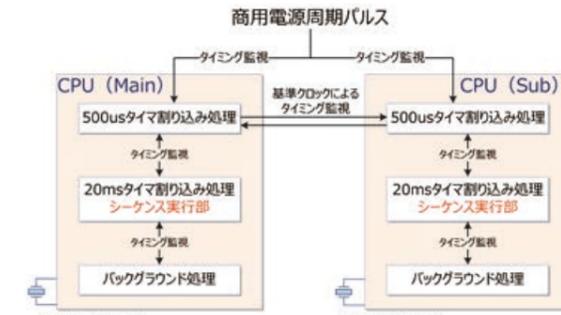


図6 シーケンスタイミング監視

ここで各CPUにクロックを供給するセラミック発振子は故障や温度特性、経年変化の特性は似たものとなるので相互比較では異常検出できない危険性がある(図7)。単一の要因によって冗長系が失われてしまう故障(障害)を共通原因故障と言う。そこで動作原理の異なる商用電源周期パルスのチェックを加え、クロック信号の多様化により対策としている。

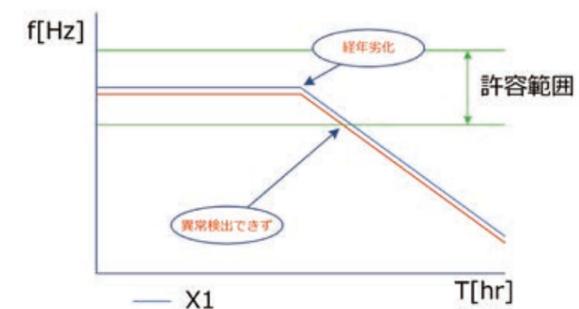


図7 クロック故障例

6.5 ソフトウェアのプロセス管理

前述の通り、ソフトウェアには偶発的な故障はなく、すべて設計ミスで作り込まれた故障となる。そのためソフトウェアに対しての安全要求が設計され検証がなされていることを証明することが必要となる。規格EN298:2012はソフトウェアに関してはIEC61508-3を参照しており、規定されているVモデル(図8)に従って、要求仕様から設計、実装に至る製品の具現化の方法と、それぞれに対して検証および妥当性確認が適切に行われているか体系的に示すことが求められる。

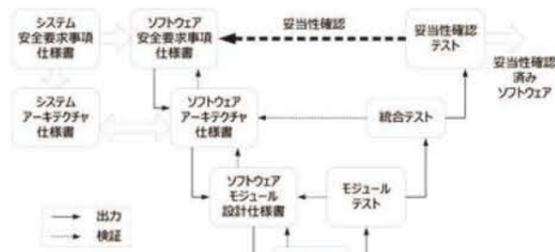


図8 Vモデル

開発プロセスを仕様定義、アーキテクチャ設計、モジュール設計などに階層化しプロセスの成果物を理解しやすく可視化することで検証の抜けや誤りを防止することが求められる。

6.6 ソフトウェアの文書管理

Vモデルを用いた安全要求の検証と妥当性の確認が正しく行われたことを示すために全ての成果物に対する文書化が必要となる。文書化に関する規格の要求事項を次に示す。

- 1) 正確であり、曖昧さがなく利用者が明確に理解できること
- 2) 要求事項が識別できること、評価基準が明確であり検証可能であること
- 3) 管理基準(バージョン管理、改訂履歴など)が規定されていること
- 4) 要求事項、設計仕様およびテストの関連についてのトレーサビリティ

特に重要な点として4)項のトレーサビリティが挙げられる。要求仕様がどのように解釈され実装に至ったのか、またそれぞれのテストフェーズにおいて、どのような方法を用いて仕様の確認を行ったのか、作業のモレや誤りを検出するためには、これらの関係がトレースできなければならない。また、開発段階や開発完了後も仕様変更や改良が入る。トレーサビリティの管理により変更による安全機能への影響箇所を見極めることが可能になり、安全機能に対する検証の抜けを防止することができる。また、変更作業を、Vモデルのどのフェーズから始めればよいのか判断することができる。

工業炉の安全設計を行う場合、燃焼技術、ハードウェア、ソフトウェア、システム設計、人間工学など広範囲の知識が必要となり、複数の人が関わる共同作業が必要となってきた。フェーズの移行にあたってのチェックゲートとして成果物のレビューを行う。ここでは、ソフトウェア技術者だけでなく、様々な専門分野の人が参加し、多様な視点により審査が行われる。

妥当性確認により最終的な確認が行われ、ソフトウェア開発が完了する。

6.7 規格認証

バーナコントローラは、個別製品安全規格EN298に適合するため欧州の第三者認証機関の監査を受けている。利用した第三者認証機関の特徴として実地確認を行うことが挙げられる。

監査は事前送付したドキュメントに対する審査と来日した

認証エンジニアによる実地確認とで行われる。

実地確認は丸一週間かけて行われ、機能面では正常動作確認およびフォールト動作確認を行い、規格上求められている要求が満たされているかを一つずつ確認した。フォールト動作確認ではフォールトの挿入方法の確認やフォールト条件を変えた抜打ち試験といった、開発者の対応能力が試される場面もあった。ソフトウェアに関しては、コードウォークスルーやコーディング方法、プロセス・文章管理方法の確認が行われた。

第三者認証機関による妥当性確認が終わり問題なければ、第三者認証機関は最終レポートと認証書の発行を行い認証は完了となる。

7. おわりに

本論文で示したように工業炉の現場における従来計装のソフトウェア・エンジニアリングには多くの課題が残されている。当社はこれからも、グループ理念である「人を中心としたオートメーション」の下、燃焼安全ソリューションを発展させ、工業炉の現場における課題解決力を強化し、お客さまの安全・安心の実現に貢献していきたい。

<参考文献>

- (1) 熊澤雄一:燃焼安全制御技術を用いたコントローラの開発, azbil Technical Review, 2011年1月号
- (2) 山田晃ほか:燃焼安全技術の開発と燃焼安全ソリューションへの応用, 計測と制御第53巻 第12号2014年12月号
- (3) 安全PLCを用いた機械・設備の安全回路事例集, (一社)日本電機工業会 技11-01
- (4) JIS B8415:2008 工業用燃焼炉の安全通則
- (5) EN298:2003 Automatic gas burner control system for gas burners and gas burning appliances with or without fans
- (6) EN298:2012 Automatic burner control system for burners and appliances burning gaseous or liquid fuels
- (7) IEC60730-1:2011 Automatic electrical controls for household and similar use -Part 1: General requirements
- (8) IEC60730-2-5:2000 Automatic electrical controls for household and similar use -Part 2-5: Particular requirements for automatic electrical burner control system
- (9) IEC61508-3:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related system - Part 3: Software requirements
- (10) 二村元規:工業炉の国際規格(ISO13577)の動向, 計測展2014 OSAKA テクニカルセミナー資料

<著者所属>

- | | |
|-------|-------------------------|
| 山田 晃 | アドバンスオートメーションカンパニー 開発3部 |
| 中田 知也 | アドバンスオートメーションカンパニー 開発3部 |

機械アプリに合わせた安全機器の展開

Selecting Appropriate Safety Equipment for Machinery

アズビルトレーディング株式会社 大竹 桂司
Keiji Otake

キーワード

機械安全, 安全規格, 安全機器, 安全制御, 隔離と停止, 安全確認型システム

労働安全に関する規格・法令の改正、減らない労働災害に対し、機械・装置メーカーと使用するユーザーの安全意識は高まってきている。しかしながら、規格法令が複雑化したことと技術の進歩により安全機器が多種多様化されたことから、状況を正しく理解して「何が本当に危険なのか」「何が最適な保護方策なのか」を見極め、「安全性・経済性を考慮」したうえで適切な安全防護を行っているケースは少ない。機械安全の根幹となる「隔離と停止」「安全確認型システム」の考え方を、いくつかの事例を交えて紹介するとともに、機械アプリに合わせた安全機器の展開方法を説明する。

Recent amendments of laws and regulations relating to occupational safety, as well as the fact that workplace injuries have not declined, have raised safety awareness in users and makers of machinery. Nevertheless, because standards and regulations have become more complicated, and because technological advancements have resulted in a great variety of available safety devices, we seldom see safeguards that are appropriate from the viewpoint of safety and economy, and that are based on correctly understanding the situation by determining what the real dangers and optimal protective measures are. Using actual case examples, we discuss the concepts of “isolate and stop” and “safety confirmation systems,” which are foundational for machine safety, and explain how to deploy safety devices that are appropriate for the applications of the machinery.

1. はじめに

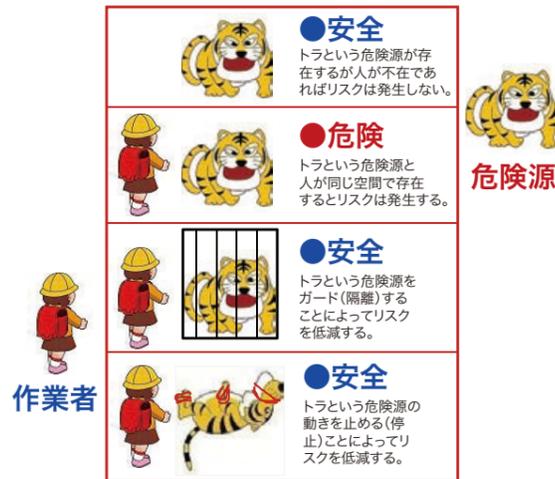
近年、機械安全に関する規格と法令は強化され、システム安全規格のISO13849-1:2006(制御回路と機器の信頼性をパフォーマンスレベルPLで表す)から、労働安全衛生法28条の2(リスクアセスメントと低減方策の努力義務化)、労働安全衛生規則24条の13(メーカーは残留リスクをユーザーにリストとマップ化して通知する努力義務化)の改正があり、安全意識は高まっている。しかしながら、リスクアセスメントや安全教育活動は十分に行うが、適切なリスク低減方策を実施しているケースは少なく、設備の老朽化や団塊世代の退職による技術伝承問題も重なり労働災害は減少していない。本稿ではリスク低減方策のステップで最も中心となる安全防護の「隔離と停止」「安全確認型システム」の考え方を捉え、その重要アイテムである安全機器の選定を機械アプリに合わせた展開方法で説明する。

2. 機械安全の考え方

2.1 隔離と停止

安全学を考察するときに、機械安全に近いところで計装安全や燃焼安全などがあるがそれぞれに装置やアプリも異なり、安全の条件も異なる。機械安全の考え方は、「隔離」と「停止」の二つを原則として、危険源を囲って近づくと危険源を正しく確実に止めることを基本としている。

危険源をトラに例え作業者を女の子に例えて説明(図1参照)すると、トラがいても女の子がその場にいないならばリスクは発生しないが、トラと女の子が同じ空間に存在するとリスクは発生する。しかし、トラを檻に閉じ込めたり(隔離)トラを縛って動きを止めれば(停止)リスクは低減される。ただしこの場合、確実な檻と切れないロープで防護しなければリスクは残るのだが至極単純である。



『隔離の原則』 人間と機械を空間的に分離する
『停止の原則』 人間と機械を時間的に分離する

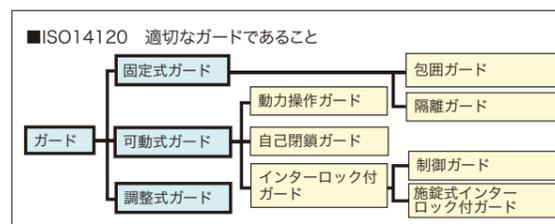


図1 隔離と停止

2.2 隔離の安全

危険源をガードで適切に囲うことに関しては、規格上でガードの種類と機能がISO14120(図2参照)で規定されており、十分な強度や取付け方法について言及している。次に、危険源までの接近可能な距離を考慮するため、ガードの高さや隙間に関してISO13857で規定されており、例えば距離ガードでは上肢の安全距離(柵の上から手を伸ばして)として危険源までの必要な安全距離が、低リスクと高リスクの場合で規定されている。下肢の安全距離については下部隙間(床から)の大きさ、また格子などがあれば開口部の大きさや形状によっても必要な安全距離が規定されている。

仕事の都合で工場の安全診断を行うことが増えてきたが、日本の狭い工場敷地事情から実際の現場で十分な安全距離を確保していることは稀で、多くは危険源に手が届いてしまい問題である。



(a) ガードの種類

身体の部分	図示	開口部	安全距離・sr		
			長方形	正方形	円形
指先		e ≤ 4	≥ 2	≥ 2	≥ 2
指の関節までの指		4 < e ≤ 6	≥ 10	≥ 5	≥ 5
		6 ≤ e ≤ 8	≥ 20	≥ 15	≥ 5
		8 ≤ e ≤ 10	≥ 80	≥ 25	≥ 20
手		10 ≤ e ≤ 12	≥ 100	≥ 80	≥ 80
		12 ≤ e ≤ 20	≥ 120	≥ 120	≥ 120
		20 ≤ e ≤ 30	≥ 850	≥ 120	≥ 120
		30 ≤ e ≤ 40	≥ 850	≥ 200	≥ 120
肩の基点までの腕		40 ≤ e ≤ 120	≥ 850	≥ 850	≥ 850
			≥ 850	≥ 850	≥ 850

1) 長方形開口部の長さが65mm以下なら、親指はストッパーとして動くので、安全距離は200mmまで減らすことができる
※表内の太線は、開口部のサイズにより制限される身体部位を示している。
※14歳以上の人に対する標準開口部のSrを示す。

(b) 開口部の安全距離
図2 隔離の安全

2.3 停止の安全

危険源に近づく時には確実に機械を停止することに関しては、アプリに合わせた適切なインターロックの選定が求められる。技術の進歩とともに安全機器の種類は増え、環境やアクセス頻度に合わせた選択肢も増えてきたが、その前にISO14119(インターロック規格)で求める要求事項について確認しておく、安全防護を目的としたインターロックでは、フェールセーフおよびフルプルーフな構造であることが求められる。

フェールセーフとは、「特定の障害モードが圧倒的に安全側であるようなアイテムの設計特性」をいい、故障や失敗が生じたとき、必ず安全側に作動する機能を示す。例えば、制御用リミット式スイッチと安全用ヒンジ式スイッチを比べると(図3参照)、制御用リミット式スイッチは想定される故障モードの接点溶着、スプリングの破損、プランジャの固着が発生した場合に接点は閉のまま危険側に制御される可能性が残る。一方、安全用のヒンジ式スイッチは、ドアを開ける力が直接カムを回してプランジャを押し下げ、接点を強制的に乖離することを構造が立証しており、障害が発生しても圧倒的に安全側に作動させることができ、フェールセーフな構造と位置付けられる。

フルプルーフとは、「間違った操作方法でも事故が起こらないようにする安全設計」をいい、人間工学的な観点以外に、インターロックスイッチの設計においては「容易に入手可能な工具備品により無効化ができない構造」を求めている。例えば、制御用リミット式スイッチの場合、プランジャを結束バンドやガムテープで固定することで容易に無効化を図れてしまうが、安全用のヒンジ式スイッチでは、同様の無効化を構造的にできない設計としている。安全用のスイッチとして最も一般的なタング式も基本的な構造はヒンジ式と同じである。

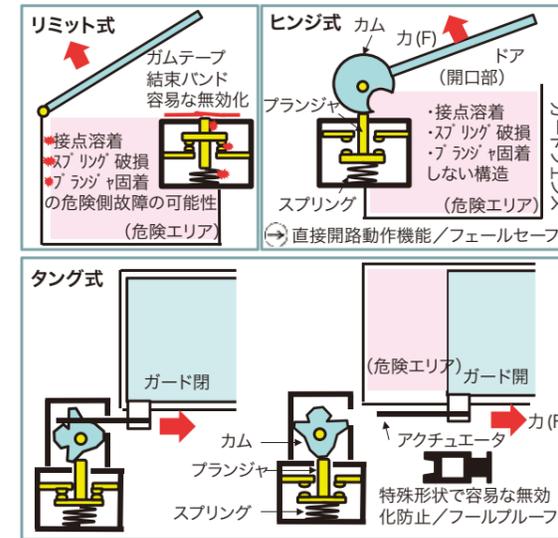


図3 フェールセーフ・フルプルーフな設計

2.4 安全確認型システム

ガードとインターロックの基本ができたところで、これらを組込んだ制御システム(非常停止回路)を構築する必要がある。

いかにフェールセーフでフルプルーフなシステム設計であるかが求められるが、基本システム構成には図4で示す安全確認型システムがあり、前段で説明してきた規格に準拠した部品を採用することで正しく止め、起動制御としては、始動ボタンによる作業意思と機械が安全である確認情報をANDの判断素子により判断し、正しく(安全に)起動することが重要である。

また、安全関連部をきちんと独立させることにより、非安全関連部において異常が発生した場合でも人に対する安全

は担保されることになる。何故ならば、非安全関連部での異常により機械が暴走しても、隔離と停止によりその時には危険エリア内に作業者が居ないので暴露しないこととなる。

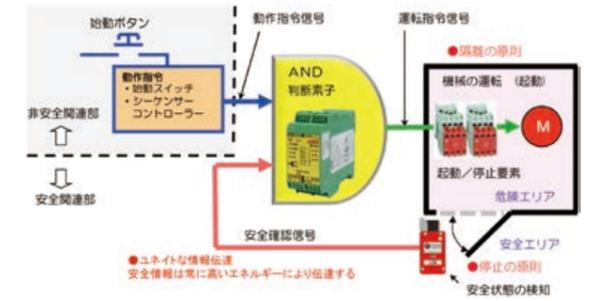


図4 安全確認型システム⁽¹⁾

3. アプリに合わせた安全機器の選定

ここからが本題であるが、最新の安全機器は多種多様になってきており、アプリに合わせた最適な安全機器の選択をするのが難しくなっている。そこで、まずは安全機器にはどのような分類があり、どのような種類・機能の物があるかを知ることが重要である。

3.1 様々な安全機器

ガードも含めて安全機器を細かく種類別に分類してみると表1のようになった。

ガード、インターロックスイッチ、制御機器、存在検知センサ、起動/停止機器、施錠となるが、使用される機械のアプリおよび環境、アクセス頻度などによって正しい選定を行うことと、それぞれの対応する規格の内容を把握し、正しい設置と妥当性確認が不可欠である。

表1 安全機器の種類

種類	機能概略	種類	機能概略
ガード	固定式ガード	包囲ガード/カバー	全ての方向に対してのアクセスを防止
	可動式ガード	隔離ガード/フェンス	危険区域の大きさや距離を利用して保護範囲を限定
		可動式ガード	ヒンジ、スライド等で固定、工具を使わないで開放
		動力操作ガード	人や重力以外の動力源の支援により動く
		自己閉鎖ガード	ワークや加工器具などは通過できるが、それが通過すると直ちに自動的に閉じる
インターロックスイッチ	制御ガード	ガード閉まで機械起動できない、ガード閉じると機械は自動起動するようなインターロック付きガード	
	調整式ガード	全体が調整可能、調整部は運転中は固定	
	インターロック付きガード	ガード閉まで機械起動できない、ガード開で機械停止	
	ドアスイッチ	タング式	防護ドアへアクチュエータ取付け
	電磁ロック式(施錠式)	防護ドア閉状態をソレノイドで保持	
存在検知センサ	ヒンジ式	防護ドアヒンジの回転で動作	
	非接触式	コード化リードスイッチ機構で非接触	
	ポルト式	ポルトを遮る時間を利用して遅延	
	プラグソケット式	2ピンプラグソケット直接連通	
	リミット式	プランジャ押し下げ強制的に接点OFF	
制御機器	キーシステム	メカのキーの受け渡しによるシステム(最初のキー抜き時に電源OFF)	
	ロックアウト/タグアウト	ロックアウト	インターロックスイッチ ロックアウト
	セーフティリレーユニット	非常停止	入力数(1,2)、出力接点増設用
	強制ガイド式リレー	強制ガイド式リレー	安全(停止)出力の増設
	強制ガイド式	強制ガイド接点の電磁開	安全(停止)出力の遅れ
安全確認型システム	光カーテン Type 2, Type 4	最小検出体14	最終端負荷を切り切り
	最小検出体20	手の甲検知	回転体を直接センサで検知
	最小検出体30	腕検知	モータの逆起電力を検出
	最小検出体300	体検知	機能安全規格で、電子部品/ソフトウェアによる安全立証ができた製品であること
	レーザー式エリアセンサ	レーザー光線により注意の範囲を監視	※AS1・デバイスネットセーフティ
非常停止	3次元ゾーン監視	安全カメラシステム	カメラ画像により危険エリアを3Dで認識
	マットスイッチ	加圧(体重、接触)を検知するセンサ	インバータ内でCT三相バランスを監視
	エッチセンサー	故障モードをモニタするコントローラとの組み合わせによるシステム	

3.2 ガードとインターロックの選定

ガードシステム規格ISO14120にガード選定のフローチャートがあるので図5にて紹介するが、次の項目の確認により選定されていく。

- ① 危険箇所への接近が必要か？
- ② 危険箇所への接近禁止が可能か？
- ③ アクセス頻度は？

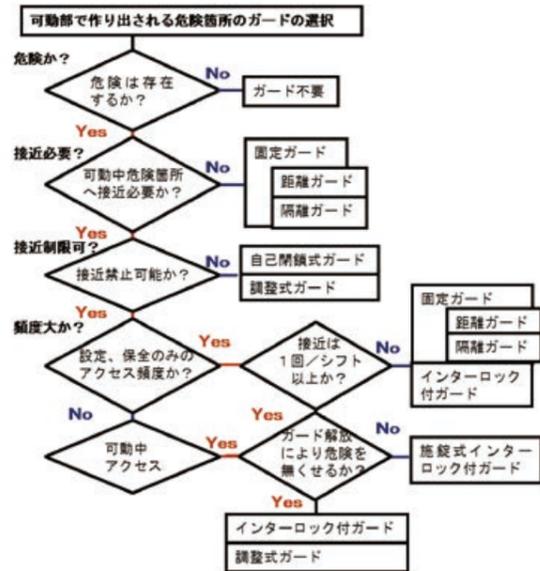


図5 ISO14120で示すガードの選定

また、インターロックの選定においては、確認必要項目を以下に抽出してみた。

- ① 機械はすぐに停止しますか？
- ② すぐに停止しない場合、停止時間は一定か？
- ③ 体全体が中に入りますか？
- ④ 緊急停止で機械破損の恐れはありますか？
- ⑤ 扉にガタつきはありますか？
- ⑥ スイッチは防水の必要がありますか？
- ⑦ 頻繁にアクセスしますか？

この確認によって適切なインターロックが何かは、図6を参照願いたい。YesかNoの選択で色のついたマスで機器が有効となる。

確認項目	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
①機械はすぐに停止しますか？	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
②機械はすぐに停止しない場合、停止時間は一定か？	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
③体全体が中に入りますか？	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
④緊急停止で機械破損の恐れはありますか？	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
⑤扉にガタつきはありますか？	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
⑥スイッチは防水の必要がありますか？	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
⑦頻繁にアクセスしますか？	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes

図6 インターロックの選定

4. アプリに合わせた安全機器の展開

日本の労働災害の状況を見ると、平成24年で119,576人もの災害届出(休業4日以上)がある。その多くを占めるのは転倒・転落(39%)の内容であるが、機械に起因する災害の比率では、対象となる製造業で28,291人(約24%)、その中で「挟まれ・巻込まれ」に起因する災害は11,175人(約43%)を占め、製造業における、挟まれ・巻込まれ災害をいかに技術的に削減していくかが大きな課題であり、アプリに合わせた安全機器の展開が重要になってくる。以降に10件の事例を挙げて展開を紹介していく。

4.1 ローラ回転部巻込まれ対策例1

ローラ状の回転部での巻込まれの対策としては、オーソドックスなものにトンネルガードがある。これは物理的に危険源の回転部まで手が届かないように安全距離をガードで設けるものであるが、開口部の隙間と距離をISO13857に基づき確認することと、保全時に頻繁にガードを取外すのであれば、そこにインターロックの設置が必要である。また、他の物理的な方法として邪魔板による方法、電気的にはエッジスイッチによる停止がある。両手がふさがっての作業における停止としては、足蹴りスイッチがある。

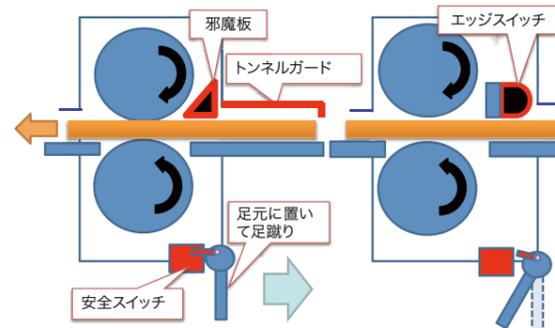


図7 ローラ回転部巻込まれ対策1

4.2 ローラ回転部巻込まれ対策例2

ローラ状の回転部での巻込まれの対策として、非常作業(掃除、給油、検査、修理)時に動かしながらの接近作業が必要な場合に、イネーブルスイッチを用いる方法がある。イネーブルスイッチは、軽く握った状態の時だけ回避可能な速度による運転を許可し、緊急時に人は握っている物を放すのではなく、逆に強く握ってしまう特性をも考慮した設計となっている。

このことは、改正安衛則第107条(平成25年10月施行)で従来の掃除、給油、検査、修理に加えて、新たに調整作業(原材料の目詰まり時の除去、異物の除去、不具合を解消するための一時的な作業や機械の設定)が加わり対象範囲が広がっている。要求事項は、ガードを開けるときには、操作モードをイネーブルスイッチON(有効)に切り替えて制限された速度を条件に、インターロックを無効としなければならない。

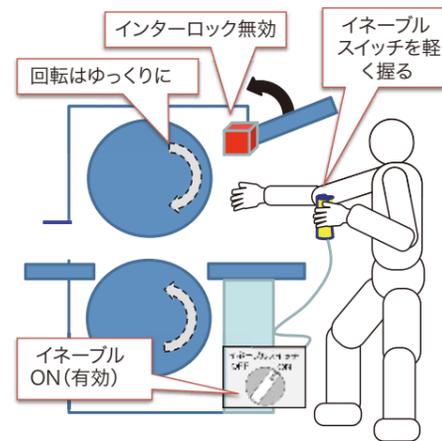


図8 ローラ回転部巻込まれ対策2

4.3 シート搬送ロール部巻込まれ対策例

ロール部の安全対策は、シート状ワークの送込/送出口の都合上完全に囲うことができなかつたり、保全や不具合対応を考えると、作業時にカバーを開けると停止するのは作業が成り立たないことが多く、そのため付加の保護対策として非常停止スイッチに頼ることが多くなる。

その場合、押しボタン式の非常停止スイッチではロール全長にわたる広範囲な危険源に対する対応が困難でありコストアップである。そこでロープ式非常停止スイッチを使用することで、どこからロープを引いても非常停止がかかるため問題を解決することができる。

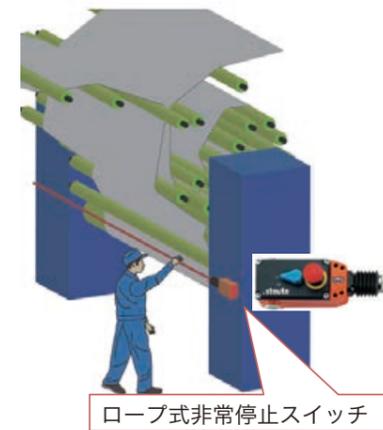


図9 シート搬送ロール部巻込まれ対策

4.4 装置内駆動部巻込まれ対策例

装置カバーをメンテナンスなどにより開口する際に、国際安全規格(ISO14119)に適合したインターロックスイッチによる確実な検出が要求されている。印刷業界の装置は、半径の小さなヒンジドアが多いが、標準的なトンゲ式のインターロックスイッチを用いると最小半径の関係でトンゲ(アクチュエータ)が挿入しづらく、振動やドア建付けの影響を受けやすい問題がある。そこで非接触式インターロックを使用することで、非接触式なので物理的な最小半径の制約は解消され、防水性や耐熱性を要求される環境においても有効である。

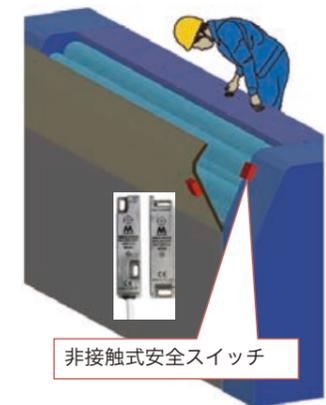


図10 装置内駆動部巻込まれ対策

4.5 工作機械の自動ドア挟まれ検知の例

工作機械などの自動ドアでは、挟まれ検知にライトカーテンやトルククラッチなどを使用することが多いが、制御性やクーラント液の影響を考慮すると難しい。このような場合に感圧エッジスイッチを採用することにより課題を解決できる。

エッジスイッチはブラケットにより開閉時に触れることはないように取り付ける。最近では角度や曲線のあるドア形状にも対応できるようになってきている。

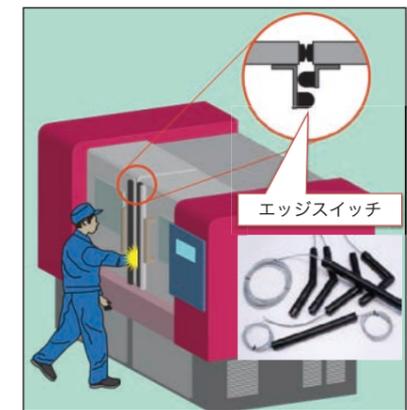


図11 自動ドアの挟まれ対策

4.6 搬送ラインの異なる環境対応の例

カバーができないコンベアなどの搬送ラインには、ロープ式非常停止スイッチを使用することが多いが、設置する環境によってはロープの温度変化による誤動作や、部品の腐食による影響が想定される。安全側(ライン停止)に働く機構であっても、不本意な停止は危険源への暴露頻度を増やしたり、生産性を下げってしまうことにつながり、それぞれの環境に適した仕様のスイッチを選定することが重要である。



図12 搬送ライン耐環境対応の対策例

4.7 衛生面・防水性・無負荷の対応例

食品機械は、使用される機器に衛生面や高圧洗浄に適応できる防水性が求められている。また、半導体装置はクリーン度を求められ、一般的に使用されるタング式安全スイッチでは、アクチュエータの抜き差し構造による摩耗粉や防水性に弱い問題から不向きである。一方、凸凹のないステンレスハウジングの非接触式安全スイッチは、要求を満たしている。

非接触式安全スイッチは他に、アクリル製のドアが多く採用されている包装機械などでも、開閉時に負荷のかからない構造なので適しているといえる。

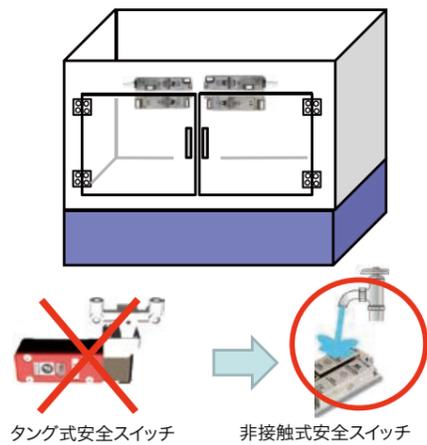


図13 衛生面・防水性・無負荷の対応

4.8 重負荷および広いエリアでの対応例

近年では、電磁ロック式安全スイッチがドアインターロックとして最も多く使用されるようになってきた。必要な時以外はドアがロックされていることは、不要な停止を防止することと生産性を維持するうえで利便性が高い。

電磁ロック式安全スイッチを選定する基準としては、アクチュエータ保持力がある。選定基準としては樹脂やアルミ構造材を枠とするようなドアには800~1500N、工作機械の鋼板ドアの場合には2000~3000Nが適切であるが、鉄鋼や粉砕機のような全体的な堅牢さが要求される特殊な環境には5000~10000Nの保持力があっても良い。また、屋外であったり身体ごと危険エリアへ侵入する場合には、内部からの緊急脱出ボタン機構なども要求される。



図14 重負荷・広いエリアへの対応

4.9 しくみを用いた安全確認システム⁽²⁾

安全機器のなかに、メカニカルなキーの受渡しによって、安全を確保するトラップキーシステムがある。このトラップキーシステムは、従来の電気的手法を用いた安全対策にくらべ、最初の段階で電源遮断を義務付けることから、複雑なシステム安全規格であるパフォーマンスレベルの計算が必要なく、既存設備の安全対策には最適である。

その考え方は、図15にあるように、ドアを開けるためには電源コンセントを抜かなければならず、機械を起動するためには、ドアを閉じないとコンセントが入り入れられないことを物理的なしくみで行っている。

日本では、まだ馴染みのない安全機器であるため少し説明を加えたいので事例に移っていく。

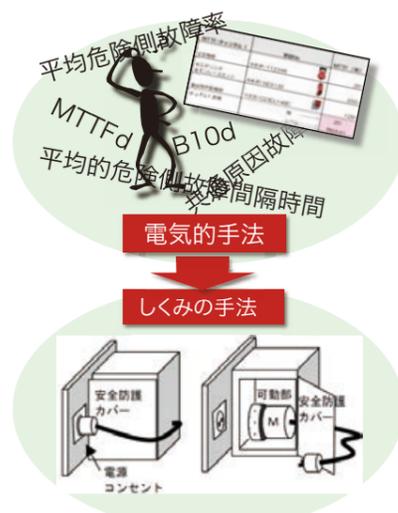


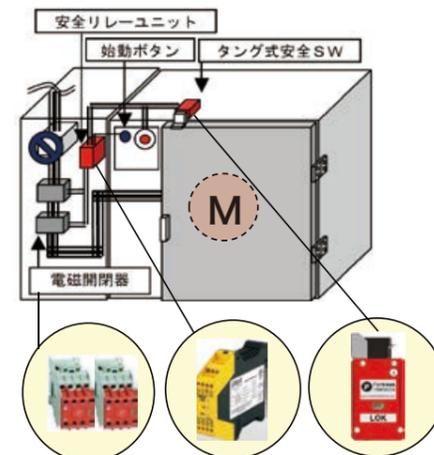
図15 しくみの手法

4.10 「電気的手法」と「しくみの手法」による方策

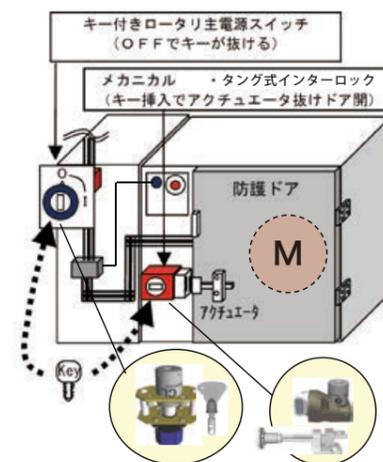
アクセス頻度を要求される場合や、一般的な非常停止回路としては(a)の電気的手法が採用される。(b)のしくみの手法が効果的なのは以下である。

- ・既存設備で複雑な安全機器の組み込みが困難
- ・設置環境が劣悪で電気的接点が使用できない
- ・防爆エリア

- ・広大領域で電気配線が困難
- ・電気的條件以外に油空圧バルブの条件も含む



(a) 電気的手法



(b) しくみの手法

図16 「電気的手法」と「しくみの手法」

4.11 トラップキーシステム「しくみ」を用いた例

蒸気と油圧と電気の異なるエネルギー源が三つある安全対策で、ガードで囲った危険エリアへの侵入箇所(ドア)が1箇所ある場合の事例である。

ドア内への侵入を行うには、以下の工程を行わなければならない。

- ①ロータリスイッチ ※電源遮断
主電源スイッチと連動した[A]キーを回すとキーを抜くことができ、同時に主電源はOFFする。
- ②レバー式バルブ ※蒸気遮断
蒸気用ボールバルブのレバーを閉じ位置へ回すとレバー軸の切りかけがボルトの前位置になり、蒸気は遮断される。
- ③ボルトインターロック
切りかけがボルト前に来る事により、[B]キーを回しボルトが飛び出てレバーの切りかけにはまり込み、キーを抜くことができる。
- ④レバー式バルブ ※油圧残圧解放

残圧解放レバーを開け位置へ回すと、レバー軸の切りかけがボルトの前位置になり、油圧の残圧が開放される。

- ⑤ボルトインターロックダブル
[B]キーを挿入し回し、[C]キーを回すと、ボルトが飛び出てレバーの切りかけにはまり込み、キーを抜くことができる。
- ⑥キー交換ユニット
[A]と[C]キーを挿入し回すと、[D]キーを抜くことができる。
- ⑦アクセスインターロック ※ドア開
[D]キーを挿入して回すと、アクチュエータが抜けドアを開けられる。

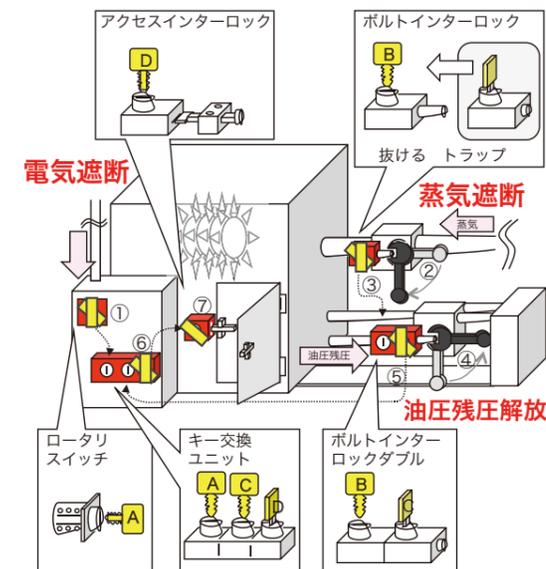


図17 しくみを用いた対策例

4.12 天井クレーンの挟まれ・感電対策の例

天井クレーンに関わる労働災害で最も多いのが、走行してきたクレーンに挟まれることと、トロリ線での感電である。主に、定常運転中よりも非定常作業中(点検作業)に発生することが多く、原因は作業場所が運転室から見えなくクレーン運転士と被災者との合図・連絡が適切にできなかった、監視人を配置しなかった、残存確認ができずに起動してしまったなどである。挟まれの場合の被災場所も乗り込み口であったり、クレーン走行箇所(ランウェイ)や、巻上げドラムであったり様々である。

安全対策であるが、第三者が不用意に起動できなくするために、トラップキーシステムを利用して(図18参照)、危険箇所への入口扉を開ける条件として、①クレーンの主電源OFFを条件にキーAが抜け ②キーAを持って入口扉のインターロックに挿入してキーBを抜く、このことにより扉を開けることが可能となる。また、作業者はキーB(セーフティキーとして)を持って危険エリアへ進入し作業を行うことにより、第三者の不用意な起動を阻止することができる。感電防止のためには、主電源OFFと動力線の接地を条件にして扉を開ける条件とすることも可能である。

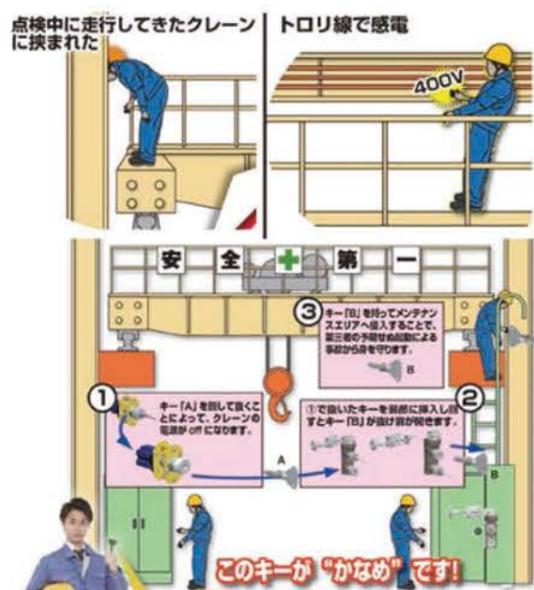


図 18 天井クレーンでの災害防止

<著者所属>
大竹 桂司 アズビルレーディング株式会社
営業推進本部安全営業部

なお、走行中の荷崩れ、転落、つまずきなどは、隔離と停止の原則による機械安全の技術が適応できず、教育と保護具と危険源排除に頼ることとなる。

5. おわりに

最後に、法規はもちろん規格に準拠することは企業倫理として重要であるが、現場で何が本当に危険であるかを見極め、安全性、経済性(利便性、目的適合性、費用対効果)を考慮したなかで、適切な安全対策を行うことが重要である。

アプリに適した安全機器では、製造現場における様々な危険源や作業に対して安全対策を行わなければならないが、不必要・不用意な停止を避け、できる限り生産性も維持することが、結果的に安全につながると考える。また、暴露頻度を減らす意味合いでも、作業者が関与しない自動化を目指すとともに、カバーの中にある給油口をカバーの外まで出したり、点検が必要な箇所は透明カバーとしてカバーを外さなくても目的が達せられるような創意工夫であったり、アプリ環境に最適な安全機器の提案を行っていききたい。

安全技術の情報では、複雑化して専門家でなければ使いこなせない機器や規格は、過剰で間違った安全対策になりやすく、本来安全は分かり易く誰でも使えるものであるべきと考え、今後も様々な安全機器・アプリ情報を提供していきたいと考える。

<参考文献>

- (1)安全技術応用研究会:安全構築総覧
- (2)安全技術応用研究会(1997)/TIRリスクアドバイザー石原立憲様

ICSのサイバーセキュリティへの取組み 今、生産制御システム(ICS)が狙われている!

Cybersecurity for Our Industrial Control System, Which is Now a Target for Attack

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	木内 誠 Makoto Kiuchi	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	田中 良則 Yoshinori Tanaka
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	関 英信 Hidenobu Seki	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	黒木 亮 Ryo Kuroki
アズビル株式会社 技術開発本部	小森谷 良明 Yoshiaki Komoriya		

キーワード
サイバーセキュリティ, ICS, オープン化, コンピュータ・ウイルス, マルウェア, 脆弱性, リモートアクセス, PSEC, CSSC, 製品セキュリティ認証, ISASecure, EDSA, SSA, SDLA, IEC62443

1996年に初めてオープンなICSとしてアズビル株式会社が開発した協調オートメーションシステム (Harmonas™)にもUSBメモリなどにより、ウイルスなどのマルウェアに感染するケースが散見されるようになった。さらに昨年、リモートアクセス機能を使った情報系からの不正侵入によるサイバー攻撃が発見され、新たな脅威が現実となってきた。azbilグループは、ICSのオープン化とともにサイバーセキュリティに対する活動を開始し、多くの対策を行ってきた。本稿では、それらの取組み内容と製品の高セキュア化開発による製品セキュリティ認証取得の成果について紹介する。

Cases have been reported in which the Harmonized Automation System—Dependable Open (Harmonas-DEO™), originally developed by Azbil Corporation in 1996 as the first open industrial control system (ICS), has been infected by a computer virus or other malware by means such as a USB flash drive. Moreover, last year a remote access cyberattack through the information network was detected. Serious new threats are therefore now a reality. Azbil, in addition to developing the open ICS, has been taking extensive preventive measures for ICS cybersecurity. In this article we discuss our efforts to develop a highly secure product, efforts that resulted in ISASecure Embedded Device Security Assurance Certification.

1. はじめに

1990年代後半から生産制御システム (ICS:Industrial Control System)がオープン化されはじめ、WindowsやEthernetが導入され、情報系と制御系の融合が現実化するようになるとともにICSに対するサイバーセキュリティの問題が起ころはじめた。情報系のサイバーセキュリティは、機密性>完全性>可用性の順に国家や企業の機密を守ることが優先されているが、一方制御系のサイバーセキュリティは、24時間365時間止まらないプラントのようにシステムを止めないように守ることが求められている。

当社の協調オートメーションシステム (Harmonas)は、それまでのICSでは専用OSを独自開発・使用してきたのを、

業界に先駆けて1996年に初めてWindows NTを採用し、ハイブリッドな協調オートメーションを具体化するものとして商品化された。

しかし、その顧客のシステムで初めてウイルス騒ぎが起きたのは、2001年に発生したNIMDA[®]であった。それ以来今日に至るまで様々なマルウェアが顧客の現場で発生するようになった。

マルウェアとは、一般に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であり、コンピュータウイルス、ワーム、バックドア、キーロガー、トロイの木馬、スパイウェアなどが含まれる。その都度数々の対策を顧客、当社双方で協力して行ってきたが、残念ながらマルウェアの発生がゼロになることはない。

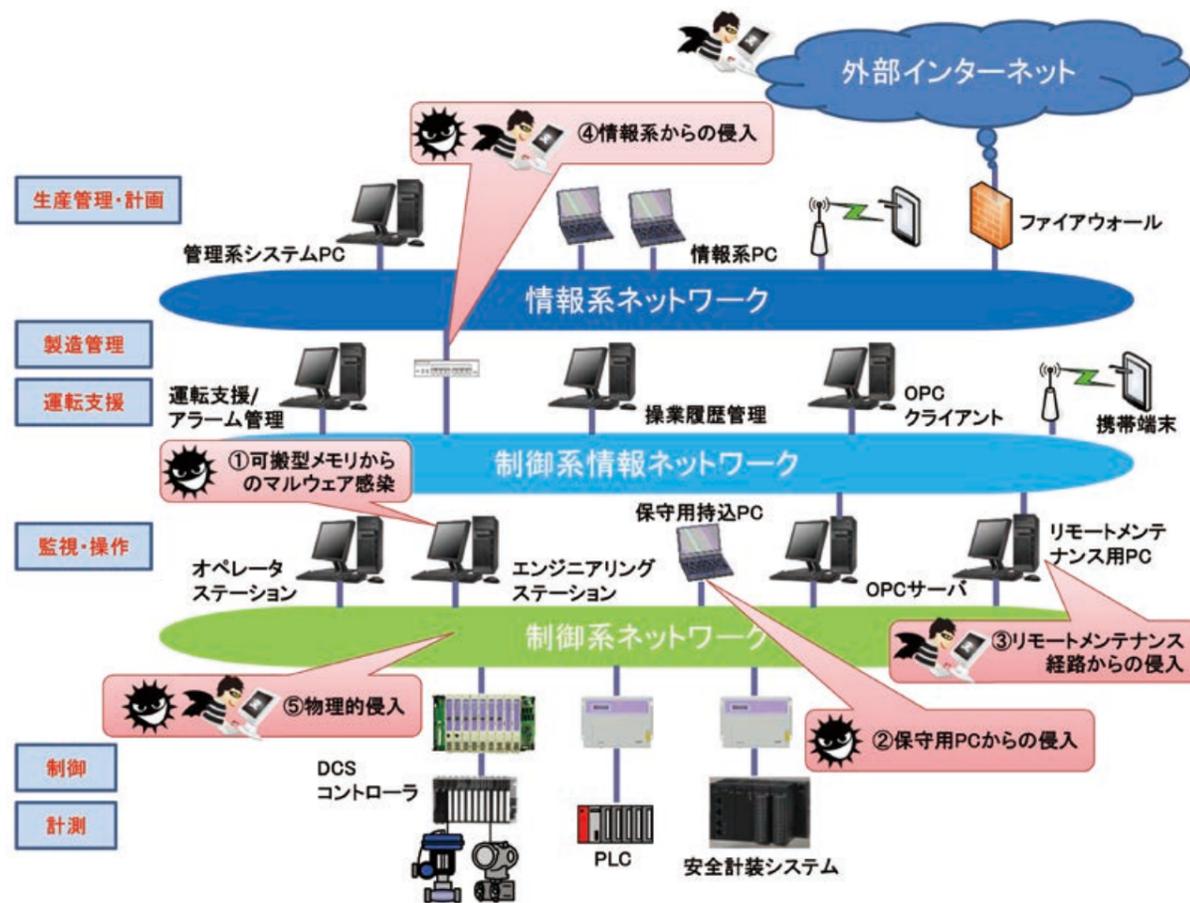


図1 ICSへのサイバー攻撃経路

本稿では、ICSサイバーセキュリティの現状と当社が取り組んできた活動について解説する。ただし、サイバーセキュリティへの最新対策技術の詳細を公開することは、残念ながら攻撃者を利することにもなるため、ここでは概要の解説に留める。

2. ICSのサイバーセキュリティ脅威とリスク

2.1 ICSへのサイバー攻撃経路ごとの問題

一般的にICSのセキュリティリスクとして考えられるサイバー攻撃経路は、図1に示す五つとされている。いずれも技術的な問題だけではなく、人の問題も抱えていることから、なかなか経路を遮断することができない。

(1) 可搬型メモリデバイスからの侵入

2001年以来当社の制御システムの顧客で最も多く発生したのは、記憶メディアの一つであるUSBメモリからウイルスに感染するというものであった。ICSの特性上、パフォーマンスや外部ネットワークとの接続上の問題から、ブラックリスト型ウイルス対策ソフトウェアの搭載が難しく、OSのセキュリティパッチを定期的に当てられないことや出処不明もしくは使用履歴の不明なUSBメモリを使用することなどの管理・運用対策が

不十分であったケースが多い。

(2) 保守用PC経由の侵入

ICSへの機器追加・変更、ソフトウェアの更新やトラブル対応の解析などのための常設や仮設の保守用PCに潜んでいたマルウェアが、ICSに感染したり、攻撃を仕掛けたりすることがある。これも実際に顧客の現場で発生しており、保守用PCのセキュリティ管理が不十分なことが原因とされている。

(3) リモートメンテナンス経路からの侵入

ICSのユーザーの中には、24時間365日継続した運転を必要とするため、夜中でもトラブル発生時にベンダが提供するリモートメンテナンスサービスを利用しているケースがある。リモートメンテナンスからの侵入事例はまだ報告されていないが、専用線とはいっても、実際には公衆ネットワーク網の一部を利用した回線であるのが一般的で、より高度な攻撃を行える攻撃者であれば、この経路からの侵入も技術的には不可能ではないとされる。また、サービスを提供するベンダ側のシステム構成やセキュリティ対策が重要なことは言うまでもない。

(4) 情報系ネットワークからの侵入

今後最もリスクが増大していくと言われるのが、情報系ネットワークからのICSへの侵入である。今や多くの先進的なICSは、制御系と情報系の融合というより一体として成り立っているものである。

市況の変化やエネルギー事情の変化をリアルタイムにICSに活かして最適生産を常に目指すためには、制御系を情報系から分離するわけにはいかない。

もちろん情報系にも、様々なセキュリティ対策を施しているのが実態であるが、今日の最新脅威は、その裏をかき不十分な対策についてサイバー攻撃を仕掛けてきている。

最近では、正規の文書やメールに添付して特定の相手のネットワークに侵入したり、フィッシングサイトにアクセス時にマルウェアをダウンロードさせたりするような標的型攻撃により、機密情報を盗む例が増えてきているが、もはや情報系には、何らかのマルウェアが潜んでいることを前提にシステム構成全体を考えたリスク管理をしなければならない時代になっている。最新のサイバー攻撃者は、侵入に成功してもそこでは悪事を働かせず、黙って次の標的を探しているのである。その標的の一つがICSであると考えられるのも当然のことになりつつある。

(5) 物理的侵入

ICSを構成する機器の設置環境を考えると一般的には考えにくいと言われる物理的侵入であるが、実際にはコントロールルームへの自由な出入りや、鍵がかからない機器・制御盤などの存在により、この攻撃も現実味を帯びてくる。パスワードで管理しているからといって安全であるとは限らない。最近情報系のインシデントで話題のように、内部犯行者が関わってくるとさらに脅威が現実的になってくる。

2.2 ICSでの具体的な被害

ある顧客のシステムは、サイバー攻撃によって、被害を受けたプラントの操業を止め、復旧までに数日を要したこともあった。また、2003年に発生したMS Blaster^{※2}は、Windowsの脆弱性を狙った攻撃であったため、セキュリティパッチをタイムリーに当てられない多くのICSが被害にあった。また最近では、国内のインシデント発生よりも海外での発生数が増えており、サイバーセキュリティの問題は、国境がなくなっている。

このような具体的な被害の例では、従来、情報系を狙っていたマルウェアが、たまたま制御系に紛れ込んだものがほとんどであり、直接制御系システムを狙っていたものではなかったと考えている。

ところが2010年に発見されたStuxnetは、イランの核燃料工場に使われていた特定のベンダの制御システムを狙い、そのウラン濃縮製造工程に大きな影響を与えるものであった。しかも、その侵入経路は複数、多段のバックアップを用意し、かつ最終目的に達するまで存在を隠すという手法を駆使し、情報系からの侵入後数カ月かかってICSに侵入するという壮大な計画を持ったものであった。最後にICSのエンジニアリング・ステーションに到達後、PLC (Programmable Logic Controller) に送られた制御ロジック

クソフトウェアに付随してPLCの制御を不正に操作し遠心分離機の回転数を異常に高め機器の故障に至らしめた。同時に監視用のオペレータ・ステーションの画面を偽装し、異常に気づかせないといった、スパイ映画まがいの攻撃をしたとのことであった。実際のサイバー攻撃の背景には、ウラン濃縮を阻止するといった国家レベルの戦略があったものと言われているが、我々がそれまで考えてきた対策の多くは、もはや役に立たなくなったとさえ認識させられるに至った。

3. 最新のICSセキュリティ脅威

昨年Stuxnet以来と言われるICSを狙った新たなマルウェアが発見された。このマルウェアは、HavexまたはDragon Fly作戦と呼ばれるもので、当初は欧米を中心としてエネルギー産業をターゲットにして登場したようである。ICSでは、異機種間でのデータ交換を効率化させるため、Microsoft社のDCOM (Distributed Component Object Model) と呼ばれるネットワーク上に分散設置されたコンピュータ上のソフトウェアコンポーネント間通信の規約を使い、1996年に登場したOPC (OLE for Process Control:当初名) というプロセス制御の標準規格を多用している。しかし、このDCOMの脆弱性を突いたサイバー攻撃がいまだに後を絶たない。Havexは、まず情報系ネットワークに複数の経路から侵入を試み、その系に繋がっているOPCクライアントを探し出し、それに繋がるOPCサーバの情報を攻撃者のサイトに外部漏洩させてしまうものである。既に多くのアンチウイルス対策ソフトウェアに定義ファイルが用意され、現時点では、情報系に侵入しても駆除されているはずである。しかし、このマルウェアにより、ICSのベンダの種類を問わない広範な脅威が存在しており、真のターゲットはファインケミカルや医薬品製造におけるレシビデータとも言われ、今後亜種の登場が危惧されている。

4. ICSサイバーセキュリティへの取組み

4.1 大規模プラント・ネットワーク・セキュリティ対策委員会

我が国でICSのサイバーセキュリティに対し、官民一体となって研究、対策を初めて行ったのは、1997年の通商産業省(当時)の「大規模プラント・ネットワーク・セキュリティ対策委員会(以下PSECと略す)」であった。当時はまだ実際のICSではウイルス発生やマルウェアによるサイバー攻撃は発生していなかったが、情報系システムではそれらが日常的になりつつあり、制御システムにおける来たるべき脅威に対し、プラントの運転、制御、管理を対象にして、調査・研究を行った。委員会は図2のような構成をとっており、当社も多くの分科会・ワーキンググループに参画した。

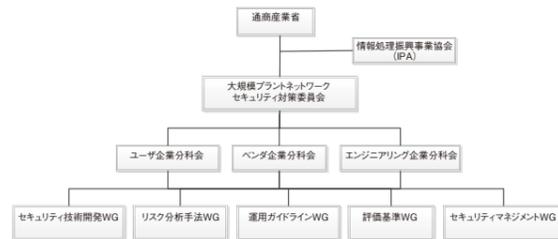


図2 PSECの組織図

本委員会では、クラッキングおよびサイバーテロリズムに関して以下の定義を用いて活動した。

- ・クラッキングとは、正規の認証を経ずにコンピュータ・ネットワーク・システムに悪意を持ってアクセスを試みること
 - ・サイバーテロリズムとは、ネットワークを通じて政府や産業に対して行われる敵対的な行動であり、大規模で組織的な不正アクセスを試みること
- また、コンピュータ・セキュリティに関する意図的な脅威の目的として
- ・国家転覆や社会攪乱目的
 - ・脅迫、恐喝などの営利目的
 - ・産業スパイなどのビジネス目的
 - ・怨恨による復讐目的
 - ・趣味(達成感、優越感)目的

これらが、今日のICSにおいて正に現実の脅威になりつつあることを改めて認識させられる。

三つの分科会では、それぞれ下記のような活動を実施した。

(1)ユーザー企業分科会

- ・全委員が共通基盤の下で議論を進めるための、国内各ユーザー企業のシステム構成に即したモデル・システムの構築
- ・委員相互の理解を深めるための用語の統一
- ・内外からの脅威に対して「防御すべき項目」のリストアップ
- ・ユーザーの立場からの運用管理要件の検討
- ・ベンダやエンジニアリング企業への要求事項の検討

(2)エンジニアリング企業分科会

- ・HAZOP, FTA, JRAMなどのプラント・リスク分析手法のネットワーク・セキュリティリスクへの応用
- ・ネットワーク・セキュリティのリスク分析を「プロセス・セキュリティ・エンジニアリング」としての作業フロー化

(3)ベンダ企業分科会

- ・外部からの侵入方法とセキュリティ侵害事象との関連の分析
- ・侵入経路別のFTA脅威分析
- ・侵入経路別セキュリティ対策の提案
- ・新規セキュリティ技術開発の提言

当社が参加した活動の中には、ICS設計時におけるセキュリティ要件を明らかにするというセキュリティ・マネジメントワーキンググループがある。ここでは、情報セキュリティの評価認証の分野で国際的な相互認証を行う動きであった共通・クライテリア(ISO/IEC15408)の枠組み

を参考に、これをICS分野に適用しようという試みであった。当時欧米各国では、主に軍事調達や政府調達を対象として、各国固有のセキュリティ評価基準を国際統一基準にしようという動きがあったが、それをICSの分野に適用拡大するという考えは、PSECが初めて試みたのではないかと考える。

さらに当社が参加・貢献できた活動の中には、世界で初めて実施されたICSへのサイバー攻撃実験がある。当時はまだICSへのサイバー攻撃の実例はなかったため、情報系への攻撃例を真似てユーザー企業分科会がまとめた「防御すべき項目」が守られるのか、いろいろな観点で実験を行った。その結果、大きな脆弱性と攻撃の可能性のある領域が判明し、報告書(非公開)を作成した。これらを元に、その後ベンダー各社は、ICSの対策開発に乗り出す契機となった。

PSECは継続的な組織ではなかったため、国や関係団体への提言を中心とした報告書をまとめた後、解散された。最終報告書の今後の課題には、以下の四つを掲げた。

- ・セキュリティに対する理解を啓発する活動
- ・セキュリティ問題を継続的に取り扱う機関の設置
- ・実証的な横展開の活動
- ・その他の研究課題(分析手法などの研究課題セキュリティ評価の定量化などの理論研究課題、プラント運用におけるセキュリティレベル向上のための必要な改善策の研究課題など)

しかし誠に残念ながら、日本では官民一体となった活動はその後しばらく行われなかった。そしてその後、欧米でICSに関するセキュリティ対策のための規格化・標準化を行う団体が組織化され、それ以後我が国がICSのサイバーセキュリティで世界をリードするチャンスは失われてしまった。

当社は最終報告書で提案された情報系と制御系の間に設置するファイアウォールやOSの不要なサービスを停止するなどの開発を行った。さらに一時USBメモリを制御システムで使った際にDOWNAD^{*3}といったウイルスに感染するというインシデントが多く発生した時期があったので、物理的な対策、ウイルス対策ソフトウェアの適用や適切な使用・運用管理により、顧客でのインシデント発生はかなり抑えられるようになった。

4.2 制御システムセキュリティセンター(CSSC)

(1)CSSC設立に参画

2.2で述べたように2010年になってそれまでのウイルス騒ぎとは異なるICSを直接狙うサイバー攻撃が初めて現実の脅威となったことから、我が国では経済産業省が2010年12月に「サイバーセキュリティと経済研究会」、2011年10月に「制御システムセキュリティ検討タスクフォース」を立ち上げ、社会の重要インフラを守るために制御システムのセキュリティ確保が必須であるとの提言をまとめた。さらに2012年3月には、「技術研究組合制御システムセキュリティセンター」(以下CSSCと略す)を設立し、恒常的な組織として研究開

発、普及啓発、人材開発、評価認証、標準化などを行うこととし、東日本大震災への復興を支援するために、減災・復興を目指されている宮城県多賀城市に東北多賀城本部を設置した。多賀城市は、奈良時代から外敵から守る要害として設置された国府があったところで「守りの都市」でもある。



写真1 CSSCの玄関

当社ではこの組織化を契機に「安全と安心を提供する」企業理念に沿った活動・貢献ができることから、発起人会から参画し、積極的に活動することとし、理事会、運営委員会と四つのすべての委員会および研究開発部に参加している。

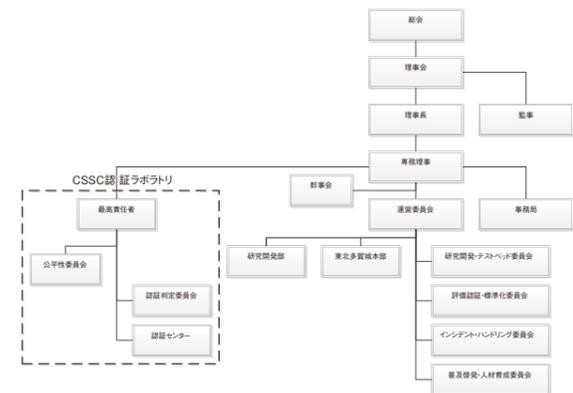


図3 CSSC組織図

(2)テストベッドを納入

CSSCでは上記の活動を行うため、制御システムと模擬プラントから構成されるテストベッド(名称:CSS-Base6)を構築した。現時点では、9種類のテストベッドが用意され、電力、ガス、化学、組立加工、ビルなどの各業界に対応した様々な研究開発や普及啓発に利用されている。

当社は、化学分野のプロセスオートメーションシステムにIndustrial-DEOTMを納入し、またガス分野にSCADA+PLCシステムを納入した。

(3)研究開発に参加

情報系セキュリティの分野では、大量導入によってコスト的にペイできるツールや機器が比較的豊富に市場にあるが、ICSの分野で使われているOSや通信プロトコルは固



写真2 CSSC納入のIndustrial-DEOシステムと化学模擬プラント

有なものも多く、なかなかセキュリティベンダに開発してもらえない悩みがある。そこでCSSCでは、研究開発予算を使ってそういったICS固有の対策に適用可能なツールや機器を独自に開発している。またCSSCでは、世界中のいろいろなセキュリティ対策製品が、実際のICS分野に有効であるかどうかの検証もCSS-Base6のテストベッドを使って行っている。これも海外の他の組織にないユニークな特徴である。

当社は独自に委託研究開発に参加するとともに、他社が研究開発の検証する際にテストベッドのノウハウを提供し貢献するという二つの方法で参加している。CSSCの独自開発の中にはユニークな製品があり、実用化に近づいているものもあって大いに期待している。

(4)普及啓発・人材育成に参加

経済産業省では、重要インフラとして定めた分野のうち、電力、ガス、化学、ビルの4分野でサイバーセキュリティ演習を実施している。2013年5月のCSS-Base6開所と同時にそれらの実施運営をCSSC東北多賀城本部に集中し、効果的な演習となるようCSSCが運営協力している。当社も化学、ガスの分野で参画し、Stuxnetの模擬、最新の脅威への対策の提案などを演習の場で体験できるようシナリオ構築などを提供してきた。この演習は、重要インフラ各分野の事業者を対象に実施されており、脅威と対策を体験・演習できるものであり、CSSCが実施した事業の成果である。2014年度のサイバー演習は、12月から2015年2月にかけて実施され、3章の「最新のICSセキュリティ脅威」で説明したマルウェア攻撃を取り込んだタイムリーな演習を実施した。

4.3 アズビル セキュリティフライデー

当社がICSに対するサイバーセキュリティの分野で他社にない特徴は、アズビル セキュリティフライデー株式会社というグループ会社を有することである。この会社の詳細紹介は、本書の別稿に譲るが、社内ベンチャー起業提案制度から生まれたこの会社は、ICSやITの世界で独特なサイバーセキュリティ対策製品を開発・販売している。現在、前述のCSSCのCSS-Base6のテストベッドのいくつかにアズビ

ル セキュリティライダーのサイバーセキュリティ対策製品が採用され、サイバーセキュリティ演習に寄与すると同時に研究開発の検証にも貢献している。

5. 製品セキュリティ認証への取組み

今や制御システムの安全運用には、サイバーセキュリティへの対策なしには考えられない時代が到来した。そのためには制御システムをどのように設計・構成し、どのように運用・保守するか、そのライフサイクルを通じて対策を講じていかなければならない。

その拠り所となるよう考えられたのが、セキュリティ認証制度である。現時点ではカナダのWurldtech社のような私企業が認証するものと業界団体であるISA (International Society of Automation)が規定する規格に基づくISA Secureセキュリティ認証が存在しているが、ゆくゆくはIEC62443の認証制度に移行していくことが考えられる。CSSCでは、評価認証・標準化委員会による、

- ・評価・認証で利用できる国産ツールの開発
- ・制御システム機器のパイロット認証の実施
- ・評価・認証基準の策定
- ・評価・認証要員の育成

を経て、CSSC認証ラボラトリー (CSSCの独立下部組織)が、ISASecureのEDSA (Embedded Device Security Assurance) 認証作業を日本で実施できる組織として認定され、2014年4月から認証が正式に開始された。

さらに続いて、ISASecureに規格化されたシステムレベルの認証であるSSA (System Security Assurance)とSDLA (Security Development Lifecycle Assurance)のパイロット認証が2015年4月から募集を始め、夏頃から認証が開始される見込みとなっている。

(1)EDSA認証とは

EDSA認証は、

- ・通信ロバストネス試験: Communication Robustness Testing (CRT)
- ・機能セキュリティ評価: Functional Security Assessment (FSA)
- ・ソフトウェア開発セキュリティ評価: Software Development Security Assessment (SDSA)

の三つの試験・評価項目から構成され、EDSA認証を取得するためには、この三つすべてに合格する必要がある。

・CRTは、デバイスの堅牢性を評価する試験であって、具体的には、組込み機器 (DCSコントローラやPLC)へのネットワーク・プロトコル実装が、ネットワークから受信した異常または意図的な悪意のあるトラフィックに対して、自分自身および他のデバイス機能を防御する程度をツール使って測定する。不適切なメッセージ応答、またはデバイスが重要サービスを適切に実行できないと、デバイス内部の潜在的なセキュリティ脆弱性の存在を示す。

現在はまだTCP/IPやUDPなど六つの汎用プロトコルのみが試験対象であるが、今後業界標準やベンダ標準のプロ

トコルも試験対象として拡張が計画されている。

・FSAは、対象機器のセキュリティ機能が十分であるかアセスメントするもので、実機テストと開発ドキュメントの審査で行われる。要件には、七つのカテゴリと83個の要求事項があり、取得するISASecureレベルに応じて満たすべき要求事項が異なる。

・SDSAは、対象製品の開発プロセスがセキュアに行われているか監査するもので、主にしくみの文書化と成果物の審査で行われる。要件には、12の活動フェーズと各フェーズに対する合計169個の要求事項があり、取得するISASecureレベルに応じて満たすべき要求事項が異なる。

CSSC認証ラボラトリーが認証機関となる以前は、米国の認証機関しか存在せず、すべての開発ドキュメントを英文で用意し、英語で説明する必要があったため、日本企業の製品認証はなかなか困難であった。しかし、これからは日本語での対応が可能となったため、認証促進されることが期待される。なお、ここで認証された製品は、ISASecure認証製品として相互認証され、世界で通用する認証になる。

(2)DOPCIVの認証取得

現在当社のICS分野での基幹システムであるHarmonasやIndustrial-DEOの主力コントローラはDOPC™IVといい、これはCPUを三重化し、通信ネットワークを二重化した高信頼なプロセスコントローラである。



写真3 DOPC IVの外観

当社は、日本でもCSSC認証ラボラトリーでEDSA認証の取得が可能となったことから、「安全と安心」を顧客にお届けするため、ICS分野での基幹システムであるHarmonasやIndustrial-DEOで使われるプロセスコントローラDOPCIVの認証を取得することとした。そのため、社内に認証取得推進タスクと開発プロジェクトの二つを発足させ、認証取得の準備を開始した。認証取得推進タスクは、まず規格や評価方法の理解と評価ツールの準備から行った。約1年かけて認証取得ガイドラインを作成し、どんな製品でもこのガイドラインに基づいて開発プロセスを構築すれば、

認証取得申請の準備ができるようにした。2014年1月にはCSSCによるEDSA認証の公開説明会が開催され、4月のCSSCの正式認証受付開始と同時に申請を行い、各種開発ドキュメントの整備を始めた。また、認証推進タスクの活動の結果、従来のISO9001ベースの業務標準やマニュアルの多くの改訂が必要になったことがわかり、高セキュアな対策が求められる製品の企画、開発、評価、保守、品証といったすべてのライフサイクルにわたって対応できるようにした。

認証要件の中には、製品の脅威分析を行ってそのリスクを評価し、適切な処置が求められているものがある。これらを一つひとつ解決していく地道な開発作業が始まった。一例を挙げると、FSA要件の一つに不要な通信ポートやサービスが閉じられていることというのがある。DOPCIVでは、一般のユーザーは使用できないものの、製品開発者のみ使用できる通信ポートが存在していた。これに対する脅威分析の結果、これは閉じるべきとの結論となり、その開発・対策を実施した。

その後約1カ月間におよぶ試験と審査を経てようやく認証取得に至った。2015年初めには、ISASecure (<http://www.isasecure.org/End-User-Resources.aspx>)とCSSC認証ラボラトリー (http://www.cssc-cl.org/jp/certified_devices/index.html)のホームページでDOPCIVの認証書を閲覧できるので是非参照されたい。

下記の写真4は、2015年2月に当社本社にて実施されたEDSA認証書授与式の模様である。



写真4 EDSA 認証書授与式の模様

6. おわりに

以前のICSではハードウェアからOS、ソフトウェアまで自社で開発することが当たり前があった。しかし、時代の要請とともにシステムをオープン化して情報系と一体となったICSは、コストダウンや拡張性の拡大に伴い、またたく間に主流となった。しかし、このパンドラの箱を開けたため、サイバー攻撃の対象になってしまった。情報系のセキュリティとは特性が異なるため、同じ対策を講じられないことが多くあり、現在業界を挙げてサイバーセキュリティ

の対策を進める機運が急速に高まっている。当社は情報セキュリティ大学院大学に聴講生を毎年多数派遣し、セキュリティ専門知識を持った制御エンジニアを育成し、底上げを図るとともにDOPCIVで取得したEDSA認証のノウハウを活かして他の製品にも高セキュア開発手法を適用していく予定である。そしてシステムレベルのSSA認証取得も考慮しながら、さらに高セキュアな製品を顧客に提供し、「安全と安心」を提供する「人を中心としたオートメーション」の具現化にこれからも注力したい。

<注記>

*1:NIMDAとは、ファイル共有や電子メールを攻撃経路として侵入するワームの一種である。感染するとコンピュータのパフォーマンス低下、ネットワークの混雑を起すため、HMIのリアルタイム監視に影響した。

*2:MS Blasterとは、Windowsのファイル共有などで使われるTCP135番ポートにアクセスし、「DCOMのバッファオーバーフロー」と呼ばれる脆弱性を利用してコンピュータに侵入するワームの一種である。Microsoftのセキュリティパッチが当てられていないコンピュータをネットワーク上で検索し、そのコンピュータに侵入する。感染するとOSの一部停止や再起動が発生し、HMIが正常な監視制御を継続できなくなった。

*3:DOWNAD (別名:Conficker)とは、Windowsの脆弱性「MS08-067」を狙って感染拡大を行うワームの一種である。亜種が多く登場し、未だに感染が後を絶たない。感染すると遠隔操作されたり、機密情報が漏洩したりした。情報系のネットワークに接続しないICSも被害にあった。また、DOWNADは、パスワード解析機能を持ち、安易なパスワードは盗まれてしまう。パスワード変更ができなかったり、変更頻度が低かったりするとICSも被害を受けることとなった。

<参考文献>

- (1)「大規模プラント・ネットワーク・セキュリティについて」～重要システムのサイバーテロリズム・クラッキング対策のあり方～最終報告書、平成12年3月、大規模プラント・ネットワーク・セキュリティ対策委員会
- (2)技術研究組合制御システムセキュリティセンターのWebサイトから引用
<http://www.css-center.or.jp/>

<商標>

- ・Harmonas, Industrial-DEO, DOPCは、アズビル株式会社の商標です。
- ・Windowsは、米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標または商標です。
- ・Ethernetは、富士ゼロックス株式会社の商標です。

<著者所属>

木内 誠 アドバンスオートメーションカンパニー
開発1部
田中 良則 アドバンスオートメーションカンパニー
開発1部
関 英信 アドバンスオートメーションカンパニー
開発3部
黒木 亮 アドバンスオートメーションカンパニー
開発1部
小森谷 良明 技術開発本部商品開発部

制御システムに侵入したマルウェアの活動を検出する技術の開発

A Technique for Detecting Malware Activity in Industrial Control Systems

アズビル セキュリティフライデー株式会社 有元 伯治
Michiharu Arimoto

アズビル セキュリティフライデー株式会社 佐内 大司
Daiji Sanai

キーワード

デコイサーバ, セキュリティ, マルウェア, サイバー攻撃, 制御システム

制御システムに対する高度なサイバー攻撃への対策として、マルウェアが制御システムに侵入していることを前提としたシステム構築が必要となっている。制御システムをサイバーセキュリティに考慮し運用していくためには、「気づき」が最も重要なポイントである。「おとり方式」によってマルウェアの活動を検出する方法が、制御システムに「気づき」を与える仕組みとして有効である。「おとり方式」を採用した制御システム向けのデコイサーバを開発したので報告する。

To counter sophisticated cyber-attacks on control systems, it is necessary to give the control system a structure that assumes the intrusion of malware. For cyber security, "noticing" while the control system is operating is the most important point. The "decoy method" is an effective way of enabling the detection of malware activity by the system. Here we report on our newly developed decoy server for control systems.

1. はじめに

2010年6月、イランの原子力プラントが高度なマルウェア(コンピュータウイルス)の攻撃を受け、大きなダメージを受けたことに端を発し、制御システムセキュリティが国家的課題と位置づけられた。2014年11月に成立/施行されたサイバーセキュリティ基本法では、「重要インフラにおける情報セキュリティ確保」が基本施策としてあげられ、2020年東京オリンピックに向けて本格的なサイバーセキュリティへの取組みが始まろうとしている。2014年度に国が設定した重要インフラは、情報通信、金融、航空、鉄道、電力、ガス、政府・行政サービス(地方公共団体を含む)、医療、水道、物流、化学、クレジットおよび石油の13分野である。ここにはazbilグループが事業対象としているオートメーションの分野が含まれており、azbilグループにおいても重要インフラや制御システムのセキュリティが重要な課題になっている。

2. 制御システムのセキュリティリスク

制御システムのセキュリティ問題がクローズアップされるようになった背景には、制御システムが情報系と同じオープンシステムを利用し始めたことが大きく関係している。具体的には、今まで専用のハードウェアとして作られていた制御装置が、パソコンや汎用コンピュータ上のソフトウェアとして実装されようになった。そして管理用周辺機器を含めた多くの制御機器がパソコン上のソフトウェアとして提供され、制御システムはパソコンなしには動かないものも多くなってきた。制御装置間を接続する手段も、今までのメーカー独自の専用プロトコルやRS-485などのシリアル通信接続から、イーサネット上のTCP/IPへと変わった。これによって、ベンダー間の接続が容易になり、マルチベンダーの制御システムが手軽に構成できるようになった。さらに、近年では生産情報や工場のエネルギーを見える化するニーズ

の高まりから、制御システムと業務系ネットワークが接続されるケースが増えている。これは主に、業務システム側から工場側のシステムデータをモニターすることに限定されているが、確実に、業務システムと制御システムの接続が進んでいるのである。

このような状況の変化によって、制御システムはマルウェア（コンピュータウイルスなどの悪意のあるプログラム）への感染というセキュリティリスクを負うことになった。想定される主な感染経路は次のようなものがある。

- (1) 業務ネットワーク（オフィスネットワーク）に侵入したマルウェアが、モニタリング用のネットワーク経由で制御システムに感染を拡大する。
- (2) マルウェアに感染したエンジニアリング用のパソコンを、メンテナンス作業のために制御システムに接続することで、制御システム内にマルウェアが拡散する。
- (3) マルウェアに感染したUSBやCD-ROMなどのメディアを、現場作業者が制御システムに接続してしまい、制御システム内にマルウェアが拡散する。

3. マルウェア対策の必要性と難しさ

制御システムは、従来、他のネットワークに接続されていないクローズドシステムであったことから、アンチウイルスソフトウェアの導入は不要と考えられ、積極的には行われてこなかった。しかし、オープン化の流れの中で、もはや「クローズドシステムである」という考え方はできなくなり、制御システムへのアンチウイルスソフトウェアの導入が急務となっている。一方で、情報系システムの実情を見ると、マルウェアは日増しに高度化し、その種類も日に数万単位で増えていて、アンチウイルスソフトウェアによるウイルス対策は既に破綻しはじめている。現在のパソコン用のアンチウイルスソフトウェアの検出率は20%前後まで低下しており、アンチウイルスソフトウェアを導入したところで、マルウェアのほとんどが検出できないのである。実際にイランの原子力プラントを攻撃したStuxnetというマルウェアは、攻撃当時のアンチウイルスソフトウェアでは検出できなかった。アンチウイルスソフトウェアの導入は必須だが、これにより完全にマルウェアの攻撃を防御することはできなくなっている。この傾向は、今後さらに進むことは確実で、情報システムと同様に、マルウェアが制御システムに侵入していることを前提としたシステム構築が必要となっている。

4. 制御システムでの本当のセキュリティ課題「気づき」

稼働している制御システムのセキュリティでは、情報系システム向けのセキュリティでは対応が難しい部分がある。その中の大きな課題として「気づき」がある。

生産現場では、日常的に様々なトラブルや異常が発生している。このトラブルへの対応のために、保全担当者が現場でシステムを監視し、不具合が発生すれば復旧作業を行っている。過去の豊富な経験と知識から、トラブル

シュートの手順ができあがっており、現場では日々これに従って作業が行われている。

では、仮に制御システムがマルウェア侵入によりサイバー攻撃を受けた場合を考えてみることにする。その場合、誰かがサイバー攻撃であることを通知してくれる訳ではない。例えば、温度が適正値より上昇してしまっただけの場合、現場の保全担当者は、従来のトラブルシュートに則って、機器の交換や調整を行うであろう。サイバー攻撃であることなど全く疑わない。現にStuxnetによるイランの原子力プラントへのサイバー攻撃の際、現場では攻撃によって壊れた遠心分離器の交換作業をひたすら繰り返していた。つまり過去に全く経験したことがないサイバー攻撃については、トラブルシュートがなく、これに気づくことすらできないのである。

もし不具合の原因がサイバー攻撃であった場合、情報セキュリティの専門家が調査を実施しない限り、サイバー攻撃が原因であったことには気づけないのである。これは、今までの現場のトラブルシュートとは別のフローでの対応が必要であり、サイバー攻撃の調査に移行できるトラブルシュートを作らなければならないことを意味している。我々は、制御システムにサイバーセキュリティを考慮し運用していくためには、この「気づき」が最も重要なポイントだと考えている。つまり発生したトラブルの原因が、「サイバー攻撃かもしれない」ことにいち早く気づく仕組みが必要である。そして、その「気づき」の仕組みをどのように提供するかオートメーションに取り組むazbilグループの課題である。

5. 制御システム特有の制約条件と目指すモデル

トラブルの原因がセキュリティ問題かもしれないと疑う「気づき」を与える仕組みを制御システム向けに開発する場合、そこには情報系とは異なる制御システム特有の課題がある。

- (1) 制御システムでは、24時間、365日の連続稼働が行われていることが多く、容易にシステムを停止できない。稼働中のシステムに対してセキュリティ対策を施すことはとても難しく、結果として対策ができない。
- (2) 制御システムに対してエンドユーザーがセキュリティ対策を施した場合、制御ベンダーはシステム動作の保証をしない、あるいは対策を施すことさえ禁止されているというケースがある。
- (3) 制御システムにセキュリティ対策を加える場合、制御システムの動作に悪影響が出ないことを事前に十分に検証する必要があることから、セキュリティ対策の実施には長い時間が必要になる。

では仮に「気づき」の機能が制御システムに提供できた場合を考えてみる。例えば現場で発生しているトラブルがセキュリティの問題かもしれないと疑った場合を想定してみる。その場合でも、セキュリティ問題の調査は簡単には進めることができない。なぜならば、セキュリティ問題の原因究明には、非常に専門的で高度な知識が必要とされるからである。セキュリティ専門家による調査や分析が必須で、

セキュリティ専門家に調査を依頼しなければならないのである。だからといって、セキュリティ専門家に調査を依頼したとしても、セキュリティ専門家は制御システムの基本的な動作に関する知識すらなく、制御システムに手を加えるような深い調査を実施することはできない。つまり制御システムのセキュリティ問題は、セキュリティ専門家でも調査ができないという現実がある。

このように、制御システムには特有の制約条件があるので、「気づき」を提供するシステムの開発にあたっては、下記の条件を目標として設定した。

- (1) 既存の制御システムで利用できること、また、いつでも着脱できること
- (2) 制御システムの稼働に影響を与えない技術であること
- (3) 未知のマルウェアの活動であってもいち早く検出できること
- (4) セキュリティ専門家に原因究明の調査を依頼できる仕組みを提供すること

我々は、様々な視点から検討した結果、「おとり方式」によってマルウェアの活動を検出する方法が、制御システムに「気づき」を与える仕組みとして有効であると判断した。おとり方式とは、制御システム上に、攻撃されやすいデコイサーバ（おとりPC）をあえて用意して、そこへの攻撃を監視し、不審なアクセスを検出するという方式である。マンションを例にして、おとり方式をわかりやすく説明する。

例えば、オートロック付きのマンションがあり、空き巣が何らかの方法でマンション内に侵入してしまったとする。空き巣は、鍵を掛け忘れていた部屋を探し出し、中に侵入し、盗みを働こうとするであろう。ここで、一つの部屋を「おとり部屋」として準備する。この部屋には、わざと鍵を掛けずに空き巣が入りやすい環境を用意しておく。

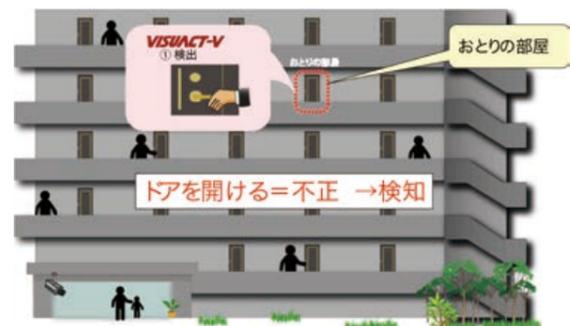


図1 おとり方式 — 検知のしくみ —

それを知らない空き巣は、やがてこのおとり部屋にやがてきて、ドアノブを回し、鍵が掛かっていないことを知り、ドアを開け中に侵入する。この時、この部屋はおとり部屋であり、ドアノブを回すことすら不審な行為であると判断できる。さらにドアを開け中にいったとなれば、不審者であると推定できる。つまりドアノブを回す行為やドアを開けて

中に入る行為を監視して、アラートを出すという仕掛けを提供するのである。さらに、ホテルのドアのオートロックを玄関ドアに反対向きにつけるといったアイデアもある。つまりおとり部屋の玄関ドアは、外からは開けられなくても、中からは開かないという仕掛けである。こうすることで、ひとたび中に入った空き巣は、出てくることができなくなり、捕獲できるという仕掛けである。



図2 おとり方式 — 捕獲のしくみ —

これと同じような原理のデコイサーバを制御システムにも提供しようというのが我々のアイデアである。制御システム内にデコイサーバをあたかも制御システムかのように設置する。このデコイサーバは、本来は誰からもアクセスはないはずである。

もしアクセスがあった場合には、それは制御システムに侵入したマルウェアやハッカーによる不審な活動であると推測できる。制御システムは、管理されたノードだけで構成され、あらかじめ決められたノード間でしか通信が行われないという特性を持っているので、この方法は単純でありながら大きな効果が期待できる。

- おとり方式のメリットとしては下記のようなものがある。
- ・マルウェアの内部探索の段階でいち早くその怪しい活動を検出できる。また、ただちに発信元（感染元）を特定できる。
 - ・攻撃手法が既知であるかどうかにかかわらず、どのような攻撃パターンでも検出できる。
 - ・おとりとなるデコイサーバを、制御システムへ簡単に設置、着脱できる。
 - ・設置しておくだけなので、制御システムへの影響がなく、システムを不安定にすることがない。

6. 制御システム用デコイサーバの機能

制御システム用のデコイサーバの主な機能は次の三つである。

(1) 攻撃検知

デコイサーバは、制御システムの機能を持っている必要はないが、制御システムネットワークに接続し、あたかも制御システムを構成するサーバのように見えるようにする。そして、制御システム内に侵入したマルウェアやハッカーからの不正なアクセスを待ち受ける。この時、デコイサーバに

は、ネットワークアクセスを監視し分析する機能を搭載しておく。この監視機能により、マルウェアの活動、つまり不正なアクセスを検出できるようになる。想定されるマルウェアの活動は次のようなものである。

何らかの方法で、制御システム内への侵入に成功したマルウェアは、まず、ネットワークや周辺ノードに対して探索や拡散活動を行う。この探索や拡散活動の段階で、デコイサーバに対して何らかのアクセスが行われる可能性がかなり高い。もともとデコイサーバ自体は、制御システムを構成するサーバではないので、もし外部から何らかのアクセスがあった場合、それを怪しいアクセス、すなわち攻撃であろうと推測できる。本来はどこからもアクセスがないはずのデコイサーバへのアクセスを検知するというスマートな検知手法であり、未知のマルウェアであってもネットワーク上で活動していれば検出できる。

(2) マルウェアへの感染を検知

もし、デコイサーバが制御システムに侵入したマルウェアからの攻撃を受けて、次のステップとしてマルウェアに感染してしまったとする。その場合、そのマルウェアの検体を捕獲したい。マルウェアを捕獲できれば、検体を取り出して制御システムの外で、専門家による詳しい調査を行えるのである。これを実現するために、デコイサーバをある程度マルウェアに感染しやすい状態でネットワークに接続する、つまり高度なセキュリティは施さない状態で稼働させておく。もし、マルウェアに感染した場合は、デコイサーバがその感染を検知し、マルウェアの捕獲機能を動作させる。

デコイサーバがマルウェアに感染したかどうかの検知は、デコイサーバから出ようとする通信の監視によりこれを実現する。マルウェアはデコイサーバへの感染に成功すると、次のステップとしてデコイサーバを拠点にしたネットワーク上の他のコンピュータへの攻撃を開始する。すなわちデコイサーバから制御システムネットワークに向けて、攻撃パケットを出し始める。このデコイサーバから出ようとするネットワークアクセスを検出し、デコイサーバへのマルウェア感染を検知するのである。ただし、デコイサーバがマルウェアに感染し、攻撃の拠点となってしまえば本末転倒である。デコイサーバが攻撃拠点にはならないような機能実装を行うことが必須である。

(3) マルウェアを捕獲

デコイサーバがマルウェアに感染したことを検知した場合、これをトリガーに感染したマルウェアの検体を捕獲する仕組みを提供する必要がある。しかしマルウェアがデコイサーバのどこに潜んでいるのかを見つけるためには、専門家による高度な解析が必要である。これらの高度な解析は、制御システムから切り離して、専門家に依頼できるようにするために、デコイサーバではマルウェアの検体抽出は行わず、感染したデコイサーバのメモリやハードディスクの状態をそのまま保全する機能を持たせる。

7. 制御システム用デコイサーバの実装

制御システム用のデコイサーバを実装する上では、次の課題の解決が必要である。

- (1) デコイサーバは、マルウェアに感染させる必要があるが、感染したとしてもデコイサーバが次の攻撃元にならないように、デコイサーバからの攻撃を全て遮断する。
- (2) デコイサーバがマルウェアに感染した場合でも、デコイサーバのコントロール自体がマルウェアに乗っ取られないようにする。
- (3) マルウェアの検体を確保するために、感染させたPCのメモリおよびハードディスクの状態をまるごと保存する機能を実装する。デコイサーバの構成には仮想PC技術とファイアウォールを採用し、以下の構成で構築することにより実現した。

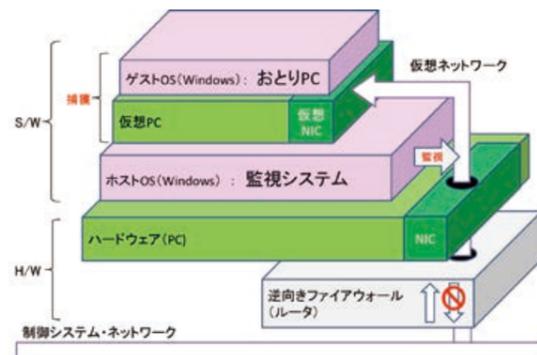


図3 システム構成イメージ

- ① マルウェアに感染した場合でも、デコイサーバから制御システム側を攻撃できないようにするファイアウォール(逆向き)
- ② デコイサーバのシステムを稼働する「ハードウェアPC」
- ③ ②の上で動作する「ホストOS」上の監視システム
- ④ 仮想マシンとして実装された「おとりPC」

デコイサーバ自体がマルウェアに乗っ取られないよう保護するために、

- ・「おとりPC」を、ホストと独立した「仮想マシンとして実装」する。
- ・「ホストOS」は通信インターフェイスをもたず、外部から一切通信ができないように保護する。
- ・「おとりPC」がマルウェアに感染した場合でも、マルウェアが「ホストOS」へのネットワークアクセスができないように、「おとりPC」の仮想NIC (Network Interface Card) を、ネットワークへ直接接続する。

次に、おとりPCが通常のWindowsPCと同じように動作するようにする必要があります。制御システムネットワーク側からのおとりPCへのアクセスは全てを透過し、制御システムネットワーク側からおとりPCへのファイル共有接続などは一切制限しない。

おとりPC自体は、通常のWindowsPCとして動作させる

ことで、マルウェアの攻撃を受け、感染しやすい状態に設定する。感染することを前提に、強度なセキュリティを施さずに稼働する。一方で、おとりPCにマルウェアが侵入、感染した場合、おとりPC上の感染マルウェアが他のコンピュータへ攻撃できないように、おとりPCから送信するパケットは、すべてファイアウォールでブロックする。このことにより、デコイサーバへの攻撃に成功しおとりPCに侵入したマルウェアを、デコイサーバ内から逃さず、閉じ込めることができる。おとりPCは仮想マシンとして実装されており、おとりPCの仮想マシンのイメージをまるごと保存、取り出すことで、おとりPCに感染したマルウェアを安全に捕獲することができる。

マルウェア検出プログラムは、ホストOS上で動作し、おとりPCの通信を監視する。おとりPCへのアクセスパケットや、おとりPCからマルウェアによる送信パケットがあれば、これを検知する。また、マルウェアが多用するファイル共有の protocols (SMB: Server Message Block) については、これをリアルタイムで分析し、マルウェアの活動を記録する。さらに、ファイル共有以外のすべての攻撃パケットを記録する。

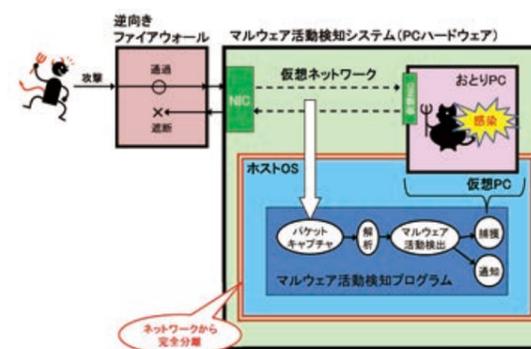


図4 機能構成図

8. 技術的ポイント

おとり方式を採用したデコイサーバの開発において、四つの主要な技術的なポイントがある。

- (1) 攻撃されない監視システム
ネットワークインターフェイスを持たないホストOS上に、仮想ネットワーク、仮想NIC、仮想マシンを構成し、ネットワークインターフェイスを持ったおとりPCを実現した。
- (2) マルウェアのリアルタイム検知機能
仮想ネットワーク上の攻撃をリアルタイムでプロトコル分析し、検知する仕組みを開発した。
- (3) マルウェア捕獲機能
仮想マシンとして実装されたデコイサーバを、仮想イメージをそのままファイル保存する機能をもつことで、マルウェアの捕獲を実現した。
- (4) 感染したデコイサーバからの攻撃遮断
おとりPCがマルウェアに感染したとしても、そこから

制御システムを攻撃することができないような逆向きファイアウォールを構成した。

9. おわりに

デコイサーバによるマルウェアの活動検知は、独立行政法人情報処理推進機構(IPA)から2014年9月に発行された『「高度標的型攻撃」対策に向けたシステム設計ガイド』⁽¹⁾でも紹介されている。年々高度化し、検出が難しくなっていくサイバー攻撃への気づきの手法として注目を集めている。

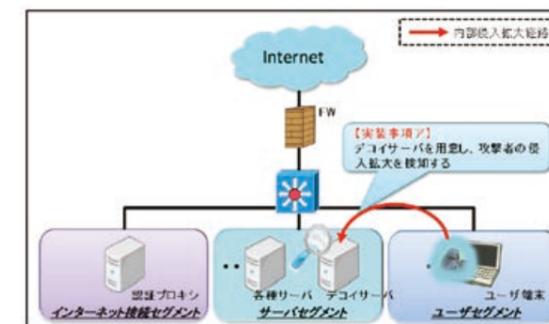


図5 デコイサーバによる監視
(『「高度標的型攻撃」対策に向けたシステム設計ガイド』, 2014より引用)

企業内部のネットワークセキュリティ問題に取り組んでいるazbilグループのアズビル セキュリティフライデーでは、このデコイサーバ方式のサイバー攻撃検出にいち早く着目し、おとり方式を採用したマルウェア・センサー VISUACT™-Vを2012年にリリースしている。

VISUACT-Vは、デコイサーバの他にもファイアウォール、侵入検知システム、サンドボックス、そしてVISUACTを利用したSMBプロトコルのリアルタイム解析といった、複数のセキュリティ技術の組み合わせで構成されている。サイバー攻撃が、ますます高度化していく中で、企業の内部ネットワークの監視/リアルタイム解析、およびデコイサーバによるマルウェアやハッカーの不正な活動のいち早い検知は、制御システムに限らず、情報セキュリティの次のソリューションとして注目されている。

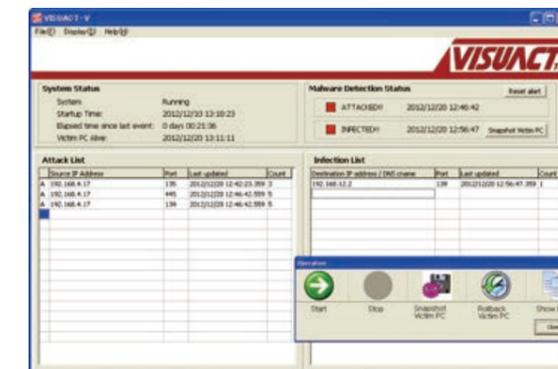


図6 VISUACT-V画面イメージ

<参考文献>

(1) 独立行政法人情報処理推進機構 技術本部 セキュリティセンター「高度標的型攻撃」対策に向けたシステム設計ガイド, 2014

<商標>

VISUACTは、アズビル株式会社の商標です。Microsoft, および Windowsは、米国 Microsoft Corporationの、米国およびその他の国における登録商標または商標です。

<著者所属>

有元 伯治 アズビル セキュリティフライダー株式会社 開発部
佐内 大司 アズビル セキュリティフライダー株式会社 代表取締役社長

風量・室圧制御用ベンチュリーバルブによる 安全性と長寿命化を両立させた 室圧補正制御技術の開発

A Technique for Use with Venturi Valve Control of Airflow Volume and Room Pressure That Provides Both Long Equipment Life and Safety at Research Facilities and Hospitals

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	大村 林太郎 Rintaro Omura
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー	大沢 信雄 Nobuo Osawa

キーワード

風量・室圧制御用ベンチュリーバルブ, 風量体積制御, 室圧制御

研究施設や病院などの安全な空気環境を実現する風量・室圧制御用ベンチュリーバルブに、室内の空気圧をより正確に制御し、汚染空気の拡散・侵入防止を実現する室圧制御モデルを追加した。このモデルに、施設利用者の安全性を確保する上で必要となる正確で安定した室圧制御と装置の長寿命化の両立を実現する室圧制御技術を開発し搭載している。同時に開発した室圧モニタにより、室圧測定値をリアルタイムに表示し、室圧異常発生時にはアラームで通知することが可能である。

In addition to our venturi valve for control of airflow volume and room pressure, which provides a safe atmosphere for research facilities and hospitals, a room pressure control model has been developed that provides more accurate pressure control and prevents the diffusion and penetration of contaminated air. The new model employs a room pressure control technique designed to achieve both more precise, stable room pressure control and longer equipment life, two requirements for assuring the safety of facility users. A room pressure monitor developed at the same time displays the room pressure in real time and alerts users if the room pressure is abnormal.

1. はじめに

有害物質(化学薬品, 感染性のウイルスや細菌など)を取扱う実験施設, 医薬品や電子部品を製造する工場では、空気による相互汚染を防止するために、部屋間の気流や各部屋の空気圧(以下、室圧)を適切に制御することが要求される。当社は2009年以来、給気風量と排気風量を連動させ、その差分であるオフセット風量を一定に保つ風量体積制御方式により、陽圧あるいは陰圧を維持し安全な空気環境を実現する研究施設向け環境制御システムと風量・室圧制御用ベンチュリーバルブ(Inflex™ VN)を提供している。

室圧制御に関して第一義的に求められているのは、陽圧/

陰圧を保ち、所定の方向への部屋間気流を常に維持することである。さらに近年では、上記の陽圧/陰圧といった定性的な室圧や気流管理にとどまらず、室圧の具体的な数値設定(xxPa~yyPa)による管理(以下、これを室圧の定量的管理とする)や、異常発生時のリスク管理が求められる施設が増えてきており、室圧制御への要求は高度化してきている。

従来でも室圧の定量的管理を達成するだけならば調節計などを併用することで対応できたが、施設利用者の安全性を確保する上で必要となる、正確で安定した室圧制御と装置の長寿命化という相反する要求を両立させる技術は今までに確立されていなかった。また、施設利用者が室圧の制御状況を、当該室や廊下などの現地で確認できる視認性

も必要とされている。

こうした要求に応えるべく、今回開発を行ったのが風量・室圧制御用ベンチュリーバルブの新ラインナップである、Inflex VN室圧制御モデル (Pressure Control Valve, 以下PCV)(図1)である。このモデルは新たな機能として、風量体積制御に加えて室圧計測値によってオフセット風量を修正する「風量体積・室圧補正制御」を搭載している。本方式により上述の課題に応えることができ、より安全な環境を提供することが可能となった。

本稿では、PCVに搭載されている風量体積・室圧補正制御機能と、PCVと同時に開発された、室圧のリアルタイム表示と室圧異常を通知する室圧モニタについて紹介する。



図1 Inflex VN 室圧制御モデル

2. システム構成

まず、Inflex VNによる制御システムについて、基本となる風量体積制御方式と、今回開発した風量体積・室圧補正制御方式の、それぞれのシステム構成を示す。

2.1 風量体積制御

システム構成例を図2に示す。換気を行うための給気バルブと一般排気バルブに加え、局所排気バルブ(有害物質を扱う際に局所的に排気を行う装置用に設置されるバルブ)で構成される。

給気バルブ(または一般排気バルブ)を当該室の風量バランスをつかさどるバルブとして設定し、そのバルブに同一室内にあるバルブの風量を相互通信により集め、給気風量と排気風量それぞれの合算値を演算させる。そして給気と排気の差分であるオフセット風量が一定となるように各バルブの風量を制御することで、室内の陽圧あるいは陰圧を保ち、所定の方向への気流を常に維持するのが風量体積制御方式である。

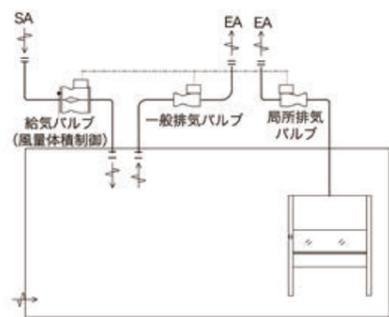


図2 風量体積制御システム構成例

2.2 風量体積および室圧補正制御

今回リリースしたPCVを用いて室圧補正制御を行う場合のシステム構成例を図3に示す。風量バランスをつかさどるバルブとは別のバルブを、室圧補正制御を行うバルブとして設定する。そのバルブに、制御対象となる部屋と室圧の基準となる空間との室間差圧を計測する室圧センサを接続する。風量体積制御により一定の風量差を維持しつつ、計測した室圧をPV、室圧設定値をSPとしてPID演算を行い、風量体積制御にて求められたオフセット風量をさらに補正することで室圧を適切に制御する方式である。

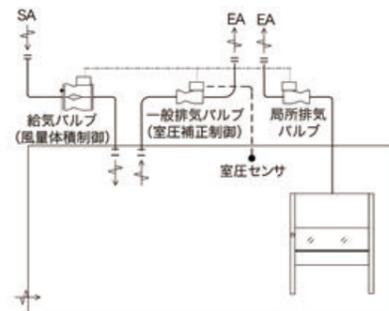


図3 風量体積・室圧補正制御システム構成例

3. 室圧補正制御併用のメリット

風量体積制御では、風量設定を一定とした状態では安定した室圧制御が実現できるため、Inflex VNの制御システムで風量体積制御を採用している。

しかし、室内の換気量を変更するなど、風量変更中には各バルブが個別にもつ若干の動作隙間や分解能の影響により室圧が不安定になりやすい。また各機器には風量制御の誤差があるため、風量演算上のオフセット風量を一定としても実際のオフセット風量は若干量変化してしまうことがある。これらの結果、特に風量設定が変更されたときには、室圧が変動し設定値から逸脱してしまう場合があった。

この逸脱の抑制を可能とするのがPCVに搭載されている室圧補正制御である。風量体積制御により安定した室圧制御を行い、風量設定変更時の室圧変動を室圧補正制御により抑制することが可能となった。

4. 風量体積・室圧補正制御の検証

4.1 実験条件

風量体積・室圧補正制御方式による効果を、当社内にある実験室による実験結果を用いて紹介する。

実験を行う環境を表1に示す。

計測条件	気密性	ELA=500 mm ²
	部屋容積	60 m ³
	室圧設定値	20 Pa

表中のELA (Effective Leakage Area)は有効漏れ面積のことをいい、室圧制御を行う上で重要な意味を持つ。

Q_{leak} を給気風量と排気風量の差である漏れ風量(=オフセット風量)、 ΔP を室間差圧とすると、以下の式が成り立つことが知られている⁽¹⁾。

$$Q_{leak} = 3780 \cdot ELA \cdot \Delta P^{0.65}$$

ELAが大きい部屋では、同じ室間差圧をつけるためにELAが小さい部屋よりも多くの風量差を必要とする。逆にELAが小さい部屋では、わずかな風量差でも大きな室間差圧がつき、風量差の変動が室間差圧に与える影響は大きくなる。

実験を行った部屋は高气密に分類される部屋であり、風量変動が室圧の変動へと結びつきやすい。この部屋にて給気風量を1200 m³/hから1800 m³/hへ変更操作を行い、一定時間後に再び元へ戻す操作を行った。

4.2 結果

風量体積制御の結果を図4に、風量体積・室圧補正制御の結果を図5に示す。

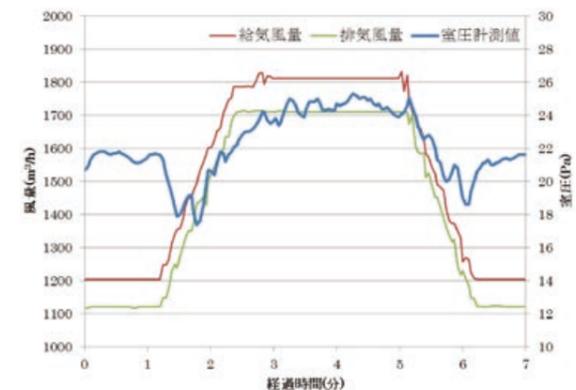


図4 風量体積制御 実験結果

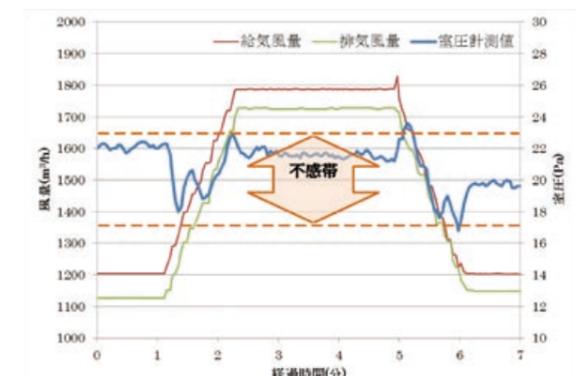


図5 風量体積・室圧補正制御 実験結果

図4のように、22 Pa付近で推移していた室圧が給気風量の増加とともに乱れ、その後24 Paまで上昇した。一旦安定した後、給気風量の減少に伴う乱れを経て再び22 Pa付近に戻っている。

室圧補正制御を併用した場合、図5のように風量変更中も含めて、設定した不感帯内で室圧が安定していた。

5. 安定性と長寿命化の両立

室圧補正制御を行う上で、様々な外乱への対応が重要となる。外乱としては、

- (1)自然風やファン脈動、ドア開閉など設備機器の状態と無関係な「他発的な外乱」
 - (2)室内の換気量変更や局所排気装置のON/OFFなどの設備機器の状態変化に起因する「自発的な外乱」
- に大別される。外乱が発生する度に室圧制御で室圧を元に戻そうとすると、制御が安定しない上、頻繁な動作によってアクチュエータが早期に摩耗し故障してしまう。それぞれの外乱に対する課題と解決方法について述べる。

5.1 「他発的な外乱」に対する課題と解決方法

室圧の計測値は数十～数百ミリ秒という短い周期で常に変動している。これはファンの脈動やダクト内を通過する際の乱流によって発生する給排気の非定常な振動、屋外の自然風の影響によるダクト静圧の変動などが主な要因で、施設利用には依存しない、定常的に発生する外乱である。

このような室圧の定常的な短周期の変動は何もしなくとも元の室圧に落ち着き、またその変動幅は一定範囲内のことがほとんどである。図6に風量体積制御を行っている部屋の室圧の変動の例を示す。

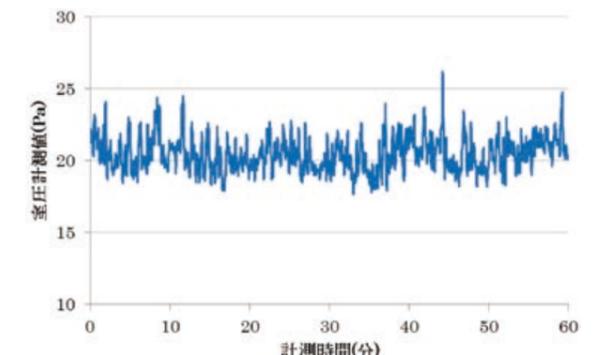


図6 定常的な室圧変動

計測中は給気バルブ・一般排気バルブともに風量設定を固定しているが、室圧計測値は絶えず変動している。また室圧設定20 Paに対して5 Paを超える大きな室圧変動があったものの、即座に元に戻っている。

このような変動に対して、当社では従来、不感帯と逸脱許容時間という二つの設定を行うことで対処してきた。室圧計測値が不感帯内に収まっている間、あるいは不感帯を超えても逸脱許容時間が経過する前に再び不感帯へ室圧が収まっている間、室圧制御動作を保留することでアクチュエータの摩耗を防いでいる。

定常的な外乱とは別に、施設利用者のドア開閉が外乱としてあげられる。ドアを開放している間は周囲の空間(廊下または他の部屋)と空間的に同一となるため室圧は瞬時に周囲と等圧となり、ドアを開閉する際にはドアによる一時的な空気の押込み(圧縮)や引張り(膨張)のため室圧が急激に変動する。

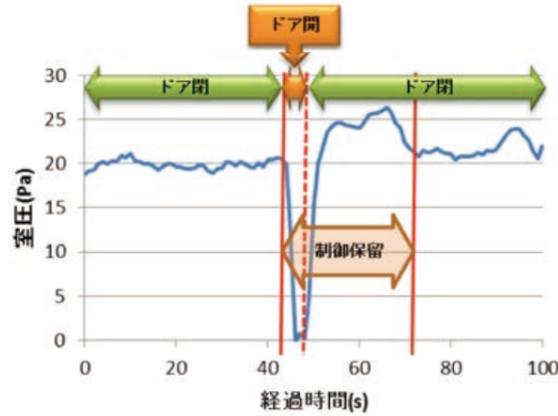


図7 ドア開閉時の室圧変動

図7に人の入室時の室圧変化例を示す。これを見ると入室後30秒ほどで元の室圧に戻っていることがわかる。

この外乱に対しても、逸脱許容時間の設定で対処が可能である。ドア開閉による室圧変動はドア開閉が終了した後は自然と元の室圧に戻る。このことを考慮し、ドアの開閉時間を逸脱許容時間に設定することでドア開閉による室圧変動中のアクチュエータ動作を抑制することができる。この場合には、30秒を逸脱許容時間として設定することにより、ドア開閉による室圧変動中のアクチュエータ動作を抑制することができる。

5.2 「自発的な外乱」に対する課題と解決方法

「自発的な外乱」として、以下のような室圧が乱れる状況がある。

- 風量体積制御を行っている給排気バルブが室内の換気量変更指令などにより風量を変更している間
- 同一室内に置かれた局所排気バルブが動作している間
- ファン起動/停止や他社バルブなど外的機器が動作している間

このような風量変更のために引き起こされる室圧の乱れは、機器が動作している間継続されその変動時間も長いので、他発的な外乱と同様の不感帯・逸脱許容時間設定では対応できない。このような外乱に対応するためには不感帯を狭く、逸脱時間を短くするなどして高い応答性を実現する必要があるが、頻繁なアクチュエータ動作を引き起こし機器寿命が短くなってしまふ恐れがある。

5.3 室内状態検知によるパラメータの切替機能

前節までに述べてきたように、外乱への対応により、以下のような課題がある。

- 「他発的な外乱」に対しては、不感帯・逸脱許容時間を設けることでアクチュエータの長寿命化を実現する反面、「自発的な外乱」に対する応答性を低下させ、室圧の安定性を悪化させてしまう。
- 「自発的な外乱」に対応したパラメータ設定を行うと、高い応答性を得られる反面、長寿命化が実現できない。

これらを解決するために、他発的な外乱に対してはできるだけアクチュエータを動かさないようにし、自発的な外乱

に対しては応答性を向上するように、不感帯・逸脱許容時間を調整できる機能が必要となる。

PCVは、この機能を有する。定常時は不要なアクチュエータ動作を抑える一方、当該室が室圧の乱れるような状況(自発的な外乱)にあるときにはその状態を検知し、定常時とは異なる別の不感帯や逸脱許容時間のパラメータに切り替えることで応答性を確保している。

5.4 機能説明

表2に挙げたパラメータ設定をした部屋を想定し機能の説明を行う。

表2 パラメータ設定例

	定常状態 (他発的な外乱)	非定常状態 (自発的な外乱)
不感帯	±4.5 Pa	±3 Pa
逸脱許容時間	30 s	0 s

この部屋にて、図8に示すような室圧の変動が起きるとする。給排気の風量に変動がない場合は、室圧制御を保留し、定常時のパラメータとして不感帯に±4.5 Pa、逸脱許容時間に30 sを設定する。この状態で室圧に乱れが生じ、室圧が不感帯を外れたとすると(逸脱①)。この場合、室圧が不感帯を外れた状態が逸脱許容時間以上継続しない限りは室圧制御を保留したままとする。これにより定常時の無駄なアクチュエータ動作をなくすことができる。

ここで、時刻1にて換気量変更指令があり、給排気風量変動し始めたとする。この時PCVは室内が室圧の乱れやすい状況にあると判断し、不感帯を±3 Pa、逸脱許容時間を0 sへそれぞれ変更する。この状況下において狭められた不感帯を室圧が逸脱する(逸脱②)と、逸脱許容時間は0 sに変更されているため、PCVは室圧制御の保留をやめ、即座に室圧制御を再開することで、室圧の変動に対する応答性を確保することができる。



図8 パラメータ切替 説明図

5.5 実環境における比較

パラメータ切替機能の有無による実環境での比較結果を図9に示す。試験を行った環境は前節と同じとした。

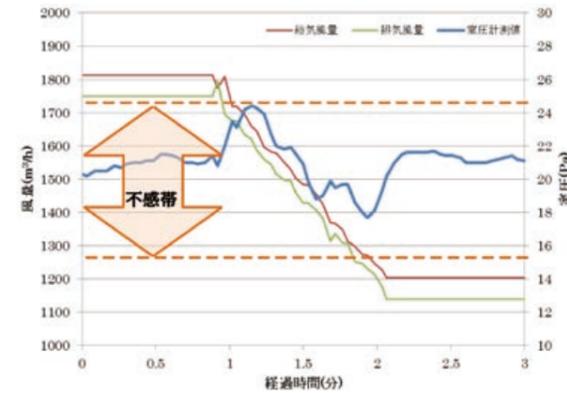


図9 パラメータ切替 OFF 実験結果

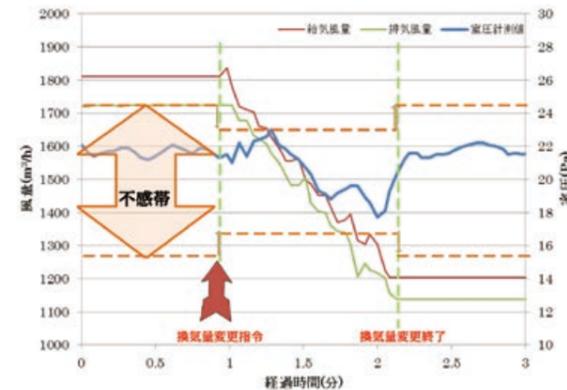


図10 パラメータ切替 ON 実験結果

パラメータ切替OFFのときは換気量変更中でも不感帯幅は4.5 Paのままのため室圧は17~25 Paで変動しているが、パラメータ切替ONのときは換気量変更中には不感帯を狭め、室圧変動を17~23 Paに収めている。パラメータを切り替えることで、換気量変更中でも室圧の乱れを抑制することができた。

5.6 室内状態を用いることによる利点

「風量変更されているために室圧が乱れやすい状況」を検知するためには、PCVは同室内にある給気バルブと排気バルブの動作状況を知る必要がある。従来行っていた調節計を用いる計装では、同室にある給排気バルブの動作状態を知るために、風量体積制御を行うバルブに特別に出力接点を用意し、調節計に入力する必要があった。

一方、PCVを用いた風量体積・室圧補正制御方式では、風量の変化状況が把握されている給排気バルブがPCVと同一のシステムとして構成・相互通信されているため、PCVは特別な配線や接点を用意することなく、バルブ間の相互通信にて「風量変更されているために室圧が乱れやすい状況」を検知することができる。

なお、PCVはInflex VN間の相互通信だけでなく従来の接点を用いた入力にも対応しており、Inflex VNを介さないファン起動/停止などの情報であっても、直接PCVへ信号を入力することで通信と同様にパラメータを切り替えられる。通信と接点の併用も可能なため、複数の要因による室

圧の状況変化にも対応することが可能である。

6 室圧モニタ

室圧モニタはInflex VN (PCV)専用の表示設定機であり、室圧制御の状況を施設利用者が当該室や廊下など、現地で確認するための装置である。

室圧モニタは、前章までに述べたような室圧制御が正常に行われていることは勿論のこと、室圧異常や装置異常が発生していることを、速やかに施設利用者に伝えることができる。この室圧モニタの特徴的な機能を、以下に紹介する。



図11 室圧モニタ

6.1 正常時の通知

室圧制御が正常に行われ、風量制御装置が正常動作しているときは、LCDに室圧計測値を表示する(図11、12参照)。また、緑色の室圧正常LEDを点灯させる(図11参照)。



図12 室圧表示部

6.2 室圧異常・装置異常時の通知

室圧が正常範囲を逸脱したり、風量制御装置に異常が発生した場合に、ブザーとLED/LCD表示で使用者に異常を通知する。

室圧異常については、2段階警報(アラート/アラーム)を設けている。室圧が極端に逸脱する前にプレ警報として伝える「アラート」と、室圧が異常状態に陥っていることを伝える「アラーム」とがあり、この2状態を区別して知らせるために、2種類のブザー音およびLED点滅パターンを持つ。「アラーム」時は、ブザー音の鳴動間隔を短く、またLEDの点滅周期を短くすることで、緊急性を表現している。

また、LCDの左端には図13のような円弧状の「室圧状態バー」を設け、■の位置で現在の室圧状態を表し、視覚的にも分かりやすい表現となるように工夫している。

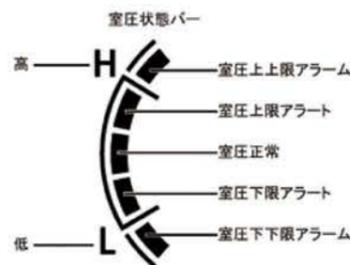


図13 円弧状の室圧状態バー

図14に室圧上限アラート発生時のLCD表示例を、図15に室圧上限アラーム発生時のLCD表示例を示す。

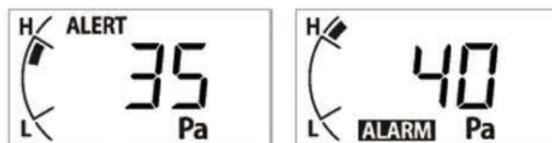


図14 上限アラート

図15 上限アラーム

一方、風量制御装置の異常を検知した場合は、ブザーを鳴らし、赤色の機器異常LEDを点灯させる。LCDには異常内容を知らせるエラーコードを表示する。

6.3 室圧設定値切替

パンデミックへの対応のために病室の使用用途変更を行うなど、室圧の管理設定値を切り替える必要が生じるケースがある。その場合、室圧モニタからの室圧設定値切替操作により、陽圧から陰圧、陰圧から陽圧へ切り替えることができる。室圧設定値を直接変更することもできるが、あらかじめ二つの室圧設定値を設定しておくことで、切替操作のみで陰陽圧を切り替えることができる。

風量体積・室圧補正制御方式の場合には、風量体積制御のオフセット風量も合わせて切り替えることができ、設定値を切り替えても室内の風量バランスを最適な状態に維持することができる。

この操作は重要な操作なので、誤って切り替わることを防ぐために、複数のキー操作を組み合わせることで切り替えができるようになっている。

6.4 室圧モニタの2台設置

室圧モニタは、1台のInfilex VN (PCV)に2台まで接続することができる。2台の室圧モニタには同じ状態が表示され、操作も後優先で行うことができる。例えば、1台は部屋入口の廊下壁面に設置し、もう1台は部屋の内側の壁面に設置するなどして、入室前および入室中にも室圧の状態が正常であるかどうかを確認することができる。

6.5 日常点検モード

前節までに述べたように、室圧モニタは異常状態を通知したり、緊急時に操作したりという重要な役割を担うため、いざというときに正常に機能することが要求される。そこで、「点検モード機能」を用意し、室圧モニタのブザー鳴

動、LED点灯/点滅/消灯、LCD表示、キー操作が、正常に機能することを日常的に確認できる。

7. おわりに

風量・室圧制御用ベンチュリーバルブに今回新たに追加された「室圧制御モデル」の機能を紹介した。従来の風量体積制御に加えて室圧補正制御を行うことにより、安全性と長寿命化の両立が可能となった。

<参考文献>

- (1) Wei Sun, 2002. Development of Pressurization Airflow Design Criteria for Spaces Under Required Pressure Differentials. ASHRAE Transactions, Volume 109 (Part 1).
- (2) 石原正也, 齊藤英弥: 室圧・風量制御の最新技術 — クリティカル最新システム — Savemation Review, 2004, P16-19.

<商標>

Infilexは、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- 大村 林太郎 ビルシステムカンパニー
開発本部開発2部
- 大沢 信雄 ビルシステムカンパニー
開発本部開発2部

水中細菌のリアルタイム検出技術の開発

Technology for Real-Time Detection of Microbes in Water

アズビル株式会社
技術開発本部

小原 太輔
Daisuke Obara

アズビル株式会社
技術開発本部

古谷 雅
Masashi Furuya

アズビル株式会社
技術開発本部

増本 新吾
Shingo Masumoto

アズビル株式会社
技術開発本部

松浦 友朋
Yuhu Matsuura

アズビル株式会社
技術開発本部

地下 久哉
Hisaya Jige

アズビル株式会社
技術開発本部

細居 智樹
Tomoki Hosoi

キーワード

蛍光スペクトル, 蛍光, 散乱光, 細菌, 微粒子, レーザ, 水の汚染検出, IMD™ (Instantaneous Microbial Detection)

医薬品、化粧品、食品製造などの分野で、原料および洗浄などの様々な用途で水が使用されている。これらの水については、含まれる細菌数が基準値以下になるよう管理する必要があるが、既存の検査方法では、検査開始から結果が出るまでに数日を要するため、より迅速に結果が得られる細菌検出技術の開発が求められている。本稿では、水に含まれる細菌のリアルタイム検出を目的とした装置を開発し、細菌を検出する性能、および、その他の粒子に対する識別性能に関して良好な結果が確認できたので、報告する。

Water is used for washing, and as an ingredient, and in various other applications in the production of medical supplies, cosmetics, and food. For such uses the number of microorganisms in the water must be kept below some standard amount, but existing laboratory procedures require a wait of several days before results are received. A faster detection method is therefore desirable. This paper reports on the development of a real-time detector for microbes in water. Good results have been obtained both for detection of microbes and for distinguishing them from particles in the water.

1. はじめに

1.1 水中細菌数の検出方法と課題

医薬品、化粧品、食品製造などの分野で、原料および洗浄などの様々な用途で水が使用されている。これらの水については、用途に応じた水質の基準が定められており、それらの項目の一つとして、水に含まれる細菌数が基準濃度以下になるよう設備を管理し、定期的に細菌数を監視することが求められる⁽¹⁾。

細菌の大きさは、菌種によって多岐にわたるが、直径約1μm前後の微粒子であり(図1)、その存在を確認するためには高倍率の顕微鏡などを用いる必要がある。しかし、実際に水質管理基準となる細菌数は注射用水で0.1CFU/ml、

精製水で100CFU/ml (CFU:コロニー形成単位)と低濃度であるため、これらの水に含まれる細菌を顕微鏡観察で監視することは現実的ではない。そのため、細菌の検出には、主に培養法が用いられる。培養法では、細菌を含んだ水を培地に塗布した後、数日かけて細菌の増殖を促し、目視可能なコロニーと呼ばれる細菌の塊を形成させる。その後、コロニーの数を目視あるいは画像識別などで計数することにより、水に含まれていた細菌数を把握する(図2)。

培養法は、長年の実績があり、検出の特異性などの点で優れた方法ではあるものの、検査を開始してから実際に細菌数を確認するまでに数日を要するため、例えば純水製造設備に汚染が発生した場合、それを発見し対処するまで

に数日を要することや、コロニーを形成しにくい細菌については検出できない場合があることがリスクとなる。また、定期検査のたびに作業者による採水、培養、計数などの作業が必要となり、運用コストがかかることも課題である。

このため、水に含まれる細菌を、より迅速に検査するための新たな技術が求められている²⁾。

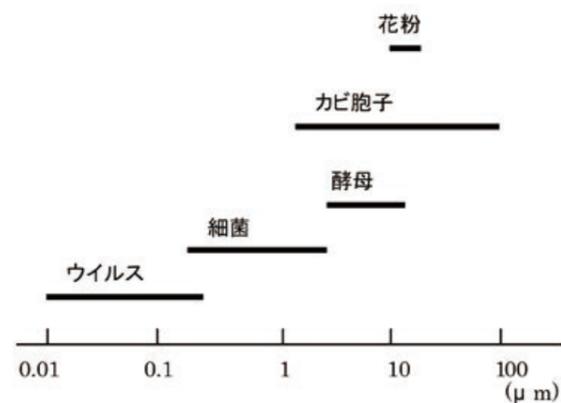


図1 細菌およびその他の生物由来粒子のサイズ



図2 培養により目視可能となったコロニー



図3 IMD-W 外観写真

今回、水に含まれる細菌のリアルタイム検出を目的として、リアルタイム水中浮遊菌ディテクタ IMD-WTMを開発した(図3)。本稿では、IMD-Wの計測原理および、設計思想、基本性能の評価結果について報告する。

2. 水中細菌のリアルタイム検出技術

2.1 計測原理

IMD-Wは、装置内の計測部を計測対象の水が通過する際に、水に対して励起光を照射する。水の中の粒子に励起光が照射された際に発生する光信号を、散乱光および2種類の波長帯の蛍光に分けて、それぞれの光の強度をPMT (Photomultiplier Tube)およびPD (Photo Diode)を用いて計測する。図4に、IMD-Wの光学系の概念図を示す。

水中に粒子が存在すると、励起光を照射された粒子から散乱光が発生する。散乱光の強度は、主に粒径および周辺媒質との屈折率差に依存するため、水中の細菌から生じうるおよその散乱光強度が予想できる。

しかし、細菌以外に大小様々な粒子が水中に存在する場合、散乱光強度だけでは細菌とその他の粒子の区別をすることはできない。そのため、粒子から発生する蛍光の強度も計測し、細菌の識別に利用する。

細菌に励起光を照射した際に、細菌に含まれる生理活性物質およびタンパクが特定の波長帯の自家蛍光を発することが知られている。特に、リボフラビン、NADHなどが自家蛍光を発する代表的な物質であるといわれている³⁾⁴⁾。

この細菌に特徴的な自家蛍光を検出することで、様々な粒子の中から細菌を識別することが可能となる。

ここまで紹介した、散乱光と生物由来の自家蛍光に基づいて細菌検出を行う基本的な検出原理は、すでに販売を開始している、リアルタイム細菌ディテクタ IMD-ATMの計測原理と同一であるが、IMD-Aは空気中のバイオエアロゾルの検出を目的としている。

これに対し、水中の粒子から発生する蛍光信号は微弱であるため、IMD-Wの開発では、検出感度を高めるため、新たに液中粒子検出用の光学系を設計した。

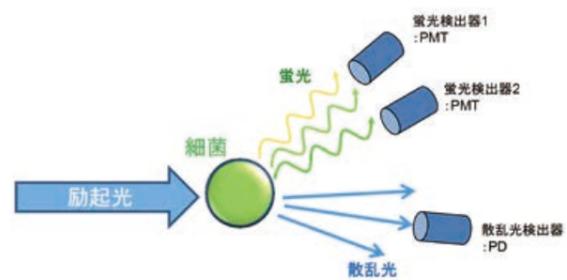


図4 IMD-W 光学系概念図

2.2 蛍光特性に基づく細菌の識別

試作機を用いたフィールドテストの結果、製造現場で実際に使用される水の中には、細菌以外の微粒子が存在し、その一部が自家蛍光を発することが明らかになった。

これらの粒子は、精製水製造プロセスに由来する粒子であり、設備配管の腐食などにより生じる金属酸化物、ガスケット、ポンプなどの可動部から生じる樹脂などの粒子と考えられる。これらは細菌ではないが、自家蛍光を生じるため、単に自家蛍光の有無を計測するだけでは、細菌と混同しやすい。

これらの粒子と細菌を識別する方法を検討するため、蛍光分光光度計を用いて、細菌および樹脂粒子の蛍光スペクトルを計測した。図5に代表的な細菌の蛍光スペクトルと、自家蛍光を生じる樹脂粒子の蛍光スペクトルを示す。図中緑の線で示した2系列は、細菌の蛍光スペクトルを示し、赤で示した4系列は、樹脂材料の蛍光スペクトルを示す。検討の結果、細菌と樹脂材料では、蛍光スペクトルのピークはほぼ重なり合っているものの、強度分布が異なる特徴を示すことを確認した。

リアルタイム計測を旨とするIMD-Wでは、計測時間の制約があるため、蛍光スペクトルの詳細な強度分布を把握することは困難であるが、蛍光を二つの蛍光波長帯に分割して計測し、二つの蛍光波長帯の強度比をとることで、細菌と樹脂粒子の蛍光スペクトルの差異を区別できることが明らかになった。

水中の粒子の蛍光を計測する際のもう一つの設計要素として、水由来のラマン散乱の存在が挙げられる。水由来のラマン散乱は励起光の波長に対し、50-70nm程度長波長側にピークを生じる⁵⁾。粒子由来の微弱な蛍光を検出するためには、ラマン散乱光が蛍光検出波長帯と重ならないよう留意する必要がある。

IMD-Wの励起波長の設定に際して、細菌と樹脂粒子の蛍光スペクトルの差異を区別するために選定した二つの蛍光波長帯の間にラマン散乱ピークが位置するよう励起波長を設定することで、細菌固有の自家蛍光を識別する機能と、検出感度を両立できるよう設計した。有効に機能する蛍光検出波長帯と励起波長の組み合わせは複数存在し、計

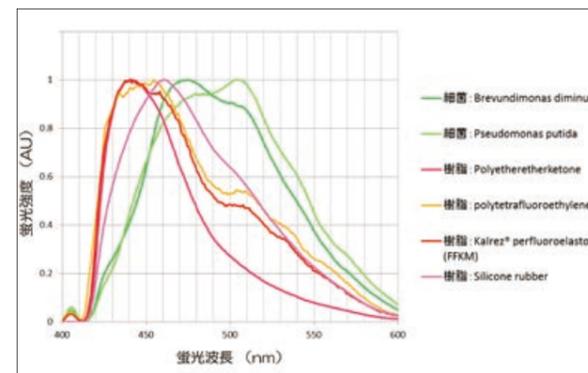


図5 細菌および樹脂材料の蛍光スペクトル

測対象物質の蛍光特性に応じて設定できる。図6に、二つの蛍光検出波長帯とラマン散乱ピーク波長帯の配置を示す。

3. 細菌検出性能の評価

3.1 試験設備

装置の性能評価のため、純水プロセスを模した簡易型純水ループを構築した。純水ループの模式図を、図7に示す。純水が一定流量で循環する構造となっており、このループにIMD-Wを接続することでループ内の水質のリアルタイムモニタリングが可能である。

純水ループには、任意の濃度で試料を混入することができる。今回の性能評価では、ループ内に0.1~1000CFU/mlの濃度範囲で細菌を混入した水を流し、それぞれの濃度で、IMD-Wが細菌を検出できるか、評価を実施した。

同時に、比較対象として、一般的な細菌検出手法である培養法による細菌検出を行い、両者の結果を比較した。試験に使用した細菌は、*Aspergillus brasiliensis* (ATCC 16404), *Bacillus subtilis* (ATCC 6633), *Candida albicans* (ATCC 10231), *Escherichia coli* (ATCC 8739), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 9027), *Salmonella enterica* (NCTC 6017), *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538)の7菌種である。再現性を確認するため、各菌種で、4段階の濃度での計測を3回繰り返し実施した。

3.2 実験結果

細菌の濃度を変化させて複数回の計測を行った結果を散布図として図8に示す。縦軸はIMD-Wによる計測でリアルタイムに得られた細菌検出数であり、横軸は同じタイミングで水を採取し、数日間の培養を行って確認した細菌数である。各細菌に対する線形近似と相関係数を示す。

二つの手法は線形関係を示し、相関係数も1菌種を除き0.95以上が得られた。

一方、細菌の検出割合については、線形近似の係数が1以下の系列は、培養法に対してIMD-Wの検出数が少ない

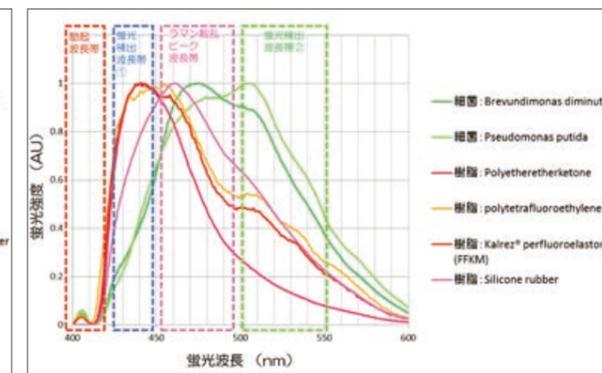


図6 蛍光検出波長帯と水のラマン散乱ピーク

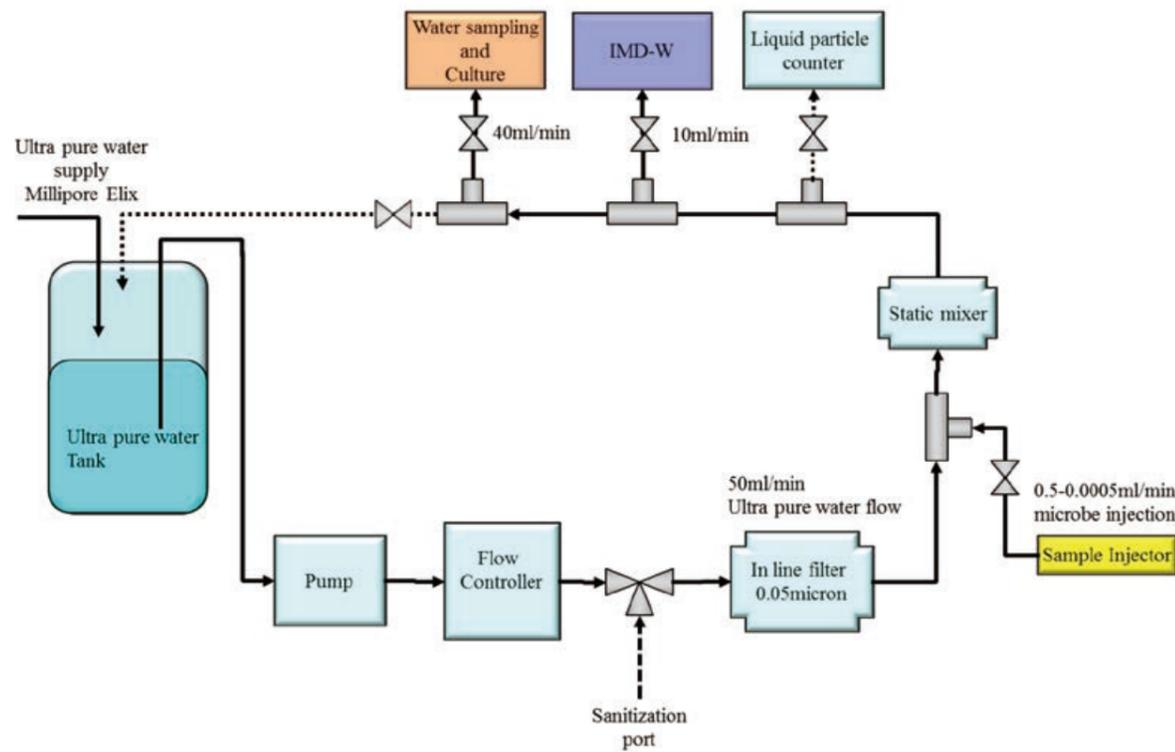


図7 純水ループ

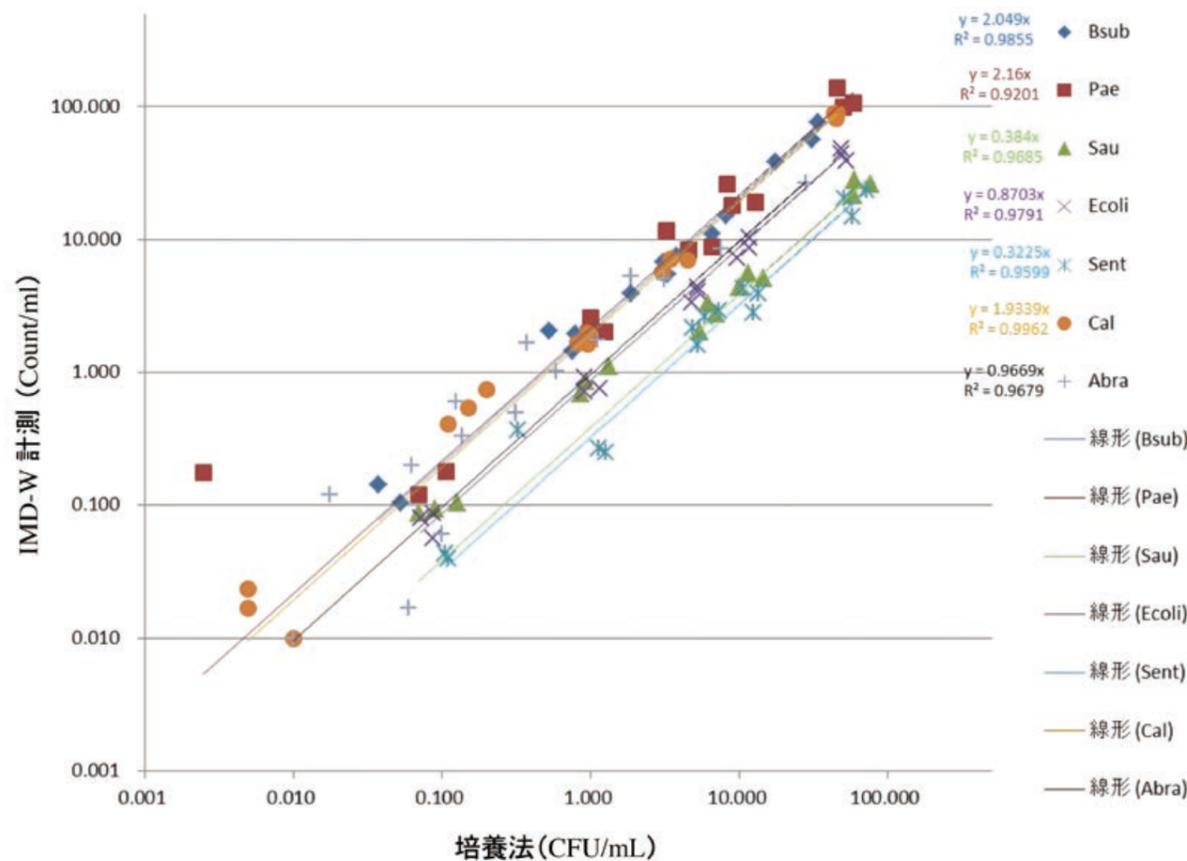


図8: 細菌検出性能 散布図

ことを示す。細菌の菌種に依存して、IMD-Wの検出割合が高い菌種と、低い菌種が存在する。この差は、IMD-Wの感度は粒子の光学特性に依存する傾向があり、一方、培養法の感度は、培養環境に対する細菌の適応度に依存するために生じていると考えている。

今回の実験では、いずれの菌種の試験においても、IMD-Wが、0.1CFU/ml程度の低濃度の細菌汚染から応答を示すこと、また、水中に低濃度で混入している細菌の濃度変化をIMD-Wでモニタリングできることを確認した。

4. 細菌と非生物粒子の識別機能

4.1 IMD-Wの粒子識別機能

IMD-Wは粒子から生じる散乱光および2種類の波長帯の蛍光を計測し、これら3種類の光の強度に基づき、細菌と、それ以外の粒子の識別を行う。図9に、粒子計測時の、三つの光強度の散布図の例を示す。赤色が細菌由来、青色が樹脂由来の信号強度分布である。

細菌と、非生物粒子の信号強度分布を3次元の分布として学習し、それぞれの群を最も効率よく分けられる位置に識別境界面を定義することで、両者を識別している。

今回の試験では、細菌3種類と、樹脂ガasket2種類およびステンレス由来の腐食生成物からなる微粒子を準備し、それぞれの粒子を計測した。

識別結果を表1に示す。細菌3種類に対しては、98%以上の確率で細菌として正しく識別された。樹脂ガasketおよびステンレス由来の腐食生成物に対しては、約90%の確率で細菌ではないと正しく識別された。

このように、自家蛍光を発する非生物粒子に対して、良好な識別結果が得られたが、IMD-Wは粒子の散乱光と蛍光波長特性に基づいた識別を行うため、粒子の種類や状態によって結果が変動する場合があります、引き続きデータの蓄積を進める必要がある。

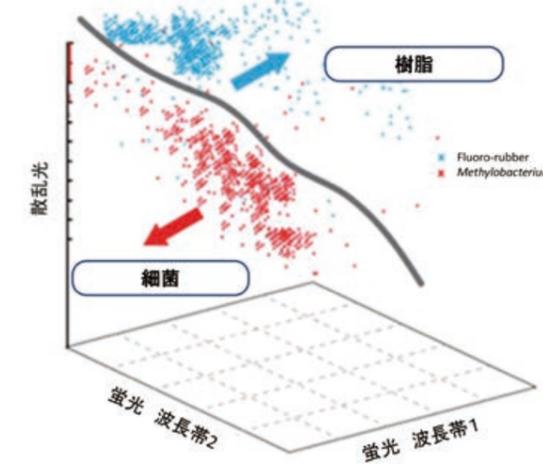


図9 識別境界を用いた細菌識別

表1 樹脂粒子および細菌の識別正解率

対象	陽性除去率	備考
Kalrez® (DuPont社製)	89%	樹脂 フッ素系ガasket材
シリコンゴム	92%	樹脂 ガasket材
ステンレス由来の腐食生成物	91%	Rougeの主成分

対象	菌 陽性識別率	備考
Bd (<i>Brevundimonas diminuta</i>)	99%	水棲菌
Pp (<i>Pseudomonas putida</i>)	99%	水棲菌
Me (<i>Methylobacterium extorquens</i>)	98%	水棲菌

5. まとめ

IMD-Wの計測原理および、基本性能の評価結果について報告した。以下に示す用途を想定し、実証試験に取り組んでいる⁽⁶⁾。

- ・ 公定法で定める周期的培養法を補完し、精製水プロセスの細菌数をリアルタイム・連続で測定することによる、微生物汚染に関する管理レベルの向上
- ・ 水質汚染が発生した場合の即時処理により、汚染リスクの影響範囲の早期特定
- ・ 粒子発生量のトレンド管理に基づいた、設備の健全性の把握

これまで広く使われてきた培養法とは全く異なる原理で細菌を検出する技術であり、特性の違いを踏まえて利用する必要があるが、精製水プロセスにおける細菌のリアルタイム、連続計測管理が可能となることを活かし、ユーザーへのさらなる価値提供を目指す。

<参考文献>

- (1) Pharmacopeial forum : USP<1231> Water for Pharmaceutical Purposes, United States Pharmacopeial Convention, 2008, Vol. 32;
- (2) Cundell, A., Gordon, O., Haycocks, N., Johnston, J., Luebke, M., Lewis, N., et al. : Novel Concept for Online Water Bioburden Analysis: Key Considerations, Applications, and Business Benefits for Microbiological Risk Reduction., 2013 May/June, American Pharmaceutical Review, 26-31.
- (3) Steven C. Hill, Michael W. Mayo, and Richard K. Chang : Fluorescence of Bacteria, Pollens, and Naturally Occurring Airborne Particles, ARL-TR-4722, 2009
- (4) Ammor, M. S. : Recent Advances in the Use of Intrinsic Fluorescence for Bacterial Identification and Characterization, 2007 Journal of Fluorescence, 17:455-459
- (5) Rouessac, F., & Rouessac, A : Chemical Analysis: Modern Instrumentation Methods and Techniques (2nd ed.), (2013). John Wiley & Sons.
- (6) R Yamasaki, S., & Morris, S : Rapid Microbiological Monitoring (RMM) technologies for purified water monitoring, IFPAC Annual Meeting 2015.

<商標>

リアルタイム細菌ディテクタ, IMD, IMD-A, IMD-Wは、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

小原 太輔	技術開発本部	基幹技術開発部
古谷 雅	技術開発本部	基幹技術開発部
増本 新吾	技術開発本部	基幹技術開発部
松浦 友朋	技術開発本部	商品開発部
地下 久哉	技術開発本部	商品開発部
細居 智樹	技術開発本部	商品開発部

静音性・メンテナンス性に優れた 新型高圧ガバナの開発

A New Type of High-Pressure Gas Regulator with Low Noise and Good Maintainability

アズビル金門株式会社

山本 健一郎
Kenichiro Yamamoto

アズビル金門株式会社

齋藤 英明
Hideaki Saito

キーワード

高圧ガバナ, 自力式調整弁, 静音

高圧ガバナとして稼働実績のあるアズビル株式会社製高圧ガバナHRBの開発・生産・メンテナンスのノウハウを継承し、小口径、小型、軽量、低騒音であり、高いメンテナンス性を持った高圧ガバナHNVを開発した。減圧機構に可変2段・固定1段の3段多孔ケーシング部を持ち、騒音の発生を抑制する。さらに可変2段にしたことにより、低開度における制御性を向上させる新構造を搭載した。

Benefitting from the know-how gained by the development, manufacture, and maintenance of the field-tested HRB high-pressure regulator, the newly developed HNV high-pressure gas regulator features a small bore, compact body, low noise, and high maintainability. The HNV has a three-level perforated cage, consisting of one fixed and two movable levels, the latter serving as a depressurizing mechanism to control noise. In addition, the HNV's novel two movable levels provide improved controllability when the degree of opening is small.

1. はじめに

導管において、ガス工場で発生させた高圧ガスを高圧状態で供給することは、遠隔地へのガス供給、圧力エネルギーの有効活用、災害時の緊急供給において非常に有益である。2011年3月11日の東日本大震災においても、津波の影響により宮城県臨海部のガス製造工場が打撃を受け、ガスの製造ができない状況であった。しかし、高圧導管には被害がなかったため、新潟-仙台間の高圧導管を使用し、遠隔地よりガスを供給することで、電気より1カ月以上、水道よりも1週間早く、迅速に復旧できたことは記憶に新しい。

日本において、高圧導管の敷設延長が1995年度から2008年度までの13年間で1.6倍と増加している。また、ロシア連邦からサハリンを経てパイプラインを建設し天然ガスを輸入する構想もあり、今後天然ガスへの燃料転換が進むと

みられ、高圧機器の市場は拡大すると予想される。

ガバナとしては、現在海外製の高圧ガバナが市場に多く設置されているが、海外製ということもあり、メンテナンスに関わる部品調達に時間を要し、緊急時の対応に苦慮している現状である。

そこで、azbilグループが保有する、高圧ガバナHRBの開発・生産・メンテナンスに関わるノウハウを継承し、小口径、小型、軽量、低騒音、高いメンテナンス性を保有したHNVガバナを開発したので報告する。

2. ガバナの概要

2.1 ガバナとコントロールバルブ

ガバナとは、導管により送られてきたガスを所定の圧力に調整する機器である。

外部からの駆動源を用いず、導管内を流れるガスを駆動源として使用するため、自力式調整弁とも呼ばれ、モータなどの外力を用いて圧力を調整する他力式調整弁であるコントロールバルブと分別される。また、大別して直動式ガバナとパイロット式ガバナの2種に分類される。

2.2 直動式ガバナ

直動式ガバナは図1に示すように、整圧する2次圧力を感知するゴム膜であるダイヤフラムとスプリング、弁体で構成されている。作動原理は、2次圧力の減少に伴い、ダイヤフラムを押している力が小さくなることによりスプリングが弁体を押下し、流路が形成される。この流路の開度により1次側から流れるガスの量を調整し、2次側の圧力を一定に保つ機器である。

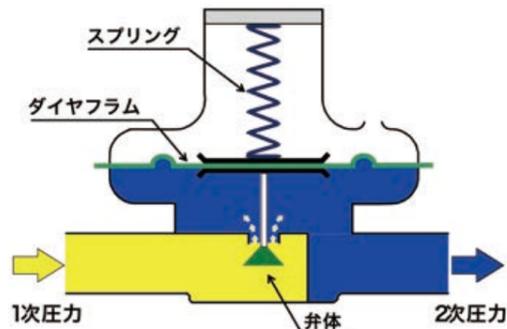


図1 直動式ガバナ模式図

通常、直動式ガバナはダイヤフラムと弁体が構造的に連結、もしくはレバーなどで機械的に連動しているため応答性が良い。しかし、大流量の流送により、オフセットと呼ばれる2次側の圧力低下が生じやすく、また、1次圧力の変動による影響(シフト)を受けやすい。一般的な直動式ガバナの流量-2次圧力特性の概念図を図2に示す。

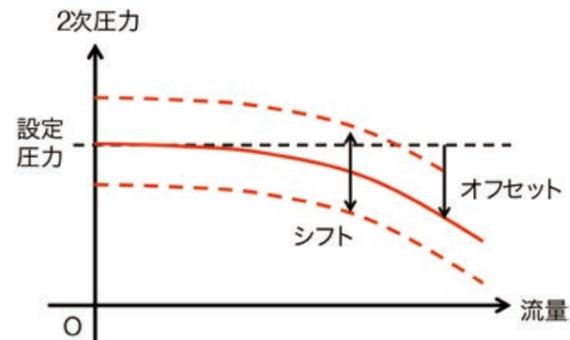


図2 直動式ガバナ流量-2次圧力特性

用途としては、ボイラーなどの燃焼装置に取り付けられる器具ガバナや、小規模工場などにガスを供給する専用ガバナなど、急な流量増加・減少に対する応答性が求められる場合に設置される。

2.3 パイロット式ガバナ

パイロット式は、図3に示すように大流量を流すための本体ガバナと、これを制御する直動ガバナであるパイロットガバナに分かれている。

作動原理は、本管から分岐した1次圧力を駆動源としてパイロットガバナが2次圧力を検知し、その2次圧力の変化を増幅して、本体ガバナを開閉する制御圧力を調整する。その制御圧力により、本体ガバナが開くことで1次側からガスが流れ、2次圧力を一定に保つ機器である。

直動式ガバナを単体で使用する場合と比べ、パイロットガバナは弁体により形成される流路が小さく、流量が少ないため制御圧力のオフセットが生じにくい。そのため、制御圧力を増幅して制御している本体ガバナも2次圧力のオフセットが生じにくい。そのため、本体ガバナで大流量のガスを流送しても、本体を開閉させる制御圧力は変動しにくい。安定性に優れている。しかし、構造が複雑であるため、直動式ガバナに比べ応答が鈍い。

用途としては、流量の急変が少なく、大流量のガスが使用される住宅地向けの地区ガバナに多く用いられる。

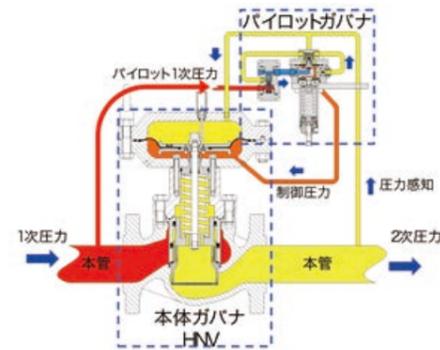


図3 パイロット式ガバナ系統図

3. HNV ガバナの開発

3.1 HNV (High Pressure Low Noise Valve)仕様

今回開発した、HNVガバナの仕様を表1に、製品の外觀写真を図4に示す。

項目	仕様		
弁サイズ	50 A	80 A	100 A
フランジ規格	ANSI Class 600		
1次圧力	1.0 ~ 8.5 MPa		
2次圧力	0.3 ~ 4.0 MPa		
定格 CV 値	25	56	95



図4 HNV ガバナ 外觀

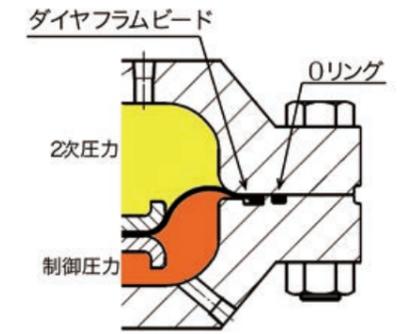


図5 2重気密構造

高圧ガス導管において使用されることから、流量変動が少なく、緊急時を除きガバナ自体が急閉・急開することがないため、HNVガバナでは流送時の安定性に優れているパイロット式ガバナを選定した。

本体ガバナの弁体を制御圧力が上昇することで開度も上昇するローディングタイプとした。もし地震災害などが発生し、パイロットガバナの供給ラインが破損しても、制御圧力が下降することで本体ガバナが閉まる構造であり、安全面を重視した設計を行った。また、減圧機構にHRBの構造を改良した新型機構を搭載し、低開度における安定性を確保した。

パイロットガバナには2段減圧パイロットを採用し制御の安定性を高めた。また、ポベット機構を採用することで、2次圧力が急上昇した場合の閉塞応答性を向上させ、安全性を高めることを目指した。

3.2 本体ガバナ

3.2.1 概要とアクチュエータ部

本体ガバナは圧力をダイヤフラムで感知し、弁体(プラグ)を稼働させるアクチュエータ部と、減圧機構を持つ本体に分かれている。

アクチュエータ部には、抜け止めと外部漏えい対策であるビードを一体成型した高圧用大型ダイヤフラムを新規設計した。さらに、図5に示すように、Oリングを外周に配置することで、外部漏えい対策を2重化し安全性を強化した。

本体のダイヤフラムを大型化することで、感圧部が大きくなることにより本体ガバナの制御性を高めた。その結果、プラグに対し長いストロークを確保することができ、多孔ケージによる減圧機構を採用しながらも大流量の流送を実現した。

加えて、アクチュエータ部には、開度指示機構を搭載することができ、アクチュエータを分解することなく簡単に取付け可能な構造を設計した。開度指示用のピンには抜け止めが付いており、もしピンがステム部から外れたとしても外部に飛び出すことがなく、ガス漏えいの危険性もない、構造的に安全な設計を行った。

3.2.2 新型減圧機構

一般的に減圧幅が大きいことにより、その圧力エネルギーの大きさから低開度でチャタリングが発生しやすく、低開度での制御は難しい。そこで、HRBでは3段多孔ケージによる減圧機構を採用しており、減圧幅を分割することでその問題を解決しようとしている。しかし、HRBの3段多孔ケージでは、ハンチングや減圧幅が大きいことによる衝撃波が生じる可能性があった。そこで、HNVでは、HRBの3段多孔ケージを改良し、2段可変、1段固定の新型3段多孔ケージを新規開発し、搭載した(図6)。HRBの3段多孔ケージは、2段目のケージ内部にプラグを配置しているのに対し、HNVの3段多孔ケージは1段目と2段目の多孔ケージの間にプラグを配置した構造を有している。HRBの3段多孔ケージでは、低開度・小流量時に1段目のケージを流体がすでに通過しているため3段減圧にならないが、HNVの3段減圧機構では、低開度・小流量時でも流体がすべてのケージを通るため、常に3段減圧を行うことができ、安定性を向上させ、ハンチングが起きにくい構造とした。

また、衝撃波対策としてプラグの刃を鋭角にし、ケージ1段目よりケージ2段目の流体が通過する孔数を増加させることで、1段目を通過してきた高速な流れを分散させる構造を提案し、低開度における衝撃波の発生を抑制した(特許出願中)。プラグの形状に関しては3.2.3項で後述する。

ケージ部にも改良を施し、ケージ1段目と2段目の孔は互い違いに孔が開けられる構造を設計した。流体が複雑な流路を流れることにより、段階的に流体の圧力を下げていき、流体が超音速になるのを防ぐことで、騒音の発生自体を抑制する構造を設計した。また、ケージ内部で流体同士を衝突させ、流体の運動エネルギーを圧力エネルギーに変換することでも騒音抑制を図った。このことにより、吸音材を搭載した他社製のガバナと同等の静音性能を実現し、吸音材・防音材の取付け部分をなくすることができるため、静音性能と軽量化・小型化を両立した。

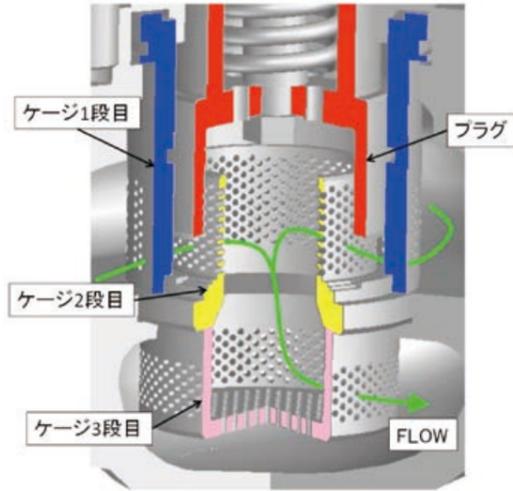


図6 3段多孔ケージ概要図

3.2.3 プラグと圧力キャンセル機構

HRB、他社製高圧ガバナの弁体は円筒形状を使用するが、HNVでは二つの径の違う円筒を組み合わせた形状の凸型のプラグを採用した(図7)。これにより、プラグ上部よりケージ1段目を取り付け、プラグ大径部分が1段目に引っかかることで、ケージ1段目とプラグをアセンブリ化できる構造とし、組立性を向上させた。



図7 プラグ形状

この構造を採用するにあたって、プラグとケージ1段目の間に空間ができ、圧力の逃げ場がないことによって、空気ばねになってしまう問題が発生したが、プラグに導通孔を設けることでその問題を解決した。

その結果、プラグ全体にかかる上下圧をキャンセルすることができ、2次圧力に左右されない動きを実現した(図8、特許取得済)。また、ケージ2段目と3段目を同一の部品とすることで、部品数を減らし組立性を向上させた。

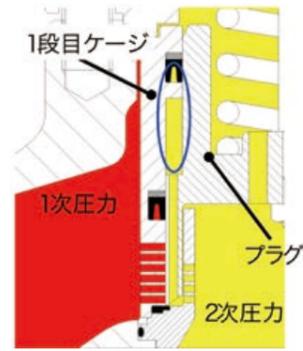


図8 圧力キャンセル機構

3.3 2段減圧パイロットガバナ

一般的に単体パイロットでの高圧制御では、減圧幅が大きいため、低開度での制御が難しいため、パイロットガバナが微小開度で急開・急閉を繰り返すハンチングが生じやすい。また、圧力が高圧なため、ダイヤフラムなどの感知部の高強度化が求められ、そのうえで精密な圧力制御を確実にこなすには難点がある。

HRBは、本体ガバナがダイヤフラムではなく大型のピストンで2次圧力を感知するピストン式直動ガバナであるため、ピストンの摺動抵抗が大きく、反応が鈍い。その反応の鈍さを補うため制御するパイロットは高性能でなくてはならない。その結果、構造が複雑かつ高い精度が要求され、調整や組立・メンテナンスに苦慮している。

HNVは本体ガバナにダイヤフラム式直動ガバナを採用しており、ピストン式に比べ応答性が良いため、複雑かつ高精度な構造のパイロットである必要がない。そこで、二つの一般的な構造の直動ガバナを直列使用する2段減圧パイロットガバナを採用した。

2段減圧とすることで、一つ目のパイロットで1次圧力を低減させ、制御圧力を調整する二つ目のパイロットの減圧幅を小さくすることができ、パイロットの弁体が微少に開いた場合でもハンチングを起こしにくく、安定してガスを供給できるガバナを目指した。図9にその構造を示す。

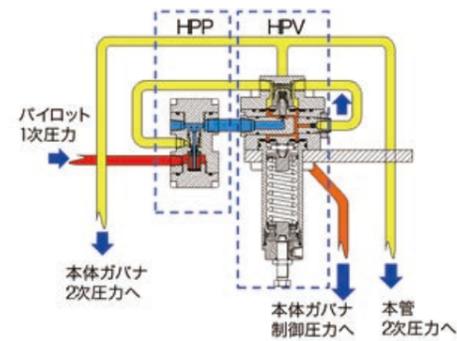


図9 パイロットガバナ構造

3.3.1 HPP (High Pressure Pre-pilot)

一つ目のパイロットガバナHPPは、上流側の圧力を二つ目のパイロットが制御できる圧力まで減圧する機器であ

る。一つ目のパイロットは、本体ガバナの制御圧力をコントロールしておらず、緻密な制御が必要ではないため、ピストン式の直動ガバナを採用した。

ピストン式直動ガバナは、一般的にダイヤフラムで圧力を感知する構造よりも、急激に圧力変動を起こした際に生じる圧力衝撃(圧力の数倍の衝撃力)に強く、故障しにくい。また、構造を単純にすることができ、HPPは11部品のみで構成され、組立性と安全性を両立することができた。

もし使用環境などにより、HPPから異音や振動が発生した場合には、ピストンを押えているスプリングを変更することにより、その異常を取り除くことができ、種々の条件を想定した部品を取り揃えている。また、スプリングはHPP上部の蓋を外すことにより現場で容易に交換することができる。

3.3.2 HPV (High Pressure Pilot Valve)

二つ目のパイロットHPVは、HPPから送られてきた圧力を2次圧力に調整する直動ガバナである。

本体ガバナと同様に、抜け止めと外部漏えい対策のビードを有したダイヤフラムを新規設計し、外側にOリングを配置することで、外部漏えい対策を二重化し、安全性を強化した。

高圧を制御する使用用途より、剛性の高いスプリングを圧力設定ねじによりねじ込んだ際に、ダイヤフラムがねじれてしまうことが考えられ、ダイヤフラムの切れによるガス漏えいや、圧力設定が正常にできなくなるなどの不具合が発生することが懸念された。そこで、HPVでは、圧力設定スプリングの設置面にスラストベアリングを配置することで、設定ネジを締め込むことによるダイヤフラムのねじれを防止した。

HPPと同様に使用環境により何らかの異常が発生した場合には、排気オリフィスを交換することで改善が見込まれる。他社製ガバナにおいては、排気オリフィスと同様の部品を本体ガバナに搭載しているため、本体ガバナを分解しなければ交換できないが、HPVではパイロットに排気オリフィスを取り付け、パイロット単体で応答性を変化させることができ、使用条件に沿った最適なパイロットガバナを提供することを可能にしている。

また、HPVにはポベット構造を採用し、安全性を高めている。図10のように、本体部の制御圧力を調整する制御室がダイヤフラムに挟まれており、2次圧力が上昇した場合、ダイヤフラムが下に押し下げられ、ポベットが吸気ノズルのオリフィスを塞ぎ、パイロットの流れを遮断する。その後、2次圧力と制御圧力を繋ぐ通路が開き、二つの圧力を同圧とすることで、本体を急閉してガスの供給を止める構造を有している。

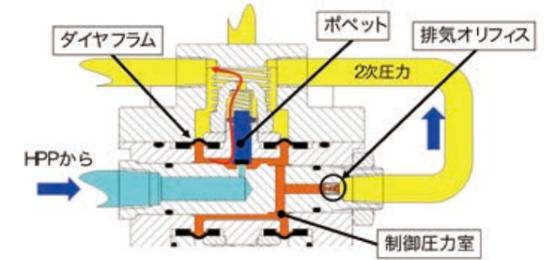


図10 ポベット構造図

3.4 メンテナンス性

現在多く配置されている他社製高圧ガバナの現状を以下に挙げる。

- ・特殊工具を必要とする
- ・本体下部より部品(重量物)を取り外す必要がある
- ・配管下部に体を入れて作業するため、危険
- ・上述理由により本体下部にスペースが必要
- ・海外製が多く、故障部品の取寄せや、問い合わせに時間をとられる

HNVでは、特殊工具を使用しない構造とし、容易に分解・メンテナンスできる構造とした。また、本体上部よりすべて組立を行うことができるトップエントリー方式を採用したことで、配管下部に入って作業する必要がなく、危険や制約がない。

海外製のガバナでは部品調達に時間が取られるのに対し、HNVではすべての部品において国内生産・調達することをコンセプトとし、一般交換部品も汎用品を選定しているため、メンテナンス部品調達も迅速にできる。

本体部品数も、多段多孔ケージによる減圧機構により、本体に防音・吸音材を必要としないことから大幅に減少させることができた。他社製ガバナが200部品以上であるのに対し、HNVは156部品と50部品減少させ、組立性を向上させた。

HPP、HPVともに問題が発生した場合でも、スプリング、排気オリフィスを交換することで、ハンチング等を改善することができる。

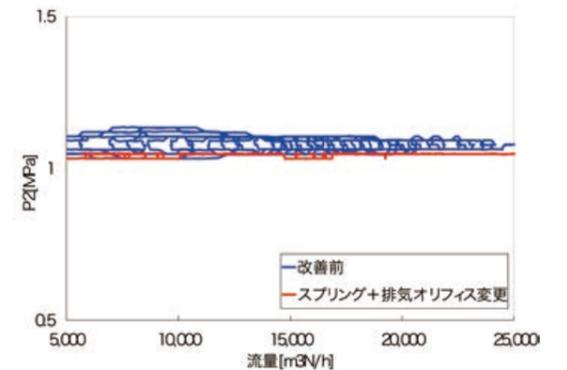


図11 スプリング、排気オリフィス交換の効果

図11は、高差圧流送時(差圧7 MPa)に実際にハンチングが発生した場合における2次圧力-流量の特性グラフである。改善前のグラフを見ると、流量が増減しており、ガバナが開いたり閉まったりしており、ハンチングを起している。そこで、スプリング・排気オリフィスを交換することでハンチングが完全に無くなり、2次圧力が流量に対し一定になる事が確認できる。

4. おわりに

本稿では、azbilグループの保有するHRBガバナの技術を継承した小口径モデルの高圧ガバナHNVについて報告した。小型、軽量、低騒音、高いメンテナンス性を兼ね備えた高圧ガバナをラインナップすることで、高圧から低圧まですべてのガバナを提供することにより、ガバナの総合メーカーとして顧客のニーズに合わせた製品を提供することを実現した。

<参考文献>

- (1) 総合資源エネルギー調査会ほか:東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書 pp.4-6 (2012)
- (2) ガスのインフラ整備に関するワーキンググループ:ガスのインフラ整備に向けて pp.4-8 (2011)
- (3) 北野哲司:東日本大震災における都市ガスの被害・復旧状況と地震対策の課題 「予防時報」pp.20-27
- (4) 仙台市ガス局:東日本大震災 復旧の記録(2012)

<著者所属>

山本 健一郎	アズビル金門株式会社 開発本部製品開発部
齋藤 英明	アズビル金門株式会社 開発本部製品開発部

湿度センサの耐環境性能向上技術の開発

Technology for Improvement of Humidity Sensor Durability

アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー

杉山 正洋
Masahiro Sugiyama

キーワード

湿度センサ, 環境, 高分子膜, ドリフト, エレメント加熱, 潮解性物質, 有機溶剤

湿度エレメントはその感湿部が測定雰囲気中に直接晒されるために、薬品や消毒剤を使用する製造環境や研究施設などの環境では、計測値のずれであるドリフト課題が避けられない。本技術開発では、湿度エレメントの耐環境性能を向上させるために①エレメント加熱機能 ②ドリフト検知機能 ③ドリフト量から加熱周期を最適化する機能 ④故障診断機能などの技術を開発した。また、この技術を使った耐環境温湿度センサを開発したので報告する。

Because humidity-sensing elements are directly exposed to the atmosphere being measured, in environments where disinfectants or other chemicals are used, such as industrial plants and research facilities, a shift of the measured value away from the actual humidity is inevitable. To make humidity-sensing elements more robust, we have developed novel functions such as: (1) element heating, (2) drift detection, (3) heating interval optimization based on detected error, and (4) failure diagnosis. We also report on our newly developed environmentally resistant humidity sensor, which employs these new functions.

1. はじめに

製造環境や研究施設などにおける湿度の管理は製品の品質や研究成果に影響するため、非常に重要になってきている。しかし、それらの施設に設置されている湿度センサは、生産・研究過程で発生する有機溶剤や消毒剤などの薬品の飛散、および、空調の給気に含まれる外気成分などの付着が原因となってセンサエレメント(湿度検出素子)の経年劣化が早まり、湿度の測定誤差(ドリフト)が大きくなるケースがある。

従来の湿度センサではこれらによる経年劣化を避けることが難しいため、劣化状態をこまめにチェックしドリフト状態を把握することで、問題が発生する前に製品を交換するなど事前に対処してきた。しかし、このような対処は顧客や現場作業員にとっても非常に負担がかかってしまう。その理由の一つは費用負担であるが、それ以上に交換作業を含む現場管理の負担が大きいためである。製造現場や動物飼育室などの研究施設では、24時間空調を稼働する場合が多く、それらの施設では空調を簡単に止めることはできない。また、クリーンルームや動物飼育室、病院では、外部からのほこりや細菌の持込みの危険性から簡単に入室を許可することができない。このようにセンサが故障したからといって簡単に交換できないなど、現場管理の負担が増加している。

こうした背景から耐環境性能を向上させた湿度センサ

は、現場ソリューションに繋がる重要な技術として開発を望まれていた。

2. 湿度センサの計測原理

ここで、湿度センサの特徴と計測原理について説明する。当社の湿度センサは高分子容量式を採用している。図1に高分子容量式湿度エレメントの出力特性のグラフを示した。横軸に相対湿度、縦軸に静電容量をとり、温度ごとに特性を示した。グラフからもわかるように高分子容量式の特長は、①出力特性の直線性が良い。②温度係数が小さい。③低湿から高湿まで広い範囲で計測できる、である。しかし、アルコールなどの有機溶剤で水分子に類似しているガスは水分子との区別ができず、計測誤差の原因になる。

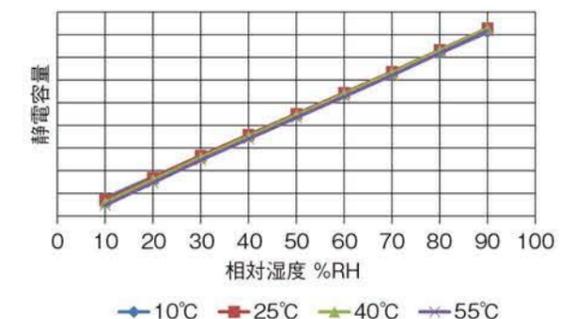


図1 高分子容量式湿度エレメント出力特性

図2に高分子容量式湿度エレメントの模式図を示す。図2のように、上側電極と下側電極の間に感湿性高分子膜を挟んだ平行平板型コンデンサが形成されている。感湿性高分子膜は数ミクロン程度の厚さがあり、適度な吸着水分量を持っている。図3に高分子容量式湿度エレメント構造模式図を示す。上側電極には水分が通過できる程度の小さい穴が開いており、水分はこの穴を通過して高分子膜に吸着する。

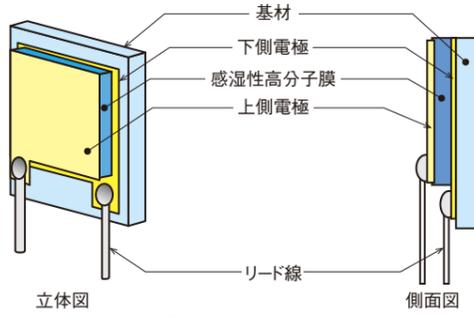


図2 高分子容量式湿度エレメント模式図

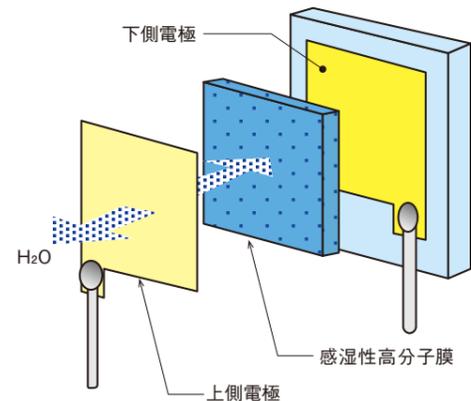


図3 高分子容量式湿度エレメント構造模式図

水分子は比誘電率80の誘電体であり、高分子膜に水分子が入り込むと高分子膜の誘電率が大きくなり、静電容量も大きくなる。この高分子膜に吸着・脱離する水分量は周囲の相対湿度に比例しており、静電容量を測定することで湿度を計測することができる。

静電容量 C_pU は式(1)のように表すことができる。

$$C_pU = \alpha \times \epsilon U \times \frac{S}{t} \quad (1)$$

- C_pU : 相対湿度Uにおける湿度エレメントの静電容量
- α : 定数
- ϵU : 相対湿度Uにおける高分子の誘電率
- S : 電極の有効面積
- t : 電極間距離

3. 対象市場環境の特徴

3.1 対象市場の領域

湿度センサを使う空調市場は表1のように大きく三つの領域に分けることができる。

表1 湿度センサ市場領域

市場領域	環境
(1) オフィスビル, ホテル, 店舗	ドリフト原因ガスを含まない環境
(2) 半導体製造工場, 印刷工場, 塗装工場	有機溶剤ガスを多く含む環境
(3) 動物飼育室, 研究所, 病院, 百葉箱	消毒剤ガス, 外気を多く含む環境

これらの市場のうち、(2)、(3)で示した有機溶剤ガスを多く含む環境と、消毒剤、外気を多く含む環境に対して長期間安心して使用できる湿度センサの技術開発を試みた。

3.2 有機溶剤ガスを多く含む環境の特徴

表1(2)で示した半導体製造工場、印刷工場、塗装工場の環境とは、有機溶剤ガスを多く含む環境のことである。

これらの施設では、有機溶剤のエッチング液や塗料の溶剤などが使用されるため、湿度センサは有機溶剤ガス雰囲気に晒されてしまう。このような施設では夜間空調を止めることもあるため、室内に残留している有機溶剤ガスは給気ダクトにも入り込み、ダクトに設置している湿度センサも有機溶剤ガス雰囲気に晒されてしまう。

表2の図で示したように、有機溶剤ガスは水分と同じように湿度エレメントの上側電極を通過し、感湿性高分子膜の中に入り込んでしまう。有機溶剤も誘電体であり、高分子膜に入り込むことで高分子膜の誘電率が大きくなり、静電容量が増加するためドリフトが発生する。

有機溶剤によるドリフトの特徴は、有機溶剤ガス濃度によっては短期間にドリフトすること、および、低湿になるほどドリフト量が増えることがあげられる。その他の特徴は表2に記載した。

表2 有機溶剤ガスによるドリフトの原因・特徴

主な現場	半導体製造工場, 印刷工場, 塗装工場
原因	<p>有機溶剤ガスは上側電極を通過し、高分子膜に入り込む。有機溶剤が高分子膜に入り込み静電容量が増加する。</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・短期間でドリフトする。 ・低湿になるほどドリフト量が多い。 ・有機溶剤の濃度が高いほどドリフト量が増加する。 ・有機溶剤の種類により、ドリフトしないものもある。
対策	・湿度エレメントを加熱し、高分子膜に入り込んだ有機溶剤を飛ばす。

3.3 消毒剤ガス, 外気を多く含む環境の特徴

表1(3)で示したように動物飼育室、研究所、病院、百

葉箱で使用する環境は、消毒剤ガス、外気を多く含む環境である。

動物飼育室、研究所、病院の手術室では定期的に室内の消毒が行われるため、室内に設置された湿度センサは消毒剤ガス雰囲気に晒されてしまう。通常、消毒が行われている間はセンサケースにカバーをかけて養生が行われるが、残留物による消毒剤ガスの影響を少なからず受けてしまう場合がある。

また、このような施設、特に動物飼育室や病院では、外部からの細菌の流入を防ぐだけでなく、内部での感染拡大を防ぐ必要性から空調設備ではオールフレッシュ空調方式をとっている場合が多い。このオールフレッシュ空調とは、図4に示したように、給気された空気はレターン(空気循環)せずすべて排気する仕組みである。これにより、室内で発生した汚染ガスは循環されず、他の室内の汚染を防ぐことができる。

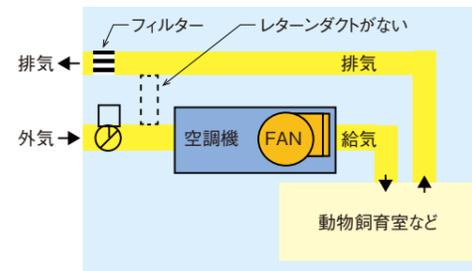


図4 オールフレッシュ空調

しかし、この方式は外気を通常よりも多く取り入れることになる。外気にはわずかに硫化物や塩類の不純物を含んでいるため、給気ダクトや室内に設置された湿度センサはより多くの不純物に触れることになる。

また、これらの室内で使用される消毒剤には塩素成分が含まれていることがある。この成分と外気に含まれる硫化物や塩化物、および、それらの化合物から潮解性物質が生成される(図5参照)。この潮解性物質とは大気中の水蒸気を吸収してしまう物質で、乾燥材などの塩化カルシウムがこれにあたる。

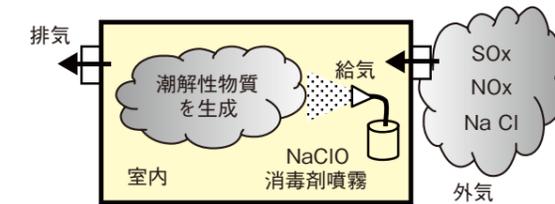


図5 潮解性物質の生成

表3の図で示したように、潮解性物質が湿度エレメントの表面に触れるとその一部が付着してしまい、周囲の水蒸気を吸収してしまうため、湿度エレメント周囲の相対湿度が上昇し、正しい湿度を計測できなくなってしまう。

このように、動物飼育室、研究所、病院、百葉箱などでのドリフト原因は、この潮解性物質の付着である場合が多い。そのドリフトの特徴は半年から数年という長い時間をかけてエレメント表面に蓄積していくため少しずつ劣化していくこと、および、高湿になるほどドリフト量が増えることが挙げられる。表3にそのドリフト原因およびドリフトの特徴を示した。

表3 潮解性物質によるドリフトの原因・特徴

主な現場	動物飼育室, 研究所, 病院, 百葉箱
原因	<p>潮解性物質が上側電極に付着。潮解性物質に水分が吸着する。エレメント表面に潮解性物質が付着すると周囲の水分が吸着し、相対湿度が上昇する。</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・半年から数年かけて少しずつドリフトする。 ・高湿になるほどドリフト量が多い。 ・付着量が多いほどドリフト量が大きくなる。
対策	・エレメント表面に付着した潮解性物質を除去する。

4. ドリフト対策

ドリフト対策は、ドリフトの原因によって異なるが、主に三つの対策がある。

- ① エレメント加熱
- ② エレメント洗浄
- ③ エレメント交換

4.1 エレメント加熱による対策

エレメントの加熱は、潮解性物質の付着と有機溶剤ガスの両方のドリフトに対して効果がある。

有機溶剤ガスの場合は加熱することで高分子膜に入り込んだ有機溶剤を飛ばしドリフトが回復する。

潮解性物質の付着の場合は加熱することで潮解性物質に吸着した水分を飛ばしドリフトが回復する。ただし、この場合は潮解性物質が除去された訳ではないので、時間経過と共に再びドリフトしてしまう欠点がある。

エレメント加熱の問題点は、加熱中は環境の湿度計測ができないことである。動物飼育室をはじめ半導体製造工場などでは24時間空調を稼働しているため、加熱中に計測を止めることはできない。そこで、二つのエレメントを交互に切り換え、片方が加熱中のときはもう一方のエレメントで計測する方式にした。二つのエレメントを使用すると、エレメントを切り換えたときに、器差により出力が変動する課題は、加熱を行っていない間に互いの計測値を比較し器差補正することで解決した。

4.2 エレメント洗浄による対策

エレメント洗浄はエレメント表面に付着した潮解性物質によるドリフトに対して効果がある。洗浄により潮解性物質を除去するため、加熱のときは一時的な回復であったが、洗浄には永続的な効果が期待できる。

しかし、通常、湿度エレメントが濡れてしまうと感湿性高分子膜に過剰の水分が入り込み、相対湿度が下がっても水分が残留してしまい、ドリフトしたり、ヒステリシスが大きくなったりする。

そこで、洗浄の方法や手順を考案した。洗浄後にはエレメントを加熱し、高分子膜内の余分な水分を飛ばす手順を決めたことで、エレメント洗浄が可能となった。

4.3 エレメント交換による対策

エレメント加熱や洗浄でも回復しないドリフトや経年劣化に対応するため、加熱素子一体型エレメントFP4を開発し、エレメント交換を可能とした。写真1はその加熱素子一体型エレメントFP4とそれをプローブに取り付けた状態である。



5. ドリフト検知・応用技術

前章までに述べてきたように、ドリフト原因によってドリフト傾向が異なっている。図6は横軸に相対湿度、縦軸にドリフト量をとったグラフで、原因別のドリフト傾向を示している。有機溶剤ガスによるドリフトは低湿度のときに大きく、潮解性物質の付着によるドリフトは高湿度のときに大きく傾向がある。

この傾向を利用してドリフト量を検知する技術を開発した。

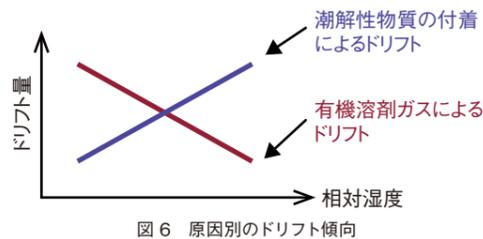


図6 原因別のドリフト傾向

5.1 有機溶剤によるドリフトの検知

有機溶剤によるドリフト対策はエレメント加熱が有効であることを述べてきたが、溶剤の種類や濃度、暴露期間によっては加熱しても完全に回復しないことがある。そのため、ドリフトを検知する技術が望まれており、その技術を開発したので説明する。

エレメントを加熱した時のエレメントの相対湿度変化を図7に示した。図7は横軸に温度をとり、縦軸に水蒸気圧をとったもので、飽和水蒸気圧曲線を示している。図7では25℃50%RHの環境にあるエレメントを加熱したときの変化を表している。

エレメントはその表面温度が約120℃になるように加熱している。加熱を行ってもエレメント周囲の水蒸気圧(絶対水分量)は変化しないので、エレメントの計測点は水蒸気圧曲線上を水平に120℃まで移動する。加熱中の相対湿度は約1%RHになり、その相対湿度に合わせて感湿性高分子膜の水分が飛ぶため、正常なエレメントであれば、エレメント

の計測する相対湿度も約1%RHに下がる。

図6に示したように、有機溶剤ガスによるドリフトは低湿度の方が大きい傾向があることから、加熱により低湿状態にすることで、ドリフトを検知しやすくしている。

図8に正常なエレメントと有機溶剤ガスによりドリフトしているエレメントの加熱動作による出力変化を示した。

25℃50%RHの環境にある正常なエレメントは加熱すると約1%RHに下がる。一方、有機溶剤によりドリフトしているエレメントは、低湿でのドリフトが大きいため、エレメントの出力が1%RHまで下がらない。この時の出力からドリフト量を検出する。

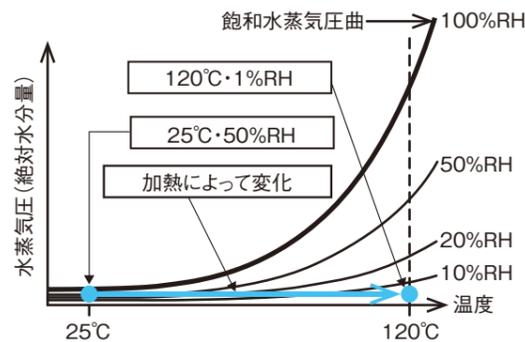


図7 加熱による相対湿度の変化

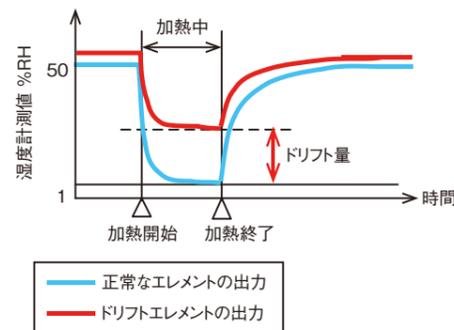


図8 加熱動作によるエレメントの出力変化

5.2 潮解性物質付着によるドリフトの検知

潮解性物質付着によるドリフト対策はエレメント洗浄が有効であるが、人手による作業であり、負担を減らすためにもできるだけ行わないで済ませたい。ドリフトが検知できれば、管理がしやすくなり負担を軽減することができる。ここでは、その検知技術を説明する。なお、この検知技術は有機溶剤によるドリフトでも有効に機能する。

図6に示したように、潮解性物質の付着によるドリフトは低湿度のときは小さいことから、5.1節で示した方法ではこのドリフトを検知できない。そこで、このドリフトの特徴を使ってドリフトを検知する。

表3で示したように、潮解性物質の付着によるドリフトは潮解性物質が周囲の水分を吸収するために起こるものであり、潮解性物質の付着量が多く、水分が多い高湿状態になるほどドリフトが大きくなる。ドリフトした状態で加熱すると、吸収された水分は蒸発し一時的にドリフトは回復するが、加熱では潮解性物質は除去できないため、再びドリフトし始める。このため二つの湿度エレメントを交互に加熱

して、加熱から時間の経ったエレメントと、加熱直後のエレメントの湿度計測値を比較することで、そのドリフト量を求める技術を開発した。

図9にドリフトしていないエレメントの動作を示した。図9は横軸に時間、縦軸に湿度計測値をとったグラフである。図9で示す計測エレメントとは、計測値を出力する側のエレメントのことで、次の切換えタイミングまでは加熱を行わない。この計測エレメントは加熱周期に合わせた切換えタイミングでエレメント①とエレメント②が交互に切り換わる。

図9のように、エレメント①とエレメント②の計測値はドリフトしていないため一定になっており、切換えタイミングでのエレメント間の計測値に差がないことがわかる。なお、説明の便宜上湿度計測値は一定になっているが、実際には環境に合わせて変動するものである。

次にドリフトしているエレメントの動作を図10に示した。図10の横軸と縦軸は図9と同じである。

図10ではエレメントに潮解性物質が付着しているため、加熱終了直後からドリフトが始まり、時間経過とともにドリフトが大きくなる。

このような場合、加熱の前後で湿度計測値が大きく変わるため、切換えタイミングで二つのエレメントの計測値を比較したときに差が生じる。この差をドリフト量として検出する。

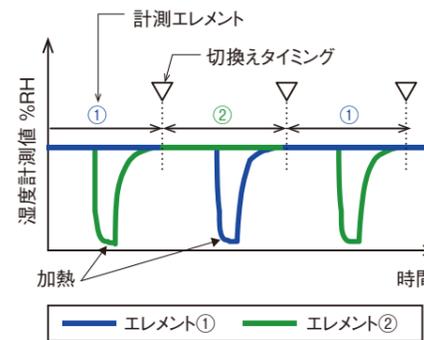


図9 加熱動作による正常なエレメント出力

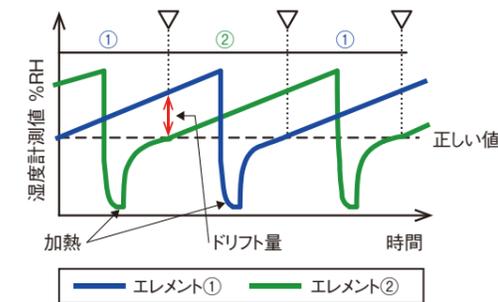


図10 ドリフトしたエレメント出力

潮解性物質の付着量が多いと単位時間当たりのドリフト量が大きくなるので、検出するドリフト量も大きくなる。また、有機溶剤ガスの濃度が高くても単位時間当たりのドリフト量が大きくなるので、ドリフトを検知することができる。

5.3 加熱最適化機能

加熱最適化機能とは、5.2節の潮解性物質付着によるド

リフト検知で求めたドリフト量から、加熱周期を変更し最適化する機能のことである。

エレメントは一定の周期で加熱を繰り返しており、製品の初期設定では加熱周期は24時間になっている。しかし、有機溶剤の種類や濃度、暴露時間によってドリフト量が異なり、ドリフトが大きい場合はより短い加熱周期が望ましく、小さい場合は長い加熱周期にすることも可能である。

ただし、設備管理者がこのドリフト量を管理し、加熱周期を変更することは、製品の機能上可能ではあるが、どのように値を変更するのか判断することは難しい。

そこでこの機能では、ドリフト検知で求めたドリフト量が製品精度の±2%RH以内になるように、自動で加熱周期を3時間から48時間まで段階的に変更し、加熱周期を最適化する。

6. 耐環境温湿度センサの開発

6.1 製品概要

前章までに述べてきた技術を搭載した耐環境温湿度センサ(写真2)の製品開発を行った。



室内用
(横 195 × 縦 115 × 奥行 56)

ダクト用
(横 155 × 縦 115 × 奥行 56, センサケーブル長 540)
写真2 耐環境温湿度センサ (mm)

この製品は、温度検出に白金薄膜測温抵抗体を使用し、湿度検出に高分子容量式湿度エレメントを使用した温湿度センサである。室内用とダクト用の2タイプがある。製品の外観を写真2に示す。基本仕様を表4に示す。

表4 基本仕様

項目		室内用	ダクト用
測定範囲	温度	0 ~ 50℃	-20 ~ 60℃
	湿度	0 ~ 95%RH	0 ~ 100%RH
	露点温度	-30 ~ 50℃ td	-40 ~ 60℃ td
精度	温度	0.2℃ ± 1digit @ 25℃	
	湿度	2%RH ± 1digit @ 25℃ 50%RH	
	露点温度	1℃ td ± 1digit @ 25℃ 50%RH	

ダクト用の湿度精度を図11に、露点温度精度を図12に示した。それぞれの精度は温度と湿度に依存している。

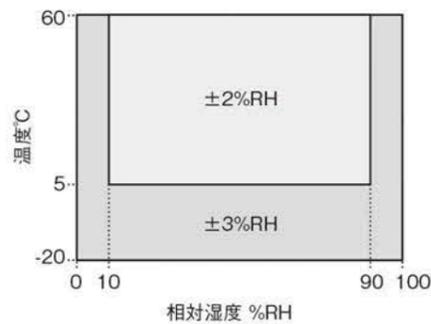


図11 ダクト用センサ湿度精度

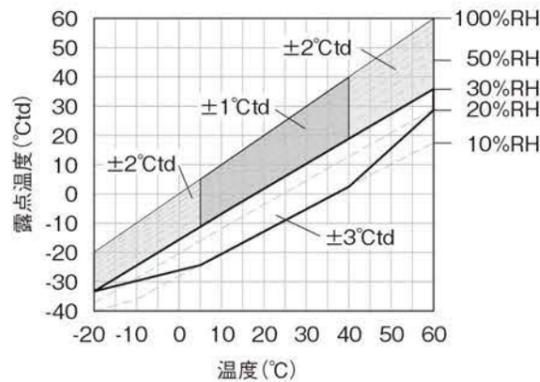


図12 ダクト用センサ露点温度精度

その他の主な仕様・機能は以下のとおりである。

- ・交換可能な加熱素子一体型温湿度エレメントFP4(写真1)を採用
- ・加熱中でも計測を継続するダブルエレメント方式
- ・湿度計測と露点温度計測の切換え機能搭載
- ・1-5V, 4-20mAアナログ出力切換え機能搭載
- ・加熱周期自動選定(加熱最適化)機能搭載
- ・故障診断機能搭載

故障診断機能とは、加熱しているエレメントの湿度の値から故障かどうかを診断する機能である。

6.2 耐薬品性能

この製品の有機溶剤に対する耐性を表5に記載した。ドリフト量は薬品の種類、濃度、暴露時間によって変わるため、表5の値は試験条件を24時間ごとに10分間の加熱で3年間暴露した場合の値である。

表5 加熱による耐薬品性能

有機溶剤	ドリフト量と暴露濃度
エタノール	± 2%RH @250ppm
アセトン	± 2%RH @100ppm
メチルエチルケトン	± 2%RH @100ppm
乳酸エチル	± 2%RH @50ppm

6.3 耐環境性能評価比較

加熱機能のない従来製品と耐環境温湿度センサの耐環

境性能を比較した。試験はサンプルを加速試験装置に設置し、約200日ごとに装置から取り出し、精度測定によりドリフト量を求めた。

その試験結果を図13と図14に示した。グラフは横軸に試験経過日数を取り、縦軸にドリフト量をとっている。

図13は有機溶剤ガス雰囲気を実験した加速試験結果である。図14は潮解性物質、外気を想定した加速試験結果である。

従来製品に比べて耐環境温湿度センサではドリフト量が小さく、加熱の効果が表れている。

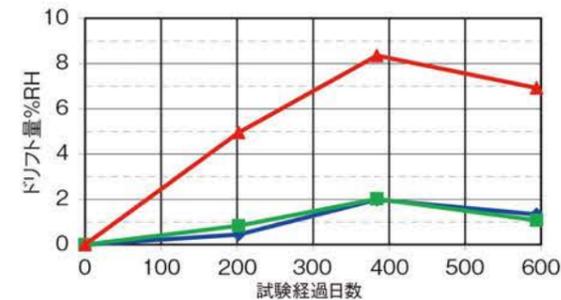


図13 有機溶剤ガスを想定したドリフト加速試験結果

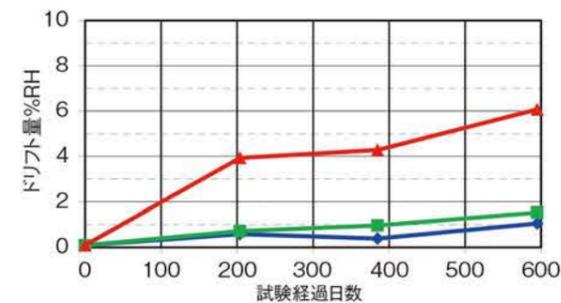


図14 潮解性物質を想定したドリフト加速試験結果

7. おわりに

従来はドリフトしたり、故障したりしていた生産・研究現場などの環境でも使用できる湿度センサの技術開発を行った。また、その技術を用いた耐環境温湿度センサを開発した。

この製品により、現場環境の安定した温湿度管理に貢献することで現場ソリューションに繋がることを期待している。

<参考文献>

- (1) アズビル株式会社:製品紹介 耐環境温湿度センサ, 計測制御, 2014, Vol.53, No.6 pp.540-541, 公益社団法人計測自動制御学会
- (2) 日本機械学会編著:湿度・水分計測と環境のモニター, 1992,技報堂出版

<著者所属>

杉山 正洋 ビルシステムカンパニー
開発本部開発2部

クランプオン超音波気体流量計の開発

Development of a Clamp-on Ultrasonic Flowmeter for Gas

アズビル株式会社
技術開発本部

佐々木 宏
Hiroshi Sasaki

アズビル株式会社
技術開発本部

林 智仁
Tomohito Hayashi

キーワード

クランプオン, 超音波, 気体, 流量計, 臨界角, エバネッセント, ダンピング材, ヒルベルト変換, 同期加算

高性能ダンピング材と臨界角を超える入射角を持つトランスデューサとの組み合わせにより、金属配管中の常圧空気の流量計測が可能なクランプオン超音波気体流量計の開発に成功した。この流量計は空気以外の気体にも適用可能で、従来の製品に比べてより低い圧力から流量計測が可能である。臨界角を超えるトランスデューサにおける超音波伝播メカニズムについて考察し、エバネッセントにより伝播されているのではないかと結論した。ノイズに強く精度の高い計算ができる信号処理方法についても解説する。

By combining a high-performance damping material and an ultrasonic transducer with an angle of incidence greater than its critical angle, we have developed a clamp-on ultrasonic gas flowmeter capable even of measuring the flow of air at normal atmospheric pressure inside metal pipes. The flowmeter can also be used with gases other than air, and its minimum measurable pressure is lower than that of existing clamp-on gas flowmeters. Based on analysis of the ultrasonic wave transmission mechanism by the transducer with the critical angle exceeded, it is believed that transmission is by evanescent field. A robust and high-precision signal processing method is also described.

1. はじめに

クランプオン超音波流量計は、配管の外側に超音波トランスデューサを取付けることで配管内部の流体の流速・流量を計測することができる流量計である。配管を切断することなく配管内部の流体の流量を計測することができるため、「液体」用の流量計としては産業分野で広く用いられている。配管の切断が不要なことから、

- ・後付けもしくは一時的な設置
- ・配管内のコンタミネーションが許容されない現場に適している。また、流量計が直接流体に触れないので、腐食性流体にも対応できる。さらに、配管が大口径の場合、配管を切って挿入する従来の流量計では流量計そのものが大型になるが、クランプオン超音波流量計では配管に取り付ける超音波トランスデューサは、小口径のものとは

ほぼ同じ大きさであり、クランプオン超音波流量計を使用するメリットが大きい。

ただ、技術的難易度の高さから「気体」の流量を計測できるクランプオン超音波流量計は少ない。また、測定条件に制約が多く、低い圧力の気体には対応できていなかった。このため低い圧力から計測できるクランプオン超音波気体流量計が求められている。

2. 測定原理

本稿で扱うクランプオン超音波気体流量計は、上流から下流(順方向)および下流から上流(逆方向)へと伝播する超音波の伝播時間の差から流体の流速・流量を算出する流量計である。この方法は伝播時間差法と呼ばれている。伝播時間差法による流量計測原理を図1に示す。

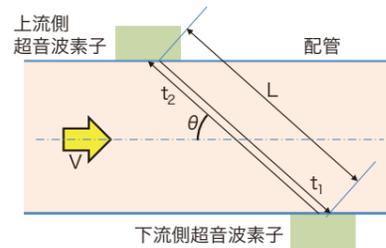


図1 伝播時間差法の原理

断面積Sの配管中を流体が速度Vで流れているとする。θは配管の軸と超音波ビームの軸とのなす角である。

上流側超音波素子から発せられて下流側超音波素子で受けられた超音波の伝播時間 t_1 (順方向伝播時間)は以下のように表される。

$$t_1 = \frac{L}{C + V \cos \theta} \quad (1)$$

ここで、

L 超音波伝播距離[m]
C 流体中の音速[m/s]
とする。

超音波は流体の流れに乗って伝播するため、流れが速いほど短い時間で伝播する。

同様に、下流側超音波素子から発せられて上流側超音波素子で受けられた超音波の伝播時間 t_2 (逆方向伝播時間)は以下のように表される。

$$t_2 = \frac{L}{C - V \cos \theta} \quad (2)$$

超音波は流体の流れに逆らって伝播するため、流れが速いほど長い時間をかけて伝播する。

(1), (2)から伝播時間差 $\Delta t = t_2 - t_1$ と流速Vの関係は以下ようになる。

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2LV \cos \theta}{C^2 - V^2 \cos^2 \theta}$$

$C \gg V$ であるので、

$$\Delta t \cong \frac{2LV \cos \theta}{C^2} \quad (3)$$

したがって、

$$V \cong \frac{C^2}{2L \cos \theta} \Delta t \quad (4)$$

この流速Vに断面積Sと流量補正係数kをかけると流量Qを求めることができる。

$$Q = kSV \quad (5)$$

流量補正係数は超音波ビームが流体を通る部分の平均流速と配管断面における平均流速との比を補正するための係数である。

伝播時間差について一例を挙げる。配管として100A Sch10S配管(内径108.3 mm)を用い、音速が343 m/s、

$\theta=84.3^\circ$ であった場合、(3)より流速1 m/sにおける伝播時間差は0.184 μs となる。同様に、流速が30 m/sにおける伝播時間差は5.52 μs となる。超音波の周波数を1 MHzとした場合その周期は1 μs であるため、超音波の周期をまたいで広い時間範囲での時間差計測を行うことが必要になる。

3. ダンピング材

クランプオン超音波流量計は、超音波素子が配管の外側から配管に押しえつけられて取り付けられているところに特徴がある。超音波素子はウェッジと呼ばれる楔形の樹脂材料と組み合わせて斜角入射超音波トランスデューサを形成し、配管表面法線方向に対して斜めに超音波を入射させる(図2)。

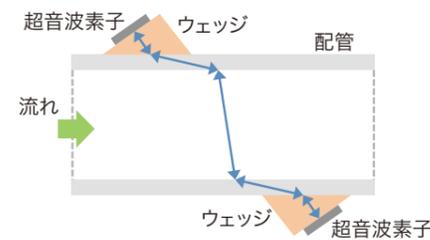


図2 クランプオン超音波流量計

クランプオン超音波流量計の第一の課題は超音波の回り込みである。超音波は、金属である配管から気体へ透過する気中伝播波よりも配管金属中を伝わる管伝播波の方が伝わりやすい。また、管伝播波と気中伝播波とは同じ周波数の信号であるため、受信信号からこれら二つの信号を分離することは困難である。そこで、配管を振動吸収材(ダンピング材)で覆うことにより配管を伝わる超音波エネルギーを吸収し、管伝播波による超音波の伝播を低減することで、気中伝播波を検出しやすくしている(図3)。

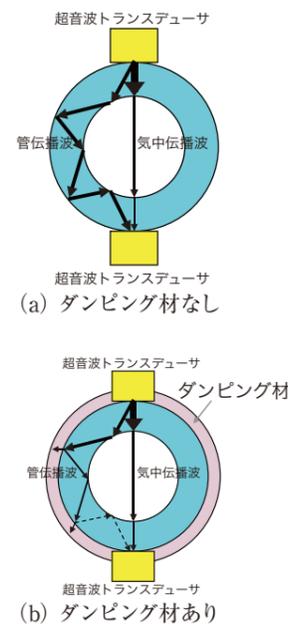


図3 ダンピング材の効果

ただし、ダンピング材を使っても配管を伝わる超音波は完全になくなるわけではない。ゴム母材や添加剤を変えながら評価を繰り返した結果、他社で従来から使われているダンピング材(図4「O」)に比べて8倍のSN比となる高性能なダンピング材(図4「A」)を開発することができた。SN比は気中伝播波と管伝播波の振幅の比で、配管の種類や圧力などの測定条件は同一にしてある。

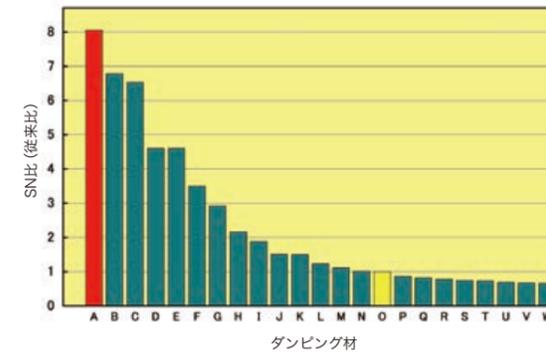


図4 ダンピング材の性能比較

4. トランスデューサ

クランプオン超音波流量計の第2の課題は、超音波の波形が拡がりやすくなることである。図5にクランプオン超音波気体流量計における受信信号波形の例を示す。

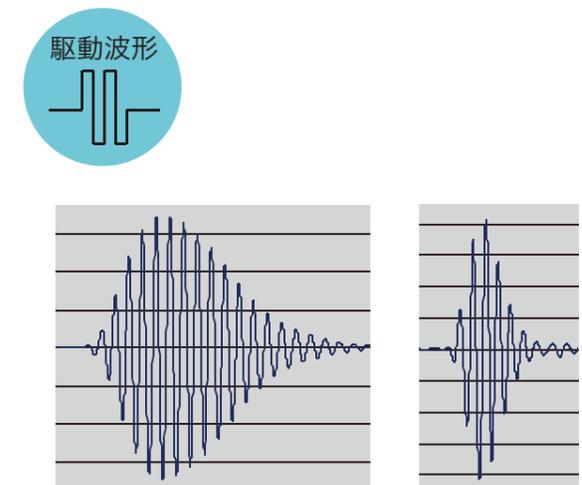


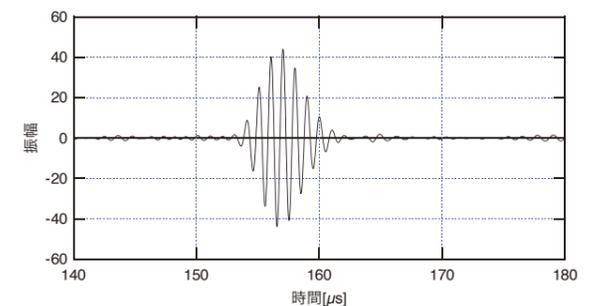
図5 超音波受信信号波形の例

送信信号としては2周期分のパルス波を用いているが、従来のトランスデューサを用いると受信信号は大幅に拡がってしまっていた。これは超音波素子が共振器であることに加えて、配管の管壁内で超音波が多重反射することにより配管から気体中へ超音波が継続的に供給され、受信信号が時間的に長く引き伸ばされてしまっているためと考えられている⁽¹⁾。

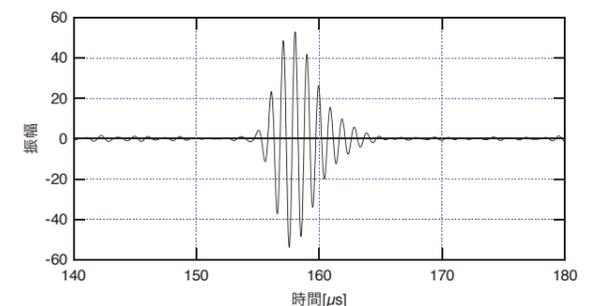
伝播時間差は相互相関により計算する場合が多いが、受信信号が拡がってしまうと複数ある相関ピークの山の高

さが揃ってきて伝播時間差を周期の整数倍分だけ誤って算出する恐れが高くなる。安定した計測を行うためには人間が目で見ても対応点をすぐに判断できる程度に受信信号波形を鋭いものとする必要がある。

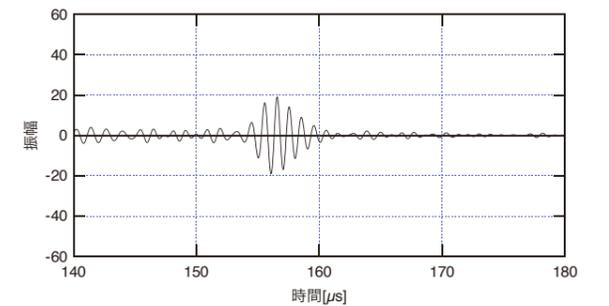
超音波の入射角を変えて試してみたところ、入射角を大きくしていくと受信信号の拡がりを抑えられる傾向が見られた。そこで、ウェッジから配管金属への臨界角(51°)を超える範囲まで入射角を大きくしていったところ、臨界角を超えても超音波を受信することができ、また波形の拡がりも抑えられることが分かった。そこで、3種類の角度54°、57°、60°でウェッジを作り波形を比較したところ、57°付近で受信波形が振幅、拡がりともに最適となることが分かった(図6)。



(a) 入射角54°
振幅80



(b) 入射角57°
振幅100



(c) 入射角60°
振幅40

図6 入射角を変えた場合の受信波形

5. 信号処理

5.1 処理の流れ

受信信号は「同期加算」によりノイズを低減したのち、「ヒルベルト相関」により順方向と逆方向との超音波伝播時間差を算出している(図7)。

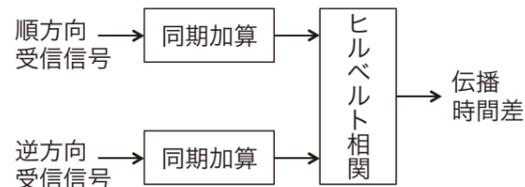


図7 信号処理

5.2 同期加算

3章でのノイズは主に配管を伝わる超音波を指していたが、これとは別に外来性のランダムノイズが存在する。このランダムノイズに対しては、送信信号に対して同じタイミングで受信信号のキャプチャを繰り返し、複数の受信信号を同じ時間ごとに足し合わせることで、ノイズの影響を軽減することができる。この手法は同期加算と呼ばれている⁽²⁾。本稿で使っている波形はこの同期加算を施したデータである。必要な同期加算回数は測定環境でのノイズの大きさにより異なるが、通常は数十回の同期加算によりノイズの少ないきれいな波形を得ることができる。

5.3 ヒルベルト相関

順方向と逆方向の伝播時間差は、それぞれの受信波形の相互相関を計算し、相関ピークの位置から求める。一般に相関ピーク付近の相関値は変化に乏しいため、相関ピーク位置を正確に求めるのは難しい。

順方向と逆方向の受信信号波形は最大値付近のみを切り出してみると余弦関数に近い。これは、送信側と受信側の超音波素子はそれぞれ共振器になっているため、共振周波数の成分を多く持っているためである。このため、相関関数自体も余弦関数に近い形状となっている。

ヒルベルト変換を使うと位相を90°ずらした波形を得ることができる。相関関数に対してこれを適用すると、相関関数ではピーク位置を計測しなければならなかったのが、ヒルベルト変換をかけることでゼロクロス位置の計測を行えばよいこととなる。

さらに、相関関数を余弦関数、ヒルベルト変換をかけたものを正弦関数と見なして、逆正接演算により位相に変換すると、伝播時間差の計算が直線のゼロクロス位置の算出へと変換されることとなり、伝播時間差を精度良く求めることができるようになる。

相関計算のピーク位置検出にヒルベルト変換を使う方法(ヒルベルト相関)は従来から提案されていた⁽³⁾。この提案では相関を計算したのちにヒルベルト変換が行われていたが、筆者らはヒルベルト変換を相関計算の中に組み入れることで、効率よく計算できるようにした(図8)。

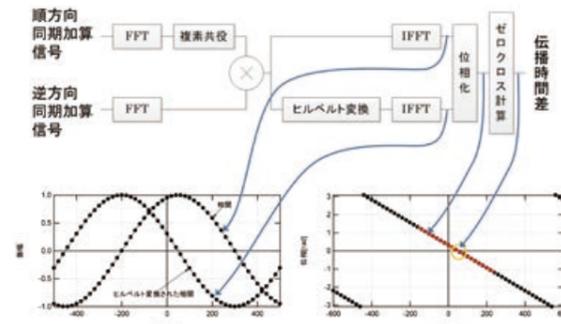


図8 ヒルベルト相関

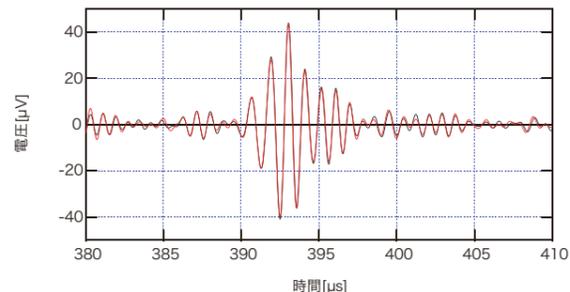
6. 計測

新たに開発したダンピング材とトランスデューサを用いて低い圧力での流量計測を試みた。

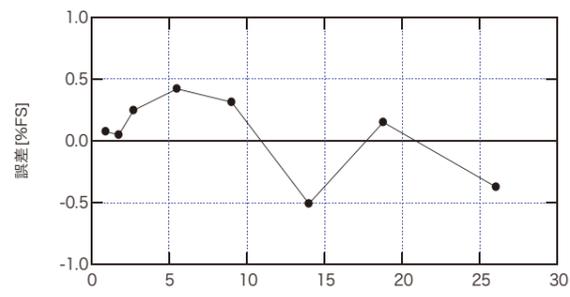
6.1 空気に対する流量計測精度評価

流量0での常圧空気に対するクランプオン超音波気体流量計の受信信号波形を図9(a)に示す。配管としては40A Sch40を用いた。常圧(0MPaG)であるにもかかわらず、配管を伝わるノイズに対して十分な気中伝播波が観測されている。

設備の都合により流量を流すためにはある程度の圧力が必要であったため、0.1 MPaGで流量を計測した。比較対象としては校正済みのタービンメータを用いた。タービンメータの計測値をクランプオン超音波気体流量計測定位置における流速に換算し比較したところ、目標としている±2 %FSで計測を行うことができた(図9(b)) (フルスケール(FS)は30 m/sとしている)。



(a) 超音波受信波形 (0 MPaG)

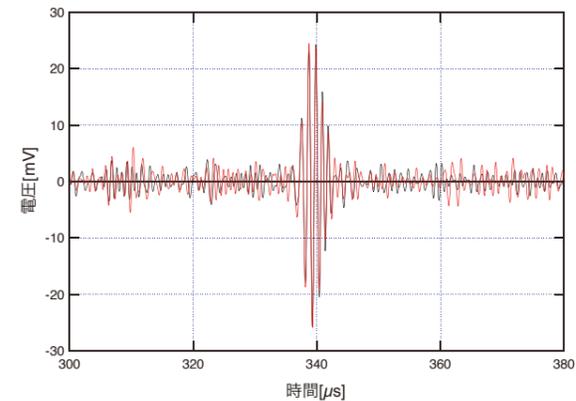


(b) 計測精度 (0.1 MPaG)

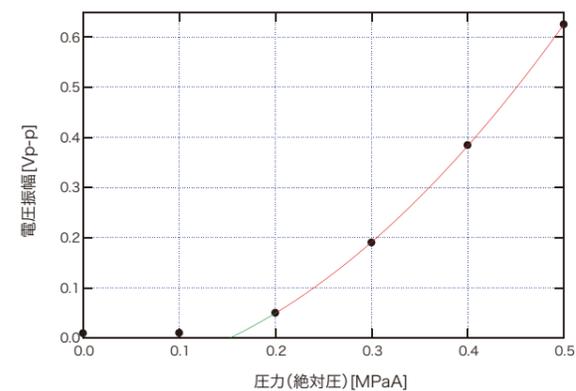
図9 常圧空気の場合の受信波形と低圧空気に対する計測精度評価

6.2 空気以外の気体に対する送受信波形

クランプオン超音波気体流量計の主な用途には空気(圧縮空気)の他に燃焼ガスがある。設備の都合で気体を流すことはできなかったが、パイプに燃焼ガスを詰めて送受信波形を観測してみたところ、0.1 MPaAでは気中伝播波がノイズに埋もれてしまっていたが、0.2 MPaAでは明瞭に観測することができた(図10(a))。燃焼ガスには都市ガス13Aを、配管としては40A Sch40ステンレス鋼管を用いている。



(a) 都市ガス13Aによる超音波受信波形 (絶対圧0.2 MPaA (0.1 MPaG))



(b) 都市ガス13Aによる超音波受信振幅

図10 都市ガスの場合の超音波受信波形と振幅

圧力を変えながら受信信号の振幅をプロットしたところ図10(b)のようになった。この結果、絶対圧で0.2 MPaA (ゲージ圧0.1 MPaG)以上であれば流量計測の可能性があることが分かった。従来では1 MPaG以上の圧力が必要であった。

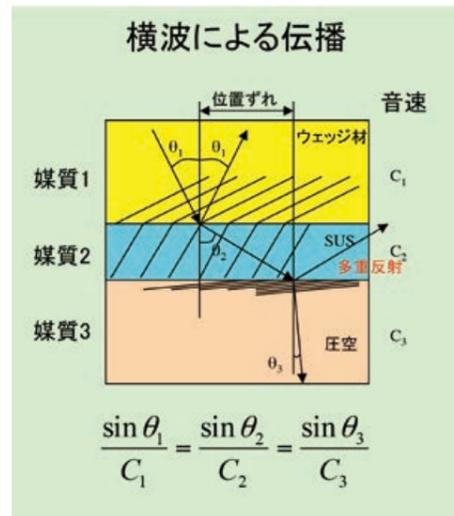
7. 考察

今回ウェッジから配管への入射角を臨界角を超える角度に設定することで良好な結果を得ることができたが、

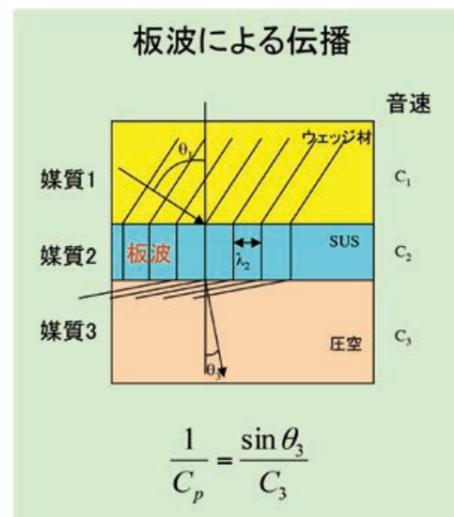
配管板材内部での超音波の伝播形態について考察しておくこととする。臨界角を超えていることから配管板材内部では縦波・横波などの実体波として伝播しているわけではない(図11(a))。実体波以外の伝播形態としては板波(ラム波)が考えられる⁽⁴⁾。板波は上下二つの境界を持つ板材を伝わるガイド波で、周波数 f [MHz]と板厚 d [mm]の積 fd [MHz mm]に応じて複数のモードを持つ(図12(a))。例えば、周波数が1 MHzで板厚が3 mmの場合、 fd は3[MHz mm]になる。この板材ではA0モードが励起されると位相速度は2.8 km/sとなり、S0モードが励起されると位相速度は3.3 km/sとなる。その間の位相速度は取らない。また、これらのモードを励起するのに適した入射角は図12(b)のようになる。 fd が3の時には、A0モードの場合は61°、S0モードの場合は48°になる。57°に合致したモードは存在しないが、比較的角度に近いA0モードが励起する可能性はある。

もし、配管中を板波として伝わっていると仮定すると、入射角を若干変化させても別のモードに移移するまでは位相速度はそのモードで決められる値に固定され、気体中での超音波ビームの角度は変化しないはずである(図11(b))。しかるに、入射角を54°、57°、60°と振って流量と伝播時間差との関係を調べたところ、④⑤式から推定される θ_3 を元に計算した $\theta_3(=90^\circ - \theta)$ は図13に示すように連続的に変化した。図13には板波のA0モードとS0モードの場合の θ_3 についてもプロットした。板波では入射角を変化させてもモードが遷移しない限り θ_3 は固定であるため、板波として伝播しているとは考えにくい。また、板波であれば板に沿ってより遠くまで伝播されるようになるはずであり、受信信号波形が短くなることの説明ができない。さらに板の厚さを変更してみたが、 θ_3 は変化しなかった。板波であれば板厚を変えると fd 積が変わるため、位相速度が変わり θ_3 も変化するはずであるため、これも板波ではないことを示している。

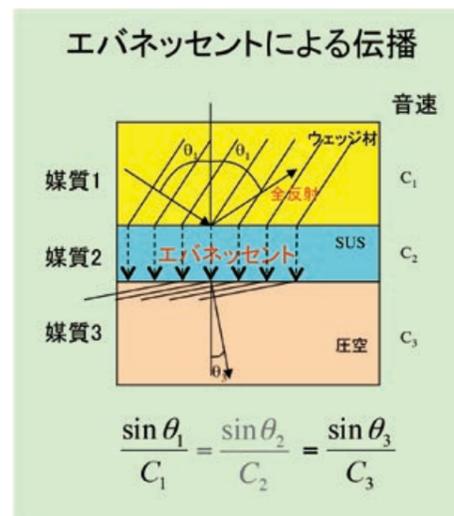
そこで、筆者らは配管板材部分での伝播形態をエバネッセントであると考えた。エバネッセントは、全反射面の裏側に波長オーダーの短い距離で波動が伝わるもので、光学の分野ではよく知られている現象である。エバネッセントであれば配管板材の一表面に生じた音圧分布が、振幅は小さくなるものの他表面にも同じように伝わりと考えられる。これにより、配管内部の流体にはウェッジから配管板材に伝わったのと同じ音圧分布が転写されることとなり、板材による影響を受けないため、受信波形の拡がりや低減されたことの説明ができる。エバネッセントの場合の配管板材前後での伝播は配管板材の部分の中抜きにしたスネルの法則(図11(c))で説明でき、図13の変化はこれにより説明できる。また、配管板材の厚さは超音波の1波長程度であることから、エバネッセントによる減衰は少なく、十分な振幅を保ったまま伝わりことができると推測している(配管板材の縦波音速は5790 m/s、横波音速は3141 m/sであり、超音波周波数が1MHzの時、波長はそれぞれ5.8 mm、3.1 mmとなる)。超音波の周波数を下げれば、より厚い板材の配管にも対応可能である。



(a) 横波による伝播

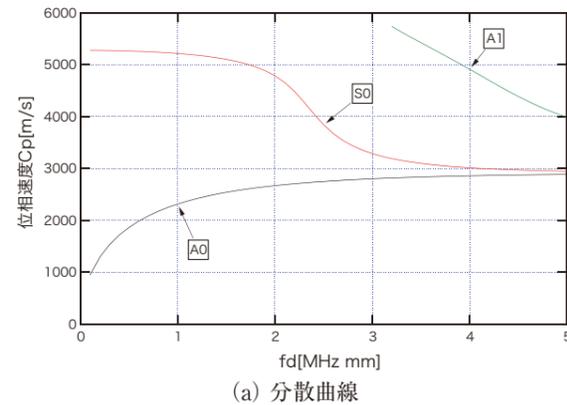


(b) 板波による伝播

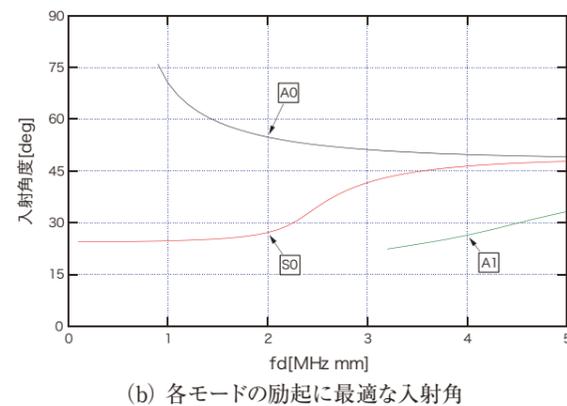


(c) エバネッセントによる伝播

図 11 伝播形態と屈折角の関係



(a) 分散曲線



(b) 各モードの励起に最適な入射角

図 12 板波のモード

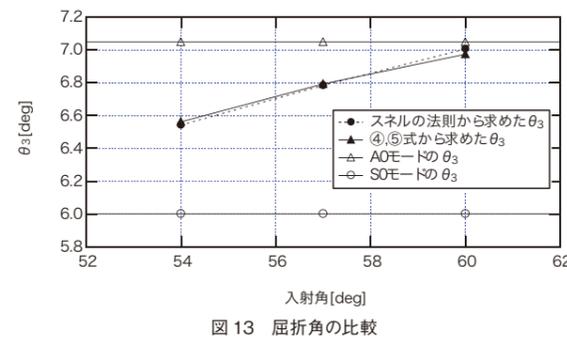


図 13 屈折角の比較

8. まとめ

臨界角を超える入射角を持つトランスデューサと高性能なダンピング材との組み合わせにより、配管の種類によっては常圧(0 MPaG)の空気に対してさえも計測可能なクランプオン超音波気体流量計を開発した。従来では0.41 MPaGまでが限界であった。また、空気以外の気体についても従来製品より低い圧力からの計測が見込めることが分かった。また、配管板材内での超音波の伝播形態はエバネッセントではないかと推測される。信号処理ではノイズに強く伝播時間差を精度良く求められる方法を開発した。

9. おわりに

配管の様子はJISやANSIなどで決められてはいるもののクランプオン超音波流量計で測定することを前提に定められているわけではない。したがって、配管を製作する際の溶接跡や配管断面の真円度、配管表面の粗度などは配管ごとに異なる。現場によっては配管が塗装されていたり、表面がさびていたりする。また、流体の流れも脈動や偏流などが現場ごとに異なるのが常である。様々な現場でテストを行い、より広い条件下で安定して計測できるクランプオン超音波気体流量計を開発していきたい。

<参考文献>

- (1)特許EP 1 173 733 B1
- (2)山本 俊広 他, 新形超音波流量計「NEW TIME DELTAシリーズ」, 富士時報 Vol.73 No.10, 2000
- (3)福原 聡 他, 超音波流量計US350, 横河技報 Vol.48 No.1, 2004
- (4)Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge Univ. Press, 1999

<著者所属>

佐々木 宏 技術開発本部商品開発部
林 智仁 技術開発本部商品開発部



azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2015年4月発行号

発行日 2015年4月1日(通巻56号)
発行責任者 高橋実加子(アズビル株式会社 経営企画部広報グループ)
編集委員会 委員長：塩手良知
委員：長田光彦、野間節、奥野啓道、筒井宏明
事務局：小貝正義、菅野裕子
発行所 アズビル株式会社 経営企画部広報グループ
〒100-6419 東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル
TEL.03-6810-1006

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

©2015 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。