

azbil

アズビル株式会社

〒100-6419
東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル
<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。

送付の取消し/変更 ▶



アンケート ▶



azbil

Technical Review

2022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：モノづくりの原点「正しく測る」ことへの挑戦



表紙について

太陽、海、地球の働きが結集してつくられる大規模な「流れ」

台風

毎年夏から秋になると、台風が日本の近くにやってきます。台風は熱帯で発生した低気圧のうち、北西太平洋に存在し、最大地上風速が秒速17.2mを超えたものを指します。台風と同じような熱帯低気圧は世界中で発生しており、発生した地域によってハリケーン、サイクロンなどと呼ばれます。

台風のエネルギー源は、大量の水蒸気が大気中で雲の粒となるときに放出される熱です。台風が熱帯の海上で生まれるのは、大量の水蒸気が海から供給されるからです。熱帯の海水が暖められると、上空に背の高い積乱雲がいくつも生まれます。まとまりなく誕生した積乱雲は、徐々に数十～数百kmの範囲に集まり、その周りを風が渦巻き、台風へと成長します。

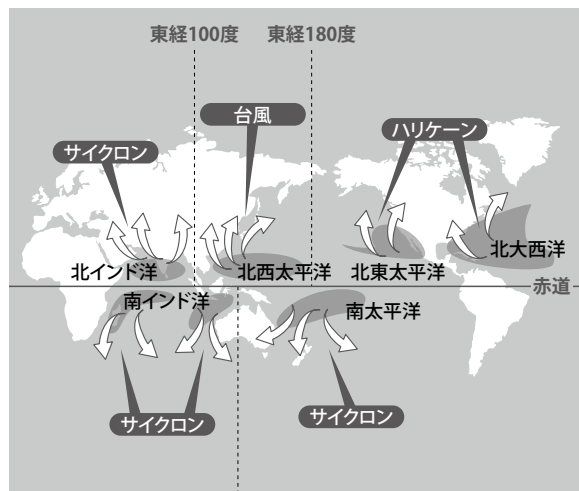
台風の特徴は、反時計回りに渦を巻く姿でしょう。この姿には、地球の自転が大きく関係しています。地球は西から東に向かって自転しているために、北半球では進行方向に対して右向きの力が働きます。これを「コリオリの力」といいます。このコリオリの力が働くことで、台風の中心に向かおうとする風が右側に曲

げられ、反時計回りの渦となります。

規模の大きな台風は宇宙からもはっきりと見ることができ、地球の大気現象のダイナミックさを感じさせてくれます。日本にやってくる台風は強い勢力を保ちながら3000km以上移動します。台風は、大きな災害をもたらすこともあるため、そのことばかりに目が行きがちですが、日本周辺に恵みの雨をもたらす存在でもあります。強い風は海をかき混ぜ、海面付近を冷やします。それによってサンゴやプランクトンなどの生態系を健全に維持する重要な役割も果たしています。

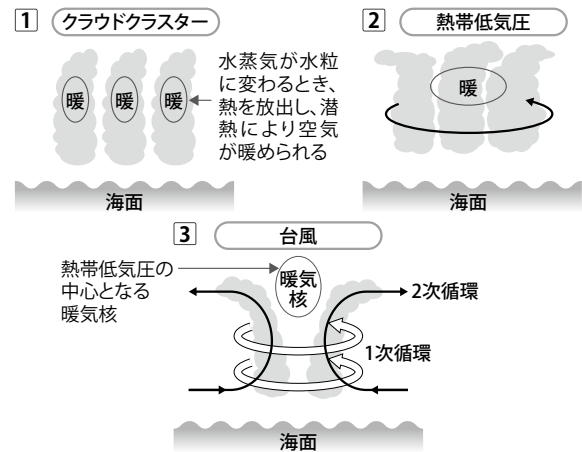
近年は台風が強大化しているように感じます。原因は地球温暖化だといわれています。温暖化によって熱帯の海上の蒸気量は多くなりますが、大気が安定化するために台風は発生しにくくなります。しかし、高いハードルを越えて発生した台風は、規模が大きくなるといいます。台風が大型化すれば、被害はますます大きくなるでしょう。それを防ぐためにも、地球温暖化を抑える必要があるのです。

監修：坪木和久（名古屋大学宇宙地球環境研究所教授） 文：荒船良孝 画像提供：Roscosmos／Sergey Ryazanskiy



海域によって呼び名が変わる台風

出典：『台風についてわかっていること知らないこと』筆保弘徳編著、ベレ出版



①積乱雲が集まってクラウドクラスターを形成し、②渦を巻くように大気の流れが生じて、③大きな渦にまで発達すると熱帯低気圧の発生となり、台風となる。

出典：『図解・台風の科学』上野充・山口宗彦著、講談社ブルーバックス

Contents

特集：モノづくりの原点「正しく測る」ことへの挑戦

巻頭言：計測の信頼性確保に不可欠な計量標準 1

産業技術総合研究所 計量標準総合センター
計量標準普及センター長 小畠 時彦

特集に寄せて 2

アズビル株式会社 取締役執行役員専務 横田 隆幸

特集論文

正しく測るための社内基盤整備 3

アズビル株式会社 技術標準部 新沢 陽介

高度に安定した校正環境を実現する新校正施設 8

アズビル株式会社 技術標準部 東海林 成樹 加藤 誠司
アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 太宰 龍太

液体流量計の開発と品質管理のための標準供給体制構築 13

アズビル株式会社 技術標準部 杉山 信幸 山口 徹

膨張法による高精度真空標準の確立 19

アズビル株式会社 技術標準部 片岡 俊之

安定した湿度校正を実現する低露点発生装置の開発 25

アズビル株式会社 技術標準部 中垣内 直美

市場要求に応える気体大流量の標準供給体制構築 30

アズビル金門株式会社 開発本部 古屋 宏樹

一般論文

燃焼安全ソリューションで実現する改正JISに適合した設備対応 35

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 奥村 大輔

小型で環境に配慮したフィルタ付き減圧弁の開発 41

アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー 小松 雅弘

位相型回折格子を用いた光学式測距技術の開発 45

アズビル株式会社 技術開発本部 藤原 久利 古谷 雅 藤井 絵理

組込機器にて最新情報技術を活用可能とするプラットフォームの実現 50

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 小森谷 良明 中林 想太
アズビル株式会社 AIソリューション推進部 山田 功

繋ぐ・調べる・動かすを1つに凝縮したスマートHARTモデムの開発 55

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 古澤 直樹 工藤 泰 深尾 直之
川松 豊 籠浦 守 森本 真弘

製品紹介

小規模ビルエネルギー管理に貢献するビル管理システム SmartScreen2 63

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 大澤 義孝

Contents

Special Issue : *Correct measurement: a fundamental challenge for manufacturing*

Preface : Measurement standards required to ensure measurement reliability 1

Director of Center for Quality Management of Metrology,
National Metrology Institute of Japan (NMIJ), AIST Tokihiko Kobata

Introduction to the Special Issue 2

Director, Senior Managing Executive Officer, Azbil Corporation Takayuki Yokota

Articles on Special Issue

In-house infrastructure development for accurate measurement 3

Technology Standardization Department, Azbil Corporation Yosuke Shinzawa

A new calibration facility for achievement of a highly stable measurement environment 8

Technology Standardization Department, Azbil Corporation Shigeki Shoji Seiji Kato
Building Systems Company, Azbil Corporation Ryota Dazai

Establishment of a standard supply system for liquid flowmeter development and quality control 13

Technology Standardization Department, Azbil Corporation Nobuyuki Sugiyama Toru Yamaguchi

Development of high precision vacuum standard by means of the expansion method 19

Technology Standardization Department, Azbil Corporation Toshiyuki Kataoka

Development of a humidity generator for reliable low dew point calibration 25

Technology Standardization Department, Azbil Corporation Naomi Nakagaichi

Establishment of a standard supply system for large gas flow rate to meet the requirements of markets 30

Research and Development Headquarters, Azbil Kimmon Co., Ltd. Kouki Furuya

Articles on Other Subjects

A combustion safety solution compliant with the revised JIS B 8415 35

Advanced Automation Company, Azbil Corporation Tomoya Nakata Daisuke Okumura

Creating a compact and environmentally friendly pressure reducing valve pressure regulator with filter 41

Advanced Automation Company, Azbil Corporation Masahiro Komatsu

A noncontact distance measurement technique using a phase grating 45

Technology Development Headquarters, Azbil Corporation Hisatoshi Fujiwara Masashi Furuya Eri Fujii

Creation of a platform enabling the use of the latest information technology in embedded devices 50

Building Systems Company, Azbil Corporation Yoshiaki Komoriya Souta Nakabayashi
AI Solution Department, Azbil Corporation Isao Yamada

An all-in-one HART modem with diagnostic, power-supply, and multiprotocol connective functions . . . 55

Advanced Automation Company, Azbil Corporation Naoki Furusawa Yasushi Kudo Naoyuki Fukao
Yutaka Kawamatsu Mamoru Kagoura Masahiro Morimoto

Product Introduction

SmartScreen2, a building management system that contributes to energy management of small buildings 63

Building Systems Company, Azbil Corporation Yoshitaka Osawa

計測の信頼性確保に不可欠な計量標準

小島 時彦
Tokihiko Kobata

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 計量標準普及センター長
Director of Center for Quality Management of Metrology,
National Metrology Institute of Japan (NMIJ), AIST



正しく計測を行うためには、計量の基準となる計量標準が必要となる。計量標準は、国民生活や産業の基盤インフラとして、様々な分野・用途で広く利用され、目に見えない形で国民一人ひとりの日常生活を守り、企業・大学等の事業・研究活動を根底から支えている。例えば、日常生活における電力・ガス・水道等の使用量や石油・天然ガス等の輸入における取引量の計量は、計量標準に基づいて適切に校正された計測・計量機器を用い、適切な方法・手順を採用することで、その信頼性を確保することができる。

計量標準にも様々な側面があるが、ここでは、「物理標準」と「標準物質」の2つに大別して説明する。「物理標準」は長さ・質量・温度・圧力・電気量のような物理的な計測を行う際に、計測機器の目盛りの調整を行う基準である。一方、「標準物質」は濃度や物性値などの化学的な計測を行う際に、計測・分析機器の目盛りの調整を行う基準となる物質である。我が国の計量法では、幅広い分野における正確な計量を確保するため、「物理標準」と「標準物質」の国家計量標準を定めている。これら計量標準の整備については、国家計量標準機関である産総研計量標準総合センター（NMIJ）が中心となり、国内の計量関係機関と連携・協力しながら開発・維持・供給に取り組んでいる。

計量標準は、いつの時代も商取引、産業支援、安全・安心な社会の実現のために必要とされてきた。近代以降、技術革新による産業構造変化が進み、経済発展、国際通商の拡がりを支えるために、国際的合意により計量に関わる国際的枠組みや計量標準の実現方法が定められてきた。国際的枠組みは、単位の確立と国際的な普及を目的とした「メートル法」を維持するための「メートル条約」や計量器の国際貿易の円滑化を図り国際法定計量機関を設立するための「OIML条約」、計量標準の技術的な実現方法は、単位の統一を実現し普遍的な国際計量標準を作り出すための方法手引き書である「国際単位系(SI)」が礎となっている。

企業・経済活動がよりグローバル化し産業のサプライチェーンが広がる中で、1990年代中頃から、計測の信頼性確保の根幹をなす計量標準のさらなる利用が進められてきた。1999年には、国家計量標準の国際同等性の確保のため、メートル条約の主要加盟国間で相互承認取決めが締結された。この取決めにより、経済活動や取引の基本である計測・計量について、国家計量標準機関を頂点とする各国の計量トレーサビリティ体系を相互に信頼し、他国の国家計量標準の校正データを自国でも同等と認め、その校正証明書

をそのまま自国でも受け入れる仕組みが構築された。その結果、国際的な計量標準の信頼性確保の枠組みが整理され、技術障壁のない公正な取引の促進に繋がっている。また、一般ユーザーの計測の信頼性確保に必要な計量標準のトレーサビリティ体系の構築も各国で進められてきた。現在、我が国では、校正事業者の力を活用し、切れ目のない校正の連鎖を通して、NMIJ等が確立した国家計量標準を国内に供給するための計量トレーサビリティ体系が整備されている。具体的には、計量標準供給制度と校正事業者登録制度から構成される計量法トレーサビリティ制度（Japan Calibration Service System: JCSS）を中心に体系が整備され、ユーザーの校正に関わる利便性および信頼性の向上が図られている。

我が国の計量標準の整備は、2001年度以降、経済産業省の産業構造審議会の下部組織において策定された知的基盤整備計画に基づいて推進されている。2021年度から始まる10年間では、第3期となる整備計画に沿って、計量標準のさらなる普及啓発と利用促進を目指した取組みが進められている。

今後の世界の持続的発展のため、昨今、人類が直面している新型コロナウイルスや地球温暖化等による急激な環境変化や災害多発への対応等の社会課題を科学技術・イノベーションの創出により解決することが求められている。また、急激に進むデジタル化、グローバル化、産業・社会ニーズへの迅速かつ適切な対応も喫緊の課題である。このような状況において、時代の変化に合わせた計量標準の整備は必要不可欠であり、その重要性は一層高まってきている。

略歴：

1995年筑波大学大学院工学研究科物理工学専攻修了。博士（工学）。同年通商産業省工業技術院計量研究所入所。以来、計量標準・計測の研究に従事。2000年米国国立標準技術研究所（NIST）客員研究員。2001年独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門力学計測科圧力真空標準研究室主任研究員、2011年同室研究室長。2012年同所計測・計量標準分野研究企画室長、2015年同所計量標準総合センター工学計測標準研究部門副研究部門長を経て2018年より同総合センター計量標準普及センター長。2012年－2015年アジア太平洋計量計画（APMP）質量関連量技術委員会（TCM）委員長、2013年－2015年計測自動制御学会理事、2015年－2018年国際計測連合（IMEKO）圧力真空計測技術委員会（TC16）委員長、ほかを歴任。

アズビル株式会社
取締役執行役員専務

横田 隆幸

オートメーションをめぐる技術や製品は、今日まで社会の様々な変化を受けて高度化・多様化してきました。その中でも急速な技術革新やロボットの導入等により、人と機械の融合が進み、さらにコロナ禍対応を契機として、新しい働き方など社会ニーズの変化に対応したDX対応等、求められる技術も大きく進化を遂げています。その一方で、これらの進化の根底にある、正確に測るという基本概念は、よりハードルが高くなることはあっても、本質が変わることは決してありません。

アズビルの技術の基本は「計測」「制御」であり、優れた最先端の計測技術を持っているということを我々は自負しています。これらは「当然のことながら」「正しく測る」という技術がなければ始まりません。このアズビルの技術力へのゆるぎない信頼を築く原点が、計測・計量における厳しい「基準」に合致した校正、即ち計測標準への取組みです。技術力の進化と合わせて、「計測技術と計測標準の両輪こそが、“正しく測る”ことを追求するアズビルのモノづくりの原点」＝「企業価値の原点」と言えると思います。

今回の特集テーマ、「モノづくりの原点“正しく測る”ことへの挑戦」、への執筆に際して、人文系出身の筆者は当初、大いに戸惑いました。手がかりを求めて計測標準部門のメンバーにインタビューした機会にきわめて印象的だったことは、メーカーの「技術部門のCSR部隊」ではと感じさせる程の熱い思いを彼らが一様に伝えてきたことです。計測トレーサビリティを維持することが、国家標準、国際標準に繋がっているという観点から、「正しく測る」ことを責務としている彼らが口を揃えて言及したのが「測れないものは作れない」ということでした。この厳しい一貫した哲学がアズビルの企業風土に根付いていることに深い感銘を受けました。

そこで、計測標準の取組みや「正しく測る」ということを社会的に見て、どういう意味があるかを少し考えてみました。社会が求める厳格な基準に沿って、信頼できる計測機器・サービスがあつてこそ、どんな時代でも「安全、安心、さらには快適」な環境や機能を、生活や社会活動において確保することができます。そこに組み込まれたアズビルの技術力・サービス力が評価されることは、まさに我々が目指す「人を中心とした」視点から社会的な価値を生み、持続可能な社会への貢献へと繋がっていると解釈できます。

また、社会のニーズが目まぐるしいスピードで変化し、日々多様化していく中で、「正しく測ることへの挑戦」自体は、より高度化する製品ニーズに対応するために求められることです。限界への挑戦は続きますが、この挑戦が新たな技術や製品開発を支えることになります。さらに、「製品・品質」という観点で、計測して品質を保つということは、メーカーの命綱であり品質維持は社会的責任でもあります。「正しく測

る」ということは、我々のコンプライアンスに、まさに直列に繋がる、いわば「技術面からのCSR活動そのもの」です。

2021年は、企業の品質問題がCSRの観点からも、大きく取り上げられました。不祥事を起こした某大手電機メーカーの第三者による調査委員会からの提言の第一に「手続きにより品質を保証するという、品質に対する正しい考え方の徹底」とあり、厳しい基準や手続きをクリアしていく当然のことが、「モノづくり」の基本に求められると指摘されています。azbilグループのCSR推進を日々担当する筆者の目から見ると、社会のモノづくりの現場において、計測器が正しく測れなければ、製品の品質や安全性は確保できず、品質面での重大な欠陥を生みだしかねません。だからこそ当社自体のモノづくりにおいて不正や妥協等によりゆがめられることがあってはなりません。そして「外部からの評価、厳格なルールに真摯に応え、結論を「データから得られる事実に基づき」解を出すという自らへの「挑戦」は、社会のあらゆるステークホルダーから求められる客観的かつ先進的な基準で堂々と勝負することです。これは、まさに崇高なCSRを希求する精神・倫理観と同じ意味を持っていると感じます。

azbilグループは、計測と制御を中心としたオートメーション技術で、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、社会からの高い信頼を獲得してきました。これからも新しい技術と技術標準に挑戦し続け、お客さまに安心と達成感を感じていただくことを喜びとする企業集団であり続けたいと考えています。そして「人を中心としたオートメーション」の理念に基づく、「測れないものは作れない」というCSR本来の倫理観による発想を、さらに一歩進めます。多様化する社会的ニーズを多角的視点から見て、専門技術のみに頼るだけでなく人間の行うことだからこそ、自由闊達な発想でさらなる課題発見につなげます。この「技術とリベラルアーツ」の両輪で「課題発見力に富み、正しく測るために、常に課題克服に向け挑戦する組織」でありたいと思います。

今回の特集をご覧いただき、azbilグループの「世界トップレベルの計測技術者集団」を目標にした「世界No.1に向けた挑戦」の粉骨砕身の様々な挑戦の軌跡や、プロの職人らしい真摯な取組み・発想についてのご理解を深めていただければ幸いです。

正しく測るための社内基盤整備

In-house infrastructure development for accurate measurement

新沢 陽介
Yosuke Shinzawa

キーワード

校正, トレーサビリティ, 精度比, ガードバンド, 物理標準, 技能試験, 不確かさ

企業活動において使用する計測器の校正やそのトレーサビリティは、ISO 9001の要求事項であることから必須なものであり、当たり前のこととして普及している。ただし、制度上その必要性を認識していても、校正を行う本来の意味や、企業がそのために何をどのようなレベルで実施しているのか、またはすべきなのかに関して深く理解している人は多くないように思える。これらの概要について、いくつかの事例を交えて紹介するとともに説明する。

Calibration and traceability, which are essential for measurement instruments used in manufacturing, service, and research, and also are required by ISO 9001, are widespread as a matter of course. Although their necessity is widely appreciated, not many people have a deep understanding of the purpose of calibration or of what the company should be doing, how it should be doing it, and at what level. We give an overview of these matters with some examples.

1. はじめに

製品の開発・評価・製造・検査・保守・メンテナンスなど様々な場面で計測は行われる。そして、測定者はその測定結果から何らかの可否を判定している。開発段階の評価・実験や、生産上の工程内検査や出荷検査、顧客に納入した製品の定期メンテナンスなどの場面ではそれぞれの目的に合った様々な計測器が用いられるが、これら計測器は当然、正しい値を示すものでなければならない。そうでなければ実験の失敗や不良品の製造、検査結果の誤判定などに繋がるからだ。

そのため計測器が正しい値を示すことを確認するために定期的に校正を行う必要がある。校正は、あらかじめ質量値が判明している分銅をはかりに載せ、はかりが正しく値を指示しているかを確認する、といった具合に行われる。この校正は計測器のメーカーに依頼し実施することが可能であろうが、企業が保有する全ての計測器の校正を計測器メーカー等に依頼すると莫大なコストがかかる。そのため、先の例での分銅のように計測器を校正する際の基準となる計測器、即ち標準器を社内で用意し、この標準器をもとに複数台の計測器を校正するということが行われる。そして標準器もまた定期的な校正対象となることから、さらに上位の標準器、そのさらに上位の標準器を用意して…というように、社内でいくつかの階層を構成することとなる。

本稿では、校正をはじめとするazbilグループの計測管理に関する概要を紹介する。

2. 計測管理に求められる要件

2.1 計測トレーサビリティ

アズビルでは、かねてより社内で使用される多種多様でかつ大量の計測器の校正に対して内製化を進めてきた。図1にその一例を示したが、右側の列が開発や製造部門等で使用されるデジタルマルチメータの直流抵抗測定機能に対する校正の階層を表している。このデジタルマルチメータは、上位のより高精度なデジタルマルチメータやキャリブレータ、標準抵抗器等により校正され、これらを作業用標準器という。そしてこれら作業用標準器はさらに上位に位置する標準抵抗器によって校正されており、この最上位の標準抵抗器に対する校正は国立研究開発法人 産業技術総合研究所（以下、産総研）が1年周期で実施している。

一方、図1の左側の列は重さを測る“はかり”に関するものであるが、この階層を遡ると最上位に位置する標準分銅の校正先は、産総研ではなく他の校正事業者となっている。ただし、この校正事業者自身が保有する最上位の標準器の校正先は産総研になっており、したがって、アズビルの“はかり”は段階的に産総研の管理する質量標準と繋がっていることになる。

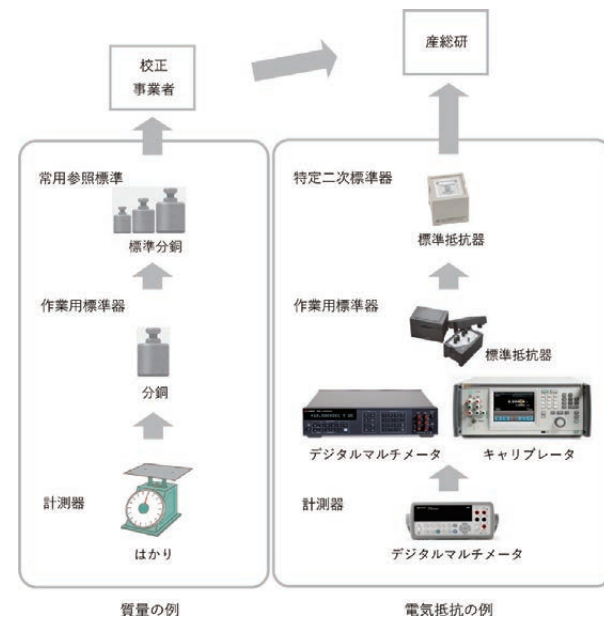


図1 計測トレーサビリティの一例

このように、図1の矢印で表される校正の連鎖を上流に遡り最終的に産総研の管理する国家計量標準（または他国の国際計量標準）まで結び付けられることを計測トレーサビリティ（以下、トレーサビリティ）という。もし、図1左列の校正事業者が産総研に繋がっていなければ、アズビルの質量の基準は校正に出した事業者独自のものということになり、たとえ毎年校正を実施していても世の中の正しい値とはかけ離れたものとなる恐れがある。そのため、トレーサビリティを確保することは重要なことであり、ISO 9001などのQMS（Quality Management System）の要求事項でもある。

2.2 物理標準の供給

図1に示す校正の連鎖であるが、これを産総研から見ると、校正を通して物理標準を産業界に供給していると言える。物理標準とは物理的計測を行うために使用する計測器等の目盛りを決めるための基準である。この物理標準供給の源である国家計量標準は、日本の国内法規である計量法において特定標準器と定められており、主に産総研が管理している。そして、特定標準器によって校正された計測器は特定二次標準器と定められており、図1右列 最上位の標準抵抗器は特定二次標準器である。また、他の校正事業者が持つ特定二次標準器に連鎖して段階的に校正されている最上位の標準器を常用参照標準といい、図1左列の標準分銅がこれに当たる。これら特定二次標準器や常用参照標準を源流にして、企業の校正部門は自社内に物理標準を供給している。

企業の校正部門など、校正事業者のあり方に関して国際規格ISO/IEC 17025（JIS Q 17025）がある。この規格に準拠している事業者を審査を通じてJCSS（Japan Calibration Service System）校正事業者として登録することを、計量法は計量法トレーサビリティ制度として定めている。azbilグループでは以下の3事業者がJCSS校正事業者である。

- ・アズビル(株) 技術標準部計測標準グループ
- ・アズビル京都(株) 校正グループ

・アズビル金門(株) 校正サービスセンター

JCSS校正事業者はその登録範囲において特定二次標準器、または常用参照標準をもつことが義務付けられている。

2.3 精度比とガードバンディング

計測器の校正に用いる標準器は、校正対象の計測器よりも高精度の物を用いる必要がある。例えば、温度計の示値がどれだけ正しいかを調べるために別の温度計を持ってきて、両温度計の先端を近づけた状態で同じ水槽に入れ比較するとする。このとき基準とすべく用意した温度計は、事前に校正されていて、かつトレーサビリティが確保されている必要があり、これによって標準器となり得るわけだが、しかし、この条件だけでは十分ではない。標準器とした温度計が校正対象の温度計と精度面で同等であったり、劣っていたりすると、得られた比較測定結果の信頼性が劣ることになる。より精密で正確な比較測定のためには、より高精度の計測器を用いるべきである。そのため、製品検査に用いる計測器や、計測器の校正に用いる標準器の選定基準に精度比を考慮する必要がある。

精度比とは、「検査や校正などに必要とされる精度＝許容差」と「用いる計測器の精度仕様値^{注1}」との比率であり、例えば、精度比4対1では許容差より4倍良い精度仕様の計測器を用いるということになる。

ここで、製品の出荷検査について考えたい。出荷検査の可否判定は、安全のために製品の精度仕様値より内側にマージン（余裕）をもたせた検査スベックを用いて行うのが一般的である。このマージンは多く取るほど誤判定のリスクが減り信頼性が上がるが、その分、検査合格品が減り、不合格品が増える方向となる。そのためリスクとコストを天秤に掛けて適切なマージンを設定したいが、これを決めるのはなかなか悩ましく難しい問題である。

アズビルでは、この検査マージンを、精度比に応じて適切に設定する手法を取り入れ運用している。製品の精度仕様値と検査に用いる計測器の精度仕様値との比率を精度比とし、十分な精度比が取れなければマージンを多く取るという運用である。

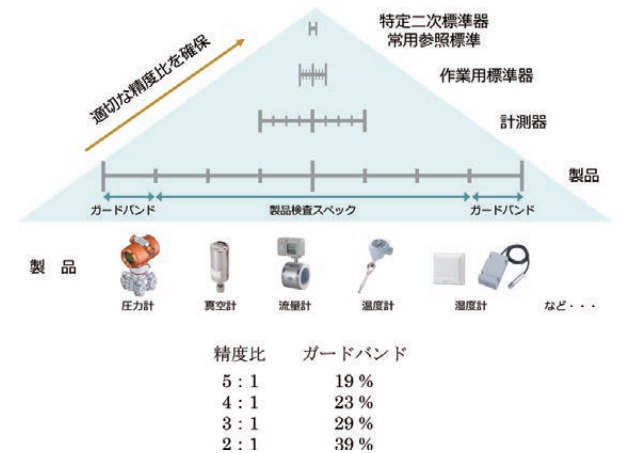


図2 精度比に応じたガードバンドの例

注1 「用いる計測器の精度仕様値」としたが、正確には「その計測器を用いて実施する測定結果の拡張不確かさ」が正しい。ただし、厳密に個々の測定結果に対する不確かさを求めることは現実的ではないため、それよりも数値として大きいと想定される計測器のメーカー精度仕様値を用いる運用としている。

計測器の校正においても同様に、計測器の精度仕様値と標準器の精度仕様値との比率を精度比として、これに応じたマージンを取った幅を調整管理幅としている。校正結果がこの幅を超える場合には、計測器の精度仕様値の内側であっても計測器の出力を調整し、そのあとに再校正する流れだ。

これらのマージンをガードバンドと言うが、図2にアズビルにおける精度比に応じたガードバンディングの一例を載せた。精度比とガードバンドの関係は巻末の参考文献(1)に記載の書籍にまとめているので、詳細はそちらを参照いただきたい。

3. 精度が高いとは

図2で表したように、社内のトレーサビリティにおける階層を上流に遡るほど必要とされる精度は高くなっていく。そのため製品の精度仕様をより良いものとして市場に出すには、それだけ社内標準に高精度が要求され、最上位に位置する標準の精度維持、およびその管理体制の構築に労力をかけることとなる。

ここで、「精度が良い」や「精度が高い」ということについて整理したい。端的に言うと、測定結果の「ばらつき」と「偏り」が小さいということになる。ばらつきが小さいとは、測定中に計測器の指示値がばらつく幅、ふらつく幅が小さいということだけではなく、同条件下で同じ測定を繰り返した際に得られる測定結果の一致の程度の良好さでもある。そのため、ばらつきの小さい測定結果を得るには、決められた手順で精密に測定することが必須であるが、ただ決められたルールに従って測れば良いということではなく、いつ測っても同じ測定結果が得られるように、測定環境・測定条件を整えることが必要となる。場合によっては安定した測定系を作り出す必要もある。例えば、高精度・高感度が求められる電気計測では、計測器のフレームグラウンドや電源アースの接続状況により測定結果が変わることがあるため、(自動測定のために通信ケーブルにより接続した)コンピュータを含めた測定系全体の回路に応じた最適な配線方法を選択する必要がある。圧力計測や湿度(露点)計測では気圧変動が測定の影響するため、高精度を求める場合は測定系における試験槽などの気圧制御が必要となるかもしれない。また、気温の変動は全ての測定結果に影響を与えるし、相対湿度が特性を変える量もある。そのため、部屋全体の気温・相対湿度を制御し、監視および記録することが必須となる。

そうした上で、実施した測定結果の偏りが小さいこと、正しい値であることを、標準器(によって実現する値)との比較、即ち校正によって確認する。その結果、想定以上の偏りが認められれば測定原理や物理現象と照らして、その原因および関係を特定し、把握し、適切に補正する必要がある。そのためにもトレーサビリティを確保しなくてはならない。ばらつきが小さく再現性の高いセンサや計測器を作り出すことは可能かもしれないが、絶対値の正しさ、値の偏りを把握するためにはトレーサビリティが必須となる。

4. 社内物理標準の構築

4.1 物理標準の拡張

アズビルが、社内で使用し自ら校正する計測器は多岐にわたり、その対象量は様々な物理量である。この中でも基礎的な社内インフラ整備のためや、圧力計・真空計・湿度計・露点計・流量計といった自社製品の精度保証および担保のために、電気(直流・低周波)・温度・圧力・湿度・流量に特に力を入れており、これらの量の最上位に位置する標準器は産総研に直接校正に出し、特定二次標準器として運用している(温度標準は日本電気計器検定所から)。産総研ではない校正事業者に校正を依頼し、トレーサビリティを確保することもできるが、図1および図2で示すように校正の階層が増えるとそれだけ精度(正しくは拡張不確かさ)が悪化することになるため、最良の精度を必要とするこれらの量については、産総研での校正が必要であった。

その1つに電気抵抗標準がある。図3にアズビルにおける抵抗標準の構築例を示したが、2台の標準抵抗器1 Ωおよび10 kΩを産総研に校正依頼し、特定二次標準器として標準の供給を受けている。ただし、社内で必要な抵抗の範囲は1 mΩから10 GΩの範囲であり、当然この2点の抵抗値だけでは必要範囲をカバーできない。そのため、産総研から供給される2つの抵抗値をもとにして、他の定格の抵抗器(作業用標準器)を校正し、範囲を拡張する必要がある。

まず、1 Ωから10 kΩに挟まれた範囲の抵抗器10 Ω、100 Ω、および1 kΩの3点を校正する。高精度なブリッジ回路を用いて、1 Ωを標準にして10 Ωを、次に10 Ωを標準にして100 Ωというようにして10倍ずつ校正していき、1 kΩを標準にして校正した10 kΩの校正結果と産総研から供給された10 kΩ抵抗値との一致の程度を評価することで、この範囲の測定結果の妥当性を確認している。

次に1 mΩから1 Ωの低抵抗範囲では、安定した測定のために大きい電流で測定する必要があるため電流源と高精度な電流トランスを用いて測定する。10 kΩから10 GΩの高抵抗範囲では測定電流が微小となりノイズの影響を受けやすくなるため、高安定な測定を行うための特別な回路を実現する装置や設備を用意して測定している。

こうして低抵抗は1 mΩまで、高抵抗は10 GΩまでと拡張するわけだが、これらの範囲は産総研から校正され供給された値の範囲外であり、自らが拡張した値であるため、作り上げた1 mΩや10 GΩといった抵抗値がどれだけ正しいのかを客観的に示せる根拠が必要となる。

そのため、信頼でき、自身より能力の高い、または同程度の測定能力をもつ校正事業者と同一の抵抗器を測定し合い、互いの測定値がある範囲で一致することを確認する技能試験や試験所間比較に参加し、自らの測定能力を確認している。

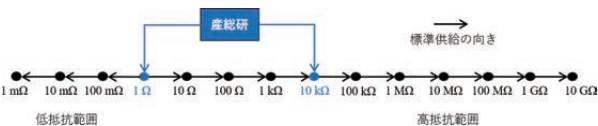


図3 電気抵抗標準の構築例

また、産総研から校正されている2台の特定二次標準器だが、この校正は1年周期で行われるため、1年の間の抵抗値変化を監視しなくてはならない。そのため、同程度の能力をもつ同定格の抵抗器を準備し、1対1の測定を行う。これを1年の間に何回か行い、測定結果に大きな変化がないことを点検することで、標準が維持されていることを常に確認、監視している。

4.2 技能試験

前述した技能試験や試験所間比較であるが、校正事業者が自身の能力を確認し、その維持を監視するための手段として、これに参加することは2.2節で述べたISO/IEC 17025(JIS Q 17025)の要求事項でもある。技能試験や試験所間比較は、参加事業者が同一の計測器を校正し、通常、能力の高い参照機関の校正結果を参照値として、自身の校正結果と参照値との差について評価する。その評価は次の E_n 数と呼ばれる数値を用いて実施されるのが一般的だ。

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2}} \quad \text{式(1)}$$

x :参加事業者の校正結果

X :参照値

U_{lab} :参加事業者の校正結果の拡張不確かさ

U_{ref} :参照機関の校正結果の拡張不確かさ

E_n 数の絶対値が1より大きいと不満足な結果と評価される(E_n 数は、技能試験スキーム提供者に関する国際規格ISO/IEC 17043(JIS Q 17043)に記載されている)。また、上式右辺の分母に含まれる拡張不確かさに関して、その詳細説明は本稿の範囲を超えるため、以下に簡単な説明を記載する。

校正結果や測定値は1つの値として表されるが、性質上、1つの点ではなく3章で述べたようなばらつきの幅がある。その幅は完全にランダムなばらつきだけではなく、定量化できず補正できない偏りも含んでいる。これら校正結果や測定値を不確かさにさせる各要素を全て合成して得られる幅のどこかに本当の校正結果、測定値が存在することになる。ではどのぐらい自信をもって本当の値が含まれていると言えるかという点において、一般的に95 %の信頼の水準をもって本当の値が含まれるとする幅を拡張不確かさとして表し、校正結果や測定値と合わせて表明する。

そして、不確かさにはその見積もり方法に国際的なルールがあるため、技能試験などで校正結果を比較する際には、測定値の質を表す指標として必須なものとなる。また、不確かさを校正結果に含めて報告することはISO/IEC 17025(JIS Q 17025)の要求事項でもあり、そのため、JCSS校正事業者の発行するJCSS標準付校正証明書には、その記載が義務付けられている。

4.3 産総研技術コンサルティングの活用

電気抵抗標準の構築例について前述したが、校正範囲の拡張とそうして構築した標準の正しさを技能試験に参加するなどして確認し、これらの作業の繰り返しによって、他の物理量でも同様に高精度の社内物理標準を構築し、その妥

当性評価を行ってきた。そうして長年、維持してきた社内標準ではあるが、やはり一定の年数を超えると劣化による機能低下が生じてくる。標準器の寿命は長いものからそうでないものまで様々であるが、産総研などの上位校正機関による校正以外にも定期的な自主点検を行うことにより、標準器の健全性確認を地道に行う必要がある。4.1節の例で同定格の抵抗器を用意すると述べたが、これはバックアップとしての機能でもあり、意図しない故障などの不測の事態にも対処できる体制を整えている。

また、異なる材料や構造、測定原理を用いて、より優れた機能や精度を実現する新たな計測器に移行することもある。アズビルにおける直近の例では、小型プログラマブルジョセフソン電圧標準装置(以下、小型PJVS装置)を導入し、直流電圧標準をこれに移行する作業を現在進めている。詳細は控えるが、ジョセフソン電圧標準とは産総研をはじめとした世界各国の国立標準研究所において運用される一次標準器(国家標準)であり、超伝導技術を用いて量子化された定電圧ステップを発生し、原理的に経時変化しない電圧標準といえる。アズビルが導入した小型PJVS装置は、産総研にて開発されたジョセフソン電圧標準素子(図4参照、中央黒色の部分に集積されている)を核として、極低温冷凍機、バイアス電流発生装置、およびマイクロ波照射装置等から構成されている。

この装置の導入により非常に高精度な電圧標準の運用を期待できるが、アズビルが保有する測定環境やシステムの中でそのパフォーマンスをどれだけ発揮できるかを確認しなくてはならない。そこで、産総研技術コンサルティング(産総研が有償にて提供する産業技術支援制度)を利用し、産総研との比較試験を行った。具体的には、ツェナー型電圧標準器という計測器(これは従来の電圧標準器であり、校正事業者の保有する最上位の標準器として広く使われている)を仲介したのだが、まず、アズビルで小型PJVS装置を標準としてツェナー型電圧標準器を校正したあと、産総研にツェナー型電圧標準器を持ち込んで校正してもらい、アズビルの測定値がどれだけ産総研の値と一致するかを確認した。そして、この結果からアズビルの測定手順や周辺機器について再考し、改善のためのアドバイスをいただくなどした。

この産総研技術コンサルティングだが、アズビルでは、真空や流量など他の物理量においてもその社内標準構築のために活用してきた経緯がある。これらは対象とする測定範囲や目標とする不確かさの小ささにおいて、参照値を供給し得る他の校正事業者が存在しなかったため、産総研技術コンサルティングを契約し、産総研との比較試験を行った。

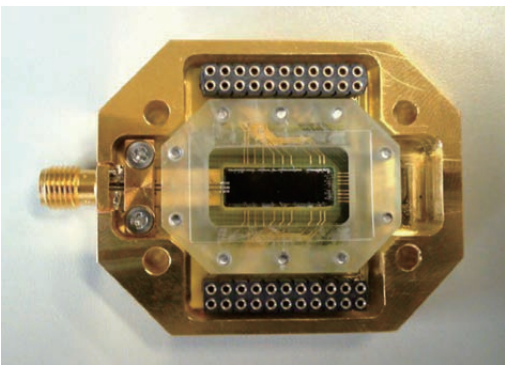


図4 ジョセフソン電圧標準素子

新たな社内物理標準の構築において困難で新しい技術的な課題に対する産総研技術コンサルティングの活用は、最も早く確実な方法ではないだろうか。

5. おわりに

校正をはじめとした計測管理とその源流となる社内物理標準の構築について述べてきたが、これは社内で使用される計測器が正しい値を示すようにするための必須な活動であり、その目的は自社製品の精度保証およびその担保にある。校正管理の内製化により校正費用の流出を抑制できるが、コスト上のメリットはそれだけではなく、社内物理標準の構築によって、例えば生産上の不具合点検や新製品開発における試作物の評価などに対する実行スピードは格段に上がり、その効果は絶大なものとなる。そのため、アズビルでは製品の企画段階から同時に物理標準開発を開始した例がいくつもある。真空計や熱式微小流量計といった製品はまさに“測れないものは作れない”という考えに基づき製品化に至った事例と言える。

こういった我々の活動を通じて、計測の重要性、正しく測ることの大切さがより認知できれば幸いである。

<参考文献>

- (1) 山口徹, 伊林洋志, 新沢陽介, 江口忠登美, 磨田光夫, 現場技術者のための計測技術入門, 日本規格協会

<著者所属>

新沢 陽介 アズビル株式会社
技術標準部計測標準グループ

高度に安定した校正環境を実現する新校正施設

A new calibration facility for achievement of a highly stable measurement environment

東海林 成樹
Shigeki Shoji

加藤 誠司
Seiji Kato

太宰 龍太
Ryota Dazai

キーワード
計測器, トレーサビリティ, 校正室, 室圧制御, 気流制御, 縁切り構造

正しく測るためには計測器を正しい手順で使うことが重要だが、計測器を使う場所の温度や湿度などの測定環境にも注意する必要がある。実際、計測器には測定時の温湿度変化によって測定結果が変わるほどデリケートなものも多く、その計測器が正しく測れていることを確認(校正)する作業においてはなおさら測定環境を安定させることが重要になる。本稿では、アズビルが建設中の新校正施設で実現しようとしている機能の紹介を通して、計測器で「正しく測る」ためには安定した測定環境がいかに重要かについて説明する。

To obtain correct results from a measuring instrument we follow the correct procedure for its use but, depending on the type of measurement, we must also pay attention to the measurement environment. Many measuring instruments are very sensitive to temperature and humidity changes. Therefore, it is very important to stabilize the measurement environment when verifying that a measuring instrument is operating correctly (i.e., in calibration). In this paper, we discuss the importance of a stable measurement environment for correct measurement and describe the capabilities that Azbil is attempting to realize through the new calibration facility currently under construction.

1. はじめに

アズビルは1906年の創業時より計測と制御を中核とした事業を展開しており、1世紀以上の長きにわたり「正しく測る」ことを追求してきた会社である。この「正しく測る」を支えているのが校正と呼ばれる、計測器の示す値がどの程度ずれているのかを確認する業務である。アズビルでは藤沢テクノセンター(神奈川県藤沢市、以下、アズビルFTC)と香春技術センター(福岡県田川郡)に校正を行う専門の施設を設置しており、azbilグループとしてはアズビル京都(京都府船井郡)とアズビル金門校正サービスセンター(福岡県糟屋郡)にもそれぞれが得意とする液体大流量と気体大流量の校正を行う施設がある。これらの施設では国内外のazbilグループ各社が行っている生産業務あるいは保守・修理などのサービス業務で使用する計測器の校正を行い、製品やソリューションの品質安定に貢献してきた。

なかでもアズビルFTCの校正施設(以下、標準室)は1996年に設置され、関係者のたゆまぬ努力と継続的な投資によって日本でもトップクラスの校正事業者に成長したが、設置後20年以上が経過した現在抱える課題として、1. 業務拡大に伴い現在の標準室が手狭になってきたこと、2. 現在の標準室はオフィスビルの一部を改良して使用しているため、

測定環境の精密な制御に限界があること、3. アズビルFTCの中で最も海拔が低い位置に設置されているため近年頻発する台風やゲリラ豪雨等による水害のリスクが高いこと、などがある。

2021年4月に社外発表されたとおり、アズビルFTCにおいて新実験棟1(通称103建物)と新実験棟2(通称104建物)の建設が進んでおり、2022年5月に竣工の予定である。このうち104建物(図1、図2)に新しい標準室(以下、新標準室)を設置する予定で、これによって前述の課題1～3を大きく改善できると考えている。特に課題2に対しては現在の建築技術とアズビルの持つ空調技術を結集し、考えられる限りの対策を施している。



図1 新実験棟2(104建物)完成イメージ図(提供:株式会社日建設計)



図2 建設中の新実験棟2(2021年12月撮影)

2. 環境の変化が標準器に与える影響

2.1 校正における環境の重要性

標準室では重さや長さなど10種類以上の物理量について校正を行っている。このうち、温度、湿度、圧力、電気、流量、周波数の6種の物理量についてはJCSS (Japan Calibration Service System) 校正事業者として登録されている。登録されるためには、厳格に管理された物理標準（標準器）、技術者の力量、および校正を行う環境を一定条件で維持する能力が求められるが、アズビルが提供する校正レベルに必要な精度でJCSS登録事業者認定を維持するためには、前述の3つの条件すべてにおいて極めて高いレベルが要求される。以下に、環境変化が校正に及ぼす影響の概要について述べ、具体的な対策については3章、4章で述べる。

2.2 環境条件が校正に及ぼす影響

校正に影響を及ぼす主な環境条件として、標準室内の温度、湿度、気圧、振動、気流がある。以下にそれぞれが校正に与える影響について概説する。

2.2.1 温度

温度の変化は5つの環境条件の中で校正に及ぼす影響が最も大きく、多くの計測器に対して様々な影響を与える。例えば、ノギスのような金属製の計測器が温度変化によって伸び縮みすることは想定できるが、その他にも圧力の標準器である重錘形圧力天びんで最も重要な部品であるピストン・シリンダは金属製のため温度変化によって熱膨張・収縮するし、電気標準器や時間の標準器は素材の特性上、温度変化によって値が変化する。また、湿度計測や流量計測では対象とする空気や流体の体積や密度、圧力の安定性が重要になるが、これらは温度変化に大きく影響される。このように構造上、または原理上、温度変化が測定結果に及ぼす影響が大きい計測器は数多くある。そのため温度の影響を可能な限り受けないようにするためには、室内を一定温度に保つのはもちろん、温度の変化量（一定時間内の上下限温度の幅）が測定精度に影響を及ぼさないように維持することも重要になる。

2.2.2 湿度

湿度は特に冬場に注意が必要となる。湿度が高いと結露を起こしやすくなり、低いと静電気が発生しやすくなるため、いずれも計測器の故障につながる可能性がある。また、湿

度が低い場合は人の衣服にも静電気が溜まりやすくなり、その人が計測器の近くを移動すると測定結果（特に電気計測）にノイズが混入することはよく知られている。このような事象の発生を防ぐためにも相対湿度50 %で維持することが重要となる。

2.2.3 気圧

精密な計測を行う場合、大気圧のわずかな変化が結果に影響を及ぼすことがある。図3は現在の標準室で計測した室圧の変化量であるが、グラフ上の小さなピークはドアの開け閉めによる気圧の変動を表している。わずか10 Pa～20 Pa（標準大気圧は101325 Pa≒1013h Pa）ほどの変化だが、0.01 Paレベルの圧力（微圧）計測には十分に大きな影響となる。また、数 mL/min程度の微小気体流量計測ではこのわずかな変化が無視できない気体の体積変化を引き起こし、測定結果に影響を及ぼす。精密な湿度計測では、わずかな気圧の変化が空気中の飽和水蒸気量を変化させるため湿度（相対湿度）の測定結果に影響が出る。これら为了避免するためには気圧の変化量が測定精度に影響を及ぼさないように維持することが重要になる。

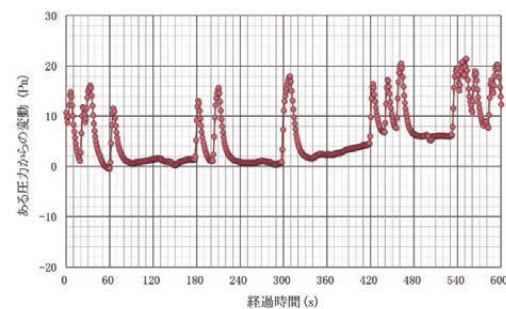


図3 現在の標準室の気圧変動

2.2.4 振動

振動は主に重さの計測に影響する。このため、重さを測ることが校正の一部になっている場合はすべて影響を受ける（図4）。

例えば圧力計測で用いる重錘形圧力天びんは、気体または液体が重りを押し上げる力で圧力を計測する方法である。また、流量計測でも一定時間に流れた気体や液体の重さを計測して流量を求める方法もある。これらの校正を行う場合は振動がある環境で正しい測定結果を出すことが極めて難しい。このような計測器には振動が可能な限り伝わらないような仕組みが必要となる。

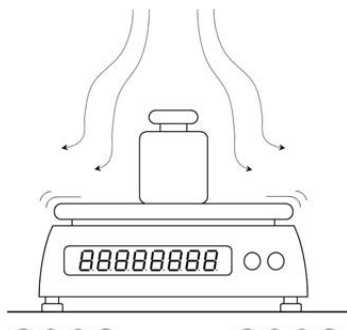


図4 振動と気流の影響

2.2.5 気流

気流も振動と同様、重さの計測に影響する。はかりや前出の重錘形圧力天びんで計測中に気流が当たると測定結果に影響が出る（図4）。一方で気流が全くないと室内の温度にばらつきが生じる。計測器に影響を与えず、室内温度も均一にできるような気流を発生させる仕組みが必要になる。

3. 温度、湿度、圧力を制御する空調システム

104建物の新標準室には、温度、湿度、圧力流量、電気・長さなどの物理量を管理する4つの部屋を設置する。ここでは、温湿度や圧力を安定させるための新標準室の空調システムについて紹介する。

3.1 空調システムの全体像

新標準室の空調システムは、共通の空調機で空気を1次処理した後、各部屋へ給気するダクト内に設置してある電気ヒーターと電熱式蒸気発生器にて、各部屋の温度と湿度環境を個別に制御している（図4）。このシステムにより、部屋ごとに単独の空調機を設置するよりもインシャルコストを大きく抑えて、安定な温度・湿度環境を実現することができる。

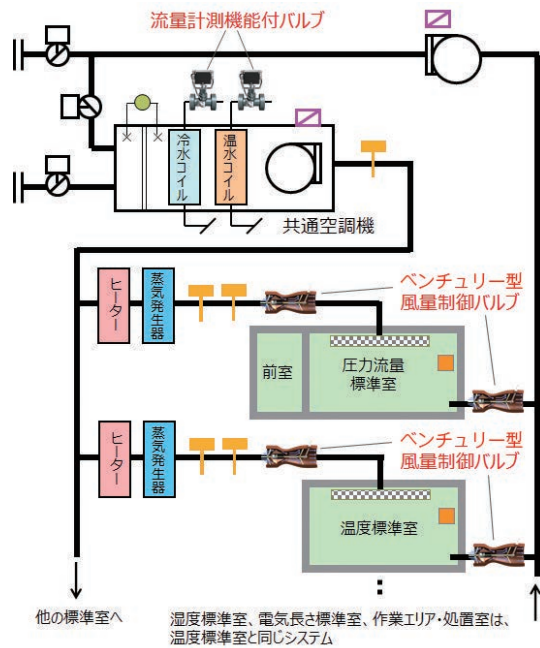


図5 新標準室の空調システム

3.2 外乱を防ぐための仕組み

3.2.1 流量計測機能付バルブによる制御

空調設備の冷温水配管には他の空調設備も多数接続されており、その使われ方により配管内の圧力は変動するため、コイル（熱交換器）に流れる流量はバルブ開度が一定であっても変動してしまう。そこで共通空調機の冷水コイル・温水コイルの制御バルブには流量計測制御機能付電動二方弁ACTIVAL™を採用し、コイルを通過する冷温水流量（以降、実流量）をPID制御する内部ループと給気温度をPID制御する外部ループからなるカスケード制御を採用した（図6）。この制御により、配管内の圧力変動による実流量変

化をすぐに捉えて給気温度に影響する前に補正することができ、制御を安定させることができる。

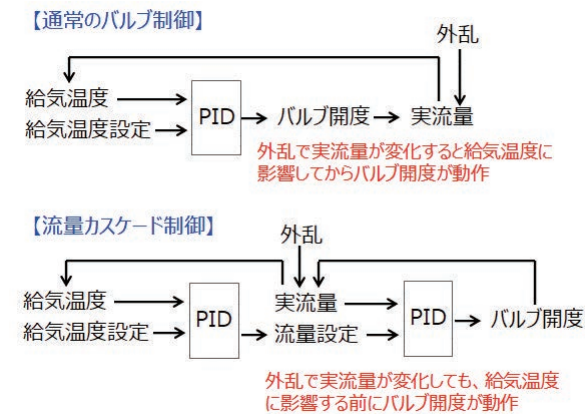


図6 実流量によるカスケード制御

3.2.2 ベンチュリー型風量制御バルブ

空調設備のダクト内の圧力は、屋外の風が空調機の外気取入口や排気口に吹き付けることで激しく変動する。ダクト内の圧力が変われば、通常は室内に吹き出す風量も変化し、室圧も安定しない。新標準室の給排気量では、圧力独立性機構を備えたベンチュリー型風量制御バルブInflex™ VN（以降、風量制御バルブ）を採用している。風量制御バルブはスプリングの伸縮によりダクト内圧力変動を瞬時に吸収することができる（図7）。新標準室の室圧は、標準室内に給気する風量と排気する風量をこの風量制御バルブにて正確に制御することで安定させている。

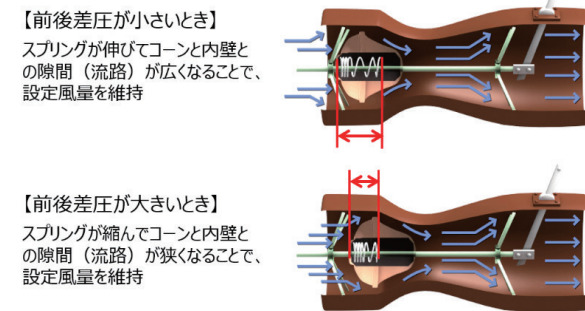


図7 風量制御バルブの特徴

3.3 省エネルギー制御

新標準室の空調システムは共通空調機でコイルによる除湿や加熱をするが、各部屋のダクト内でも電気ヒーターによる加熱や電動式蒸気発生機での加湿をするため、その負荷処理の分担を適切に制御することが重要となる。

(1) 共通空調機の除湿量可変制御

各部屋の蒸気発生装置の出力のすべてが一定値以上の場合は共通空調機での除湿を抑えるように自動で調整し、蒸気発生装置の出力も抑えることができるため省エネルギーとなる。

(2) 共通空調機の加熱量可変制御

各部屋の電気ヒーターのすべての出力が一定値以上の場

合は、共通空調機での加熱を自動で強めることで、電気ヒーターの出力を抑えることができる。共通空調機の加熱エネルギーは増加するが、加熱に使用する温水は建物共通の高効率ヒートポンプで生成しているため、電気ヒーターで加熱するよりも効率が良く、エネルギー使用量の削減に貢献できる(図8)。

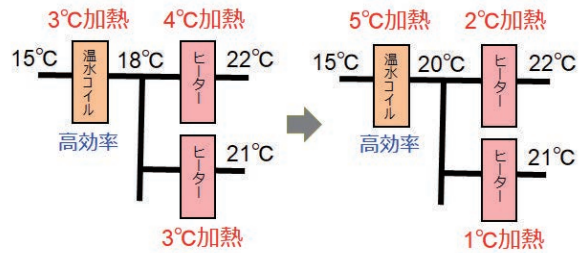


図8 適切な負荷分担による省エネルギー制御

4. 気流と振動を制御する仕組み

2章で述べたとおり、精密な計測を行うためには室内温度のばらつきを生じることなく計測器にも影響を与えない程度の適度な気流を発生させ、振動をできる限り抑える仕組みが必要となる。ここでは気流と振動を抑えるための仕組みについて説明する。

4.1 気流を抑える仕組み

校正作業を行う際、計測器に影響を与えない気流速は一般に1 m/s以下と言われている。流速を減らすために、単に空気の吹き出し流量を抑えると、標準室内の温度分布にばらつきを生むことになる。吹き出し流量を保ちつつ流速を抑えるためには、極力均質な流れを作り出す必要がある。このために、標準室の吹出口を十分大きいパンチングメタルとし(図9)、設置数も増やした。

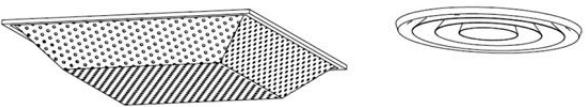


図9 パンチングメタル（左）と通常の吹き出し（右）

これらの工夫により温度分布のばらつきを少なくでき、計測器への影響も小さい均質で柔らかな流れを作り出すことができる。

4.2 振動を抑える仕組み

104建物は実験棟という位置づけであり、コンプレッサなど振動源となりうる設備が多数設置される。これらの設備が発生させる振動はわずかであっても精密な計測には大きな影響を及ぼすため、振動を嫌う校正を行う部屋には振動を伝わりにくくする仕組みが必要となる。そこで新標準室では縁切りと呼ばれる当該の部屋に専用の基礎を設けて建物全体の基礎と物理的に切り離す構造を採用し、他の部屋からの振動が伝わりにくい構造にした(図10、図11)。

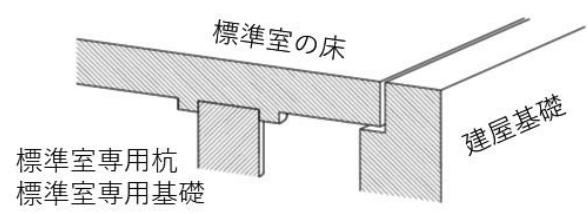


図10 縁切り構造の概要

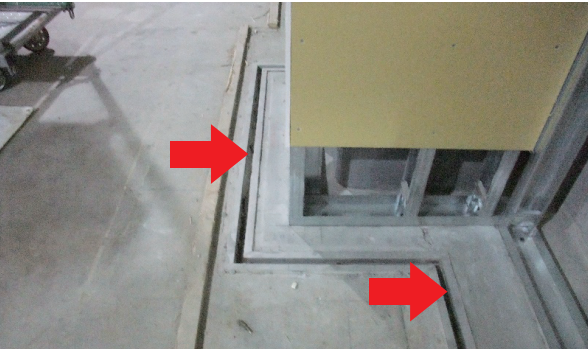


図11 縁切り構造により床にできた溝

5. 今後の取り組み

新標準室の適切な性能維持の確認、継続的な改善活動を実施していくには、各標準室や空調設備のデータ解析が必須となる。本システムが接続されている中央監視装置savic-net™ G5では、測定点ごとにデータのサンプリング周期を最短1秒周期で設定できるようになっている⁽¹⁾。室圧などのように変化の激しい測定点は、データ収集周期も短く設定し、新標準室の状況をより正しく把握し、改善活動につなげていきたいと考えている。

2020年初頭以降、新型コロナウイルス感染症のパンデミックによって出社人員の削減を余儀なくされたが、それでも限られた人員で校正業務を継続しなければならず、事業継続の観点から脆弱な体制であることを痛感した。このため自動化や遠隔支援など人員の減少を補うためのリモート対応を進めていきたいが、それには環境が自動制御されている状態は必須となる。リモート対応を進めるには、環境条件以外にも課題は多いが、この移転を機に取り組みを加速させたいと考えている。

6. おわりに

新標準室において「正しく測る」ために必要な測定環境の条件とそれを実現するアズビルの空調技術や建築技術について述べた。校正という厳密さを要求される作業だからこそ厳しい条件が必要となるが、計測器の測定環境を安定させるというのは校正に限った話ではなく通常の計測を行う際も注意が必要である。測定結果に違和感がある場合には改めて測定環境を確認してみてはいかがだろうか。

本稿で紹介した新標準室を設置予定の新実験棟は2022年5月に竣工予定と書いたが、残念ながらすぐにフル稼働できるわけではない。一部の校正設備については現在の標準室から移動して稼働する予定になっているが、それ以外の

校正設備については年間を通して安定した測定環境が必要となるため、1年ほどかけて新標準室の環境制御能力の確認を行い、問題があれば対応する作業が必要となる。

まだまだ気の抜けない日々が続くことになるが、あらゆる確認作業が完了し、すべての校正を新標準室で行えるようになった暁には世の中に誇れる校正施設になっていると確信する。その際にはぜひアズビルFTCにお越しいただき、「正しく測る」ことの楽しさ、難しさ、大切さを感じるとともに、アズビルの技術を体験していただければ、関係者一同これに勝る喜びはない。

<参考文献>

- (1) 深浦, 高度なエネルギー管理と快適な空間を提供するsavic-net™ G5システムの統合コントローラ, azbil Technical Review, 2019

<商標>

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

<著者所属>

- | | |
|--------|---|
| 東海林 成樹 | アズビル株式会社
技術標準部計測標準グループ |
| 加藤 誠司 | アズビル株式会社
技術標準部 |
| 太宰 龍太 | アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー
マーケティング本部IBシステム部 |

液体流量計の開発と品質管理のための標準供給体制構築

Establishment of a standard supply system for liquid flowmeter development and quality control

杉山 信幸
Nobuyuki Sugiyama

山口 徹
Toru Yamaguchi

キーワード

校正事業者登録制度, JCSS, 校正設備, 液体流量計, 大流量, 微小流量

アズビルは電磁流量計や熱式流量計などの液体流量計の製造・販売を行っている。これらの製品の開発や生産に欠かすことができない校正設備の紹介と製品の性能を評価できる設備の特徴や能力について述べる。また、これらの技術を維持する仕組みとしてJCSS (Japan Calibration Service System) 校正事業者登録制度を活用し、トレーサビリティの確立や校正測定能力を維持していることを説明する。

Azbil Corporation manufactures and sells liquid flowmeters, including electromagnetic and thermal models. This article introduces our calibration facility, which is indispensable for the development and production of these products, and describes its features and capabilities for evaluating the performance of the products. In addition, we explain how our utilization of the Japan Calibration Service System (JCSS) helps us to maintain a of high level of technology and product traceability.

1. はじめに

azbilグループで販売・製造している液体(水用)流量計(以下、液体流量計)の品質や性能維持に欠かすことができない校正設備を紹介する。液体流量計の校正設備はアズビル藤沢テクノセンター(以下、アズビルFTC)とアズビル京都にあり、微小な流量(1 g/min≒1 mL/min)から大流量(5090 m³/h)までJCSS校正が可能である。ちなみに微小流量の1 mL/minはティースプーン(約5 mL)を満たすまで約5分かかるのに対して、大流量の5090 m³/hでは一般的な25 mプール(約600 m³)を約7分で満たすことができる。

液体流量計の主な製品として以下、微小液体流量の測定により充填や混合などに使われる熱式微小液体流量計とプロセス流体、スラリー性流体などの測定に使用される電磁流量計を紹介する。

それぞれの流量の測定範囲は図1のとおりで、微小流量から大流量まで正しく測れることを校正作業で確認して出荷する。校正作業は、流量に応じた細かな対策(設備の工夫や手順など)が必要になるので本稿にて説明する。

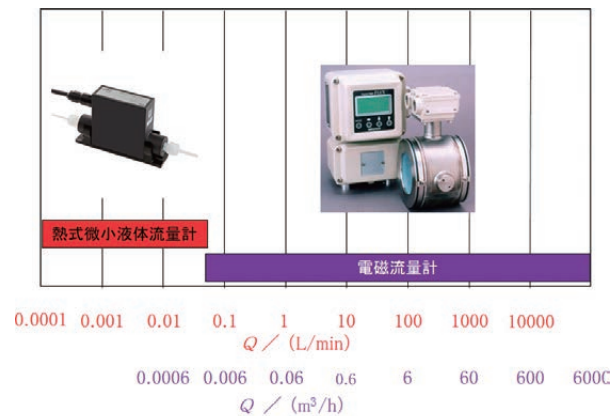


図1 製品の測定流量範囲

2. 校正設備の紹介

2.1 液体流量の校正

まず、一般的な液体流量計(水流量)の校正方法について説明する。図2のように標準器となる流量計(標準流量計)と校正対象の流量計を同一配管内に接続し、上流側の圧力を高くすることで配管内に水を流す。この状態で一定時間放置し配管内の流れの状態を安定させ、各流量計の出力を比較

することで校正が可能になる。このように流量計同士を比較して校正することを比較法と呼んでいる。

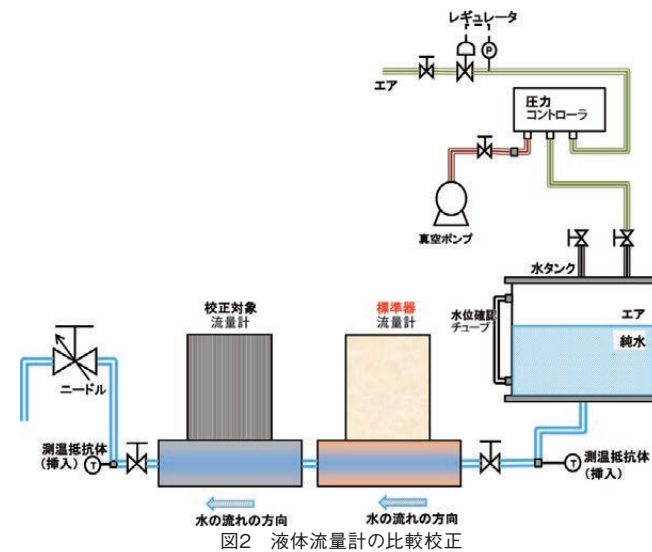


図2 液体流量計の比較校正

比較法では、標準器(流量計)より高い能力(精度)で校正することはできないため高精度で校正するには、以降で紹介する秤量法という方法が使われる。秤量法とは、流量計を通過した水の重さ(質量)と流した時間を測って流量(質量流量)を算出する方法である。

2.2 微小流量校正設備

2.2.1 JCSS登録内容

微小流量計の校正設備はアズビルFTCに設置されており、この設備を用いて技術標準部計測標準グループがJCSS登録事業者として表1のとおり登録されている。

表1 JCSS登録内容(微小流量)

登録番号	0155
校正手法の区分の呼称	液体流量計
種類	微小用流量計
校正範囲	1 g/min 以上 30 g/min 以下
拡張不確かさ 信頼の水準約 95 %	0.15 %

1 g/min ≒ 0.001 L/min

2.2.2 設備の概要

微小流量計の校正設備の概略は図3のとおりで、1.5 m×1.5 mのスペースに設置できる大きさである。水の流れは右のタンクから左のはかりへと配管内を流れるが、図3の右上部を書いた圧力コントローラでタンク内の圧力を制御し(絶対圧250~400 kPaの範囲に設定)、送水している。

流量を一定に制御するには水圧を一定に保つ必要があるが、水圧を水で直接コントロールすると力の伝達速度が速すぎて脈動が生じてしまう。そのため空気粘性による配管抵抗とタンク(ボリュウム)で脈動を小さくする工夫をしている。

タンクから押し出された水は流量計を通過したあと、はかりの上の容器に排出され、ここにためられていく。一定時間

経過後、たまった水の質量を経過時間で割ることで、実際に流れた流量を決定することが可能となる。しかし、測定対象は最小で1 mL/minと微小な流量であるため、これを高精度で測定するには様々な現象を考慮しなければならない。これらの内容とその対策について次節に述べる。

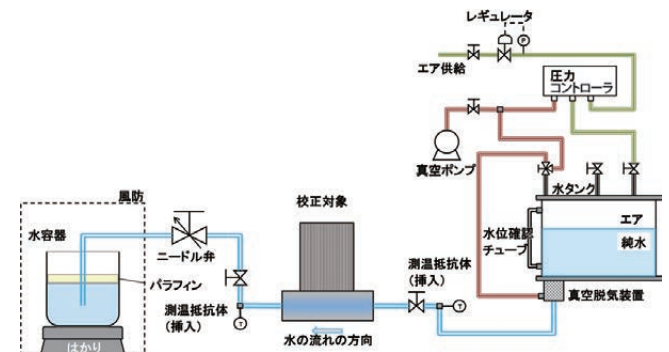


図3 微小流量校正設備の概略図

2.2.3 設備の概要

正しく測るには誤差要因を把握し、それらの対策をする必要がある。これらの対策のいくつかは厄介なトレードオフの関係(現象)になるため不確かさの感度係数や過渡的な物理現象を見極め、バランスを考えて校正設備を構築したり作業手順の一部を加えたり様々な工夫をする必要がある。次に挙げる誤差要因が及ぼす影響を軽減するために行った設備の特徴を4つ紹介する。

(1) 水の蒸発対策

まず始めに水の蒸発を防ぐ方法を、図3を参照しながら説明する。秤量法による流量計の校正では流量計を通過した水をはかりの上にある容器にためていくが、このときの水の量が非常に少ないため、測定中のわずかな蒸発量でさえ測定に影響を与えてしまう。この蒸発の影響を避けるため水が直接、測定環境の空気に触れないよう工夫をしなければならない。そこで植物油(パラフィン)を容器内の水に浮かべることで蓋をし、蒸発を防ぐ対策をとった。蒸発防止の蓋としてパラフィンを選定した理由は、液体なのではかりに余計な力をかけないためでもある。

(2) 気泡や溶存空気対策

次に、配管内において気泡の発生を防ぐ方法を説明する。微小流量校正設備には接手やバルブがいくつも介在し配管の内径が一樣ではないため、内径の変化によって水が流れる際に圧力差が生じ、気泡が発生しやすい環境になる。液体流量の校正において配管内に気泡が混在すると、流体の体積や熱伝導率などの物理的特性が異なることで誤差が生じる。そのため、あらかじめ校正前にタンク内の水を真空脱気することで気泡や水に溶け込んだ空気を除去している。その後、校正を開始するとタンク内の空気を加圧して送水するため徐々に水中へ空気が溶け込んでしまう。その校正中に溶け込んだ空気を取り除く方法として真空脱気装置をタンクの出口に装着し校正中も脱気処理を行っている。この真空脱気装置を通過する水の流路は多孔性のテフロン膜で構成されており、その流路の外側は容器で囲われている。この容器内を真真空にし続けることで気泡が流路の外側へ透過する構造になっている。このような脱気原理であるため同

時に一部の水が水蒸気となり、その気化熱で水温低下が生じてしまう。そのため配管にヒーターを巻き精密な水温制御でリカバリしている。また、同時に水蒸気も脱気されてしまうため、配管内の水の圧力が低下してしまう。この圧力損失分を見越した設計が必要になる。

(3) 温度変化対策
次に温度変化が流量の校正において、どのような影響を及ぼすのかを説明する。どんなに測定環境を精密に温度制御しても、人の出入りや校正設備の発熱などにより、環境の温度変化をなくすことは難しい。さらに水を配管に流す際、流量計を通過する過程で電子回路等の発熱により水温が上昇してしまうため、水の温度変化をなくすことも難しい。ここで考慮しなければならない現象は配管と水の熱伝導率や熱膨張率の違いにより温度変化があると、それぞれの膨張・収縮の違いによって、水を押し出したり、吸い込んだりすることで流量校正に影響を与えるということである。この影響を小さくするには校正対象の流量計を通過してからはかりの容器に入るまでに必要な配管の容積をできる限り小さくする方法が効果的であるが、小さく（細く短く）し過ぎると圧力損失が大きくなり水が流れにくくなる。そのため、圧力損失の大きい流量計を想定して配管径、配管長を設計したが、微小流量になると理論どおりの結果が得られず、試行錯誤により適切な配管を見つけ出した。

(4) 液滴対策
微小流量の校正では、測る水の量があまりにも少ないため、配管出口を水面から上方に離すと、配管から液滴となって断続的にはかりの容器に落下することになり連続的なデータを取得することができず、時間当たりの質量変化が安定しないということになる。その対策としてパラフィン下に配管出口を浸水させ送水することで、連続的なデータの取得を可能とした。対策前後の結果の一部を図4に示す。これは約0.05 g/minの例であるが、この対策により連続データが取得できていることがわかる。

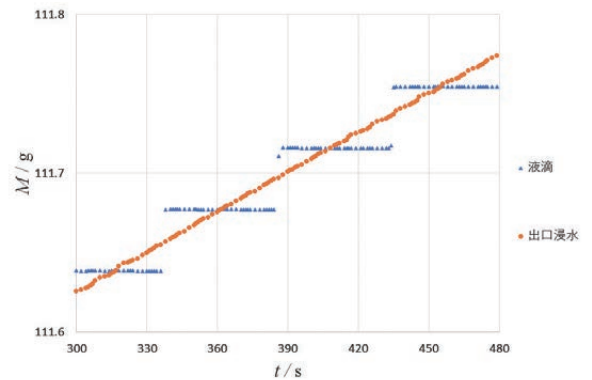


図4 液滴の影響と配管出口浸水の効果

図4のとおり液滴による問題は解決したが、測定中は水の量が増え配管が徐々に浸かる。その結果、配管の浸水部分が増加し、その体積にかかる浮力が誤差になる、そのため浸水する配管は可能な限り細くし、この影響を無視できるように設計した。

2.3 大流量校正設備

2.3.1 JCSS登録内容

大流量用の流量計校正設備はアズビル京都に設置されており、この設備を用いてアズビル京都校正グループがJCSS登録事業者として表2のとおり登録されている。

表2 JCSS登録内容(大流量)	
登録番号	0274
校正手法の区分の呼称	液体流量計
種類	水用流量計
校正範囲	0.002 m ³ /h 以上5090 m ³ /h 以下
拡張不確かさ 信頼の水準約 95 %	0.10 %

2.3.2 設備の概要

アズビル京都の大流量校正設備では大量の水を使用するため地下水槽に貯水し、校正に必要な水の量を循環させて使用している。図5の流量校正設備の断面図(概略図)をもとに地下水槽から水の流れに沿って校正設備を説明する。まず「地下水槽」から「揚水ポンプ」で「高架水槽」に水を上げ、ここから重力を利用して各配管（表3の各校正ラインへ）に水を流す。この流量を測る「制御用流量計」の出力をもとにして目標の流量になるように「流量制御バルブ」の開度を調整する。流量が安定したら捨て流し工程を経て「ダイバータ」で流路を切り替え「秤量タンク」に水をためる。所定の水の量がたまれば再び「ダイバータ」で流路を切り替え、たまった水の質量（重さ）を「秤量器」で測る。ダイバータとは、短時間で水の流れを切り替える装置であり、ダイバータからの切替信号により秤量タンクに水をためている時間を正確に測定することができる。この時間でたまった水の質量を割れば、この間に流れた流量（質量／時間）を算出できる。

表3 アズビル京都の校正ラインの対象口径と流量範囲		
校正ライン名称	校正対象口径	流量範囲
S1	2.5A ～ 25A	0.005 m ³ /h ～ 14.1 m ³ /h
S2	2.5A ～ 25A	0.002 m ³ /h ～ 14.1 m ³ /h
M1	40A ～ 50A	4.34 m ³ /h ～ 42.4 m ³ /h
M2	50A ～ 65A	14.8 m ³ /h ～ 71.7 m ³ /h
M3	80A ～ 100A	39.8 m ³ /h ～ 226 m ³ /h
L1	125A ～ 200A	102 m ³ /h ～ 905 m ³ /h
L2	250A ～ 1200A	442 m ³ /h ～ 5090 m ³ /h
T	15A ～ 200A	0.090 m ³ /h ～ 905 m ³ /h

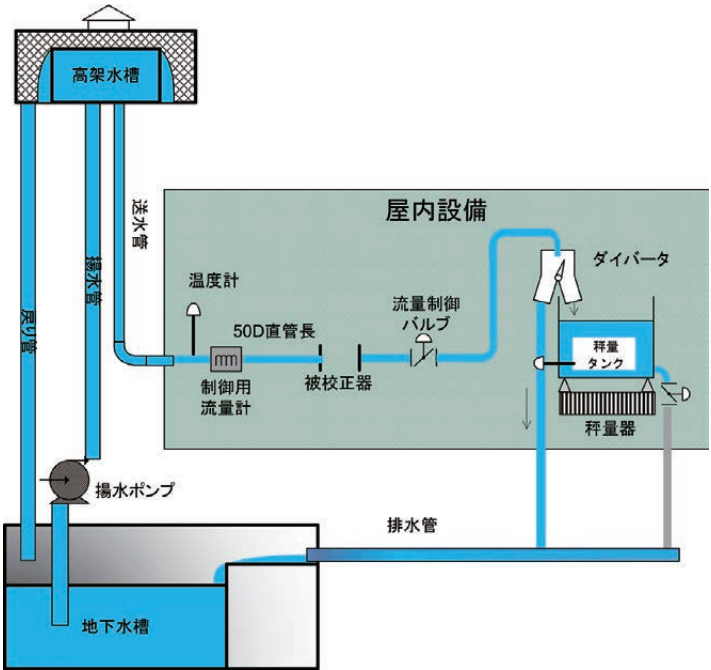


図5 流量校正設備の断面図(概略図)

2.3.3 設備の特徴

大流量校正設備の4つの特徴を紹介する。
(1) 高架水槽
まず、大流量の安定化について高架水槽の役割・機能を説明する。一般的に大流量の水を配管に流すには、ポンプなどの動力源を利用し循環させる方法を使う。しかし、この動力源の特性によって脈動や旋回流が引き起こされる。また、動力源の発熱により水温が上昇する。これらの結果として校正に必要な安定した流量を作り出すことが難しい。
そこでアズビル京都では大流量の水を安定して流すために35 mと20 mの落差を持つ高架水槽を設置し、常に水があふれている状態を保つことで水面を一定にし、水压を安定させている（オーバーフロー方式）。これにより、ポンプなど動力源の影響をなくし、重力によって安定した流量を作り出す方式を採用した。2021年現在、アズビル京都の高架水槽は国内最大級の容量と高さである。
表3に示した各校正ラインはそれぞれ個別配管で高架水槽と繋がっているため、他の校正ラインに流れた水の影響（水压の変化）を受けず、水压が安定することで流量が安定する。さらに図6の写真のように高架水槽は2段構造となっており、下段は大口径用、上段は小口径用の校正ラインへと送水している。
各校正ラインで使用された水は再び揚水ポンプ室の下にある地下水槽に流れ込む。地下水槽は常に800 m³以上貯水でき、最大流量を流しても十分な水量を確保できている。また、地下水槽から再び高架水槽へと給水することで水を再利用し環境に配慮した設計になっている。
(2) 配管類
上記の(1)で説明した安定した水压と共に流量測定の重要な要素には、水の流れの状態がある。図6の写真のように配管には、集合管、分岐管、バルブや曲がり管があり、ここでは偏った流れ（偏流）や配管内を回転しながら進む流れ

（旋回流）が発生してしまう。校正対象の流量計によってはこれらの影響を受けてしまうため、偏りや旋回成分のない整った流れ（軸対象流）を作り出す必要がある。配管設計に関しては流体シミュレーションを行い、旋回流を極力発生させない配管レイアウトとした。また、全ての校正ラインで口径の50倍（50D）以上の直管長を被校正器の直前に設置し、安定した流れを実現した。

(3) 気泡や溶存空気対策
次に大流量でも気泡の混入は悩ましい誤差要因の1つである。高架水槽が大気開放状態であり、構造的に水の真空脱気ができず気泡の混入は避けられないが、小さな気泡が水に溶け込んだ状態で維持されれば大流量では大きな影響が出にくい。しかし、配管内に気泡が塊となって存在し、それが校正中に配管内から秤量タンクに放出された場合は大きな誤差要因となる。これを回避するため配管の高低差を利用して気泡が集まりやすい場所を作り、その場所から校正作業の直前に気泡抜きを実施している。この気泡抜きは、表3に示す8つの校正ラインの全てで行っており、また、気泡検知器を設置している。これにより気泡が検知された場合は、自動的に校正を中断する仕組みとなっている。
(4) 温度変化対策
大流量設備での環境温度と水温や配管の温度変化による校正結果への影響は、微小流量と同様であるため詳細は割愛するが、アズビル京都の校正設備は非常に大きいため恒温室内に設置することができない。そのため外気の影響により水温や配管温度は季節によって大きく変わるが、十分な時間をかけて大量の水を循環させる慣らし運転を行い、水温と配管温度を安定させることで校正時の温度変化が小さくなるようにしている。

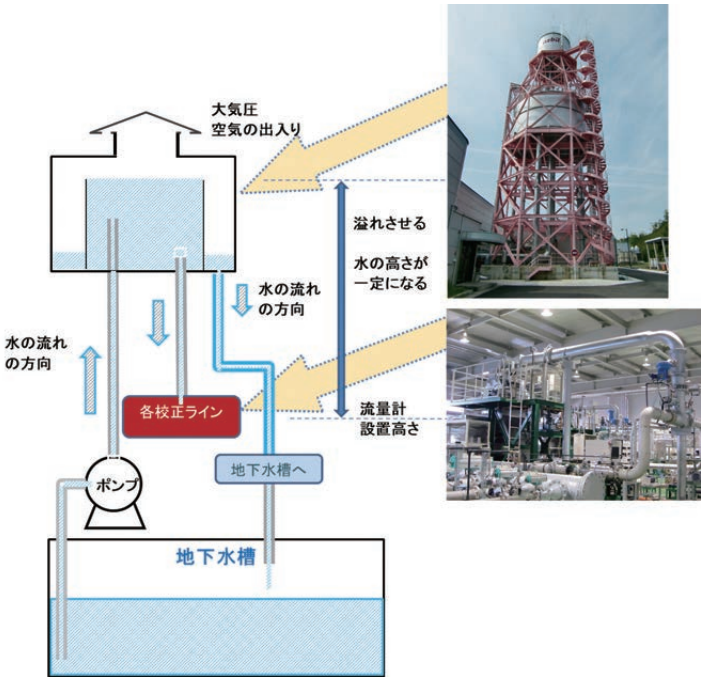


図6 大流量校正設備の水の流れ

3. トレーサビリティ

流量は質量(体積)と時間から成り立ち、このトレーサビリティ^{注1}を明らかにするには、これらの2つの上位標準を辿る必要がある。まず質量計(天びんなど)は、JCSS校正された分銅を使って現地で、流量測定の不確かさの1/10以下で校正している。次に時間測定であるが、アズビルFTCの微小流量校正設備(2.2節)ではPCの時計を用いている。このPCには特殊な周波数ボードを組み込んでおり、ここに標準周波数発生器の10 MHz信号を入力し時間の基準としている。したがって、この時間測定の標準器は標準周波数発生器となる(図7)。そして、この標準周波数発生器はGPS衛星からの信号を受信できるようになっており、GPS信号を仲介して産業技術総合研究所(以下、産総研)の時間標準と遠隔でリアルタイムに比較校正されている。この遠隔校正の仕組みを用いてアズビルの技術標準部計測標準グループは周波数区分のJCSS登録事業者にも登録されている。

アズビル京都の大流量校正設備(2.3節)では、ダイバータ切り替えの時間間隔を周波数カウンタで読んでいるが、周波

数カウンタの外部参照信号入力端子に微小流量校正設備と同様に標準周波数発生器の10 MHz信号を入力している。したがって、時間測定の標準は周波数カウンタ内部のタイムベースではなく、より高精度な標準周波数発生器となっている。この標準周波数発生器は前述した遠隔校正の仕組みによりアズビルFTCの標準周波数発生器を標準に遠隔校正されている。アズビル京都に標準周波数発生器が導入される以前は、各校正ラインに2台、合計で16台設置されている周波数カウンタを1年周期でアズビルFTCに搬送し校正していたが、遠隔校正(e-trace)導入後は個別の周波数カウンタの校正が不要となったため、運搬の必要がなくなり、取り外しや輸送によるドリフトのリスクがなくなった。

以上によりPCの時計や周波数カウンタではなく、標準周波数発生器を標準とすることで、時間標準に起因する不確かさは非常に小さくなっている。さらに標準周波数発生器が有する同期機能によって、インターネットを通じて常に産総研の時間標準と同期しているため、時間測定の誤差は流量測定の不確かさにとって無視できるほど小さい。

4. おわりに

液体流量計の区分では、アズビル京都で2011年4月にJCSSの初回登録、2014年4月に登録範囲を拡大し、現在の登録範囲(0.002 m³/hから5090 m³/h)とした。その後、2019年10月に微小流量範囲(1 g/min~30 g/min)の登録も行い、現在は国内で広い流量範囲に対応する水用流量計のJCSS登録事業者の1つとなり、数々の校正業務や流量校正に関する相談を受けてきた。またJCSS校正以外(一般校正と呼んでいる)も含め、年間200件程度の校正業務を実施する中で、流量計の校正やトレーサビリティに対する関心が年々高まっていることを実感している。今後は、様々な規格要求事項に盛り込まれニーズが高まり、さらにJCSS校正が普及すると考えられ、校正依頼件数が減ることは考えにくい。azbilグループは流量計の製造メーカーであり、校正事業者でもあるので両事業の継続とJCSS校正事業者登録制度のさらなる周知と活用に貢献していきたいと考えている。

<著者所属>

- 杉山 信幸 アズビル株式会社
技術標準部計測標準グループ
- 山口 徹 アズビル株式会社
技術標準部計測標準グループ

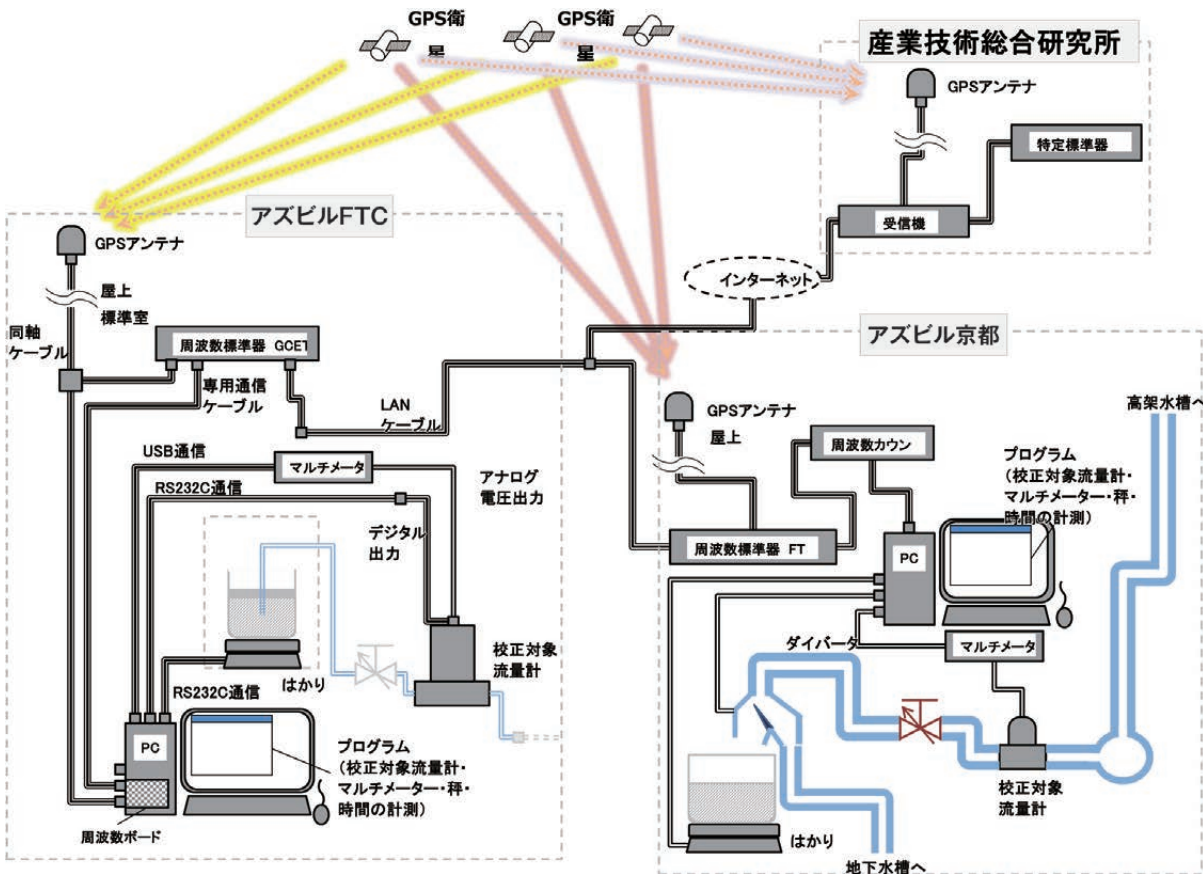


図7 トレーサビリティの概略図

3.1 トレーサビリティの階層化の仕組み

1993年のJCSS制度発足後、大きな改正の1つに、現場に近い計測器へJCSS校正の普及を目指して階層化が導入された。階層化とは、上位標準供給機関にあたるJCSS登録事業者から校正を受けた計測器を使い妥当かつ安価な方法

で校正を実施する体制のことを言う。具体的にはアズビル京都内で校正された流量計を標準器として用いて他の校正ラインを校正することで、その校正ラインもJCSS校正設備(液体流量校正設備(WS)と言う)として位置づけられる。これにより設備管理を簡略化し、校正費用を削減している。この階層化の校正ラインは、新品の電磁流量計のJCSS校正に使用することにより、製品へのコスト影響を抑えている。

注1 詳しくは本誌p.3「正しく測るための社内基盤整備」をご覧ください。

膨張法による高精度真空標準の確立

Development of high precision vacuum standard by means of the expansion method

片岡 俊之
Toshiyuki Kataoka

キーワード

真空計測, 真空標準, 膨張法, JCSS, 国家標準

アズビルが製造・販売しているサファイア隔膜真空計 形 SPGの信頼性, トレーサビリティ確保のため, 真空標準として膨張法という方式による真空発生装置を導入した。測定の不確かさとなる要因を調査し, その低減を行った。そして, 真空計を仲介して産業技術総合研究所 (以下, 産総研) との測定結果の比較を行い, 導入した装置が十分な能力を持っていることが確かめられた。その上で, 真空計という区分でJCSS (Japan Calibration Service System) 校正事業者として登録され, サファイア隔膜真空計 形 SPGのトレーサビリティの確保等につなげることができた。

In order to ensure the reliability and traceability of the Sapphire Diaphragm Gauge (model SPG), manufactured and sold by Azbil, we introduced a vacuum generation system that is based on the expansion method as our vacuum standard. We investigated the factors that cause measurement uncertainty and reduced them. Then, the accuracy of our vacuum generation system was verified by comparing our measurement values with those of the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). The results confirmed that the system had sufficient capabilities. On that basis, we were registered as a calibration service provider of JCSS (Japan Calibration Service System) in the vacuum gauge category, securing the traceability, etc., of the SPG Sapphire Diaphragm Gauge.

1. はじめに

近年, 半導体プロセスを中心に真空計測の重要性が高まっている。アズビルでは, 2011年より主に半導体製造プロセス用途向けにサファイア隔膜真空計 形 SPGを販売している (図1)。この製品は, センサ部の材料としてサファイアを使用することにより耐食性, 耐熱性, 機械的に優れた特性を実現している^{(1) (2) (3)}。



図1 サファイア隔膜真空計 形 SPG外観

真空とは, 通常の大気圧より低い圧力の気体で満たされた空間内の状態のことであり, アズビルの隔膜真空計は大気圧近辺からその数万分の一程度までの真空領域の圧力の計測に用いられる。

このサファイア隔膜真空計が必要とする精度レベルでのトレーサビリティ^{注1}を維持するには, より精度の高い真空標準が必要となる。しかし, 国内ではその要求を満たす標準供給^{注2}が可能な校正事業者が存在しなかったため, アズビル自身で真空標準を構築する必要があった。

本稿では, 主にアズビルの隔膜真空計の仕様精度に対して十分な信頼性を持った特性評価や校正を行えるようにするためにアズビル技術標準部計測標準グループ (以下, 当グループ) において構築した真空標準と, 測定の不確かさを低減するための実施事項について紹介する。

注1～注5 詳しくは本誌p.3「正しく測るための社内基盤整備」をご覧ください。

2. 膨張法の概要

隔膜真空計が対象とする圧力範囲のうち, 5000 Pa程度から大気圧近辺までの範囲では高安定かつ高精度の圧力を発生させる重錘形圧力天びんが圧力標準として一般的に用いられており, 当グループでもこれを保有している。重錘形圧力天びんは, 図2のような構造になっており, 圧力媒体を加圧して重錘を載せたピストンを浮かせ, 力の釣り合いがとれた際に安定した圧力が発生する。圧力の定義は単位面積にかかる力であるから, 重錘とピストンの質量による鉛直下向きの力をピストン・シリンダの有効断面積で除すことで重錘形圧力天びんの発生圧力が得られる。

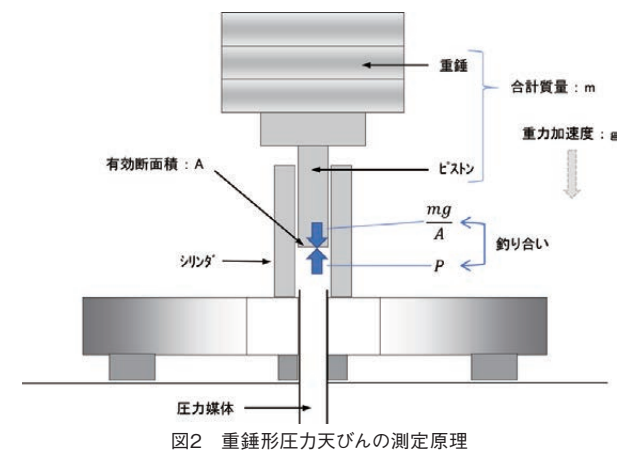


図2 重錘形圧力天びんの測定原理

しかし, 前述のサファイア隔膜真空計は133.32 Paレンジ, 1333.2 Paレンジ等といった測定レンジを持つため, 重錘形圧力天びんのみではその圧力範囲をカバーすることができない。そこで, これらの真空領域に対応し, かつ高精度な標準として, 膨張法という方式による真空発生装置 (図3) を製作し, 真空標準として導入することにした。

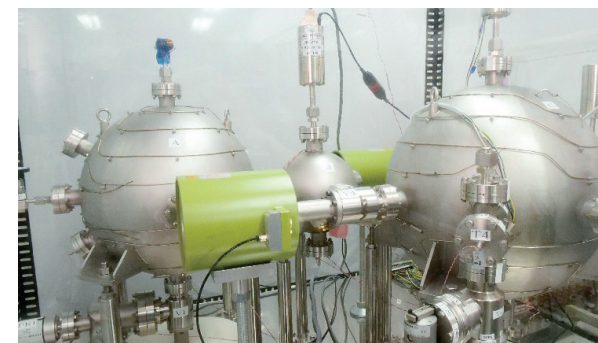


図3 膨張法装置の外観

膨張法とは, 以下のようにして所定の真空度を発生させる方式である (図4-1～5)。

- (1) 2個のチャンバA, B (それぞれの容積を V_A, V_B とする) がバルブを介して接続されており, それぞれのチャンバは真空引きの配管を持っている。いずれかのチャンバに校正対象の真空計および初期圧力測定用の絶対圧計が取り付けられている。この絶対圧計は重錘形圧力天びんで校正されている。

- (2) まず両チャンバ間のバルブが開いた状態でチャンバ内に数十 kPa程度の圧力のガスを入れ, チャンバ内初期圧力 P_0 を測定する (図4-1)。

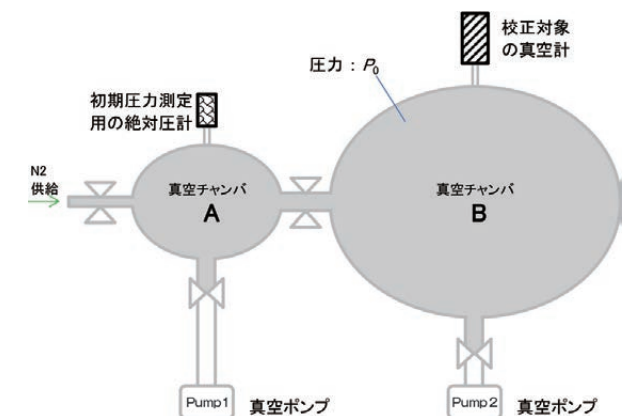


図4-1 膨張法の原理:文中の(2)の状態(単純化した模式図による)

- (3) チャンバ間のバルブを閉める (図4-2)。

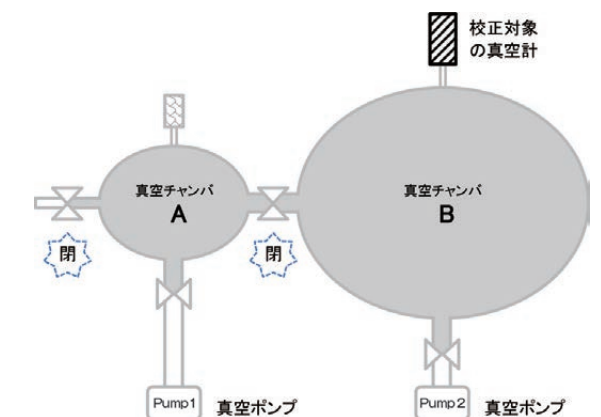


図4-2 膨張法の原理:文中の(3)の状態

- (4) 片方のチャンバ (チャンバBとする) のみ真空引きする (図4-3)。

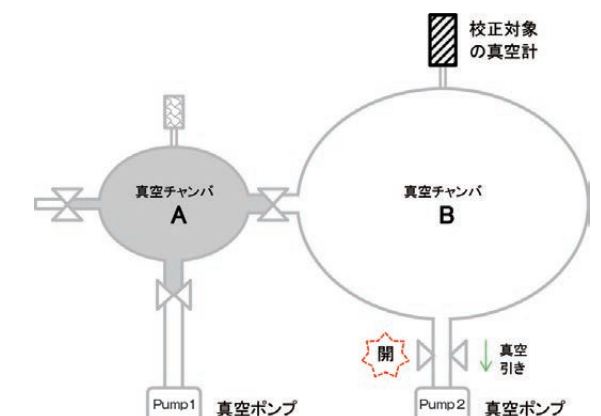


図4-3 膨張法の原理:文中の(4)の状態

(5) 終了後封止する(図4-4)。

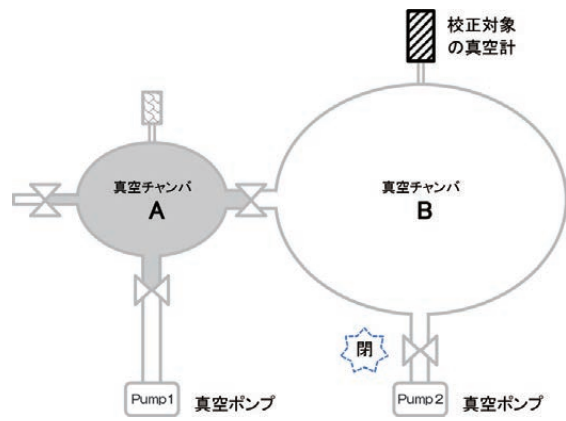


図4-4 膨張法の原理:文中の(5)の状態

(6) 再びチャンバ間のバルブを開くと、片方のチャンバ(A)内のみにあったガスは真空引きした方のチャンバ(B)内に膨張し、両チャンバ内に均等に同じ圧力のガスが広がった状態になる。その圧力 P_1 はボイルの法則より

$$P_1 = P_0 \frac{V_A}{V_A + V_B} \quad \text{式(1)}$$

となる(図4-5)。

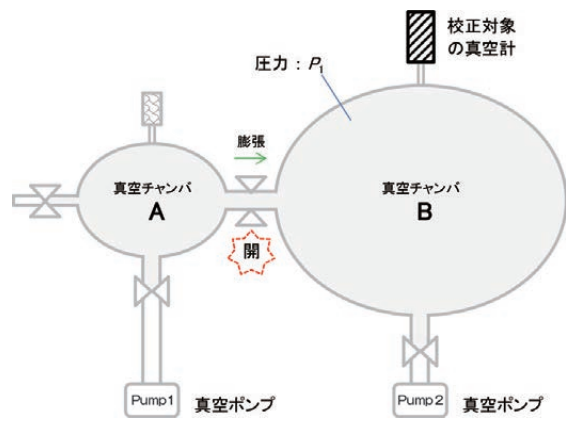


図4-5 膨張法の原理:文中の(6)の状態

(7) この状態から再度上述の(3)～(6)の操作を繰り返すと、終了後の圧力 P_2 は

$$P_2 = P_1 \frac{V_A}{V_A + V_B} = P_0 \left(\frac{V_A}{V_A + V_B} \right)^2 \quad \text{式(2)}$$

となり、同様に n 回繰り返すと、終了後の圧力 P_n は

$$P_n = P_0 \left(\frac{V_A}{V_A + V_B} \right)^n \quad \text{式(3)}$$

となる。ここで、

$$\alpha = \frac{V_A}{V_A + V_B} \quad \text{式(4)}$$

を膨張比と呼ぶことにする。

(8) 上記のような繰り返しを、チャンバ内が目標の圧力に達するまで行う。

例えば、膨張比 $\alpha = 0.1$ であったとして、チャンバ内を30 Paにしたい場合、初期圧力 P_0 を30 kPa、膨張回数 n を3とすれば、式(3)、(4)から

$$P_n = P_0 \alpha^n = 30000 \times 0.1^3 = 30$$

となる。

その状態で校正対象の真空計の出力値を計測し、 P_n と比較する。

(1)～(8)において、膨張比 α の正確な値が必要となる。上記の膨張比 α の式(4)には、各チャンバの容積 V_A, V_B が含まれているが、それらの値を十分に正確に得ることは困難である。そこで、真空計の校正を行う前に以下のように膨張比 α を導出する。すなわち、(1)～(8)と同様に膨張を行い、膨張前の圧力 P_0 および膨張後の圧力 P_1 から、

$$\alpha = \frac{V_A}{V_A + V_B} = \frac{P_1}{P_0} \quad \text{式(5)}$$

から膨張比 α を求める。ただし、膨張前の圧力 P_0 および膨張後の圧力 P_1 とも初期圧力測定用の絶対圧計の校正範囲になるように行う。

なお、導入した実際の装置(図3)は、複数の膨張比を実現させる等の目的で3つのチャンバを持つ構造になっているが、原理としてはここに記したとおりである。

3. 膨張法の誤差要因とその低減

前記のような動作原理の膨張法であるが、初期圧力についても膨張比についても様々な誤差となりうる要因があり、それらによる影響を十分に低減させる必要がある。考えられる主な要因として以下のようなものがある。

- ・初期圧力測定用の絶対圧計の性能
- ・チャンバ内のガス(実在気体)と状態方程式(理想気体)との乖離
- ・真空引き時のチャンバ内到達真空度
- ・リーク・脱ガス
- ・チャンバ内温度の時間的変化・空間的分布

真空標準構築に着手した当初は国内において産総研以外では膨張法による校正装置を保有していなかった状況で、試行錯誤をしながらこれらの評価・改善を行った。以下に改善の概要について述べる。

3.1 初期圧力測定用の絶対圧計の性能

初期圧力測定用の絶対圧計の性能は、初期圧力についてももちろん膨張比の導出にも影響を及ぼす。なぜなら、もしも絶対圧計の直線性が悪ければ、この絶対圧計を用いて膨張比を求める際に、測定する圧力によって膨張比が変わってくるし、経年変化についても同様である。従って、経年変化が少なく、広い範囲で高精度に計測でき、直線性のよい絶対圧計が必要である。

そこで、この初期圧力測定用の絶対圧計として、直線性

がよく経年変化の小さい物の選定を行った結果、アズビル製サファイア隔膜真空計の100 kPaレンジを用いることとした。初期圧力を変えて膨張を行う実験を継続的に行うことにより、膨張比の圧力依存性、得られる膨張比の経年変化が十分小さいことを確認した。

3.2 実在気体と理想気体との乖離

2章でチャンバ内圧力をボイルの法則に基づいて求めるとしたが、これはチャンバ内のガスが理想気体であるという仮定の下で成り立つものである。しかし、実際の気体は圧力値が十分に小さい領域では理想気体の状態方程式によく従う挙動を示すが、圧力値が上がるほどその挙動が理想気体から離れていき、例えば10 kPa程度以上になるとその差異は無視できないものとなっていく。そこで、膨張比を求めたり膨張後の圧力を求めたりする際、初期圧力測定用の絶対圧計の測定値をそのまま用いるのではなく、以下のような補正を行うことで理想気体と実在気体の乖離による影響を低減させる。

まず、絶対圧計で計測されたチャンバ内圧力から、実在気体を表現する状態方程式の1つであるファンデルワールスの状態方程式

$$\left(P_r + \frac{a}{\left(\frac{V}{n} \right)^2} \right) \left(\frac{V}{n} - b \right) = RT \quad \text{式(6)}$$

P_r : 計測された圧力値 V : 体積
 n : 物質質量 R : 気体定数
 T : 温度 a, b : ファンデルワールス定数

を用いてモル体積 V/n を求める。

次に、得られたモル体積 V/n を理想気体の状態方程式

$$PV = nRT \quad \text{式(7)}$$

に当てはめ、理想気体(すなわちボイルの法則が適用できる)と仮定した場合のチャンバ内圧力 P を計算して用いる。

3.3 真空引きの到達真空度

2章で説明した工程の中で真空引きを行っているが、その結果としてチャンバ内の絶対圧は0 Paに到達するわけではなく(それは実現不可能である)、実際には 10^{-6} Paオーダー程度のガスは残るため、その分を考慮して計算を行う必要がある。

3.4 リーク・脱ガスの影響

チャンバにリーク(漏れ)があると、チャンバ真空封止時にチャンバ内に外気が流入し、測定誤差要因となる。また、同じくチャンバ真空封止時にチャンバ内壁に吸着していたガス分子が脱離(脱ガス)すると、同様にチャンバ内圧が上昇し、測定誤差要因となる。そのため、本装置を製作する際に、脱ガスが小さくなるようチャンバ内壁表面は鏡面加工した。また、リークができるだけ起こらないよう配管継手部(ガスケットシール部)の締付は注意しているが、実現したい圧力値が小さいところではごくわずかなリークの影響が無視できない場合がある。そのような場合は、膨張後の圧力を一定時間

連続で測定してチャンバ内圧力上昇速度を求め、その影響分を差し引く。

3.5 温度の影響

チャンバ内温度の時間的変化は測定結果に影響を及ぼす。2章で説明した膨張の各工程において温度が変化していれば、ボイルの法則のみならずシャルルの法則も考慮して圧力を求める必要がある。すなわち、膨張前の温度を T_0 、膨張後を T_1 とすると、

$$P_1 = P_0 \frac{V_A}{V_A + V_B} \cdot \frac{T_1}{T_0} \quad \text{式(8)}$$

また、チャンバ内温度の空間的分布の影響に関しては、膨張法装置全体の内チャンバ部(真空ポンプ以外の部分)を風防でおおい、その中でサーキュレータを回すことで温度の均一化を図っている(なお、膨張法装置の置かれている部屋は一定の温湿度で空調制御されている)。それにより、各チャンバ間の温度差は0.05℃のレベルに保たれている。さらに、その温度差分の補正も行っている。

4. 校正体制の整備

膨張法は非常に小さい不確かさでの圧力発生・計測ができる一方、測定時間がかかる等の難点もある。そこで、膨張法で校正されたサファイア隔膜真空計を標準器として、これと校正対象の真空計を1つのチャンバに取り付け、目標の圧力を印加し、両者の値を比較することで校正を行う比較校正装置(図5)を製作した。比較校正装置で用いる標準器は膨張法装置にて定期的に校正する。比較校正装置での校正の不確かさは膨張法よりも大きくなる一方、測定時間は短くできる。目標とする不確かさに応じて両者を使い分けることにより、効率的に校正が行える体制が構築できた。

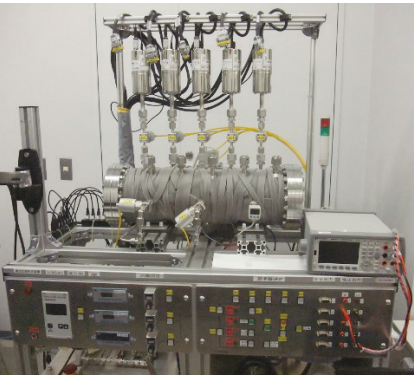


図5 比較校正装置の外観

5. 国家標準とのトレーサビリティの確保

以上により、重錘形圧力天びんを標準として校正した初期圧力測定用の絶対圧計を用いて、膨張法装置の膨張比 α を求め、真空計の校正を行う社内真空標準を構築した。重錘形圧力天びんは産総研に特定二次標準器^{注3}として定期的に校正依頼しており、供給される圧力値の最小値は10 kPa程度である。ここからスタートして、膨張法装置での膨張を繰り返し、100 Paや10 Paといった圧力を校正するため、そ

の測定能力の妥当性を客観的にも評価する必要がある。
そこで、同じ真空計（133.32 Paレンジ隔膜真空計を用いた）を当グループの真空標準と産総研の持つ国家標準とで測定し、両者の校正結果を比較する（技能試験^{注4}）ことで、当グループの真空標準が十分な測定能力を有していることを評価することにした。

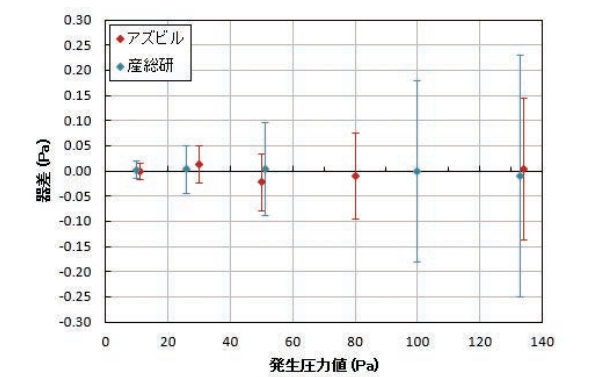


図6 同じ隔膜真空計を当グループと産総研で計測した器差

表1 上記比較試験の E_n 数

校正値 [Pa]	E_n 数
11	-0.16
30	0.15
50	-0.25
133	0.05

図6にその結果を示す。グラフ中のエラーバーは当グループ、産総研それぞれの校正結果の拡張不確かさである。互いのエラーバーの重なり度合いで両者の測定値の一致性が判断できるが、このグラフにおいてはよく一致しているといえる。また、本結果における E_n 数^{注5}を計算すると表1のとおりとなった。この表を見て分かるとおり、両者の差は十分小さいことを確認できた。なお、比較校正装置での校正についても上記と同じ真空計を用いて同様の産総研との比較を行い、やはり E_n 数の絶対値が1.0以下であることを確認した。

以上の結果をもって10 Pa～133.32 kPaの圧力範囲においてJCSS登録申請を行い、審査の結果JCSS校正事業者として登録された。2021年現在で登録されている校正測定能力（Calibration and Measurement Capability:CMC）を表2に示す。

表2 当グループの真空計の校正測定能力(CMC)

校正範囲				拡張不確かさ (信頼の水準約95%) P : 測定圧力[Pa]
10 Pa	以上	40 Pa	以下	$0.20 P \times 10^{-2}$
40 Pa	超	133.32 Pa	以下	$0.12 P \times 10^{-2} + 0.010 \text{ Pa}$
133.32 Pa	超	1333.2 Pa	以下	$0.085 P \times 10^{-2} + 0.15 \text{ Pa}$
1333.2 Pa	超	13332 Pa	以下	$0.060 P \times 10^{-2} + 1.5 \text{ Pa}$
13332 Pa	超	133320 Pa	以下	$0.010 P \times 10^{-2} + 10 \text{ Pa}$

なお、現在真空領域の特定二次標準器として認められて

注6 粘性真空計とも呼ばれる。金属球を宙に浮かせて回転させ、その回転速度の減少度合いから金属球のいる空間の圧力値を求める計測器。

いる計測器は重錘形圧力天びん、およびスピニングロータ真空計^{注6}の2種類のみである。その標準供給の圧力範囲を図7に示す。これを見てわかるとおり、サファイア隔膜真空計の主に使用される圧力範囲の多くの部分においては、特定二次標準器が存在せず、従って産総研による直接の標準供給が受けられない。

そこで、JCSS登録された圧力範囲よりさらに低圧側である0.01～1 Paにおいて、同様に同じ真空計（産総研からの標準供給の手段でもあるスピニングロータ真空計を用いた）を当グループと産総研とで測定し、両者の校正結果を比較することにした。

その結果を図8、表3に示す。これらの見方は図6、表1と同様である。これを見てわかるとおり、特に0.1 Pa、1 Paにおいて、国家標準との差が十分小さいことを確認できた。

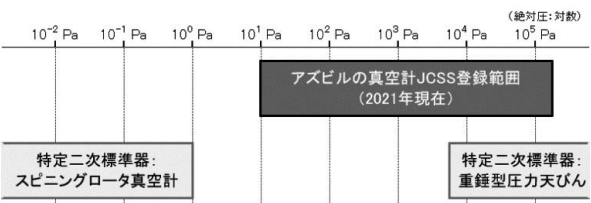


図7 当グループの真空計JCSS登録範囲(上段)と
特定二次標準器として産総研より標準供給された圧力範囲(下段)

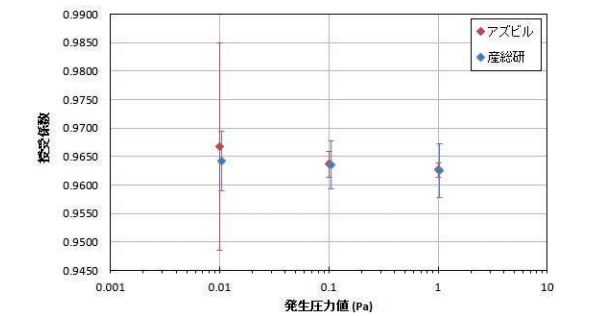


図8 同じスピニングロータ真空計を当グループと産総研で計測した時の授受係数(真空計出力値と発生圧力値の比の値)

表3 上記比較試験の E_n 数

校正値 [Pa]	E_n 数
0.01	0.16
0.1	0.25
1	0.15

重錘形圧力天びんの校正結果として産総研から供給される10 kPaのオーダーの圧力値から始め、膨張法装置を用いて膨張を繰り返し校正したスピニングロータ真空計の0.1 Pa、1 Paの校正結果が、上記のように産総研の校正結果と十分に一致していた。もし、膨張比や補正計算等が少しでも間違っていたら、膨張を繰り返して到達する（スピニングロータ真空計の）真空領域での測定値が産総研の測定値と一致することはない。従って、この一致により、当グループが産総研より直接標準供給されていない範囲を含む、当グループの真空計JCSS登録範囲の測定能力に対して、その妥当性がより確認されたということがいえる。

そして、スピニングロータ真空計は特定二次標準として産

総研に定期校正依頼し、もとより特定二次標準器である重錘形圧力天びんの2台によるトレーサビリティを確保することで、継続的に妥当性の評価を行う体制を構築している。
以上のイメージを図9に示す。

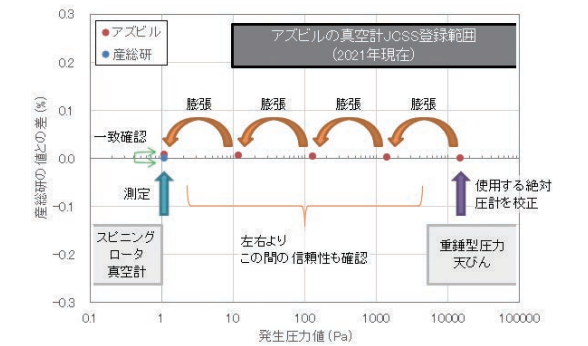


図9 当グループの真空計JCSS登録範囲における、
値の信頼性の確認のイメージ

以上により、10 Pa～133.32 kPaの圧力範囲においてサファイア隔膜真空計製品のトレーサビリティを確保できるようになった。

6. おわりに

アズビルで製造・販売しているサファイア隔膜真空計 形SPGの特性評価、信頼性、トレーサビリティ確保のため、真空標準として膨張法という方式による真空発生装置を導入した。測定の不確かさとなる要因を調査し、その影響の低減を行った。その上で同じ真空計を用いた産総研との値の比較を行い、我々が十分な測定能力を持っていることを確認した。比較校正ができる装置も導入して校正の体制を整備し、真空計という区分（計量器等の区分）でJCSS登録することができ、サファイア隔膜真空計 形SPGのトレーサビリティや信頼性の確保につながった。

今後についてであるが、現状では、真空計という区分（計量器等の区分）でJCSS登録している範囲は、表2のとおり10 Pa以上133.32 kPa以下である。この範囲は、133.32 Paレンジから133.32 kPaレンジまでの隔膜真空計が使用される圧力範囲をおおむねカバーしているものと考えている。しかし、半導体の分野を中心に今後も高真空の要求は高まることが予想される。このような市場の要求に合わせ、我々もより高真空の範囲まで対応できるようにJCSS登録範囲を拡大していく予定である。

<参考文献>

- (1) 関根、石原、差波、谷:サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発, Azbil Technical Review (2011)
- (2) 吉川、原田、市原、長田、山口:サファイア高温隔膜真空計の開発, Azbil Technical Review (2011)
- (3) 石原、添田、関根、栃木:13Paレンジサファイア隔膜真空計の開発, Azbil Technical Review (2018)

<著者所属>

片岡 俊之 アズビル株式会社
技術標準部計測標準グループ

安定した湿度校正を実現する低露点発生装置の開発

Development of a humidity generator for reliable low dew point calibration

中垣内 直美
Naomi Nakagaichi

キーワード
露点, 湿度計測, 発生装置, 低湿度, 校正

アズビルでは計量法校正事業者登録制度(JCSS:Japan Calibration Service System)が確立される以前から、常温常湿付近の湿度に関する計測設備を構築しトレーサビリティを確保してきた。湿度製品の仕様範囲拡大に伴い、低湿度(常温での相対湿度が概ね10 %以下)の領域についても設備を導入しトレーサビリティ確保を続けてきた。しかし最初に導入した低露点発生装置は偏りやばらつきなどが目標の性能に達せず高精度な測定が行えなかったため、より精度良い校正を効率良く行うことを目的に新たな装置の検討をすすめ、偏りとばらつきの少ない低露点発生装置を開発した。

Even before the Japan Calibration Service System was established, Azbil had constructed humidity measurement equipment for conditions near normal room temperature and humidity and was able to ensure traceability. When the specification range of our humidity products was expanded, we also introduced measurement equipment for low humidity (about 10% or lower relative humidity at room temperature) and ensured traceability. However, our first humidity generator, which was purchased, did not achieve its target performance, preventing high-precision calibration. Consequently, we developed a new generator for accurate and efficient calibration.

1. はじめに

アズビルでは1980年代よりビル空調の湿度計測用に相対湿度計などの湿度関連製品を製造販売してきたが、時代とともに建物市場だけでなく工業市場でも湿度計測の要求が高まり、より高い精度を求められるようになった。

一方1993年に計量法が改定されJCSSがスタートしたが、湿度分野のJCSS確立は比較的遅く第1号の校正事業者が登録されたのは2001年である。アズビルでは1980年代より計量研究所(現在の産業技術総合研究所)から湿度の標準供給を受け、2004年にはJCSS校正事業者としても登録され、湿度関連製品のトレーサビリティ^{注1}と精度の確保を行っている。

湿度のJCSSが確立した当初、産業技術総合研究所(以下、産総研)により標準供給される範囲は常温常湿範囲であったが、その後徐々に広がり産業界のニーズに対応している。アズビルでも製品仕様範囲の拡大に伴い、低湿度や高湿度の領域を校正できる設備も構築し、幅広くトレーサビリティ確保と製品精度維持に対応している。

3章で述べるように、精度良くまた効率良く校正するため

注1, 注2 詳しくは本誌p.3「正しく測るための社内基盤整備」をご覧ください。

には試料空気の変りとはつきが小さいことが必要である。本稿ではJCSS校正事業者であるアズビル技術標準部計測標準グループ(以下、当グループ)が保有するいくつかの設備の中から、特に偏りやばらつきが小さく安定した試料空気を作るのが難しい低湿度領域の校正設備(低露点発生装置)について、その原理や試料空気を安定させるための施策と開発した設備の性能について述べる。

2. 湿度・露点の計測および校正方法

低露点発生装置の説明の前に、一般的な湿度と露点の計測方法と、湿度計測に露点を用いる理由、および当グループにおける露点計校正方法について説明する。

2.1 湿度・露点の計測方法

「湿度」とは空気中に含まれる水蒸気量を表す言葉であるがその表現方法はJIS Z 8806:2001⁽¹⁾にも記載されており、混合比(kg/kg)やモル分率(mol/mol)、絶対湿度(kg/m³)、相対湿度(%), 露点(℃), 飽和水蒸気圧(Pa)など様々である。その中で相対湿度は、対象となる空気内に存在できる水蒸気量の最大値(飽和水蒸気量)と実際に存在している水蒸気量の割合を百分率で表したもので、単に「湿度」

と呼ばれることも多く最も日常的に使われている。

一般的に相対湿度は物質が湿気を帯び、その割合によって何らかの物理量が変化し、それを検知することで計測される。かつては毛髪が湿気によって伸び縮みすることで湿度の測定をしていたことはよく知られている。現代では物質の抵抗値や容量値など電気的な特性の変化を利用する相対湿度計により、精度良い計測が可能になった。

一方、空気の温度と露点から相対湿度を求める方法がある。露点とは、空気中の水蒸気が空気の冷却により飽和し、凝結して水になる(結露)温度である。図1に示すように飽和水蒸気量は温度と1対1の関係にあるため、空気の温度と露点を測定することで、その空気の飽和水蒸気量と実際に含まれる水蒸気量を知ることができ、両者の比率から相対湿度を求めることができる。この方法は相対湿度計を用いた湿度計測に比べ、応答性の遅さや操作性の複雑さはあるものの、より高精度に測ることができる。

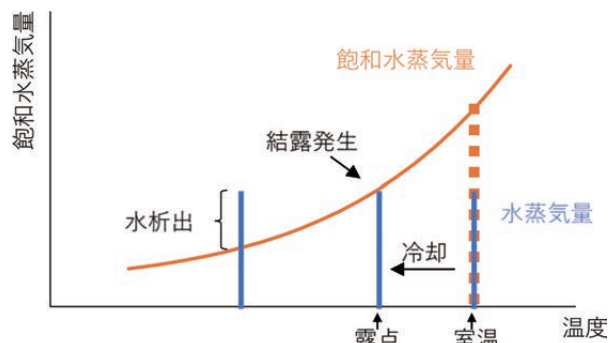


図1 温度と飽和水蒸気量、露点の関係

露点を測定する計測器のうち最も高精度なものに光学式鏡面冷却露点計がある。一般的にこの露点計は内部に小さな鏡があり、鏡を冷却することで取り込んだ試料空気を鏡面に結露させ、その状態を光学的に検知して、この時の温度を露点として測るものである。露点を小数点以下2桁で測ることができ、これにより相対湿度を0.1 %の桁で正しく測ることができる。

このように相対湿度を高精度で再現性良く測定する場合や、相対湿度計を校正する場合には露点を用いることが欠かせない。アズビルでは開発や生産での高精度な測定には露点計を用いており、これらの露点計を精度よく校正することが必要となっている。

2.2 露点計の校正方法

当グループでは露点計の校正を図2のように、標準となる露点計(以下、標準器)と校正対象となる露点計に任意の露点の試料空気を並列に導入し、それぞれの露点計の指示値を比較することで行っている。

試料空気の流路となる配管等の表面は、可能な限り乾燥させた状態で校正に臨む必要がある。もし配管表面に吸着していた水蒸気が校正中に脱気してしまうと、試料空気中の水蒸気量が増えてしまい露点に影響するからである。そのため、配管には吸着しにくい素材の物を使い、事前に十分な時間乾燥空気を流して、水蒸気量が少ない露点から多い露点に移行し校正している。また、露点計への試料空気導

入のための流量制御器やポンプを露点計より下流に配置することでできるだけ脱気が影響を及ぼす箇所を減らしている。

校正では生成する試料空気ができるだけ目標とする露点で安定していることが重要である。次章よりこれを実現するための低露点発生装置の開発について述べる。

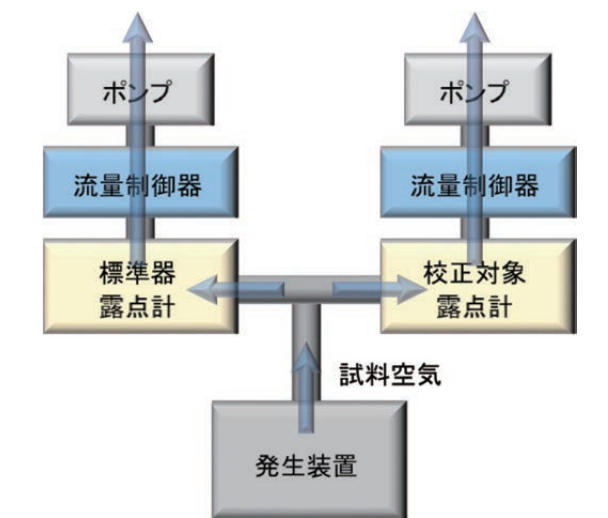


図2 校正方法イメージ

3. 低露点発生装置の開発

3.1 発生装置の重要性

当グループでは高精度な校正を行うため、試料空気の露点の偏りが ± 0.1 ℃の範囲内でかつ校正中のばらつきが ± 0.02 ℃の範囲で安定していることを目標としている。

例えば発生装置で生成される試料空気の露点が校正したい露点から大きく離れると、その露点で校正したとは言い難い。また特に低露点は、空気中に含まれる水蒸気量が少ないため、露点計の試料空気を導入される部分の表面積や鏡の大きさ、鏡面を冷却する能力や制御性などにより応答性に大きな違いが出やすい。そのため発生装置が生成する試料空気は、設定した露点で長時間安定している必要がある。

2.1節の図1からわかるように、温度が低いほど水蒸気量の傾きが緩やかになっている。すなわち試料空気の露点の偏りとばらつきを目標の範囲内に入れるためには、露点が高いほど水蒸気量を精密にコントロールする必要がある。発生装置の性能が低いことで水蒸気量のわずかな変化を再現性良くコントロールできない場合、試料空気の露点の偏りを目標の範囲内に入れるために繰り返し微調整が必要になる。また試料空気のばらつきが小さく安定したタイミングを選んで校正しなくてはならず、多大な時間を要することになる。

このように、精度の良い校正を効率よく行うためには発生装置の性能が重要となる。

3.2 湿度の発生装置原理

目標とする水蒸気量を含む空気を安定して精密に生成する装置としては、JIS B 7920:2000⁽²⁾にあるように、二温度法、二圧力法、二温度二圧力法、分流法などがある。

今回開発した装置では、水蒸気量が少ない試料空気を

作るのに比較的適している分流法を採用した。

分流法による発生装置とは、相対湿度0 %の空気（以下、乾燥空気）と100 %の空気（以下、飽和空気）を混合して目標の水蒸気量を含む空気を生成する装置である。混合する比率を変えることにより含まれる水蒸気量を任意に決めることができる。

乾燥空気は一般的に、乾燥窒素ガスを利用するか、圧縮空気を乾燥器に通し乾燥させて生成する。飽和空気は、乾燥させた空気を水中に通すことで水蒸気を与え飽和させて生成する。

分流法を用いて実現する装置のイメージを図3に示す。飽和空気を生成するための水を入れた槽は飽和槽と呼ばれ、この槽を通った飽和空気と槽を通らない乾燥空気とを、最終的に混合させて試験槽に試料空気を生成している。

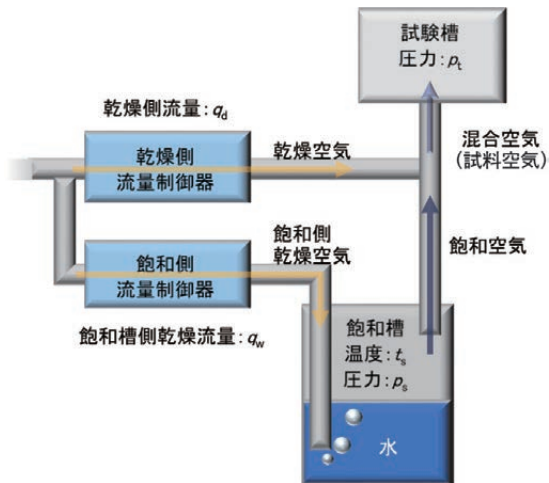


図3 分流法による湿度の発生装置イメージ

分流法による発生装置が生成する試料空気の水蒸気量は以下の式により求めることができる。

$$d = e_s(t_d) = \frac{M_v}{RT} \quad \cdots \text{式(1)}$$

$$e_s(t_d) = \frac{p_t \gamma e_s(t_s)}{p_s - (1 - \gamma) e_s(t_s)} \quad \cdots \text{式(2)}$$

$$\gamma = \frac{q_w}{q_w + q_d} \quad \cdots \text{式(3)}$$

- d : 水蒸気量 (g/m^3)
- $e_s(t)$: 温度 t における飽和水蒸気圧 (Pa)
- t_d : 露点 ($^{\circ}\text{C}$)
- M_v : 水のモル質量 (g/mol)
- R : 気体定数 ($\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$)
- T : 温度 (K)
- t_s : 飽和槽温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- p_t : 試験槽内の圧力 (Pa)
- p_s : 飽和槽内の圧力 (Pa)
- γ : 飽和槽に流入する乾燥空気の流量と乾燥空気の全流量との比
- q_w : 飽和槽に流入する乾燥空気の流量
- q_d : 飽和槽を通らない乾燥空気の流量

式 (1)(2) からわかるように試料空気の水蒸気量は、飽和側乾燥流量と乾燥空気全流量との流量比（以下、飽和側流量比）、飽和槽の温度と圧力、試験槽の圧力に依存する。そのほかにも乾燥空気の乾燥の程度、飽和空気の飽和の程度も試料空気の水蒸気量に影響する重要な要素である。

3.3 初期導入装置の性能

低露点用の露点計を校正するため、最初に導入した市販の装置も分流法による発生装置であった。この装置は、飽和槽に温度制御機能がなく、使われている流量制御器の制御性・再現性が当グループが目指す精度を満たしていなかった。この装置での実施例として露点 -50°C の測定結果を図4に示す。安定までに時間がかかり、安定後も目標値から 0.2°C 以上高い露点である。このように、低露点では市販されている発生装置でも安定した試料空気の生成が難しいことがわかる。

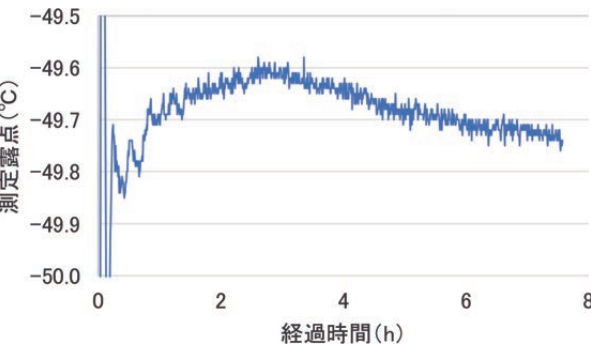


図4 初期導入装置の試料空気露点

3.4 開発した低露点発生装置

試料空気の偏りとばらつきの目標を再現性良く達成させるため、分流法により新たに低露点発生装置の開発に取り組んだ。開発した装置の概要を図5に示す。

目標達成のための重要要素である乾燥空気の管理、流量の制御性向上、飽和空気の生成について説明する。

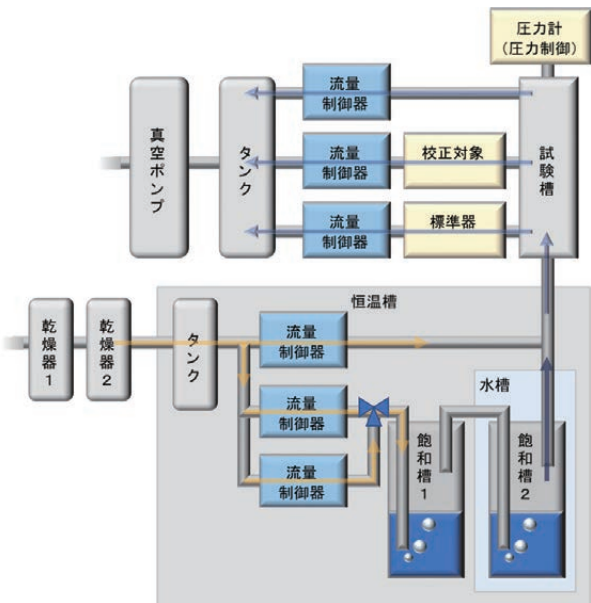


図5 低露点発生装置概要図

3.4.1 乾燥空気の管理

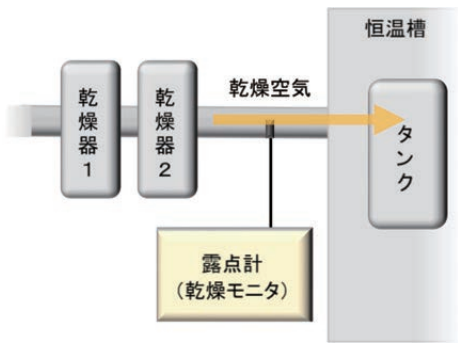


図6 乾燥空気の生成

低露点の試料空気生成にあたり、その第一段階として最上流にある空気は高い乾燥状態が必要となる。そのためこの乾燥空気の生成は図6に示すように2段階で行い、乾燥空気の水蒸気量を相対湿度0.001 %以下に抑えている。しかしこの乾燥工程が不十分な場合、最終的に生成する試料空気の露点は目標より高く偏ることになる。乾燥器内の乾燥剤は通過する空気的水分を徐々に吸着し、いずれ湿気ってしまう。その結果仮に乾燥空気の相対湿度が0.01 %まで増えると、目標とする露点が -50°C の場合、 0.5°C ほど高い露点の試料空気になってしまう。これを防ぐため、生成した乾燥空気の露点を乾燥モニタ用露点計で監視し、十分な乾燥が認められない場合は乾燥剤を再生させ、乾燥空気を管理している。

3.4.2 流量の制御性向上

3.2節で述べたように、分流法による発生装置の基本的な原理は、飽和空気と乾燥空気の混合比率であるため、それぞれの流量制御器の再現性やばらつきの程度が重要になる。そこで開発した低露点用発生装置ではアズビルのデジタル式の気体質量流量コントローラ（形 MQV□□□）を採用した。

開発した装置で生成する試料空気の露点範囲は -50°C から -10°C で、この範囲の飽和側流量比は0.00682から0.495である。この流量比を乾燥側流量制御器1台と飽和側流量制御器1台の計2台で精度よく実現するのは難しい。そこで、飽和側でレンジの違う流量制御器複数台を目標露点に合わせて切り替えることで目標露点との偏りを小さくしている。

また自社製品を使うことにより、電磁バルブ開閉の発熱の影響や、使用するレンジなどについて、低露点発生装置の仕様に合うよう変更や改造を行い、流量制御のばらつきを抑え再現性を向上させた。

その結果、再現性が良くばらつきの小さい飽和側流量比を得ることができた。

3.4.3 飽和空気の生成

生成した乾燥空気を均一で過不足なく飽和させるため、飽和槽に対して次の施策を行った。

- (1) 飽和槽で生成する空気の飽和不足への対策
- 飽和槽内の水量に対して流れる空気量が多い場合、飽和槽で生成する空気が目標温度の飽和状態に達しない（飽和

不足）場合がある。水中を通る気泡が大きく水を通る時間が短い場合には気泡内が飽和に達する前に水中から出て流れてしまうからである。また蒸発熱による飽和槽内の水温低下によっても飽和不足がおこる。これは、乾燥空気が飽和槽を通る時、飽和槽内の水が乾燥空気に水分を奪われ、その蒸発熱によって飽和槽内の水温と通過する空気の温度が低下することで、目標温度の飽和状態に達しないためである。

これらの飽和不足を解消するため、図7に示すように飽和槽を2段設けることで、水を通る時間を増やしている。そして、1段目の飽和槽温度とそこに流入する空気温度を目標より高い温度で制御することで蒸発熱による水温低下を補っている。さらに、2段目の飽和槽を水槽に入れ、この水温を目標温度（図7では 23°C ）に精密に制御することで、2段目飽和槽に流れてきた空気の水蒸気量が目標より多い場合でも、2段目飽和槽内の水中で凝結させ取り除くことができ、安定した過不足ない飽和空気を生成している。

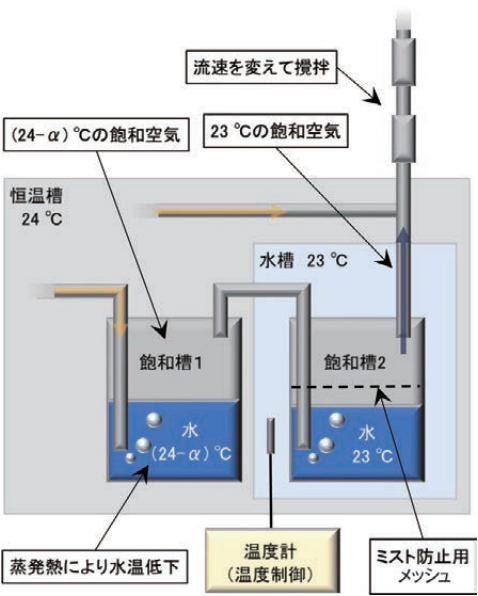


図7 飽和槽周辺

- (2) 飽和槽内壁面の水滴付着による影響への対策
- 開発当初、飽和側流量が特定の範囲の際に露点が不安定になる現象が起きており、検討の結果、2段目飽和槽内の水面より上の壁面への水滴のつき方が影響していることがわかった。
- 飽和槽内の水を通過する空気は気泡となって水中を上に移動し、水面から飛び出す際に割れて水滴が弾け飛ぶ。飽和側流量が少ない時には弾け飛ぶ水滴は少なく、飽和槽内壁面は乾いた状態であるが、飽和側流量が増えるにつれ壁面に付着する水滴が増えていく。装置の開発当初は2段目飽和槽の水温のみを制御していたため飽和槽内の水と水面より上の空気に温度差が生じ、壁面に弾け飛んだ水滴が蒸発することで全体の水蒸気量が増え露点に影響していた。(1)の対応で実施した2段目の飽和槽を水槽内に入れることでこの温度差を解消し生成する試料空気の露点を安定させることができた。
- また気泡が弾ける際に発生するミストが、乾燥空気との

合流部より先まで流れていき、そこで水蒸気になるのを防ぐため、水面上部にメッシュ状の板を設置してミストが届かないようにしている。

2段目の飽和槽を設置した水槽の温度安定性を図8に示す。精密に制御することで ± 0.001 ℃の安定性を実現している。

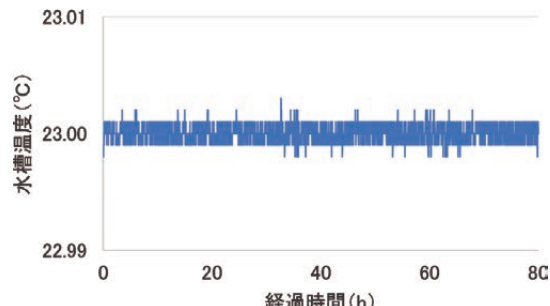


図8 水槽温度の安定性

(3) 水蒸気の均一な混合

飽和側流量が少ない場合、配管から飽和槽の水の中に出てくる空気は水压に負けて不連続になる。2段目の飽和槽の水面上に出てくる気泡が不連続になることにより、乾燥空気と合流する飽和空気量が変動し試料空気の水蒸気に濃淡ができる。これを解消するため流路の配管太さに変化をつけた。水蒸気が濃い箇所どうしの距離は、細い配管内では離れているが、配管が太くなることで流速が遅くなり近くなる。さらに配管が太くなる箇所では空気の渦ができるためこれを利用して攪拌し水蒸気の濃淡の均一化を図った。乾燥空気との攪拌も同時に行えるよう乾燥空気との合流後の経路に対策を実施した。

これらの対応により、生成する飽和空気の偏りとばらつきを小さく抑えることができるようになった。

3.5 低露点発生装置の能力

開発した低露点発生装置で露点-50℃の試料空気を生成し、測定した結果を図9に示す。この図から目標の露点-50℃に対して偏り・ばらつきともに小さいことがわかる。

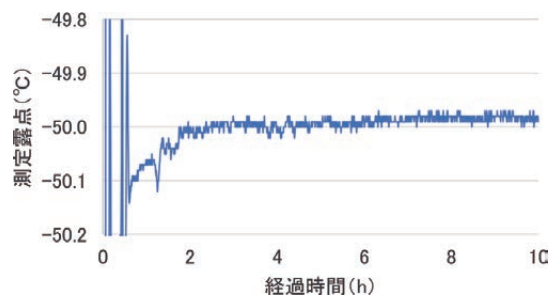


図9 開発装置の発生露点

この装置を用いて参加した2018年度の露点計の技能試験^{注2}の結果を図10に示す。参照機関である産総研の校正結果(参照値)との差はほぼなく、大変良好な結果が得られた。エラーバーは当グループの拡張不確かさである。

2022年1月現在、当グループはこの低露点範囲で最も不確かさの小さいJCSSL校正事業を展開している。

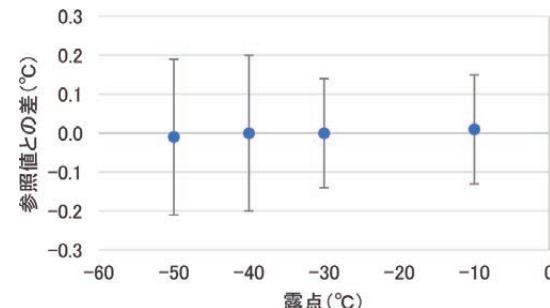


図10 技能試験の結果

4. おわりに

様々な施策により、偏りとばらつきが小さく再現性良い試料空気を発生させる装置を開発することができた。

この背景として、低露点発生装置の性能を決める流量計に自社製品が使えたこと、当グループが流量、温度、圧力のJCSSL校正事業者であり、それぞれの計測の専門家がそろっていること、そして計測制御機器メーカーとしての技術があることが強みとなったと考えている。

図11に示すように、現在当グループの露点のJCSSL登録範囲は-50℃から85℃で、JCSSL校正可能な露点の幅は135℃である。これは湿度の登録事業者12事業者の中で最も幅広い範囲となっている。今回の低露点発生装置の開発経験を活かし、今後は同じく自社開発した高露点発生装置の改良にも取り組み、低露点から高露点までの幅広い範囲で精度よく校正できる体制を整えていきたい。

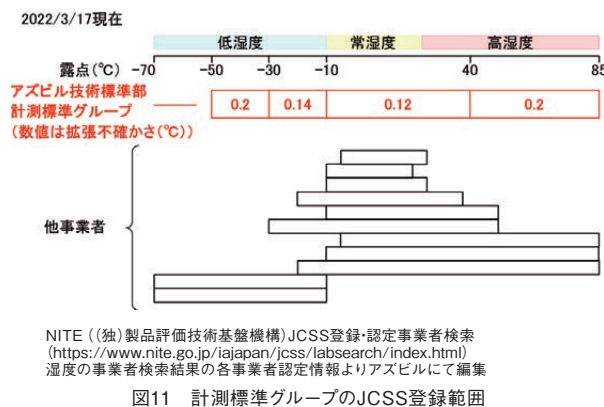


図11 計測標準グループのJCSSL登録範囲

<参考文献>

- (1) JIS Z 8806:2001
- (2) JIS B 7920:2000

<著者所属>

中垣内 直美 アズビル株式会社
技術標準部計測標準グループ

市場要求に応える気体大流量の標準供給体制構築

Establishment of a standard supply system for large gas flow rate to meet the requirements of markets

古屋 宏樹
Kouki Furuya

キーワード

JCSS, ISO/IEC 17025, 校正範囲拡大, トレーサビリティ, 不確かさ, 気体流量計, 音速ノズル, 加圧校正, 気体大流量

世界的に流量計測はエネルギー管理やエネルギー取引において重要視されているが、国内において気体流量のトレーサビリティに対する重要性の認識は、他の物理量と比較して遅れているのが現状である。それは、受け皿となるJCSSL (Japan Calibration Service System) 登録事業者の対応可能な範囲が限られているなども要因の1つであった。azbilグループにおいても大流量への標準供給体制の充実が求められてきた。そのような背景の中、アズビル金門校正サービスセンターは、2003年に気体流量計の区分においてJCSSL登録事業者となって以来、校正可能な範囲を拡大してきた。現在では、国家計量標準で供給できない校正範囲のJCSSL校正を可能にしている。本稿では、その取組みについて紹介する。

Throughout the world, flow measurement is important for energy management and energy trading, but Japan has lagged in recognizing the importance of gas flow traceability as compared with the traceability of other physical quantities. One causal factor, among others, was that the range of services undertaken by the registered service provider, the Japan Calibration Service System (JCSSL), was limited. The azbil Group, too, had a need to enhance the standard supply system for large flow rates. Against this background, the Azbil Kimmon Calibration Service Center has expanded its calibration range capabilities since becoming a JCSSL registered service provider for gas flowmeters in 2003. Currently, it provides JCSSL calibration in a calibration range that cannot be supplied by the National Measurement Standards. This paper describes how that is done.

1. はじめに

1.1 校正サービスセンターの概要

アズビル金門校正サービスセンター(以下、当センター)は、JCSSL登録事業者として気体流量計測に用いる音速ノズルおよび各種気体流量計の校正を行っている。

当センターは、2003年に気体中流量(50 m³/h~1000 m³/h)のJCSSL登録事業者となって以来、その流量域において、実際に現場で使用される圧力条件を想定した加圧状態で実流校正が可能なJCSSL登録事業者として、校正サービスを提供してきた。その後も2007年に6 m³/hまで小流量域に流量範囲を拡大した。2013年には、気体流量において国内初(2013年7月時点、当社調べ)となる現地校正(出張校正)に対応した。2016年には、国家計量標準で供給可能な上限の1000 m³/hを超え、国内最大流量(2016年9月時点、当社調べ)となる4000 m³/hまで、流量範囲の拡大を進めてきた。さらに、2021年12月に校正可能な圧力範囲を0.98 MPaまで拡大し、標準状態(0℃, 1気圧)で約40000 m³/hのJCSSL校

正が可能となった。

また、JCSSL登録事業者である優位性を活用して、azbilグループにおける気体流量計やベンチュリバルブ等の製造現場の検査設備に使用している基準器および標準器を定期的に校正し、トレーサビリティ^{注1}を確保している。

当センターが供給する気体流量のトレーサビリティ体系の概要を図1に示す。JCSSL登録事業者として特定二次標準器^{注2}およびワーキングスタンダード(作業用標準器)^{注3}である音速ノズル(以下、標準ノズル)に加えてワーキングスタンダード流量計(以下、標準流量計)を保有し、校正による切れ目のない連鎖によって一般計測器を国家計量標準に関連づけることでトレーサビリティを確保している。

注1~注4 詳しくは本誌p.3「正しく測るための社内基盤整備」をご覧ください。

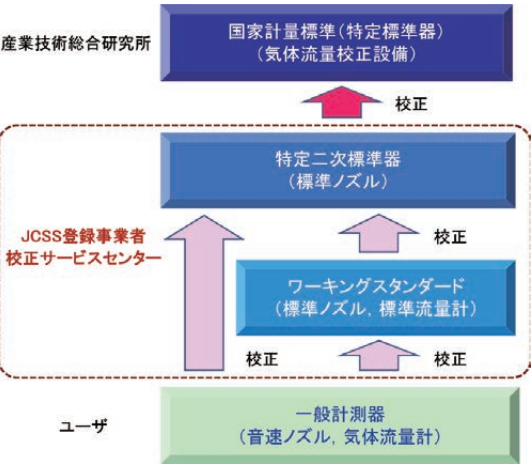


図1 トレーサビリティ体系

1.2 校正サービスセンターの校正設備

流量計を校正する大流量校正室（図2）は、広さが53 m×13 m、総配管長が約130 mの非常に大きな設備である。そのため、校正対象流量計と標準ノズルおよび標準流量計間の配管ボリュームが大きく、配管自体の熱容量が流体温度に影響してしまうため、室温は重要な管理項目として設定温度±0.5℃で制御している。



図2 大流量校正室

気体流量の標準として、標準ノズル12本、標準流量計5台を設備に常設しており、試験条件によって最適な標準器を選択して校正を行うことが可能である。標準ノズルラインの写真を図3に示す。



図3 標準ノズルライン

恒久設備（引取り校正）および現地校正（出張校正）におけるJCSS校正の範囲を表1に示す。

表1 JCSS校正範囲

	圧力範囲 (MPa)	流量範囲 (m³/h)	拡張不確かさ (%)
恒久設備	0.09 ~ 0.98	6 ~ 4000	0.25 ~ 0.54
現地校正	0.09 ~ 0.115	6 ~ 4000	0.29 ~ 0.40

2. 気体流量校正の概要

2.1 気体流量の計測

気体流量の計測には大きく分けて2通りの方法がある。1秒間あたりに流れた体積（体積流量、単位は「m³/s」、1時間あたりの場合は「m³/h」）を計測する方法と、1秒間あたりに流れた質量（質量流量、単位は「kg/s」）を計測する方法である。一般的には、体積流量を計測する流量計が多い。体積流量と質量流量は密度を計測（密度は、温度、圧力、湿度の計測により算出）することで同じ単位（体積流量「m³/s」＝質量流量「kg/s」÷密度「kg/m³」）に揃えることが可能である。計測の際に注意すべき点として、気体は液体に比べて圧縮性が高いため、体積が変わりやすい。このため、膨張収縮による影響を無くするために流量、温度、圧力を安定させる必要があるが、これらはお互いに影響することから、安定状態を作ることが非常に難しい。このため、気体の場合は音速ノズルによる安定した流量を発生させる手法で精密な計測ができる。

2.2 音速ノズルの特徴

気体流量において高精度の校正を行う場合には、音速ノズルを用いて配管内の気体流量を一定に保つ方法が一般的に用いられる。音速ノズルは、図4に示すような絞り構造で、上流側と下流側の差圧が一定以上になれば、スロート部を通る気体の流速は音速となり、それ以上変化しない特性を持っている。温度一定の条件下であれば音速は一意に決まるので、既知であるスロート断面積をかけるだけで体積流量も一意に決まる。この特性により安定した体積流量を発生させることができる。このように音速ノズルを流れる流量は一定流速になるが、実際に流れる流量は、境界層の存在等でスロートの有効断面積が小さくなり、理論的に求められる流量より少なくなる。そのため、音速ノズルの校正とは、理論流量（ Q_{theo} ）と実際に流れる流量（ Q_{meas} ）の違いを補正するための流出係数（ Cd ）を決定（値付け）することである。

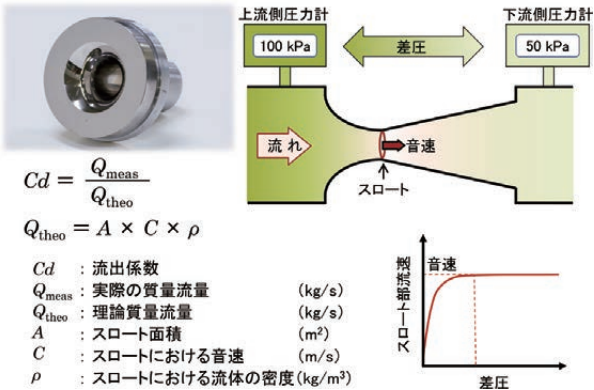


図4 音速ノズルの説明

さらに大流量の場合、音速ノズルを並列配管にすることで、高精度を維持したまま2倍3倍と増やしていくことが可能である。当センターが標準ノズルとして使用している音速ノズルの形状は、JIS Z 8767の「トロイダルスロートベンチュリノズル」に準拠しており、製品評価技術基盤機構（以下、NITE）の技術的要求事項適用指針⁽¹⁾によって最大で1000 m³/hまで増やすことが認められている。

2.3 気体流量の校正方法

気体流量の校正には大きく分けて2通りの方法がある。標準ノズルによって作り出した精密な流量を校正対象流量計で計測する方法（校正方法1）とプロワによって調整した流量を標準流量計と校正対象流量計で比較する方法（校正方法2）である。図5に校正方法1の概略図を示す。この方法では標準ノズルが持つ、温度一定の条件下で配管内の体積流量を一定に保つことができる特性を利用し、高精度で安定した流量を発生することで校正を行う。直列に設置した標準ノズルと校正対象流量計に差圧発生装置となるプロワを用いて標準ノズルの上流側と下流側の差圧を発生させ、標準ノズルの流速を音速にする。その状態で、閉じた配管内（以下、閉ループ）の温度、圧力の安定を待ち、互いの流量値 Q_N と Q_1 を比較する方法である。当センターでは、標準流量計を校正する際に用いる最も精度の高い校正方法である。その校正測定能力は、拡張不確かさ0.25%～0.29%（信頼の水準約95%）である。

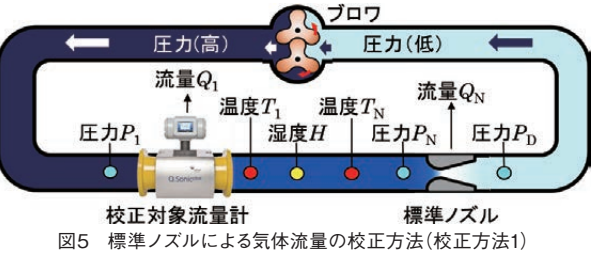


図5 標準ノズルによる気体流量の校正方法（校正方法1）

図6に校正方法2の概略図を示す。直列に設置した標準流量計と校正対象流量計に流量発生装置となるプロワを用いて閉ループに気体の流れを作り、流量、温度、圧力が安定した状態で、互いの流量値 Q_0 と Q_1 を比較する方法である。

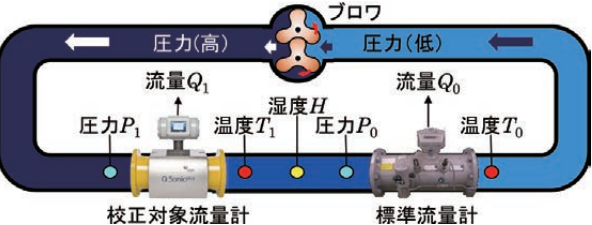


図6 標準流量計による気体流量の校正方法（校正方法2）

体積流量は、流れる気体の温度や圧力に依存するため、校正対象流量計と標準流量計の温度や圧力にわずかな違いがあっても正しく校正することができない。このため、標準流量計の流量を補正して条件を揃える必要がある。

補正後の標準流量計の体積流量を Q
標準流量計の体積流量を Q_0
標準流量計の圧力を P_0
標準流量計の温度を T_0
校正対象流量計の圧力を P_1
校正対象流量計の温度を T_1
としたとき、ボイル・シャルルの法則より、以下の補正式が成り立つ。

$$Q = Q_0 \times \frac{P_0}{T_0} \times \frac{T_1}{P_1}$$
 式(1)

この補正した標準流量計の体積流量 Q と校正対象流量計の体積流量 Q_1 の値を比較することで正確な校正が可能となる。標準流量計を用いる校正方法2は、標準ノズルを用いる校正方法1より不確かさが大きくなってしまいますが、小流量から大流量まで任意に流量を調整することができる。JCSS校正が可能な範囲は、圧力0.09 MPa～0.98 MPa、流量6 m³/h～4000 m³/hで、その校正測定能力は、拡張不確かさ0.29%～0.54%（信頼の水準約95%）である。

3. 気体流量校正範囲の拡大

3.1 1000 m³/hを超える流量範囲の拡大

2016年当時、ビルやプラントの大規模化に伴って大流量が計測できる流量計の校正要望は高まり続けていた。しかし、当時JCSS校正が可能であった最大流量（1000 m³/h）では流量が不足しており、azbilグループのトレーサビリティ維持のためには流量拡大が急務となっていた。一方で校正が長期間停止するような大規模な設備改造もトレーサビリティ維持の観点から難しく、既存の設備を活用して短期間で完了できる改造に留める必要があった。そこで図7に示すような概要で流量拡大を実現した。

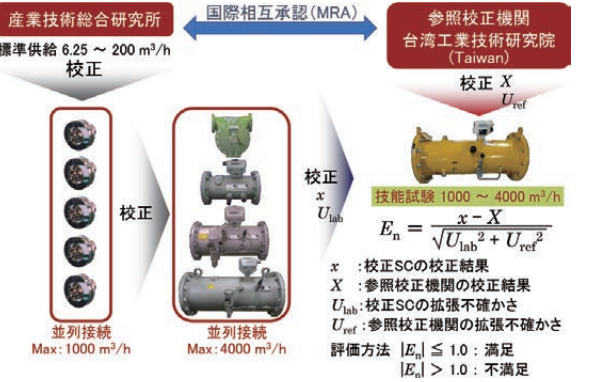


図7 流量拡大の概要

まず、NITEの技術的要求事項適用指針で認められている手法として、200 m³/hの標準ノズルを5本並列に使用し、最大1000 m³/hまで標準流量計を校正する。次に標準流量計を複数台並列に使用し、4000 m³/hまで積み上げる。理想的には同口径の標準流量計を4台準備し、同じ配管形状で並列に使用することで容易に4倍の流量を実現できるが、既存の設備を最大限に有効活用し、既存の標準流量計（80AのCVM300、150AのG650、200AのG1000、300AのG2500）

を組み合わせ、4000 m³/hまで実現した。

1000 m³/hまでは、産業技術総合研究所と技能試験（互いに同じ流量計を校正して校正結果を比較する技術能力確認試験）を実施することで、JCSS登録事業者として技術能力が適正であることを証明できる。しかし、1000 m³/hを超えると国内に技能試験を実施できる校正機関がないことから、海外の国際相互承認された校正機関と技能試験を実施することが求められた。

1000 m³/hの流量から4倍の流量まで拡大したが、その校正結果の妥当性については、自らの評価結果に基づく自己宣言でしかなく、技能試験に合格するかどうかは実施しなければわからない。さらに海外の校正機関に流量計を送り技能試験を実施することは、時間的、費用的に容易ではないため、実施する前に妥当性評価を繰り返した。海外の校正機関との技能試験に用いる流量計は、標準流量計として実績があり、長期安定性と流量特性に優れたタービン流量計を選定し、我々の知見とノウハウを駆使して、1000 m³/hを超える流量域での挙動を慎重に推定した上で考えられる限りの対策を行った。並列使用する標準流量計のばらつきが十分小さくなる最適な通過体積を評価し、全体流量が変更された場合でも各流量計が安定して計測できる流量となるよう分流比を調整し、並列使用する標準流量計の合計流量を安定させた。その結果、広い流量範囲において、再現性のよい校正結果を得ることに成功した(図8)。

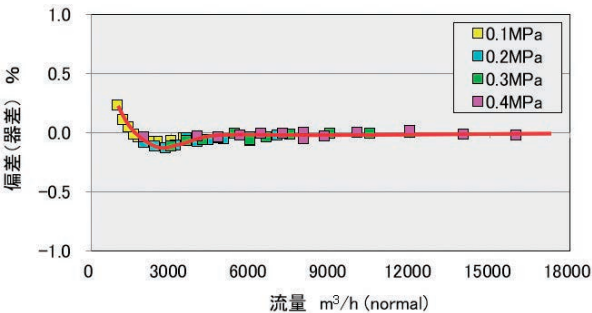


図8 流量範囲拡大の評価結果

この結果を踏まえて、国際相互承認された校正機関である台湾工業技術研究院へ校正した流量計を送り、技能試験を実施した。その結果、合格基準である En 数^{注4}判定が $|En| \leq 1.0$ となり、2016年9月に圧力0.4 MPa、流量4000 m³/hまでJCSS校正が可能となった。これにより、国家計量標準で供給できない標準供給が可能となり、国内で唯一1000 m³/hを超えた校正が可能なJCSS登録事業者となった。

3.2 0.4 MPaを超える圧力範囲の拡大

2019年までにJCSS校正可能な範囲を圧力0.09 MPa～0.4 MPa、流量6 m³/h～4000 m³/hまで拡大してきたが、2020年にJIS M 8010「天然ガス計量方法」が改訂され、従来のオリフィス流量計、容積流量計、渦流量計に加え、新たに超音波流量計が規格に追加され利用可能になった。そのため超音波流量計の校正の必要性が増えることが期待される。しかし、当時JCSS校正が可能であった最大圧力(0.4 MPa)では校正可能な上限圧力が不足しており、より高い圧力に

対応した範囲拡大が急務となっていた。そこで、図9に示すような概要で0.4 MPaを超える圧力範囲拡大を実現した。

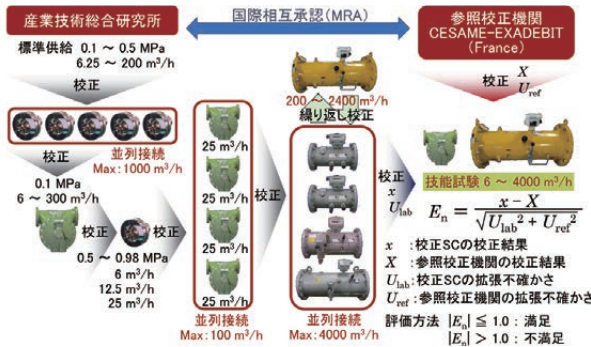


図9 0.4 MPaを超えた流量拡大の概要

既存の設備を最大限に活用して短期間で完了するために、トレーサビリティを確保した標準供給方法が課題となった。当センターが保有している特定二次標準器は、圧力0.1 MPa～0.5 MPaの範囲において、国家計量標準によって校正されている。0.5 MPaを超える圧力条件では、トレーサビリティが確保されていないことから、使用する圧力範囲まで自らが校正を行い、その校正結果が正しいことを技能試験で証明する必要がある。そのため、標準流量計を用いて、校正対象ノズル(特定二次標準器)を圧力0.5 MPa～0.98 MPaの範囲で校正した。その概略図を図10に示す。

2 MPaまで蓄圧した10 m³のサージタンク、圧力調整弁、校正対象ノズル、大気圧でJCSS校正された標準流量計の順に設置し、校正対象ノズルの上流側圧力を任意の圧力(0.5 MPa～0.98 MPa)に制御し、一定流速を発生させる。流した流量は、校正対象ノズルの下流側が大気圧になる過程で気体が膨張し、圧力比の分だけ流量が増える。その流量を標準流量計で測定し、校正対象ノズルを校正する。例えば、図10の例に示している25 m³/hの校正対象ノズルの上流圧力を0.5 MPaに制御した場合、大気圧(0.1 MPa)では5倍の約125 m³/hの流量となる。校正対象ノズルの理論流量と標準流量計から得られた実際に流れる流量の比から流出係数を決定する。流出係数は、流れの状態を表すレイノルズ数の関数であるが、レイノルズ数は流速が同じであれば密度に比例するため、校正対象ノズルの上流側圧力を変えることでレイノルズ数を変えることができ、数点校正することで流出係数とレイノルズ数の関係を求めることができる。

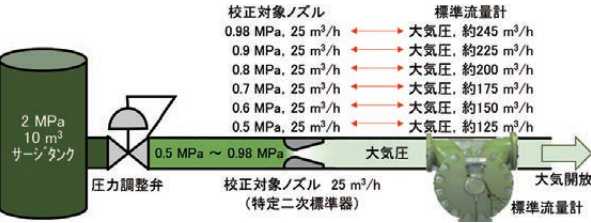


図10 0.5 MPa超における標準供給方法

圧力範囲を拡大したい最大流量は4000 m³/hであることから、積み上げていくための流量標準となる校正対象ノズルは可能な限り大きな流量の標準ノズルを選定したいが、2 MPa、10 m³のサージタンクの容量から、一定圧力を維持

したまま十分な計測時間が確保できる6.25 m³/h、12.5 m³/h、25 m³/hとした。25 m³/hの校正結果を図11に示す。校正した結果から得られた流出係数とレイノルズ数の関係は、特定二次標準器として使用可能な範囲(0.1 MPa～0.5 MPa)の関係式から求めた外挿値によく一致した。

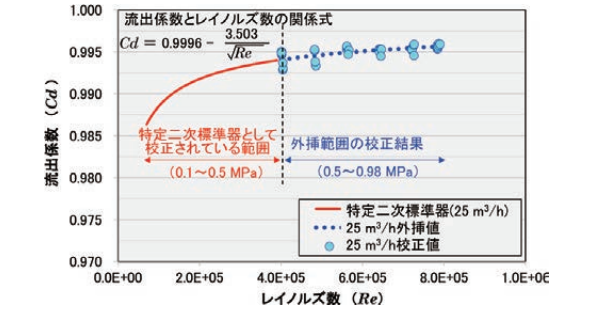


図11 特定二次標準器の外挿値校正結果

0.98 MPaまで校正した3本の標準ノズルを用いて、0.4 MPaを超えた圧力範囲における4000 m³/hまで積み上げるための基となる標準流量計を校正する。その概略図を図12に示す。

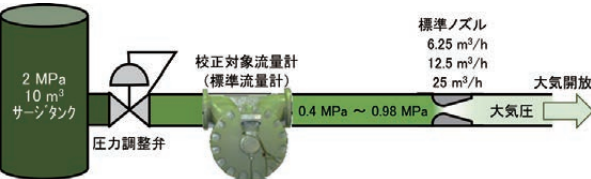


図12 0.4 MPa超における標準ノズルを用いた校正方法

2 MPaまで蓄圧したサージタンク、圧力調整弁、校正対象流量計(標準流量計)、標準ノズルの順に設置し、標準ノズルの上流側圧力を任意の圧力に制御し、一定流速を発生させている状態で校正対象流量計と比較して校正する。

4000 m³/hまで積み上げる方法は、図12の校正方法で校正した4台の標準流量計を閉ループラインに並列設置し、25 m³/h×4台(100 m³/h)で校正対象流量計(標準流量計)を3台校正(図13のSTEP 1)し、100 m³/h×3台(300 m³/h)で校正対象流量計(標準流量計)を校正(図13のSTEP 2)し、様々な流量で積み上げ校正を繰り返し4000 m³/hまで積み上げた(図13)。

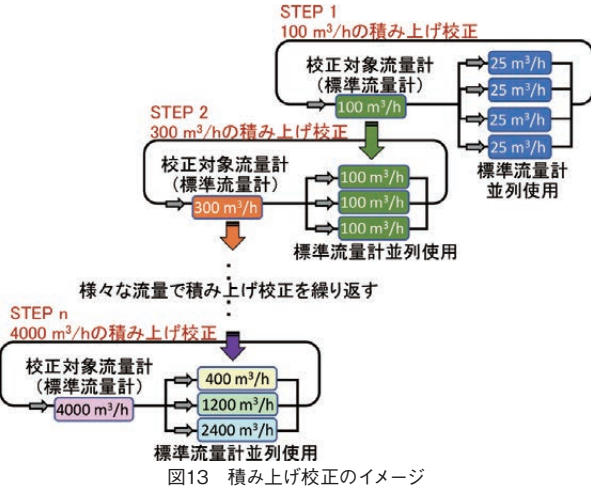


図13 積み上げ校正のイメージ

技能試験を国内で対応できる校正機関がないことから、フランスの国際相互承認された校正機関であるCESAME-EXADEBITへ校正した流量計を送り、技能試験を実施し、良好な結果を得た(図14)。その結果、合格基準である En 数判定が $|En| \leq 1.0$ となり、2021年12月に圧力0.98 MPa、流量4000 m³/hまでJCSS校正が可能となった。これにより、国家計量標準で供給できない校正範囲をさらに拡大した。

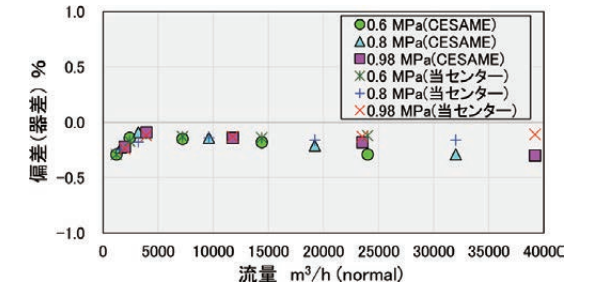


図14 技能試験結果

4. おわりに

当センターは、気体流量のJCSS登録事業者になって以来、様々な取り組みにチャレンジし、校正範囲を広げてきた。その結果、気体流量において国内最大の流量と圧力条件で校正が可能な唯一のJCSS登録事業者となった。今後も常に新しい取り組みにチャレンジし、継続的な校正能力、校正技術の向上により、顧客ニーズに広く応えていきたいと考えている。

<参考文献>

- (1) 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター JCT20810 技術的要求事項適用指針(流量・流速/気体流量計) <https://www.nite.go.jp/data/000001459.pdf>

<著者所属>

古屋 宏樹 アズビル金門株式会社
開発本部校正サービスセンター

燃燒安全ソリューションで実現する改正JISに適合した設備対応

A combustion safety solution compliant with the revised JIS B 8415

中田 知也
Tomoya Nakata

奥村 大輔
Daisuke Okumura

キーワード

燃燒安全, 安全規格, JIS B 8415 改正, プロテクティブシステム

工業用燃焼炉(以下工業炉)の安全規格「JIS B 8415 工業用燃焼炉の安全通則」が2020年に改正され、工業炉の安全機能はプロテクティブシステムと呼ばれる安全計装システムに対応しなければならなくなった。しかし、工業炉を改正JISに対応するのは容易ではなく工業炉メーカーの大きな課題となっている。

そこでアズビルは、バーナコントローラ、火炎センサ、自動遮断弁といった製品からなる燃焼安全ソリューションによる改正JIS対応方法を従来とほぼ同じ設計で提供し、工業炉メーカーの改正JIS対応を支援する。

The JIS B 8415 safety standard, “General safety code for industrial combustion furnaces,” was revised in 2020. The safety functions of industrial combustion furnaces must now constitute the protective system type of safety instrumented system. However, it is not easy to bring industrial furnaces into compliance with the revised JIS standard, and this has become a major issue for industrial furnace manufacturers.

In response, Azbil now provides a method of complying with the revised JIS in the form of a combustion safety solution consisting of products such as a burner controller, flame sensor, and automatic shutoff valve.

1. はじめに

工業炉とは鉄やアルミ等の材料を加熱して物理的・科学的性質を望む形に変化させる為の設備である。加工された金属材料は自動車や建築資材など身近で使用されており、工業炉は我々の生活に欠かせないものとなっている。

一方、加熱の過程では多量のエネルギーを使用するため、万が一事故が発生すれば重大災害に繋がりがかねないことから安全に運用することが求められている。そのため、工業炉メーカーは安全運用方策の1つとして安全規格に適合した設計を行っている。

2. 工業炉に関連する安全規格

2.1 国内外の規格

工業炉に関連する国内安全規格として、JIS B 8415 工業用燃焼炉の安全通則⁽¹⁾がある。この規格は工業炉の安全性を目標に1982年に制定されたが、工業炉の高性能化による安全基準の見直しや欧米規格(EN 746-2⁽²⁾、NFPA 86⁽³⁾)との整合を図るため、2008年に26年ぶりの改正が行われた。

この改正では工業炉のリスクアセスメントの実施、汎用プログラマブルロジックコントローラ (Programmable Logic

Controller: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、燃料安全遮断弁の二重化、火炎の個別監視など安全面で大きな変更が加えられており、各工業炉メーカー、関連機器メーカーが対応に迫られたことは記憶に新しい。

一方、国外安全規格としては欧州EN規格や米国UL規格といった地域規格は存在していたものの、国際的な枠組みでの安全規格は長らく存在していなかった。そこで、2008年に高性能工業炉に係る国際標準化を推進するISO/TC244^{注1}が日本工業炉協会の働きかけで発足し、ISO 13577 Industrial furnaces and associated processing equipment -Safety-シリーズ⁽⁴⁾が2012年から順次制定されていった。

2.2 2度目のJIS B 8415改正

2020年、前述のISO 13577シリーズを反映する形でJIS B 8415の2度目の改正が行われた。

2008年版のJIS B 8415 (以下 従来JIS)と2020年版のJIS B 8415 (以下 改正JIS)、ISO 13577の関係は表1で表すことができる。

注1 ISOが設置した工業炉の専門委員会
https://www.iso.org/committee/561961.html

表1 新旧JIS規格とISO規格の対応表

従来JIS	改正JIS	ISO
JIS B 8415	JIS B 8415-1	ISO 13577-1
	JIS B 8415-2	ISO 13577-2
該当なし	JIS B 8415-3	ISO 13577-4

従来JISを包括しつつ、ISO 13577の構成に合せる形で2分割されたのが改正JISのJIS B 8415-1、JIS B 8415-2となる。

「JIS B 8415-1 第1部:一般要求事項」は従来JISとほぼ同様の要求事項が規定されており、大きな変更はない。

「JIS B 8415-2 第2部:燃焼及び燃料取扱システム」においても従来JISに記載されている条項は包含されているが、新規条項がいくつかあるほか、細かなスペックなどで変更が見受けられる。中でも、安全機能において「プロテクティブシステムの要求事項に適合しなければならない」との記載が追加されたことが最大の変更点となる。

新たに用意された「JIS B 8415-3 第3部:プロテクティブシステム」には新規概念であるプロテクティブシステムについての要求事項が規定されている。

2.3 プロテクティブシステム

プロテクティブシステムは完全に新しい計装システムというわけではなく、既存の制御回路や操作回路といった安全計装の捉え方を変えたものである。

改正JISにおいては、「プロテクティブシステムとは、1つ以上の安全関連の計装機能を実施するための計装システムと定義され、センサ、論理処理部 (ロジックソルバ)、および操作端で構成される」と定義されているが、この3つの組み合わせ自体は従来計装でもとられているため新要素というわけではない。

また、改正JISでは、プロセス制御システムとプロテクティブシステムは明確に独立することが求められている。これは、制御システム側に故障/誤作動が発生しても安全機能に影響を与えないためであるが、この制御と安全の分離は従来JISにおいても、汎用PLCでのソフトウェアインターロックの禁止や制御用温度調節計 (含む温度検出器)と炉内過熱防止器の共用の不可等、一部安全機能で採用されている考え方である。

では、何が大きく変わったかという点、図1のようにセンサ・論理処理部・操作端において関連製品規格に適合した機器、または、SIL^{注2}/PL^{注3}能力を持つ機器を用いるという要求と各機器間の接続方法が決められている点が大きな変更となる。

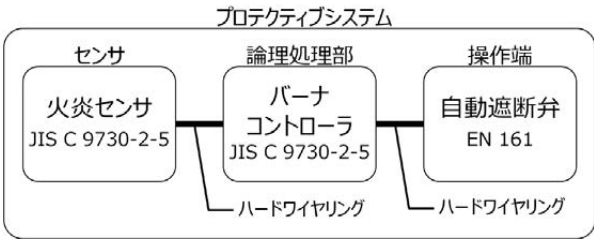


図1 プロテクティブシステムの構成例

注2 SIL (Safety Integrity Level) :JIS C 0508⁽⁵⁾においてシステムの安全性能を示す尺度

注3 PL (Performance Level) :JIS B 9705⁽⁶⁾においてシステムの安全関連部の能力を規定するための区分レベル

2.4 プロテクティブシステムの構築方法

プロテクティブシステムの構築方法は下記および図2に記載の方法A～Dの4つから選択することとなる。

方法A:関連製品規格適合機器で構成

方法B:方法AおよびSIL/PL適合機器で構成

方法C:方法BおよびSIL/PL適合PLCおよび機器で構成

方法D:機能安全規格に完全に従って設計



図2 各方法の概要

最もシンプルな構成が方法Aで、改正JISに記載の関連製品規格に適合した機器間を直接ハードワイヤリングしている。後述する計装例ではこの方法Aを採用している。

関連製品規格には適合していないSIL/PLに適合した機器を使用した場合や、機器間の接続に安全バス通信^{注4}を利用している場合は方法Bとなり、安全機能が要求するSILを決定するリスク分析を行う必要がある。

安全PLC^{注5}を使用する場合は方法Cとなり、安全PLCに実装するアプリケーションソフトウェアの安全設計が必要となる。

方法Dについての説明は本論文では割愛とする。

3. アズビルの燃焼安全ソリューション

3.1 ラインナップ

改正JISで定義されているリスクの1つに「爆発」がある。爆発は「燃料・空気・点火源」の3要素のうち少なくとも1つ以上を制御することで防ぐことができる。しかし「空気」は地表のどこにでも存在して容易に炉内に侵入する。また、「点火源」は炉内が燃焼によって赤熱していると存在することになり制御が難しい。当社の燃焼安全装置は「燃料」を制御して炉内の燃料を貯蓄させないことで爆発を防いでいる。

燃焼安全装置はプロテクティブシステムに対応しており、センサ部としては火炎センサ、ガス圧力スイッチ、論理処理部としてはバーナコントローラ、操作端としては自動遮断弁などをラインナップしており、それぞれ関連製品規格またはSIL/PLに適合している。

注4 JIS C 0508またはJIS C 9730-2-5⁽⁷⁾に従って設計された安全機器間で使用できるような仕組みを備えたフィールドバスシステムのこと

注5 JIS C 0508-1 のSIL 2 又はSIL 3 の安全機能をもつ、公認機関、国家認定試験所又はJIS Q 17025⁽⁸⁾に適合する組織によって認証されたPLCのこと

表2 アズビル製品の関連製品規格およびSIL/PL対応

製品	適合関連製品規格 およびSIL/PL
バーナコントローラ 形 RX-L80/90 形 RX-R40/20 形 BC-R15/25/35	JIS C 9730-2-5 EN 298 SIL3
バーナコントローラ 形 AUR455	JIS C 9730-2-5 EN 298
バーナコントローラ 形 AUR255	JIS C 9730-2-5 EN 298(申請中)
バーナコントローラ 形 AUR890	JIS C 9730-2-5
アドバンスUVセンサ 形 AUD300C1000 形 AUD100/110/120	JIS C 9730-2-5 *1 EN 298 *1
高機能工業用ガス電磁弁 形 GV-A□□□	EN 161 ⁽⁹⁾ SIL2 および PLd *2 SIL3 および PLe *3
電磁弁付きレギュレータ 形 GV-D□□□ 形 GV-G□□□ 形 GV-H□□□	EN 161 EN 88-1 ⁽¹⁰⁾ EN 1854 ⁽¹¹⁾ SIL2 および PLd *2 SIL3 および PLe *3
ガス圧力スイッチ 形 C6097A	JIS C 9730-2-6 ⁽¹²⁾ EN 1854

*1 バーナコントローラとの組合わせにて適合。詳細は各スペックシート参照のこと
*2 単独使用時
*3 2台直列使用時

以前より、これらを用いて制御系と安全系を分離しつつ省配線/省スペースを実現する燃焼安全ソリューションを提供してきた⁽¹³⁾が、今回のプロテクティブシステムの考え方は、この延長線上にあると捉えている。

燃焼安全ソリューションが提供可能なプロテクティブシステムは表3のとおりである。サブシステム間の接続はハードワイヤリングを採用した方法Aをとっており、アズビル製品を配線で結ぶことでプロテクティブシステムに対応することができる。

表3 対象プロテクティブシステム一覧

対象安全機能	プロテクティブシステム		
ガス圧低下に対する保護	圧力SW	バーナコントローラ	自動遮断弁
ガス圧上昇に対する保護	圧力SW	バーナコントローラ	自動遮断弁
自動遮断弁	圧力SW	バーナコントローラ	自動遮断弁
	火炎センサ	バーナコントローラ	自動遮断弁
自動遮断弁の閉止確認(パルプ検証機能)	自動遮断弁Po CSW	バーナコントローラ	自動遮断弁
空気流量及び圧力検知	圧力SW	バーナコントローラ	自動遮断弁
自動バーナ制御システム	火炎センサ	バーナコントローラ	自動遮断弁
燃焼室のプレバージ	圧力SW	バーナコントローラ	自動遮断弁

3.2 対応可能なバーナ運転方式

当社バーナコントローラにより改正JIS対応が可能なバーナ運転方式を表4に示す。これまで個別点火バーナ運転方式に対応した連続運転/バッチ運転用バーナコントローラモジュール 形 RX-R、連続運転用バーナコントローラ 形 AUR455等を提供してきたが、新たに一括点火バーナ運転方式や上流遮断バーナ運転方式に対応した、バッチ運転用バーナコントローラ 形 AUR255が製品ラインナップに加わることとなった。

次章では、これらの運転方式に対する改正JIS対応計装例を述べる。

表4 改正JIS対応が可能なバーナ運転方式

運転方式	説明	バーナコントローラ	
		AUR255	他
個別点火バーナ	二重自動遮断弁がバーナごとに設置されているバーナ運転方式	対応可	対応可
一括点火バーナ	根元の二重自動遮断弁で複数のバーナを一括に点火させるバーナ運転方式	対応可	対応不可
上流遮断バーナ	POC機能を持つ下流の単一自動遮断弁と、上流の単一自動遮断弁により構成されるバーナ運転方式	対応可	対応不可

4. 方法Aによる改正JIS対応計装

4.1 個別点火バーナ運転方式

個別点火バーナ運転方式の改正JIS対応計装例を図3に示す。

本計装ではパージコントローラがリミット/インターロックに異常がないことを確認したあとプレバージを実施し、完了後バーナコントローラへ安全出力にて点火許可を通知することで点火開始が行われる。

本計装はリミット/インターロックおよびパージコントローラに形 RX-L、バーナコントローラには形 AUR255や形 RX-Rなどを利用することで実現でき、いわゆる従来JIS計装からの変更がない(形 BC-R35といったパージ機能付きバーナコントローラの使用も可能)。

そのため、個別点火バーナ運転方式を燃焼安全ソリューションで構築し従来JISに対応している場合は、計装変更することなくプロテクティブシステムに合致可能である。

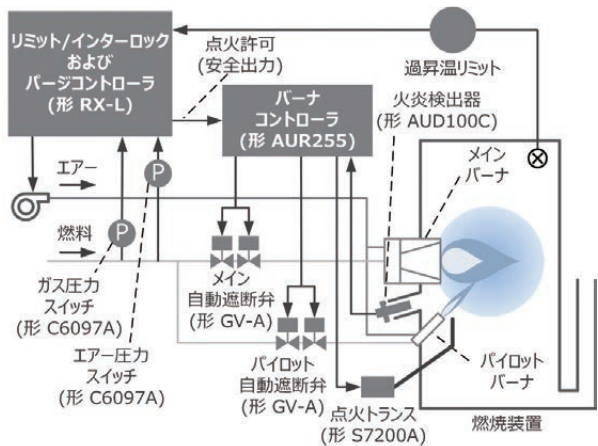


図3 個別点火バーナ運転方式の計装例

4.2 一括点火バーナ運転方式

4.2.1 JIS非対応計装例

一括点火バーナ運転方式の計装例として、汎用PLC+フレームリレー(火炎を検出し、その結果をリレー出力する機器)による計装がある。図4の計装例では汎用PLCがフレームリレーの火炎信号を受け取り、異常発生時は安全時間以内に根元の自動遮断弁を遮断する。

ただし、汎用PLCは従来JISの時点で安全機能への使用禁止が記載され、フレームリレーも関連製品規格に適合していないため、この組み合わせではプロテクティブシステムの要件を満たすことはできない。

仮に、関連製品規格またはSIL/PLに適合したフレームリレーがあったとし、汎用PLCを安全PLCに変更した場合は同様の計装でプロテクティブシステムの要件を満たすことができる。しかし、アプリケーションソフトウェアの安全設計が必要となる方法Cを採用する必要がある、方法Aに比べると多くの工数が必要になる。

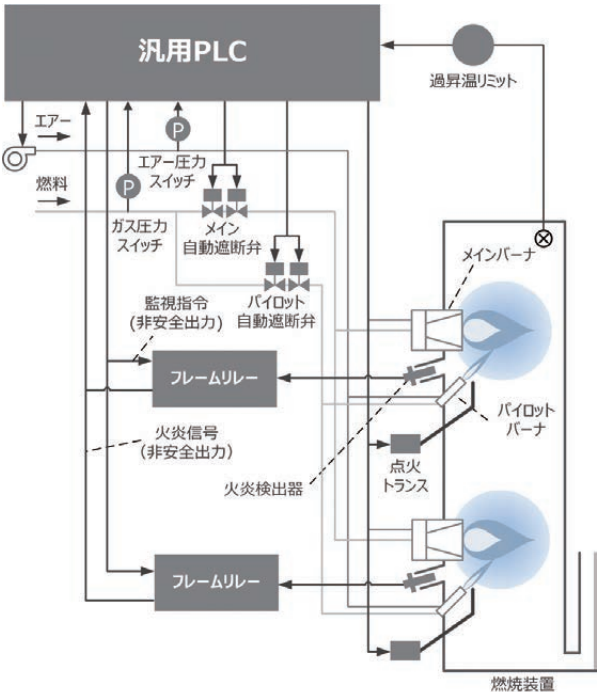


図4 JIS非対応計装例

4.2.2 改正JIS対応計装例

一括点火バーナ運転方式に対応した形 AUR255を利用することで方法Aを用いて簡便に改正JISへの対応が可能となる。一括点火バーナ運転方式の改正JIS対応計装例を図5に示す。

本計装ではパージコントローラがリミット/インターロックに異常がないことを確認したあとプレバージを実施し、完了後バーナコントローラおよび全てのフレームコントローラへ安全出力にて同時に点火許可を通知することで点火開始が行われる。

点火開始指令を受けたフレームコントローラはスタートチェックで機器の正常確認実施後、点火トランスを駆動すると共に安全出力にてバーナコントローラに遮断弁開許可を通知する。すべてのフレームコントローラから遮断弁開許可通知を受けたバーナコントローラは、自動遮断弁を開きすべ

てのバーナにガスを供給する。

もし、フレームコントローラが不着火や断火などの異常を検知した場合は、バーナコントローラに遮断弁閉指令を通知する。いずれかのフレームコントローラの遮断弁閉指令通知を受けたバーナコントローラは、即座に自動遮断弁を閉じすべてのバーナへのガスの供給を停止する。

本計装はリミット/インターロックおよびパージコントローラに形 RX-L、バーナコントローラおよびフレームコントローラに形 AUR255を利用することで実現できる。この時、形 AUR255への点火許可は外付け安全リレー経由の安全出力により通知する。

すべての入出力が汎用PLCに集中する図4の計装例に比べ、本計装ではリミット/インターロックの取込みはパージコントローラ、根元の自動遮断弁の操作はバーナコントローラ、バーナの点火と監視はフレームコントローラと機能を分割することにより分散配置が可能となっている。これにより、バーナ近傍の制御盤へフレームリレーを配置することで省配線/省スペースを実現することができる。

形 AUR255では、バーナコントローラへの遮断弁開許可および遮断弁閉指令の通知方法として、安全出力の接点によるハードワイヤリング構成を採用した。これは、通信に比べ速度が速く、JIS規定のタイミングの遵守、素早い点火の開始を実現するためである。

本接点をシリアルにバーナコントローラへ接続することで、すべてのフレームコントローラの遮断弁開許可、いずれかのフレームコントローラの遮断弁閉指令を通知している。

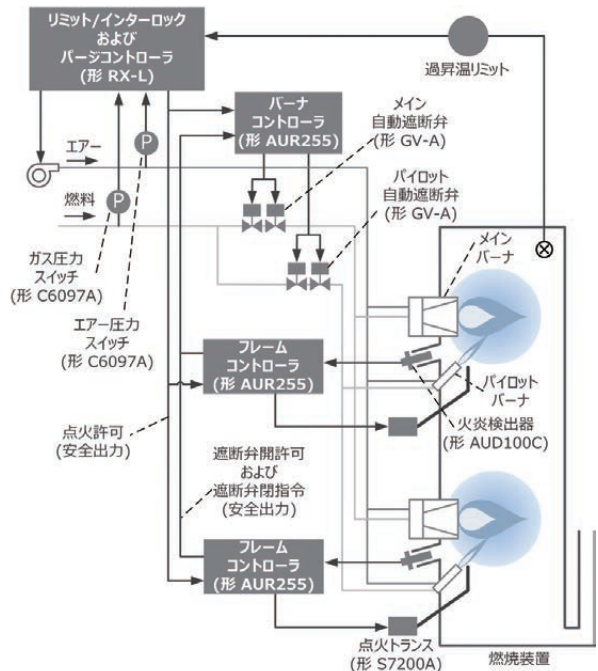


図5 一括点火バーナ運転方式の計装例

4.3 上流遮断バーナ運転方式

本運転方式はJISの改正に伴い新たに規定された計装である。JIS B 8415-2では単一の自動遮断弁の閉止を認める条件として、「低温運転時にISO 23551-1によるPOCが個別の自動遮断弁に装着されており、POCスイッチのうちの1つがバーナ弁の閉止を確認できなかった場合、プロテクティブ

システムによって上流側の自動遮断弁（ヘッダ弁）が閉止する場合」と規定されている。

当社の自動遮断弁 形 GV-□□□□はEN 161に適合しており、JIS B 8415-3の附属書JBにはISO 23551-1またはEN 161が関連製品規格として記載されているため利用可能である。

上流遮断バーナ運転方式の改正JIS対応計装例を図6に示す。ここでは、適用が想定されるダイレクト点火設備を例として挙げている。

本計装ではパージコントローラがリミット/インターロック、およびすべてのバーナコントローラからの遮断弁開許可を確認したあとプレパージを実施し、完了後バーナコントローラへ安全出力にて点火許可を通知すると共に上流側遮断弁を開く。

また、バーナコントローラは停止/運転/ロックアウトにかかわらず常にメイン自動遮断弁のPOC入力を監視し、本来自動遮断弁が閉じていなければならない状況で閉止を確認できなかった場合、パージコントローラに遮断弁閉指令を通知する。パージコントローラは点火許可通知中に、いずれかのフレームコントローラの遮断弁閉指令通知を受けた場合、即座に上流側自動遮断弁を閉じる。

本計装はリミット/インターロックおよびパージコントローラに形 RX-L、バーナコントローラに形 AUR255を利用することで実現できる。この時、形 AUR255への点火許可は外付け安全リレー経由の安全出力により通知し、上流側遮断弁の制御も本出力により行う。

形 AUR255では、一括点火バーナ運転方式の場合と同様、パージコントローラへの遮断弁開許可および遮断弁閉指令の通知方法として、安全出力の接点によるハードワイヤリング構成を採用した。

本接点を起動インターロックとしてRX-Lにパラレル接続することで、どのバーナの自動遮断弁で異常が発生したのかを検知することができる。一方、シリアル接続した場合、どのバーナの自動遮断弁で異常が発生したのか検知できないが、一入力のみで本計装を実現できる。

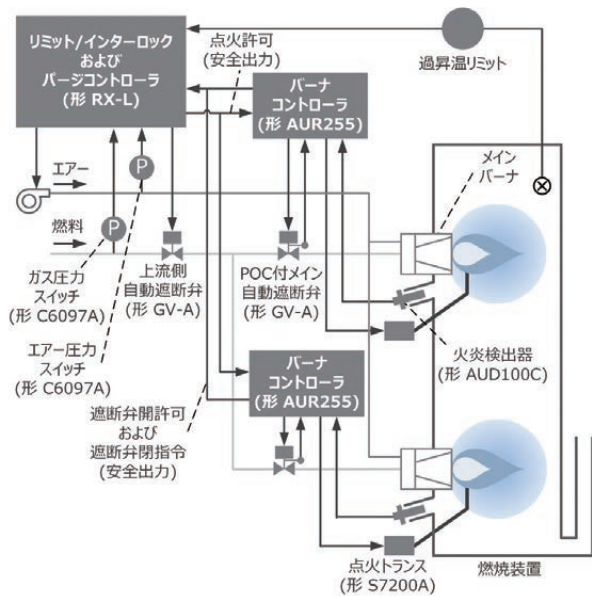


図6 上流遮断バーナ運転方式の計装例

4.4 まとめ

計装例を中心に改正JIS、特にプロテクティブシステムへの対応方法について説明したが、関連製品規格適合機器で構成する方法Aを燃焼安全ソリューションを用いて構築することで従来とほぼ同じ設計で対応できることを示すことができた。

また、従来ではJIS非対応のまま運用されていたケースもある一括点火バーナ運転方式においても、燃焼安全ソリューションを用いることで改正JIS対応を行えることを示すことができた。

なお、本稿ではリスクアセスメントの実施については説明省略したため、工業用燃焼炉の自動制御装置設計用リスクアセスメントガイド及び事例集⁽¹⁴⁾等を参考に実際の設計時には忘れずに実施していただきたい。

5. おわりに

安全規格を遵守することは安全上においても社会通念上においても重要なことではあるが、設計者の負担が膨れ上がり、規格適合が業務の大半を占めてしまっは本末転倒である。今回示した計装例は一例ではあるが、改正JIS対応の一助となれば幸いである。

折しも、カーボンニュートラルの実現に向けて水素やアンモニアといったCO₂を排出しない新たなエネルギーを用いた燃焼方法の確立が進められる中、安全規格の改正や新規発行が今後行われるであろうことは想像に難くない。

今後も安全規格の動向を注視し、規格に対応した燃焼安全ソリューションの提供を行うことで工業炉メーカーの安全規格対応を支援し、最終的にはアズビルのグループ理念である人を中心としたオートメーションで人々の安心、快適、達成感の実現と地球環境に貢献することを推進していきたい。

＜参考文献＞

- (1) JIS B 8415:2020 工業用燃焼炉の安全通則
 (2) EN 746-2:2010 Industrial thermoprocessing equipment - Part 2: Safety requirements for combustion and fuel handling systems
 (3) NFPA 86 Standard for Ovens and Furnaces
 (4) ISO 13577 Industrial furnaces and associated processing equipment -Safety-
 (5) JIS C 0508 電気・電子・プログラマブル電子安全関連系の機能安全
 (6) JIS B 9705 機械類の安全性 -制御システムの安全関連部-
 (7) JIS C 9730-2-5:2010 家庭用及びこれに類する用途の自動電気制御装置 - 第2-5部:自動電気バーナコントロールシステムの個別要求事項
 (8) JIS Q 17025:2018 試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項
 (9) EN 161:2011 Automatic shut-off valves for gas burners and gas appliances
 (10) EN 88-1:2011 Pressure regulators and associated safety devices for gas appliances - Part 1:

Pressure regulators for inlet pressures up to and including 50 kPa

- (11) EN 1854:2010 Pressure sensing devices for gas burners and gas burning appliances
 (12) JIS C 9730-2-6:2019 自動電気制御装置 - 第2-6部:機械的要求事項を含む自動電気圧力検出制御装置の個別要求事項
 (13) 山田晃, 中田知也, 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, azbil Technical Review, 2015年4月, アズビル株式会社
 (14) 工業用燃焼炉の自動制御装置設計用リスクアセスメントガイド及び事例集, 2020年9月,(一社)日本工業炉協会
 (15) 燃焼安全装置セレクションガイド 第26版, 2021年6月, アズビル株式会社

＜商標＞

AUDはアズビル株式会社の商標です。

＜著者所属＞

- 中田 知也 アズビル株式会社
 アドバンスオートメーションカンパニー
 CP開発部
 奥村 大輔 アズビル株式会社
 アドバンスオートメーションカンパニー
 CP開発部

小型で環境に配慮したフィルタ付き減圧弁の開発

Creating a compact and environmentally friendly pressure reducing valve pressure regulator with filter

小松 雅弘
Masahiro Komatsu

キーワード
フィルタ付減圧弁, 小型軽量化, 環境配慮設計, 圧力制御

現行製品である形 KZ03減圧弁の後継としてフィルタ付減圧弁 形 RA1Bを開発した。
形 KZ03減圧弁は使い勝手の良い減圧弁として長期間にわたって愛用され販売継続してきたが, 形 RA1B減圧弁ではより長期動作の高信頼性を追求し, ガイドOリングやサクシジョンチューブといった機構の改善により圧力制御の安定性を向上しつつ, 空気消費の削減や従来比約70%となる小型化により環境に配慮した減圧弁となった。

The user-friendly model KZ03 pressure reducing valve pressure regulator has enjoyed wide use and continuing sales over an extended period. Its sister model, the RA1B pressure reducing valve pressure regulator, is designed for high reliability, extra long-term operation, and enhanced stability of pressure control through the improvement of mechanisms such as the guide O-ring and suction tube. With reduced air consumption and miniaturization to about 70% of the conventional size, it is also.

1. はじめに

アズビルのアドバンスオートメーション事業は, 石油化学・電力・ガスをはじめ様々な工場やプラント市場向けに計測・制御機器を提供している。

それらの機器のうち, コントロールバルブ, ポジショナ, 調節計など一部製品では空気圧を駆動源とする。

減圧弁は, 空気源から供給される高压空気を個々の機器の定格圧力まで減圧し, 圧力を安定的に制御し供給する役割を担う。

アズビルの現行製品である形 KZ03減圧弁は販売開始から40年のロングラン製品であるが, 組み合わせ製品の多様化が進む中, 圧力制御の安定性向上が望まれていた。そのような要望に応じて資源削減・環境配慮設計, 小型軽量化を考慮したフィルタ付減圧弁 形 RA1Bを新規に開発した。

図1に減圧弁の外観を示す。図の減圧弁はどちらも直径約40mmの圧力ゲージが取り付けられており, 形 RA1Bの方が小型であることがわかる。



図1 減圧弁(左:形 KZ03 右:形 RA1B)

2. 減圧弁の原理

2.1 減圧弁の構造と動作原理

1次側から入った空気はフィルタを通過し異物がろ過され, バルブを通過して2次側から出力される。

出力圧(2次圧)によりダイアフラムを押し上げる力が調圧ばねのダイアフラムを押し下げる力と釣り合ったとき, バルブの1次側が閉じる。

2次圧が設定圧より高くなると調圧ばねの力に押し勝ってダイアフラムが持ち上がりバルブ上端との間に隙間が生じ, ボンネット側面のブリード穴を通して大気に排出される。

減圧弁の構造を図2に示す。

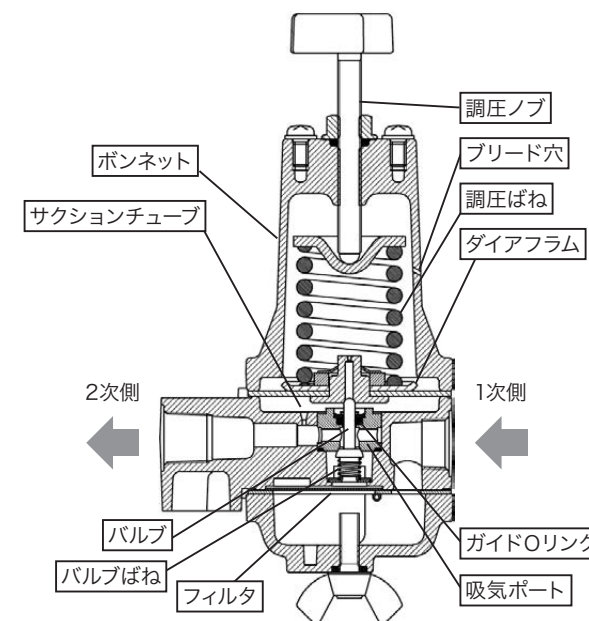


図2 減圧弁の構造

2.2 減圧弁の特性

減圧弁の主な特性として流量特性と圧力特性がある。減圧弁は, これらの特性を元に流路の配置や部品の機械的性質といった各種要素を考慮して設計することになる。

流量特性および圧力特性は, 以下に示すとおり調圧ばねと2次圧のつり合いの式から導出することができる。

図3において2次圧がダイアフラムを上向きに押す力を F_1 , 調圧ばねがダイアフラムを下向きに押す力を F_2 とすると以下のように書ける。

$$F_1 = P_1 B + P_2 A + k_b \delta_b \quad \text{式(1)}$$

$$F_2 = P_2 B + k_a \delta_a + mg \quad \text{式(2)}$$

ただし, 供給圧(1次圧) P_1 および2次圧 P_2 とし, 調圧ばねのばね定数とたわみ量を k_a および δ_a , バルブを下から押すバルブばねのばね定数とたわみ量を k_b および δ_b とする。また, バルブの荷重を m とし, A はダイアフラム有効面積, B はのど部の断面積, g は重力加速度である。

上向きの力 F_1 と下向きの F_2 が釣り合うとき

$$P_1 B + P_2 A + k_b \delta_b = P_2 B + k_a \delta_a + mg \quad \text{式(3)}$$

これを P_2 について整理すると下記(4)式となる。

$$P_2 = \frac{(-P_1 B + k_a \delta_a - k_b \delta_b + mg)}{(A - B)} \quad \text{式(4)}$$

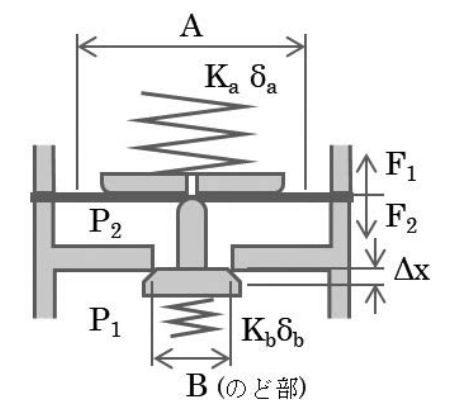


図3 減圧弁模式図

2.2.1 流量特性

流量特性とは, 2次側の流量変化によって圧力が設定値からどう変動するかという特性である。

減圧弁の安定制御のためには, 流量が変動しても2次圧の変化が小さいことが望まれる。

2次圧が設定値 P_2 でバルブが閉じているとき, 2次圧が低下するとバルブが開いて圧力を供給する。この間, ばねのたわみ量が増えるため新しいつり合い状態となり2次圧が P_2' となる。バルブの開度を Δx として式(4)に入れると

$$P_2' = \frac{\{-P_1 B + k_a(\delta_a - \Delta x) - k_b(\delta_b + \Delta x) + mg\}}{(A - B)} \quad \text{式(5)}$$

2次圧の変化 ΔP_2 は式(5)から式(4)を引いて

$$\Delta P_2 = P_2' - P_2 = \frac{-(k_a + k_b)}{(A - B)} \Delta x \quad \text{式(6)}$$

バルブが開くと流量が増加するので, 式(6)から流量と圧力変化の関係がわかる。右辺 Δx 以外の項は減圧弁の設計によって決まる定数である。計算ではバルブの開く方向を負としているため Δx は負の値である。従って式(6)はバルブが開いて流量が増えるほど2次圧が低下し, その係数はばね定数とダイアフラムおよびのど部の面積で決まることを意味している。

形 RA1Bは小型化によりダイアフラム有効面積 A が小さくなるため特性的には不利となる。

2.2.2 圧力特性

圧力特性とは, 1次圧の変動を受けて2次圧がどれだけ変動するかという特性である。

流量特性と同様に安定制御のためには2次圧が1次圧変動の影響を受けにくいことが望ましい。

上記式(4)で1次圧 P_1 が ΔP_1 だけ変化する場合を考える。それによって2次圧 P_2 が P_2'' になると

$$P_2'' = \frac{\{-(P_1 + \Delta P_1)B + k_a \delta_a - k_b \delta_b + mg\}}{(A - B)} \quad \text{式(7)}$$

であり、2次圧の変動量 ΔP_2 は下記ようになる。

$$\Delta P_2 = P_2'' - P_2 = \frac{-B}{(A-B)} \Delta P_1 = \frac{-1}{(A/B-1)} \Delta P_1 \quad \text{式(8)}$$

上記式 (8) より、圧力特性はダイアフラム有効面積 A との
と部面積 B の比で決まる。 A/B の値はかなり大きいので、減
圧弁が1次圧の変動を抑制することがわかる。

3. 新型減圧弁に求められる特性

減圧弁はバルブなどの部品の摩擦や位置ずれがあると
気密不足などにより圧力を安定的に制御できない状態が発
生し、運転中のトラブルの原因となる。

形 KZ03はバルブの位置ずれ防止機構など一部の構造
が簡略化された形状であったが、形 RA1B減圧弁では
形 KZ03と比較して圧力制御の安定性をより向上するよう
設計を見直した。

形 KZ03および形 RA1Bは空気圧で駆動するので、供給
空気の消費量が環境指標の1つとして挙げられ、無駄な空
気消費は抑える必要がある。

いずれの減圧弁も2次圧変化に対する応答性向上のため
バルブを完全には締め切らないブリードタイプと呼ば
れる構造であり、空気消費量はゼロにはならないものの、
形 RA1Bでは形 KZ03と比較してより無駄な空気消費を抑
制する構造とした。

また、近年は減圧弁を組み込む先の機器も小型化が進
んでいるため、形 RA1B減圧弁は体積で形 KZ03比70%以
下を目標とした。ただし、流量特性と圧力特性はダイアフ
ラム有効面積の大きい方が有利であることを示しており、
形 RA1B減圧弁では後述するサクシオンチューブによる工
夫などを盛り込み、諸特性との兼ね合いを考慮しつつ小型
化した。

4. 形 RA1Bの技術

形 RA1Bの開発にあたり、上述のとおり圧力制御の安定
性向上や空気消費量低減、製品の小型化を踏まえてバルブ
をはじめ各部の仕様や設計を見直した。

その中から、本稿ではガイドリングとバルブ、サクシオン
チューブの設計について述べる。

図4は該当部の拡大図である。

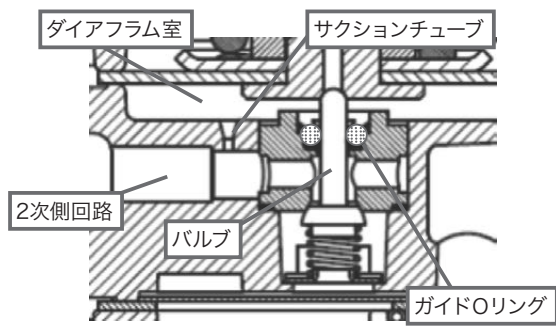


図4 構造図拡大

4.1 ガイドリング

形 KZ03ではバルブのガイド穴はバルブに非接触だった
が、形 RA1Bでは余分な空気消費を抑制する方法として、バ
ルブが位置ずれすることなく確実に閉じるようリングによ
る接触式のガイドを設けた。

バルブの上下動によってリングは摺動摩擦を受けるた
め、材料の摩耗が懸念される。一般的には耐摩耗性を向上
したゴムを使用することが多いが、低温では硬化してバルブ
の動きに支障をきたすおそれがある。従って形 RA1Bでは
摩擦抵抗が小さく低温においても弾性を保持し摺動を阻害
しにくいゴムを採用した。

その結果、設計寿命を大幅に上回る摺動においてもリ
ングの摩耗は見られず、長期信頼性の高い構造を実現でき
た。

4.2 バルブのローラーバニッシング加工

減圧弁のバルブは1本の棒状の部品で、本製品では先端
は半球状で胴に肩状の膨らみを持つ。バルブの先端部と肩
部でそれぞれ空気回路に蓋をして不必要な空気の流れを
遮断し密閉する。そのため、表面が平滑でないと気密が不
十分となり空気消費量が増大し、漏れ量が極端に多い場合
には調圧不能となってしまう。

一般的に、金属表面の平滑化のためには電解研磨が効
果的である。

電解研磨とは次のような表面処理加工である。

金属をバルブの形状に切削加工すると表面には切削溝の
細かい凹凸ができるが、この部品を薬液に漬けて部品自身
が電極となるよう電圧をかけると金属がイオン化して溶け出
していく。この時、突起部から優先的に溶けるため表面が滑
らかになる。

電解研磨は鏡面仕上げ加工のためによく用いられる手法
だが、廃液処理など環境負荷の観点から形 RA1Bでは電
解研磨によらない方法を模索した。

まずは旋盤の切削加工のみで動作確認したところ、気密
性以前の問題としてガイドリングがバルブ表面の切削溝に
食い込んでバルブが固定されてしまい空気回路が開閉しな
いという現象が発生した。そこで切削後にバニッシング加工
を導入した。

バニッシング加工とは部品の表面にローラー工具を押し
当てて凹凸を潰して平滑にする加工方法である。切削のみ
ではバルブ表面の算術平均粗さがRa0.8 程度だったが、バ
ニッシング加工の追加によってRa0.2 程度を実現でき、鏡面
仕上げと呼べる平滑さとなった。

本工法により電解研磨不要となったため、環境に負荷を
かける薬液の使用を回避できた。また、バルブのような棒材
部品は切削からバニッシングまで旋盤加工の1工程で完結
できるため、コストや部品の仕上がり品質の面においても利
点が大きい。

図5はバニッシング加工前後の拡大図である。バニッシ
ング加工前は切削溝が明瞭だが、加工後は平坦になっており
溝が目立たない。

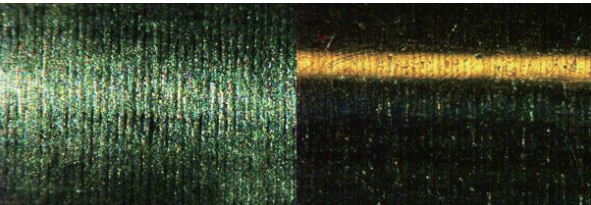


図5 バニッシング加工(左:加工前 右:加工後)

4.3 サクシオンチューブ

形 KZ03ではダイアフラムの下側は1つの大きな部屋に
なっており、この室内に2次圧が直接引き込まれているため
乱流を生じやすく圧力変化の影響を受けやすい構造であっ
た。

形 RA1Bではダイアフラム室と2次圧の空気回路を分断
して両者をサクシオンチューブと呼ばれる細い穴で接続す
る構造とした。ダイアフラム室の容量減少による応答性の向
上、乱流の抑制による安定性の向上、などの効果が期待で
きる。

また、サクシオンチューブ自体も、2次側の流れを利用して
ダイアフラム室から空気を効率よく吸い出して圧力を下げる
ことで応答性向上の効果がある。

サクシオンチューブは流速が大きいほど吸い出しの効果
が高くなり、小型化によって低下した流量特性の改善に寄与
する。吸い出しの効果を高めるためには2次側流路内にL字
形のパイプを挿入して口を下流側に向けるのが最も効果的
であるが、形 RA1Bでは小型化のためパイプの挿入が難し
いこと、パイプ自体により2次側流路が狭まることから、ダイ
アフラム室と2次圧側流路を単純に穴でつなぐ構造とした。

本開発では上記設計の効果について試作評価とあわせて
流体解析を行い、形状を決定した。

流体の解析手法には定常解析と非定常解析があるが、定
常解析では過渡状態を見ることが難しくサクシオンチューブ
による応答性の効果を容易に確認できないため、2次圧を
時間変化させて流路各部の圧力追従を見る非定常解析の
手法を採用した。

図6は解析モデル、図7は解析結果の一例で、サクシオン
チューブ付近の圧力と流速の分布を示している。

のべ20を超えるモデルを解析実行することで、実機での
試験時間を大幅に短縮しつつ適切な流路形状を選定でき
た。

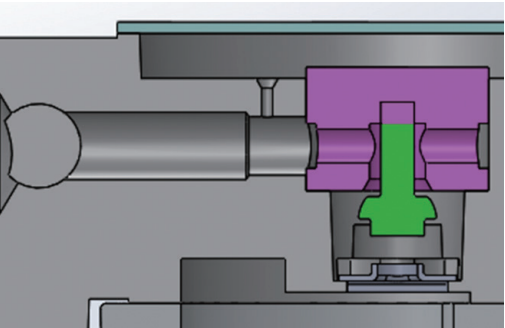


図6 解析モデルの例

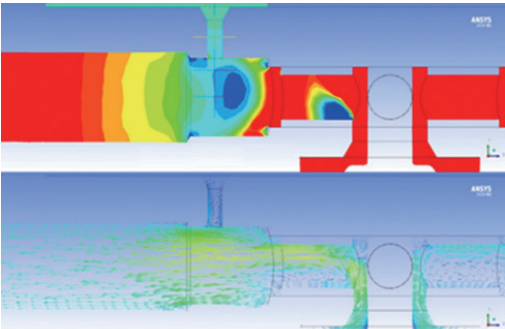


図7 解析結果の例(上:圧力 下:流速)

5. まとめ

形 RA1Bはガイドリング構造を採用してバルブの位置
ずれを防止することによって気密性を向上し、空気消費量を
形 KZ03の約半分に低減した。このことは圧力制御の安定
性向上とともに省エネルギーという点で環境負荷低減の効
果がある。

ガイドリングについては摺動摩擦や低温での硬化と
いった課題への対策を施し長期動作の信頼性を高めた。

バルブの表面を平滑にする電解研磨によらない方法とし
てローラーバニッシング加工を採用した。実用的な平滑面を
得られ、加工工程における環境負荷を最小限とした。

形 RA1Bは形 KZ03に比べ体積約70%に小型化した。小
型化は流量特性にとって不利となるが、サクシオンチューブ
構造などにより所定の性能を満足した。サクシオンチューブ
の条件選定にあたって評価試験と流体解析を連携し、解析
手法を工夫することで工数を大幅に減らすことができた。

また、製品の小型化や加工の工夫などにより形 RA1Bの
コストは部品点数の増加に関わらず形 KZ03とほぼ同等に
抑えられた。

6. おわりに

形 KZ03減圧弁の後継として開発されたフィルタ付減圧
弁 形 RA1B減圧弁は、圧力制御の安定性を向上しつつ小
型化・環境に配慮した設計という目標を達成した。

減圧弁を組み付ける製品について、近年の現場機器に
求められる小型化、高効率化および長期信頼性の向上に
形 RA1Bが寄与できることを願う。

<著者所属>

小松 雅弘 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
I A P開発部

位相型回折格子を用いた光学式測距技術の開発

A noncontact distance measurement technique using a phase grating

藤原 久利
Hisatoshi Fujiwara

古谷 雅
Masashi Furuya

藤井 絵理
Eri Fujii

キーワード
非接触距離計測, 三角測量法課題解決, 正反射影響低減, 安定計測, 位相型回折格子, ラテラルシアリング干渉計, 波面, 縞周波数, 解析信号

光学式非接触距離計測法の1つである三角測量法が持つ課題を解決する測距技術を開発した。本技術は測定対象からの拡散反射光の波面を位相型回折格子により2分岐させ、発生する干渉縞を受光素子で受光し、干渉縞空間周波数から波面の曲率半径、すなわち測定対象までの距離を求める技術である。本技術は三角測量法と比べ、曲面や凹みなど測定対象の形状に強いことが特長である。また、測定対象からの強い正反射光による影響を低減している。評価サンプルとして金属ピンゲージの形状を、三角測量法と今回開発した方法で測定し、実効性を確認した。

We developed a distance measurement technique that solves some of the problems of the triangulation method of optical noncontact distance measurement. In this technique, the wavefront of diffuse reflection from the measured object is split into two by a phase grating and the generated interference fringes are received by a photodetector. Our technique seeks the radius of the curvature of the wavefront from the interference fringe spatial frequency, which is to say, the distance to the measured object. Compared to the triangulation method, this method is characterized by a better ability to cope with curved surfaces, dents, and other features of the measured object's shape. In addition, the effects of strong reflected light from the measured object are reduced. As a sample evaluation, the surface profiles of a metal pin gauge were measured by the triangulation method and the novel method, and the effectiveness of the latter was confirmed.

1. はじめに

産業分野での測定対象の位置や形状を測定するためのセンサとして、光を用いた非接触型の測距センサが多く使用されている。それら光を用いた測距センサの中で代表的な計測法には、三角測量法が挙げられる。三角測量法は測定対象にスポット光を照射し、測定対象からの反射光の位置を受光素子で検出し、測定対象との距離によって反射光が受光素子に入射する位置が変わるという原理を利用して測定対象までの距離を測定する方法である。三角測量法では測定対象にスポット光を照射する角度と、測定対象からの反射光を検出する角度が異なるため、測定対象の形状や設置する向きによって光線が測定対象に遮られ（これを「オクルージョン」と称する）、測定できないという課題がある。例えば測定対象が図1に示すような凸形状であった場合、測定可能な向きと測定不可能な向きがある。一方この課題を解決するために、従来同軸光学系を利用した様々な光学式測距法が提案されているが、いずれの方法も光学系が複雑になる⁽¹⁾。

このオクルージョンによる測定不能領域が発生する課題を解決できる一方法として、位相型回折格子を用いた光学式測距技術を開発した。この技術はオクルージョンを発生せず安定した測定ができるとともに、シンプルな構成であることを特長とする。

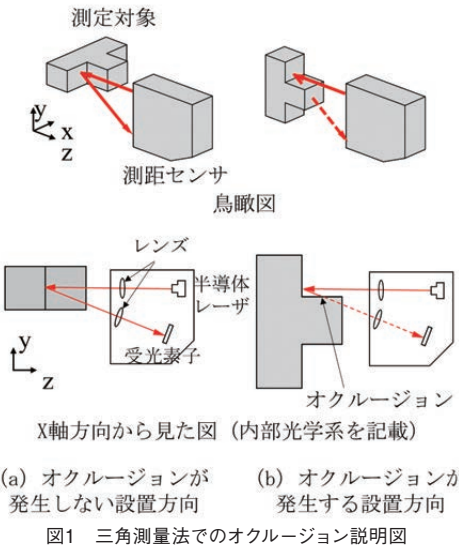


図1 三角測量法でのオクルージョン説明図

この光学式測距技術を用い、サンプルとして用いた金属ピンゲージの方向を変えてピンゲージ円柱曲面の形状測定を行い、どちらの向きでも安定した測定結果が得られることを確認した。

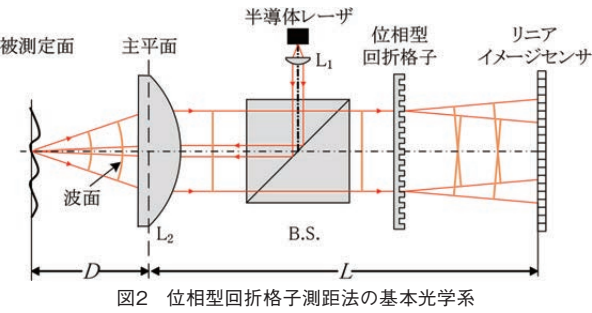
2. 位相型回折格子測距法の計測原理

開発した位相型回折格子を用いた測距技術の計測原理を説明する。本方式における距離計測は、波面を利用する。測定対象に向けて光を照射すると、対象面での拡散反射光の波面は、ホイヘンスの原理に基づき球面状となり、測定対象から離れるに従い波面の曲率半径は大きくなる。この波面の曲率半径を求めることにより測定対象までの距離を測定する。一方、波面の曲率から距離を求める方法の1つとして、コンスコープホログラフィー⁽²⁾がある。この方法は光源にレーザなどの単色光を用い、複数の複屈折結晶と偏光板を用いて測定対象からの拡散反射光を分岐させることにより発生するコンスコープ像の干渉縞周波数から、測定対象までの距離を測定する方法である。我々はさらにシンプルであり、量産性に優れた光学系を実現するため、この波面の曲率半径を求める方法として位相型回折格子⁽³⁾を使ったラテラルシアリング干渉計⁽⁴⁾測距技術を考案した。シアリング干渉計は被測定対象からの反射波面自身を干渉させる共通光路干渉計のため、振動や温度変化など外乱に対して安定な干渉計であり、工場などの生産現場での使用に適している。位相型回折格子とは回折格子の一方式であり、光の吸収のない平板の表面に周期的な溝や屈折率変化をつけた格子のことをいう。位相型回折格子は半導体プロセスやレプリカ複製法で製作できるため⁽³⁾量産性に優れる。位相型回折格子測距法は1枚の回折格子で拡散反射光を分岐し、干渉させることが可能なため、数少ない光学要素で構成されるシンプルな光学系で距離計測を実現することができる。

図2に位相型回折格子測距法の基本光学系を示す。半導体レーザからの光はレンズL₁で平行光になり、ビームスプリッタB.S.と対物レンズL₂で測定対象へ照射する。位相型回折格子で測定対象からの拡散反射光波面を2分岐させ、発生する干渉縞をリニアアレイセンサ等の受光素子で受光し、干渉縞の空間周波数から波面の曲率半径、すなわち測定対象までの距離を求める。干渉縞の空間周波数fと測定対象距離D（測定対象とL₂レンズ主平面距離）の関係は、下記の式で求められる。

$$D = \frac{FL\lambda f}{(L-F)\lambda f \Delta k F} \quad \text{式(1)}$$

ここでFはL₂レンズの焦点距離、LはL₂レンズ主平面と受光素子の距離、λは位相型回折格子のピッチ、Δkは位相型回折格子で回折する2つの回折光の次数差で正の整数である。位相型回折格子を利用することにより、特定の2つの次数の光を回折させることができるため、明瞭な干渉縞を形成させることができる。さらに式(1)に表されるように、測定対象までの距離は光源の波長に依存しない特長をもつ。



3. 高分解能縞周波数解析法

干渉縞の空間周波数を求める方法の1つとして離散フーリエ変換が用いられる。しかし離散フーリエ変換の周波数分解能は受光素子の長さの逆数となるため、高い分解能で縞周波数を求めるには、長い受光素子を必要とし現実的ではない。そこで干渉縞信号を解析信号⁽⁵⁾で表現し、解析信号の瞬時位相の近似直線から位相変化を求める高分解能縞周波数解析法を開発した。干渉縞の解析信号を求める方法にはヒルベルト変換⁽⁶⁾や直交検波法があるが、本解析法では、位相情報に影響を与えない離散フーリエ変換と逆変換を応用する手法を用いた。

高分解能縞周波数解析法における信号処理のステップを下記に示す。

- 干渉縞信号*i*(*x*)の離散フーリエ変換を行い、*I*(*f*)を求める。
- I*(*f*)の正の干渉縞の空間周波数成分のピーク周波数*f*₀を求め、*I*(*f*)に*f*₀の周辺の縞周波数成分のみを抽出するバンドパスフィルタをかけ、*I*_{*p*}(*f*)を求める。
- I*_{*p*}(*f*)を*f*₀シフトさせ*I*_{*p*}(*f*-*f*₀)を求める。これは、*f*₀が局部発振器となるヘテロダイン検波における周波数変換と等価である。
- I*_{*p*}(*f*-*f*₀)の逆フーリエ変換を行い、周波数変換された干渉縞の実部となる実信号*i*_{*re*}(*x*)および虚部となる解析信号*i*_{*im*}(*x*)を求め、*i*_{*re*}(*x*)と*i*_{*im*}(*x*)から*x*位置での位相、すなわち瞬時位相を求める。
- 瞬時位相の直線近似から求めた位相変化を、補正周波数*f*_cに変換する。
- f*_cを用いて*f*₀を補正し、縞周波数を求める。

なお手順 c)の周波数変換は行わなくても縞周波数を求めることはできるが、位相飛び⁽⁷⁾が多くなり、位相接続ミスが起こりやすくなる。手順の概念図を図3に示す。

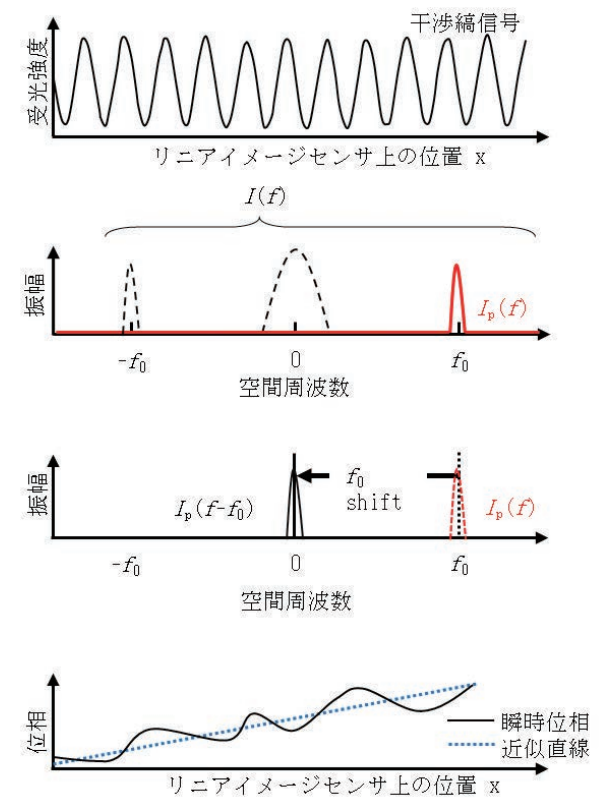


図3 高分解能フーリエ解析法概念図

4. 正反射光飽和対応アルゴリズム

測定対象の表面状態によっては、強い正反射光が受光素子の一部分へ入射し、過剰露光となって受光信号が飽和する場合があります。そのため、前章で説明したフーリエ解析をする際に、飽和した画素の瞬時位相が乱れ、ステップ e)において適切な近似直線を求めることができず、正しく周波数を求めることができない場合があります。そこで正反射光の影響を強く受けた干渉縞の周波数解析の前に、飽和した画素を除き、位相の直線近似を行うアルゴリズムを考案した。図4 (1)に示すようにリニアイメージセンサ中央付近に強い正反射光があり、飽和を起こした場合の解析方法について説明する。

まず図4 (2)に示すように正反射光による受光信号の飽和がない領域（両端部分と呼ぶ）のみを用いて解析を行う。それぞれで前章に示した a)～d)の信号処理で瞬時位相を求める。このとき両端部分の位相は本来連続しているため、図4 (3)に示すように左部分のみの瞬時位相から近似直線を求め、その近似直線との差分が最小になるように右部分に $2n\pi$ (n:整数)を加えることで、位相接続を行う。その後、離れた両端の位相を用い、前章の e)～f)の信号処理を行うことにより干渉縞の周波数を求める。

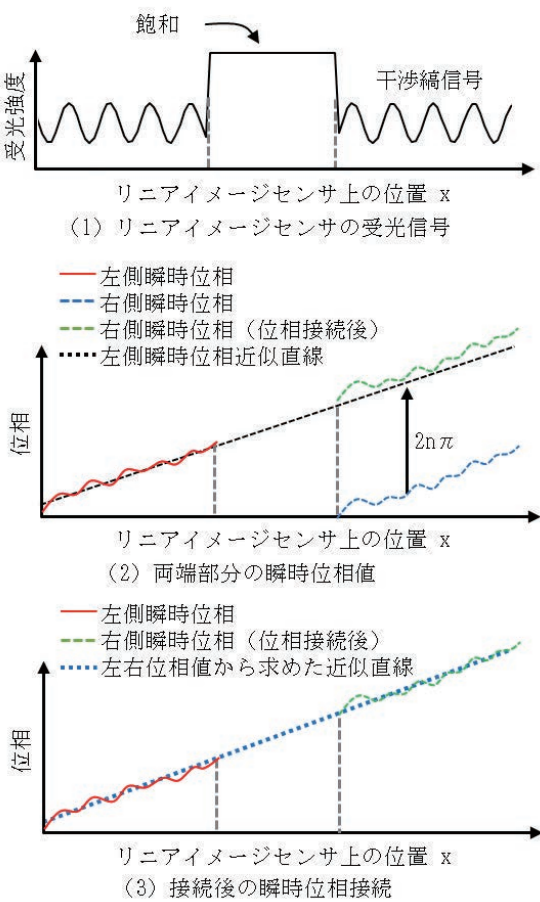


図4 飽和した正反射光解析法説明図

5. 評価実験

開発した位相型回折格子測距法の精度検証および、三角測量法でのオクルージョンの影響を比較するために、サンプルとして円柱形状である金属ピンゲージを用い評価した。金属ピンゲージの径精度（許容差）は $\pm 0.8\mu\text{m}$ 、表面粗さは(Ra) $0.2\mu\text{m}$ である。

位相型回折格子測距法での評価光学系とピンゲージ配置は、図5(a)に示すx軸方向に走査させて測定する（以下「x方向走査」とする）評価と、z軸を中心にピンゲージを90°回転させ、y軸方向に走査させながら測定する（以下「y方向走査」とする）評価を行った。ピンゲージは $20\mu\text{m}$ ステップで走査させた。三角測量法はセンサを図5(b)に示すように、投受光軸を含む面をyz平面と同一になるように設置し、位相型回折格子測距法と同じ評価を行った。

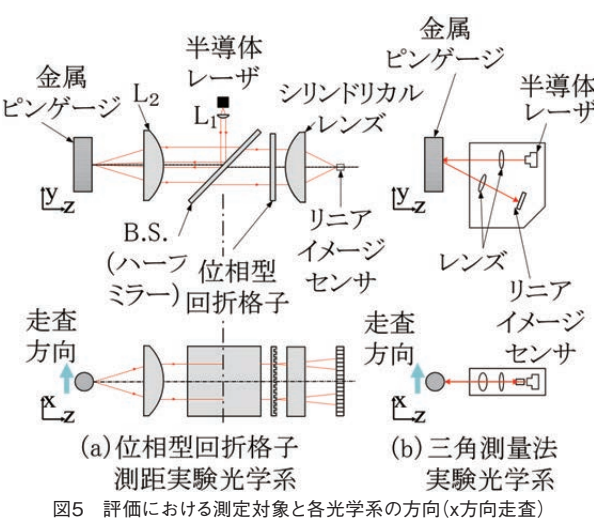


図5 評価における測定対象と各光学系方向(x方向走査)

6. 評価結果と考察

三角測量法を用いたときのピンゲージの形状測定結果を図6に、位相型回折格子測距法での形状測定結果を図7に示す。参考として、ピンゲージφ5の円柱を理想円と仮定して、黒破線として付記した。なお、ピンゲージ位置0.0mmでの面の法線角度を0°とし、正のピンゲージ位置の法線角度をプラス、負のピンゲージ位置の法線角度をマイナスと定義して以下説明する。

三角測量法の計測可能角度領域は、x方向走査では155°であり、理想円とはほぼ一致した測定値が得られているが、y方向走査の場合62°であった。24°以下（ピンゲージ位置1.0mm以下）で、測定値が大きく乱れている領域や、測定値を出力しないデータ欠損領域があることがわかる。

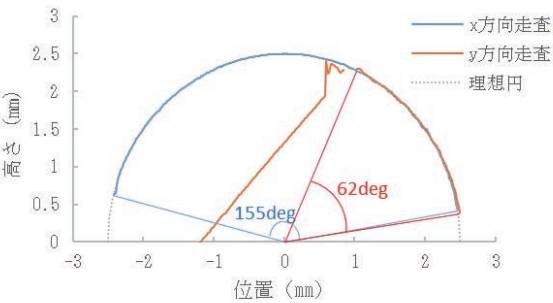


図6 三角測量法でのピンゲージ測定結果

この測定値の乱れや欠損については下記の3つの角度領域によって異なる原因が考えられる。

-40°以下（ピンゲージ位置1.62mm以下）の領域: 光学系とピンゲージの配置の関係により、オクルージョンが発生している。この領域は測定値が乱れているが、これはピンゲージの被照射面からの強い正反射光が、レンズや筐体内壁面等で反射・散乱し、光学設計と異なる方向から受光素子に入射する迷光が生じたためと考える。

-40°～13°（ピンゲージ位置-1.62～0.56mm）の領域: オクルージョンは発生していないので、正しい値を出力すべき領域であるが、測定値が乱れている。これはピンゲージの被照射面

からの強い正反射光が迷光となって受光素子へ入射し、被照射面からの光よりも大きいため誤出力したことが原因と考える。

20°～24°（ピンゲージ位置0.86～1.00mm）の領域: この角度領域では測定値が欠損している。ピンゲージの被照射面からの正反射光が強く、受光素子が過剰露光による飽和を起こし、正確に解析できないためであると考えられる。

位相型回折格子測距法の計測可能角度領域は、図7に示すようにx方向走査では160°、y方向走査では153°であった。

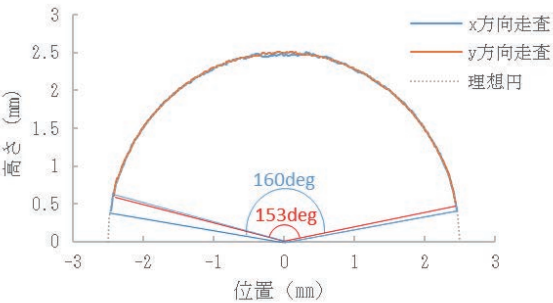


図7 位相型回折格子測距法での測定結果

次に三角測量法と位相型回折格子測距法の測定精度比較結果を表1に示す。精度評価は金属ピンゲージを理想曲面（真円）とした値と測定値との差分をとり、その標準偏差を精度の評価指標とした。

三角測量法のx方向走査は正反射光の影響を受けない方向の測定であるため、精度が $7.9\mu\text{m}$ と安定した測定値を得た。他方y方向走査では前述した測定データの欠損領域が多く、精度比較にはデータ点数が不十分のためN/Aと記載した。

	精度(μm)	
	x方向走査	y方向走査
三角測量法	7.9	N/A (測定データ欠損領域あり)
位相型回折格子法	14.2	8.2

位相型回折格子測距法でのy方向走査での精度は $8.2\mu\text{m}$ であった。正反射の影響を受けない三角測量法のx方向走査とはほぼ同等の精度を得られた。ピンゲージからの正反射光が受光素子に入射する位置0mm付近も測定できており、正反射光飽和対応アルゴリズムが有用であることがわかる。位相型回折格子測距法のx方向走査の測定精度は $14.2\mu\text{m}$ であり、y方向走査での精度より73%大きい。図7の測定結果のグラフより、x方向走査の測定において、位置0mm付近で測定値に小さな変動が見られる。この測定値の変動の原因を探るため、ピンゲージ位置0mmでのリニアイメージセンサ出力データを取得した。x方向走査、y方向走査でリニアイメージセンサ出力値分布を図8示す。

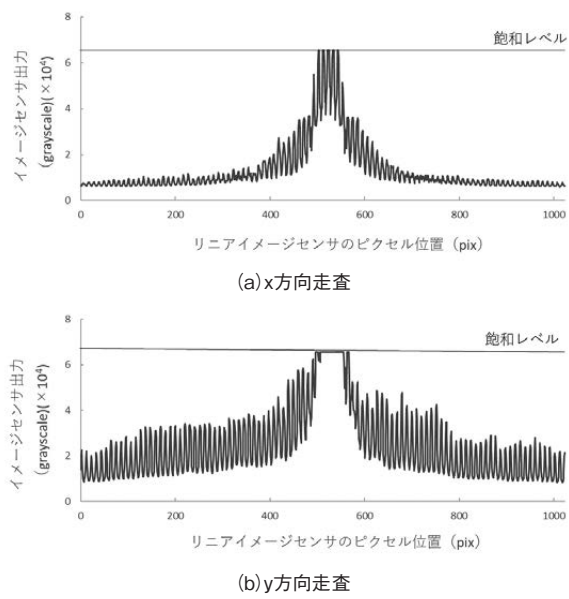


図8 金属ピンゲージ位置0mmでのリニアイメージセンサ出力分布

図8の出力分布よりx方向走査、y方向走査ともにピンゲージの正反射光がリニアイメージセンサの中心付近に入射して、受光強度が大きくなっていることを確かめた。y方向走査では中心付近の信号が完全に飽和しており、正反射光飽和対応アルゴリズムを適用しているが、x方向走査では正反射光は部分的に飽和するレベルの干渉縞信号を観測した。この部分的な飽和が干渉縞の周波数乱れを引き起こし、誤差が大きくなったと考える。x方向走査での正反射強度がy方向走査の正反射光強度に比べ大きくない理由は、金属ピンゲージ表面の曲率により、リニアイメージセンサ上に正反射光が分散するためである。さらに、正反射光が入射する位置もy方向走査では常にリニアイメージセンサの中心付近になるが、x方向走査では正反射光の位置が走査位置によってリニアイメージセンサ上を移動するため、正反射光飽和対応アルゴリズムを適用するには改良を必要とする。

以上の結果から、三角測量法でオクルージョンが発生する走査方向の場合、測定できない部分がある一方で、位相型回折格子測距法では、一部で誤差が大きくなるものの、走査方向に依存せず安定して測定できることがわかった。

7. おわりに

位相型回折格子測距法を開発し、金属ピンゲージを用いて三角測量法による測距センサとの比較評価を行った。三角測量法ではx方向走査では155°の角度領域で精度7.9μmが得られたが、y方向走査では、オクルージョンと迷光による強い正反射光により測定値が乱れ、データ欠損する角度領域があった。他方、我々が開発した位相型回折格子測距法ではx方向走査では160°に渡り精度14.2μm、y方向走査では153°に渡り精度8.2μmを得て、安定した測定値を得ることができた。

本方式は測距に着目しているが、幅広い計測にも適用できる可能性を持つ。今後、適用の範囲を検討しつつ、直面する様々な課題解決へ応用していく予定である。

<参考文献>

- (1) 吉澤徹 最新光三次元計測, 2007, 第2刷, pp.6-9, 朝倉書店.
- (2) G Sirat and D Psaltis, “Conoscopic holography”, Opt.Lett.,1985,vol.10,No.1, pp.4–6.
- (3) J Turunen and F Wyrowski, Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications, 1997. Akademie Verlag.
- (4) D Malacara,Optical Shop Testing,2007,3rd ed., pp.124–184,Wiley.
- (5) J W Goodman,Statistical Optics,2015,2nd ed., pp.98–100, Wiley.
- (6) A V Oppenheim and R W Schaffer, with J R Buck, Discrete-Time Signal Processing,1999, 2nd ed., chapter 11, Prentice-Hall.
- (7) K Creath, “Phase-measurement interferometry techniques”, Progress in Optics, E. Wolf (Eds.), 1988, vol. 26, pp.349–393, Elsevier.

<著者所属>

- | | |
|-------|--------------------------------|
| 藤原 久利 | アズビル株式会社
技術開発本部センシングデバイス技術部 |
| 古谷 雅 | アズビル株式会社
技術開発本部センシングデバイス技術部 |
| 藤井 絵理 | アズビル株式会社
技術開発本部センシングデバイス技術部 |

組込機器にて最新情報技術を活用可能とするプラットフォームの実現

Creation of a platform enabling the use of the latest information technology in embedded devices

小森谷 良明
Yoshiaki Komoriya

中林 想太
Souta Nakabayashi

山田 功
Isao Yamada

キーワード

savic-net G5, ビル空調システム, 快適性, 省エネルギー, 制御アプリケーション, 人工知能, Python

ビル空調システムでは近年、さらなる快適性と省エネルギーを実現するために、人工知能等の最新情報技術の活用が求められている。ビル空調システムを構成する組込機器に制御アプリケーションを追加する場合、制御専用言語で制御アプリケーションを製作する必要があったため、最新情報技術の活用が困難であった。そこで、汎用プログラミング言語やライブラリで製作した制御アプリケーションを、組込機器に追加可能とするプラットフォームを実現した。これによりPCをシステムに追加しなくても、既にある組込機器で最新情報技術が活用可能となる。

In recent years, in order to realize further comfort and energy savings from building air conditioning systems, the need for artificial intelligence and other advanced information technology has become apparent. However, a new control application for the embedded devices incorporated into a building system usually must be created using the already-implemented control application language, making it difficult to utilize the latest information technology. To solve this problem we created a platform that allows control applications written with general-purpose programming languages and libraries to be added to embedded devices. Existing embedded devices can now take advantage of the latest information technology without the need to add a PC to the system.

1. はじめに

ビル内には熱源設備や空調設備など様々な設備がある。ビル空調システムでは一般的なPCより信頼性が高く、省電力でスペース効率にも優れたコントローラと呼ばれる組込機器が、各種設備の機器を連携して制御することで、ビル全体の省エネルギーや快適な空調を実現している。

アズビルではビル空調システムにて、様々な標準制御機能を提供している。また、顧客ごとの要求に合わせた制御アプリケーションを別途製作して、組込機器に追加することも可能としている。

一般的に組込機器に追加する制御アプリケーションは、汎用のプログラミング言語（Java, JavaScript, Python, C#, Go, R等）ではなく、IEC 61131-3という国際規格で定義されているような、組込機器用の制御専用言語で製作される⁽¹⁾。アズビルの従来ビル空調システム（savic-net FX™等）においても、制御アプリケーションの製作は制御専用言語で行う。制御専用言語はPCと比べてCPU性能やメモリ容量の制約が厳しい組込機器向けに設計されているため、組込機器での実行に適した制御アプリケーションの製作が可能である。

一方で近年、様々な分野にて人工知能等の最新情報技術の活用が試みられているが、これらの制御専用言語は汎用プログラミング言語と比べて機能や自由度が低いため、高度な科学計算や複雑なロジックの実装が困難である。

また、利用者が多い汎用プログラミング言語では、最新情報技術を活用するための機能改善やライブラリ開発が絶え間なく行われているが、制御専用言語においては、これらが活発に行われているとは言えない。

このように、制御専用言語は最新情報技術を活用するのが困難であり、別途、汎用プログラミング言語で製作した制御アプリケーションを実行するためのPCを、システムに追加する等の対応が必要であった。

この課題を解決するために、汎用プログラミング言語で製作した制御アプリケーションを組込機器に追加可能とし、かつ、既に動作している制御アプリケーションの機能を損なわずに、最新の言語バージョンや最新ライブラリを活用する新たな制御アプリケーションを追加可能とするプラットフォームを実現した。

これにより、ビル空調システムに新たなPCを追加するコストなしに、最新情報技術を活用する制御アプリケーションを、既にある組込機器に追加することが可能となる。

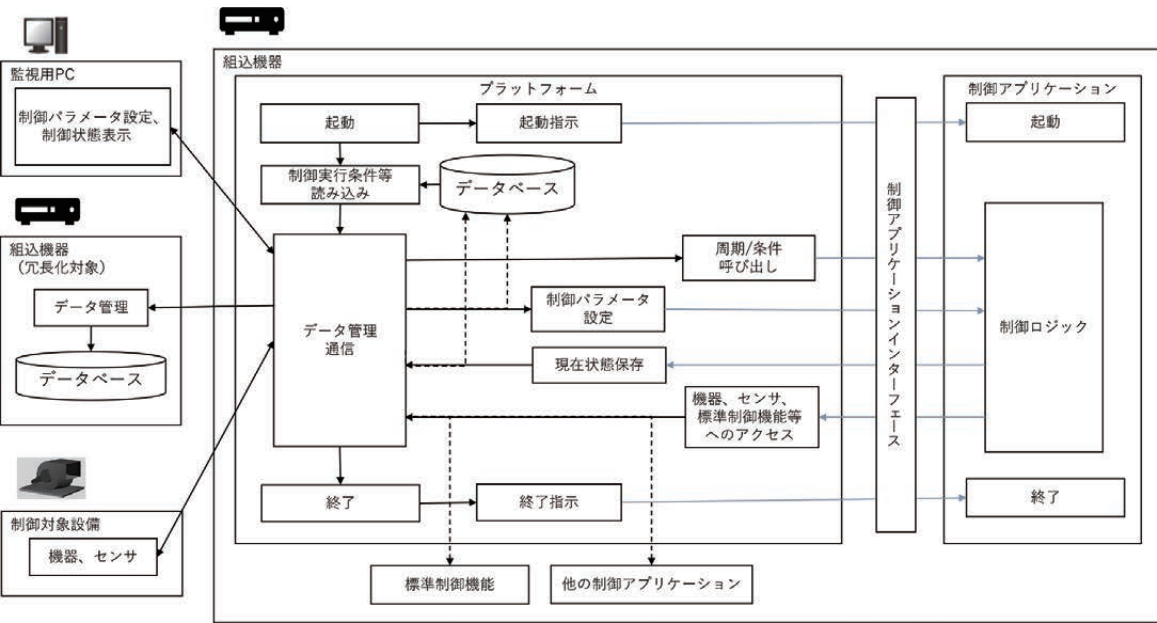


図1 プラットフォーム概要

2. 汎用プログラミング言語による制御アプリケーションの実現

2.1 プラットフォームの概要

本プラットフォームの概要を図1に示す。本プラットフォームと制御アプリケーションは互いに独立したプロセスとして動作する。プラットフォームは機器の電源ONに連動して起動し、各制御アプリケーションに起動を指示する。その後、制御実行条件等を読み込んで、指定された周期、または指定された条件に合致したタイミングで、各制御アプリケーションに実装された制御ロジックを呼び出す。機器電源OFF時には、各制御アプリケーションに終了を指示する。

プラットフォームは、監視用PC上の画面から設定された各制御アプリケーションの制御パラメータと、各制御アプリケーションの現在状態をデータベースにて管理する。組込機器が冗長化されている場合には、プラットフォームが冗長化対象の組込機器上のデータベースとリアルタイムで同期をとる。これにより不測の故障が発生して各制御アプリケーションに対する終了指示が行えなかった場合でも、冗長化対象の組込機器の各制御アプリケーションにて故障前の制御パラメータと現在状態を引き継いで、制御を継続することを可能としている。

また、プラットフォームは制御対象設備の機器やセンサと通信して、制御アプリケーションが機器の状態やセンサの計測値にアクセスする機能を提供する。これにより制御アプリケーションは機器やセンサの所在、アクセスに使用する通信プロトコル (BACnet, Modbus等) の違いを意識せずに、機器やセンサの状態や計測値を読み書きすることを可能とした。また、プラットフォームは、制御アプリケーションが組込機器の標準制御機能や、既に動作している他の制御アプリケーションの、制御パラメータや現在状態にアクセスする機能も提供する。

プラットフォームはこれらの機能を、制御アプリケーションインターフェースを経由して各制御アプリケーションに提供する。このインターフェースはプログラミング言語非依存なプ

ロトコル (WebSocketプロトコル) とメッセージ形式 (JSON形式) から構成される。これにより特定のプログラミング言語だけでなく、様々な汎用プログラミング言語による制御アプリケーション開発に対応可能としている。

2.2 制御アプリケーション実行環境の仮想化

汎用プログラミング言語の多くは絶え間なく機能改善され、新バージョンの言語やライブラリが次々と登場する。この際、必ずしもバージョン互換性が保たれるとは限らない。このため、新バージョンの言語やライブラリで製作した制御アプリケーションを組込機器に追加する際に機器OSに組み込んだ言語やライブラリのバージョンを上げると、すでに動作している古いバージョンで製作した制御アプリケーションが動作しなくなる場合がある。

そこで、本プラットフォームでは、あとから新しいバージョンの言語やライブラリで製作したアプリケーションを追加しても、既に動作している制御アプリケーションに影響を与えないために、仮想化技術を組込機器に適用した。具体的には、仮想化技術により制御アプリケーションの実行環境を隔離し、制御アプリケーション本体や使用する言語とライブラリを機器OSに組み込むのではなく、機器OSから隔離した制御アプリケーション実行環境に追加する (図2)。この仕組みにより、追加する制御アプリケーションは、常に最新バージョンの言語とライブラリで製作することが可能となる。

2.3 メモリ使用量の削減

組込機器はサーバやPC等と比べて、CPU性能の強化やメモリ容量の拡大が困難である。また、汎用プログラミング言語は制御専用言語と比べて機能や自由度が高いため、汎用プログラミング言語で作成した制御アプリケーションは制御専用言語で作成したそれと比べて、メモリ使用量が多くなる傾向がある。

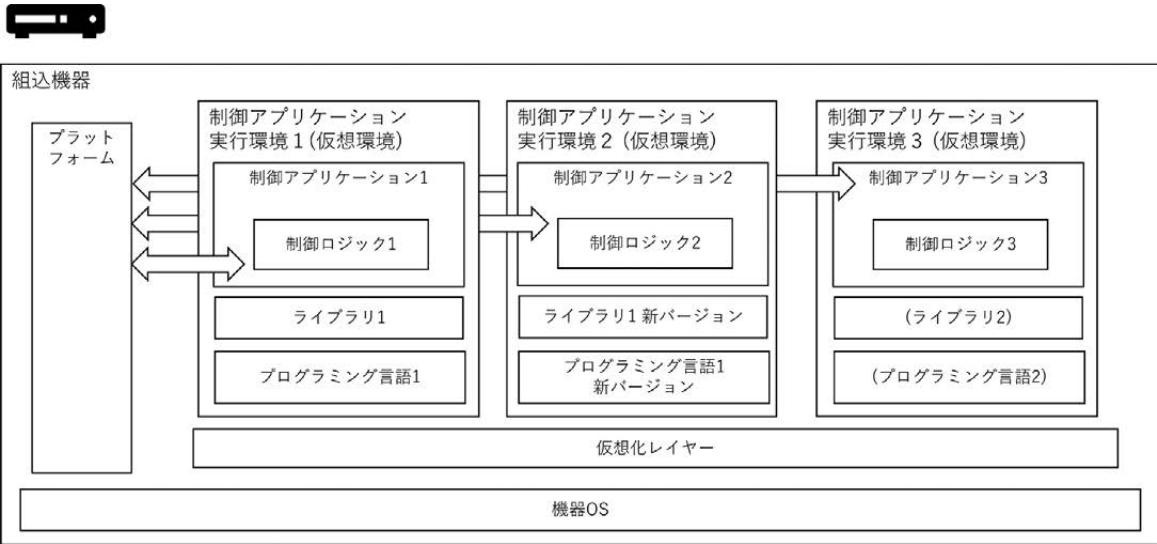


図2 制御アプリケーション実行環境の仮想化

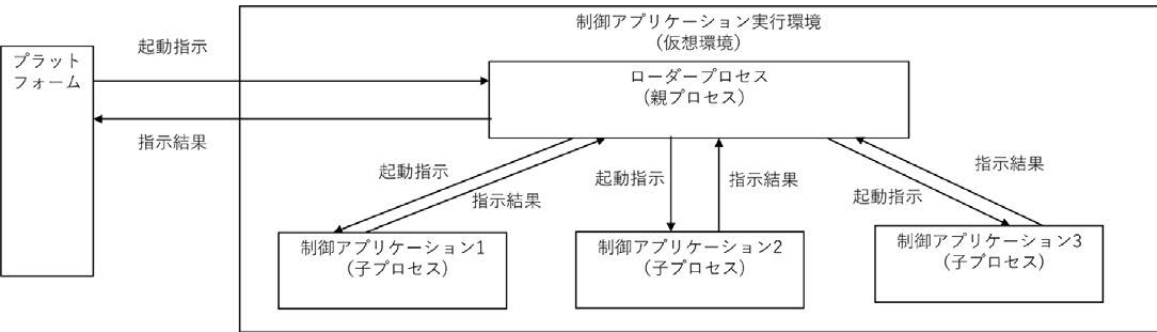


図3 制御アプリケーション起動の仕組み

CPU性能やメモリ容量の制約が厳しい組込機器にて仮想化を実現するために、ホスト型やハイパーバイザー型の仮想化技術と比べて必要なCPU性能やメモリ容量が少ない、コンテナ型仮想化技術⁽²⁾を採用した。

コンテナ型仮想化技術を採用する場合、保守や管理の容易性確保の観点から、1つのアプリケーション実行環境につき1つのアプリケーションを実行するのが望ましいとされている。しかし、厳密にこの方式を採用すると、各制御アプリケーション実行環境固有のメモリ空間が実行する制御アプリケーションの数だけ必要となるため、多くのメモリが必要になる。そのため、メモリ制約の厳しい組込機器では、動作可能な制御アプリケーションの数が少なくなる。そこで、本プラットフォームでは、同じ言語のバージョンとライブラリバージョンで製作した制御アプリケーションは、同じ制御アプリケーション実行環境にて実行する方式とした。

さらにメモリ使用量を削減するために、同じ実行環境で実行する複数制御アプリケーションを、あらかじめ必要なライブラリをインポートしたローダープロセスから、子プロセスとして起動する仕組みを開発した (図3)。

通常、ライブラリは各制御アプリケーション固有の独立したメモリ空間上に読み込まれる。しかし、今回開発した仕組みを用いることで、ローダーがライブラリを読み込んだメモリ空間を各制御アプリケーションで共有できる。これにより、一例としてPythonで製作した制御アプリケーションを30アプリケーション起動した場合で、メモリ使用量を約50%削減

減できることを確認した (図4)。

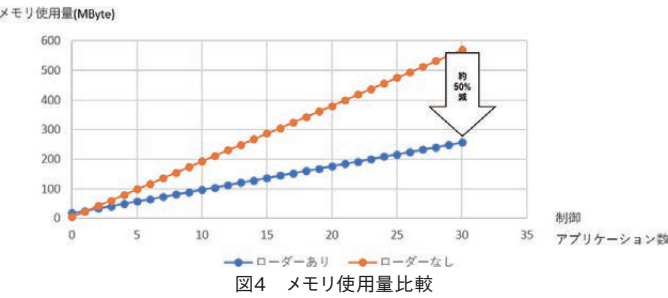


図4 メモリ使用量比較

3. 技術の製品化

3.1 汎用プログラミング言語Pythonの採用

2020年12月より、アズビルの最新ビル空調システムである savic-net™ G5にて、本プラットフォームによりPythonで製作した制御アプリケーションを追加可能とした組込機器である、savic-net™ G5 統合コントローラ⁽³⁾を販売開始した (図5)。



図5 savic-net™ G5 統合コントローラ

Pythonは習得が容易でコーディングの生産性が高く、高度な科学計算や複雑なロジックの実装も可能であることから、人工知能活用分野をはじめとする様々な分野で広く用いられている汎用プログラミング言語である。Pythonでの制御アプリケーション製作を可能としたことにより、複雑な科学計算を効率的に行うためのPythonライブラリや、機械学習を行うためのPythonライブラリを制御アプリケーションにて使用できる。加えて充実したコード編集機能やデバッグ機能を備える市販のPython用開発環境を、制御アプリケーションの製作に使用することも可能となった。

3.2 制御アプリケーション製作支援ツール

Pythonで制御アプリケーションを製作可能としたことに加えて、その製作をより簡便にするための、製作支援ツールを用意した(図6)。



図6 制御アプリケーション製作支援ツール

制御アプリケーション製作者はこのツールに、製作する制御アプリケーションの名称や制御実行条件等と、制御パラメータや現在状態の値を格納するための変数のデータ名やデータ型等を入力する。ツールは入力された内容をもとに、制御実行時等にプラットフォームから呼び出される関数や、データベースのテーブルに格納するデータ構造と変数の定義を、Pythonコードのソースファイル等に自動出力する。加えて、ツールは入力された内容をもとに、制御アプリケーションの利用者が制御パラメータの設定と現在状態の確認を行うための画面⁽⁴⁾を自動生成する。

この制御アプリケーション製作支援ツールにより、アプリケーション製作者がデータ構造の定義や画面等を手作業で作成することを不要とし、ツールが出力したソースファイルの関数に制御ロジックを追記するだけで、制御アプリケーションを製作することが可能となった。

4. 制御アプリケーション開発事例

4.1 最適室温設定アプリケーション

本節では、本プラットフォームにて実現した制御アプリケーションの例として、最適室温設定アプリケーションを紹介する(図7)。

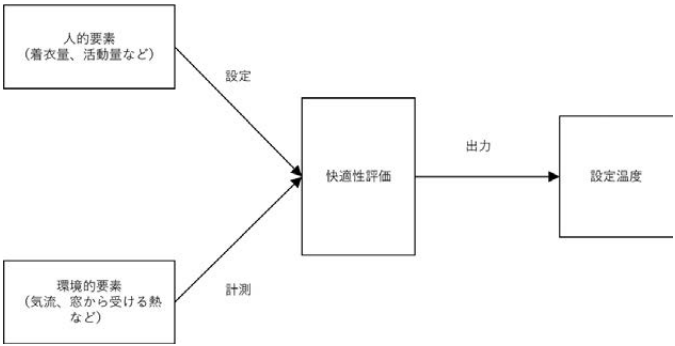


図7 最適室温設定アプリケーション

通常の空調制御では、あらかじめ人が室温の設定値を決めて設定するが、本アプリケーションは、室内の人の着衣量や活動量等の人的要素と室内の気流や窓から受ける熱等の環境的要素を元に、室内の人が快適と感じる設定温度を動的に自動演算する。これにより、室温の冷やし過ぎや暖め過ぎを自動的に防ぎ、快適性と省エネルギーの両立を実現する。

環境的要素として利用可能な計測値は、制御を実施する室内のセンサ設置状況等により異なる。また、快適性を評価し設定温度を決める手法にも、高度な科学計算を使用する等の、無数のバリエーションが考えられる。このような制御であっても、本プラットフォームにてPythonで制御アプリケーションを製作することで、顧客ごとの高度な要求に柔軟に対応可能となった。

4.2 人工知能制御実証実験での利用

人工知能を活用する試みとして、制御対象設備から取得した過去データを使用して学習を行い、得られた学習済みモデルを用いて制御を行うアプリケーションの試作も行っている(図8)。

本プラットフォームと製作支援ツールにより、制御アプリケーション製作者は制御ロジックの検討と実装に注力できるとともに、Pythonのライブラリを活用して効率よく制御アプリケーションを製作し、制御ロジックの効果を検証することが可能となった。

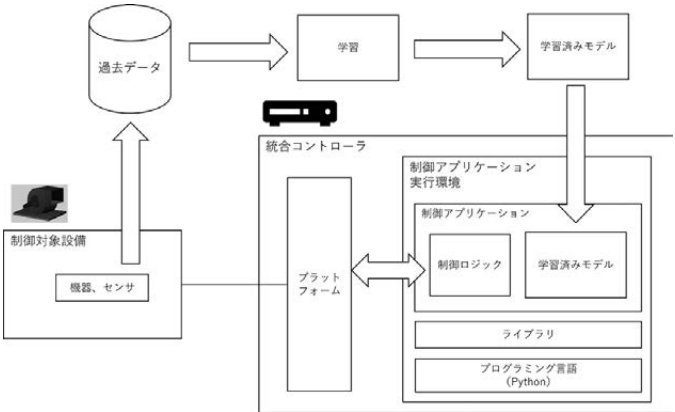


図8 人工知能分野での利用例

5. おわりに

本稿で述べたプラットフォームにより、最新の汎用プログラミング言語や最新ライブラリで製作した制御アプリケーションを、組込機器に追加可能とすることができた。これによりPC等をシステムに追加しなくても、既にある組込機器で最新情報技術を活用可能となった。

加えて、Pythonの採用と制御アプリケーション製作支援ツールにより、簡便に制御アプリケーションが製作可能となった。

今後は、制御アプリケーションを社外の販売協力店等で製作するための体制構築と、本技術による人工知能制御実証実験等を推進する予定である。本技術により、ビル空調システムへの人工知能等の、最新情報技術の活用が加速することを期待している。

<参考文献>

- (1) 日本電機工業会:
「PLCアプリケーションの開発効率化指針」, https://www.jema-net.or.jp/jema/data/plc_ver1.pdf
- (2) 川口 直也 (2020):
「コンテナ型仮想化概論」, カットシステム
- (3) 深浦 敦:
「高度なエネルギー管理と快適な空間を提供する savic-net™ G5システムの統合コントローラ」, azbil Technical Review, 2020年4月発行号, pp17-21
- (4) 西羅 大貴, 古賀 宏, 山本 博之:
「優れたユーザー体験を提供する新しいビルディングオートメーションシステムの開発」
azbil Technical Review, 2016年4月発行号, pp27-33

<商標>

savic-net, savic-net FXはアズビル株式会社の商標です。
Java, JavaScriptはオラクルおよびその関連会社の登録商標です。
PythonはPython Software Foundationの商標または登録商標です。
BACnetはASHRAEの商標です。
Modbus is a trademark and the property of Schneider Electric SE, its subsidiaries and affiliated companies.

<著者所属>

- 小森谷 良明 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー
開発本部開発1部
- 中林 想太 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー
BAエンジニアリング部
- 山田 功 アズビル株式会社
AIソリューション推進部

繋ぐ・調べる・動かすを1つに凝縮した スマートHARTモデムの開発

An all-in-one HART modem with diagnostic, power-supply,
and multiprotocol connective functions

古澤 直樹
Naoki Furusawa

工藤 泰
Yasushi Kudo

深尾 直之
Naoyuki Fukao

川松 豊
Yutaka Kawamatsu

籠浦 守
Mamoru Kagoura

森本 真弘
Masahiro Morimoto

キーワード

プロセスオートメーション, DX化, HART, 通信トラブル, HART 通信確認, 通信ノイズ, ループ給電, 解析, 機器管理, バルブ診断, SFN, DE

HART (Highway Addressable Remote Transducer) 通信を用いたプロセスオートメーション (以下, PA) プラントのデジタルトランスフォーメーション (以下, DX) 化が進んでいる。その際、通信トラブルに遭遇し、様々な機器を用いた解析と対応を余儀なくされることがある。今回、HART/SFN/DE対応のスマートHARTモデム 形 AZ-ISHMを開発し、様々な解析機器を使用することなく、現場でのHART対応フィールド機器導入時の動作確認やHART通信トラブル解析を可能とした。

The digital transformation (DX) of process automation plants using Highway Addressable Remote Transducer (HART) communication is underway. In this process, communication problems are sometimes encountered, requiring analysis and response using a variety of equipment. We have now developed the HART/SFN/DE-compatible model AZ-ISHM smart HART modem, which can check the operation of HART-enabled devices in the field and analyze HART communication problems without using various external analytical equipment.

1. はじめに

PAプラントではHART通信を用いてのDX化が進んでいる。HART通信を用いたプラントのDX化は、分散制御システム (以下 DCS) の制御ソフトウェアをはじめとする4-20 mAアナログ計装の資産を利用し、生産への影響を最小化しながら段階的に進めることができる。アナログフィールド機器をHART対応フィールド機器 (以下, HARTフィールド機器) に交換し、DCSのI/OモジュールをHART対応に変更するか、HART通信ユニットを追加してHART対応の機器管理ホストシステムを導入すると、HART通信によってフィールド機器が持つ様々な機能のパラメータへのアクセスが可能となり、それを利用したのループチェック時間の短縮や、フィールド機器の自己診断情報のメンテナンスへの活用が期待できる。

このとき、HART信号に影響を与えるノイズが存在したり、負荷抵抗の不足からHART通信仕様に定められた必要な波高を得ることができないなどの通信トラブルに遭遇し、現場で解析の必要に迫られることがある。解析にはマルチメータ、オシロスコープ、バスアナライザ、HART対応フィールドコムーニケータ、電圧・電流発生器、他のHARTフィールド機器など、様々な装置・機器を用いる場合があり、これらを常に現場に持参するのは容易でない。

今回、HARTおよびアズビルのフィールド機器通信プロトコルであるSFN (Smart Field Network)/DE (Digital Enhancement) をサポートする、複数プロトコル対応モデムであるスマートHARTモデム 形 AZ-ISHM (以下, ISHM) を開発し、様々な装置・機器を使用することなく、HART導入時の動作確認やHART通信トラブル解析を可能とした。

2. 1SHMの構成

ISHMは図1に示す本体と、サポートツール (ソフトウェア) から構成される。

2.1 本体

本体は片手で握ることができるサイズで、親指で操作する。本体背面には保持・操作時のグリップ性と安定性を考慮し、人差し指が入る窪みを設けた。操作パネルのボタンは使用手順に沿って上から配置し、左右どちらの手でも操作しやすいよう中心線上に並べている。



図1 1SHM本体

片手で握って使用することを前提とした小型化のため部品数を極力減らし、温度上昇を避けるため発熱を抑えられる部品を採用した。

また、現場での使用を考慮し、懸けておくことができるよう本体にストラップホールを設け、さらに耐衝撃性を高める専用シリコンジャケットを用意した。



図2 シリコンジャケットを装着した本体

本体とフィールド機器は 図1右上のフィールド機器側ケーブルで接続する。フィールド機器側ケーブルの先端は図1に示すICテストクリップを付属の、みのむしクリップと交換して使用できる。

本体は、HARTホストアプリケーション (以下, HARTホスト) またはサポートツールが動作するWindowsパソコン (以下, PC) またはタブレットと、USB Type-C® ケーブル (以下, USBケーブル) で接続する。無線認証取得済の国/地域では、サポートツールを用いて無線利用の設定を行った後にHARTホストが動作するPCまたはタブレットとBluetooth® Classic v4.2で接続し、あるいはサポートツールが動作するPCまたはタブレットとIEEE 802.11 b/g/nの無線 (Wi-Fi) で接続して使用できる。

本体はUSBケーブルでPCまたはタブレットから供給される電力、あるいは内蔵の乾電池の電力で動作する。

小型化および部品点数の削減により、様々な解析機器を用いていた従来と比較し、製品本体部重量を80%削減してCO₂を削減するなど、再使用・再資源化、環境保全性、省資源化の改善に貢献している。

2.2 サポートツール

サポートツールはPCまたはタブレット上で、本体とオンライン接続の状態で作動するソフトウェアであり、本体使用前に必須であるライセンス認証やHART通信解析のユーザーインターフェースとなっている。サポートツールの機能は3.2節と4章で述べる。また、画面イメージを図3に示す。必要な画面サイズは400×700ピクセル以上で、PC、タブレット両方において同じイメージで使用できる設計とした。画面解像度が高いモニターでは、最大化ボタンなどを利用して横長の表示も可能である。

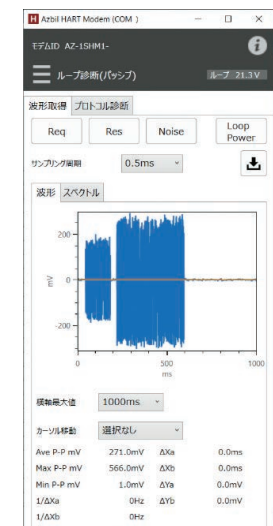


図3 サポートツールの画面イメージ

3. 1SHMの機能

3.1 モデム

ISHMはフィールド機器の設定・調整などを行うHARTホストまたは当社フィールド・コミュニケーション・ソフトウェア CommStaff™ 形 CFS100 (以下, CFS100) が、フィールド機器と通信するためのモデムである。HART/SFN/DEの複数プロトコルを切替えなしで利用できる。

3.1.1 HARTホストのモデム

ISHMとPC上で動作するHARTホストとのUSBケーブル接続では、HARTホスト上で通信先として付属USBドライバ (Azbil HART and SFN DE Serial Port) に該当するCOMポートを選択することで、そのHARTモデムとして機能する。

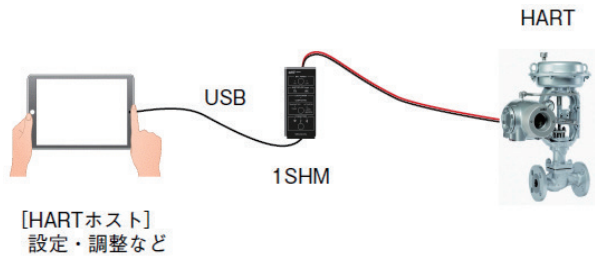


図4 HARTホストのUSB接続

Bluetooth接続の場合、Windows上で動作するHARTホストでは、ペアリング後に発信側COMポートを通信先として選択する。また、Android上で動作するHARTホストでは、ペアリング後に1SHMを通信先として選択する。

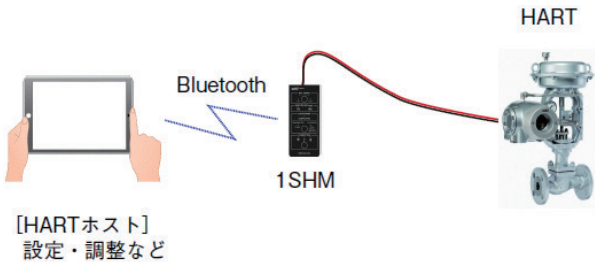


図5 HARTホストのBluetooth接続

3.1.2 CFS100のモデム

1SHMはCFS100のUSBモデムとして機能する。CFS100の起動時の画面でHARTまたはSFN／DEのいずれかを選択してフィールド機器との接続を開始する。1SHMはCFS100からの通信プロトコルを自動判別し、HART／SFN／DE対応モデムとして動作する。

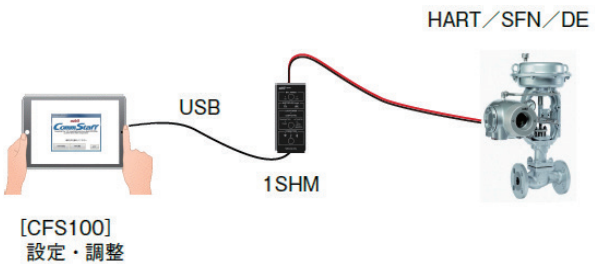


図6 CFS100の接続

3.2 HART通信解析

1SHMは本体単独で、またはサポートツールと組み合わせ、現場のHART通信トラブルの解析を行うフィールドサービストールとして使用することができる。サポートツールと組み合わせての通信解析には「監視モード」と「HARTマスターモード」がある。

1SHMを用いた現場での通信解析作業の詳細は4章で述べる。

3.2.1 監視モード

監視モードは1SHMからのHARTコマンド送信を行わず、HARTホストとフィールド機器の間で実行されているHART通信やノイズをサポートツール上でモニタリングするモードである。

図7はUSB接続の例であるが、Wi-Fi接続も可能である。



図7 監視モード（USB接続の例）

3.2.2 HARTマスターモード

HARTマスターモードでは、サポートツールがHARTホストとなり、接続先のフィールド機器にHARTコマンドを送信し、それをモニタリングするモードである。このとき、プライマリ通信、セカンダリ通信のどちらを用いるかの選択が可能である。また、接続先のフィールド機器からレスポンスがない場合、信号強度を上げてコマンドを送信してみることも可能である。

サポートツールから送信するHART信号が、意図せず接続先ループのHART通信に影響を与え、動作中のHARTホストが通信タイムアウト等の異常を検出することがないように、接続先のループにHART通信を検出すると、本モードへの切替を制限する安全機能を備えている。

図8はUSB接続の例であるが、Wi-Fi接続も可能である。



図8 HARTマスターモード（USB接続の例）

3.3 フィールド機器への給電

3.3.1 電圧・電流発生機能

1SHMはモデムとして動作、また、HART通信解析装置として動作しながら、1台でフィールド機器に給電（ループ給電）を行うことができる。

本体のボタンでの切替えまたはサポートツールでの設定により、トランスミッタ向けのDC24V電圧給電、アクチュエータ向けのDC電流給電を行うことができる。電流給電は2.4mA（-10%）から23.2mA（120%）まで設定できるが、上限は給電対象フィールド機器のインピーダンスによる。

3.3.2 通信負荷抵抗

11SHMのループ給電回路内には通信に必須の負荷抵抗250Ωを電源と直列に接続している。1SHMからフィールド機器へ給電しながらHART／SFN／DE通信を行う場合、4線式フィールド機器など一部を除き、外付けの負荷抵抗を用意する必要はない。

3.3.3 安全機能

1SHMは動作中のプラントでも使用される可能性を考慮し、1SHMからの意図しないループ給電によって動作中のポジションの開度が変化してしまうリスクを低減させるための

安全機能を備える。

接続先フィールド機器への外部からの給電を検出した場合、1SHMはループ給電を開始しない。また、ループ給電開始時あるいはループ給電中に、接続先フィールド機器が接続されていないことを検出した場合には、ループ給電を停止する。それにより、給電状態にある1SHMの端子が動作中のフィールド機器に接触し、意図しないループ給電が開始されることを防止する。

4. 1SHMを用いた現場での解析作業

本章では、様々な装置・機器を用いて行われている現場作業が、1SHMの活用により、短時間で容易に行うことができる事例を述べる。

4.1 接続先ループの給電状態確認

4.1.1 本体での表示

フィールド機器側ケーブルの端子間（接続先ループ）が給電されていることを検出すると、図9に示す本体操作パネル上のLOOP ACTIVE表示(LED)が点灯する。

1SHMからフィールド機器への給電を行う前にこのLEDが点灯している場合、既に給電されていると判断し、給電はできない。



図9 本体操作パネル上のLOOP ACTIVE表示

4.1.2 サポートツールでのループ電圧表示

図10に示すように、サポートツールの画面上でループ電圧値を確認することができる。監視モード、HARTマスターモードとも、波形表示や通信内容が表示更新されるタイミングで、ループ電圧値の表示が更新される。



図10 サポートツールでのループ電圧表示

4.2 通信波形／ノイズの確認

1SHMでは通常オシロスコープを用いて確認を行う通信波形やノイズをサポートツールで表示・確認できる。1SHMは1回の波形データ取得指示で4096回のサンプリングを行う。サンプリング周期はサポートツールを用いて、表1に示す選択肢から指定する。

表1 サンプリング周期／サンプリング時間

サンプリング周期	サンプリング時間	横軸最大値
0.02ミリ秒	81.92ミリ秒	10ミリ秒
0.1ミリ秒	409.6ミリ秒	100ミリ秒
0.5ミリ秒	2048ミリ秒	1000ミリ秒
1ミリ秒	4096ミリ秒	4000ミリ秒

サンプリング結果は電圧（mV）を縦軸とし、時間を横軸とするチャートに表示する。小画面での見やすさのため縦軸のスケールを自動調整し、横軸は指定されたサンプリング周期に応じ、表1の「横軸最大値」で初期表示する。横軸のスケールはチャート表示中にユーザが自由に変更できる。

図11はサンプリング周期0.5ミリ秒のHART通信波形の例（左）とノイズ波形の例（右）である。HART通信は左図のようにコマンドとレスポンスの2つの塊を持つ波形（の繰り返し）として見える。ノイズレベルの高い環境では、これらの塊がノイズの波形に埋もれ、明確に判別できないこともある。

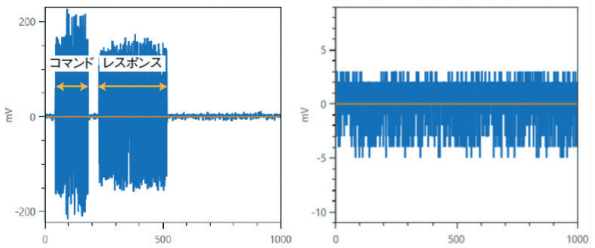


図11 HART通信波形（左）とノイズ波形（右）の例

4.2.1 監視モード

監視モードでは、サンプリング後のサポートツールでのチャート表示を以下から選択できる。

- ①HARTコマンド開始を起点とする表示
- ②HARTレスポンス開始を起点とする表示
- ③ボタンを押したタイミングを起点とする表示

上記①②はHART信号の波形がチャートの先頭に表示され、一方HART信号が検出できない場合にはタイムアウトエラーとなり、効率よくHART信号の有無および波形を確認できる。③は通信経路のノイズレベルの確認に用いることができる。

4.2.2 HARTマスターモード

HARTマスターモードでは、1SHMからHARTコマンド0（Read Unique Identifier^⑤）を発行し、そのコマンド開始を起点とする波形をチャート表示する。また、4.2.1項の③のボタンを押したタイミングを起点とする表示も可能である。

4.3 スペクトル解析

監視モード、HARTマスターモードに関わらず、サンプリングした信号の周波数ごとのスペクトル強度をチャート表示し、HART信号の周波数付近のノイズレベルを確認することができる。図12はHART通信中のスペクトル解析結果の例であるが、同図の中で高い値を示しているHART信号（1200Hz：1、2200Hz：0）の周波数付近のノイズレベルが高い場合、通信への影響が懸念される。

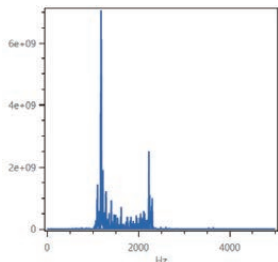


図12 スペクトル解析結果の例（HART通信中）

4.4 通信内容のモニタリング

ISHMが検出したHARTコマンド／レスポンス／バースト通信の内容をデコードし、サポートツールで集計結果と共に動的に表示する。

図13は通信内容の表示例である。通信内容は画面拡大またはスクロール操作で見ることができる。また、図14に通信の集計結果の表示例を示す。

0000	FF05	STX	S-	0x82	0x36051FE297	-	003	000	-	-
0187	FF05	ACK	S-	0x86	0x36051FE297	-	003	016	0x00	-
0428	FF05	STX	S-	0x82	0x36051FE297	-	003	000	-	-
0039	FF06	ACK	S-	0x86	0x36051FE297	-	003	016	0x00	-
0553	FF05	STX	S-	0x82	0x36051FE297	-	003	000	-	-
0105	FF05	ACK	S-	0x86	0x36051FE297	-	003	016	0x00	-

図13 通信内容の表示例

通信結果			
マスターモード	送信	受信	エラー
Primary	0	0	0
Secondary	6	6	0
Burst	---	0	---
Frame / Parity	---	---	0

図14 通信の集計結果の表示例

通信内容をモニタリングすることで、HART通信の内容、プライマリ通信のコマンドとレスポンス、セカンダリ通信のコマンドとレスポンスのやり取りがタイミング良く行われ、無応答がないかなどを確認することができる。また、バースト通信数、フレームエラー・パリティエラー数の確認も可能である。

表2にコマンドリクエストで表示される情報、レスポンスで表示される情報の例と表示内容を示す。表2は図13の3行目、表3は図13の4行目に相当する。表中の用語説明は参考文献⁽¹⁾⁽²⁾を参照いただきたい。

表2 コマンド表示内容(図13の3行目)

値	内容
0428	直前の通信からの間隔:428ミリ秒
FF05	Preamble (0xFF) 数が5
STX	コマンド (Master to Field Device)
S-	セカンダリ (S), 非バースト (-)
0x82	Delimiter Fieldの値
0x36051FE297	Long Frame Addressの値
-	Expansion Bytesなし
003	HARTコマンド番号3(10進表示)
000	データバイト長:0(10進表示)
-	レスポンスコード非該当
-	ステータスバイト非該当

表3 レスポンス表示内容(図13の4行目)

値	内容
0039	直前の通信からの間隔:39ミリ秒
FF06	Preamble (0xFF) 数が6
ACK	レスポンス (Field Device to Master)
S-	セカンダリ (S), 非バースト (-)
0x86	Delimiter Fieldの値
0x36051FE297	Long Frame Addressの値
-	Expansion Bytesなし
003	HARTコマンド番号3(10進表示)
016	データバイト長:15(10進表示) 値にはCommand Status Byteの1バイト分が加わる
0x00	Communication Statusの値
(欄外)	Device Statusの値
(欄外)	HARTコマンド3のResponse Data Bytesの内容(16進表示)
(欄外)	HART PDUのCheck Byteの値

4.4.1 監視モード

接続先のHART通信の内容を表示する。ISHMからHART信号を発することはない。接続先でHART信号を検出できない場合は図13に示すデコード結果が表示されない。モニタリングの停止／再開は任意のタイミングで行うことができる。

4.4.2 HARTマスターモード

ISHMからHARTコマンド0を繰り返し発行し、コマンドとレスポンスを表示する。HARTコマンド0発行の停止／再開を任意のタイミングで行うことができる。

4.5 フィールド機器の識別情報確認

主にプラントから取り外した機器の設定内容を確認するのに用いられるHARTマスターモードの機能である。

ポーリングアドレス0から63までの間で接続されているフィールド機器を検索し、見つかったフィールド機器の中から指定された機器の識別情報を表示する。

HARTマルチドロップ非対応のHARTホストでは、ポーリングアドレス値が0以外に設定されているフィールド機器からのパラメータ読み込みが容易でないことがある。このような場合のフィールド機器のパラメータ内容確認にも利用できる。

Polling Address	0
HART Version	6
Manufacturer ID	---
Expanded Device Type	0x3614
Device Revision	0x01
Software Revision	0x07
Device ID	0x010000
Configuration Change Counter	128
Min.Number of Preambles (Response)	5
Loop Current Mode	Enabled
Tag	FV101
Long Tag	FCV101

図15 フィールド機器の識別情報表示

4.6 プロセス変数確認

指定したフィールド機器にHARTコマンド3 (Read Dynamic Variables And Loop Current⁽³⁾)を繰り返し送信し、HARTフィールド機器の動変数(PV, SV, TV, QV)とループ電流値をトレンドチャートの形式で表示する、HARTマスターモードの機能である。チャートには同時に最大5本(PV, SV, TV, QV, ループ電流値)のグラフを表示できる。小画面での見やすさのため縦軸のスケールを自動調整している。

図16は縦軸にループ電流を選択した際の例である。

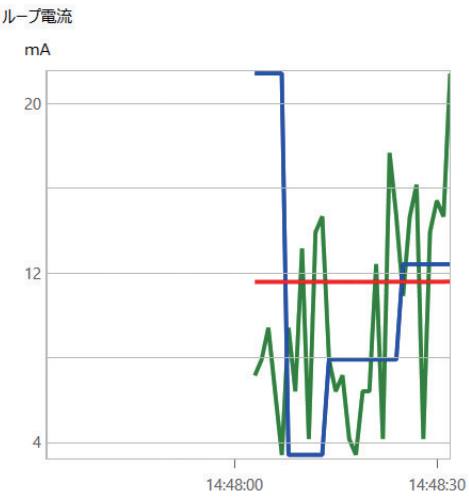


図16 プロセス変数確認

フィールド機器から読み込んだそれらの変数をチャート形式で表示することで、ノイズ等の影響により通信が途切れないかなどを視覚的に確認できる。

4.7 HART導入前の通信環境確認

アナログフィールド機器をHARTフィールド機器に置換する場合、既存の通信経路／ケーブルを変更せずにHART通信が可能であることを確認する必要がある。このとき、最も容易な手段は、アナログフィールド機器をHARTフィールド機器(以下、実機)に交換し、HARTホストと通信してみることであるが、実機の準備が難しいことも多い。

その実機の代替となるよう、ISHMにはHARTスレーブとして動作するデバイスモードを設けた。デバイスモードのISHMはManufacturer ID: 0x0036 (Azbil Corporation)、Device Type: 0x3617 (SHM1)の疑似HARTフィールド機器として動作し、全てのHARTユニバーサル・コマンドと、コモン・プラクティス・コマンド72(Squawk⁽⁴⁾)をサポートしている。

通信環境を確認する際は、デバイスモードで動作するよう設定したISHMを実機の代わりに配線した後、HARTホスト(図17では機器管理システム)で接続フィールド機器の検索などを実行する。その際、HARTホストからISHMへHARTコマンド0などが送信される。ISHMはそれらを問題なく受信できればレスポンスを返信する。HARTホストで期待通りの結果が確認できれば、ISHMに替えて他のHARTフィールド機器を接続しても、HART通信が可能であろうことが推測できる。



図17 デバイスモードを用いた通信環境確認

5. おわりに

現場でのHART通信トラブル解析支援の経験から、HART導入時の動作確認や通信トラブル解析に有効で、使いやすいフィールドサービスツール機能を持つ、片手サイズのスマートHARTモデム 形 AZ-ISHMを開発した。ISHM 1台とサポートツール(ソフトウェア)は、
・HARTモデム(有線／無線)
・SFN／DEモデム(有線)
・通信負荷抵抗付き電流・電圧発生装置
・ループ給電状態の表示
・ノイズ／波形の表示とスペクトル解析
・HART通信内容と通信結果の表示
・HARTフィールド機器の識別情報表示
・HARTフィールド機器の動変数のトレンド表示
・HARTフィールド機器の代替(デバイスモード)の現場価値を提供する。また、ISHMは2020年度グッドデザイン賞、およびRed Dot Award Product Design 2021(ドイツ)を受賞した。

HART通信を利用したPAプラントのDX化がますます進むと、通信トラブルに遭遇し、解析を必要とするケースがさらに増加することが予想される。今後は、本製品を必要とされる方々の声を聞き、(1)リアルタイムでの観測が困難な通信トラブルの解析のための、データ収集／記憶機能の強化、(2)クラウド連携と遠隔診断への利用、(3)サポートツールのユーザーインターフェース改善とオンラインアドバイスサービス、(4)本質安全防爆版の開発など、拡張／改善に活かしていきたいと考えている。

<参考文献>

- (1) FieldComm Group
HART Token-Passing Data Link Layer Specification(HCF_SPEC-081 FCG TS20081)
- (2) FieldComm Group
HART Command Summary Specification (HCF_SPEC-099 FCG TS20099)
- (3) FieldComm Group
HART Universal Command Specification (HCF_SPEC-127 FCG TS20127)
- (4) FieldComm Group
HART Common Practice Command Specification (HCF_SPEC-151 FCG TS20151)

<商標>
CommStaff はアズビル株式会社の商標です。
BluetoothはBluetooth SIG, Inc. の登録商標です。
HARTはFieldComm Groupの登録商標です。
USB Type-CはUSB Implementers Forumの登録商標です。
Wi-FiはWi-Fi Allianceの登録商標です。
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。

<著者所属>
古澤 直樹 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
IAS開発部
工藤 泰 アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニー
SSマーケティング部
深尾 直之 アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニー
IAS開発部
川松 豊 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
IAS開発部／CP開発部
籠浦 守 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
IAS開発部
森本 真弘 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
IAS開発部

小規模ビルのエネルギー管理に貢献する ビル管理システム SmartScreen2

SmartScreen2, a building management system that contributes to energy management of small buildings

大澤 義孝
Yoshitaka Osawa

1. はじめに

SmartScreenTMは、延床面積5000m²規模の小規模建物に向けたビル管理システムであり、1998年の販売開始以降、オフィスビルや病院などに1万システム以上導入されている。

近年、持続可能な社会の実現に対する機運の高まりにより省エネルギーの社会的要求は年々増加しており、SmartScreenがターゲットとする小規模建物においても、エネルギー管理の重要性が高まっている。建物のエネルギー管理にはBEMS (Building Energy Management System) と呼ばれるシステムが一般に使われるが、小規模建物の場合、BEMSを導入することはコスト面から現実的でなく、既存のビル管理システムにエネルギー管理の役割も持たせていくことが求められる。

そこで、小規模建物におけるエネルギー管理の第一歩として、エネルギーを可視化する機能を大幅に拡充した後継製品であるSmartScreen2を開発し、2020年1月より販売を開始した。

2. 製品概要

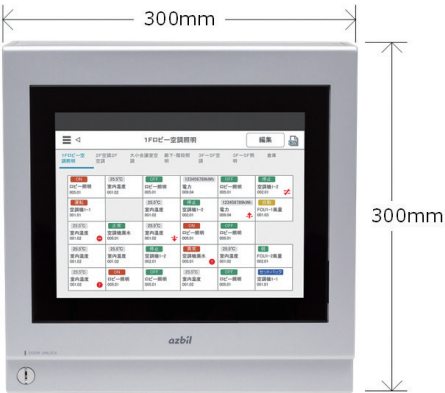


図1 SmartScreen2外観

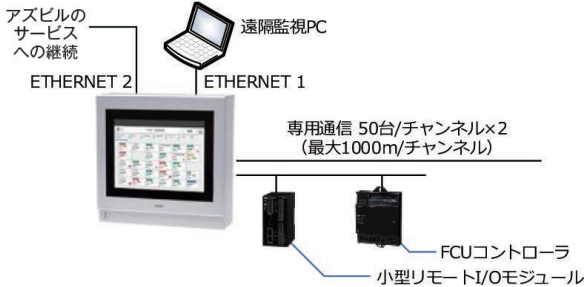


図2 SmartScreen2のシステム構成

SmartScreen2のシステムは、SmartScreen2本体と、設備機器の近傍に設置され本体に設備機器の情報を通信経由で伝える小型リモートI/Oモジュールによって構成される。またFCU (Fan Coil Unit) コントローラを接続し、SmartScreen2をFCUの集中操作パネルとして使用することもできる。I/OモジュールおよびFCUコントローラの最大接続台数は100台 (50台×2チャンネル)、通信幹線は最大1,000mであり、小規模の建物であれば建物内のどこでも情報の授受ができる。本体にはETHERNETを2ポート備えており、ほぼ同等の画面を遠隔に設置したPCから監視できるほか、アズビルが提供する総合ビル管理サービス (BOSS-24TM) やBASトータルシステムメンテナンスサービス (BESTMANTMEV) などのサービスに接続できる。

3. SmartScreen2のエネルギー管理機能

SmartScreen2の主要なエネルギー管理機能と、SmartScreenからの拡充点を表1に示す。

表1 主要なエネルギー管理機能		
機能	SmartScreen2	SmartScreen
トレンドグラフ機能	○	× 機能なし
日月年報作成機能	○	× 機能なし
データ収集機能	○ 最大13ヶ月 (1分周期収集時)	△ 最大20日 (1分周期収集時)
電力デマンド制御機能	○	○

以下に、個々の機能について述べる。

3.1 トレンドグラフ機能

管理データの時系列推移をグラフ表示する機能。建物内のエネルギーの使用量、設備の使用状況などの推移を可視化し、増エネルギーに繋がる設備の異常や運用の無駄がないかどうかを直感的に確認できる。グラフは最大16枚。1枚につき4点のデータを、15日分まで遡って表示。



図3 トレンドグラフ画面例

3.2 日月年報作成機能

時間ごと、日ごと、月ごとのデータを帳票形式で画面に表示し、CSVファイルに出力する機能。建物内の温度やエネルギー使用量を登録し、定期的に観測することで、トレンドグラフとは異なる前年同月比等の長期的な視点で設備の異常や運用の無駄の有無を確認できる。帳票枚数は系統ごとに帳票を作成することを想定して最大10枚、1枚あたりの登録データは最大20点。

図4 日報画面例

3.3 データ収集機能

最大200点の管理データを、1分単位の時系列データとして長期的に収集・蓄積する機能。トレンドグラフや日月年報作成機能によって増エネルギーの兆候を捉え、本機能を使用してより詳細な分析を行うことができる。蓄積期間は最大で約13カ月。蓄積したデータはCSVファイルとして出力し、PC上で分析を行う。

3.4 電力デマンド制御機能

デマンド時限と呼ばれる30分の周期ごとに、電力使用量の伸びからデマンド時限終了時点の使用電力量を予測し、常に平均使用電力が目標電力以下になるように設備の稼働状態を調整する機能。契約電力量を最適値に抑えられるため、建物の電気料金を削減すると同時に省エネルギーに貢献する。

予測される電力に応じて、停止させる設備機器を3段階のレベルで各8台ずつ登録。使用電力が目標値を超過しそうなときには警報として通知する。

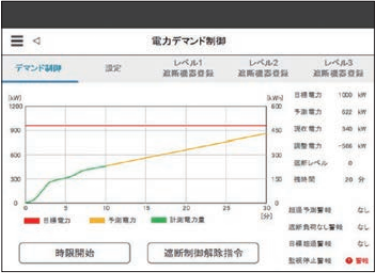


図5 電力デマンド制御画面例

4. おわりに

本稿ではSmartScreen2の簡単な紹介とともに、SmartScreen2が提供する各種エネルギー管理機能について述べた。今後は、当社が提供するサービス群とも連携し、SmartScreen2単体でなし得る以上の付加価値を持ったエネルギー管理サービスを提供していく所存である。

<商標>

SmartScreen, BESTMAN, BOSS-24はアズビル株式会社の商標です。

ETHERNETは富士フイルムビジネスイノベーション株式会社の商標です。

<著者所属>

大澤 義孝 アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー開発本部開発2部



azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2022年4月発行号

発 行 日 2022年4月1日(通巻63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：吉村俊哉
委 員：藤井六郎、百瀬修、衣笠静一郎、北條達也、山田功、
久保田耕、倉科裕行
事務局：筒井宏明、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/corporate/pr/library/review/>
©2022 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。