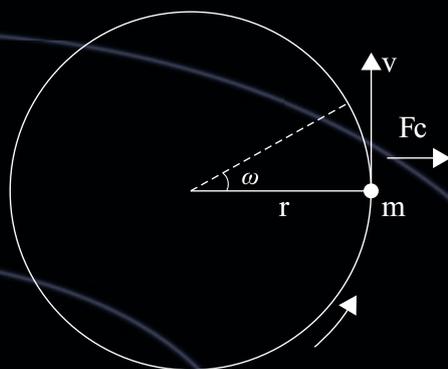


azbil

Technical Review

2012年1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

$$F_c = -2m\omega \times v$$

2012年4月1日
(株)山武からアズビル(株)へ

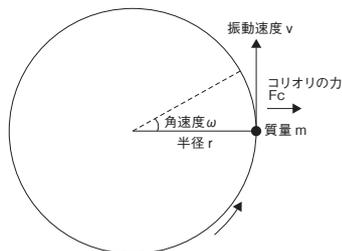
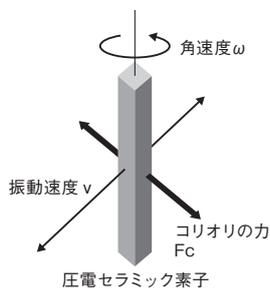
Technical Review

2012年1月発行号

azbil グループ ー技術研究報告書ー
azbil テクニカルレビュー

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

表紙について



振動速度とコリオリの力の関係

100年以上前に成功した地球の自転速度計測が、デジタルカメラの「手ブレ補正機能」に応用されていることをご存知でしょうか。

現在では、当たり前のように搭載されているデジタルカメラの手ブレ補正機能は、従来の「電子式」から画質の劣化をより抑えることができる「光学式」にシフトし、多くのメーカーで開発・発売が続いています。

「光学式」手ブレ補正機能のしくみは、カメラに内蔵された振動型ジャイロセンサにより手ブレ（角速度）を計測し、そのブレを打ち消す方向にレンズや影像素子を移動し光軸を補正するものです。この振動型ジャイロセンサとは、振動用圧電セラミックスなど振動（一次振動）しているものに回転（手ブレ）が加わると「コリオリの力」が検出されるもので、地球の自転速度の計測を応用したものです。

振動式ジャイロスコープは1970年代にアメリカで盛んに研究が行われ、現在ではデジタルカメラ以外にも、カーナビやスマートフォンなどの小型電子機器にも利用が進められています。デジタルカメラの場合には、圧電効果を持つセラミックス振動子（振動速度 v ）などに手ブレによる回転（角速度 ω ）が加わると、振動子（質量 m ）の振動方向と垂直に加わるコリオリの力（ $F_c = -2m \omega \times v$ ）が発生し、この向きと大きさを検出することでカメラが、どの方向にどれだけの速度で動いたかが判るのです。地球の自転によって生じるコリオリの力は、台風の渦の向きや飛行機の航路などに影響を与えることがあっても、日常生活では感じることはできない小さな力です。その小さな力を計測するテクノロジーが、デジタルカメラの手ブレ補正といった日常に活かされています。

Contents

巻頭言：ゼロ・エネルギー建築（ZEB）と自動制御	1
早稲田大学 創造理工学部建築学科 教授	田辺 新一

環境・省エネルギー技術

居住者エネルギー見える化機能の開発	2
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	鈴木 仁美

電磁流量計 電池駆動のための低消費化技術	10
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	井上 陽 光武 一郎
株式会社 金門製作所	荒木 敏文 小島 剛

安全・安心実現のための技術

2次元画像と3次元立体形状を用いたハイブリッド顔認証技術	18
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	中島 寛 長嶋 聖
東北大学	青木 孝文

水用流量計校正の JCSS (ISO/IEC 17025) 登録	26
株式会社 山武	杉山 信幸 山口 徹
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	鈴木 伸
独立行政法人 産業技術総合研究所	古市 紀之

品質・生産性向上のための技術

空調用バルブのライフサイクルメンテナンスの研究	40
株式会社 山武	猿渡 亮
早稲田大学 創造理工学部経営システム工学科	高田 祥三

計装保全の効率化，生産ロスの低減を実現する，プラントライフサイクルを通じた価値を提供する機器管理システムの開発	48
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	渡邊 桂 尾形 竜太
株式会社 山武	尾形 知美

HART 通信対応プロセスコントローラ用 I/O モジュールの開発	56
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	鈴木 伸

蛍光温度センサの開発	62
株式会社 山武	衣笠 静一郎
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	加藤 淳之 菊地 則雄 柳川 雄成

紫外線検出センサ UV チューブの量産技術開発	68
株式会社 山武	關 宏治

Contents

Zero Energy Building and Automatic Control	1
Professor, Department of Architecture, Waseda University	Shin-ichi Tanabe

Environmental and Energy-Saving Technology

Development of an Energy Visualization Function for Residents	2
Building Systems Company, Yamatake Corporation	Hitomi Suzuki

Low Power Consumption Technology for Battery-Driven Electromagnetic Flowmeters ...	10
Advanced Automation Company, Yamatake Corporation Kimmon Manufacturing Co., Ltd.	Taka Inoue Ichiro Mitsutake Toshifumi Araki Tsuyoshi Kojima

Safety-Related Technology

A Hybrid Face Recognition Technology Using a Two-Dimensional Image and a Three-Dimensional Structure	18
Building Systems Company, Yamatake Corporation Tohoku University	Hiroshi Nakajima Sei Nagashima Takafumi Aoki

JCSS (ISO/IEC 17025) Certification of a Calibration System for Water Flowmeters ...	26
Yamatake Corporation Advanced Automation Company, Yamatake Corporation National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Nobuyuki Sugiyama Toru Yamaguchi Shin Suzuki Noriyuki Furuichi

Technology for Better Quality and Productivity

Research on Life Cycle Maintenance of Motorized Valves for Air Conditioning Units ...	40
Yamatake Corporation Department of Industrial and Management Systems Engineering, Waseda University	Makoto Saruwatari Shozo Takata

Development of the device management system which offers the value which actualizes the improvement of efficiency of instrumentation integrity, and the decrease of production loss passes through plant life cycle	48
Advanced Automation Company, Yamatake Corporation Yamatake Corporation	Kei Watanabe Ryota Ogata Tomomi Ogata

Development of an I/O Interface Module for Process Controllers with HART Communication Capability	56
Advanced Automation Company, Yamatake Corporation	Shin Suzuki

Development of a Fluorescence Temperature Sensor	62
Yamatake Corporation Advanced Automation Company, Yamatake Corporation	Seiichiro Kinugasa Atsushi Kato Norio Kikuchi Yusei Yanagawa

Development of Mass Production Technology for Ultraviolet Sensor UV Tubes	68
Yamatake Corporation	Koji Seki

巻頭言

ゼロ・エネルギー建築 (ZEB) と自動制御

早稲田大学
創造理工学部建築学科
教授

田辺 新一



ZEB あるいは ZEH という言葉を耳にしたことがあるでしょうか。ZEB は「ゼロ・エネルギービル」、ZEH は「ゼロ・エネルギーハウス」を意味します。ゼブ、ゼツチと発音します。その、ZEB / ZEH が注目されています。英国では 2016 年までに全ての新築住宅を ZEH 化すると公表していますし、欧州会議では 2020 年末以降に新築されるすべての建築物は、「概ねゼロ・エネルギー (nearly zero energy)」とすると決議しています。

建築や住宅をゼロ・エネルギーで運転するなど不可能ではないかと思われる方もいるかも知れません。しかし、太陽光発電などでエネルギーを作り出すこともできます。すでに住宅では実例もあります。都心の高層ビルなどでは太陽電池の設置面積が圧倒的に不足するでしょうから、オフサイトからグリーン電力を購入してくるといふ裏技も認めればネットでゼロは夢ではありません。現状のコストではまだまだ建設する人は少ないと思われませんが、技術的に不可能なことではないのです。

2011 年 3 月に公開された経済産業省の「省エネルギー戦略 2011」でも業務・家庭部門のキーとなる技術として ZEB / ZEH が取り上げられています。資源のない我が国ですが、建築・住宅部門で 3 割以上もエネルギーを使用しています。日本のエネルギー安全保障のためにはこの方向に進むしか解決策はないと思っています。

ZEB では超省エネルギーと再生可能エネルギー利用がベストミックスで行わなければなりません。そのためには、自動制御の役割が非常に大きいのです。それも個々の住宅や建築だけの範囲にとどまるものではありません。敷地の中で完結して単独で ZEH や ZEB を目指すというのはあまりにも無駄が多いからです。様々な負荷が混在する近隣、都市レベルで結ばれてこそ価値があります。

東日本大震災後の計画停電で体験しましたが、その時我々は ON-OFF という最も単純な制御しかできませんでした。その後の節電のための室温設定の緩和や照明の間引きもある意味では、マニュアル制御の極端なものでしょう。ピークカットが目的ですから、そこで働いている人の生産性は二の次です。

もちろん、大災害の直後ですから、ある程度の我慢は必要でしょう。しかし、東京の最も重要な産業は知識産

業です。節電のために人間の知的効率が低くなっては全く意味がないのです。クリーンルームの生産効率をシビアに考えるのと同じです。世界との競争に勝てなくなる。根性で頑張れと激励されても人間性を無視した節電、省エネは長続きしないでしょう。

ZEB / ZEH を進めていくときには、健康性や快適性を確保した上で、いかに少ないエネルギーで、できればゼロで運転する方法を提供するかを考えることが必要とされます。単純に機械を制御するという考えは捨てた方が良いでしょう。また、知的生産性は、個人の満足度と関係が深いことがわかっています。個人の満足度をどのように読み取り、向上させるか、そのために環境をどのようにコントロールするかが、キー技術になるでしょう。

世界的にはハードを先に販売して利益を得て、それを次の受注までの原資にするというビジネスモデルが苦境に立っています。ただ同然で所有してもらい、その使用により収益を得て発展するビジネスが世の中を席卷しています。建築設備業界も誰でもできるハードを提供して利益を得ることは非常に難しくなっています。人の満足を提供する ZEB サービスプロバイダーになるぐらいの発想が必要なのかも知れません。その時に、自動制御技術は鍵となると思っています。

田辺 新一 (たなべ しんいち)

1958 年福岡県生まれ / 1980 年早稲田大学理工学部建築学科卒業 / 1984 年同大学大学院博士課程修了 / 1984 ~ 86 年デンマーク工科大学暖房空調研究所 / 1992 ~ 93 年カリフォルニア大学バークレー校環境計画研究所 / 1992 ~ 99 年お茶の水女子大学生生活科学部助教授 / 1999 年 ~ 早稲田大学理工学部建築学科助教授 / 2001 年 ~ 現在同大学教授 / 2002 ~ 2003 年デンマーク工科大学客員教授 / 1989 年米国暖房冷凍空調学会 R.G.Nevins 賞受賞 / 1996 年「松下情報通信システムセンター」で空気調和・衛生工学会賞受賞 / 2002 年日本建築学会賞 (論文) / 2006 年米国暖房冷凍空調学会 (ASHRAE) Fellow / 2009 年「鹿島赤坂別館」で空気調和・衛生工学会賞受賞など / 主な著書に『室内化学汚染・シックハウスの常識と対策』(1998 年, 講談社) 他

居住者エネルギー見える化機能の開発

Development of an Energy Visualization Function for Residents

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

鈴木 仁美
Hitomi Suzuki

キーワード

改正省エネ法, テナントビル, エネルギー見える化, ビルマネジメント

「エネルギー使用の合理化に関する法律」(省エネ法)が改正され、テナントビルのオーナーには、入居テナントへのエネルギー使用量の情報提供が求められるようになった。これに対応して、テナントビルオーナーからビル居住者へ提供する、エネルギー報告書作成機能と居住者別のエネルギー推移データグラフ作成機能を、ビルマネジメントシステムとテナントサービスサーバを用いて開発した。その概要を報告する。

Due to revision of the Act on the Rational Use of Energy (Japanese energy conservation legislation), building owners are now required to provide tenants with information on their energy consumption. To meet this requirement, we developed a system by which building owners can create energy reports and data graphs showing changes in tenant energy consumption using our building management system and tenant service server. We give an overview of this system.

1. はじめに

「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(以下省エネ法)の改正を契機に、テナントビルのエネルギー使用量を入居テナントごとに管理し、エネルギーデータとしてテナントに提供するシステムを開発した。

このシステムでは、テナントビルオーナーに以下のメリットを提供する。

- ・ 入居テナントへのエネルギー報告業務の効率化
- ・ 入居テナントの省エネ活動の推進

2. 開発の背景

2009年4月に改正省エネ法が施行され、エネルギー使用状況等の定期報告書の提出が、それまでの建物単位から、事業者(企業)単位に変更された。これにより、企業全体のエネルギー使用量の原油換算値が1,500kl/年以上であると、定期報告書の提出が必要となった。

これを受けて企業は、企業全体のエネルギー使用量の把握が必要となる。企業の一部(または全部)が、テナントビルにテナントとして入居している場合、そこで使用しているエネルギー使用量も把握して合算す

る必要がある。

テナントビルの入居テナント側でエネルギー使用量を把握するには、テナント側で計測できない部分のエネルギー使用量について、テナントビルオーナーに情報提供を求めることになる。テナントビルオーナー側には報告義務が課せられる。

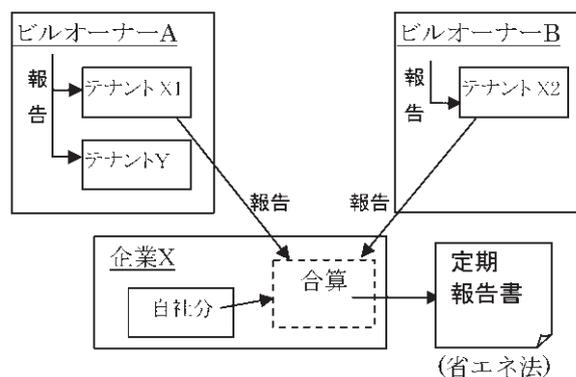


図1. エネルギーデータの報告の流れ

テナントビルオーナーは、個々の入居テナントのみが使用するエネルギー使用量について、課金目的で計測、集計している場合が多い。この計測値は、テナン

トへのエネルギー報告にも利用できる。しかし、課金目的の集計と省エネ法報告データの集計では、集計方法が異なる。このため、テナントビルオーナーは、課金用とは別に、エネルギー報告用としてテナントのエネルギー使用量を集計する必要がある。

また、改正省エネ法対応で、テナントビルオーナーがテナントに報告すべきエネルギー使用量には、空調によるエネルギー使用量も含まれるが、セントラル空調を採用しているテナントビルの場合、一般にはテナントごとの空調エネルギーを計測していない。テナントビルオーナーはこれを計測し、エネルギー報告用のデータに加える必要がある。

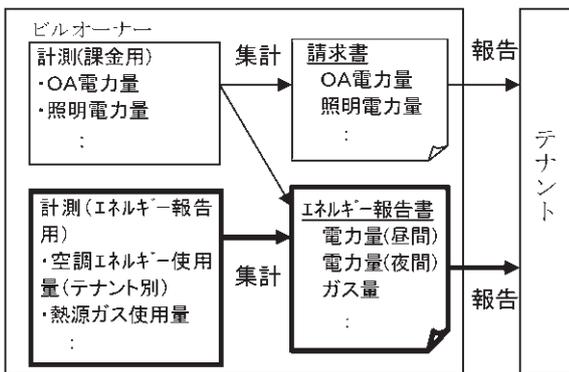


図2. テナントへのエネルギー報告

本開発では、上記のテナントビルオーナーのニーズに対応した居住者エネルギー見える化機能として、以下の機能を開発した。

- ・ テナントビルオーナーが、入居テナントへ、改正省エネ法での定期報告書作成に利用するエネルギーデータを報告する。
- ・ テナントビルオーナーが、入居テナントの省エネ活動を推進させることを目的として、入居テナントへ、エネルギーデータ見える化サービスを提供する。

3. システム構成

居住者エネルギー見える化機能は、ビルオートメーションシステム（以下BAS）のシステム構成の中で、ビルマネジメントシステム（以下BMS）と、テナントサービスサーバ（以下TeSS）で実現させた。

BMSにはエネルギー情報の収集・蓄積機能があり、TeSSには、テナントクライアントとの接続機能があった。この機能分担を利用して、BMS、TeSSそれぞれに新たな機能を追加した。

運用時のシステム構成は、BAS + BMS、もしくはBAS + BMS + TeSSの2通りとした。BAS + BMS + TeSSの構成で、一般的なシステム構成例を図3に示す。

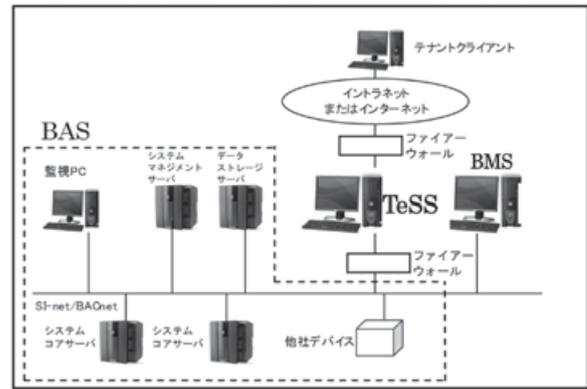


図3. システム構成図

BMSは、建物の運営管理業務機能（設備保全機能、検針機能など）を受け持つシステムである。

BMSでは従来、建物のエネルギー管理機能を有していた。これは、BASから実測点のデータを収集・蓄積し、必要に応じて実測点を演算処理して論理点を作成し、ビルオーナーおよびビル管理者向けに、エネルギーデータのグラフ表示や、CSVファイル出力を行う機能である。このエネルギーデータを用いて、以下の機能を有する「居住者エネルギー管理機能」を開発した。

- ・ テナント情報と、貸付区画情報を管理する。
- ・ テナントごとにエネルギーを集計し、テナント向けのエネルギー報告書を作成する。
- ・ テナントごとのエネルギー使用量を、積層／トレンドグラフ形式のエネルギー推移グラフとして作成し、表示、印刷、CSVファイル作成を行う。

TeSSは、テナントのパソコンによる、BASの運用設定機能（空調温度設定、空調延長設定など）を受け持つシステムである。

TeSSでは従来、接続するテナントユーザーをパスワードによるログインで管理するための、ユーザー管理機能を有していた。このテナントユーザー管理機能と、BMSで設定したテナント情報と連携させ、以下の機能を有する「居住者エネルギー表示機能」を開発した。

- ・ テナントユーザーが、自テナント向けのエネルギー報告書をダウンロードする
- ・ テナントユーザーが、自テナントのエネルギー推移グラフの表示、印刷、CSVファイル作成を行う。
- ・ テナントユーザーが、エネルギー使用量に対し、目標値設定や、テナント内での小計設定を行う。

4. 開発の留意点

本システムの開発にあたり、以下の点に留意した。

- ・ エネルギー報告書のエネルギー使用量データは、省エネ法の定期報告書作成に容易に利用できるデータとするため、省エネ法のデータ分類に合わせて集計する。その際、集計のための演算式設定は不要とすること。

- ・ テナントの入れ替わりなどの運用上の設定変更に対して、容易に継続運用できるよう最低限の設定を行うだけで済むように工夫すること。
 - ・ テナント向けのエネルギー表示画面では、簡単な操作でエネルギー分析できるように工夫すること。
- これらの留意点を踏まえて開発した、BMSの居住者エネルギー管理機能とTeSSのテナント向けエネルギー表示機能の特徴を、以下の4つの観点で紹介する。
- ・ エネルギー報告書用データ集計
 - ・ 運用中のデータ設定変更
 - ・ データ比較
 - ・ テナントへの情報提供サービス

5. エネルギー報告書用データ集計

居住者エネルギー管理機能で用いるエネルギーデータ向けに、従来のBMSエネルギー管理機能用に収集・蓄積していたエネルギーデータに加えて、省エネ法向けのデータ集計機能を開発した。追加した集計データは以下の2つである。

- ・ 電力の昼夜別集計
- ・ 締め日による月集計

5.1 電力の昼夜別集計

省エネ法の定期報告書で報告するエネルギーデータは、以下の3つである。

- ・ エネルギー種別ごとのエネルギー使用量
- ・ エネルギー種別ごとの熱量換算値と、その合算
- ・ 合算された熱量換算値をもとに換算した原油換算値

このとき、エネルギー種別の1つである電力量は、昼夜別に集計して熱量換算した方が、正しい熱量換算値が得られるため、昼夜別に集計することが望まれる。電力量を昼夜別に集計すると、昼夜別に集計しなかった場合（すべて昼間として扱う）に比べ、熱量換算値は小さくなる。これは電力量の熱量換算係数が、夜間のほうが昼間より小さいためである。

従来のBMSでも、演算式を設定することで、昼夜別のデータ集計は可能であった。ただし、全時間帯で計測する実測データと、実測データを演算処理して得られる昼間使用量データと、夜間使用量データの3つに分かれるため、その後のグラフ表示時に3つを組み合わせ設定する必要があることなど、やや扱いにくかった。

これを改善するため、全時間帯で計測する実測データに対し、オプションデータとして昼間使用量、夜間使用量のデータを作成し、1組のデータとして扱うことができるようにした。この昼間使用量、夜間使用量のデータは、居住者エネルギー管理機能だけでなく、従来のエネルギー管理機能でも利用できることとし、グラフ設定も容易になった。

5.2 締め日による月集計

従来のBMSエネルギー管理機能では、月データは1日～月末で集計している。居住者エネルギー機能では、設定された月締め日で集計することにより、エネルギー管理機能の月データとは別の月別、年別の集計データを作成する。これは、課金用データが任意に設定できる毎月の検針日による月データのため、これが月末締めでない場合に、エネルギー報告書の月集計を課金用データと同じ期間で集計するためである。

5.3 エネルギーデータの種類

上記昼夜別集計、締め日での月集計を追加開発したことにより、BMSで蓄積するエネルギーデータの種類は表1に示す構成となった。これらのデータをエネルギー管理機能と居住者エネルギー管理機能で共用している。

表1. エネルギーデータ種類

	集計期間	時	日	月	年	月	年
				月末締め		締め日	
積算点	正時読値	○					
	偏差値*	◎	◎	○	○	□	□
	昼偏差*	◎	◎	○	○	□	□
	夜偏差*	◎	◎	○	○	□	□
アナログ点	瞬時値	○					
	平均値	◎	◎	○	○	□	
	最大値	○	◎	○	○	□	
	最小値	○	◎	○	○	□	

- エネルギー管理機能のみで利用
- 居住者エネルギー管理機能のみで利用
- ◎ 共用

網掛け部分は今回追加開発したデータ集計種類

*偏差値は集計期間の使用量、昼偏差は時データ9時～22時（8:01～22:00）の使用量、夜偏差は昼偏差以外の使用量

6. 運用中のデータ設定変更

テナントビルでは、運用中にテナントの入居／退居が発生するが、その際の設定変更作業を効率的に行うため、「貸付区画設定」と「単位桁合わせ機能」を開発した。

6.1 貸付区画設定

テナントビルでは、テナントに貸し出す最小の単位として、貸付区画を設定する。テナントに光熱費を課金する目的で、電力量などを計測する場合、貸付区画ごとに計測することが望まれる。貸付区画ごとに計測せず、1つの計測データを複数のテナントの使用量に

案分する場合も、その最小単位は貸付区画となる。
本システムでは、貸付区画ごとに計測データを設定しておく。

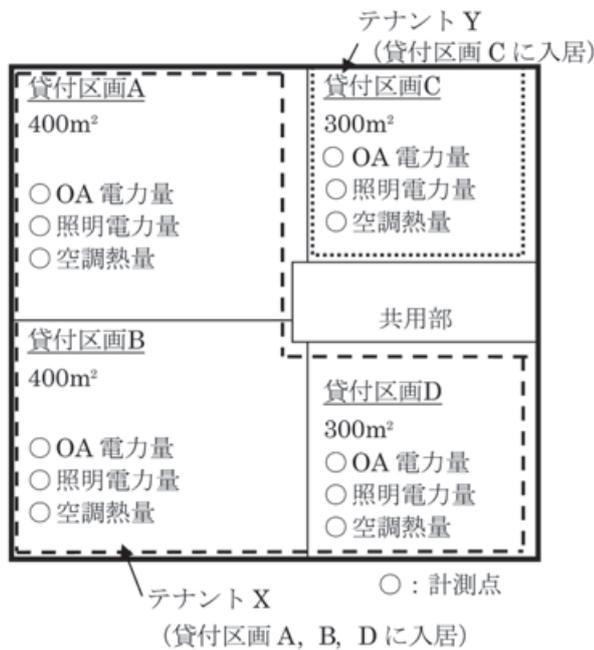


図4. テナントビルフロア平面図イメージ

これと平行して、テナントごとに、個々の貸付区画を割り当て、その利用期間を設定する。

テナントごとのエネルギー集計時には、この2種類の情報を組み合わせ、そのテナントの利用している貸付区画に割り当てられている計測データからエネルギー使用量を集計する。テナントの入居/退居が発生したときは、貸付区画とテナントの割り当て設定を変更するだけで、計測データの集計用に演算式を設定変更する必要はない。

6.2 単位桁合わせ

各テナントのエネルギー使用量を集計する際、集計対象の全てのメータで、計測している値の単位が同じとは限らない。たとえば電力量の計測点でMWhとkWhが混在する場合などがある。従来のBMSではこれらを集計する際に、桁合わせの演算設定が必要だった。居住者エネルギー管理機能では、テナントのエネルギー使用量を集計する際に、この単位桁合わせを自動的に行うため、集計するデータの組合せが変わっても演算式の設定変更は必要ない。これはMWhとkWh、m³とl（リットル）など桁合わせすることにより集計できる複数の単位を、単位系列としてべき乗係数とともにあらかじめ登録しておき、複数の計測データを集計する際に、集計結果の単位と違う単位は設定されたべき乗による変換を行ってから集計することによる。

さらにこの単位系列を利用して、貸付区画に計測点を設定する際の単純な設定ミスを回避するため、同じ

エネルギー種別は同じ単位系列の計測点だけで構成されるよう、設定制限をかけている。

7. データ比較機能

テナントの省エネ活動の推進に役立てられるよう、エネルギー報告書とエネルギー推移グラフには、いくつかのデータ比較機能を準備した。

7.1 自テナントの過去実績データとの比較

エネルギー使用量を過去実績データと比較することは、エネルギー使用量を検証する上で、一般的によく行われている。

エネルギー報告書では、1か月データとその月までの年累積値を併記し、それぞれ過去データとの比較を行っている。1か月データでは前月比、前年同月比を表示し、年累積値では、前年度のその月までの累積値と比較する。

図5. エネルギー報告書例

月単位のデータを過去データと比較する場合、エネルギー報告書のように月合計の比較であれば、たとえば1日から月末までなどの同じ期間で合計し、比較すればよい。だが、月間の日データを前月や前年同月と比較する場合、単純に1日から月末で比べると、曜日での違いが大きく直感的には比較しにくい。そのため、曜日合わせオプションを設け、比較の期間をずらし曜日を合わせて比較できることとした。

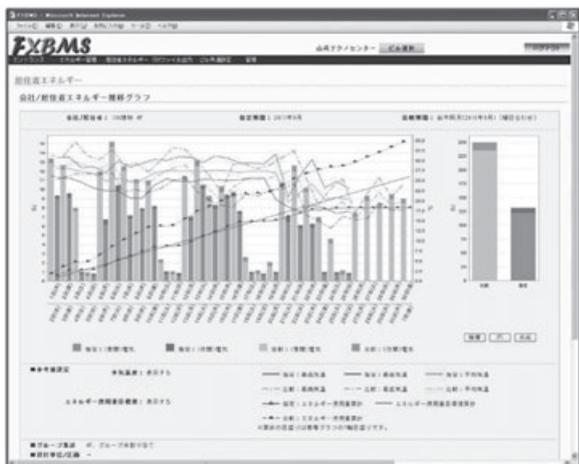


図6. 曜日合わせ比較を用いた月グラフ例 (BMS・エネルギー種別ごと)



図7. 曜日合わせ比較を用いた月グラフ例 (TeSS・エネルギー種別詳細ごと)

これにより、視覚的な比較が容易に行える。

なお、比較データを作成する際、6.1 貸付区画設定と組み合わせて、過去に同じテナントで利用していた区画のみを、比較対象として集計している。たとえば昨年同月には別のテナントがその貸付区画を利用していた場合は、比較値としては利用しない。これにより、テナントのエネルギー使用量の情報漏洩を防止している。

7.2 目標値との比較

エネルギー推移グラフでは、エネルギーデータ実績と比較するため、テナントごとに、月別または年合計の目標値を設定できる。

省エネ活動への積極性、今までの省エネ活動の実績などは、テナントで差があると考えられるため、

- ・ 省エネ活動を始めたばかりのテナント→年合計
- ・ 入居したてのテナント→年合計

- ・ 月データを把握済みのテナント→月別
- ・ きめ細かく省エネ目標を設定できるテナント→月別

というように、テナントごとに目標値を選択できる。

また、目標値にするデータの種類も、熱量換算値、CO₂排出量換算値の2つのいずれか、または両方を設定でき、テナントの省エネ活動目標に合わせて選択できる。

7.3 テナント間の比較

エネルギー使用量をテナント間で比較することにより、テナントビルオーナーは省エネ余地のあるテナント候補を確認できる。テナント間の比較は面積を基準にした原単位で行う。面積は、貸付区画ごとに設定しておき、個々のテナントが利用している貸付区画の面積を合計し、エネルギー使用量をその面積合計で割って原単位を計算する。

この原単位データを用いて

- ・ 全テナントランキング
- ・ 1テナントの順位のみ

の2種類のエネルギー効率順位グラフを作成する。

全テナントランキングのエネルギー効率順位グラフは、テナントビルオーナー（またはビル管理者）向けである。これにより省エネ余地のあるテナントを判別し、該当テナントには省エネに関する働きかけを行うことができる。



図8. 全テナントのエネルギー効率順位グラフ

また、本システムを自社ビル用に転用して、テナントの代わりに各部門などを設定する運用も可能である。この場合は、ランキングを自社内に公開することにより、各部門で競わせるなどして、省エネ意識を高めるために利用することもできる。

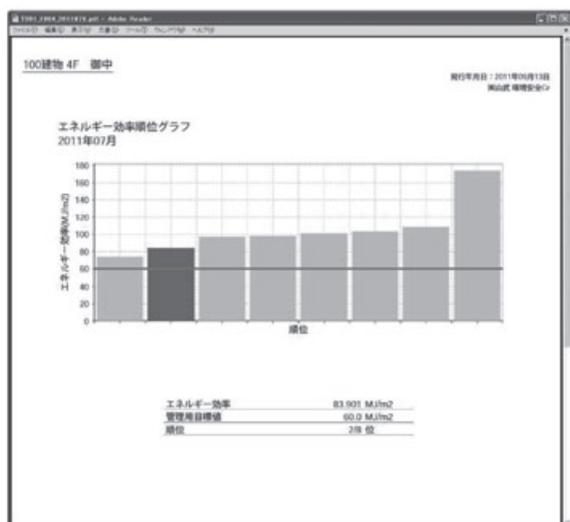


図9. テナントごとエネルギー効率順位グラフ

8. テナントへの情報提供サービス

テナントビルオーナーが、テナントへエネルギー使用量を提示する手段は、ビルの運用形態により様々である。

本システムでは、以下の2つの運用形態を想定し、各機能を開発した。

- ・ 印字したエネルギー報告書をテナントに提出する。
- ・ インターネットまたはイントラネットで、テナントのパソコンと接続し、テナントユーザーが直接エネルギーデータを確認する。

8.1 エネルギー報告書の作成

エネルギー報告書は、テナントビルオーナーが各テナントへエネルギー使用量を報告する業務に用いる。このエネルギー報告書は、そのまま直接省エネ法の定期報告書とするものではない。そのため、テナントの省エネ活動への支援に重点をおき、テナントビルオーナーからテナントに対して、毎月、月別エネルギー使用量を報告する運用想定とした。ただし、報告する月までの年累計値も集計することとして、年度末のエネルギー報告書の年累計値が、その年の年合計値となるようにした。

このことで、

- ・ テナントは、年合計値を、省エネ法の定期報告書用のデータとして利用できる。
- ・ テナントは、毎月、エネルギー使用量の推移を確認でき、年度途中での省エネ活動の検証ができる。
- ・ テナントビルオーナーは、月別にエネルギー報告書を作成すれば、年度末に年合計値を作成する必要がない。

エネルギー報告書は、ビルオーナーからの正式な報告データとして扱われることを想定し、容易に改竄できないようPDFファイル形式とした。また、報告業務の効率化のため、画像ファイルとしての印影登録によ

るエネルギー報告書への印影付加も可能とした。

エネルギー報告書のフォーマットは、Excel 雛型ファイルで作成した。テナントビルオーナーの要求による、軽微なフォーマット変更（文字サイズや、報告者の社名位置の変更など）は、このExcel 雛型ファイルの修正で対応し、エネルギー報告書作成プログラムの変更は不要とした。

エネルギー報告書の作成指示を行うと、以下の動作を順次自動的に行う。

- ・ エネルギー報告書用データの集計およびCSV ファイルを作成する
 - ・ Excel 雛型にCSV ファイルを読み込み、Excel シート上でエネルギー報告書フォーマットに成型する
 - ・ 成型したExcel シートをPDF ファイルに変換する
- PDF ファイルの形成過程で、Excel シートを作成しており、エネルギー報告書をExcel シートで作成する要望があった場合に、容易に対応できる。

また、エネルギー報告書の提供に合わせて、テナントへグラフ化されたデータを提供するサービスも想定した。月ごとのデータをグラフ化することで、テナントの省エネ意識の向上に役立てられる。作成できるグラフは、エネルギー種別ごと、全エネルギー種別の発熱量換算、および用途（貸室・空調）別発熱量換算の3種類とした。

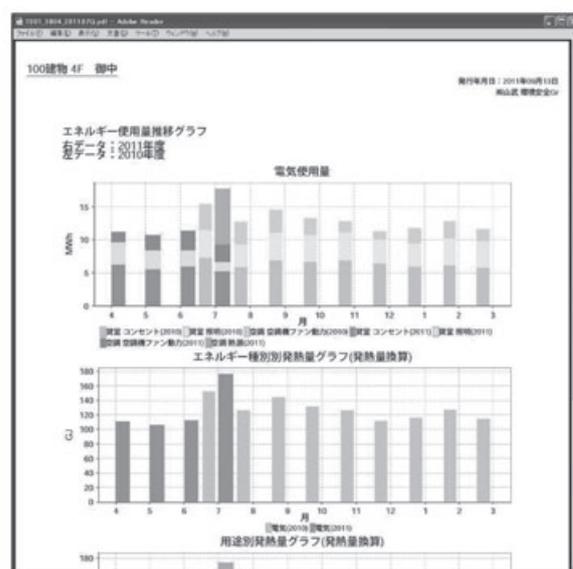


図10. エネルギー使用量推移グラフ (エネルギー報告書用)

8.2 テナント居住者によるエネルギー推移データの表示

テナント居住者へのエネルギーデータ提供の形態として、月別のエネルギー報告書だけでなく、より近隣のエネルギー使用量データをテナントに提供することは、テナントの省エネ活動推進に、さらに効果的であると考えられる。

そのため、テナントのパソコンをBASに接続し、オンラインでエネルギーデータを提供する機能を開発し

た。この機能では、直近の 1 時間前までのエネルギー使用量をテナントが直接確認できる。

このテナント居住者のエネルギー表示機能は、TeSS と BMS で連携した機能として開発した（図 3 参照）。

TeSS は、インターネットまたはイントラネットを介してテナントのパソコンと接続しており、テナントユーザー管理情報を保持している。テナントユーザーは、テナントのパソコンから TeSS を介して BAS と接続することができる。

一方、テナントのエネルギー使用量は、BMS で収集・蓄積・集計している。BMS では、これらのテナントのエネルギー情報以外に、テナントへの課金情報や、建物設備修繕費用などの、ビル運用情報も保持している。

データセキュリティ上の観点から、テナントとの接続は TeSS で行うシステム構成は維持し、BMS から TeSS に対して、テナントに提供するエネルギー使用量を受け渡す機能を追加した。

このため、BMS 側で保持しているエネルギー使用量に関するテナント情報と、TeSS 側で保持しているテナントユーザー情報を、TeSS 側で紐つける。テナントユーザーがエネルギー使用量をグラフ表示する際は、TeSS がテナントからの表示要求を BMS に通知し、BMS でエネルギー使用量を集計しグラフ化して、TeSS に受け渡す。TeSS はその結果を受け取って、テナントユーザー向けに表示する。

TeSS は、外部のネットワークと接続するため、BAS のネットワーク保護目的で、FW（ファイアーウォール）を介して BAS と接続している。そのため、TeSS と BMS との通信では、FW で通信ポートを開けている、HTTP 通信（ポート:80）を利用した。また、開発効率と拡張性の高さを考慮し、XML 形式データを受け渡す方法で開発した。

9. おわりに

今回、省エネ法の改正を契機にテナントのエネルギー見える化機能を開発したが、機能目的はテナント居住者の省エネ活動推進である。今後、オンラインでの BAS とテナントの接続、およびテナントへの情報提供ニーズは、増えていくものと想定される。そこでテナントが求める情報は、テナントによって様々であり、世間情勢によっても変化していく。さらに、BAS や BMS の利用者であるテナントビルオーナーやビル管理者と違い、テナント居住者の要求は、機能・デザイン・操作性・接続方式など、多角的であると想定でき、IT 環境の変化により、その要求の変化も大きい。

今後は、このような状況の中で、テナントひいてはビル居住者の省エネ活動に寄与する機能、そして「見える化」の次にある機能とは何かを捉え、システムの機能として展開していく取組みを実施していく。

<商標>

Excel は、米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標または商標です。

<著者所属>

鈴木 仁美 ビルシステムカンパニー
開発本部開発 1 部

電磁流量計 電池駆動のための低消費化技術

Low Power Consumption Technology for Battery-Driven Electromagnetic Flowmeters

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー Taka Inoue

井上 陽

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー Ichiro Mitsutake

光武 一郎

株式会社 金門製作所
荒木 敏文
Toshifumi Araki

株式会社 金門製作所
小島 剛
Tsuyoshi Kojima

キーワード

電磁流量計, 電池駆動, 低消費電力, 水道メーター

水道メーターの規格を満足するために、電池交換不要で8年間駆動し、より広い計量範囲を持つ電磁方式の水道メーターを開発した。電池という限られた電力の中でより広範囲の計測を可能とした技術について報告する。

To better meet the required specifications for a custody transfer meter used to measure water consumption, an electromagnetic meter which can operate for 8 years without battery replacement, and which has a wider measuring range than conventional meters, has been developed. We report on the technology that has enabled a wider rangeability of measurement in a meter using only battery power.

1. はじめに

取引・証明用の水道メーターに適用される計量法が2005年10月に改定された。この改定で、従来計量法の特定計量器検査規則にて技術要件が規定されていたが、新基準では日本工業規格のJIS B8570へ移行された。それに伴い、2011年4月以降は新基準に適合した水道メーターのみ販売可能となった。

新基準では計量範囲の考え方や定義が大幅に変わり、要求される検定公差の流量範囲の比も変更された。また、許容される圧力損失の規定も厳しくなった。

水道メーター市場では機械式(羽根車式)が主流であるが、より厳しくなった圧力損失の規定および安定した流量特性に対応させることは口径が大きくなるほど難しい。さらに、大口径を使用するユーザからは大流量の連続測定などの期待が大きい。

そのため当社では測定原理に、機械的可動部がないため圧力損失が発生せず大流量測定に適している電磁式を採用した。電磁式は機械式と異なり、流量測定に電源を使用する。そのため、外部からの電源供給なし

でJISの規定にある有効使用期間8年間の駆動を実現する必要がある。

本稿では、電磁式水道メーター(以後、電池電磁TMと呼ぶ)として、電池交換不要で8年間駆動できる低消費電力技術および広範囲の計測を可能にした技術を紹介する。

なお、本製品が対象とするのは、口径50~200mmの主に公共設備や集合住宅の親器に使用される水道メーターである。



図1. 電池電磁の外観

2. 製品要求と仕様

電池電磁の特徴と水道メーター市場に要求される製品の仕様を紹介する。

2.1 口径

azbilグループでは、新基準の水道メーターとして機械式で口径13～100mmを開発している。電磁式は口径50～200mmを製品化しており、口径50～100mmは大流量測定などの使用条件により機械式・電磁式を選択できる。

表1. azbilグループが提供する水道メーターの原理毎の口径

	13	20	25	30	40	50	65	75	100	125	150	200
機械式	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
電磁式						○	○	○	○	○	○	○

2.2 計量特性

水道メーターの計量範囲は大流量域と小流量域とに分かれ、大流量域の検定公差は $\pm 2\%$ ・小流量域は $\pm 5\%$ で規定される。なお、検定公差とは計量法に規定される特定計量器検査におけるメーター器差の許容値である。

従来の計量要件は定格最小流量（旧基準では最小流量と呼ぶ）と定格最大流量（旧基準では使用最大流量と呼ぶ）の比が1:66（以降この比を計量範囲と呼ぶ）である。一方、新基準では計量範囲が任意である。

表2. 流量の定義

定格最小流量 Q1	メーターが検定公差内($\pm 5\%$)で作動することが要求される最小の流量。
転移流量 Q2	大流量域(検定公差内 $\pm 2\%$)と小流量域(検定公差内 $\pm 5\%$)との2つの領域に区分する境界の流量。
定格最大流量 Q3	メーターが検定公差内($\pm 2\%$)で作動することが要求される最大の流量。

本開発では、流量測定の範囲を広げるため、計量範囲1:200を目標とした。図2に旧基準と電池電磁の計量範囲の比較を示す。電池電磁は旧基準に比べ計量範囲が広く大流量域が広いことがわかる。

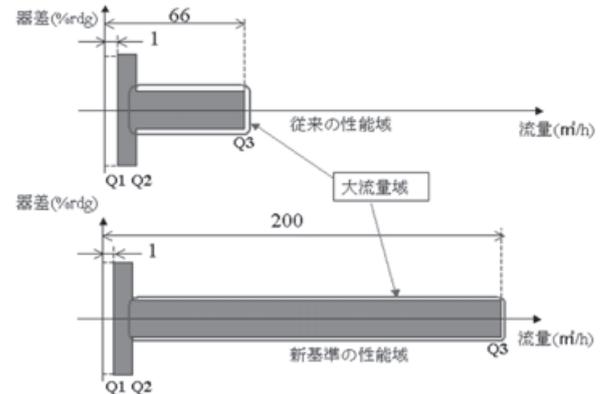


図2. 旧基準と電池電磁の計量範囲の比較

小流量域も、旧基準では定格最小流量と転移流量の比が1:6.6であったが、新基準では定格最小流量と転移流量の比が1:1.6となっている。

図3に示すように、検定公差 $\pm 2\%$ が要求される下限が広がっており、この仕様も電池電磁で実現する必要がある。

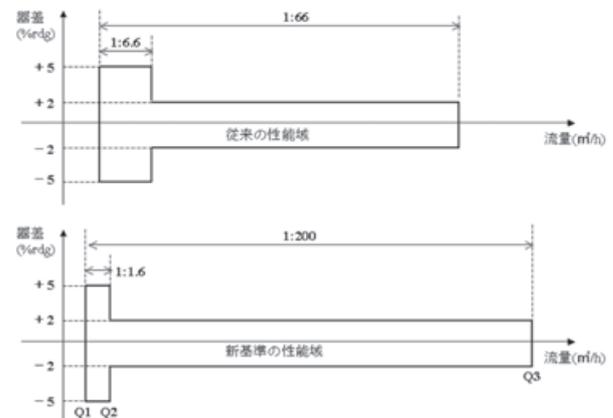


図3. 旧基準と新基準の計量範囲の比較（小流量域）

なお、旧基準と新基準の計量範囲を比較するために図2、図3では旧基準でもQ1・Q2・Q3により、最小流量・転移流量・使用最大流量の範囲を示している。

2.3 電池駆動

水道メーターは従来から機械式が主流であったため、外部からの電源供給は不要である。また、設置場所も電源が供給できるような場所がほとんどないため、電磁式では電池駆動が必要となる。

水道メーターは有効使用期間が8年であり、その有効使用期間よりも少なくとも1年以上メーターが正確に作動するように規定されている。そのため電池寿命として9年を必要とする。

3. 電磁流量計の概要

3.1 電磁流量計の測定原理

電磁流量計は、ファラデーの電磁誘導の法則を応用した流量計である。

ファラデーの電磁誘導の法則とは、「磁界の中を物体が動くと、その物体内に起電力が発生する」というものである。

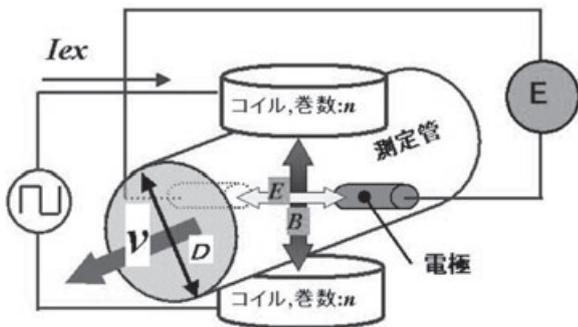


図4. 電磁流量計の測定原理

発生する起電力はファラデーの法則に基づいて、以下のように表せる。

$$B \propto n \cdot I_{ex} \quad \text{式 (1)}$$

$$E = kBDv \quad \text{式 (2)}$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad \text{式 (3)}$$

B : 磁束密度, n : コイルの巻数, I_{ex} : 励磁電流

E : 起電力, k : 定数, D : 内径, v : 流速, Q : 体積流量

(1) 検出器内の巻数 n のコイルに励磁電流 I_{ex} を印加すると、コイルとコアにより、磁束密度 B が測定管内に印加される。

(2) (1) の状態で導電性の液体が流速 v で流れると式 (2) に従い、起電力 E が流体内に発生する。この起電力 E を測定管内壁に磁気回路と直行した位置に設けられている一対の電極にて検出し、変換器内に取り込む。

(3) この E は式 (1) より流速に比例し、式 (3) に基づき、変換器内にて体積流量 Q に変換される。

3.2 電磁流量計の構成

電磁流量計は検出器と変換器から構成される。

検出器は測定する流体を流し、発生した起電力を電極で検出する。

変換器は励磁電流を検出器内のコイルに流し、また電極から得られる起電力の信号処理を行う。

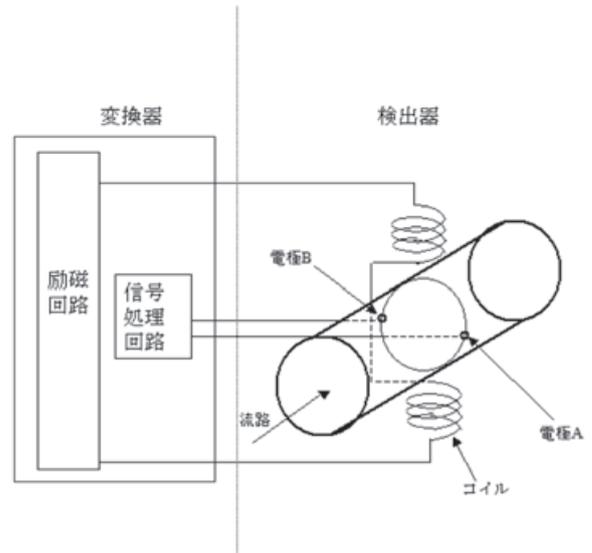


図5. 電磁流量計の構成

変換器では、電極から得られる微小な流量信号を増幅とノイズの除去を繰り返しながら、より S/N 比の高い信号を流量信号として取り出している。その信号処理を図6に示す。

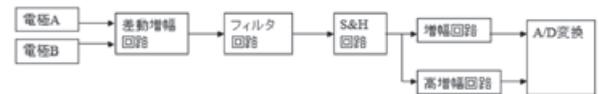


図6. 信号処理回路ブロック図

3.3 電源方式による消費電力の比率

電磁流量計はその原理より安定した出力を得るために、供給する電流を多くするほど、安定した流量計測が可能となる。

電池電磁では、従来機種と比較して約 1/5000 の低消費電力化が必要となってくる。表3に電池電磁の消費電力の比較を示す。

表3. 電磁流量計の消費電力比較

従来機種*	電池電磁
11W	2.4mW

*従来機種は当社 MGG10C

4. 広範囲の流量計測の実現

4.1 広範囲の計測には

電磁流量計は図4に示すように測定管内に配置された一対の電極から起電力を得ている。一方で電極からは様々な種類のノイズも拾い、流量測定に影響を与えてくる。この S/N 比を高くすることで安定した流量計測を可能とする。

また、低流速と高流速では発生するノイズの特徴も

異なり、安定した広範囲の計測にはそれぞれのノイズを除去することが必須である。

S/N比向上のため、下記の3通りの方法に着目した。

①の励磁電流の増加は消費電力に依存するため5項の低消費電力化で述べる。本項ではノイズ対策について説明する。

- ① 励磁電流増加
- ② 検出器によるノイズ抑制
- ③ 変換器によるノイズ除去

4.2 電池電磁のノイズ

表4に流体から起電力Eに重畳してくるノイズの分類を示す。これらのノイズが重畳してくると、流量測定誤差要因となる。

表4. 電池電磁のノイズ

ノイズ種類	説明
コモンモードノイズ	流体の持つ電位変化により発生するノイズ
フローノイズ	流速、流体導電率に依存したノイズ
商用電源ノイズ	商用電源で動作する機器から発生するノイズ

コモンモードノイズは流体の持つ電位変化により発生するノイズで、全流量範囲に影響してくるノイズである。特に流速が低い時は起電力が小さいため、その影響が顕著に現れる。

フローノイズは流速や流体導電率に依存し、電極にノルマルモードノイズとして発生するノイズである。

商用電源ノイズは商用電源で動作する機器から発生するノイズである。設置される現場によっては、装置の商用電源ノイズが配管から容量結合して流体に重畳してノイズ成分として発生する可能性がある。

4.3 ノイズ対策

4.3.1 コモンモードノイズ

本開発ではコモンモードノイズに対して、検出器では(1)に示す確実な流体基準電位の確保を、変換器では(2)に示す差動増幅回路のコモンモードノイズ除去比(Common-Mode Rejection Ratio, 以下CMRRと省略する)を向上することによりノイズ影響を小さくすることを実現した。

(1) 検出器による測定基準電位の安定

電磁流量計では、流体の持つ電位変動を吸収するため流体電位を基準として取る必要がある。そのため、検出器内部(通常は両端)に導電性のある接液部(以降接液部と呼ぶ)を設け、その接液部の電位を基準電位として扱う。

接液部は接液面積が広い程、確実な基準電位が取れる。しかし、検出器内には起電力を逃さないように絶縁のライニングが必要なため、単純に接液部を増やすことは難しい。



図7. 電池電磁の流体測定部

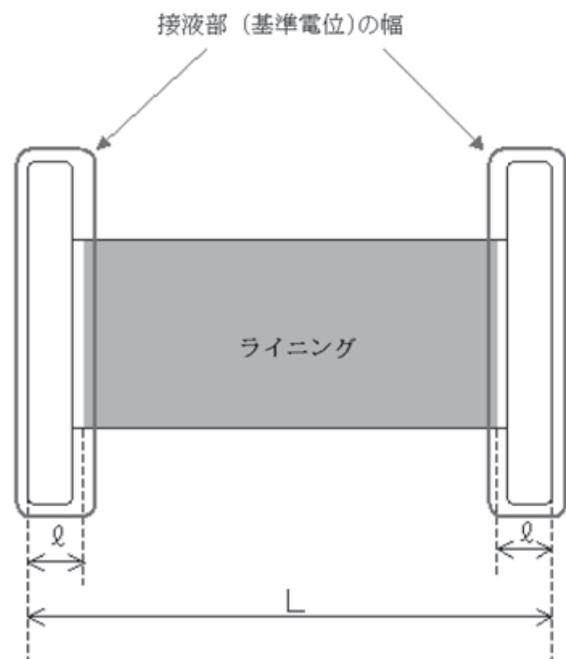


図8. 接液部の幅

図8のように検出器の面間をLとし、接液部の幅を ℓ とする。ライニングの幅は、 $(L - 2\ell)$ で表わされる。

ℓ を増やしていくと、安定した基準電位が確保できるため、S/N比のNが下がる。一方で、ライニング部の幅は狭くなっていくため、Sが下がっていく。

ℓ の幅とS/N比をグラフ化したものが図9となる。本開発では各口径毎に最適な接液幅とすることで、基準電位の安定と起電力の獲得(S/N比向上)を実現している。

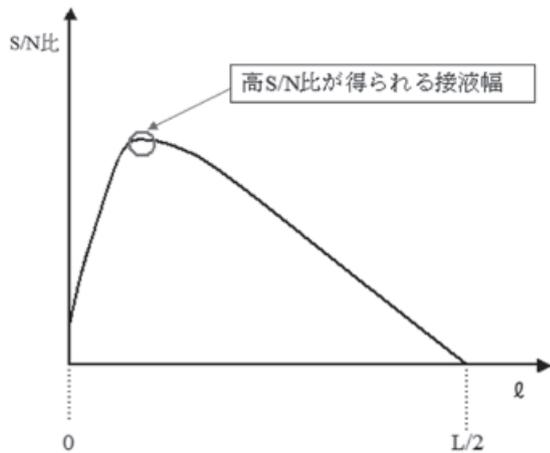


図9. 接液部とS/N比の関係 (イメージ)

(2) 変換器のコモンモードノイズ除去特性

検出器で抑制されたコモンモードノイズはさらに変換器の差動増幅回路により除去する。差動増幅回路は図6に示すように、電極A・Bから得た信号を最初に増幅する回路である。

本開発では差動増幅回路の回路構成を変更することにより、従来の方式と比べてCMRRを向上させている。

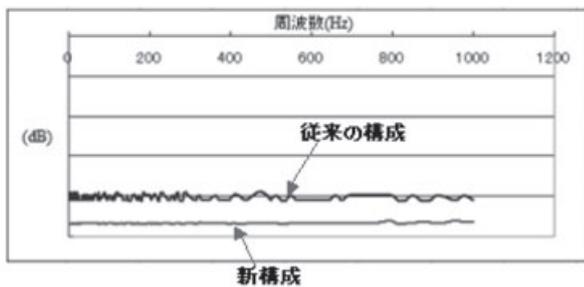


図10. 差動増幅回路の構成によるCMRRの比較

図10は電極A、Bから周波数1Hz～1000Hzの電気信号を入力した時の差動増幅回路での減衰率を示す。新回路構成により、ノイズが約100倍(-40dB)減衰している。

4.3.2 フローノイズ対策

高流速を測定する時には流量信号に図11のようなフローノイズが重畳してくる。本開発は信号起電力の増幅率を増やしているため、フローノイズの増幅も大きいことから、この影響を減らしていくことが必要となる。

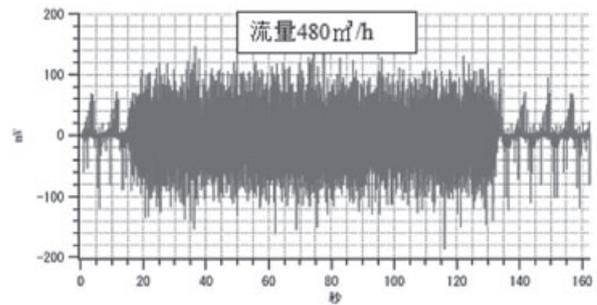


図11. フローノイズ波形

この影響を減らす方法として信号処理回路のサンプル&ホールド回路(以降S&H回路)に着目した。S&H回路は信号を励磁周波数 f_{ex} でサンプリングする回路である。特性は $f_{ex} \cdot 3f_{ex} \cdot 5f_{ex}$ と f_{ex} の奇数倍成分を出力するため、 f_{ex} を高くすることでノイズに反応する帯域を減らしたノイズ除去が可能となる。

フローノイズは図12に示すように0.1Hzから100Hz程度の帯域において発生している。したがって、この帯域のノイズに対する対策を行った。

流量信号は励磁周波数とその高調波により形成されている。そのため、周波数が低い程、その奇数倍の信号がノイズの影響を受けやすくなり、測定誤差が増える(図13参照)。すなわち、励磁周波数は高周波のほうが測定に有利である。

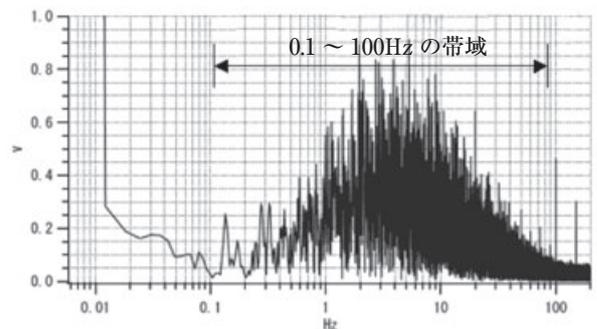


図12. フローノイズの周波数分析

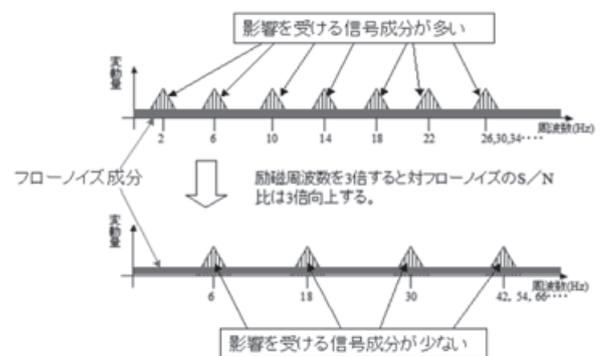


図13. 励磁周波数によるフローノイズの影響度

一方で、励磁周波数を高くすることは、消費電流の増加や5.2項に述べる定常域が短くなってしまうため、単純に高くはできない。

Q3近傍の高流速での誤差の発生要因はフローノイズが支配的である。本開発では低流速よりも高流速に対してよりフローノイズの影響を受けないようQ3近傍に対して適正となる励磁周波数を選択した。それにより、図14に示すように全流速範囲にてフローノイズの影響を低減できた。

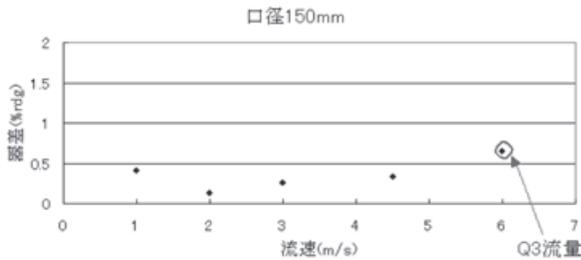


図14. フローノイズによる誤差発生量

4.3.3 商用電源ノイズ対策

装置からの容量結合によって発生する商用電源ノイズは、流量信号に図15のように50Hz（または60Hz）ごとの高周波ノイズを発生させる。

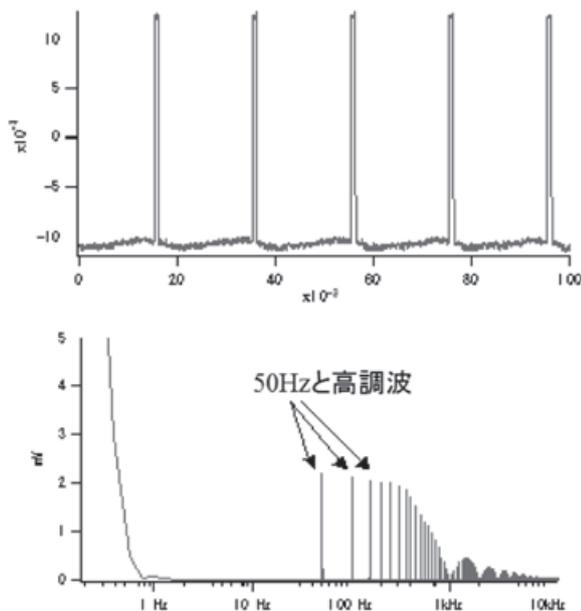


図15. 装置からの商用電源ノイズと周波数分析結果

このノイズは50Hzとその高調波成分で構成されている。このノイズは流量特性に影響を与えるため、本開発では電磁流量計で通常使用されているローパスフィルタに加え、商用ノイズの高調波成分を除去するためバンドエリミネーションフィルタを追加した。

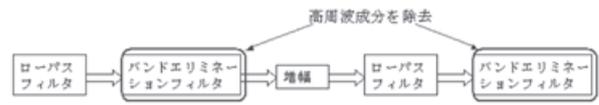


図16. フィルタ回路の構成

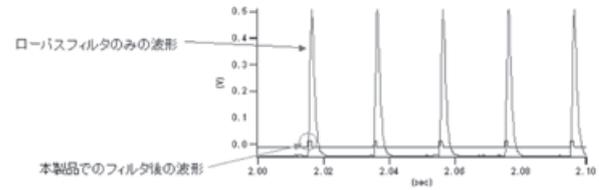


図17. 除去波形

図17にバンドエリミネーションフィルタを追加したときのノイズ波形を示す。新たなフィルタ回路が通常のフィルタ回路に比べノイズ除去の能力が高いことがわかる。

4.3.4 器差結果

4.3.1～4.3.3項で紹介した技術を使用した電池電磁の器差特性を図18に示す。高流量・低流量ともに安定して測定できていることが分かる。

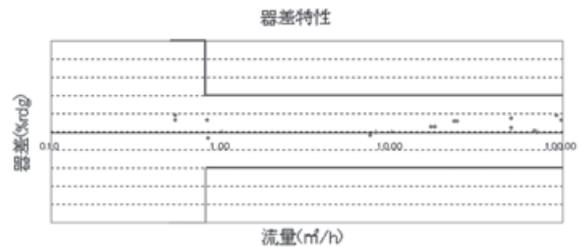


図18. 電池電磁の器差特性

5. 低消費電力化

5.1 電磁流量計の消費電力の割合

電磁流量計は大きく分けて、励磁回路と信号処理回路とそれ以外の回路で構成される。電源方式により若干異なるが、各回路の消費電力の割合を図19に示す。

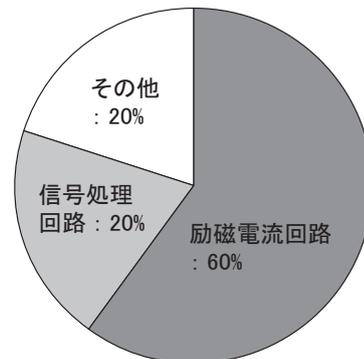


図19. 電磁流量計の消費電力割合

励磁電流回路が占める消費電力の割合が高いため、主にこの回路での電力を削減すれば、機器として低消費電力化にはつながる。しかし、コイルに流す電流を削減することにもなり、S/N比が悪くなる。このため、コイルに流す電流を最大現に確保しながら、低消費電力を実現する必要がある。

5.2 励磁方式

当社では、従来より矩形波励磁方式（図20）を採用している。

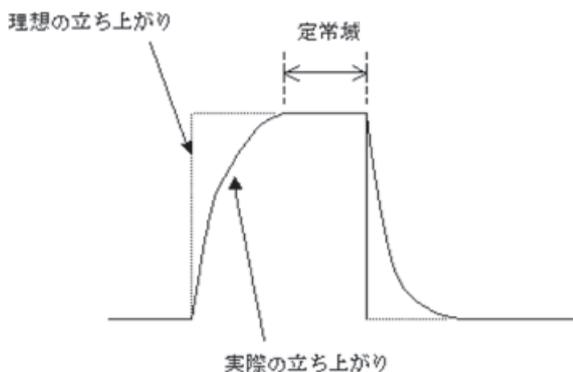


図20. 励磁電流の定常域

式 (1) $B \propto n \cdot I_{ex}$ の式に示すように磁束密度を大きくするにはコイルの巻き数を増やすか、励磁電流を大きくすればよい。

しかしながら、コイルの巻き数を増やすとコイルのインダクタンスが増え、励磁電流の立ち上がりが遅くなる。立ち上がりが遅いと、十分な定常域（励磁電流が一定になる期間）がとれなくなる。そのため、従来は励磁電流の立ち上がり時に高い励磁電圧を印加し、立ち上がりを早くするようにしていた（図21参照）。

また、励磁電流を大きくすることで、より大きな磁束密度を得ることができるが、その反面消費電力は増大する。

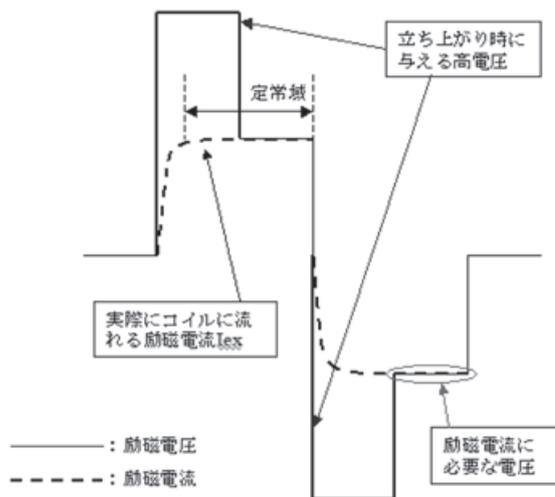


図21. 従来の励磁方式

本開発では、消費電流を削減しながら、十分な定常域を得る方式を確立したので、そのアプローチについて述べる。

(1) 励磁の低消費電力化

コイルに印加する励磁電流の大きさは、コイルのインダクタンスやコイルの巻き数、またコイルの巻き数により増減するコイルスペースなど、いろいろな要素が関わりあって決定される。

電池電磁はアプリケーションが特定されていることもあり、これら各要素の設計自由度が比較的高く、磁場解析、回路解析、構造解析などのシミュレーションを重ねて現時点での最適解を求めた。

これにより、従来より1/70となる低励磁電流を可能とした。

(2) 低電力で早く定常域に達するための電圧印加

定常域の確保のため、従来は図21に示すように励磁電流の立ち上がり時に高電圧を与えることを行っていた。

この方法は定常域に早く到達させるだけではなく、低消費電力化にも有効である。なぜならば、励磁の立ち上がりはコイルのインダクタンスがあるため、立ち上がるまでは高電圧を与えても励磁電流が小さいからである。

本開発では定常電圧に対して与える高電圧の比を従来より2.5倍高くし、より早い定常域の到達を実現した。そのため、高電圧の印加時間を1/5とすることが可能となり、低消費電力と定常域の確保を両立させた。その高電圧印加方法の差を図22に示す。

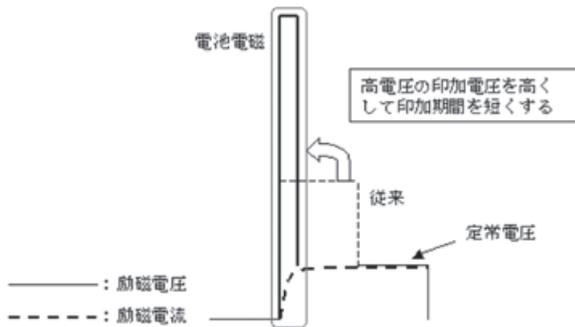


図22. 低消費励磁回路

(3) サンプリングタイムの見直しと休止期間

電磁流量計では信号処理回路のS&H回路の中で流量信号を定期的にサンプリングすることにより、変化する流量値に対応させている。このサンプリング時間は流量信号が安定している時間、すなわち励磁電流の定常域が確保されている時間が必要となる。そのため、通常は励磁周波数と同じ周波数となっている。

本製品はアプリケーションから適正なサンプリングタイムを決定した。また、(2)により定常域に早く到達することが可能となり、磁場を与える必要のない期間は、励磁電流を印加しない構成とした。

図23に励磁の休止期間を示す。1周期の間に休止期間を設けることにより、一層の低消費電力化を達成した。

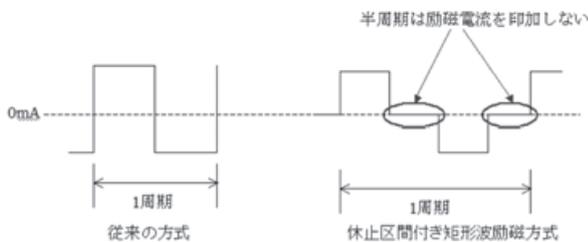


図23. 休止期間

(1)~(3)の方式を採用することにより、励磁電力の大幅な削減を実現した。

6. 終わりに

本稿にて紹介した低消費化技術、計測技術により、水道メーターの広流量範囲にわたる計測を実現した。

本開発は水道メーターと電磁流量計の技術を保有する金門製作所と山武との共同開発で実現したものであり、互いの長所を活かした製品である。

今後もこのようなユーザの要求に応えられるよう、製品開発を進めていきたい。

<参考文献>

- (1) JIS B8570 水道メーターおよび温水メーター
- (2) 2線式電磁流量計の高S/N比化技術, Savemation Review (2003), pp40-45
- (3) 2011 水道メーター総合カタログ金門製作所, p7

<商標>

電池電磁は、株式会社 山武の登録商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|---------------------------|
| 井上 陽 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 光武 一郎 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 荒木 敏文 | 株式会社 金門製作所 開発部 |
| 小島 剛 | 株式会社 金門製作所 開発部 |

2次元画像と3次元立体形状を用いた ハイブリッド顔認証技術

A Hybrid Face Recognition Technology Using a Two-Dimensional Image and a Three-Dimensional Structure

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

中島 寛
Hiroshi Nakajima

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

長嶋 聖
Sei Nagashima

東北大学

青木 孝文
Takafumi Aoki

キーワード

顔認証, ハイブリッド, 位相限定相関法, バイオメトリクス, 受動型ステレオビジョン, 3次元計測, ICP アルゴリズム

従来、主流であった2次元顔画像認証では明るさや向き等の状況が変化した場合に認証性能が劣化するという問題があり、一方、3次元顔認証ではこのような状況変化の影響を受け難いが、計測精度や処理速度に問題があった。そこで、受動型ステレオビジョンを用いた高精度な3次元計測から得られる3次元立体形状と2次元画像による業界初のハイブリッド顔認証技術を開発し、明るさや向き等の状況変化の影響を受け難くし、当社の指紋照合並みの高い認証性能を実現した。プロトタイプによる2年間のフィールドテストでも問題なくその結果も合わせて報告する。

Two-dimensional facial recognition is commonly used, but recognition performance deteriorates when conditions such as brightness and direction change. Three-dimensional face recognition, on the other hand, is not easily affected by such changes in condition, but presents problems with regard to measurement accuracy and processing speed. Consequently, a hybrid face recognition technology, the first in the industry, has been developed by utilizing a two-dimensional image together with a three-dimensional structure obtained from high-precision, three-dimensional measurements made using passive stereo vision. This technology works comparatively well when conditions such as brightness and direction vary, and it has achieved high recognition performance equivalent to that of fingerprint matching. In a two-year field test whose results we report, this technology achieved stable recognition without deterioration over time.

1. はじめに

現代の情報社会において、セキュリティは重要なキーワードの1つであり、信頼性が高く、利便性に優れた個人認証システムが必要とされている。一般的に用いられている個人認証システムでは、パスワード、ICカード、

鍵、生体情報などが利用される。これらの中でも、生体情報を用いた個人認証システムは、記憶や所持を必要としないこと、盗難の危険性が低いことなどから注目されている。山武においても、生体情報による個人認証技術にいち早く着目し、これまでに各種の用途向けの指紋認証システム(図1)を開発している⁽¹⁾。また近年では、

利便性と受容性の高さから注目を集めている顔認証技術に着目し、顔の2次元画像と3次元立体形状を用いたハイブリッド顔認証技術¹の研究開発を行っている。現在、製品プロトタイプの試作・評価段階ではあるが、他の手法と比較して、ユニークな技術として完成しつつあるため、本稿では、この顔認証技術について紹介する。



図1. 指紋認証装置

¹ 以下「2次元」を「2D」、「3次元」を「3D」と略記する。

2. 3D 顔認証

従来研究されている顔認証技術は、通常のカメラ等で撮影した画像データ（2D データ）を用いる 2D 顔認証と、3D スキャナ等で取得した顔の形状データ（3D データ）を用いる 3D 顔認証に分類される。2D 顔認証に関する研究が古くから盛んに行われてきたのに比べ、3D 顔認証に関する研究は歴史が浅く、依然として主流は 2D 顔認証である^(2, 3)。しかしながら、2D データのみでは、明るさや顔の向きが変化した場合に認証性能が低下するという問題がある。2D 顔認証技術の限界を克服するブレイクスルー技術として、3D の情報を使った顔認証に注目が集まっている。

これまでに提案されている 3D 顔認証手法には、顔の 3D 可変モデルを用いた手法⁽⁴⁾、PCA (Principal Component Analysis) を用いた手法⁽⁵⁾、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いた手法^(6, 7)などがある。以下、それぞれについて簡単にまとめる。顔の 3D 可変モデルを用いた手法では、まず、顔の 2D 画像を入力し、この入力画像の顔に最も近い顔の画像を生成するように 3D モデルを変形させる。そして、最も近い顔画像が生成されたときに得られるパラメータを、その人物を表す特徴量として用いる。認証は、特徴量間の距離を用いて行われる。PCA を用いた手法は、2D 顔認証で広く知られているが、3D データを用いる場合には、画像の輝度値の代わりに 3D データの奥行き情報が利用される。2D 画像を用いる場合に比べ、3D データを利用することで顔の向きを補正することができるため、姿勢変化に対してロバストな認証が期待できる。また、3D データの位置合わせ手法として広く知られている手法に ICP アルゴリズムがあるが、登録されている 3D 顔データと入力された 3D 顔データとの間で ICP アルゴリズムを適用することで、比較的シンプルな方法で認証を行うことも可能である。つまり、2つの 3D データ間の距離が位置合わせによって十分に小さくなるようであれば、それらは同一人物のデータであるとみなすことができる。

このように注目を集める 3D 顔認証であるが、これら全てに共通する課題として、いかにして顔の 3D データ

を取得するか、という問題があげられる。3D 計測技術には、レーザ光やパターン光を用いた能動型計測と、カメラのみで計測を行う受動型計測がある。一般に能動型計測の方が高精度であり、筆者の知る限り従来の 3D 顔認証技術は、ほぼ例外なく能動型計測システムから得られた 3D データを利用している。しかし、顔に対してレーザ光などの特殊な光を照射することは安全面や心理面から望ましくなく、またシステムの高コスト化にもつながる。そこで筆者らは、ステレオビジョンを利用した受動型 3D 計測に着目し、研究開発を進めてきた。受動型ステレオビジョンでは、環境光のみで計測を行うことができるため、顔認証の用途に適している。以降ではまず、ステレオビジョンに基づく受動型 3D 計測について述べる。

3. 受動型ステレオビジョンを用いた 3D 顔計測技術

受動型計測の代表例であるステレオビジョンでは、2つのカメラを並べたステレオカメラを用いて 3D データを取得する。このステレオビジョンによる 3D 計測では、2つの画像間で画素の対応付けを行う対応点探索アルゴリズムの選定が重要になる。この対応付け精度が 3D 計測精度を左右するため、一般にサブピクセル精度の対応付けが必須である。

また、ステレオビジョンによる 3D 計測の精度を決定付ける他の要因として、基線長、つまりカメラ間の距離がある。基線長が大きいほど高精度な計測が可能となるが、得られる 2つの画像間の変形が大きくなるため、画像中の特徴点などの限られた箇所しか計測を行うことができない。一般に顔の 3D データを用いて認証を行う場合には、顔全体の密な形状が必要となるため、必然的に基線長は短くせざるを得ず、その分ステレオ画像の対応付け精度を向上させて 3D 計測精度の低下を回避しなければならない。

通常、対応点探索のためには、対応候補点近傍から切り出した局所的な画像ブロックに対するマッチングが用いられる。このブロックマッチングの尺度としては、従来、SAD (Sum of Absolute Differences) や SSD (Sum of Squared Differences) などが広く利用されてきた。これらは計算コストに優れるものの、高精度な 3D 計測を目的とする場合には、ロバスト性や位置合わせ精度が不十分であった。

こういった問題に対し、筆者らは、ステレオ画像の対応付けに位相限定相関法を利用している。位相限定相関法は、筆者らにより開発された高精度画像マッチング技術であり、画像照合と画像レジストレーション（位置合わせ）の観点から特に優れた性能を示す⁽⁸⁾。当初は、指紋認証（図1）のために開発された技術であったが、その適用範囲が拡大し、現在では極めて広範な応用をカバーしている。その中でも、特に生体画像の照合に対し

て非常に高い有効性を示すことが明らかとなっており、指紋認証のみならず虹彩認証⁽⁹⁾や掌紋認証⁽¹⁰⁾においても高い性能を発揮している。図2に、位置ずれた2枚の画像間で計算される位相限定相関関数の例を示す。

この位相限定相関法をステレオ画像の対応付けに利用することで、SADやSSDを用いた場合に比べて高い3D計測精度を達成することができる^(11, 12)。また、ブロックマッチングでは対象のテクスチャが重要になるが、顔

画像はそれほど明瞭なテクスチャを持たない。そのため、例えばステレオ画像を取得する際にランダムパターンを投影することで強制的にテクスチャを付加する方法などがよく利用されるが、位相限定相関法ではそういったパターン投影を行わずとも、十分な精度で3D計測を行うことが可能である。

基準物体として半径約100mmの球を利用し、これを約50cm離れた位置から位相限定相関法に基づくステレ

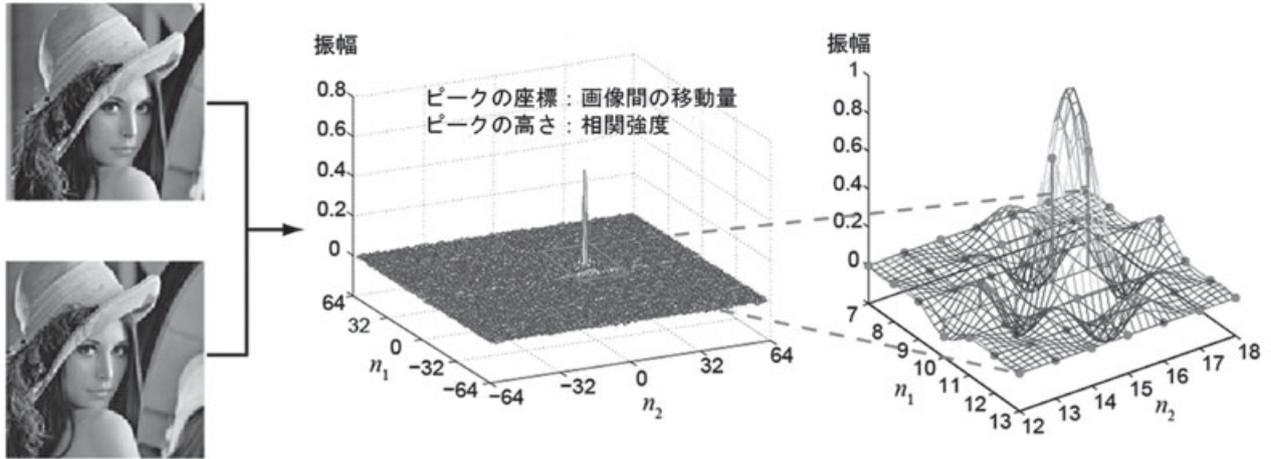


図2. 位相限定相関法



図3. 左側：ステレオ画像

中央：3D顔の点群データ（画像濃淡値あり）

右側：3D顔の点群データ（画像濃淡値なし）

オビジョンシステムにより3D計測したところ、得られた3Dデータに対する球の方程式の当てはめ誤差は0.5mm以下(2乗平均平方根)となった。これより、カメラのみで構成される簡便なシステムを用いて高精度に顔の3Dデータを取得可能であることがわかる。また、実際に人物の顔を3D計測した例を図3に示す。図3の左側はステレオカメラで撮影した顔画像で、中央および右側はステレオ画像より計測された3D顔の点群データである。

4. 2D・3Dハイブリッド顔認証アルゴリズム

これまでに、3D顔認証および筆者らが着目する受動型ステレオビジョンについて述べた。3D顔認証は2D顔認証に比べて顔の向きの変化などにロバストであるが、利用者の姿勢をある程度コントロールできるような環境下では、必ずしも全ての場合において3Dデータを利用する必要はないと考えられる。特にステレオビジョンを利用した3D計測では、撮影したステレオ画像から3Dデータを生成する際の計算コストが比較的高く、また、高い性能を得るためには高密度な3Dデータを用いて認証処理を行う必要がある。そのため、登録されているすべての顔データと認証するいわゆる1対N認証を行う場合にはかなりの計算時間を要する。この問題に対し、筆者らの開発した顔認証技術では、2D認証と3D認証を組み合わせることで、計算時間、認証性能の両方において十分に実用可能なレベルを達成している。以下にその概要を述べる。

本手法では、3D認証にはICPアルゴリズムを利用している。つまり、登録されている3Dデータと入力された3Dデータとの間でICPアルゴリズムによる位置合わせを行い、結果的に2つのデータ間の距離が十分に小さくなれば認証成功とみなす。位相限定相関法に基づく高精度ステレオビジョンにより、高品質な3Dデータを取得できるため、単純に位置合わせを行うだけで十分な認証性能が得られる^(13, 14)。しかし、ICPアルゴリズムは、3Dデータ間の最近傍点の対応付けを繰り返すことで位置合わせを行う手法であり、高密度な3Dデータであれば最近傍探索に高い計算コストを要するため1対N認証には向かない。

そこで、筆者らは、通常の顔認証システムにおいては、利用者はカメラに対して正対する場合がほとんどであることに着目し、まず比較的計算コストの低い2D認証を行ったうえで、必要に応じて3D認証に切り替えるというアプローチをとっている。通常、2D認証と3D認証とは全く異なる技術が必要となるが、筆者らは、登録顔画像と入力顔画像との間で、3Dの計測と同じ技術である位相限定相関法により対応付けを行うという極めてシンプルな2D認証手法を用いている^(15, 16)。異なるタイミングで撮影された画像であっても、同一人物ならば信頼性の高い対応点が多く得られ、他人であれば信頼性の低い対応点しか得られないため、これをもとに個人

識別が可能である。

このように、開発した2D・3Dハイブリッド顔認証技術では、位相限定相関法に基づく画像対応付けを基本技術として、これを2D認証と3D認証の両方で利用している。なお、登録画像と入力画像の直接的な対応付けにより2D認証を行うためには、画像間でカメラと顔の距離の変化などを正規化することが不可欠であるが、開発した技術ではステレオ画像から距離推定などを行うことができるため、容易かつ正確に正規化を行うことができる。この正規化によって、位相限定相関法による対応付けが可能となり、その高いロバスト性と精度により2D認証においても高い認証性能が得られることを確認している。

筆者らが開発した顔認証技術では、まず上記の2D認証を行い、認証に失敗した場合のみICPアルゴリズムを用いた3D認証に切り替える。3D認証に比べて2D認証の方が計算コストが低いため、瞳間距離を用いた絞り込みなどと組み合わせることによって、1対N認証においても十分高速に認証を行うことができる。また、必要に応じて3D認証に切り替えることで、2D認証では難しい非正面顔もロバストに認証することができる。後述するプロトタイプ顔認証システムでは、N = 40(登録人数)の場合に0.5～1.2秒程での認証を実現している。

5. プロトタイプシステムの開発および実証実験

これまでに述べた2D・3Dハイブリッド顔認証技術に基づいて開発された顔認証システムのプロトタイプについて述べる。図4、5に開発したプロトタイプの外観を示す。ステレオカメラを構成する2台のカメラは、Point Gray Research SCOR-14SOM-CS(12bits digital resolution, 1280x1024 pixels, monochrome, IEEE-1394)を用いている。



図4. プロトタイプ外観

本システムでは、2つのカメラを可能な限り近づけた極めてコンパクトなステレオカメラで構成しており、基線長が短いと顔の3D形状を全体に渡って密に取得することができる。カメラの前に立つだけで認証が開始され、認証に成功すると savic-net™ FX セキュリティシステム⁽¹⁷⁾ と連動して電気錠の解錠と入退室履歴保存を行う。

2008年5月より、実際に実験室の入口に本システムを設置し、長期に渡ってフィールドテストを行っている。現在の登録人数は約40名(N=40)で、最初に登録した顔データを、ほとんど登録し直すことなく運用している。運用開始からすでに2年以上が経過し使用回数のはべ1万回を超えているが、他人誤認識などの問題が生じるようなことはなく、明るさ、顔の向き、立ち位置、表情、眼鏡、頭髪、髭など様々な変化に対してもロバストな認証を実現している。また、利用者がID番号などを入力する必要のない1対N認証を行っているが、認証に要する時間は、2D認証の場合が約0.5秒であり、



図5. プロトタイプユーザインターフェース部(ステレオカメラ, LCD, テンキー, 人感センサ付き照明)

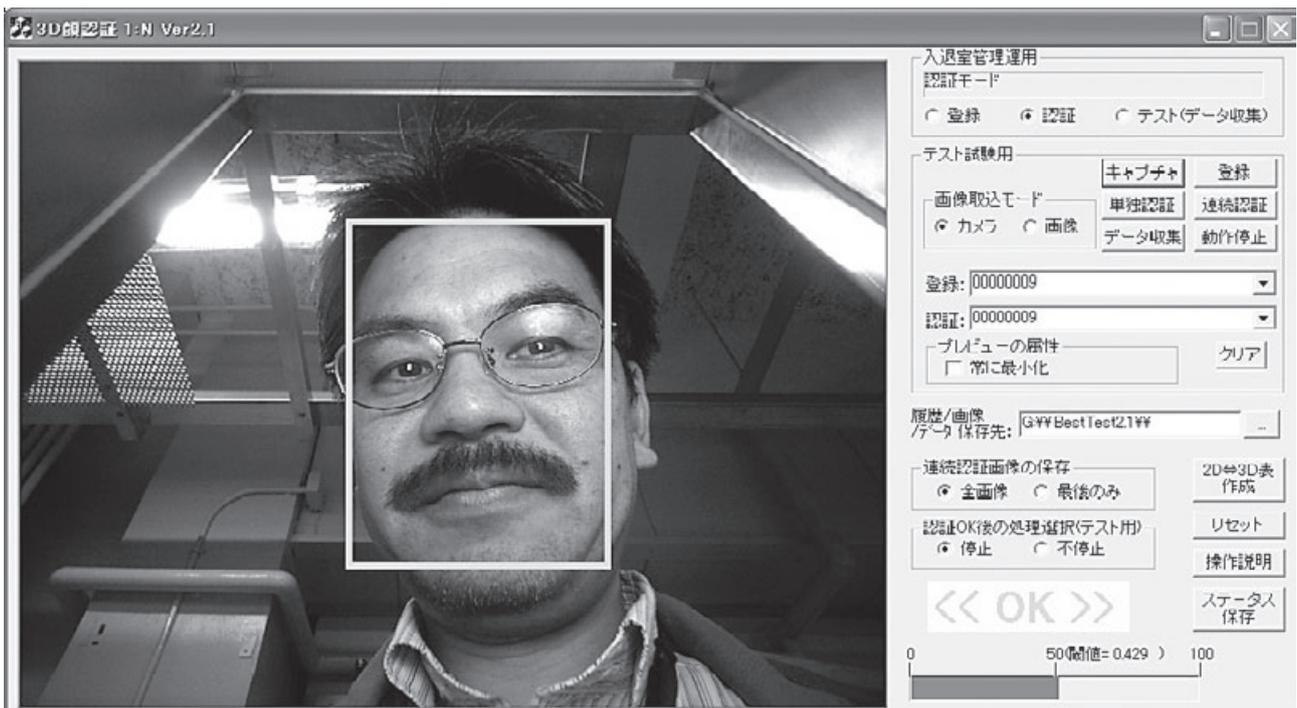


図6. 2D・3Dハイブリッド顔認証プロトタイプの認証結果画面

3D 認証まで行ったとしても約 1.2 秒である。本システムにおける認証結果画面を図 6 に示す。左下に示した登録画像は 2 年前に登録されたデータであり、カメラと顔の距離や顔の向きなどを意図的に変化させて入力を与えているが(右下)、問題なく認証に成功していることがわかる。なお、筆者らが独自に構築した顔画像データベースを用いた実験では、被験者約 1300 人から顔データを各々 2 セット収集して約 300 万回の認証を行い、EER (Equal Error Rate) = 0.42% という良好な実験結果を得ている。EER とは、本人拒否率と他人許容率が等しくなるように判定閾値を設定した場合のエラー率を示す。筆者らが知る限り、これまでの一般的な 2D 顔認証は EER = 1% 以上であり、実運用で苦労してきたと認識している。長期にわたる実運用実験および大量の顔データを用いた認証実験の結果より、本技術の顔認証性能は、当社で製品化している指紋照合並みの高い実用性能があることを示している。

6. おわりに

本稿では、位相限定相関法に基づく 2D・3D ハイブリッド顔認証技術について述べ、プロトタイプ顔認証システムの開発・運用を通して本技術が指紋照合並みの実用性・有効性を持つことを示した。顔認証は、非接触で認証できるため、不潔感がなくユーザーの心理的負担が少ない。また、顔は常に見えている生体情報のため、指紋/静脈/虹彩などの生体情報と違って人が見て確認でき、比較的プライバシー問題が少ないという利点もある。

入退室管理システムにおける映像監視システムでは、今後、映像から人物や不審物などを特定することが期待され、高精度な認識技術ならびに形状計測技術が必要とされる。本稿で紹介した顔認証技術や高精度 3D 計測技術は、これらを実現するためのコア技術に成りえる。筆者らは、本セキュリティシステムの開発を通じて、安心・安全・快適な社会の実現に貢献していきたいと考えている。

<参考文献>

- (1) 中島寛, 小林孝次, 森川誠, 勝亦敦, 伊藤康一, 青木孝文, 樋口龍雄, 位相限定相関法に基づく指紋照合技術 — 一般住宅向け指紋照合装置のためのアルゴリズム設計と実現 —, 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン準部門誌) (Feb. 2006), Vol. 126, No. 2, pp. 38-46
- (2) W. Zhao and R. Chellappa: "Face processing: Advanced modeling and methods", Academic Press (2006)
- (3) A. F. Abate, M. Nappi, D. Riccio, and G. Sabatino: "2D and 3D face recognition: A survey", Pattern

- Recognition Letters, Vol. 28, pp. 1885-1906 (Oct. 2007)
- (4) V. Blanz and T. Vetter: "Face recognition based on fitting a 3D morphable model", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 9, pp. 1063-1074 (Sep. 2003)
- (5) C. Xu, Y. Wang, T. Tan, and L. Quan: "A new attempt to face recognition using 3D eigenfaces", Proc. of the 6th Asian Conference on Computer Vision (ACCV), Vol. 2, pp. 884-889 (Jan. 2004)
- (6) P. J. Besl and N. D. McKay: "A method for registration of 3-D shapes", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256 (Feb. 1992)
- (7) X. Lu and A. K. Jain: "Matching 2.5D face scans to 3D models", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 28, No. 1, pp. 31-43 (Jan. 2006)
- (8) 青木孝文, 伊藤康一, 柴原琢磨, 長嶋聖, 位相限定相関法に基づく高精度マシビジョン-ピクセル分解能の壁を越える画像センシング技術を目指して -, IEICE Fundamentals Review (July 2007), Vol. 1, No. 1, pp. 30-40
- (9) K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi and H. Nakajima: "An effective approach for iris recognition using phase-based image matching", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 30, No. 10, pp. 1741-1756 (Oct. 2008)
- (10) S. Iitsuka, K. Ito and T. Aoki: "A practical palmprint recognition algorithm using phase information", Proc. of the 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), No. WeBCT9.18 (Dec. 2008)
- (11) M. A. Muquit, T. Shibahara and T. Aoki: "A high-accuracy passive 3D measurement system using phase-based image matching", IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science, Vol. E89-A, No. 3, pp. 686-697 (Mar. 2006)
- (12) 柴原琢磨, 沼徳仁, 長嶋聖, 青木孝文, 中島寛, 小林孝次, 一次元位相限定相関法に基づくステレオ画像の高精度サブピクセル対応付け手法, 電子情報通信学会論文誌 D (Sep. 2008), Vol. J91-D, No. 9, pp. 2343-2356
- (13) A. Hayasaka, T. Shibahara, K. Ito, T. Aoki, H. Nakajima and K. Kobayashi: "A passive 3D face recognition system and its performance evaluation", IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E91-A, No. 8, pp. 1974-1981 (Aug. 2008)

- (14) A. Hayasaka, K. Ito, T. Aoki, H. Nakajima and K. Kobayashi: "A robust 3D face recognition algorithm using passive stereo vision", IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E92-A, No. 4, pp. 1047-1055 (Apr. 2009)
- (15) 伊藤康一, 早坂昭裕, 青木孝文, 中島寛, 小林孝次, 2次元／3次元顔認証アルゴリズムの組み合わせに関する検討, 暗号と情報セキュリティシンポジウム (Jan. 2009), 2F4-2
- (16) 中島寛, 長嶋聖, 青木孝文, 受動型ステレオビジョンを用いた2D・3D複合顔認証, 映像情報メディア学会誌 (Apr. 2010), Vol. 64, No. 4, pp. 472-476
- (17) savic-net™FX セキュリティシステム, 株式会社山武,
http://jp.yamatake.com/product/ba/secu/secu_fx.html.

<商標>

savic-net は, 株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

中島 寛	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
長嶋 聖	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
青木 孝文	東北大学 大学院 情報科学研究科 教授

水用流量計校正の JCSS (ISO/IEC 17025) 登録

JCSS (ISO/IEC 17025) Certification of a Calibration System for Water Flowmeters

株式会社 山武	杉山 信幸 Nobuyuki Sugiyama	株式会社 山武	山口 徹 Toru Yamaguchi
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	鈴木 伸 Shin Suzuki	独立行政法人 産業技術総合研究所	古市 紀之 Noriyuki Furuichi

キーワード

ISO/IEC 17025, JCSS, 水用流量計校正装置

水用流量計校正装置は、様々な測定機器や配管類から成り立っている。校正装置としての性能は、環境感受性などそれぞれの装置がもつ要因から算出する不確かさの積み上げで決まる。本論文では、山武が保有する水用流量計校正装置の概要を述べ、性能を確認するために、ISO/IEC 17025 に適合した JCSS 校正事業者の登録に先立って実施した産業技術総合研究所との共同研究の結果を述べる。さらに、校正の不確かさの算出方法と不確かさを利用した適合性表明について説明する。

Calibration facilities for water flowmeters consist of various measuring instruments, piping, etc. The performance of a calibration facility is determined by the sum of its uncertainties, as calculated based on factors such as the environmental sensitivity of each instrument. This paper describes our calibration facilities for water flowmeters, and the results of our collaborative research with the National Metrology Institute of Japan (NMIJ), which was undertaken to evaluate the uncertainty of our facility compared with that of NMIJ in advance of our application for ISO/IEC 17025 compliant JCSS certification as a calibration business. In addition, we describe how we calculate the uncertainty of our calibration system and how uncertainty is incorporated into the declaration of an instrument's conformity to standards.

1. はじめに

水用流量計の校正装置は様々な測定機器や配管類から成り立っている。高精度に流量計を調整（アジャストメント）・校正（値付け）するためには、精度だけではなく、トレーサビリティを意識した不確かさという考え方が重要である。なぜならば、測定機器や流体に起因する各々の不確かさの積み上げによって、流量計を校正する時の信頼性が決まるからである。また、計量法で定める JCSS（計量法校正事業者登録制度：Japan Calibration Service System）登録事業者になることで、山武の校正装置が、産業技術総合研究所（以下、産総研）が保有する特定標準器とどの程度の不確かさを持ってトレーサビリティを確保しているかを証明できる。

本論文では、水用流量計校正装置の概要を説明し、JCSS 登録事業者として用いる校正装置における産総研

との共同研究の結果と不確かさの算出方法を説明する。さらに、不確かさを考慮した適合性表明の考え方も説明する。

2. 校正装置の仕様

山武の校正装置は 2009 年 4 月より稼働を開始している。図 1 に校正装置概略図を示す。校正装置の構成は地下水槽、揚水ポンプ、高架水槽、制御用流量計、流量制御用バルブ、ダイバータ、秤量タンク、秤量器、計測システムとなっている。揚水ポンプで送られた水は高架水槽にたまり、高架水槽の水頭圧により校正装置に送られる。測定ラインの最上流には流量計を設置しており、バルブ開度の制御用信号として使用している。校正流量に応じて流量制御用バルブが開度を自動

調節し流量設定を行う。その後、システム側からの信号によりダイバータが流路を秤量タンク側に切り替える。所定の時間、タンク内に水を貯めるとダイバータはもとの位置に戻る。タンク内にたまった水の重さを秤量器で測定し、浮力補正や密度計算を行い基準となる流量値を計算する。ダイバータがタンク側に水を入れている時間に同期して被校正器からの電流信号や積算パルスを計測し、基準流量と被校正器の出力を比較して器差を計算する。

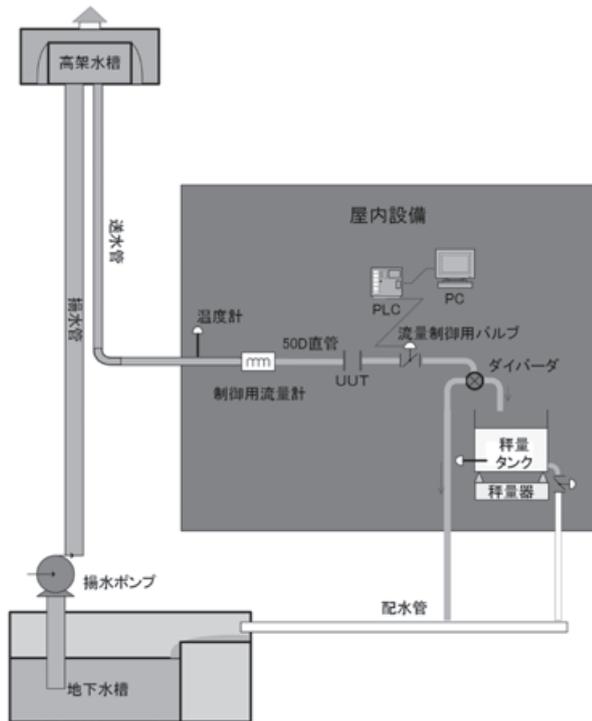


図 1. 校正装置概略

2.1 システム区分

校正装置は 8 つのシステムに分かれていてそれぞれ独立に稼働することができる。今回、JCSS 校正事業者登録を行ったのは、その中の一部のラインで流量範囲は $0.09 \text{ m}^3/\text{h} \sim 650 \text{ m}^3/\text{h}$ である。

2.2 高架水槽・地下水槽

高架水槽はオーバーフロー構造となっていて、ポンプの脈動や水頭変化による圧力変動が発生しない構造となっている。高架水槽水面の変動量は常に一定量以下となるように設計している。各ラインへの送水管は高架水槽から直接接続しているため、他ラインでの使用流量の変化による影響を受けない。

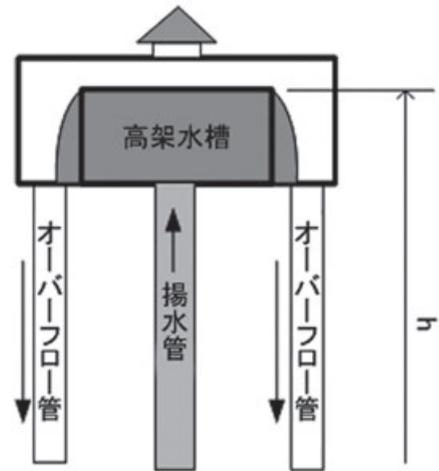


図 2. オーバーフロー構造

高架水槽は 2 段式になっていて、小容量タンクはオーバーフロー部の高さ (h) が 35 m、大容量のタンクはオーバーフロー部の高さ (h) が 20 m となっている。小容量タンクは口径の小さなライン用、大容量タンクは口径の大きなライン用に使い分けている。口径が大きい場合は同一流速でも圧力損失が小さいため水槽の高さを必要としない。



図 3. 高架水槽外観

地下水槽は高架水槽およびポンプ室の地下に位置している。地下水槽には常時、一定量の水を貯めてあり、排水された水の気泡抜きが十分に行える設計としている。

2.3 揚水ポンプ

揚水ポンプは合計8機あり、校正流量に応じてポンプ稼働台数を決定し、常にオーバーフロー状態を確保するシステムとなっている。

2.4 ダイバータ・秤量器・秤量タンク

ダイバータ、秤量器、秤量タンクのセットは合計で16機ある。ダイバータは0.0002 m³/h～5000 m³/hの流量に対応している。5000 m³/h仕様のダイバータは国内最大である。

秤量器は600 g～60 tの計測範囲である。6 t以下の秤量器は、電磁平衡式はかりを使用しているため30万分の1以上の分解能を持つ。6 tを超える秤量器は高精度ロードセルを使用し1万分の1以上の分解能を実現している。

秤量タンクは、秤量器の校正時は移動できるように軽量設計されている。図4は60 t秤量器の校正風景である。



図4. 60 t秤量器の校正風景

2.5 計測システム

操作パネル内の機器構成は図5のようになっており、PCは1システムに2台使用している。

PLC (Programmable Logic Controller) を介した機器制御やシーケンスをコントロールする制御用PC1とマンマシンインターフェイスや器差計算等の数値演算を行う演算用PC2を使い分けてリアルタイム処理を実現している。

PC1はお客さまから高評価をいただいている山武製の現場分散協調オートメーション Harmonas-FLeX™ の技術を使い、信頼ある制御と安定性を実現している。

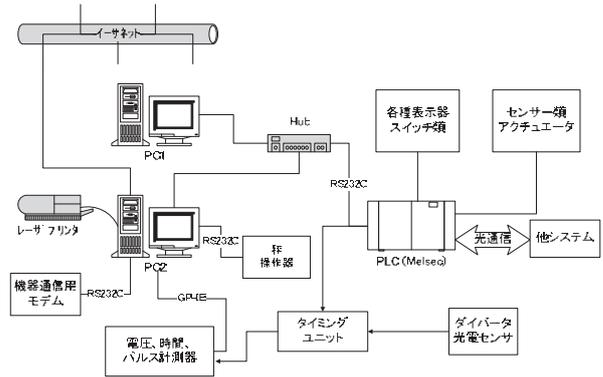


図5. システム構成図

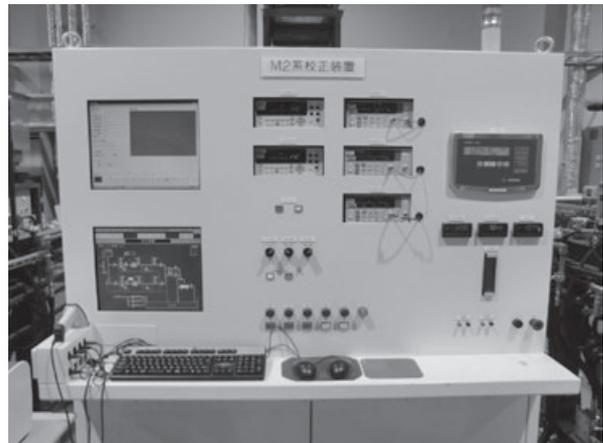


図6. パネル外観

2.6 配管類

配管内には気泡が貯まらない工夫をしている。また、気泡が貯まりやすい部分には気泡検知器を取り付けて自動的に排気を行っている。図7は校正装置の一部である。



図7. 校正装置外観

被校正器の上流側直管は口径の 50 倍以上の長さ確保し、試験流体が十分に整った軸対称流になるようにしている。また、配管のつなぎ目部分ではガスケットによる段差が発生しないように Oリングによるシールを行っている。図 8 のような構造を取る事により内面側に段差が発生しないので渦等が発生しない安定した状態を作り出すことができる。

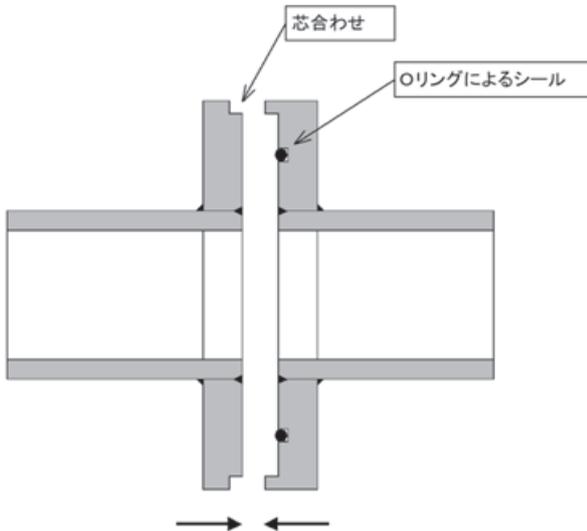


図 8. 配管接続部構造

直管部導入までの配管引き回しについても図 9 の旋回流や偏流が発生しないように流体解析を行い、最適形を決定している。図 10 に示すように旋回成分を減らし、管内断面の流速分布についても一樣になることが確認できた。

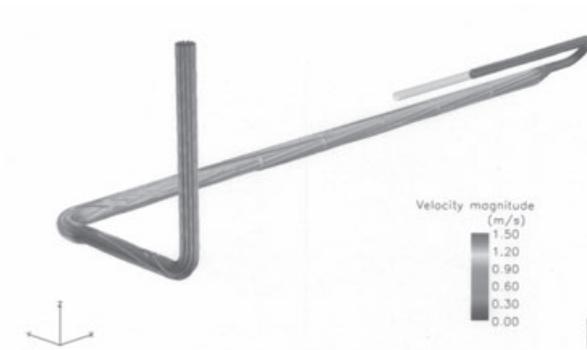


図 9. 配管レイアウト



図 10. 被校正器取付部の流線図

3. 校正の不確かさ

3.1 産総研との共同研究

JCSS 登録事業者の申請に先立ち、産総研と共同研究を行ったので、その結果を紹介する。

タービン流量計 (25A, 50A, 100A, 200A) を伸介器として産総研と山武の校正装置でそれぞれ校正を行った。共同研究は 2009 年 10 月から 2010 年 10 月の約 1 年間実施し、取り付け取り外しによる再現性を含め長期間に渡り校正結果が一致している事を確認した。

口径別の測定ポイントは表 1 のとおりである。

表 1. 共同研究比較流量一覧

流量計口径	配管口径	流量計測定範囲	測定ポイント	はかり
25A	50A	1~18 m ³ /h	1.0 m ³ /h	50 kg
			1.8 m ³ /h	50 kg
			2.5 m ³ /h	50 kg
			2.5 m ³ /h	500 kg
			5.0 m ³ /h	500 kg
			10 m ³ /h	500 kg
50A	50A	10~58 m ³ /h	23 m ³ /h	500 kg
			23 m ³ /h	5000 kg
			35 m ³ /h	5000 kg
			45 m ³ /h	5000 kg
			55 m ³ /h	5000 kg
100A	100A	40~300 m ³ /h	40 m ³ /h	5000 kg
			90 m ³ /h	5000 kg
			140 m ³ /h	5000 kg
			140 m ³ /h	22 t
			175 m ³ /h	22 t
200A	200A	80~660 m ³ /h	225 m ³ /h	22 t
			100 m ³ /h	5000 kg
			140 m ³ /h	5000 kg
			140 m ³ /h	22 t
			200 m ³ /h	22 t
			300 m ³ /h	22 t
			400 m ³ /h	22 t
			600 m ³ /h	22 t
			650 m ³ /h	22 t

産総研と山武の校正結果を図 11～14 示す。

山武のデータに示す上下のマーカは校正測定能力：Calibration Measurement Capability（以下、CMC）の範囲（0.10%）である。

図 11 が示すように、25A については、他の口径とは異なり、横軸をレイノルズ数としている。これは、タービン流量計はレイノルズ数の影響を受ける特性があり、特にその影響は口径が小さいほど大きくなるためである。

図 12～14 の 50A～200A は不確かさの範囲内で校正結果が産総研と一致している。

以上のことから 1 m³/h～650 m³/h の範囲で国家標準との整合性を確認することができた。

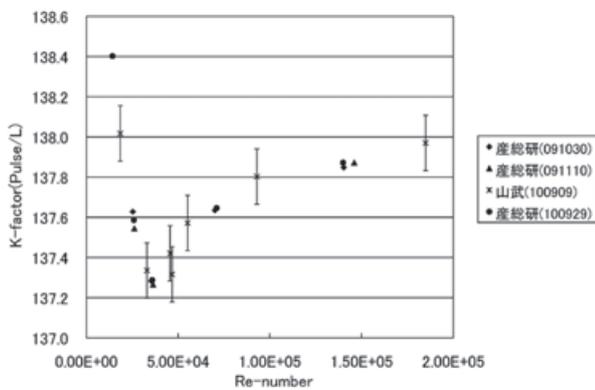


図 11. 25A 校正結果 (Re 軸)

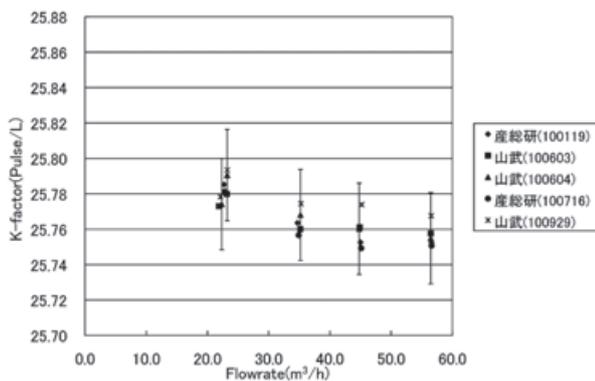


図 12. 50A 校正結果

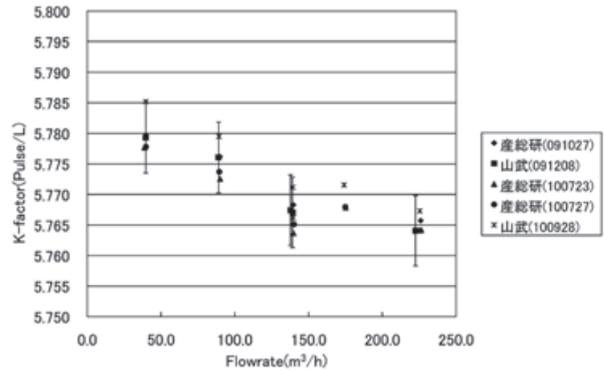


図 13. 100A 校正結果

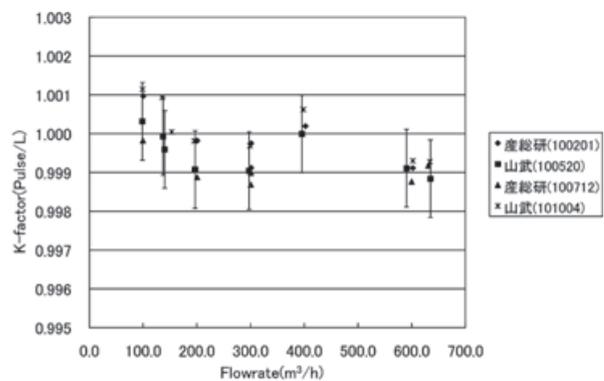


図 14. 200A 校正結果

3.2 不確かさ

校正装置から得られるデータを大別すると

- ①測定開始時の重さ
- ②測定終了時の重さ
- ③測定中の空気密度
- ④水の密度

- ⑤測定開始から終了までの時間

の 5 つである。まず、測定物の質量と時間より質量流量を求める。さらに質量流量と水の密度から体積流量が計算により求められる。

したがって、校正装置が示す流量の一般式は下記で表すことができる。

$$q \equiv \frac{M}{t} \quad \text{式(1)}$$

q : 質量流量 (kg/s)

M : 水の質量 (kg)

t : 時間 (タンクへの流入時間) (s)

式 (1) より q の不確かさの成分を δq として考慮すると次のように表すことができる。

$$q + \delta q = \frac{M + \delta M}{t + \delta t} \quad \text{式(2)}$$

$$q + \delta q = \frac{M \left(1 + \frac{\delta M}{M}\right) \left(1 - \frac{\delta t}{t}\right)}{t \left(1 + \frac{\delta t}{t}\right) \left(1 - \frac{\delta t}{t}\right)} \quad \text{式(3)}$$

不確かさ成分の二乗項を 0 と近似すると式 (3) は

$$q + \delta q \approx \frac{M}{t} \left(1 + \frac{\delta M}{M} - \frac{\delta t}{t}\right) \quad \text{式(4)}$$

となり

$$\delta q \approx \frac{M}{t} \frac{\delta M}{M} - \frac{M}{t} \frac{\delta t}{t} \quad \text{式(5)}$$

$$\text{従って, } \frac{\delta q}{q} \approx \frac{\delta M}{M} - \frac{\delta t}{t} \quad \text{式(6)}$$

となる。

式 (6) は、各流量において、質量測定の不確かさと時間測定の不確かさを合成したものが、校正の不確かさとして表されることを意味している。

式 (1) に実際に取得するデータやそれらの補正内容などを考慮した計算式を代入すると式 (7) となる。

$$q_m = \frac{(k_f M_f - k_i M_i) * \varepsilon}{t_D} \quad \text{式(7)}$$

q_m : 校正装置が示す質量流量 (kg/s)

k_i : 測定開始時の秤量器の補正係数

M_i : 測定開始時の質量 (kg)

k_f : 測定終了時の秤量器の補正係数

M_f : 測定終了時の質量 (kg)

ε : 浮力補正係数

t_D : タンクへの水の流入時間 (s)

注意: k_i および k_f は 1 とし補正しないため、この補正分は不確かさに含める。

式 (7) を体積流量として扱う場合、被校正器 (流量計) に流れる水の密度 ρ_{wD} で割り、以下の式で表す。

$$Q_m = \frac{q_m}{\rho_{wD}} \quad \text{式(8)}$$

この式により体積流量が算出可能となる。

式 (1) ~ (7) の展開と同じように式 (8) も式 (9) のように表現できる。

$$\frac{\delta Q_m}{Q_m} \approx \frac{\delta q_m}{q_m} - \frac{\delta \rho_{wD}}{\rho_{wD}} \quad \text{式(9)}$$

Q_m : 校正装置が示す体積流量 (m³/s)

ρ_{wD} : 校正装置内の水の密度 (kg/m³)

体積流量の相対不確かさは質量流量の相対不確かさに流量計に流れる水の密度 ρ_{wD} の相対不確かさを合成することで算出が可能である。

質量流量の不確かさは、

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta(M_f - M_i)}{M_f - M_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_D}{t_D}\right)^2} \quad \text{式(10)}$$

体積流量の不確かさは、

$$\frac{\delta Q_m}{Q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta(M_f - M_i)}{M_f - M_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_D}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_{wD}}{\rho_{wD}}\right)^2} \quad \text{式(11)}$$

となる。

一方、被校正器の出力から流量値への計算式は下記のようになる。

■パルス出力の場合

$$q_u = \frac{I_P \times P_{um}}{t_P} \quad \text{式(12)}$$

q_u : 被校正器が示す質量流量 (kg/s)

I_P : パルスカウンタにより積算された一回の測定での総パルス数

t_P : パルスカウンタでのパルス取り込み時間 (s)

P_{um} : 被校正器の設定パルス重み (kg/P)

$$Q_u = \frac{I_P \times P_{uv}}{t_P \times 1000} \quad \text{式(13)}$$

Q_u : 被校正器が示す体積流量 (m³/s)

I_P : パルスカウンタにより積算された一回の測定での総パルス数

P_{uv} : 被校正器の設定パルス重み (L/P)

被校正器のパルス値が K ファクターで与えられている場合は下記により算出する。

$$Q_u = \frac{I_P}{t_P \times 1000 K_u} \quad \text{式(14)}$$

K_u : 被校正器のメーカー設定 K ファクター (P/L)

■電流出力の場合

$$q_u = S_{um} \times \frac{I_{ave} - 0.004}{0.016} \quad \text{式(15)}$$

q_u : 被校正器が示す質量流量 (kg/s)
 I_{ave} : 測定時間内の電流出力の平均値 (A)
 S_{um} : 被校正器の設定スパン (kg/s)

$$Q_u = S_{uv} \times \frac{I_{ave} - 0.004}{0.016} \quad \text{式(16)}$$

Q_u : 被校正器が示す体積流量 (m³/s)
 I_{ave} : 測定時間内の電流出力の平均値 (A)
 S_{uv} : 被校正器の設定スパン (m³/s)

パルス出力の場合、 Q_u の不確かさは

$$\frac{\delta Q_u}{Q_u} = \sqrt{\left(\frac{\delta I_P}{I_P}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_P}{t_P}\right)^2} \quad \text{式(17)}$$

電流出力の場合、 Q_u の不確かさは

$$\frac{\delta Q_u}{Q_u} = \left(S_u \times \frac{\delta I_{ave}}{0.016} \right) / Q_u = \frac{\delta I_{ave}}{I_{ave} - 0.004} \quad \text{式(18)}$$

となる。

偏差については下記の式で算出される。

$$Er = Q_u - Q_m \quad \text{式(19)}$$

偏差の不確かさ成分 δEr は下記のようになる。

$$\delta Er = \delta Q_u - \delta Q_m \quad \text{式(20)}$$

校正装置が示す体積流量 Q_m に対する偏差の比率は

$$\frac{\delta Er}{Q_m} = \frac{\delta Q_u}{Q_u - Er} - \frac{\delta Q_m}{Q_m} \quad \text{式(21)}$$

となる。

Q_u に比べ、 Er は非常に小さいので

$$\frac{\delta Er}{Q_m} \approx \frac{\delta Q_u}{Q_u} - \frac{\delta Q_m}{Q_m} \quad \text{式(22)}$$

と近似できる。

パルス出力の場合、偏差の相対不確かさは式 (11)、式 (17) より

$$\frac{\delta Er}{Q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta I_P}{I_P}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_P}{t_P}\right)^2 + \left(\frac{\delta(M_f - M_i)}{M_f - M_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_D}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_{wD}}{\rho_{wD}}\right)^2} \quad \text{式(23)}$$

電流出力の場合は式 (11)、式 (18) より

$$\frac{\delta Er}{Q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta I_{ave}}{I - 0.004}\right)^2 + \left(\frac{\delta(M_f - M_i)}{M_f - M_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_D}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_{wD}}{\rho_{wD}}\right)^2} \quad \text{式(24)}$$

となり、不確かさの各成分を算出することにより、偏差の不確かさを見積もることができる。

Er : 標準と校正値との偏差 (m³/s)

3.2.1 秤量に起因する不確かさ

秤量器の計測値 ($M_f - M_i$) の不確かさは

- (1) 秤量器校正の不確かさ u_{m_cal}
- (2) 直線性による不確かさ u_{m_line}
- (3) 温度特性による不確かさ u_{m_temp}
- (4) ダイバータ切り替え直後の安定性による不確かさ $u_{\sigma_{m_short}}$
- (5) 秤量器校正間隔での出力ドリフトによる不確かさ u_{m_drift}

の合成により求められる。

- (1) 秤量器の校正の不確かさ u_{m_cal}

秤量器は2年毎にJCSS校正を行っている。校正用分銅の質量値の不確かさ、秤量器の分解能による不確かさ、繰返し性、分銅の荷重位置による不確かさは秤量器のJCSS校正時で考慮されているので、校正証明書に記載された不確かさを用いて下記のように計算する。

$$u_{m_cal} = \frac{\sqrt{u_c(M_f)^2 + u_c(M_i)^2}}{k_{m_cal}} \quad \text{式(25)}$$

$u_c(M_f)$, $u_c(M_i)$: 測定終了時および測定開始時の荷重に対する校正証明書記載の不確かさ

k_{m_cal} : 秤量器の校正証明書記載の包含係数

- (2) 秤量器の直線性の影響 u_{m_line}

秤量器の直線性についてはJCSS校正証明書に記載された使用する範囲での偏差(絶対値)の最大値に多少余裕を加えて最大値 θ を設定している。直線性による不確かさは下記式より算出する。

$$u_{m_line} = \frac{\theta}{\sqrt{3}} \quad \text{式(26)}$$

θ : 校正証明書記載の偏差のうち最大値 + a (kg)

- (3) 秤量器の温度特性の影響 u_{m_temp}

温度変化によっておこる秤量器の変化については、個々の秤量器の温度特性と校正したときの温度と使用時の温度差より導くことができる。

しかしながら、すべての測定点を網羅すると補正式が煩雑になるため、校正中の温度範囲を 5℃～35℃と定め、その最悪値を不確かさに見込むこととする。温度特性はメーカーの仕様から以下の式より算出する。

$$\frac{u_{m_temp}}{M_f - M_i} = \alpha \times \left(|t - t_0| \right) / \sqrt{3} \quad \text{式(27)}$$

α : 秤量器の温度係数 %/℃

t : 校正中の温度で t_0 から最も離れた温度 (5℃または 35℃)

t_0 : 天びんを校正したときの基準となる温度 (校正証明書記載値) (℃)

(4) ダイバータ切替直後の影響 $u_{\sigma_m_short}$

ダイバータ切り替え後、秤量タンク内の水面変化等によりデータ取得時のバラツキ (短期安定性) が発生する場合がある。

そこで、5回の測定データが最小分解能以内の偏差であることを確認して読み取るようにしている。これより、最小分解能の幅が一様分布として考えられるので、以下のように不確かさを考慮する。

$$u_{\sigma_m_short} = \frac{\omega}{2\sqrt{3}} \quad \text{式(28)}$$

ω : 秤量器の目量 (最小分解能) (kg)

(5) 秤量器の校正間隔の影響 (経年変化によるドリフト)

u_{m_drift}

秤量器の経年変化については秤量器の過去の校正結果からの変化量を確認する。

秤量器の校正から次の校正までの変化量 ΔM_{drift} を、その秤量器の経年変化として不確かさにいれる。

$$u_{m_drift} = \frac{\Delta M_{drift}}{\sqrt{3}} \quad \text{式(29)}$$

ΔM_{drift} : 秤量器のドリフト (2年分) (kg)

(6) 不確かさの合成

秤量器の示す値 (浮力補正前) の不確かさは下記の式により求める。

$$\delta(M_f - M_i) = \sqrt{(u_{m_cal})^2 + (u_{m_line})^2 + (u_{m_temp})^2 + (u_{\sigma_m_short})^2 + (u_{m_drift})^2} \quad \text{式(30)}$$

3.2.2 浮力の補正係数の影響

秤量タンク内に貯めた水には大気による浮力が働くため、補正が必要である。

浮力の補正係数 ε は以下の式で表すことができる。

$$\varepsilon = \frac{1 - \frac{\rho_{airC}}{\rho_m}}{1 - \frac{\rho_{airM}}{\rho_{WT}}} \quad \text{式(31)}$$

ρ_{airC} : 秤量器校正時の空気密度 (kg/m³)

ρ_{airM} : 流量測定時の空気密度 (kg/m³)

ρ_m : 秤量器校正時に使用した分銅の密度 (kg/m³)

ρ_{WT} : タンク内に貯まった水の密度 (kg/m³)

空気密度 ρ_{airC} 、 ρ_{airM} は気温、気圧、湿度によって導くことができる。

秤量器を校正しているときの空気密度 ρ_{airC} は、協定値を使い補正されるため秤量器を校正しているときの空気密度と異なる。そのため秤量器の校正時の空気密度と協定値の差が不確かさになる。同様に ρ_{airM} についても流量測定の際、空気密度を算出せず一定値として扱っているため、環境の変化による空気密度の変化分を不確かさとして計算する。

< 環境管理範囲 >

気温 : 20℃ ± 15℃ (5℃～35℃)

気圧 : 100 kPa ± 3 kPa (97 kPa～103 kPa)

湿度 : 50 % rh ± 40 % rh (10 % rh～90 % rh)

この条件における空気密度の最小値は 1.0754 kg/m³ で最大値は 1.2905 kg/m³ である。

従って、空気密度の変化の最大値は協定値 (1.2 kg/m³) を基準とした場合、協定値から最小値を減じた 0.1246 kg/m³ であり、10.38% と計算する。密度が 8000 kg/m³ の分銅には空気中で約 150 ppm の浮力が働いているため、式 (31) の分子の相対変化は約 15.6 ppm でありこれが最大値となる。

分母側も同様に計算すると 20℃ の水 (998 kg/m³) には 1202 ppm の浮力が働いているのでその 10.38% である 125 ppm が相対変化の最大値となる。分銅および水の密度の変化は計算上で補正係数への影響がほとんどないので無視する。秤量器を校正するときの ρ_{airC} と、流量を測定するときの ρ_{airM} は時間的に異なるため独立として考えることができるので浮力の影響がおよぼす不確かさ $\delta\varepsilon$ は、15.6 ppm と 125 ppm を分散の合成により最大値として 126 ppm と計算する。

従って、浮力の補正係数の相対不確かさは

$$\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} \approx \frac{126}{\sqrt{3}} \text{ ppm} = 0.007 \% \quad \text{式(32)}$$

となる。

3.2.3 時間計測に起因する不確かさ

流量は単位時間当たりに流れる量を表すため時間の測定が必要になる。

この時間の測定は、測定開始時と測定終了時にダイバータの動作信号を周波数カウンタへ送ることによ

て計測される。

測定開始から測定終了までの間、タンク内への流入時間 t_D は、以下のように表すことができる。

$$t_D = t_{Dm} + t_{Dc} \quad \text{式(33)}$$

t_D : タンク内への流入時間 (s)

t_{Dm} : ダイバータ切り替え信号の時間間隔 (s)

t_{Dc} : ダイバータの流路切り替えによる時間測定の誤差 (タイミングエラー) (s)

この式より、タンク内への流入時間の相対不確かさを表すと、

$$\frac{u_{t_D}}{t_D} = \sqrt{\left(\frac{u_{t_{Dm}}}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u_{t_{Dc}}}{t_D}\right)^2} \quad \text{式(34)}$$

とあらわすことができ、右辺の t_{Dm} (ダイバータ切り替え信号の時間間隔) の相対不確かさ $\frac{u_{t_{Dm}}}{t_D}$ は、

$$\frac{u_{t_{Dm}}}{t_D} \approx \sqrt{\left(\frac{u_{f_{Hz_cal}}}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u_{f_{Hz_drift}}}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u_{f_{Hz_temp}}}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u_{f_{Photoele_sensor}}}{t_D}\right)^2} \quad \text{式(35)}$$

と考えることができる。

$u_{f_{Hz_cal}}$: 時間計 (周波数カウンタ) の校正の不確かさ (s)

$u_{f_{Hz_drift}}$: 時間計 (周波数カウンタ) のドリフト (管理幅) による影響 (s)

$u_{f_{Hz_temp}}$: 時間計 (周波数カウンタ) の温度の影響 (s)

$u_{f_{Photoele_sensor}}$: 光電センサの反応速度による影響 (s)

(1) タイミングエラーの影響 (ダイバータの流路切り替えによる時間測定の誤差)

ダイバータの切り替えによる時間測定の誤差 (以下タイミングエラー) は ISO 4185 Annex A の方法により測定している。具体的な手順としては、ダイバータ使用流速範囲の中心値付近の流量で水を流し約 60 秒間秤量器に水をため次の 3 つのデータを取得する。

m : 秤量器に水を貯めて得た質量

t : ダイバータが秤量器側に水路を切り替えている (以下、ダイバータ ON) 時間

T_q : 測定時間中の標準流量計の平均流速

次に、流量を変えずに約 2 秒間の測定を 30 回連続で行う。その間に秤量器にたまった水は排水せずに足していく。この測定で次のデータを取得する。

$\sum m$: 30 回分の測定で秤にたまった水の総量

$\sum t$: 30 回分のダイバータ ON 時間の積算値

T_a : 測定時間中の基準流量計の平均流速の 30 回分の平均値

m と $\sum m$, t と $\sum t$, T_q と T_a は計算のため単位を揃える。

下記数式によりダイバータのタイミングエラー t_{Dc} を計算する。 t_{Dc} の単位は t と同じになる。

$$t_{Dc} = \frac{t}{30-1} \left(\frac{T_q}{T_a} \times \frac{\sum m}{\frac{m}{t}} - 1 \right) \quad \text{式(36)}$$

タイミングエラー t_{Dc} はその時間分ダイバータ ON 時間が短いのでダイバータの移動速度 $\times t_{Dc}$ を計算しその寸法分ダイバータ ON 時間が長くなるように光電センサ位置を移動する。(センサー位置調整量 = ノズル幅 $\times t_{Dc}$ / 切替時間)

光電センサはマイクロメータ付きの移動台に固定されているので微調整が可能である。

センサー位置調整後に再度タイミングエラーを測定し規定値内に入っていることを確認する。

次に流速範囲の最小値に流速を合わせて同様にタイミングエラーを測定し規定値内に入っているか確認する。さらに流速範囲の最大値に流速を合わせて同様にタイミングエラーを測定し規定値内に入っているか確認する。

ダイバータの光電センサの位置調整を行うことにより t_{Dc}/t_D が $\pm 0.008\%$ 以内になるように管理している。タイミングエラーの測定結果の一例を図 15 に示す。

タイミングエラーによる不確かさは次のように計算する。

$$\frac{u_{t_{Dc}}}{t_D} = \frac{t_{Dc_MAX}}{t_D} \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{式(37)}$$

$\frac{t_{Dc_MAX}}{t_D}$: 0.008% 以内に調整可能、また、余裕をみて 0.01% に切り上げる。

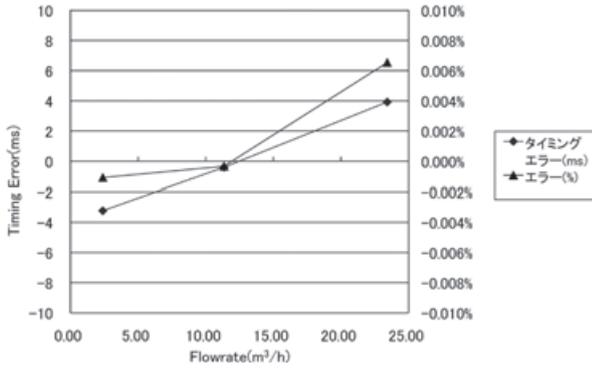


図 15. 500 kg ダイバータのタイミングエラー

(2) 時計の校正の不確かさ $u_{t_{Hz,cal}}$

時計の校正の不確かさは、校正証明書より下記の値とする。

$$\frac{u_{t_{Hz,cal}}}{t_D} = \frac{5 \times 10^{-7}}{2} \quad \text{式(38)}$$

(3) 時計の経年変化の影響 $u_{t_{Hz,drift}}$

時計 (周波数カウンタ) は、管理幅 (10.00000 MHz ± 0.00003 MHz) 以内にあるように定期的に管理しているため、0.00003 MHz を時計のドリフトによる不確かさとして考慮する。

$$\frac{u_{t_{Hz,drift}}}{t_D} = \frac{0.00003}{10} \quad \text{式(39)}$$

(4) 時計の温度の影響 $u_{t_{Hz,temp}}$

メーカーの仕様 (0 °C ~ 50 °C) から 25 °C を基準に最大 15 °C の影響を考慮し算出する。メーカーの仕様では、0 °C ~ 50 °C の温度範囲において、 5×10^{-6} (25 °C 基準) 以下と表記がある。

また実際の使用温度範囲が 5 °C ~ 35 °C であることから、校正温度 (23 °C) との差異である最大温度差は、18 °C であり、この温度差を考慮すればよいので 10 MHz に対して $5 \times 10^{-6} \times 18/50$ に相当する変化量の 0.000018 MHz を考慮する。

$$\frac{u_{t_{Hz,temp}}}{t_D} = \frac{0.000018}{10} \quad \text{式(40)}$$

(5) 光電センサの反応速度の影響 $u_{t_{Photoe_sensor}}$

光電センサの反応速度は、メーカーの仕様によると 1 ms である。さらに、測定開始と測定完了の 2 回の動作で一連の測定が完了するが、それぞれの動作には相関がないものとして不確かさを考えると以下のように計算できる。

$$\frac{u_{t_{Photoe_sensor}}}{t_D} = \frac{\sqrt{(0.001^2 + 0.001^2)}}{\sqrt{3}} \quad \text{式(41)}$$

(6) 不確かさの合成

3.2.3 (1) ~ 3.2.3 (5) の要因を考慮すると、タンク内への流入時間 t_D の相対不確かさ $\frac{u_{t_D}}{t_D}$ は

$$\frac{u_{t_D}}{t_D} = \sqrt{\left(\frac{u_{t_{Dc}}}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u_{t_{Hz,cal}}}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u_{t_{Hz,drift}}}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u_{t_{Hz,temp}}}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u_{t_{Photoe_sensor}}}{t_D}\right)^2} \quad \text{式(42)}$$

と表すことができる。

3.2.4 流量変換に起因する不確かさ

校正装置において使用中の水の密度 ρ_{wD} は、温度や圧力および不純物の混合により変化することが分かっているため、3つの要因から水の密度が与える相対不確かさ

$$\frac{\delta \rho_{wD}}{\rho_{wD}}$$

(1) 温度が水の密度にあたる影響 $u_{\rho_water_t}$

温度発信器の許容差 (管理幅) が ± 0.6 °C であることと、流体の温度分布 (温度測定点、被校正器内、タンク内) が最大 0.5 °C あると想定し、1 °C あたりの水の密度変化は最大 (40 °C 付近) 0.38 kg/m³ であるため、以下のように計算することができる。

$$u_{\rho_water_t} = 0.38 \times \sqrt{\left(\frac{0.6}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad \text{kg/m}^3 \quad \text{式(43)}$$

$$u_{\rho_water_t} = 0.143 \quad \text{kg/m}^3$$

(2) 圧力が水の密度にあたる影響 $u_{\rho_water_P}$

水の圧縮率は 1 atm あたり約 0.0045 % である。校正装置の高架水槽の高さは 35 m であり、最大 3.5 atm の圧力変化があるので密度計算式より半分の圧縮を見込んである。圧縮による密度補正の不確かさは下記のようになる。

$$u_{\rho_water_P} = 1000 \times 0.000045 \times 3.5 / 2\sqrt{3} \quad \text{kg/m}^3 \quad \text{式(44)}$$

$$u_{\rho_water_P} = 0.045 \quad \text{kg/m}^3 \quad \text{式(45)}$$

(3) 不純物が水の密度に与える影響 $u_{\rho_water_I}$

山武と産総研で純水の比較校正を実施した結果を用いることによって、0.03 kg/m³ ($k = 2$) 以下と推測できる。

また、過去 2 年間の変化分を考慮すると、約 0.10

kg/m³ 増加した。

この結果から、2 年に一度交換する水の密度は、あらかじめ変化する未来の 1 年分である 0.05 kg/m³ を補正する。これにより、水の密度の不確かさ $u_{\rho_water_I}$ は以下のようになる

$$u_{\rho_water_I} = \sqrt{(0.03/2)^2 + (0.05/\sqrt{3})^2} \quad \text{kg/m}^3 \quad \text{式(46)}$$

$$u_{\rho_water_I} = 0.033 \quad \text{kg/m}^3$$

(4) 不確かさの合成

3.2.4 (1) ~ 3.2.4 (3) の要因を考慮すると水の密度の不確かさは

$$u_{\rho_water} = \sqrt{u_{\rho_water_T}^2 + u_{\rho_water_P}^2 + u_{\rho_water_I}^2} \quad \text{式(47)}$$

となり、

$\frac{\delta\rho_{wD}}{\rho_{wD}} \approx 0.015\%$ が水の密度が与える相対不確かさとなる。

3.2.5 被校正器の出力取り込みの影響

3.2.1 ~ 3.2.4 まだが校正装置側の不確かさである。これらを踏まえた上、被校正器の出力信号の取込み時に発生する不確かさを算出する。

校正データは、パルス入力、電流入力があり、パルスは時間計で測定し、電流は 250 Ω の固定抵抗に流れる電流の電圧降下分を測定する。

それぞれの測定には、以下の不確かさの要因を考慮する必要がある。

(1) パルス出力の場合

計測された総パルス数の不確かさ u_{IP} は最大 1 カウントでの一様分布と仮定すると

$$u_{IP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{式(48)}$$

パルスカウンタでのパルスの取込み時間 t_p の不確かさ u_{tP} はパルスカウンタへのトリガ信号と時間計測用カウンタへのゲート信号の時間差である。この 2 つの信号はダイバータからの切り替え信号を分配している。同期性を確保する回路を構成しているため、 u_{tP} は無視できる。

$$u_{tP} = 0 \quad \text{式(49)}$$

(2) 電流出力の場合

デジタルマルチメータの管理幅（メーカー仕様）と標準抵抗器 250 Ω の管理幅（メーカー仕様）とそれぞれの

温度係数を考慮して電流測定の不確かさを求める。電流出力の場合、電流測定の不確かさが同じ値であっても流量レンジによって影響量が異なるため、被校正器の流量レンジから電流と流量の関係式を導き、不確かさの影響量を算出する。電流測定の不確かさは、前述のように標準抵抗器を使用するため以下の方法で不確かさを算出する。

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{式(50)}$$

電流の不確かさは下記のように表すことができる。

$$u^2(I) = \left\{ \frac{\partial I}{\partial V} u(V) \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial I}{\partial R} u(R) \right\}^2 \quad \text{式(51)}$$

感度係数は $\frac{\partial I}{\partial V} = \frac{1}{R}$, $\frac{\partial I}{\partial R} = -\frac{V}{R^2}$ なので

$$u^2(I) = \left\{ \frac{1}{R} * u(V) \right\}^2 + \left\{ -\frac{V}{R^2} * u(R) \right\}^2 \quad \text{式(52)}$$

となる。

デジタルマルチメータの確度仕様はメーカー仕様書より 1 年間での精度として下記以内である。

読み値 × 0.0030 % + レンジ × 0.0005 %

また、温度特性は 0 °C ~ 55 °C の範囲において

(読み値 × 0.0005 % + レンジ × 0.0001 %) / °C

である。デジタルマルチメータは 23 °C で校正され、5 °C ~ 35 °C の周囲温度で使用されるので校正温度と使用環境での温度差の最大値は 18 °C となる。従って読み値の不確かさは下記のようになる。

$$u(V) = \frac{V \times (0.00003 + 0.000005 \times 18) + 10 \times (0.000005 + 0.000001 \times 18)}{\sqrt{3}} \quad \text{式(53)}$$

一方、電流を電圧に変換する抵抗器 (250 Ω) は、± 0.01 % で管理され、その温度係数は 10 ppm である。

$$u(R) = \frac{R \times \left(\sqrt{0.0001^2 + (0.00001 \times 18)^2} \right)}{\sqrt{3}} \quad \text{式(54)}$$

式 (53) , 式 (54) を式 (52) に代入して整理すると

$$u^2(I) = \frac{\left(I \times 1.2 \times 10^{-4} + \frac{2.3 \times 10^{-4}}{250} \right)^2}{3} + \left(I \times 2.059 \times 10^{-4} \right)^2 \quad \text{式(55)}$$

$$= \frac{I^2 \times 5.68 \times 10^{-8} + I \times 2.208 \times 10^{-10} + 8.464 \times 10^{-13}}{3}$$

となる。

この電流測定の不確かさ $u(I)$ と被校正器出力の流量値

の相対不確かさ $\frac{u(Q_u)}{Q_u}$ の関係を表すと、

$$\frac{u(Q_u)}{Q_u} = \left(\frac{u(I)}{I - 0.004} \right) \quad \text{式(56) になる。}$$

I : 電流の実測値 (出力信号の 4 mA ~ 20 mA の場合)
電流出力による相対不確かさの変化量を図 16 に示す。

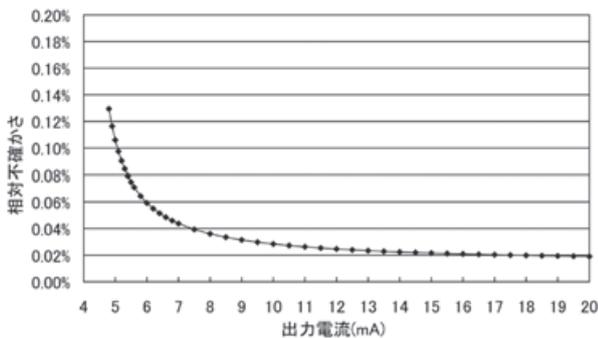


図 16. 電流出力と相対不確かさの関係

3.2.6 被校正器に起因する不確かさ

3.2.5 までは被校正器の種類によらず校正装置が持っている不確かさとして算出できる。被校正器に起因する不確かさについては被校正器の種類により影響量は異なるため、電磁流量計、タービン流量計、コリオリ流量計、超音波流量計、容積式流量計、渦流量計、差圧式流量計、その他の流量計に分けて不確かさを算出している。今回は産総研との共同研究に使用したタービン流量計について不確かさの算出根拠を紹介する。

(1) 再現性による影響

JCSS 校正では校正値として通常 3 回測定の平均値を用いる。この平均値が持つ不確かさ $u_{x-\sigma}$ は 3 回の校正の結果、標準偏差より算出する。

$$u_{x-\sigma} = S/\sqrt{n} \quad \text{式(57)}$$

S : 実験標準偏差, n : 校正回数

(2) 被校正器の温度特性の影響

3 α 自動補正機能が付いていないタービンメータは 20 °C の流体温度を基準として補正を行う。この補正量の不確かさは、被校正器の温度特性 (温度係数) $\alpha_{\text{temp_eff}}$ により $u_{\text{temp_slope}}$ を以下のように考慮する。温度計測の不確かさは 3.2.4 (1) と同様なので

$$u_{\text{temp_slope}} = \alpha_{\text{temp_eff}} \times \sqrt{\left(\frac{0.6}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad \text{式(58)}$$

$\alpha_{\text{temp_eff}}$: $2\beta_H + \beta_R$ (β_H : ハウジングの熱膨張係数,
 β_R : ロータの熱膨張係数)

温度補正を行わず、基準温度 (例えば 20 °C など) で不確かさを算出する場合は測定中の流体温度から以下のように考慮する。

$$u_{\text{temp_slope}} = \alpha_{\text{temp_eff}} \times \sqrt{\left(\frac{t_{\text{max}} - 20}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.6}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad \text{式(59)}$$

t_{max} : 校正中の最高温度または最低温度で基準温度から離れている値

顧客の要求により、個別に基準温度の指定があった場合は、式 (59) を変更し、 $u_{\text{temp_slope}}$ を算出する。ただし、流量計のメーカー動作保証範囲内に限定する。

(3) 旋回流、偏流による影響

2 章で述べた通り、校正装置の配管レイアウトは旋回流や偏流が発生しないように十分考慮している。これらの校正装置が作り出す流体が被校正器に与える影響については微細であり、下記の 3.2.6 (5) に含める。

(4) 気泡混入による影響

校正前には十分な気泡抜きを行い、水を満たしている。もし気泡が混入した場合には気泡検知装置が反応して校正を中止するため無視できる。

(5) その他、取り付け状態の影響等

取付け、取外しによる再現性の影響や校正装置 (配管形状や長さなど) が被校正器に与える影響をこの項目で考慮する。

前述の産総研との共同研究において、その結果から最大 0.1 % とする。

$$u_{\Delta d} = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} \% \quad \text{式(60)}$$

$u_{\Delta d}$: その他の不確かさ

3.2.7 バジェットシート

一例として 50A タービンメータを校正した場合の不確かさを表 2 に示す。

測定条件および環境条件は下記のとおりである。

測定点 : 22.82 m³/h

計測時間 : 53.5 s

測定回 : 3 回

パルス重み : 0.0294 L

気温：18.1℃
 水温：19.9℃
 気圧：990.7 kPa
 湿度：65.7 % RH

$$v_{eff} = \frac{\left(\frac{CMC}{k}\right)^4}{\frac{(u_{x-\sigma})^4}{n-1}} = \frac{\left(\frac{22.82}{1.96}\right)^4}{\frac{(0.66)^4}{3-1}} = 193683 \quad \text{式(63)}$$

表2. バジェットシート

番号	名称	タイプ	分布	標準不確かさ L/h	相対不確かさ %
3.2.1	秤量に起因する不確かさ				
3.2.1(1)	秤量器の校正の不確かさ	B	正規	2.85	0.012
3.2.1(2)	秤量器の直線性の影響	B	一樣	0.50	0.002
3.2.1(3)	秤量器の温度特性の影響	B	一樣	0.40	0.002
3.2.1(4)	ダイヤタ切替直後の影響	B	一樣	0.04	0.000
3.2.1(5)	秤量器の校正間隔の影響	B	一樣	4.34	0.019
3.2.2	浮力の補正係数の影響	B	一樣	1.65	0.007
3.2.3	時間計測に起因する不確かさ				
3.2.3(1)	タイミングエラーの影響	B	一樣	2.28	0.010
3.2.3(2)	時間計の校正の不確かさ	B	一樣	0.01	0.000
3.2.3(3)	時間計の経年変化の影響	B	一樣	0.04	0.000
3.2.3(4)	時間計の温度の影響	B	一樣	0.02	0.000
3.2.3(5)	光電センサの反応速度の影響	B	一樣	0.35	0.002
3.2.4	流量変換に起因する不確かさ				
3.2.4(1)	温度が水の密度に与える影響	B	一樣	3.28	0.014
3.2.4(2)	圧力が水の密度に与える影響	B	一樣	1.05	0.005
3.2.4(3)	不純物が水の密度に与える影響	B	一樣	0.75	0.003
3.2.5	被校正器の出力取り込みの影響				
3.2.5(1)	バルス出力の場合	B	一樣	1.14	0.005
3.2.6	被校正器に起因する不確かさ				
3.2.6(1)	再現性による影響	A	正規	0.66	0.003
3.2.6(2)	被校正器の温度特性の影響	B	一樣	0.39	0.002
3.2.6(3)	旋回流、偏流による影響	B	一樣	0.00	0.000
3.2.6(4)	気泡混入による影響	B	一樣	0.00	0.000
3.2.6(5)	その他、取り付け状態の影響等	B	一樣	6.59	0.029
合成標準不確かさ				9.65	0.042
拡張不確かさ(k=1.96)				18.92	0.083

3.2.8 有効自由度、包含係数

標準不確かさの合成を行った後、合成標準不確かさの有効自由度を計算する。合成標準不確かさの有効自由度は Satterthwaite の方法により下記のように計算する。(TypeA の不確かさが1つの場合)

$$v_{eff} = \frac{(u_c)^4}{\frac{(u_{x-\sigma})^4}{n-1}} \quad \text{式(61)}$$

u_c : 合成標準不確かさ

v_{eff} : u_c の有効自由度

3.2.7 を例として、有効自由度を計算すると

$$v_{eff} = \frac{(9.65)^4}{\frac{(0.66)^4}{3-1}} = 91403 \quad \text{式(62)}$$

となる。包含係数 k は t 分布表より $t(v_{eff}, 0.05)$ を求めると $k = 1.96$ となることわかる。

校正結果に十分な再現性が得られず有効自由が、10 以下の場合、測定回数を増やす等の有効自由度を増加させる対応について検討する。

また、拡張不確かさが CMC を下回る場合は校正証明書の不確かさ欄に CMC の値を記載するため、有効自由度を再計算する必要がある。

この例の場合、再計算前でも十分な有効自由度があるため再計算の必要はないが手順の説明として記載した。

3.2.9 不確かさ関連のまとめ

被校正器を校正することによって得られた校正結果は、校正装置と被校正器の性能が混在した状態で導かれるため、この結果をもとに有効自由度を算出すると校正作業の信頼性が確認できるので、重要なチェックポイントとして活用できる。

このことから前記した算出例においても、見積もった不確かさに対し、校正装置の性能、被校正器である流量計の性能、環境管理の能力を発揮しており校正の信頼性が十分あることが確認できた。

4. 適合性の表明

メーカーとして校正を行う場合は、仕様に対して合否の判断をすることが前提となっていることが多いが、登録事業者として JCSS 校正を行う場合は、校正結果と不確かさを明らかにするところまでが前提となっている。

ところが、近年「JCSS 登録の一般要求事項」に、顧客の要望や用途によって、校正結果から「仕様や規格の範囲」に対して、これらの範囲内に校正結果が「存在する」かどうかを明らかにする合否判定、いわゆる適合性の表明について、一定の要件を満たすことで校正証明書に記載することが可能になった。そのため数値の取り扱い方法などを説明する。

4.1 校正の種類

校正には、以下の2種類がある。

- ・「測定値と不確かさ」を提供する校正
- ・「許容範囲のテスト」を行う校正

前者の「測定値と不確かさ」を提供する校正は、比較的高価な標準器（下位の計測器を校正することを目的とした計測器）を対象に実施することが多い。

一方、「許容範囲のテスト」を行う校正は、産業界において幅広い分野で使用される以下のような計測器に対して実施されることが多い。

- ・製品の品質を維持、改善するための計測器
- ・機器を保護（壊さないように）するための計測器
- ・生物への安全性を確保するための計測器

これらの計測器は、許容範囲内に校正結果があることの確認、すなわち「適合性の表明」が求められることが多いが、校正には不確かさが伴うため「誤って適合（合格）と判定するリスク (False Accept Risk)」

を考慮する必要がある。

4.2 適合性の表明方法

適合性の表明方法については、いくつかの論文で発表されているが山武が行う JCSS 校正では、以下の 2 つの方法を選択できるようにした。

- ・ APLAC TC 004 にある許容差から校正の不確かさを単純に引き、合否判定基準値を設定する方法
- ・ ANSI/NCSL Z540.3 のように許容差と校正の不確かさからリスクを計算し、合否判定基準値を設定する方法

まず、APLAC TC 004 に示されている方法は、許容差として決められている管理幅（片側）から単純に、校正の不確かさを引いた値を合否判定基準値とし、その合否判定基準値以下なら合格と判定する方法である。

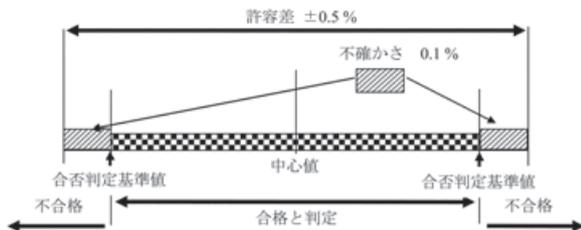


図 17. 合否判定基準

すなわち図 17 のように $\pm 0.5\%$ の許容差において、不確かさが 0.1% の場合、合否判定基準値は、

$0.5\% - 0.1\% = 0.4\%$ になるため、校正結果が 0.4% 以下で合格、 0.4% を超えると不合格として判定を行う単純な方法である。

もう一方は、ANSI/NCSL Z540.3 のように誤って合格と判定するリスク（False Accept Risk）を一定以下に抑えるため適切な合否判定基準値を統計的に導き出す方法である。詳細の説明は長くなるので、ここでは割愛するが、日本規格協会発行の「現場技術者のための計測技術入門－正しい計測が品質をかえる－」を参考にいただければ幸いである。

これらの方法を用いることで適合性の表明（合否判定）を校正証明書に書き加えることが可能になったので是非活用していただきたい。

5. JCSS登録情報

JCSS 登録情報については、独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター（NITE）のホームページを参照されたい。

<http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/lab/index.html>

6. 終わりに

産総研、NITE、山武の関係者の協力を得て 2011 年 4 月に流量の登録事業者になれたことに、まずは感謝したい。

水用流量計の JCSS 登録事業者は、近年増加しており、流量市場において、トレーサビリティが確保された不確かさ付きの JCSS 校正証明書を添付できるという新たな価値をお客様に提供できる環境が整ってきている。

山武はメーカーとして流量計をお客様へお届けするにあたり、長年、品質向上の取り組みを行ってきたが、今回 JCSS 登録事業者として認定されたことにより、より一層の信頼性が確保できたと考えている。

これらの蓄積された技術により校正された流量計は、お客様のもので、安心、そして安全に使用していただけるものと確信している。

<参考文献>

- (1) JCSS 不確かさ見積りに関するガイド
製品評価技術基盤機構
- (2) 計測における不確かさの表現ガイド
日本規格協会
- (3) 現場技術者のための計測技術入門
日本規格協会
- (4) NCSLI measure Vol, 1 No.4 Dec. 2006

<商標>

- ・ MELSEC は、三菱電機株式会社の商標です。
- ・ Harmonas-Flex は、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|---------------------------|
| 杉山 信幸 | 環境・標準化推進部計測標準センター |
| 山口 徹 | 環境・標準化推進部計測標準センター |
| 鈴木 伸 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 古市 紀之 | 独立行政法人 産業技術総合研究所 |

空調用バルブのライフサイクル メンテナンスの研究

Research on Life Cycle Maintenance of Motorized Valves for Air Conditioning Units

株式会社 山武

猿渡 亮

Makoto Saruwatari

早稲田大学

高田 祥三

創造理工学部経営システム工学科

Shozo Takata

キーワード

ライフサイクルコスト, 劣化進展予測式, 診断コスト, 余寿命診断

従来、山武の空調用バルブは製品自体の品質に加えて、定期訪問点検と定期交換を行うことで、さらに高品質を維持している。一方で定期交換した大部分はすべての寿命を活用し切れておらず、ライフサイクルコストや環境負荷の面で改善の余地がある。そこで次期空調用バルブ開発における一つの指標として各種保全方式（時間基準保全、状態基準保全など）を組み合わせる時におけるメンテナンス方式の導入効果の評価手法を検討したので報告する。

In the past, to ensure the continuing high quality of motorized valves for air conditioning, Yamatake has relied upon periodic on-site inspections and replacements, in addition to the inherent quality of its valves. However, since in most cases periodic replacement does not fully utilize the lifespan of the product, there is room for improvement with regard to factors like life cycle cost and environmental impact. Thus, in connection with the development of a new type of motorized valve for air conditioning, a maintenance method that combines various approaches (time-based, condition-based, etc.) into a single indicator was introduced. We report on a technique for evaluating its effectiveness.

1. はじめに⁽¹⁾

メンテナンスについての基本的な考え方は信頼性工学が未発達段階では、故障したものを修復する、いわゆる事後保全であったが、予防保全の概念が発達すると、時間基準保全（Time Based Maintenance, 以降TBM）の考えが取り入れられるようになった。しかし、劣化の進行は個々の設備の使用環境や運転条件により変化するため、TBMの場合、一定の時間間隔で予防保全を施すのでは早すぎたり、遅すぎたりする場合がある。それを補うメンテナンス方式として、状態基準保全（Condition Based Maintenance, 以降CBM）が考えられる。しかし、CBMを適用する場合においても、その適用の可否、検査周期などを判断するためには、各部の

劣化進展パターンを予測する必要がある。また、どれだけの精度で予測できるかによって、適用した際の効果が変わる。さらに、診断装置搭載の初期投資も考慮する必要がある。すなわち、CBMがメンテナンス方式として、常に優れているわけではなく、対象設備・機器の特性に応じて、TBM、CBM、あるいは事後保全（Breakdown Maintenance, BM）を適切に組み合わせる必要がある。

以上の背景から、本研究ではTBMやCBMを含む各メンテナンス方式の評価のために、運用データから得られる故障分布や劣化進展パターンにより、部位ごとにどのようなメンテナンス方式を適用すべきかを決定し、CBMを適用すべき部位には故障徴候検出成功率（設備診断能力）を評価し、最適となる診断周期、処置閾値

を導出する手法を提案する。さらに本手法を空調用バルブアクティブTM VY51 シリーズに仮想的に適用した事例を報告する。

2. メンテナンス計画手法⁽¹⁾

メンテナンス計画の手順は図1のように表すことができる。計画は対象の特定と準備の後、技術的要因と管理的要因で評価した後、ライフサイクル全体での期待影響度をシミュレーションにより求め、その結果に基づき最適なメンテナンス計画を決定する。ここで、期待影響度とは、予防保全、事後保全を含めたメンテナンス作業に関わる影響、およびそれに伴って生じる機器の機能低下の影響の期待値をライフサイクル全体にわたって求めたものである。

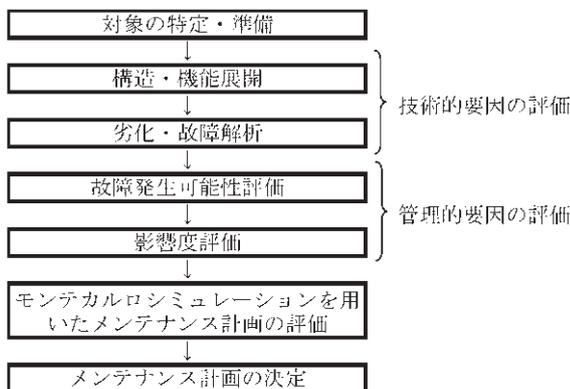


図1. メンテナンス計画手順

以下、この手順に沿って、3章で対象の特定と準備について、4章で技術的要因の評価について、5章で管理的要因の評価について、さらに6章でモンテカルロシミュレーションを用いた計画評価について説明する。

3. 対象の特定と準備⁽¹⁾

本ステップでは対象機器を特定し、どのような場面で使われ、機器がどのような構成となっているか、現状どのようなメンテナンスを行っているか、などこれから対象を解析するための前提条件や背景などを抽出することを目的とする。

今回の対象は空調用バルブアクティブ VY51 シリーズである。以降、各ステップの説明をこの機器を例にとって示す。

4. 空調用バルブの技術的要因の評価⁽¹⁾

設備の故障は設備を構成する最下位階層の要素にス

トレスが加わり、劣化モードが生起して、その影響が上位アイテムへ伝播することで起こる。ここで、ある階層に着目して、そこで発生する現象を時間軸上で捉えると図2に示す劣化・故障進展パターンとして表現できる。劣化・故障進展パターンは、ある検査法で検査を行ったとき、劣化が発生していると判断できる状態量のレベルである検出限界と設備が要求機能を発揮できなくなる状態量のレベルである機能限界との関係から、正常期、兆候期、故障の3つの期間に分けることができる。検出限界は検査法に応じて決まる検出精度に依存し、同じ状態量の場合、検出精度が高ければ検出限界も高くなり、兆候期 τ_D が長くなる。適用時に効果が得られるメンテナンス方式は劣化発生時期 t_D の予測精度と兆候期 τ_D の長さから決定される。図3に適用可能なメンテナンス方式と劣化・故障進展パターンの関係を示す。例えば、 t_D を正確に予測することができず、いつ劣化が発生するかわからない製品に対して、TBMを適用しても効果は得られない。また、兆候期間 τ_D が短い劣化・故障進展パターンに対して、CBMを適用しても、劣化発見後に処置を施す時間的余裕がないため、効果を得ることができない。また、CBMを適用する場合、劣化を検出するための検査方法の有無と、その検出精度についても考慮する必要がある。たとえ、漸進型の劣化・故障進展パターンであってもそれを検査する方法がなければ劣化を発見することができないからである。また、検出精度が低い場合、たとえ適切に検査を行っても兆候を見逃してしまう可能性があり、CBM適用の効果を得られない場合がある。

以上のように、技術的要因の評価では、劣化・故障進展パターンと検査方法の有無、適用した時の効果から技術的に妥当性のあるメンテナンス方式を抽出していく。

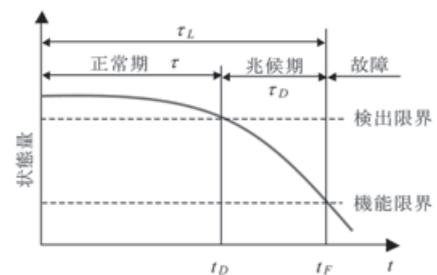


図2. 劣化・故障の進展パターン

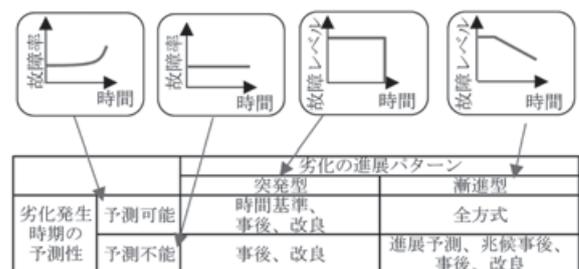


図3. 劣化・故障進展パターンの分類と適用可能な保全方式

4.1 構造・機能展開

構成する部品の把握とその部品同士の接続関係を把握するために、構造展開、機能展開を行う。図4に構造展開を行った結果を示す。図5に機能ブロック図を用いた機能展開を行った結果を示す。続いて、図4より得られた最下位階層のアイテムについて、図5に示す機能関係を考慮し、起こりうる劣化・故障を想定する。図6にそれらのうちの主な結果を示す。図5の機能ブロック図より、アクチュエータ部のアイテムの劣化・故障の影響はすべてバルブ部のボールに影響伝播する。ボールにおいては異物の噛込による固着がボール自身の運動停止を引き起こす。また、シートリングやグランドにおけるリークについてはバルブアクチュエータの部品には影響をおよぼさないものの、外部への影響がある。

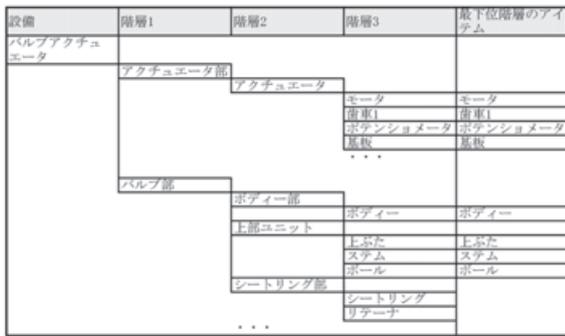


図4. バルブアクチュエータの構造展開

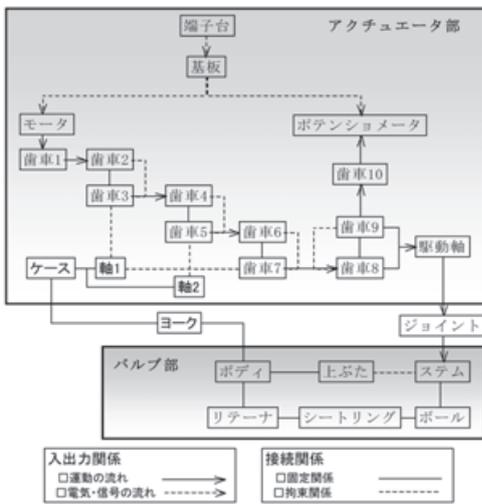


図5. バルブアクチュエータの機能ブロック図

	対象アイテム	劣化モード	故障モード
アクチュエータ部	歯車	歯面摩耗	騒音・振動
		歯面疲労損傷 歯の折損	騒音・振動 運動停止
	ポテンシオメータ	導通不良	運動停止
		部分摩耗	ハンチング
バルブ部	シートリング	摩耗	内部漏れ
	グランド	摩耗	外部漏れ
	ボール	摩耗 異物噛込	内部漏れ 運動停止

図6. バルブアクチュエータの劣化・故障モード

4.2 劣化・故障解析⁽¹⁾

本項では4.1にて列挙した劣化・故障モードにおいて、技術的に妥当性のある適用可能なメンテナンス方式を列挙する。

本研究では、劣化進展パターンは、使用中の機器の回収もしくは使用環境を模した環境にて劣化試験を行い、調査することで特定した。

劣化試験条件

- ・ 流体：温水
- ・ 流体差圧：1次側 0.3MPa, 2次側 0.1MPa
- ・ 動作回数：3, 6, 9, 12万回の4種類

以下に劣化進展予測式の決定手順を示す。

(1) 劣化モードの予測と観察

前述の構造・機能展開に基づき得られた対象部品の劣化・故障モードに対して、その発生箇所をSEMおよび光学顕微鏡を用いて観察を行い、検出可能な状態量の測定を行い、劣化モード発生を検証を行う。

(2) 劣化状態量と劣化進展パターンの検討

検証した劣化モードに対して、劣化メカニズムから劣化状態量を同定する。決定した劣化状態量の劣化進展パターンを劣化メカニズムに基づき予測する。

(3) 劣化状態量を観測するための検出量の決定

決定した劣化状態量を観測するための検出量の決定を行う。推測した劣化状態量と相関があると考えられる検出量を検討し、検出量の測定結果との相関分析を行う。

(4) 検出量に基づく劣化進展予測式の決定

決定した劣化状態量およびその進展パターンと検出量の実測結果に基づき、劣化進展予測式を決定する。

以降に劣化進展予測式導出例として、ポテンシオメータの場合を示す。

(1) 劣化モードの予測と観察

一般的に予測されるポテンシオメータの劣化モードは抵抗体焼損、摺動部摩耗、異物混入がある。これらの劣化・故障モードの発生メカニズムは図7の通りである。また、予測される劣化・故障モードに対して変化のあると考えられる状態量と状態量の測定法を図8に示す。光学顕微鏡による新品と動作回数3万回後の抵抗膜を観察すると、稼動回数が増えていくほど、摺動筋がはっきりしていくことが確認できた。観察結果を図9に示す。

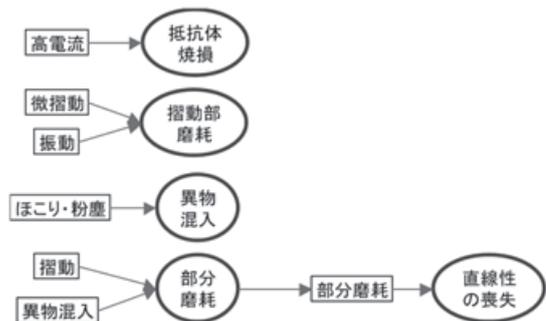


図7. ポテンシオメータの劣化・故障発生メカニズム

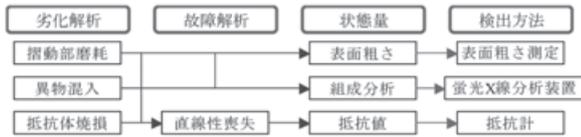


図8. ポテンシオメータの劣化・故障解析

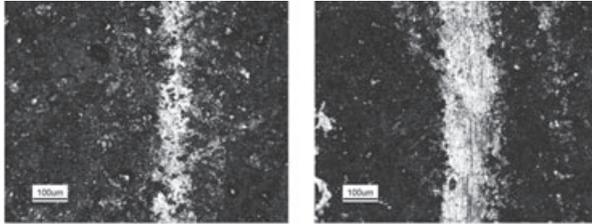


図9. ポテンシオメータ抵抗膜摺動部の観察結果
(左：新品, 右：稼働回数3万回後)

(2) 劣化状態量と劣化進展パターンの検討

摩耗の発生が観察できたので、摩耗により変化すると考えられる表面粗さを測定し、改めて摩耗の確認を行う。図10に測定結果を示す。抵抗膜は3本の摺動端子と接触しており、摺動端子との接触部の表面粗さの変化が見られる可能性が高いと考えていたが、大きな変化は見られないので、粗さの測定では摺動による摩耗は確認できないと言える。

続いて、デジタル輪郭形状測定機による抵抗膜の輪郭測定を行った。図11に輪郭の測定結果を示す。こちらにおいても、3本の摺動端子との摺動部に表面の凹凸が観察されると考えていたが、大きな変化は見られず、摩耗は確認できなかった。

最後に、摩耗により単独直線性が変わるという前提で劣化試験による単独直線性測定を行うことにした。しかし、現在使用しているポテンシオメータは長寿命品であり、故障時点まで劣化試験を行うことは現実的でないため、構造が同様であれば劣化進展パターンが同様になるという仮定のもと、比較的寿命が短いポテンシオメータを用いて劣化試験を行った。なお、運転スピードも実際の機器と異なり、回転速度100 [rpm]、稼働範囲90°にて加速的に耐久試験を行っている。図12に劣化試験により得られた稼働回数ごとの単独直線性からの増加量を表す劣化量 D と劣化式 $D(t)$ を示す。



	新品	稼働回数3万回後
評価長さ [mm]	2.5	
カットオフ値 [mm]	0.25	
Ra [µm]	0.5977	0.6206
Rz [µm]	2.477	2.280

図10. ポテンシオメータ抵抗膜粗さ測定結果
(左：新品, 右：稼働回数3万回後)

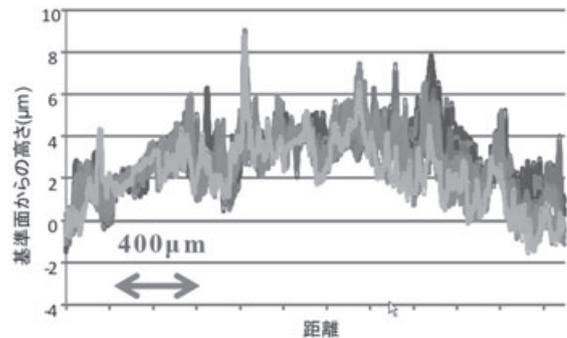


図11. ポテンシオメータ抵抗膜輪郭測定結果

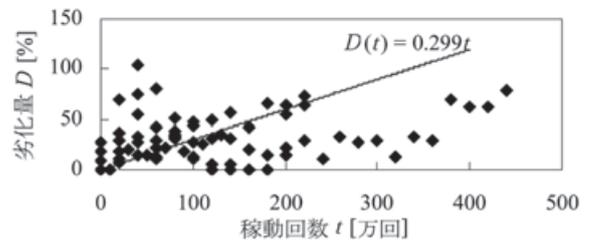


図12. 稼働回数に伴う劣化量と劣化式

(3) 劣化状態量を観測するための検出量の決定

以上のようにポテンシオメータの摺動による摩耗を3つの方法で検出することを検討した。直接、摩耗量を把握する目的で表面粗さ測定機による抵抗膜表面粗さ測定とデジタル輪郭形状測定機による抵抗膜の輪郭測定を実施したが、定量化は困難であった。そのため、代用特性ではあるが、ポテンシオメータの単独直線性の測定を試行し、稼働回数によって劣化が進んでいく状況を確認できたため、今回はこちらを劣化状態量の観測に使用するものとする。

(4) 劣化量に基づく劣化進展予測式の決定

劣化式は線形・指数・対数・累乗近似のなかで、分散が最も小さくなった線形近似を用いた。得られた劣化式は以下となった。

$$D(t) = 0.299t$$

余寿命の真値と予測値の相関を図13に示す。この結果より、実運用における余寿命予測値のばらつきの標準偏差を62年と推定した。ここで標準偏差が大きな値となってしまうが、実現場における平均寿命も260年程度と長い為、診断は可能であると考えられる。

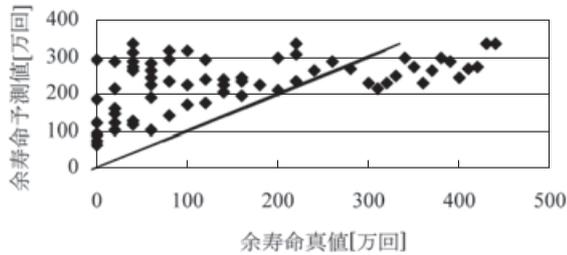


図 13. 余寿命真値と予測値の関係

5. 空調用バルブの劣化・故障の管理的要因の評価⁽¹⁾

管理的要因の評価では、技術的要因の評価により絞り込まれた適用可能なメンテナンス方式の中から、設備全体として資源の投資効果を最も得られるメンテナンス方式を選択することを目的としている。このために管理的要因の評価では、劣化・故障の発生可能性と影響度および設備管理特性の評価を行う。

5.1 故障発生可能性評価

故障の発生確率がワイブル分布に従うという仮定のもと、実際に使用されている機器の保全データから使用できるデータを無作為に抽出し、累積ハザード法を用いて劣化・故障モードごとにワイブル分布のパラメータを求める。結果を図14に示す。

なお、前述の機器の保全データは当社にて販売し、当社にて施工、適切にアフターメンテナンスを行っている機器のデータであり、使用環境や過度な動作頻度によっては早期に故障する可能性があることに注意する必要がある。

劣化・故障モード	ワイブルパラメータ	
	<i>m</i>	<i>n</i>
ポテンシオメータの導通不良	2.06	300
ボールの固着	3.36	150
シート、グラウンドでの漏れ	3.15	150
原因不明	2.13	230

図 14. 劣化・故障モードとワイブルパラメータ

5.2 影響度評価

影響度評価では、劣化・故障モードの生起や定期交換・定期検査により引き起こされる影響の大きさを定量的に評価する。一口に影響といっても、何に対すどのような影響なのかによって種々の影響項目が考えられる。そこで、影響度評価においてはこれらの影響項目に

関する評価を総合して影響度を算出する必要がある。以下に、影響度算出の手順を示す。

(1) 評価項目の選定

劣化・故障が発生した際に影響を受ける対象と影響の種類観点から、評価項目を階層的に展開した結果を図15に示す。



図 15. 選定した評価項目

(2) 評価値の決定

各評価項目が例えば損害額や停止時間のように定量的に評価できる場合には、その値を水準値として用いることができる。ただし、水準値を評価値とすると、評価項目ごとの絶対値の差の影響が出てしまう。そのため、各項目に対して、基準値を設定し(例えば、平均値、中央値、最大値など)、その値で割って規格化した値を評価値として用いる。

(3) 評価項目の重み付け

各評価項目についての評価値の求め方が決まると、次にそれらを統合するための重みを求める必要がある。重みは評価項目の重要度の違いを表すために与えるものである。この値は設備の管理方針に依存するもので、管理の重点の置き方の違いによって、同種の設備に関する評価項目でも異なった重み付けとなりうる。重みの算出には、AHP (Analytic Hierarchy Process) の絶対評価法を用いた。

(4) 影響度算出

図15の最下層に記載の評価項目について、それぞれ影響を想定する。想定する影響度はコストのみでなく、劣化・故障による様々な影響を総合した値である。各故障モードにおける影響度を図16に示す。

劣化・故障モード	影響度
ポテンシオメータの導通不良	0.112
ボールの固着	0.149
シートグラウンドでの漏れ	0.468
原因不明	0.270

図 16. 各劣化・故障モードの影響度

6. モンテカルロシミュレーションを用いたメンテナンス計画評価^{(2), (3)}

6.1 余寿命分布と余寿命予測精度を用いた設備診断能力評価法

5.2の影響度評価により求めた影響度は、事象が発生した時に生じる損失の値である。これに、故障確率をかけることにより、期待影響度が求まる。本研究では勝田らによる期待影響度に基づく保全計画評価手法を参考とし、モンテカルロシミュレーションを用い、故障分布に従い故障時間を発生させて影響度を累積することで、選択したメンテナンス方式のもとでの期待影響度を求めた。

この手法でCBMの評価も行うためには、余寿命を的確に予測し、故障の発生を予防できる確率である設備診断能力を評価する必要がある。

CBMによる診断は、観測される劣化の進展状況から余寿命を推定し、その時点で処置を施すか、次回の診断時点まで運転を継続するかを判断することを目的としている。よって、余寿命を正確に推定することが可能であれば、故障が発生する前に確実に処置を施すことができるため、故障確率は0となる。しかし、実際には劣化の進展を正確に測定できるとは限らず、また劣化が進展していない状態でも負荷によっては故障が発生する可能性があるため、余寿命の推定には誤差が存在する。従って、余寿命を実際よりも長く見積もってしまい、処置を施さないことで、故障が発生する可能性がある。ここでは、設備診断能力を余寿命の確率密度分布である余寿命分布と、余寿命予測精度を用いて評価する。

図17を用いて評価方法を説明する。ある期間使用した機器の劣化・故障モードの余寿命分布 $h(t)$ は①のような分布になるとする。一方、余寿命が t であるアイテムに対して、測定した劣化量から予測した余寿命予測値 τ は平均値 t 、標準偏差 σ の正規分布 $p(\tau-t)$ をとるとすると仮定する。このとき、 $t=t'$ で故障するアイテムに着目すると、その予測値は図17の②のようにばらつくこととなり、処置を施すと判定される確率は余寿命予測値 τ が処置基準となる余寿命閾値 t_c よりも短い場合

を考えることで求めることができ、図17の③の部分となるので、

$$\int_{-\infty}^{t_c} p(\tau-t')d\tau \tag{1}$$

と表すことができる。これをすべての余寿命について、計算することにより、今回の診断で処置すべきと判定される確率 P_{pm} は以下の式で表される。

$$P_{pm} = \int_0^{\infty} h(t) \int_{-\infty}^{t_c} p(\tau-t')d\tau dt \tag{2}$$

一方、故障確率は次回の診断時 t_d までに故障する場合を考えて求める。これは、次回の診断時以降故障する場合は次回以降の診断によって、予防保全が可能となる可能性があるためである。次回診断時より近い時点 $t=t'$ で故障する場合においても処置を施す必要がないと判定されてしまう確率は余寿命予測値 τ が余寿命閾値 t_c よりも長いと判定される、図17の④の部分となるので、

$$\int_{t_c}^{\infty} p(\tau-t')d\tau \tag{3}$$

と表すことができる。これを次回診断時までに余寿命が尽きるすべての場合について計算することにより、次回の診断までに故障する確率 P_f は以下のように求められる。

$$P_f = \int_0^{t_d} h(t) \int_{-\infty}^{t_c} p(\tau-t')d\tau dt \tag{4}$$

余寿命分布 $h(t)$ は、対象アイテムの故障分布関数 $f(t)$ から求めることができる。ただし、 $h(t)$ は余寿命を予測する時点に応じて定まる。今、アイテムの使用開始から x 回目の診断時の余寿命分布 $h_x(t)$ を考える。 $h_x(t)$ は前回診断時の余寿命分布 $h_{x-1}(t)$ から処置を施したアイテムの割合を引き、診断周期 t_d の分だけ平行移動した上で、合計確率を1とするために、残っているアイテムの割合で割ったものとなる。また、運用開始時点の余寿命分布 $h_0(t)$ は故障分布 $f(t)$ と等しくなるため、 $h_0(t)=f(t)$ と表すことができる。

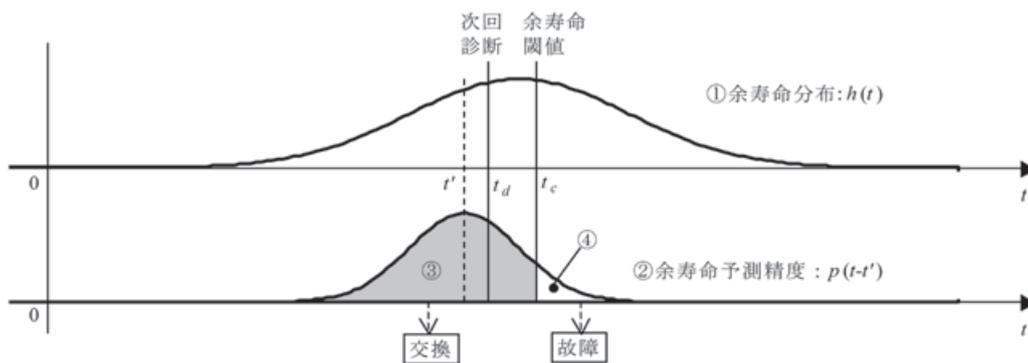


図17. 設備診断能力方法の概念

以上より、余寿命分布 $h_x(t)$ は次の漸化式で表すことができる。

$$h_0(t) = f(t)$$

$$h_x(t) = \frac{h_{x-1}(t+t_d) \left(1 - \int_{-\infty}^{t_c} p(\tau-t-t_d) d\tau \right)}{\int_{t_d}^{\infty} h_{x-1}(t) dt - \int_{t_d}^{\infty} h_{x-1}(t) \int_{-\infty}^{t_c} p(\tau-t) d\tau dt} \quad (5)$$

故障分布関数 $f(t)$ と一回目の診断時点での余寿命分布 $h_1(t)$ の関係を図 18 に示す。

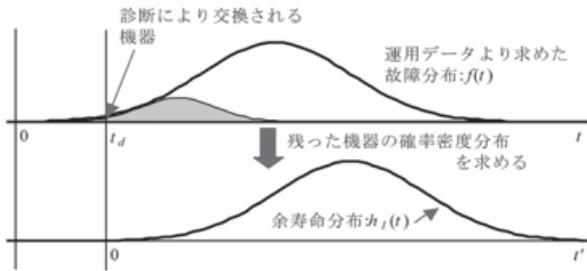


図 18. 故障分布関数 $f(t)$ と一回目の診断時点での余寿命分布 $h_1(t)$ の関係

6.2 余寿命予測精度の評価法

図 19 のように劣化式と稼動に伴う劣化量データがある場合を想定する。これらのデータの中であるアイテムの一つの劣化量データとそのアイテムが実際に故障した時点に着目する。

余寿命予測値の分布 $p(\tau-t)$ は、その劣化モードの劣化状態量の観測値から予測される故障時点と実際の故障時点の差のばらつきから求められる。

稼動に伴う劣化量を表す劣化式を $D(t)$ 、平均故障時点を t_f とおくと、ある部品 a の余寿命 T_{pre} は $D(t') = d_{a1}$ となる t' を用いて、

$$T_{pre} = t_f - t' \quad (6)$$

と表される。しかし、真の余寿命 T_{true} は実際にそのアイテムが故障する時間 t_{af} から診断時点 t_{a1} を引いた値

$$T_{true} = t_{af} - t_a \quad (7)$$

である。この真の余寿命 T_{true} から予測余寿命 T_{pre} を引いた値が予測値の差異であり、この差異を同種のアイテムすべての調査時点における劣化量について求める。この差異のばらつきが、求める余寿命予測値のばらつきとなる。

以上より、求められた余寿命の真値と予測値のばらつきは図 20 のように表現することができる。ばらつきの平均値は $T_{true} = T_{pre}$ となるため、各値はこの線を中心にはらつく。

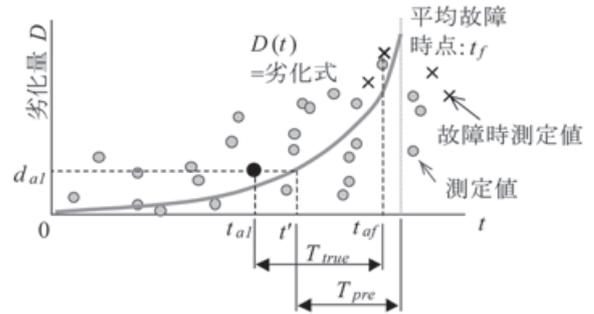


図 19. 劣化量データと劣化式

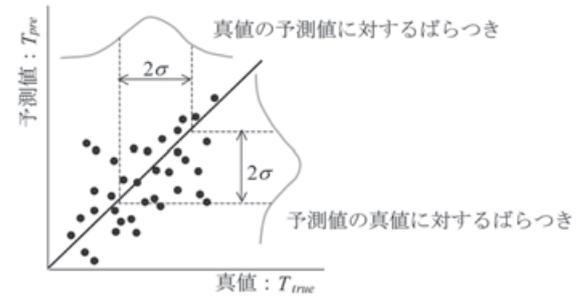


図 20. 余寿命の真値と予測値の関係

6.3 空調用バルブのメンテナンス評価

前述の手法に従い、ポテンシオメータに CBM を適用した際の効果を予測する。故障分布については運用データを用いた。ここで、評価期間は 50 年、モンテカルロシミュレーションの繰返し回数はメンテナンス方式の各組み合わせに対して 1 万回試行し、積算値を平均している。

まず、ポテンシオメータに CBM を適用せずに、定期交換周期を変えた場合の影響を図 21 に示す。この結果より、交換周期を伸ばすと影響度（≒ ライフサイクルコスト）を下げることができるが、不信頼率が上昇することが分かる。

ポテンシオメータに CBM を適用したメンテナンス計画においては、他の部品の定期交換周期が同じであれば、不信頼率を低減することができる。以降、基準として 10 年周期の定期交換を考える。本研究では 10 年周期の定期交換よりも不信頼率を低減させ、かつ影響度を最も低く抑えられる計画を選択することにより、ライフサイクルコストや環境負荷の低減を目指す。

図 21 より、基準とした 10 年周期の定期交換の場合より、影響度が小さく、不信頼率の上昇が一番低い組み合わせは 25 年周期の定期交換の場合となる。これは評価期間が 50 年であり、定期交換周期を 25 年以上としても定期交換回数が変わらず、バランスよく交換することが可能となり、不信頼率を低減できるためである。また、不信頼率が低減できると故障交換の回数が減るため、影響度を低減することが可能である。

以上より、ポテンシオメータ以外の部位を 25 年の定

期交換とし、ポテンシオメータの診断周期、閾値を変化させた際の年間不信率と影響度の結果を図 22 に示す。

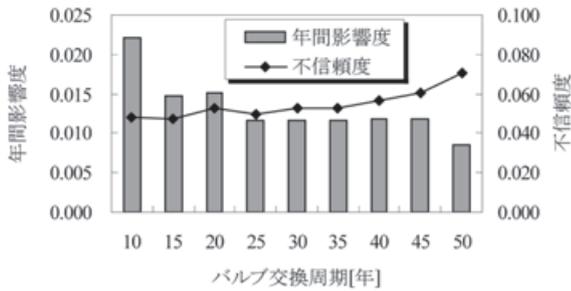


図 21. 定期交換周期と不信率, 影響度

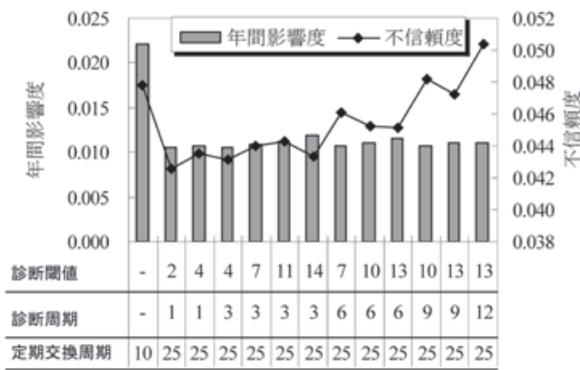


図 22. ポテンシオメータの診断周期, 閾値と不信率, 影響度

ポテンシオメータに、直線性を検出量としたCBMを適用することで、影響度、不信率の低減が可能となる。今回のように、余寿命予測精度があまり良くない場合でも、CBMを導入する効果がある場合があるといえる。また、図 21 に示したすべてのメンテナンス方式についての計算結果において、影響度の削減ができていたが、診断周期を長くしすぎると、不信率が10年周期のTBMよりも悪くなる場合もある。

以上の結果より、本研究で設定した前提条件の基では、基準として設定した10年周期のTBMよりも不信率を下げて、影響度を最小とするメンテナンス計画はポテンシオメータに対しては診断周期1年、処置閾値2年のCBMを行い、その他の部品を25年で定期交換する計画であるといえる。これにより、影響度を約50%、不信率を約10%削減することが可能となる。

7. おわりに

本研究では、状態基準保全を適用すべきか、適用するのであれば、どのように適用すべきかを個別に判断するのではなく、機器全体として最適な組み合わせのメンテナンス方式を計画するための評価法を示した。このために、状態基準保全を適用した際の設備診断能力を運用

データから得られる故障分布と劣化式に基づき評価する方法を示した。この手法を空調用バルブに適用し、ポテンシオメータに状態基準保全を導入し、その他の部品を時間基準保全とすることで、故障率と影響度(≒ライフサイクルコスト)を削減できる可能性を示した。

ただし、この方法を実際に導入するためにはさらに多くの正確な機器のデータの収集や個々の故障モードの実用的な診断方法の確立が必要であり、今後の課題としたい。

本研究で示したシミュレーションに基づく評価手法は様々な製品の環境負荷低減やライフサイクルコスト低減のニーズに対して有効であり、この手法を活用することにより、製品の更なる信頼性向上や製品価値向上が期待できる。

<謝辞>

本研究は早稲田大学との共同研究により、手法の構築、状態量の把握を実施することができました。本研究に卒業・修了時までご尽力いただいた棚山泰良氏、寺尾和樹氏に厚く御礼申し上げます。

<参考文献>

- (1) 高田祥三, ライフサイクルメンテナンス, JIPMソリューション (2006.)
- (2) 勝田祐司, 高田祥三, 期待影響度に基づく保全計画評価手法, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2007.), pp. 1171-1172
- (3) 穂積直裕, 金神雅樹, 高橋紹大, 武田敏尚, 岡本達希, 絶縁診断による電力危機のライフサイクル管理 (2002.), 電気学会 論文誌 A, vol. 122, No.4, pp. 421-428

<商標>

アクティバルは、株式会社 山武の登録商標です。

<著者所属>

猿渡 亮 バルブ商品開発部
高田 祥三 早稲田大学 教授
創造理工学部経営システム工学科

計装保全の効率化，生産ロスの低減を実現する， プラントライフサイクルを通じた価値を提供する機 器管理システムの開発

Development of the device management system which offers the value which actualizes the improvement of efficiency of instrumentation integrity, and the decrease of production loss passes through plant life cycle

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー

渡邊 桂
Kei Watanabe

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー

尾形 竜太
Ryota Ogata

株式会社 山武

尾形 知美
Tomomi Ogata

キーワード

HART, FOUNDATION フィールドバス, フィールド機器, 調節弁, 点検, 工数削減, 生産ロス

HART 通信や FOUNDATION フィールドバスをサポートした調節弁や計測機器は国内でも普及段階となったが、豊富な機能をいかに活用していくかが課題となっている。フィールド機器の初期導入時や、プラントシャットダウンメンテナンス時の機器の調整、点検作業を支援し作業の効率化（工数削減）をはかるとともに、プラント運転時の機器の監視および診断によって機器異常を起因とする生産ロスを低減するなど、プラントのライフサイクルを通して価値を提供する機器管理システムを開発したので報告する。

While control valves and measurement equipment which support HART communications and FOUNDATION fieldbus are widespread in Japan, putting their abundant functions to practical use is still a challenge. In this paper, development of an equipment management system that provides value throughout the lifecycle of the plant is reported. The system reduces production losses due to equipment irregularities by observing and diagnosing equipment during regular plant operation. In addition, it reduces the time required for initial field equipment installation and plant shutdown maintenance by supporting inspection and adjustment.

1. はじめに

HART 通信や FOUNDATION フィールドバスをサポートした調節弁や計測機器（以降フィールド機器）は国内においても採用されるケースが増え普及段階となってきた。HART 通信や FOUNDATION フィー

ルドバス通信を利用することによって、フィールド機器の初期導入時やプラントシャットダウン時に必要不可欠な調整・点検作業をシステムとして扱うことができるようになり、作業の効率化（工数削減）が可能となる。

またフィールド機器自体が持つ診断機能を活かしてより早期に異常を把握したり、データを継続的に蓄積す

ることにより、フィールド機器の故障時の前兆となるデータを把握することにより、故障を予知したりすることにも繋がる。このように情報を活用することによって、機器異常を起因とする生産ロスを低減することが可能となる。

このようなプラントのライフサイクルを通して価値を提供する機器管理システムを開発したので報告する。

2. 製造現場における課題

プラントのライフサイクルは一般的に、①設計・建設、②据付・調整、③運転、④保全、⑤廃棄の流れとなるが、通常②から④を繰り返し行い、必要な改造を行い、場合によっては廃棄することになる。

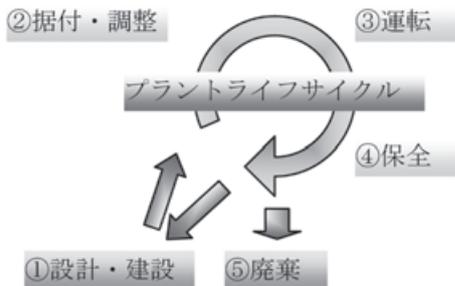


図1. プラントライフサイクル

プラントを構成するフィールド機器はプラントライフサイクルの中で様々な点検や整備が必要となる。

- ②据付・調整時
設計通りに計装されているかどうか、設定は適切かどうかの確認
- ③運転時
異常により運転に影響を与えていないかどうかの点検。さらには生産に影響を与えるような異常がないかの点検
- ④保全時
フィールド機器の検査や予防保全部品交換

これらの調整、点検、整備の作業は、計器室で分散制御システム (Distributed Control System, 以降 DCS) 上に表示されるフィールド機器のデータを確認する人と、実際にフィールド機器が設置されている現場に行き、携帯型端末などを接続して状態を確認する2人1組で実施している場合が多く、工数が多くかかることが課題である。

またフィールド機器が異常になる前に点検や整備、フィールド機器の定期交換部品の交換を行うと、運転や生産に影響を与えないが、コストが高くなってしまいます。逆に十分に点検や整備、部品交換を行わないと運転時に

フィールド機器の異常を起因とする生産の一時停止、生産しているものによってはその製品のロスを発生させてしまうことになる。点検、調整の時期を明確にし、無駄な点検を減らしつつ、必要な整備、部品交換を行うことが課題である。

これらの課題に対し、機器管理システムは、次の機能を提供することによって、フィールド機器導入時およびシャットダウンメンテナンス時の調整、点検作業の工数削減や、機器異常を起因とする生産ロスの低減を目指して開発された。

- (1) フィールド機器の管理を一元化
- (2) 計器室に置かれたシステムから調整作業を行うことによる調整作業の工数削減
- (3) 計器室に置かれたシステムから点検作業を行い自動化することによる点検作業の工数削減
- (4) アラートの発生状況やフィールド機器の各種データを監視し適切なメンテナンス時期の決定を支援

3. システム構成

3.1. ハードウェア構成

まずシステムのハードウェア構成について説明する。今回開発した機器管理システムは、DCS に接続して使用することができる。

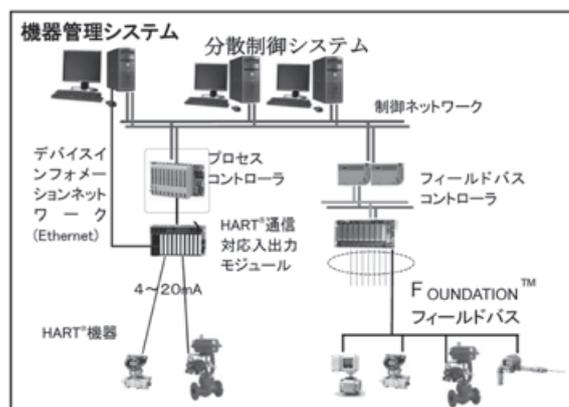


図2. システム構成

HART 通信を利用する場合は、プロセス・コントローラと HART 通信対応入出力モジュールを使用し、入出力モジュールとフィールド機器間はアナログ信号 (DC4 ~ 20mA) で接続、入出力モジュールと機器管理システム間はデバイスインフォメーションネットワーク (Ethernet) で接続する。

FOUNDATION フィールドバスを利用する場合は、FOUNDATION フィールドバス対応プロセスコントローラを介して、フィールド機器と機器管理システムを接続する。

3.2. ソフトウェア構成

次に機器管理システムのソフトウェア構成について説明する。機器管理システムは主に次の5つのソフトウェアで構成されている。

(1) 機器監視画面

機器の接続状態、アラート状態を表示する画面。DTM (Device Type Manager)、ループチェック画面、調節弁管理 PLUG-IN 画面の呼び出しを行う。

(2) ループチェック画面

フィールド機器の点検を行うループチェックを行う。

(3) 調節弁管理 PLUG-IN

調節弁に特化したメンテナンス支援アプリケーション

(4) アラートヒストリデータベース

フィールド機器のアラートを蓄積するデータベース

(5) プロトコル共通通信インターフェイス

FOUNDATION フィールドバス, HART の区別なく通信可能なように配慮された通信インターフェイス

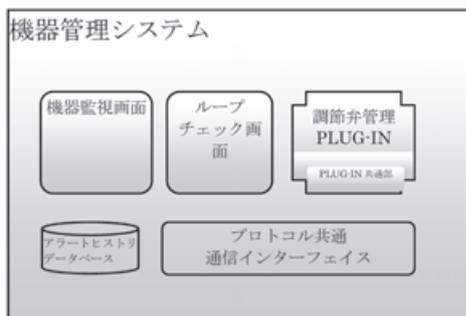


図3. 機器管理システムソフトウェア構成

4. 機器管理システムの特徴

4.1. 機器の一元管理

従来、フィールド機器の設定確認および調整には、現場で機器を操作する必要があった。そのため、プラントの制御値とフィールド機器の実際の値を確認するためには、プラント制御を行う計器室と現場とでトランシーバーなどを利用し、連絡を取り合う必要があった。

そこで、機器管理システムでは、各フィールド機器ベンダーが提供する、機器の設定や管理に必要なすべてのユーザーインターフェイスを含むソフトウェアコンポーネントであるDTMを起動することができる仕組みを実現した。また、各フィールド機器ベンダーが提供する、機器が提供できる機能や情報が記述された電子ファイルであるデバイスディスクリプションを機器管理システムで解釈し、機器の調整や設定を行う仕組みも実現した。このことにより、現場作業の回数を低減し、作業員の作業負荷軽減および作業時間短縮を実現する一方、ベンダーを問わずあらゆるフィールド機器の設定確認および調整を計器室で行うことが可能となる。そのため、従来は現場でなければ確認できなかったフィールド

機器の設定を計器室で直接管理することができるようになり、計器室におけるフィールド機器の一元管理を実現している。

4.2. マルチベンダーサポート

機器管理システムでは、フィールド機器との通信プロトコルにHART通信および、FOUNDATION フィールドバスを採用している。そのため、HART通信または、FOUNDATION フィールドバスをサポートしているフィールド機器であれば、ベンダーを問わずに管理することが可能である。

また、各フィールド機器ベンダーが提供するDTMまたは、デバイスディスクリプションを利用することにより、各フィールド機器への接続に特別な専用ソフトウェアを使用しなくても、同じ操作性でフィールド機器に接続できる環境を実現している。

4.3. フィールド機器の点検作業支援機能

機器管理システムはフィールド機器の点検作業を支援するために次の2つの機能を持つ。

- (1) HART対応フィールド機器が正しく設置、接続されているかどうかの確認を支援するためのループチェック機能
- (2) 当社調節弁の調整・設定機能

4.3.1. ループチェック

ループチェックは次の4つの機能からなる。

- (1) フィールド機器の接続状態確認
- (2) コミッショニング
- (3) AI/AOチェック
- (4) 点検作業進捗管理

ループチェックの機能はHARTユニバーサルコマンドを利用しているので各社のフィールド機器に対して使用可能である。

(1) フィールド機器の接続状態確認

接続されているフィールド機器のステータスを取得し、一覧に接続、切断、不明、不一致のいずれかの状態を表示する。



図4. 機器の接続状態確認

(2) コミッショニング

コンフィギュレーションされたフィールド機器の情報と、接続されているフィールド機器から取得した情報（ライブラリスト）とを比較し、一致しているかどうかの判定を行う。比較項目はデバイスタグ、デバイスタイプ、モデル名、HARTバージョンなどである。接続ミスや定義ミスなどを容易に検出することができる。

(3) AI/AO チェック

Analog Input (AI) チェックは、HART コマンドを用いてフィールド機器に疑似入力を指定し（入力値①）、プロセスコントローラに渡される AD 変換後の出力値（出力値①）と、HART コマンドで読んだ出力値（出力値②）とを比較し、一致しているかどうかの判定を行う。

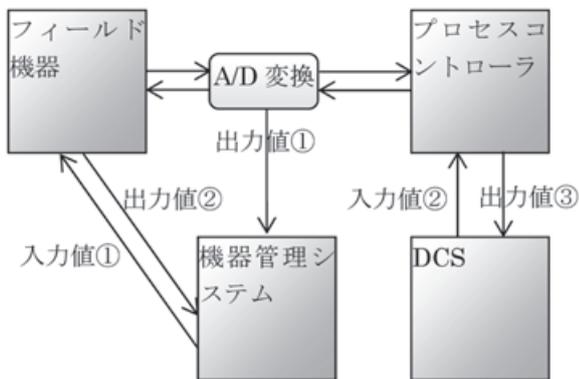


図5.AI/AO チェック

Analog Output (AO) チェックは DCS で出力値を指定し（入力値②）、プロセスコントローラからのアナログ出力値（出力値③）と HART コマンドで読んだ出力値（出力値②）を比較して一致しているかどうかの判定を行う。

(4) 点検作業進捗管理

フィールド機器の接続確認、コミッショニング、AI/AO チェックの実施状況をフィールド機器毎に一覧表示しループチェックの一連の作業がどこまで完了したかの確認をすることができる。

4.3.2. 調節弁の調整・設定支援アプリケーション

ポジションの調整・設定作業を支援するためのいくつかのアプリケーションについて説明する。

(1) 調節弁のステップ応答検査アプリケーション

プラント停止時に調節弁にステップ応答を与え、その応答波形をグラフや数値指標で可視化することで、調節弁の劣化や異常の判定を支援するアプリケーションである。同じステップパターンで検査を行った応答波形をグラフで重ね合わせて比較することができるため、調節弁に発生している劣化や不具合を視覚的に確認するこ

とができる。また、応答波形から求めた時定数や遅れ時間、整定時間などの定量的な数値指標は、調節弁性能の定量的な評価にも役立つことができる。

さらに、あらかじめ複数台の調節弁とステップパターンをプログラムすることができるため、多数の調節弁に対するステップ応答検査を夜間などに連続で自動実行させることで、効率的に作業を行うことができる。

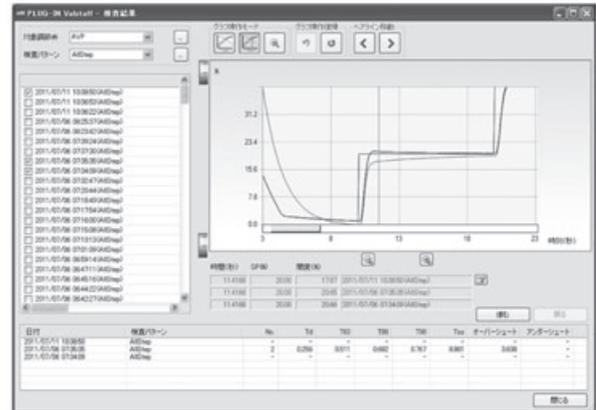


図6. 調節弁のステップ応答検査

(2) ポジショナのパラメータ管理アプリケーション

ポジションの調整・設定を容易に行い、その情報を管理するためのアプリケーションである。ポジションからデバイス情報や調整・設定データを読み、それらを一つの画面で確認・変更することができる。また、パラメータ管理の画面では、調整・設定情報を一括で管理することが可能である。管理された情報は、ポジション交換時などのデータの置き換えや、一つのポジションに対して異なる調整・設定を適用することが容易になる。



図7. ポジショナのパラメータ管理

(3) ポジショナのオートセットアップアプリケーション

当社のポジションが持つ自動調整機能であるオートセットアップを実行させるアプリケーションである。オートセットアップ中の調節弁の挙動を画面のグラフ

でモニタリングすることができるため、自動調整のプロセスに異常が無いかどうかを確認しながらの調整作業を可能にする。

また、オートセットアップの画面では、ポジションの調整項目や、平均動作スピード、ヒステリシス差指標値といった計測値を表示する。オートセットアップの前後でデータを比較表示するため、調整の良否や計測値に関連する異常の有無の推定に役立てることができる。

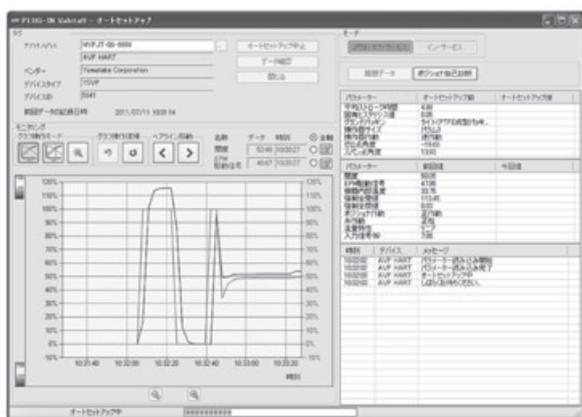


図8. ポジションのオートセットアップ

4.4. 機器の監視

4.4.1. アラート発生状況の把握

機器管理システムでは、フィールド機器のアラート発生状況を素早く把握するために、フィールド機器をツリー形式で表示する方法を採用した。

ツリー形式でフィールド機器を表示することにより、実際のフィールド機器を俯瞰的に把握し、アラートがどこで発生しているかを認識しやすい表示としている。ツリー表示にはプラントのシステム構成を元にした視点の表示および、プラントの管理単位を元にした視点の表示を用意し、フィールド機器の監視視点による切り替えを可能としている。

フィールド機器で発生したアラートは、対処の優先度を視覚的に判断できるよう、NAMUR NE107^{※1}で定義されたシンボルに準拠した優先度付けを行い、ツリーに表示する方法を採用した。

NAMUR NE107に準拠したシンボルは優先度の高いものをツリーの上位階層に表示することとし、どの場所で優先度の高いアラートが発生しているかを素早く把握することを可能としている。

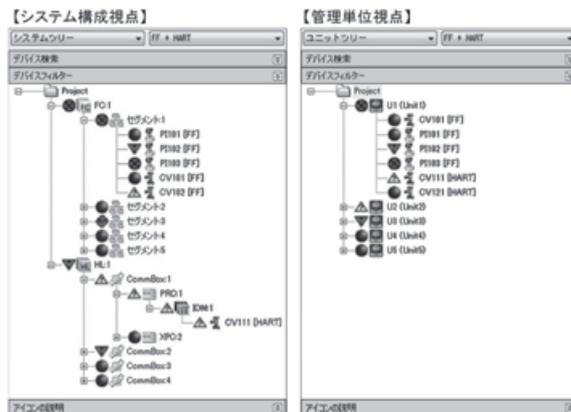


図9. 機器管理システムのツリー表示

また、ツリー表示はフィールド機器の種類別、ベンダー、デバイスタイプなどを使用してフィルタリングできるようにし、特定のフィールド機器のみをツリーに表示して、アラート発生状況を監視できることを可能とした。



図10. ツリー表示のフィルタリング

※1 NAMUR NE107 :

ドイツのプロセスオートメーションに関するユーザー団体NAMURが発行したフィールド機器アセット管理に関してまとめた要求仕様書。フィールド機器アセット管理に関しては世界的にデファクトスタンダード的存在として認知されている。

4.4.2. アラート監視

フィールド機器で発生したアラートは、データベースに蓄積することにより、フィールド機器で発生したアラートの履歴を管理することが可能となり、日時、NAMURシンボルなどの検索条件を使用して、アラート履歴から必要なアラート情報のみを素早く取り出すことを可能とした。また、フィールド機器で発生したア

ラートは、履歴の一覧から発生傾向や発生順序を分析・検証することができる。

アラート履歴に対して検索条件を指定して一覧表示することにより、例えば、不具合が発生したフィールド機器において、不具合発生直前1週間で発生した重大アラートのみを表示することが可能となり、フィールド機器で発生する膨大なアラート情報の中から、必要な情報のみを取り出すことが可能である。



図 11. アラート履歴のフィルタリング

また、アラート履歴を、CSV (Comma Separated Values) ファイルに出力する仕組みを用意し、発生アラートに対して詳細な分析を行うためのデータを提供することを可能としている。

4.4.3. オンラインモニタリング

オンラインモニタリングは、調節弁の稼働状況に関わる診断データをプラント運転中にポジションナから収集し、診断データとして表示、管理する機能である。診断の項目には、摺動部の劣化によるグラウンド漏れや操作器の動作異常の診断、プラグヤシート部の異常の診断、また、当社オリジナルの診断アルゴリズムを用いたスティックスリップ (固着・かじりなどによる調節弁動作異常) の診断などがある。

収集した診断データをリアルタイムでグラフ表示することで、劣化の進行や異常の兆候をプラント運転中に早期に検知することが可能になる。設定された周期で常時収集される診断データは、日常保全における参照データとしても活用できる。また、グラフ表示による視覚的な確認だけでなく、あらかじめしきい値を設定しておくことで、しきい値を超えた診断データが検出された場合にアラートを発生させることができ、異常の早期発見を助ける。

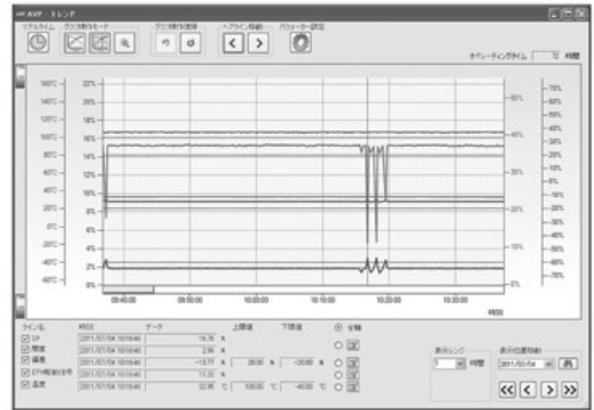


図 12. ポジションナのオンラインモニタリング

5. 機器管理システムの開発技術

5.1. フィールド機器メンテナンスアプリケーションのプラグイン化

フィールド機器のメンテナンス機能を機器管理システムからは独立したプラグインソフトウェア (以下、プラグイン) として開発することにより、さまざまなフィールド機器毎のそれぞれのメンテナンス支援機能をより容易に追加可能なシステムとしている。

最初のプラグインとして調節弁に特化したメンテナンス支援アプリケーション PLUG-IN Valstaff を開発した。開発したプラグインは、プロトコルの違いによる通信処理の差異を内部で吸収する仕組みになっている。そのため、ユーザーは HART 機器と FOUNDATION フィールドバス機器との違いを意識せずにアプリケーションを利用することができる。

また、調節弁に特化した画面や処理とそれ以外の汎用的な処理とを分離した仕組みとしているため、将来的に他のフィールド機器を対象としたアプリケーションを開発する場合にも利用可能であるような拡張性が高い内部構造になっている。

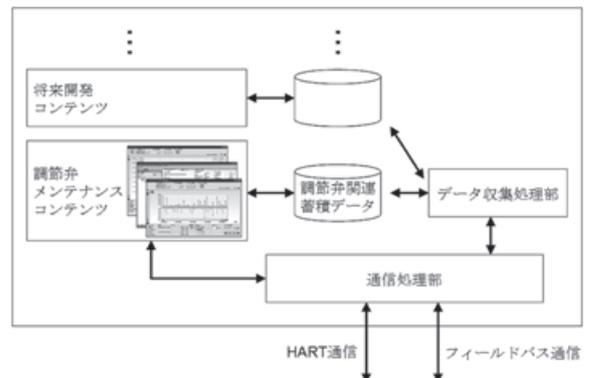


図 13. プラグイン化

5.2. フィールド機器に対する操作の動的切り替え

機器管理システムで管理するフィールド機器は、多種におよぶため、機器ごとに実行できる操作が異なる。そのため、機器管理システムでは、フィールド機器ごとに、操作メニューの内容、操作メニューの利用権限管理、操作メニューから起動されるアプリケーションの実行監視、DTM やデバイスディスクリプションの特定などを動的に切り替える仕組みを開発した。

フィールド機器ごとの異なる操作を管理するため、機器管理オブジェクトと呼ばれる操作内容などの情報を保持したオブジェクトを機器ごとにインスタンス化している。メニュー表示や DTM の起動時など、機器ごとに切り替える必要がある操作を実行する際は、この機器管理オブジェクトに従って、メニュー表示や DTM の起動が行われる。このことにより、実行時におけるフィールド機器ごとの操作内容の動的切替えを実現している。

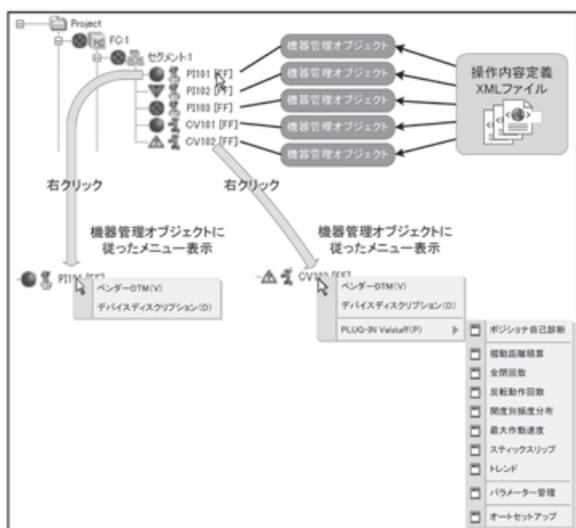


図 14. メニュー表示の動的切り替え

フィールド機器ごとの操作内容は、XML (Extensible Markup Language) ファイルで定義されている。この XML ファイルは拡張性を考慮し、プロトコルごと、ベンダーごと、モデルごとなどの区分で定義できる仕組みとしている。そのため、将来フィールド機器に対する操作内容が変更された場合でも、機器管理システムに影響をおよぼさず、XML ファイルの追加、拡張のみで柔軟に対応できるよう配慮されている。

6. おわりに

本稿では、プラントのライフサイクルを通して価値を提供する機器管理システムの機能および開発技術を解説した。

今後は、調節弁以外のフィールド機器に対応したプラグインを増やしメンテナンス機能の充実や、最新の

HART, FOUNDATION フィールドバス規格の対応を通してさらなる価値をユーザーに提供していきたいと考えている。

<商標>

- ・ Ethernet は、富士ゼロックス株式会社の商標です。
- ・ FOUNDATION は、Fieldbus Foundation の商標です。
- ・ HART は、Highway Addressable Remote Transducer の略語で、HART Communication Foundation の商標です。

<著者所属>

- 渡邊 桂 アドバンスオートメーションカンパニー 開発部
- 尾形 竜太 アドバンスオートメーションカンパニー 開発部
- 尾形 知美 技術開発本部商品開発部

計装保全の効率化、生産ロスの低減を実現する、プラントライフサイクルを通じた価値を提供する機器管理システムの開発

HART 通信対応プロセスコントローラ用 I/O モジュールの開発

Development of an I/O Interface Module for Process Controllers with HART Communication Capability

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー Shin Suzuki

鈴木 伸

キーワード

HART 通信, I/O, コントローラ

プロセスコントローラ用 I/O モジュールに HART 通信機能を搭載した製品を開発した。従来のアナログ信号による制御監視と計装に影響を与えない設計で、HART 通信対応とすることで、フィールド機器が持つ様々なデジタル情報を高速に取得することができる。その情報を機器管理システムに伝送し、プラントの機器管理やコミッショニングを実現する。

This paper reports the development of an I/O interface module for process controllers with HART communication capability. Designed so as not to affect conventional analog signals used for control monitoring and instrumentation, the I/O module can quickly obtain a variety of digital information from field devices with HART communication capability. This information is then sent to the device management system for use in plant device management and commissioning.

1. はじめに

フィールド機器のスマート化が進み、従来の 2 線式のアナログ電流出力ライン上に、デジタル信号を重畳した、HART 通信機能を有するフィールド機器（以下、HART 機器）が主流となっている。HART 機器自身およびプロセスの診断情報を、機器管理システムに伝送し、ユーザーに様々な情報の提供が可能となる。

プラントのライフサイクル（図 1）は 5 つに大別できる。

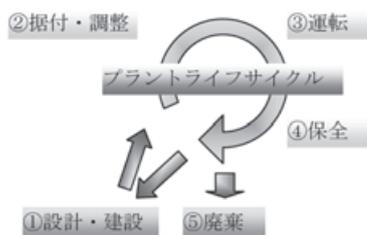


図 1. プラントのライフサイクル

①設計・建設

プラントの新規あるいは改良のための設計と建設を行う。

②据付・調整

フィールド機器を正しく設置し、配線を行い、設定・調整を実施する。

③運転

フィールド機器が正常に運転していることを確認する。フィールド機器やプロセスに異常が発生した場合には、点検を行う。

④保全

定期的あるいは、不定期にフィールド機器の検査や予防保全のためのメンテナンスを行う。

⑤廃棄

プラントに設置されたフィールド機器が寿命を全うし、廃棄する。

実際のプラントは、②から④を繰り返すことになり、このサイクルにわたり機器管理システムが提供できるユーザーへの価値は以下ようになる。

据付・調整：ループチェックを支援するツールから、HART 機器に対して、アナログ電流の固定出力を通信で設定し、その出力確認を通信で行う。この一連の作業は、すべて自動で実施できるため、作業員が不要となる。さらに、迅速で確実な据付確認が可能となる。

運転：HART 機器の診断情報やプロセスの診断情報を通信を用いて、定期的に取得し、HART 機器の健全性を監視する。さらに、HART 機器やプロセスに変化があった場合には、その情報を機器管理システム上に示し、ユーザーに適切な処置を促す。HART 機器やプロセスの異常がプラントのシャットダウンを引き起こさないよう未然に防止できる。

保全：従来の時間計画保全 TBM (Time Based Maintenance)⁽¹⁾ に加えて、状態監視保全 CBM (Conditional Based Maintenance) を導入し、保全の合理化や設備利用率の向上が実現されている。すなわち、時間が来たら正常な機器も、異常な機器も、プラントから取り外し、メンテナンスを行う方法から、③の監視で状態に変化があった機器に限定して、メンテナンスを実施するという方法と併用できる。さらに、メンテナンス後の動作確認も②据付・調整と同じ価値を提供できる。

これらの価値を提供するためには、HART 機器から HART 通信のデジタル情報を、機器管理システムに受信する装置が必要である。そこで、従来から当社の実績あるプロセスコントローラ用 I/O モジュール：ベースユニット型 I/O を利用して、そのパッケージの中に HART 通信機能を追加した BU100H シリーズを開発したので報告する。

2. 要求仕様

既設のアナログ電流信号を用いた制御監視システムに、HART 通信を用いた機器管理システムを導入する場合は、既設のケーブルをそのまま利用することができるという利点がある。

その方法として、HART 通信に対応した制御監視システムに全面交換するか、HART 機器との HART 通信を処理する外付けの HART マルチプレクサを利用する方法が一般的である。しかしながら、これらの方法は、導入の容易さや通信速度という見地から、お客さまの要求仕様を満たさない。そのため、現状の商品の課題を示し、本商品に対する要求を明確にする。

2.1 既存システムへの導入の課題

既存の制御監視システムに HART 通信を利用した機器管理システムを導入する場合に、図 2 のように、フィールド機器を HART 機器、I/O モジュールを HART 通信

対応 I/O に、制御監視システムを機器管理に対応した制御監視システムへ、全面更新する方法がある。

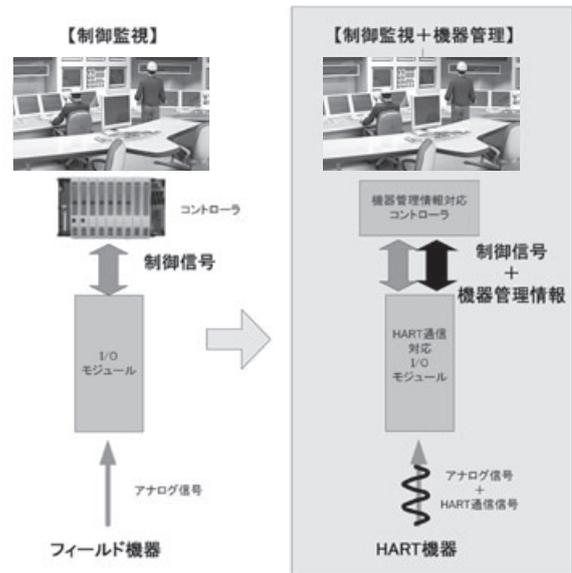


図 2. 既存システムからの全面更新

この方法は、稼働中の実績のある制御監視システムを全面的に更新するため、制御監視に与える品質上のリスクに加えて、設備投資が大きという課題がある。

その他の方法として、図 3 のように、外付けの HART マルチプレクサの導入が考えられる。この場合には、フィールド機器を HART 機器に変更し、HART マルチプレクサを外付けで追加し、機器管理システムを別置きする形となる。この方法は、既存の制御監視システムへの影響は少ない。しかしながら、HART マルチプレクサを設置するためには、コントローラ等が設置されているキャビネットに新たなスペースを作り、さらにアナログ信号線への追加の配線が必要となる。

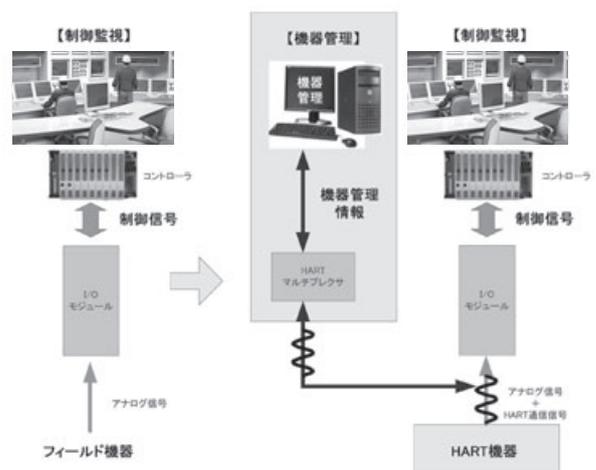


図 3. 既存システムから HART マルチプレクサの追加

既存の制御監視システムに機器管理システムを導入

するために示した2つの方法は、制御監視システムへの影響、設備投資、設置スペース、配線の課題がある。そのため既存の制御監視システムへの影響がなく、かつ、容易に導入できる構成が望まれていた。

2.2 通信速度の課題

機器管理システムを効果的に使用するためには、機器管理情報の更新周期、すなわち、HART 通信対応 I/O モジュールから HART 機器への HART 通信のコマンド/レスポンスの周期が重要となる。しかしながら、多くの競合の HART 通信付き I/O や HART 通信対応機器は、マルチプレクサ方式となっている。図4のように HART 通信を処理する回路は、HART 機器を接続するポート（以下、SLOT）数、用意されておらず、1回のコマンド/レスポンスごとに切り替えていく方式である。

そのため、図5のように、HART 機器が16台それぞれの SLOT に接続しているとき、すべての SLOT で1回ずつ通信を行うのに、非常に時間がかかる。

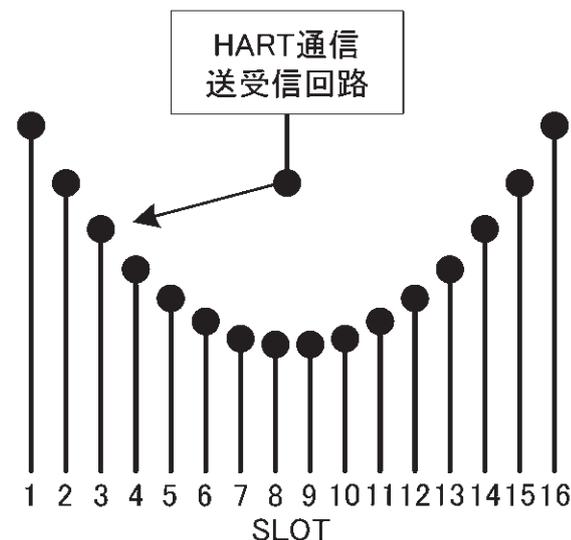


図4. マルチプレクサ方式

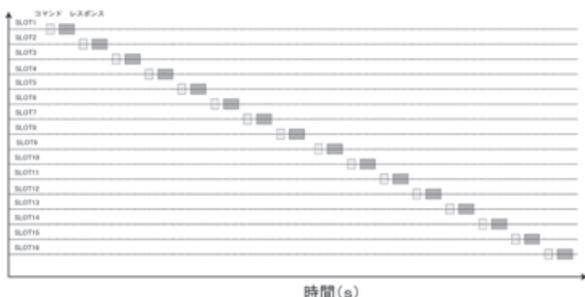


図5. マルチプレクサ方式のコマンドレスポンス

表1に SLOT 数による周期実行時間の見積もりを示す。例として、HART 通信の通信コマンドの1つである Command9 (4変数) を周期的に送受信に使用すると仮定すると、マルチプレクサで SLOT 数が16の場合、

計算上は、12.016秒ごとに各 SLOT が HART 機器と通信が可能となる。しかしながら、実際には、ハンディタイプで HART 機器を設定するコミュニケータのようなセカンダリマスタが HART 機器と通信するための監視時間や回線の切り替え時間を考慮すると、周期実行時間は悪化する。すなわち、HART 機器やプロセスに異常が発生しても、時間遅れを伴って、その情報が機器管理システムに通知されることになる。

マルチプレクサ方式を用いて、機器管理システムを実現すると、時間遅れのない診断情報等の収集が困難となる。

そのため、快適に機器管理システムを実施するためには、SLOT 数が1相当の通信速度が望まれていた。

表1. マルチプレクサ方式時の SLOT 数による周期実行時間

SLOT 数	周期 実行時間
1	0.751 秒
4	3.004 秒
8	6.008 秒
16	12.016 秒

* HART Rev7 Command9 (4変数) を使用し、Slave Time Out は100ms として計算

3. 開発コンセプト

2章で述べた課題から要求仕様を表2にまとめ、これらの要求仕様を満たすことを開発コンセプトとした。

表2. 要求事項

要求事項	説明
導入の容易さ	制御監視システムの品質を落とさずに、設備投資を抑えた導入
通信速度	スループットの高い通信の実現

3.1 導入の容易さ

BU100H では既存の制御監視システムを変更せずに、容易に導入できる構成を実現している。既設の I/O モジュールの代わりに BU100H を設置し、Ethernet ケーブルを利用して、機器管理システムと接続することで、既存の制御監視システムに加えて、図6のように機器管理システムが利用可能となる。

制御監視システムの信号は、既存製品と互換性を持った設計となり、従来通りの信頼性が確保できる。一方、機器管理システムに必要な機器管理情報は、制御監視システムとは、物理的に別の Ethernet ケーブルの配線と

なり、互いに影響をすることがない。

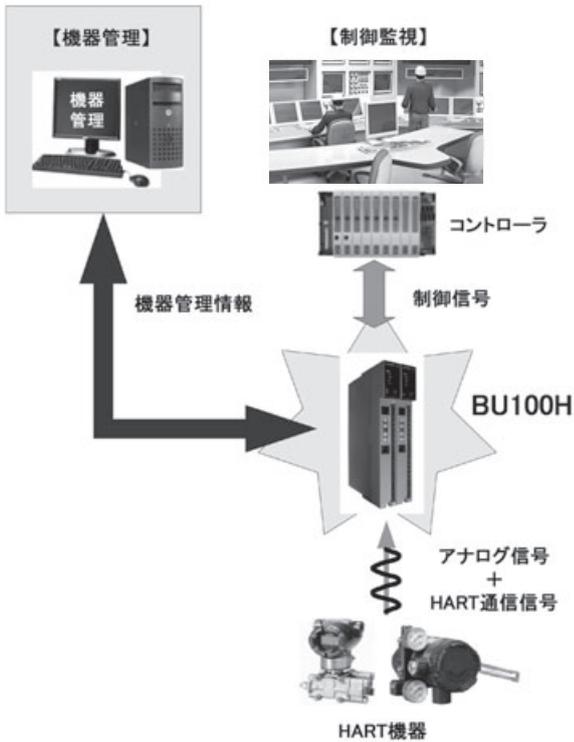


図 6. 機器管理システムと制御監視システム

3.2 通信速度

図 7 に BU100H の回路ブロック図を示す。従来の I/O 回路に加えて、HART 通信を処理する HART Network Interface (以下、HNI) 回路が追加された構成となっている。

要求事項を満たすために、図 7 のように、SLOT 毎に専用の HART 通信送受信回路を持つ構成とする。この場合のコマンドレスポンスは図 8 のようになり、SLOT 毎に、他の SLOT と独立して、コマンドの送受信が可能となる。HART 通信の通信速度をフルに発揮できる構成となる。

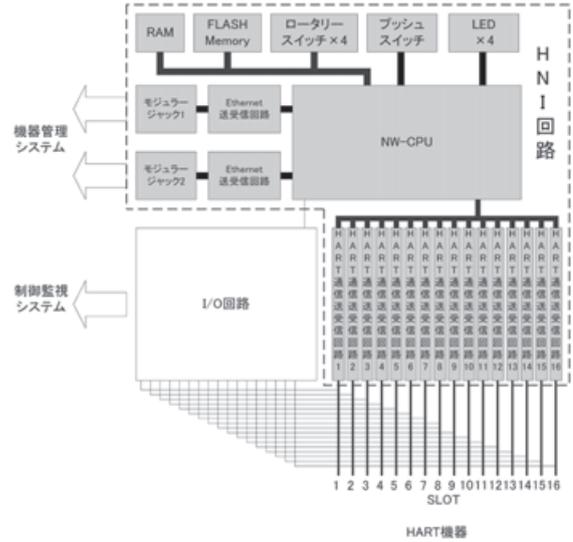


図 7. BU100H 回路ブロック図

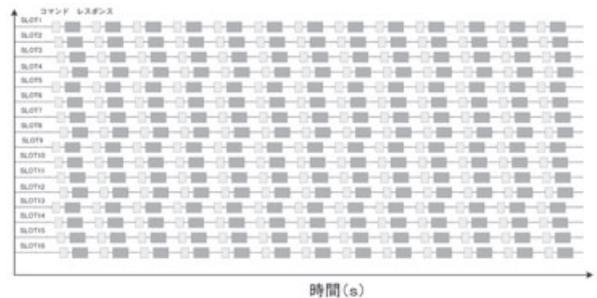


図 8. コマンドレスポンスイメージ

図 9 に HART 通信のプロトコルの OSI 層と HNI 部での実現方法を示す。HART 通信のデータリンク層の処理として、データリンク用 CPU (以下、DL-CPU) を SLOT 毎に配置する。アプリケーション層の処理はネットワーク用 CPU (以下、NW-CPU) を使用する。16 個の HART 送受信回路に含まれる、それぞれの DL-CPU と 1 個の NW-CPU は、十分な転送速度を持つシリアル通信で接続されている。このような構成をとることで、機器管理システムとの Ethernet 通信を処理する NW-CPU の負荷を分散している。



図 9. OSI 層と HART 通信部の構成

4. BU100H の特徴

4.1 リング接続による冗長構成

BU100H から機器管理システムの Ethernet を利用したネットワークは、図 10 のようにリング型ネットワークを構成している。複数の BU100H は、リング状に接続され、機器管理システムとの接続には、当社NXシリーズのコミュニケーションボックス（以下、CB）を利用する。BU100H 間、および、BU100H と CB 間は Ethernet ケーブルを利用して接続し、1つのキャビネット内に1つのリング型ネットワークを構成することを推奨している。リング型ネットワークを利用することで、Ethernet ケーブルの断線、コネクタ外れ等が1箇所発生しても別経路で通信を維持することが可能であり、安定した機器管理を実現するために冗長な構成としている。

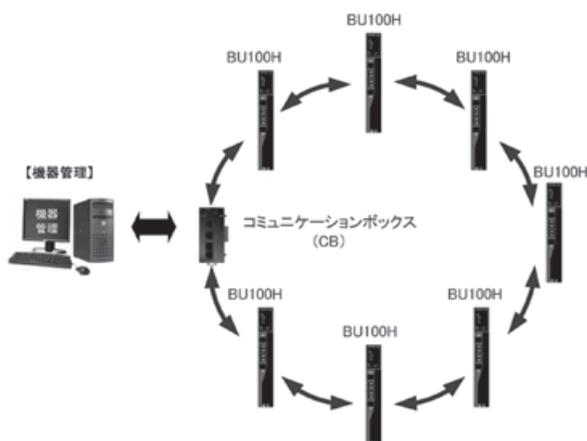


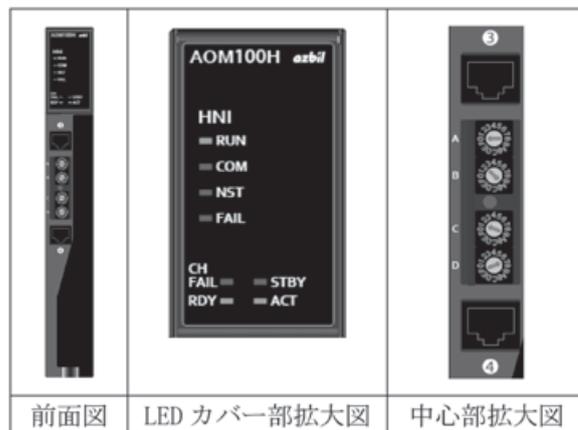
図 10. CB を利用したリング型ネットワーク

4.2 ユーザにやさしいデザイン

BU100H は、従来の I/O ケーブルを利用した I/O モジュールと互換性を保つために、限られた前面スペースに必要な機能をデザインとの調和を保ちながら配置した（表 3）。前面デザインの LED カバー部拡大図では、上部 4つの LED（RUN、COM、NST、FAIL）が HNI 部の状態を表す LED である。下部の 4つの LED（CH FAIL、STBY、RDY、ACT）は互換性を保つため、従来の I/O モジュールと全く同じ配置で同機能を持っている。

表 3 の中心部拡大図の白抜き③、④には、機器管理システムと接続するための Ethernet のリング型ネットワークを構成するポートである。A、B、C、D のロータリースイッチ 4つは、BU100H の IP アドレスを設定する。プライベートアドレスのうち、3桁目を A、B、4桁目を C、D のロータリースイッチを用いて、16進数で設定する。IP アドレスを変更した場合には、プッシュスイッチを押して、ソフトウェアリセットを実行する。このソフトウェアリセットは、I/O 部とは独立した機能であり、制御監視システムには影響しない。

表 3. 前面デザイン



4.3 オンライン F/W アップグレード

HNI 部は汎用的な HART 通信プロトコルを使用している。汎用的な通信プロトコルは小規模な改訂と大規模な改訂が、不定期に発生する。このような、規格の改訂に柔軟に対応できるように、HNI 部の NW-CPU と DL-CPU の F/W については、オンラインで機器管理システム上の専用アプリケーションからアップデート可能な構成となっている。機器管理システムからつながる BU100H の IP アドレスを設定することで、同時にアップデートが可能である。F/W のアップデートが終了したのちには、自動的にソフトウェアリセットが実行され、その後、正常に起動する。一連の F/W のアップグレードの間は、機器管理システムとの通信は停止されるが、I/O 部の制御監視システムには影響しない。

5. 機器仕様

I/O には、アクチュエータを駆動するためのアナログ電流出力の機能を有する AOM シリーズと、センサの電源を供給するとともに、アナログ電流入力の機能を有する HAM シリーズの 2種類がある。

BU100H シリーズの概略の仕様を表 4 に示す。

表 4. AOM/HAM シリーズ仕様

I/O 仕様	仕様	詳細
I/O 仕様	対応コントローラ	A-MC, PM100, PM-EX, HC, DOPC DOPCII, DOPCIII
	SLOT 数	16 (非絶縁) *1
	接続方式	I/O ケーブル方式
	アナログ入力	電流 4-20mA
	アナログ出力	負荷抵抗 750Ω _{max}
	HART 通信	出力形式
コミュニケータ		接続可能 *2
定周期実行		1秒~10秒
リトライ		3回~10回
HART リビジョン		HART Rev5, 6, 7
バースト機器		接続可
マルチドロップ接続		不可 *3

- *1 絶縁タイプとして使用する場合には、SLOT 毎に HART 通信対応の外付け絶縁器を接続する。
- *2 コミュニケータと HART 機器間の通信により、定周期実行が妨げられる。
- *3 SLOT 毎に 1対1 の高速通信を実現するため、1つの SLOT に 1台の接続とする。

6. 終わりに

既存のアナログ信号を用いた制御監視システムの信頼性を損なわずに、モジュールの交換のみで、高速で、安価に機器管理システムを導入するためのインフラとして、HART 通信対応 I/O モジュールを開発した。

本商品を利用することで、機器管理システムの導入が可能となり、プラントのライフサイクルにわたり、お客さまへ価値を提供することができる。お客さまの目に触れる機器管理システムの裏で安定した通信を実現するために、本商品が活躍していることは開発者として嬉しい限りである。

今後は、当社のお他シリーズの I/O モジュールに対応した HART 通信機器の開発を進めるとともに、機器管理システムのさらなる価値提供を行っていく所存である。

<参考文献>

- (1) TBM と CBM を併用した保全方式における TBM 実施間隔最適化モデル 日本原子力学会和文論文誌 Vol.6, No.3, pp.312-319 (2007)

<商標>

- ・HART は、Highway Addressable Remote Transducer の略語で、HART Communication Foundation の商標です。
- ・Ethernet は、富士ゼロックス株式会社の商標です。
- ・DOPC は、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

鈴木 伸 アドバンスオートメーションカンパニー
開発部

蛍光温度センサの開発

Development of a Fluorescence Temperature Sensor

株式会社 山武

衣笠 静一郎
Seiichiro Kinugasa

株式会社 山武

アドバンスオートメーションカンパニー

加藤 淳之
Atsushi Kato

株式会社 山武

アドバンスオートメーションカンパニー Norio Kikuchi

菊地 則雄

株式会社 山武

アドバンスオートメーションカンパニー Yusei Yanagawa

柳川 雄成

キーワード

蛍光寿命, 光ファイバ, 蛍光材料, 温度センサ

半導体ドライエッチング工程やマイクロ波による加熱工程など、高周波電磁場環境下での温度計測を目的とした、蛍光温度センサを開発したので報告する。蛍光温度センサが有する特長は、光が持つ電磁場無誘導性によって、高周波環境下でもセンサ信号が変調を受けないことにある。このため、マイクロ波が照射されている空間あるいは被処理物質の温度を、電磁ノイズを受けずに測定できる。今回、われわれが開発した蛍光温度センサの温度測定範囲、分解能およびマイクロ波オープン中での温度計測結果を報告する。

We have developed a fluorescence-based fiber optic sensor for monitoring temperatures in high-frequency electromagnetic fields, for use in processes such as semiconductor dry etching and microwave heating. Since light is unaffected by electromagnetic induction, the characteristics of the fluorescence temperature sensor include a stable sensor signal even in high-frequency environments. As a result, the sensor can measure the temperature of a space or processed material irradiated by microwaves without interference from electromagnetic noise. In this paper, the fluorescence temperature sensor's measurement range and resolution are reported, as well as the results of temperature readings taken in a microwave oven.

1. はじめに

マイクロ波による材料製造および乾燥工程では、誘電加熱を利用した局所的な加熱効果を利用することによって、反応時間あるいは乾燥時間の短縮を実現している。この効果は、投入するエネルギー総量の縮減を実現し、省エネルギーの効果を高めている。マイクロ波応用技術の開発を重点課題として位置づけた研究がすすめられ、いくつかの知見が得られている。

一方、半導体ウエハに加工される回路パターンでは、半導体素子の高密度化にともなって微細化が進行し、要求される加工寸法精度は、ますます厳しくなっている。たとえば、プラズマを用いて配線パターンを形成する、ドライエッチング工程がある。通常は、ウエハにバイアス電圧を印加して、電場でイオンを加速してウエハに引き込むことにより、異方性形状を実現している。ウエハ表面には入熱が発生するので、表面温度が上昇する。

このウエハ表面温度の上昇はエッチングによって形成される形状に影響する。反応生成物が被エッチング面に付着する。付着の度合がウエハ温度により変化する。したがって、処理中のウエハの温度管理ができていないと、面内で不均一なエッチング結果となり、歩留まりの低下につながる。

ウエハステージの温度を制御する必要性はあるが、エッチング中はマグネトロンから発生する電磁場の影響がある。エッチング中の表面温度計測システムが提案されているが、構造が複雑であるという問題がある。

マイクロ波による加熱プロセスや半導体ドライエッチングプロセスで必要とされる温度制御のために用いる温度センサとして、測温抵抗体や熱電対などの電気式センサは、適切ではない。電磁ノイズ対策を適切にとらなければ、センサ信号の変動、誘導加熱による破壊、他の電子機器に及ぼす影響が発生するからである。

代替される温度計測方法として、放射温度計が挙げら

れる。しかしながら、低温度領域では、被測温面からの放射量が極めて少なく、温度測定分解能が低下する欠点を有する。さらに、被測温面の状態が変わると放射率が変動するため、プロセス中の放射率モニターが必要である。

我々は、マイクロ波プロセス装置、あるいは、エッチング装置に装着する目的とした、蛍光温度センサを開発した。蛍光温度センサは、他の温度センサにはない特長を有する。蛍光温度センサでは、測温材料として用いる蛍光材料の温度依存性を利用している。開発した蛍光温度センサの動作原理と、性能を報告する。

2. 蛍光温度センサの動作原理

図1に、開発した蛍光温度センサを示す。蛍光温度センサは、励起光を発する励起光源と、励起光と蛍光を伝搬させる光ファイバと、雰囲気温度によって蛍光特性を変える蛍光材料と、蛍光を受光し蛍光強度を測定する蛍光測定器で構成される。

図2に、蛍光特性と蛍光材料の雰囲気温度の関係を示す。励起光源を点灯して励起光を蛍光材料に伝搬させると、蛍光材料から発生する蛍光強度は、時間が経過するに従って、強くなっていく。励起光源を消灯すると、蛍光強度は徐々に弱くなっていく（これを、消光という）。

蛍光の消光の速さは、蛍光材料の雰囲気温度によって変化する。消光の速さと蛍光材料の雰囲気温度の関係をあらかじめ求めておけば、実測定時に求めた消光速度から、蛍光材料の雰囲気温度を測定することができる。

励起光源を消灯した直後に、蛍光測定器で測定された蛍光強度を初期値として、所定の比率に蛍光強度が低下するまでの時間を求める。所定の比率にまで低下する時間を、蛍光寿命と呼ぶ。蛍光強度と蛍光寿命の関係を、式(1)で記述できる。

$$I(t) = I(0)\exp(-t/\tau) \quad (1)$$

t は、消灯直後からの経過時間、 $I(t)$ は時間 t 経過後の蛍光強度、 $I(0)$ は励起光消灯直後の蛍光強度、 τ は蛍光寿命を表わす。

図3に、蛍光寿命の温度依存性を示す。蛍光材料の雰囲気温度を、 -20°C から 350°C まで変化させた場合、蛍光寿命は 0.5ms ～ 4.3ms の間で一様に変化する。

蛍光温度センサの原理上の更なる特徴は、蛍光強度の相対変化率を使って蛍光寿命を導出することから派生する、蛍光強度の絶対値の影響を受けないことである。原理的に、励起光源の発光強度が瞬時変動しても、蛍光寿命は変わらない。

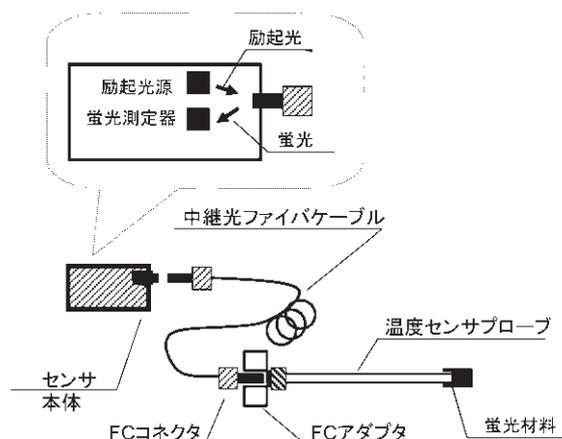


図1. 蛍光温度センサ

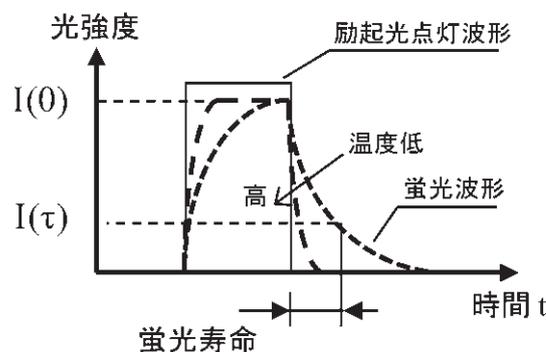


図2. 蛍光特性の温度依存性

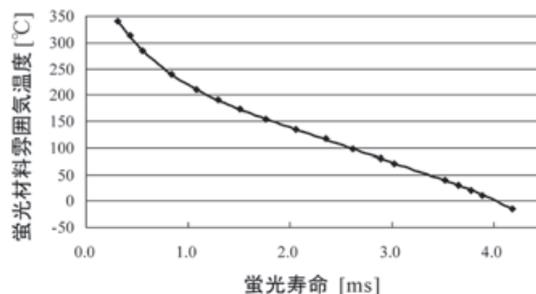


図3. 蛍光寿命の温度依存性

3. 蛍光温度センサの基本形態

開発した蛍光温度センサは、基本的に3つの部位に分けられる。

第1の部位は、センサ本体である。センサ本体には、励起光源、発光制御回路、光ファイバ結合部、蛍光測定器および出力機構を搭載した。光ファイバ結合器を用いて、光源から発する励起光を、光ファイバに結合する。励起光源として、発光ダイオードを用いた。発光制御回路から、発光ダイオードに電流を供給し、所定の周期で矩形波状に間欠駆動する。蛍光検出のための受光素子として、フォトダイオードを用いた。フォトダイオードからの光電流を電圧に変換して増幅し、蛍光寿命の導出に

用いる。測定結果を、出力機構を介して出力する。

光ファイバ結合部は、光通信などで用いられるFC型アダプタを用いた。

第2の部位は、中継光ファイバケーブルである。温度センサは、使用中に破断される場合、あるいは経年変化する場合がある。温度センサの交換頻度は高いが、装置内部に設置された温度センサを、複雑な機構部から抜き取り、新規なものに交換することに、コストがかかる。そのため、中継光ファイバケーブルを用意して、装置組み立て時に組み込む。温度センサプローブに交換の必要性が生じて、光ファイバ全体を抜き取らずに、温度センサプローブの交換だけで済む。中継光ファイバケーブルの片側の端面はセンサ本体側に接続され、他方の端面は、被測定領域の近傍に配置される。温度センサプローブは耐環境性（耐熱性、耐食性）が求められるが、中継光ファイバケーブルに耐環境性を要求しなければ、簡易な形状にすることができる。

図4に、中継光ファイバケーブルの外観を示す。中継光ファイバケーブルを、装置内部の各機構部の隙間を利用して敷設するために、光ファイバの曲げ最小半径、加重を考慮する必要がある。

機械負荷が、中継光ファイバの素線に加わらないように、保護部材で周囲を覆う。図4の外観図では、ポリビニル系被覆チューブを利用している。被覆材料を、用途に応じて変えることができる。

第3の部位は、温度センサプローブである。温度センサプローブは、光コネクタと、光ファイバと、蛍光材料およびそれらを保護する保護部材で構成される。光コネクタから励起光を光ファイバに送り込み、光ファイバ中を伝搬させて蛍光材料を照射する。蛍光材料で励起された蛍光が、光ファイバを励起光とは逆方向に伝搬する。

温度測定に用いるときは、温度センサプローブを、被測定物体に接触させるか、あるいは空間中に露出する。これにより、被測定領域の雰囲気温度による蛍光寿命の変化を起こす。温度センサプローブの形状は、用途に応じて様々な形をとる。被覆の材料、長さおよび口径を、要求内容に応じて、変更することができる。実施例を、図5に示す。

中継光ファイバケーブルと温度センサプローブを、FCアダプタを用いて接続する。図6に、FCアダプタを示した。アダプタ内部では、光ファイバ端部同士が、互いに押し付け合い、常に接触している状態になっている。

今回開発した蛍光温度センサでは、中継光ファイバケーブルと温度センサプローブを分離しているが、中継光ファイバケーブルと、温度センサプローブにはFCアダプタを介さずに、1本の光ファイバ素線で構成することもできる。

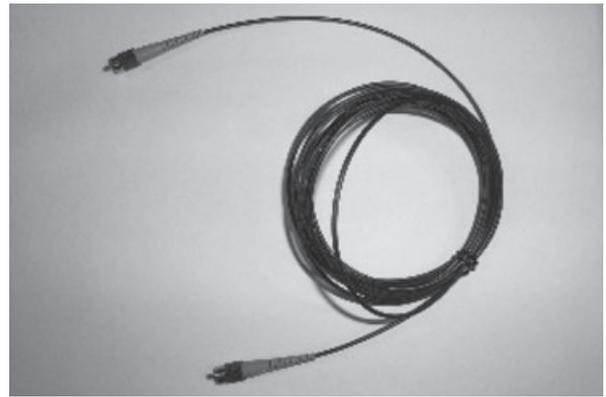


図4. 中継光ファイバケーブル

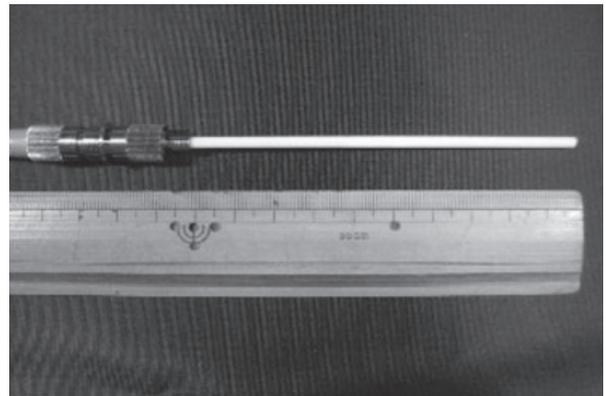


図5. 温度センサプローブ

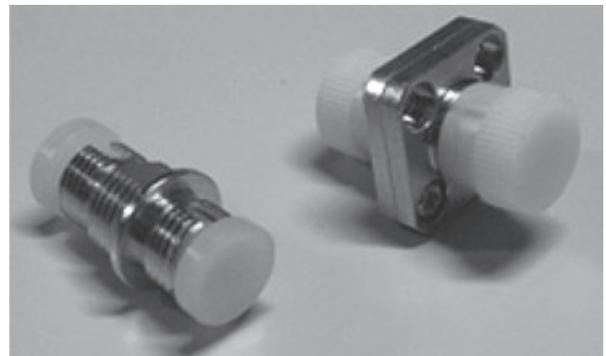


図6. FC アダプタ

4. 蛍光温度センサの性能

開発した蛍光温度センサの性能を、表1に示す。センサ本体の温度測定範囲は、 -200°C から 350°C までである。しかし、実際の測定上限および下限温度は、温度センサプローブの構成材料の耐熱性を考慮して設定される。とくに、測定温度が高くなるほど、使用できる材料が少なくなる。

さらに、蛍光材料の雰囲気温度が高くなると、蛍光寿命が短くなる。このため、高温領域であるほど、蛍光強度を測定するサンプリングレートを高速化する必要がある。

表 1. 性能

部位	項目	性能指標
センサ 本体	測定温度範囲	-200~350℃
	分解能	0.1℃
	更新周期	10Hz (標準値)
	使用温度	0~50℃
	保管温度	-20~55℃
	アナログ出力	4-20mA 0-10V
	光源寿命	40000 時間
温度セン サプロ ーブ	形状	蛍光材料と光ファイ バの 一体構成
	使用温度範囲	-40~150℃
		-40~250℃
-40~350℃		
中継光フ アイバケ ーブル	形状	単芯
	使用温度範囲	-30~80℃
	保管温度	-30~80℃

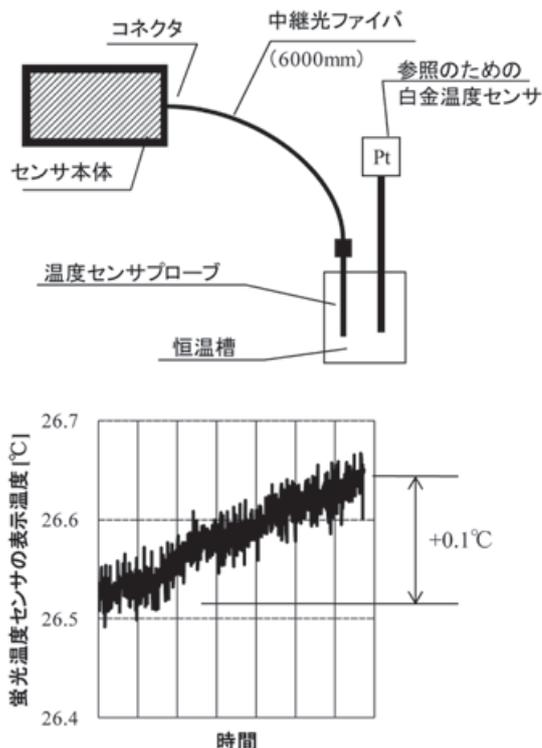


図 7. 微小温度変化時の表示温度変化

開発した蛍光温度センサの出力形式は、2つの形式から一方を選択できる。4-20mA 出力あるいは 0-10V 出力の選択が可能である。

蛍光温度センサを構成する部材の中で、最も劣化しやすい光源の寿命は 40000 時間である。光源の寿命は、発光強度が半分になる時間を定義することが多い。蛍光温度センサにおける光源の寿命は、蛍光寿命に影響を与え始めるまでの時間として定義されるべきである。加速試験を実施し、発光素子を 40000 時間 (5 年) 以上にわたり、使用できる結果を示した。

表示分解能は、0.1℃である。蛍光温度センサの温度センサプローブを恒温槽に設置して、密閉空間における自然温度変化を利用して、分解能を確かめた。図 7 に、測定系と測定結果を示す。参照のための白金温度センサを併設し、それぞれの温度センサが示す温度の変化を比較した。参照温度センサの表示温度が 0.1℃変化すると、蛍光温度センサの表示温度も 0.1℃だけ変化していることを確認した。

次に、加熱した物体の表面に、蛍光温度センサの温度センサプローブを接触させたときの応答性を調べた。蛍光材料中の発光点から蛍光を発するので、点計測となるが、発光点が出す蛍光強度は低い。十分な蛍光強度を獲得するために、一定の大きさの蛍光材料の集合体を必要とする。この蛍光材料の大きさが、応答性を決める要因であり、小さいほど良い。

図 8 に、加熱した物体の表面に、蛍光温度センサの温度センサプローブを接触させて得た、表示温度変動を示した。接触方法は、温度センサプローブを、断熱材で覆われた空間に挿入し、加熱体に垂直に接触させる方法である。蛍光温度センサプローブの表面を平面状に研磨し、加熱体の表面をも平面研磨した。

蛍光温度センサプローブと加熱体が接触する直前は、加熱体近傍の温度が暖められているので、わずかに表示温度が上昇する。

接触直前の表示温度と、接触後安定したときの表示温度の変化量のうち、63%相当だけ変化する時間を応答時間として定義する。接触する表面に、異物などが存在すると、接触面積が低くなって、温度センサプローブに加熱体から熱が伝わらない。表面を汚したときの参考値としての応答時間は、5.6 秒であった。一方、接触表面を清浄に保った場合、応答時間は 2 秒であった。

異物が介在することで、さらには、安定した後の表示温度に差が発生する。加熱体を 100℃に保った場合では、表面の清浄状態によっては、4.5℃の差が生じた。

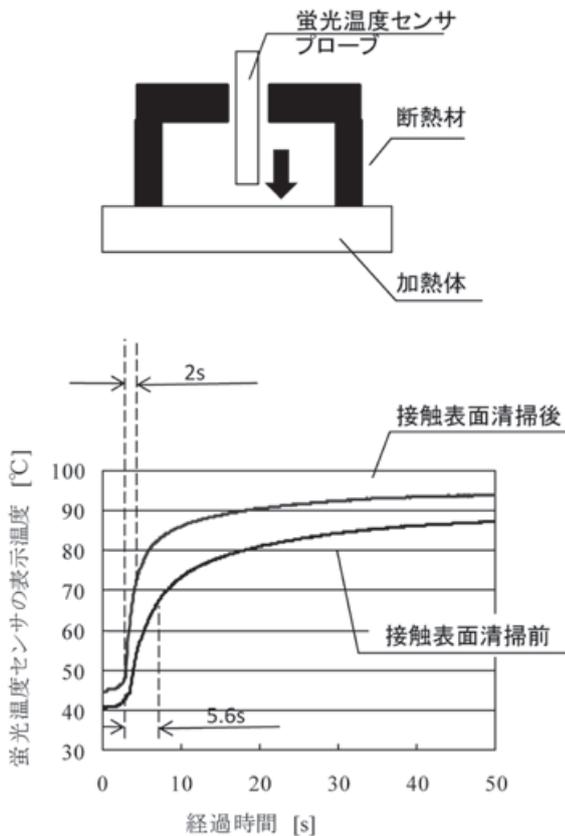


図 8. 応答性の評価

温度センサプローブを、グリースを熱伝達物質として用いて加熱体と接触させると、加熱体と温度センサプローブの物理的な接触面積が広がって、加熱体から蛍光材料への熱伝導を改善できる。これにより、上記数値(2秒)よりも、応答性を改善することができる。

蛍光温度センサの最大の特長は、高周波電磁場環境下でも電磁ノイズを受けずに温度を測定できることである。放射温度計とは異なり、低温度プロセスにも適用できることで、幅広いアプリケーションに用いることができる。

開発した蛍光温度センサの温度センサプローブに、マイクロ波を直接照射して表示温度の変化を調べた。

図 9 に、測定系を示す。開発した蛍光温度センサと、従来の電気式温度センサを束ねて、電子レンジに開口した挿入口から庫内に挿入した。庫内天井から約 70mm 程度挿入した。電気式センサとして、熱電対と白金温度センサを用いた。電気式センサをデータロガーに接続し、データロガーを介して連続的に温度を測定した。並行して、蛍光温度センサを連続的に用いた。

電子レンジは、家庭向け電子レンジである。パワーは 750W である。1 回あたりの稼働時間を 30 秒に制限した。

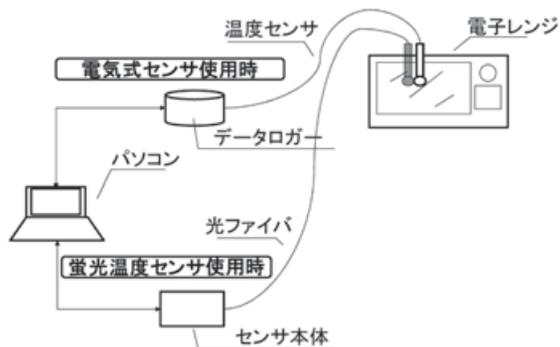


図 9. マイクロ波照射試験

図 10 に、熱電対と蛍光温度センサを同時に電子レンジの庫内に配置し、マイクロ波を照射して得た表示温度シフトを図示する。マイクロ波を照射すると、熱電対に誘導電流による発熱が生じることとデータロガーに電磁ノイズが伝わって、表示温度が異常値を示した。また、その異常値(波高値)の再現性がない。データロガー側の異常で測定できないこともあった。

蛍光温度センサは、誘電体で構成されているので、電磁誘導の影響を受けないが、電子レンジ中の空気が、庫内側壁からの熱あるいは水分子の加熱で温度が上昇して、表示温度が変化する。電子レンジの扉を開けて開放すると、表示温度は低下する。

蛍光温度センサは、電磁場環境下でも電磁ノイズの影響を受けることはないものの、蛍光材料と光ファイバを保護する保護材料が、誘電加熱で温められることで、表示温度がシフトすることはある。我々は、複数の被覆材料を用いて、マイクロ波照射による表示温度シフトを調べた。

図 11 を使って、マイクロ波照射による、被覆材質が異なる蛍光温度センサプローブを用いた時の、表示温度を比較した。

蛍光温度センサの温度センサプローブとして、3つのタイプを用いた。誘電損失が異なる2つの無機材料で保護された蛍光温度センサプローブ、高分子系材料で保護された蛍光温度センサプローブである。誘電損失が低い(無機材料 1) 蛍光温度センサプローブでの表示温度シフトが最も低かった。高分子系材料で蛍光温度センサプローブを保護した場合に比べて、無機材料で保護した温度センサプローブにおける表示温度シフトが小さかったのは、誘電損失が低くて誘電加熱が起きにくかったためであると考えられる。

表示温度のシフトが発生した理由として、マイクロ波による庫内空気そのもの(含まれる水分)が温められたことと、庫内の側壁の温度が上昇して、近傍の気体が温められ、庫内を循環しているためであると考えられる。

実際には、測定環境(水分、気体の流れなど)によって、マイクロ波照射後の温度変化量が異なると考えられる。温度制御のための温度センサとして用いる前に、表示温度シフトの大きさを把握しておくことが望ましい。

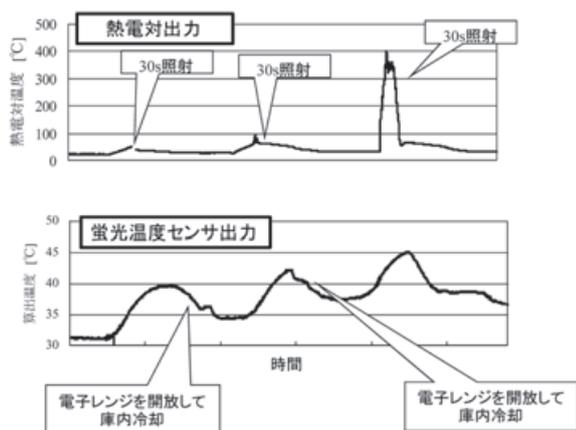


図 10. マイクロ波試験結果

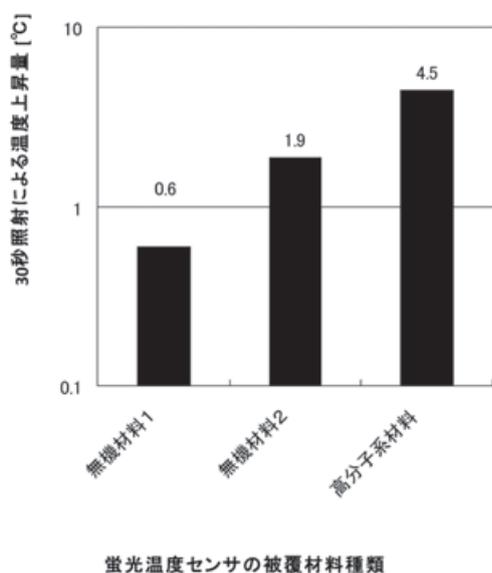


図 11. マイクロ波照射による表示温度シフト量

5. 蛍光温度センサのアプリケーション

蛍光温度センサは、電磁ノイズに無感であるという特色から、高周波プロセス中の温度制御を必要とする用途に用いることができる。想定できる応用例を、以下に掲げた。

半導体製造装置のプラズマ中の基板の温度測定、通電状態での集積回路の温度測定等に利用可能である。したがって、蛍光式温度センサおよび温度の測定方法は、半導体およびエレクトロニクス産業分野で利用可能である。

また、原油の2次および3次産出に用いる地中深くの蒸気の温度測定、および温度測定に基づくオイルパイプラインからの漏れ検知等、石油化学産業分野で利用可能である。

さらに、高電圧電力設備の保全等を目的とした、電力トランス巻線、高圧送電線、および発電器等の温度測定に利用可能である。

電子レンジ等で加熱中の食材の温度測定、マイクロ波を用いる殺菌装置又は乾燥装置の温度管理、高周波加熱を用いる木材、セラミックス、および繊維等の加熱装置、乾燥装置、および殺菌装置の温度管理に利用可能である。最近では、マイクロ波を用いた化学反応プロセス中での被処理物体の温度の測定に、用いられている。

さらに、超電導コイル、ハイパーサーミア装置やMRI装置の温度測定に利用可能である。

6. おわりに

蛍光温度センサは、高周波加熱プロセスにおける温度制御のための温度測定技術を具体化したものである。放射温度計とは異なって、低温度から高温まで幅広い範囲の温度測定を可能にする技術である。本稿では、商用利用が多い温度制御範囲を想定して開発した蛍光温度センサを紹介した。

高周波電磁場環境における温度計測を実現するだけでなく、自己発熱がない特性を利用して、低温度領域での正確な温度測定を実現すると考える。

蛍光温度センサの歴史は、他の方式のセンサと比べて新しい。しかし、特色がある温度センサである。応用する機会をみつめていきたい。

<参考文献>

- (1) K.T.V.Grattan and Z.Y.Zhang, “FiberOptic Fluorescence Thermometry,” Chapman & Hall (1995)
- (2) 衣笠, 秋季応用物理学会予稿集 (2010) 15a-ZL-7

<著者所属>

- | | |
|--------|---------------------------|
| 衣笠 静一郎 | 技術開発本部商品開発部 |
| 加藤 淳之 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 菊地 則雄 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 柳川 雄成 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |

紫外線検出センサ UV チューブの量産技術開発

Development of Mass Production Technology for Ultraviolet Sensor UV Tubes

株式会社 山武

關 宏治
Koji Seki

キーワード

紫外線検出, ガラス成形, 精密溶接, ガス封入制御, 画像処理, 燃焼安全装置

UV チューブとは燃焼安全装置の火炎検出器として使用される紫外線検出センサである。油・ガスバーナなどは火炎から紫外線を発生しており、UV チューブは特定の波長域の紫外線のみを選択的に検知する放電管の一種である。UV チューブの量産化には筐体を作るガラス成形技術、電極の溶接技術、微弱圧力制御を要求されるガス封入制御技術など高い生産技術力が必要不可欠となる。

本稿ではこれまで熟練した職人の勘、コツ、経験に依存していたガラス成形工程の機械化、画像処理技術による精密位置決めを実現した電極溶接工程、またサファイア真空計を用いることで封入ガスの微弱圧力制御を可能としたガス封入工程の量産技術について報告する。

UV tubes are used as ultraviolet radiation sensors in flame detectors for combustion safety equipment. The flame of oil and gas burners, for example, emits ultraviolet rays. The UV tube, a type of discharge tube, selectively detects only ultraviolet rays in a specific range of wavelengths. For the mass-production of UV tubes, advanced production technology capabilities are essential, such as technologies for molding the glass which forms the housing, welding the electrodes, and controlling the delicate pressure needed to introduce the gas.

This paper reports the development of UV tube mass-production technology, including the mechanization of the glass-forming process, which was previously dependent on the sense, know-how, and experience of masters in the field; an electrode welding process with precision positioning by image processing technology; and a gas-charging process in which control of the weak pressure of the filler gas is made possible by utilizing a sapphire vacuum meter.

1. はじめに

UV チューブは火炎検出器に内蔵される紫外線を検出するガラス筐体で構成された放電管センサである。工業用の油やガスバーナは燃焼時に火炎から紫外線を発生しており、UV チューブは 200nm 前後の波長域にある紫外線のみを選択的に検知することで、的確に火炎を検出することを可能としている。

UV チューブは燃焼安全装置の火炎検出器として、たとえば自動車のボディや部品の塗装ラインにおける乾燥炉やアルミ、亜鉛ダイカストに使用する溶解炉、また金属部品の焼き入れなど熱処理炉といった各種工業炉の燃焼制御の分野で幅広く使用されている。

近年、半導体の UV センサも開発されてきているが、

我々はガラス筐体の放電管での開発に強いこだわりがあった。これは何よりも使用者である顧客のメリットを最優先としたためといえる。

半導体 UV センサは微弱な信号の検出となるために、火炎検出器が使用される過酷な環境に対応するためには、複雑な増幅回路やノイズ対策が求められる。このため半導体 UV センサではガラス筐体の放電管に比較して当然製造コストが高くなってしまふ。さらに燃焼安全装置として半導体 UV センサでは、未だ信頼性にも疑問が残る。日本のモノづくりを下支えするすべての使用者、顧客の皆さまに低価格で長寿命、また定期保全などの交換時に調整が不要であるガラス筐体の放電管を市場に安定供給するために量産技術の開発を行った。

2. UV チューブ

2.1 UV チューブの基本構成および特徴

UV チューブは硬質ガラスで構成されたガラス管体を持ち、内部空間にタングステンからなるアノード電極、カソード電極一対の電極板を備えており、特殊な混合ガ

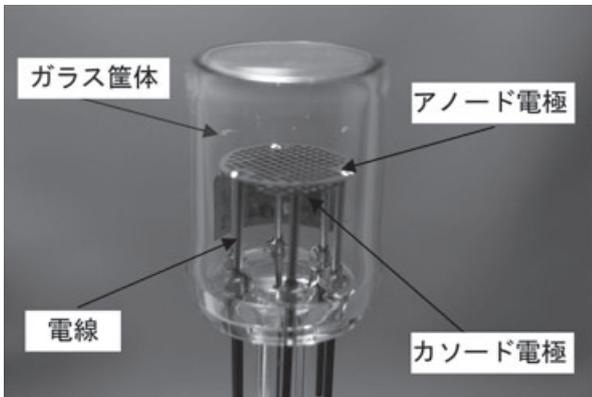


図1. UV チューブの構造

スが封入されている放電管である。2枚の電極板は一定間隔で、平行に配置されるように、それぞれ3本の電線に溶接されている。上面に配置されたアノード電極はメッシュ状に多数の貫通孔をもち、電極間には所定の電圧が印加されている。ガラス管体を介して入射された紫外線がアノード電極の貫通孔を通じてカソード電極に到達すると、封入された混合ガスが励起され、電極間に放電現象が発生する。この紫外線による放電現象を利用して、火炎の検出を行うセンサがUV チューブである。

火炎から発せられる特定領域の波長の紫外線のみによって放電が発生し、紫外線の入光が止まれば、直ちに放電がおさまることが、UV チューブの重要な性能の一つである。この性能を発揮できるUV チューブを市場に安定して送り出すためには、UV チューブを製品設計通りに、固体差なく生産する量産技術の開発が必要である。



図2. アドバンスト UV センサ AUD300C

UV チューブは燃焼安全装置である火炎検出器アドバンスト UV センサ AUDTM シリーズに搭載され、火炎の有無検出を的確に実現している。

2.2 UV チューブ製造における生産技術課題

UV チューブが安定した放電特性をもち、再現性よく紫外線を検知するためには、いくつかの要素があるが、アノード電極、カソード電極の2枚の電極板が正確に一定の間隔でかつ、平行に配置されていることが、最も重要な要素といつてよい。

このような電極をUV チューブに作り込むためには、まず電極が溶接される6本の電線が、正確に配置されたガラス成形部品、ボタシステムが必要となる。またUV チューブの管体を作るためにはボタシステムなどいくつかのガラス成形部品があり、これら一つ一つの部品精度が、最終的には電極の位置精度に影響を与えてしまう。ガラス成形には個々の部品を成形するだけでなく、複数のガラス部品を接合する加工工程もある。こうしたガラス成形工程の開発と量産設備としての自動化が、第一の生産技術課題であった。

さらに当然のことながら、電線への電極板の精密溶接工法の開発が必要であった。今回使用したタングステン電極は厚さが0.1mmと薄く、特にアノード電極は多数の貫通孔を持つため機械的な強度が低い。溶接時に負荷をかけてしまえば簡単に变形してしまい平行に配置することができなくなる。機械的な剛性に乏しい電極をいかに变形させることなく、決まった間隔で平行に溶接することが第二の生産技術課題であった。

UV チューブの放電特性を決定するパラメータの一つとして、封入されるガスの圧力が挙げられる。一般に平行な電極間での放電開始電圧は、封入されたガス圧と電極間隔によって決定することが知られている。UV チューブには電極間に一定の電圧が印加されているためガスの封入圧が変化してしまうと当然、放電特性に影響が及ぶ。封入工程の精密圧力制御の開発と量産設備化が第三の生産技術課題であった。

このほかにもUV チューブを安定的に量産するためには多くの生産技術的課題は存在するが、本稿では、ここに挙げた3つのプロセスにおける工法開発、設備開発について次項で述べる。

3. UV チューブの工法開発と量産技術開発

3.1 精密ガラス成形

UV チューブの管体を構成する硬質ガラスは作業温度が1000℃以上と非常に高いため、加熱にはガスバーナが使用されている。ガスバーナには高温でシャープな形状の火炎を得るために、可燃性ガス、支燃性ガス、そして空気など複数のガスが使用されている。安定したガスバーナの火炎を得ることが、ガラス成形を安定させるための第一歩となる。従来は安定した火炎を得るために、

熟練した職人による勘、コツ、経験によりガスの圧力や流量を調整することが行われてきた。筆者らは、この職人の目や感覚を質量流量計マスフローコントローラに置き換えることで、再現性のあるガスバーナの火炎を得ることに成功した。

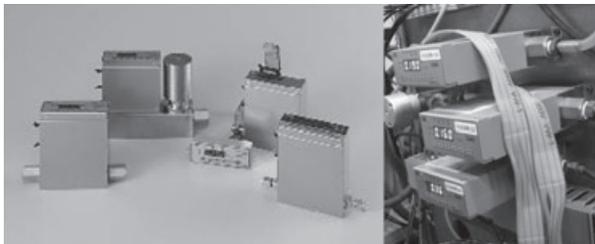


図3. マスフローコントローラ CMQ

今回使用したのは当社製品であるマスフローコントローラ CMQTM-V である。ガスバーナの火炎を制御するためには、特に支燃性ガスである酸素 O₂ の流量制御が重要となる。これは酸素の量がわずかに変化するだけで、火炎の温度が変化するだけではなく、火炎の形状が変化してしまうからである。ガラス管体の骨格ともいえるボタンステムのように、微細な形状を成形するためにはシャープな火炎が必要となり、ガスバーナの火炎制御の精度そのものが、生産歩留に直結しているといっても過言ではない。

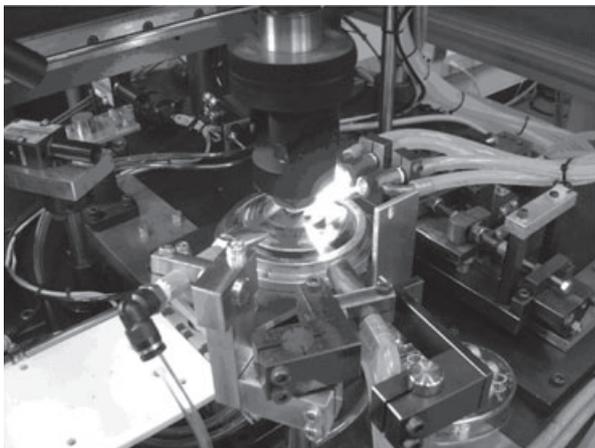


図4. 自社製ガラス成形機

マスフローコントローラ CMQ-V は供給ガスの圧力変動による影響を受けない質量流量制御であるため一系統のガスラインから複数のガスバーナに分岐させても、個々のガスバーナは設定された流量を安定して供給することが可能である。

筆者らが開発したガラスの成形プロセスは金型温度、ガラス温度を常時計測し、この温度データをガラス成形機のコントローラにフィードバックすることで、火炎の強さおよび金型のプレスタイミングを制御している。わずか数10秒の間にガラスは常温から1000℃以上まで加熱され、形状も劇的に変化していく。この変化をこれま

では職人が目で色や形を見て成形機を操作していたが、我々はこの職人の目を複数の温度センサに置換え、職人の経験を自社で開発した成形機にフィードバックし、経験をデータとして蓄積していくことで、安定した量産技術として日々進化している。

3.2 電極板の精密溶接技術

UV チューブの電極板の溶接工程としては、まずカソード電極をボタンステムにある6本のうち、3本の電線の端面に突き当て溶接、固定する。次に所定の間隔でカソード電極に平行になるようにアノード電極を配置して、アノード電極から突き出した電線の先端を溶融させることで溶接を行っている。

前述の通り UV チューブの放電特性を決定する重要な要素として、

- (1) 電極間隔が所定の範囲内にあること。
- (2) 2枚の電極が平行に配置されていること。

この2点が挙げられる。

まず電極間隔については、間隔が広すぎれば当然放電現象が発生しにくくなるため紫外線センサとしての感度は低下してしまう。反対に間隔が狭すぎれば本来、放電を発生させてはならない波長領域の光に反応し誤検知してしまう可能性や、紫外線の入光が遮断されても放電が止まらない、いわゆる偽放電による誤検出を引き起こしてしまうことが考えられる。

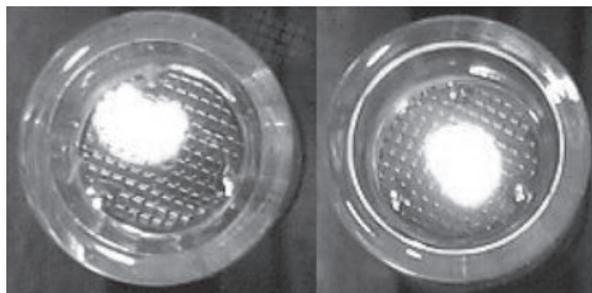


図5. 放電位置の比較 (左: 放電が中心からずれている
右: 放電が中心で発生している)

また2枚の電極板の平行度が確保できないと、狭い領域が、相対的に印加電圧が高くなり、集中的に放電が発生してしまうためセンサとしての寿命が短くなる傾向にある。

電極の精密溶接を量産技術として、実現する工法の一つとして画像処理による溶接箇所自動検出と位置決めを行った。電線はわずか直径0.65mmであり、電極の端面のどの部分を溶融させるかによってアノード電極の変形状態が毎回異なってしまう。わずか数10μmの反りや傾きが、UV チューブとしての放電特性に影響を与える工程であるため、人の目や感覚に依存することなく自動化することが、安定した量産には不可欠であった。

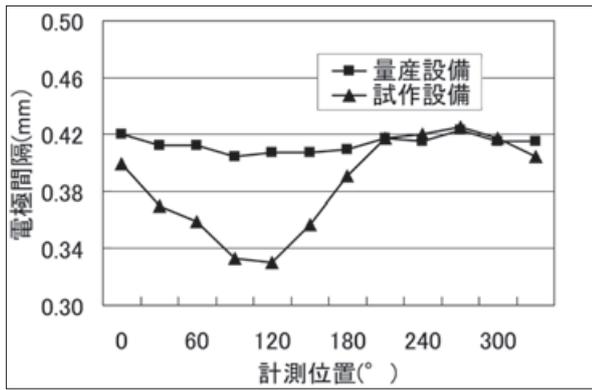


図 6. 溶接後の電極間隔の比較

図 6 に目視で溶接位置を決めていた試作設備と画像処理による位置決めを行った量産設備での電極間隔の違いを示す。電極間隔を円周方向に 30° ずつ 12 点測定している。試作設備では全体的に傾いているために、サインカーブを描いているのに対して、量産設備では、ほぼ平坦であり、電極間隔が全周にわたり傾きや変形が小さいことが確認できる。

さらに溶接した後の出来栄評価として、電極板を側面から連続的に複数箇所を撮影し、電極間隔が工程内基準で定められた範囲内にあるか画像処理によって自動計測する検査を行っている。

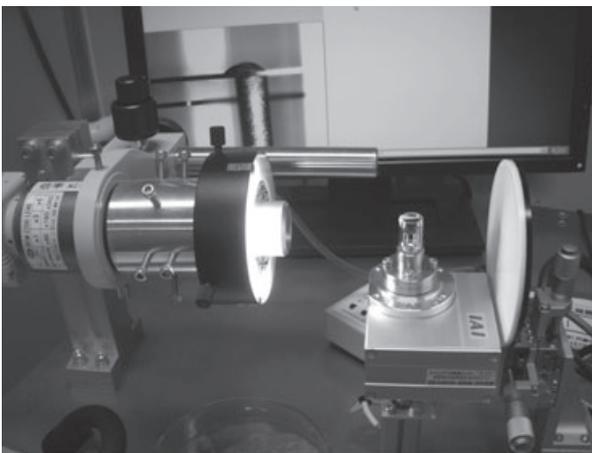


図 7. 電極間隔の自動計測設備

溶接工程では人が行うに有利な作業は人が行い、人が困難もしくは、人の作業では信頼性に欠けてしまう溶接の箇所的位置決めや電極間隔の検査などは機械が行っている。これは当社の企業理念である「人を中心としたオートメーション」を生産工程設計に適用した結果である。

3.3 ガス封入プロセスの開発

今回、筆者らが量産技術を開発した UV チューブは、より多くの分野へ提供できるようにする目的で、大幅なダウンサイジングを行っている。

UV チューブは小型化にすることで耐振動性、耐衝撃

性が向上するため、これまで使用が困難であった過酷な環境への適用が可能となる。



左側：
今回開発した UV チューブ
右側：
従来の UV チューブ

図 8. UV チューブの比較

その反面、従来と同等以上の機能を得るためには、これまで述べてきた構造体の寸法精度だけではなく、放電特性を決定するもう一つの重要な要素であるガス封入圧に対してもより高い精度が要求されるのである。これを実現する手段として、我々が選択したのは当社製品であるサファイア真空計 COVAC™ である。



図 9. 自社製ガス封入装置

サファイア真空計 COVAC をガス封入装置に選択した理由は 2 つある。

- (1) ガス封入プロセスでは高真空から大気圧まで数段階の圧力制御が必要であること。
- (2) 封入ガスには半導体の生産プロセスと同等のクリーン度が必要であること。

これら 2 つの要求に満足することができかつ、速い応答性をもつサファイア真空計は、ガス封入プロセスの圧力センシングには最適であった。

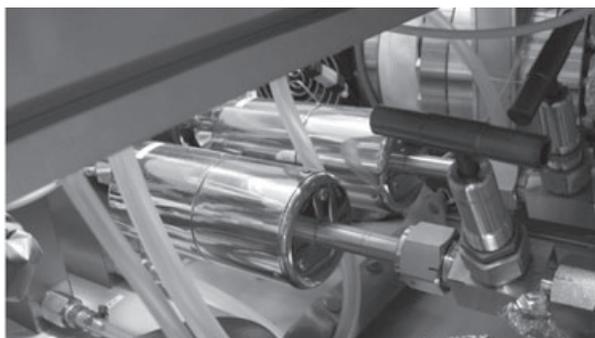


図 10. ガス封入装置に導入されたサファイア真空計

サファイア真空計 COVAC とマスフローコントローラ CMQ-V を組み合わせることで、複数台の UV チューブに同時にガスを封入するプロセスと量産設備を開発することができたのである。

4. UV チューブの量産設備

本稿では火災検出センサ UV チューブの工法開発および量産技術開発への取組みとして、ガラス成形工程、電極の溶接工程そして、ガス封入工程について報告してきた。しかしながら実際に UV チューブを量産するためには、今回報告した3つの工程以外にも多くの重要工程が存在する。

これらすべての工程が、目的通りに機能することではじめて、UV チューブを求められる仕様を満足する製品に作り込むことができると考える。

UV チューブの量産設備には自社の計測、制御機器が多く使用されている。本稿でも報告したようにマスフローコントローラ CMQ-V、サファイア真空計 COVAC に加えて、温調器としては計装ネットワークモジュール NX、デジタル指示調節計 SDCTM、マンマシンインターフェースとなるスマートターミナル大型マルチチャンネルプログラマブル表示器 EMS などが使用されている。当然ほとんどの設備には、光電センサ HPX や HP100 や近接センサ FL7M などが、使用されている。

つまり、ほとんどの設備の重要な機能を担う計測器や制御機器、センサは自社製品で賄うことが可能な環境にある。

さらにはガラス成形でもっとも重要な部品である金型も自分たちで設計し、自社の工機機能を駆使して試作型から量産型までを製造することができる環境をもつ。

前述したように、当社の企業理念は「人を中心としたオートメーション」で社会に貢献することである。持てる生産技術開発環境を武器に、UV チューブのすべての量産設備に、この企業理念を適用していくことが、筆者ら生産技術に携わるものの使命と考えている。

今後もさらに量産設備を進化させて、安心・安全・達成感をつかさどる UV チューブを提供していく所存である。



右上：
プログラマブル表示器 EST
左上：
計装ネットワークモジュール NX
右下：
デジタル指示調節計 SDC

図 11. 量産設備に導入された制御機器

5. おわりに

UV チューブは長年の研究開発を経て、本格的な量産へ移行することが可能となりました。これは長きにわたり、真摯に技術開発にあたられてきた製品開発者の努力と厳しい目で UV チューブの性能を評価頂いた顧客の皆さまのお陰に他なりません。また量産工程開発、量産設備開発でご協力を頂きましたすべての皆さまにこの場をお借りして、御礼申し上げます。

<参考文献>

- (1) 熊澤：焼安全制御技術を用いたコントローラの開発
azbil Technical Review (2011), pp. 70-75,
株式会社 山武
- (2) 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), pp. 28-34,
株式会社 山武

<商標>

AUD, CMQ, COVAC, SDC は、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

關 宏治 技術開発本部基幹技術開発部

Technical Review

azbil Technical Review azbil グループ技術研究報告書 2012 年 1 月発行号

発行日 2012 年 1 月 10 日 (通巻 53 号)

発行責任者 高橋実加子 (株式会社 山武 経営企画部広報グループ)

編集委員会 編集長: 塩手良知

委員: 米田雅之、吉永純一、柏屋弘、大谷秀雄、早川勲、北條達也、
込堂雅幸、岡山喜彦、吹浦健、西沢旬一、土橋恭彦

事務局: 小貝正義、菅野裕子

発行所 株式会社 山武 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

© 2012 Yamatake 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。

2012 年 4 月 1 日、株式会社 山武はアズビル株式会社へ社名を変更いたします。

azbilグループ 技術研究報告書
azbilテクニカルレビュー

azbil

株式会社 山 武

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



PR-1106J(1201-8K-KY)

本誌からの無断転載・複製はご遠慮ください。
記載内容は、お断りなく変更する場合がありますのでご了承ください。