

**azbil**

# Technical Review

2009年12月発行号

山武グループ —技術研究報告書—  
azbilテクニカルレビュー



株式会社 山武

**azbil**  
グループ

創業 1906年 山武の進化  
人を中心としたオートメーション

# Technical Review

2009年12月発行号

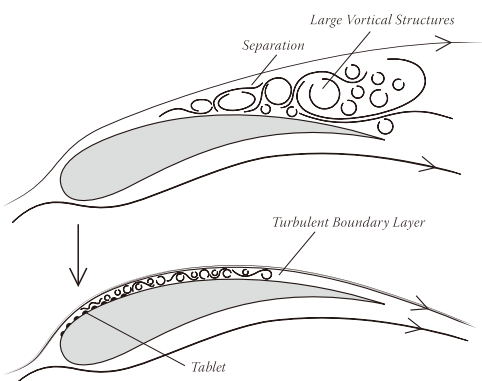
azbilグループ 技術研究報告書  
azbilテクニカルレビュー

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



### 〈乱流境界層理論〉



500系の新幹線が開発される時に、一番問題になったのは速度ではなく静音性だったそうです。特に車両に取り付けられたパンタグラフが、猛スピードで架線や空気と触れあう時に生じる激音が最もやっかいな問題でした。開発者たちが試行錯誤を繰り返す中で目をつけたのは、なんとフクロウだったのです。深夜に音もなく飛来して餌をつかまえるフクロウには鋸歯状の羽毛があり、それが空気の小さな渦を作り出すことで、静音飛行を実現していることが分かりました。パンタグラフに応用されたその仕掛けは、500系新幹線の静音性向上に大きく貢献したそうです。フクロウは古来より「智者の使い」というイメージが定着していたようですが、実際にフクロウから教えてもらった知恵が、大きな成果を生みだしたわけです。

流れの中にある物体の表面と流れる流体の間では大きな速度勾配が生じます。この領域は境界層と呼ばれ、流体が規則正しい運動をしている場合は層流境界層、微小な渦が生じ、流体が不規則な動きをしている場合は乱流境界層と呼ばれます。乱流境界層は層流境界層よりも巨視的な流れの変動や騒音、エネルギー損失が少ないことが分かっており、乱流境界層を積極的に発達させるために、物体の表面に微小な凹凸(タブレット)をわざとつけることが一般的に行われています。ふくろうの羽もパンタグラフもその考え方で騒音を抑えているのです。

# Contents

<b>巻頭言:企業による価値創造方法の歴史的転回</b> .....	1
東京工業大学 大学院社会理工学研究科 准教授	妹尾 大

## 安全・安心実現のための技術

<b>気中微生物リアルタイム検出技術とその応用</b> .....	2		
株式会社 山武	長谷川 倫男	山崎 信介	堀口 康子
BioVigilant Systems, Inc.	J. P. Jiang		

<b>引継ぎ業務を支援する操業知識データベースシステムの開発</b> .....	8		
—経験／知識の可視化・共有・活用—			

株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー 籠浦 守 尾形 竜太

## 省エネルギー技術

<b>ビル省エネルギー支援サービスのための高度情報処理応用技術の開発</b> .....	14		
株式会社 山武	久下谷 任祥	総田 長生	
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	松本 邦裕	太宰 龍太	

<b>原動力設備の運用最適化パッケージの開発</b> .....	20		
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	植木 和夫	鈴木 康央	今福 賢一

## 計測制御技術

<b>世界最高水準の精度と信頼性を有するピエゾ抵抗式圧力センサの開発</b> .....	28		
株式会社 山武	徳田 智久		

<b>水中環境下におけるトライボケミカル反応を利用した低摩擦・低摩耗技術の研究</b> .....	34		
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	大橋 智文		

<b>流量計測・制御機能付きバルブの開発</b> .....	42		
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	古谷 元洋	大谷 秀雄	

<b>フィールド機器診断の技術動向と差圧・圧力発信器導圧管詰まり診断技術の開発</b> .....	50		
株式会社 山武	田原 鉄也	青田 直之	

<b>高安定温度調節モジュールの開発</b> .....	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	岩切 研		

## 基盤技術

<b>アクティブ・コンプライアンスデバイスの開発</b> .....	62		
株式会社 山武	川瀬 茂	津村 高志	小黑 直輝

<b>バイオマスプラスチックへの取組み</b> .....	68		
株式会社 山武	浜野 裕之	宇田川 良吉	
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	石塚 保夫		

<b>高温高湿発生技術の研究</b> .....	72		
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	伊藤 力哉	石塚 保夫	

# Contents

## Preface: Historical Turnaround in Value Creation Methods by Corporations ..... 1

Associate Professor, Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

Dai Senoo

## Technologies for Realizing Safety and Peace of Mind

### Instantaneous Bioaerosol Detection Technology and Its Application ..... 2

Yamatake Corporation  
BioVigilant Systems, Inc.

Norio Hasegawa  
J. P. Jiang

Shinsuke Yamasaki

Yasuko Horiguchi

### Development of Operation Knowledge Database System for Assisting in Work Handover Process ..... 8

–Visualization, Sharing, and Utilization of Experience and Knowledge–

Advanced Automation Company, Yamatake Corporation

Mamoru Kagoura

Ryota Ogata

## Energy-saving Technology

### Development of Intelligent Data Analysis Technology for Solution Services for Saving Energy in Buildings ..... 14

Yamatake Corporation

Hideaki Kugaya

Chosei Kaseda

Building Systems Company, Yamatake Corporation

Kunihiro Matsumoto

Ryouta Dazai

### Development of Operation Optimization Package for Utility Facility ..... 20

Advanced Automation Company, Yamatake Corporation

Kazuo Ueki

Michihisa Suzuki

Kenichi Imafuku

## Measurement and Control Technology

### Development of Piezoresistive Pressure Sensors with the World's Highest Level of Accuracy and Reliability ..... 28

Yamatake Corporation

Tomohisa Tokuda

### A Study on Low-friction and Low-wear Technology Applying the Tribo-chemical Reaction in a Water Environment ..... 34

Building Systems Company, Yamatake Corporation

Tomofumi Oohashi

### Development of Control Valve with Flow Measurement and Flow Control ..... 42

Building Systems Company, Yamatake Corporation

Motohiro Furuya

Hideo Otani

### Technological Trends in Field Device Diagnosis and the Development of Blockage Diagnosis for Impulse Lines Connected to Differential Pressure Transmitters / Pressure Transmitters ..... 50

Yamatake Corporation

Tetsuya Tabaru

Naoyuki Aota

### Development of a High-stability Digital Temperature Controller ..... 56

Advanced Automation Company, Yamatake Corporation

Ken Iwakiri

## Fundamental Technologies

### Development of Active Compliance Device ..... 62

Yamatake Corporation

Shigeru Kawase

Takashi Tsumura

Naoki Oguro

### Application of Biomass Plastics to Industrial Control Product Housings ..... 68

Yamatake Corporation

Hiroyuki Hamano

Ryoukichi Udagawa

Building Systems Company, Yamatake Corporation

Yasuo Ishizuka

### Development of Two-pressure, Two-temperature Humidity Generator ..... 72

Building Systems Company, Yamatake Corporation

Rikiya Itou

Yasuo Ishizuka

# 巻頭言

## 企業による価値創造方法の歴史的転回

東京工業大学  
大学院社会理工学研究科  
准教授

妹尾 大



なぜ企業は存在するのか。企業の存在意義は、顧客、社員、株主、そして社会に対する価値を生み出すことにある。

各ステイクホルダーの求める価値が安定している状況においては、既に価値が認められた特定の財やサービスを生産し続けることが企業のなすべき中核的活動である。したがって、企業の価値創造の大部分は生産機能(工場など)が負うこととなり、その他機能(営業、研究所、本社など)の果たすべき役割は、計画的生産を脅かす各種の外部擾乱要因から生産機能を保護することに置かれる。企業の、とりわけ製造業における企業の機能設計はこのような指針に基づいてきた。

ところが、日本を含む先進国では、上述のような状況、すなわち生産活動がそのまま価値創造活動を意味する時代は終わりを迎えてつつある、と多くの論者が指摘している。情報通信技術の進歩、市場のグローバル化、消費者の嗜好の多様化、と原因とされているものは論者によってさまざまであるが、各ステイクホルダーの求める価値が大きく変化する状況にあるという認識では一致している。近年の自然環境保全意識の急速な高まりは、変化の一例であろう。

変化の激しい状況において、企業のなすべき中核的活動は、イノベーション(革新)である。これは、新しい財やサービスの創出や、新しい生産技術やビジネスシステムを確立する活動などを指す。ここでは、もはや価値創造を生産機能のみに頼ることはかなわず、企業内外の各種機能が連携しながら価値創造活動を遂行していかなければならない。なぜなら、イノベーションの本質は、利用可能な物質や力を従来とは異なるかたちで結合する「新結合」だからである。

元来、企業が組織を必要とするのは、個人の能力を超える活動を実現するためであった。企業の無期限な事業継続

を指す「ゴイング・コンサーン」という前提には、個人の寿命を超えるという時間的超越の意図がみえる。そして、空間的超越の意図としては、「情報処理装置」としての組織観をあげることができよう。サイモン(H. A. Simon)は、個人の情報処理能力の限界を組織によって克服する考えを示した。個人の処理能力限界を超える大きな情報負荷を、階層構造や分業制度を用いて組織が削減して対処可能にするのである。複雑システムを相互作用関係の低い下位システムに分解する「準分解可能システム」という概念は、多くの企業で依然として支配的な経営原則であるように見受けられる。組織の各部門と各個人は、全社目標からブレイクダウンされてきた定型活動を粛々と遂行することが期待される。

これとは異なり、組織の利点を「準分解可能システム」ではなく、「文脈の多様性」に求める理論が日本で構築された。これが、野中郁次郎の「組織的知識創造理論」である。新たな意味形成には異なる文脈を持つ主体同士の対話が必要であるとし、文脈共有の関係性である「場」を、組織の主要素と捉えている。

企業がイノベーションを中核的活動に据える際には、文脈の多様性を用いて新しい知識を創造するという観点を導入すべきであると私は考えており、ここ数年、「クリエイティブ・オフィス」というキャッチフレーズのもとで、情報処理作業に適した職場だけでなく、知識創造作業に適した職場とそこでの「場」づくりが必要であることを訴え、そのあり方を模索している。顧客現場での価値創出を目指して部門間シナジーを追求する山武に共感するのは、同じ方向に向けて舵を切っていると思うからである。

### 妹尾 大(せのお だい)

東京工業大学 大学院社会理工学研究科 准教授

1969年生まれ。1998年、一橋大学大学院商学研究科博士課程単位取得満期退学  
北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助手を経て、2002年から現職。博士(商学)  
専門分野は、経営組織論、経営戦略論、情報・知識システム  
著書に、「知識経営実践論」白桃書房2001年(編著)などがある

# 気中微生物リアルタイム検出技術とその応用

## Instantaneous Bioaerosol Detection Technology and Its Application

株式会社 山武

長谷川 倫男  
Norio Hasegawa

株式会社 山武

堀口 康子  
Yasuko Horiguchi

株式会社 山武

山崎 信介  
Shinsuke Yamasaki

BioVigilant Systems, Inc. J. P. Jiang

### キーワード

バイオエアロゾル, リアルタイム, 散乱光, 蛍光

米国BioVigilant Systems社\*が開発したリアルタイム細菌ディテクタ™は、空気中に浮遊する細菌細胞など、生物由来のバイオエアロゾルをリアルタイムに検出することができる。装置内に吸引した試料空気レーザーを照射し、その中に存在する微粒子による散乱光を検出することで、エアロゾルを検出する。さらに、そのレーザー光で励起された細菌や生物由来粒子が発する蛍光を同時に検出することによって、それがバイオエアロゾルか否かを判定する。本稿では、このリアルタイム細菌ディテクタのバイオエアロゾル検出技術について紹介する。(\*:azbilグループのグループ会社)

BioVigilant Systems, Inc. (Tucson, AZ, USA) has developed Instantaneous Microbial Detection™. Instantaneous Microbial Detection™ is capable of realtime detection of bioaerosols, especially bacteria and fungi spores. The air is aspirated into the equipment and aerosols in the air are detected by laser induced light scattering. At the same time, if the aerosol particles are bioaerosols, Instantaneous Microbial Detection™ recognizes them by their auto-fluorescence excited by the laser. This paper describes the instantaneous bioaerosol detection technology.

## 1. はじめに

普段目には見えないが、空気中には多くの粒子が浮遊している。それらの粒子は液体であったり固体であったり、大きさや性状も様々である。これらの浮遊粒子は総称してエアロゾルと呼ばれる。エアロゾルは、気象や公害、健康への影響まで、様々なかたちで我々に関係している。そのため、その性状などの物理的な解析、自然現象、医学・衛生学の分野からの解析など様々な角度からエアロゾルに対する研究がなされている。

エアロゾルのうち、生物由来のものを、特にバイオエアロゾルと呼んでいる。昨今注目されているインフルエンザも、バイオエアロゾル化したインフルエンザウイルス粒子が空気感染の原因となっているし、カビによるアレルギー症もバイオエアロゾルとしてのカビ胞子によって引き起こされる。細菌感染も同様である。さらに、このような、粒子が生きている細胞そのものである場合以外であっても、バイオエアロゾルは我々に影響を及ぼしている。花粉などはその良い例である。このようにバイオエアロゾルは、生物由来の物

質であるがゆえに、生物である我々ヒトの健康に大きく影響する。そのため、感染症学や衛生学など、医学的な立場から多く研究されている。

2009年にazbilグループの一員となった米国BioVigilant Systems社は、このようなバイオエアロゾルを瞬時に検出する装置「リアルタイム細菌ディテクタ」(図1)の開発を行ってきた。ここではリアルタイム細菌ディテクタのバイオエアロゾル検出技術と、それが検出する微生物の性状について紹介する。

## 2. リアルタイム細菌ディテクタの光学的原理

### 2.1 背景

前述のようにバイオエアロゾルは、以前から健康被害をもたらすものとして研究対象となってきた。衛生学などの分野とともに、食品や医薬品の製造現場では、微生物による汚染を防ぐためにも、それを管理し空気清浄度を保つことが重要となっている。



図1 BioVigilant Systems社製リアルタイム細菌ディテクタ

目に見えないバイオエアロゾルの検出、特に細菌やカビの検出は、空気を吸引し、その中にある粒子をフィルターで濾し取るか、空気を液体中に通すことで含まれる粒子を液体に懸濁させる、あるいは粒子の質量を利用して捕集面に慣性衝突させることで捕集し、その後培養して目に見える量に増やすことを行うのが一般的である(図2)。

しかし培養して目に見える量まで増殖させるには、通常よく検出される微生物でも1~3日かかり、生育の遅いものでは培養に1週間かかるものもある。そのため、サンプルを採取してから検出結果が出るまで、非常に時間がかかるという問題がある。そこで、フィルター上などに捕集したバイオエアロゾルを、培養を経ずに直接顕微鏡で観察する手法も行われているが<sup>(3)</sup>、バイオエアロゾル濃度が低いと顕微鏡下での検出が難しく、さらに観察には前処理が必要である。近年では、細胞の持つ遺伝子の本体であるDNAを検出する方法など、分子生物学的手法も開発されてきている。しかし、このような方法も検出に先立つ前処理が必要なため、実験室で行われる解析においては多くの成果を挙げてきたが、測定現場で処理をして検出することはできない。さらに、これらの方法による結果は、空気を吸引していた間だけのもので、恒常的にモニタリングできるものではない。したがって、バイオエアロゾルに対しては、その性状やヒトへの影響を調べる研究とともに、近年では、古くから行われてきた培養法に代わる迅速、簡便に検出する方法の研究が行われている<sup>(1), (2)</sup>。

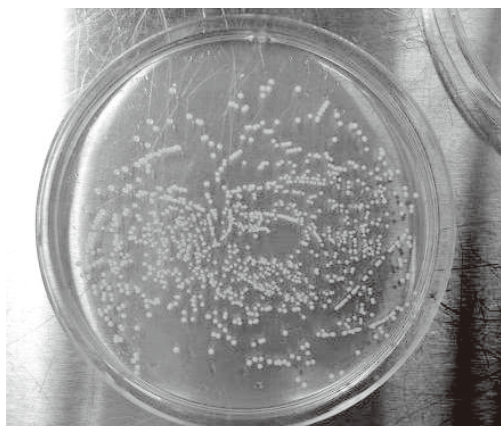


図2 培養により生育した細菌のコロニー

## 2.2 バイオエアロゾルの検出技術

リアルタイム細菌ディテクタはこのような背景のもと、バイオエアロゾルを瞬時に検出することを目的に開発されてきた。リアルタイム細菌ディテクタはバイオエアロゾルも含め、すべてのエアロゾルを検出するための光学系と、そのなかからバイオエアロゾルを判定するための光学系の、2種類の検出系を持つ。

エアロゾルの検出は、通常のレーザーパーティクルカウンターと同様に、粒子によるレーザー光の散乱で行う。レーザーの波長と粒子の大きさが同程度のときに起こるMie散乱による前方散乱を検出することで、エアロゾルの有無と大きさを判定する。光学系検出部分の構成を図3に示す<sup>(8)</sup>。ファンで吸引された空気は、図の④に導入される。その中にエアロゾルが存在すれば、光源①から発せられたレーザー光に当たり散乱光を生じる。粒子のまわりに生じる散乱光強度の分布のイメージを図4に示す。縦軸と横軸の交点に粒子が存在するとし、縦軸は上半分のみ示した。下に行くほど粒子が大きくなる。図の左側に光源を置いたとすると、粒子の大きさに従って散乱光強度の分布は複雑な形をとりながら変化していくが、図の右側への前方散乱が大きくなっていく。リアルタイム細菌ディテクタが検出対象とする大きさの粒子に由来する前方散乱光は、図3のレンズ②及び③によって粒子検出部⑥に集光される。検出されるエアロゾルの粒径範囲は0.5~15 $\mu\text{m}$ で、一般的に検出されるバイオエアロゾルの粒径範囲に合わせている。さらに、検出された前方散乱光の強度によって粒径が判定される。屈折率1.6のポリスチレンビーズで計算した、前方散乱光の強度と粒径の関係を図5に示す<sup>(8)</sup>。

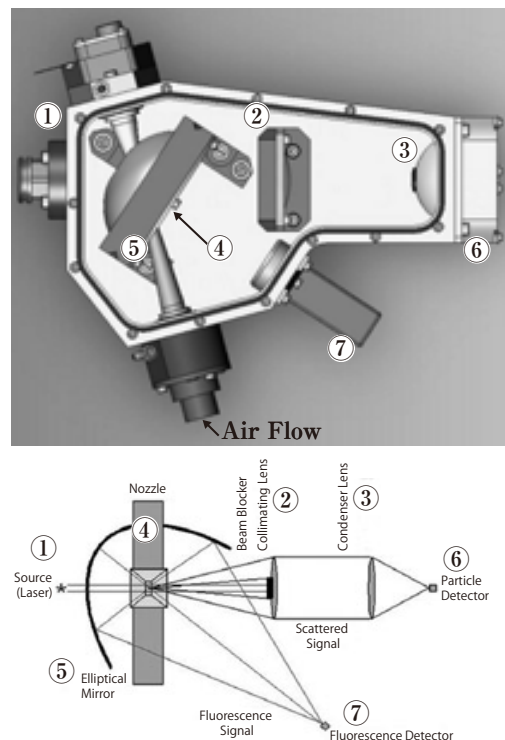


図3 リアルタイム細菌ディテクタの光学系部分のイラスト(上)とその模式図(下)<sup>(8)</sup>

- ①光源、②コリメートレンズ、③コンデンサーレンズ、④検出部、⑤集光ミラー、⑥粒子検出部、⑦蛍光検出部

一方、バイオエアロゾルの判定は、エアロゾルの蛍光の有無を検出することによって行う。

生物細胞の多くは自家蛍光を持つため、それを指標にして、非生物粒子、生物粒子の判定を行う。詳細は第3章で述べるが、生物細胞に存在して自家蛍光を持つものとして、アミノ酸の一種であるトリプトファン、代謝産物のNADH (Nicotinamide Adenine Dinucleotide)、ビタミンであるリボフラビンが良く知られている。リアルタイム細菌ディテクタはおもに、このうちのNADH及びリボフラビン由来とされ

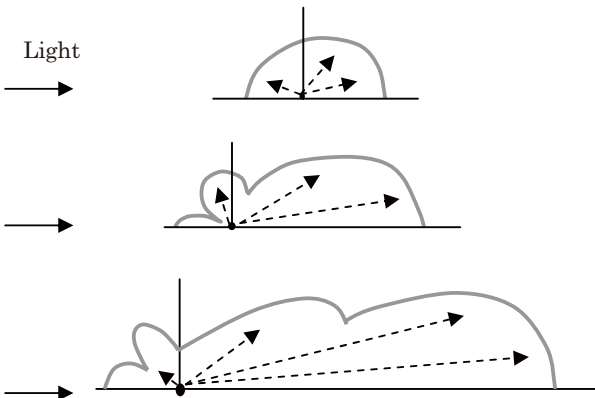


図4 粒子のまわりの散乱光分布のイメージ (軸の交点に粒子、左側に光源があるとし、下へ行くほど粒子径が大きくなるとした)

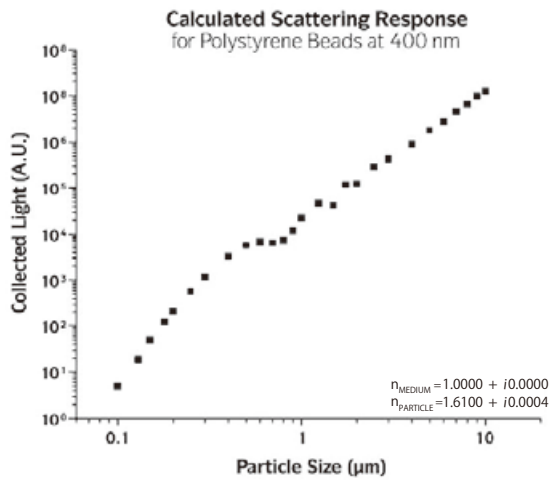


図5 前方散乱光強度と粒径の関係<sup>(8)</sup>

る蛍光を検出している<sup>(8)</sup>。例として、リボフラビンの励起波長と蛍光強度との関係を図6に示す<sup>(7), (8)</sup>。リアルタイム細菌ディテクタでは、粒子の検出及び自家蛍光物質の励起のためのレーザーは波長405nmのものが搭載されている<sup>(8)</sup>。

図3 ④の検出部に導かれたエアロゾルのうちバイオエアロゾルは、散乱光を生じさせると同時に、レーザーによって細胞内の蛍光物質が励起され、蛍光を発する。発した蛍光は、集光ミラー⑤によって蛍光検出部⑦に集光され検出される。これによって散乱光を生じさせたエアロゾルが、バイオエアロゾルであるかどうか判定される。

図7にリアルタイム細菌ディテクタでバイオエアロゾルを測定した例を示す。1m<sup>3</sup>の機密性の高いチャンバーを用意し、内部をHEPAフィルターユニットで清浄にしたのち、黄色ブド

ウ球菌*Staphylococcus aureus*を含む菌液を霧状に噴霧することでバイオエアロゾルを発生させた。リアルタイム細菌ディテクタでモニタリングすると同時に、ある時間におけるチャンバー内の空気をサンプリングし、それに含まれるバイオエアロゾルを培養した。リアルタイム細菌ディテクタによる計数結果と培養法による結果は、このとき良く相関していた。

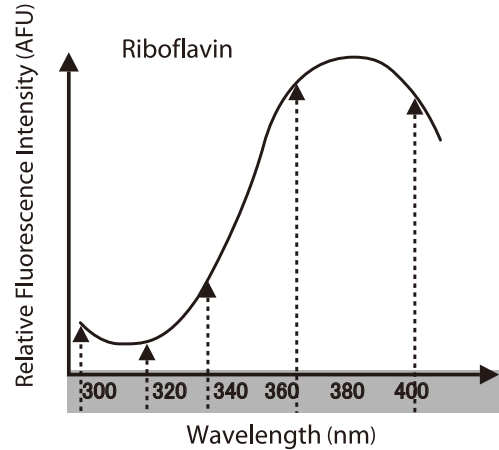


図6 リボフラビンの励起吸収スペクトル<sup>(7), (8)</sup>

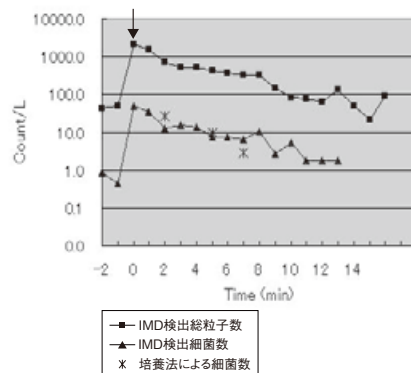


図7 リアルタイム細菌ディテクタによる細菌の検出(0min (矢印)で噴霧を開始)

### 2.3 新たな微生物迅速測定法としての利用

リアルタイム細菌ディテクタのおもなアプリケーションは、製薬工場の製造ラインにおける微生物モニタリングである。注射剤や点眼剤などのいわゆる無菌医薬品は、「厚生労働省・無菌操作法による無菌医薬品の製造に関する指針」に従って製造されている。この中で、製造環境を監視するものとして、0.5μm以上の大きさの浮遊粒子及び細菌・真菌の微生物が挙げられている。

環境監視測定の頻度については、指針の中で参考として挙げられている。グレードA及びBの環境では、浮遊粒子については無菌作業中、浮遊微生物については作業シフトごととなっている。つまり、浮遊粒子については従来型のレーザーパーティクルカウンターで作業中リアルタイムに監視できるが、浮遊微生物についてはリアルタイムモニタリングする手法がこれまでなかったため、作業が停止したタイミングで空気をサンプリングし、培養法などの検査に供する。また、製造エリアの無菌試験においては、培養時間が24時間～7



日間に設定されており、結果が出るまでに相当の時間を要する。その間、製品は出荷できない。

リアルタイム細菌ディテクタはレーザーパーティクルカウンターと同様にリアルタイムで浮遊粒子を測定しつつ、そのなかの浮遊微生物つまりバイオエアロゾルを検出できる。これによって製造環境を常時モニタリングし、その清浄度を担保できれば、最終製品の品質検査の代替とし、従来の、製造後の検査に時間がかかるなどの問題の解決を図ることができる。また、リアルタイムであることで、菌による汚染が発生した場合、そのときの作業内容などから何が原因であったか分析しやすくなり、対策を立て易くなる。

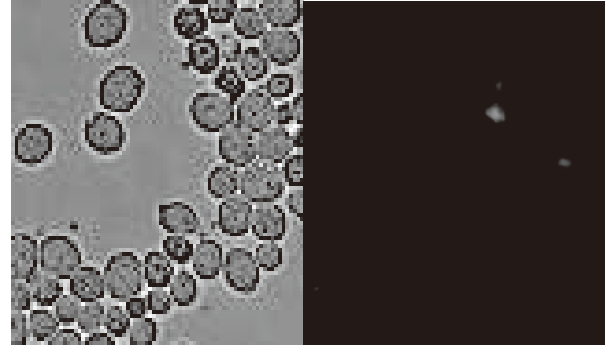


図9 酵母の顕微鏡写真(左)とその自家蛍光(右)

### 3. 生物学的視点からの検出原理

#### 3.1 微生物の自家蛍光

第2章ではリアルタイム細菌ディテクタの細菌検出技術について装置の面から述べたが、この章ではその検出原理の元となる微生物の知見について、もう少し詳しく紹介する。

バイオエアロゾルのうち微生物であるものは、ウイルス、細菌、カビ孢子・酵母が挙げられ、その大きさは、0.01~数十 $\mu\text{m}$ にわたる(図8)。リアルタイム細菌ディテクタの検出対象となっている細菌、カビ孢子は0.2 $\mu\text{m}$ 以上になるので、エアロゾルとしては大きな部類に入る。したがって、散乱光の原理に基づいた微生物粒子の検出が可能となっている。

一方、細菌の自家蛍光は古くから知られている(図9)。医学・生物学分野で最大の論文データベースで検索すると、細菌の自家蛍光を論じているもっとも古い報告として1962年のものがヒットする<sup>(4)</sup>。さらに他の論文も辿ると、1950年代には呼吸鎖、NADHと蛍光についての報告があり、1949年には細菌の自家蛍光とリボフラビンの関連を言及した報告がある<sup>(5)</sup>。このことから、研究者の間では、20世紀前半にはその性質が認められていたと思われる。

近年、分子生物学の分野で、生体分子を蛍光分子で標識して検出する手法が盛んに行われている。蛍光顕微鏡が普及し、細胞内の微小な器官や極微量の成分、細胞の働きを蛍光標識あるいは蛍光染色することで検出することが可能になった。ところがこのような手法が盛んになったことで、検出系の開発は、細胞の自家蛍光をノイズとして遮断する方向に進んできた。リアルタイム細菌ディテクタは、逆にこの自家蛍光をうまく利用した画期的な技術を採用していると言える。

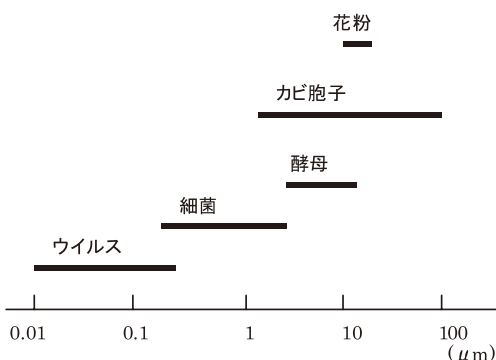


図8 微生物の大きさ

#### 3.2 微生物の代謝

それでは、このような自家蛍光のもととなる物質は、細胞内で何を担っているのか？

細菌、カビは自分で栄養を得て増殖することができる。増殖するにはエネルギーが必要だが、細菌、カビのみならず生物の細胞が増殖するため、あるいは生きるためのエネルギーを得る代謝は、大雑把に言えば、ガソリンエンジンに例えることができる。ガソリンエンジンでは、ガソリンという炭化水素を酸素で燃やすことによって、おもに二酸化炭素と水を排出しながら運動エネルギー、熱エネルギーを得る。このとき、反応を引き起こすのは点火プラグである。一方、生物の細胞では栄養源としてのブドウ糖など炭水化物を、呼吸で得た酸素を使って燃やすことで、二酸化炭素と水を排出しながら、生命活動のための化学エネルギーを得る。このとき反応を引き起こすのは、点火プラグの代わりに酵素蛋白質である。この反応が、生物が行っているいわゆる酸素呼吸で、細菌からヒトまで多くの生物で基本的に共通である。

炭水化物を酸素で燃やす、つまり酸化するということは、酸素の側から見れば、水に還元されるということである。酸素を水に還元するための還元力を提供するのがNADHであり、その還元力を酸素に伝える経路の一部を構成するのが、細胞内でリボフラビンが変化して形を変えたFMN (Flavin Mono nucleotide)である。リアルタイム細菌ディテクタは、これらの分子に由来するとされる細胞の自家蛍光を指標として、生物由来粒子を識別している。

還元力であるNADHは、栄養素として取り込んだブドウ糖を分解する複数の反応過程で作られられる。この代謝経路が止まるとNADHの供給は止まり、残っているNADHも速やかに酸化型の $\text{NAD}^+$ へと変化する。したがってNADHが存在するかどうかは、細胞の代謝活性の指標としてよく利用される。

ちなみにウイルスは核酸と蛋白質の殻だけの単純な構造で、こうした代謝反応は行わず、また単独では増殖しない点で細菌細胞とは異なる。このような、生命反応である代謝を行わない粒子は、リアルタイム細菌ディテクタの検出対象とはしていない。

### 3.3 VBNCの検出可能性

前述した培養による微生物の増殖能を指標とした検出では、理論的には生きて増殖できる微生物は検出することができる。しかし、実際には生きていても増殖しない細胞が存在する。VBNCあるいはVNC (Viable but Nonculturable)と呼ばれる細胞の状態がそれである。代謝活性を測定すると、たしかに活性は確認できるのだが、培養すると増殖してこない。そのような細胞の状態は以前から知られていたが、ある種の病原菌が、VBNC状態においても病原性を発現する可能性が指摘され、感染症学の分野で重視されている<sup>(6)</sup>。

このような状態の細胞は、従来の培養法では検出できなかったが、3.2で述べたような代謝をしている限り細胞は自家蛍光を持つことが考えられ、リアルタイム細菌ディテクタによって検出できることが期待されている。

## 4. おわりに

ヒトゲノムが解読された当時、ヒトの遺伝子はおおよそ31,000個と思われた。しかし、その後の研究によって、これまで無意味だと思われていた因子も細胞の働きに大きく関わっていることが分かった。生物個体として見ればきれいに均衡が保たれていても、その中身は非常に複雑で混沌とした状態である。ヒトよりずっと単純な細菌においても、数千の遺伝子が明らかになっており、細胞を維持する仕組みは、さらに多くの因子が入り乱れて複雑なものと考えられる。バイオテクノロジーでは、この中から目的に応じて、利用できる特徴的な性質を取り出すための知見を蓄積することが重要である。リアルタイム細菌ディテクタは比較的単純な構造でありながら、生物細胞が持っている自家蛍光という性質をうまく利用して、検出している。

近年、医薬品製造の現場では、工程内で品質を管理し、最終製品試験の代替とすることで出荷までの時間を短縮する「リアルタイムリリース」が1つの関心事となっている。リアルタイム細菌ディテクタによって製造環境を常時モニタリングできれば、最終製品試験における従来の培養法による時間を省くことができるという期待があり、リアルタイムリリースを実現する強力なツールとなると思われる。それによって従来行われていた管理手法に代わる、新たなコンセプトを提唱できる可能性が期待されている。

### 謝辞

細菌の噴霧試験にあたり、(財)北里環境科学研究センター奥田舜治先生、菊野理津子先生、岡上晃氏に御指導ならびに実験実務への多大な御協力を賜りましたことを、厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- (1) Renald G. Pinnick, Steven C Hill, Paul Nachman, J. David Pendleton, Gilbert L. Fernandez, Michael W. Mayo and Joohn G. Bruno: Fluorescence Particle Counter for Detecting Airborne Bacteria and Other Biological Particles, *Aerosol Sci. Technol.*, Vol.23, pp.653-664 (1995).
- (2) F. L. Reyers, T. H. Jeys, N. R. Newbury, C. A. Primmerman, G. S. Rowe and A. Sanchez: Bio-Aerosol Fluorescence Sensor, *Field Anal. Chem. Technol.*, Vol.3(4-5), pp.240-248 (1999).
- (3) 石松維世, 福田和正, 石田尾徹, 谷口初美, 保利 一: 職場における微生物のリスク評価のためのバイオエアロゾル捕集方法及び検出方法, *産業衛生学雑誌*, Vol.48, pp.1-6(2006)
- (4) L.S. Agroskin, and N.A. Pomoshchnikova: Studies on the excitation spectra of auto-fluorescence of microorganisms, *Biofizika*, Vol.7, pp.292-297 (1962).
- (5) Otto A. Bessey, Oliver H. Lowry, Ruth H. Love: The Fluorometric Measurement of The Nucleotide of Riboflavin and Their Concentration in Tissues, *J Biol. Chem.*, Vol.180, pp.755-769 (1949).
- (6) Ishrat Rahman, M. Shahamat, M. A. R. Chowdhury, R. R. Colwell: Potential Virulence of Viable but Nonculturable *Shigella dysenteriae* Type 1, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.62(1), pp.115-120 (1996).
- (7) J. K. Li, E. C. Asali, A. E. Humphrey: Monitoring Cell Concentration and Activity by Multiple Excitation Fluorometry, *Biotechnol. Prog.*, Vol.7, pp.21-27 (1991).
- (8) J.P. Jiang: Instantaneous Microbial Detection Using Optical Spectroscopy, In Michael Miller (ed.), *Encyclopedia of Rapid Microbiological Methods*, Chapter 5, PDA Press (2005).

### 商標

「Instantaneous Microbial Detection™」はBioVigilant Systems社の商標です。

「リアルタイム細菌ディテクタ」は株式会社 山武の商標です。

### 著者所属

長谷川 倫男	研究開発本部
山崎 信介	研究開発本部
堀口 康子	研究開発本部
J. P. Jiang	Chief Technical Officer, BioVigilant Systems, Inc.



# 引継ぎ業務を支援する 操業知識データベースシステムの開発

－経験／知識の可視化・共有・活用－

## Development of Operation Knowledge Database System for Assisting in Work Handover Process

－Visualization, Sharing, and Utilization of Experience and Knowledge－

株式会社 山武 籠浦 守  
アドバンスオートメーションカンパニー Mamoru Kagoura

株式会社 山武 尾形 竜太  
アドバンスオートメーションカンパニー Ryota Ogata

キーワード

製造業, 引継ぎ業務, 申し送り, 見える化, 可視化

24時間連続稼働を行っている製造現場のシフト勤務における引継ぎ業務は、紙媒体(ノート記入など)や口頭伝達で行われているところが多く、作業漏れ/作業忘れや情報伝達のスピードアップ化などの課題を抱えているのが現状である。引継ぎ業務を電子化することにより、作業項目毎の進捗・重要度・経過履歴の管理機能を提供し、また知識・情報の共有、蓄積、活用を支援することで日常業務における作業漏れ/作業忘れの防止、コミュニケーションのスピードアップを図る環境を実現したシステム「操業知識ベース OperationKnowledgeBase」を開発したので報告する。

The handover between shifts at manufacturing sites running at 24-hour continuous operation is frequently conducted by paper (such as filling in of information) or verbal communication, and issues such as operation omissions, forgotten operations, and faster communication of information are facing the workplace today. This paper presents the development of an “OperationKnowledgeBase,” a system that performs the handover of shifts electronically for enabling an environment that provides management functions for the progress, importance, and history of each operation item and assists in the sharing, accumulation, and utilization of knowledge and information to prevent the omission or forgetting of operations and speeding up communication in daily operations.

### 1. はじめに

24時間連続稼働を行っている製造現場では、2交代あるいは3交代のシフト勤務(交代勤務)により運転を継続しており、このシフト勤務では、直の交代時に必ず「引継ぎ業務」(申し送り)が行われている。前の直の作業状況、トラブルなどの報告/注意事項などを次の直へ伝える業務である。直間の引継ぎは、通常フォーマット用紙やノートといった「紙媒体」の利用や口頭伝達で行われているところが多く、作業漏れ/作業忘れや情報伝達のスピードアップ化などの課題を抱えているのが現状である。引継ぎ業務を電子化することにより、作業項目毎の進捗・重要度・経過履歴の管理機能を提供し、また知識・情報の共有、蓄積、活用を支援することで日常業務における作業漏れ/作業忘れの防止、コミュニケーションのスピードアップを図る環境を実現したシステム“操業知識ベース OperationKnowledgeBase”(以下「OKB」と略す)を開発したので、ここに報告する。

### 2. 製造現場における課題

前述のように、引継ぎ業務を紙媒体利用により実施している場合、直毎の報告書が作成され、その勤務内で起きた事だけを記録していることが多い。記録されている情報は元々どのような問題だったのか、どのような経緯を辿り現在の状態となっているのかといった情報の紐付きは、報告書の内容全てに目を通し、頭の中で整理していかなければならない。

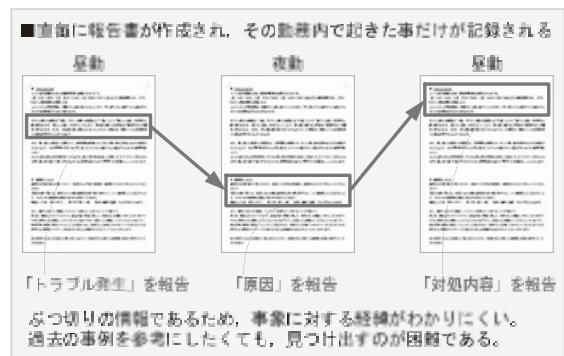


図1 紙媒体による引継ぎ業務

このような製造現場では、以下に示すような様々な課題を抱えている。これら課題は、ヒューマンエラーの発生や意思決定の遅れにつながる可能性があり、ひいては事故発生や製品の品質低下などのリスクを高めることにもなる。

- ① 事象別の進捗状況が分からず、作業漏れ／作業忘れが起きやすい。
- ② 事象別の重要性、緊急性が分からず、優先度を考慮した対応ができない。
- ③ その勤務内で起きた事だけを記録しているため、断片的な情報になりがちであり、過去の経緯を含めた全体の流れを把握することが困難である。
- ④ 紙媒体で管理しているため、必要な情報をすぐに取り出すことができない。過去の事例を活用したくても探すのに時間がかかってしまう。また、情報伝達にも時間的コストを要する。

OKBは、上記課題の解決／リスクの軽減を目的とし、製造現場の「コミュニケーションを円滑」にし、「皆で問題解決する仕組み」を作り、「経験の蓄積と活用が行える環境」を提供することを目指して、開発したものである。

### 3. システム構成

OKBは、MicrosoftのWebアプリケーションフレームワークであるASP.NETを採用して開発した。Webシステムであるため、クライアントには特別なソフトウェアをインストールする必要がなく、またイントラネットのみならず、ファイアウォール越えのインターネット環境でも利用することが可能である。

OKBサーバーは、1台でWebサーバーとデータベースサーバーを共有する構成としている。

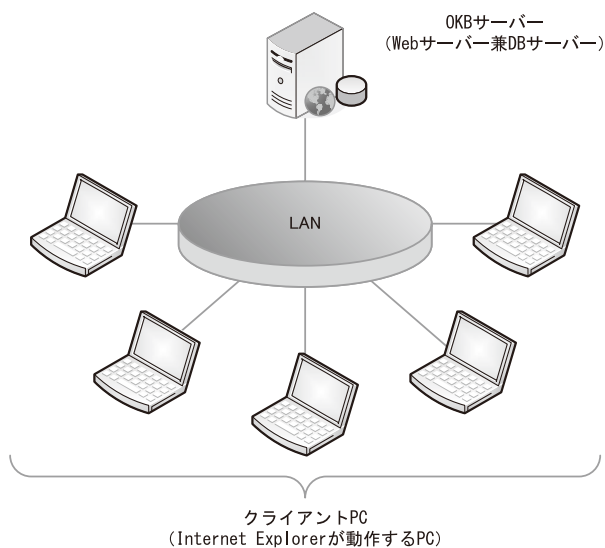


図2 システム構成図

## 4. OKBの特徴

### 4.1 引継ぎ業務支援(情報の見える化)

製造現場で発生した事象の進捗状況、重要性、緊急性、経緯が分かりにくいという状況を解決するため、「事象の経過履歴管理」、「重要度別色分け表示」、「進捗ステータス管理」といった機能を提供することで、今やらなければならないこと(残件)や現在の現場の状況を素早く把握できる環境を実現した。

#### 4.1.1 事象の経過履歴管理

OKBでは、運転の情報、発見したことや対処したことなどの情報を追記式で記録していく方式を採用した。紙媒体で行われていた引継ぎ業務ではばらばらであった情報が、このシステムでは追記していくことにより1つの事象が「発見」→「判断」→「対処」→「結果」となって結びつく仕組みとしている。情報を紐付けていくことで、事象に対する過去の経緯、現在の状況、緊急性などをまとめて管理することができ、意味のある情報の塊となっている。したがって、誰でもすぐに状況を理解、把握することができる。

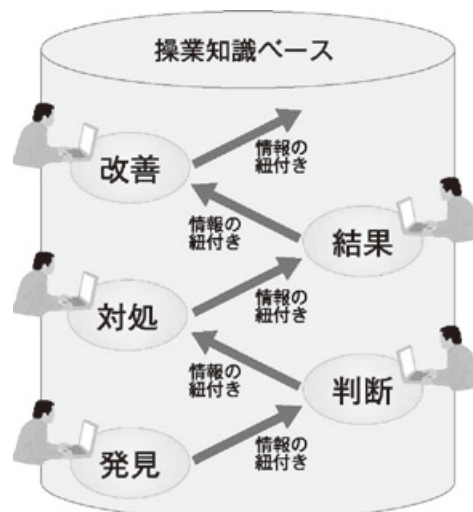


図3 OKBにおける情報の紐付き管理

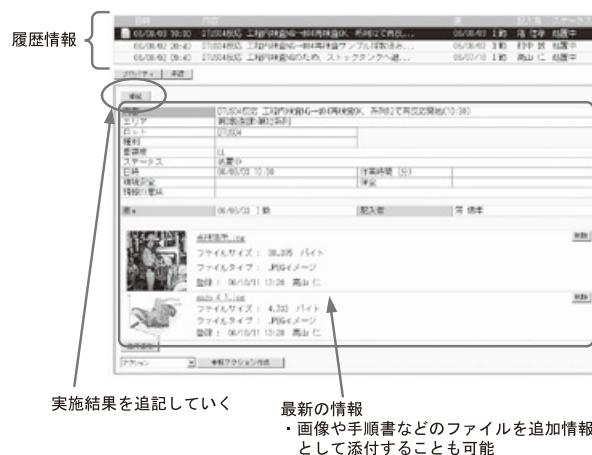


図4 追記式管理の画面イメージ

### 4.1.2 重要度別色分け表示

事象の重要度を色分けして一覧表示する。現在どこでどんな問題が発生しているのか、問題のレベルはどの程度か、といった状況をひとめで把握できるため、優先度を考慮して次取るべき行動を素早く判断することができる。

日時	内容	担当者	重要度	ステータス
06/12/13 15:25	PO21出口溜り大、緊急停止しま...	渡辺 六郎	H	処置中
06/10/13 14:35	ポンプ室上層煙室(0.75%) 煙注意	山田 太郎	H	処置中
06/12/13 05:00	ポンプA出口溜りに煙あり、軽...	伊藤 七朗	L	処置中
06/12/13 18:55	原料切り替えに伴う、ロード変更...	伊藤 七朗	L	処置済み
06/12/13 13:40	TK021 ドレン抜き実施。	渡辺 六郎	L	処置済み

図5 重要度別色分け表示

### 4.1.3 進捗ステータス管理

作業項目毎の進捗状態を管理し、一覧表示する。何が終わっていて、何が終わっていないのか、項目毎の進捗を網羅的に確認できるため、作業漏れ/作業忘れをなくすることができる。

日時	内容	担当者	重要度	ステータス
06/12/13 15:25	PO21出口溜り大、緊急停止しま...	渡辺 六郎	H	処置中
06/10/13 14:35	ポンプ室上層煙室(0.75%) 煙注意	山田 太郎	H	処置中
06/12/13 05:00	ポンプA出口溜りに煙あり、軽...	伊藤 七朗	L	処置中
06/12/13 18:55	原料切り替えに伴う、ロード変更...	伊藤 七朗	L	処置済み
06/12/13 13:40	TK021 ドレン抜き実施。	渡辺 六郎	L	処置済み

項目毎の進捗管理により、終わっていないものを確認し、作業を実施することが出来る

図6 進捗ステータス管理

### 4.1.4 その他製造現場に必要な機能も網羅

その他にも製造現場で運用するために必要な以下の機能を有しており、より現場に密着した最適な運用を可能とした。

- ・シフト管理  
2交代, 3交代など, 勤務時間帯の管理。また, 日替わり時刻の管理も行う。
- ・エリアの管理  
製造現場内で管理すべき設備や機器, 工程, 製品種別などの情報をエリアと呼び, それら管理対象の集合体をツリー形式で管理する。さらに, 自分が担当している工程などのエリアをユーザー情報として登録しておくことで, 担当エリアで発生したトラブルなどの情報を素早く入手する手段も提供している。

全ての操作はWebブラウザ上から行うことができ, どこからでもすぐに情報を記録及び確認できる。これら機能を活用することで, 製造現場における引継ぎ業務を「見える化」し, よりスピーディに円滑に業務を遂行できる環境を実現している。

また, 引継ぎ業務を中心として製造業務に必要な情報全てを電子媒体でまとめて保存, 管理していくため, 日常業務をこなしていけば自然に経験を蓄積していくことができ, またそれらを活用できる仕組みとなっている。

### 4.2 製造現場の視点で取り出せる文書検索

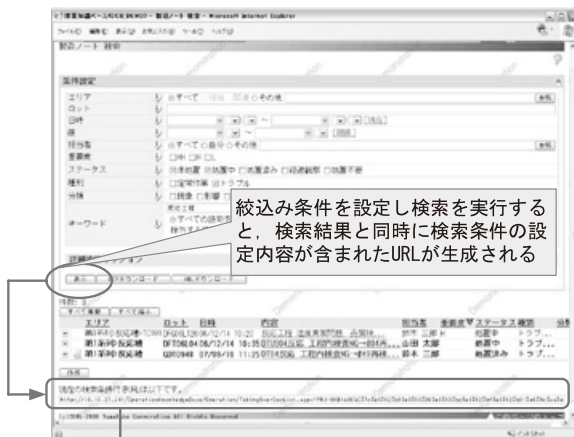
プラントの安全を第一とする製造現場では, 様々な状況下において素早い意思決定が求められており, 現場の状況やトラブル時の対応手順などの情報を素早く参照できなければならない。OKBでは, 素早い情報入手を実現するために, 蓄積された情報を製造現場の視点で取り出せる仕組みとした。例えば, 装置や機器毎で現場状況, トラブル対応手順の参照, ロットや品種, 日時も単に日にちや時刻だけでなく直単位で取り出すなどの工夫をしている。さらに, 全文検索や添付ファイル内検索も可能で, 定型化できていない過去の経験を素早く取り出し, 意思決定に活かすことができる。



- <文書検索機能の特長>
- ①製造現場視点による条件指定
  - ②キーワードによる全文検索
  - ③データに添付されたMicrosoft Word文書などのファイル内検索にも対応
  - ④検索項目はユーザーに合わせてカスタマイズ可能

図7 文書検索画面のイメージ

また, 検索条件設定部分をパラメータ化してURL内でも指定できるように対応することで, よく利用する特定条件における検索結果情報をいつでも簡単に呼び出すことも可能としている。



絞り込み条件を設定し検索を実行すると, 検索結果と同時に検索条件の設定内容が含まれたURLが生成される

このURLによりOKBを呼び出すと, URLに含まれる検索条件に従って検索した結果をいつでも簡単に表示することが出来る

図8 検索条件付きURLの利用

さらに, このURLの仕組みを利用することで, 他システムからのOKB呼び出し・連携も容易とし, 必要な知識・情報を必要な場面で素早く取り出し運転や解析にも活用でき

る環境を実現している。当社の生産情報ポータルシステムである“Manufacturing Information Briefing”(以下、「MI Briefing」と略す)と連携する例を以下の図に示す。

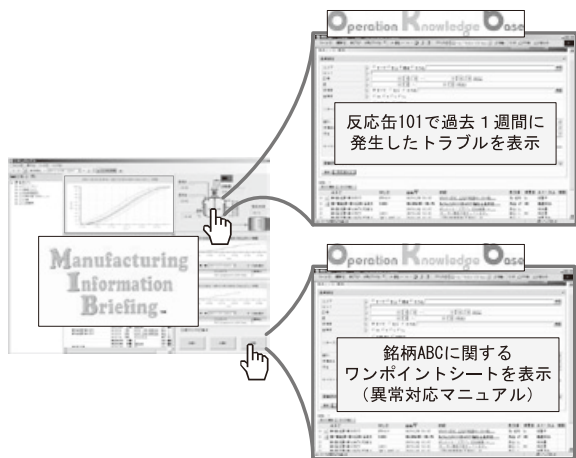


図9 MI Briefingとの連携例

### 4.3 文書フォーマットデザイナー

現場で発生した事象を報告するための文書、過去の事象を基にノウハウとしてまとめるための文書など、製造現場／部門／目的別に様々な文書フォーマットが存在するが、その多種多様な文書フォーマットをユーザー自身で容易に作成できる環境を開発した。また、一覧画面及びアクセス権限の設定についても容易にデザインすることが可能である。これらデザイン作業についてもすべてWebブラウザ上から操作することができる。

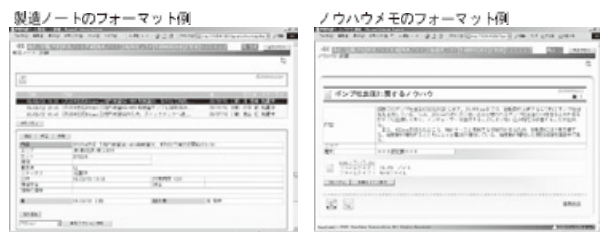


図10 文書フォーマットの例

#### 4.3.1 文書フォーマットのデザイン

OKBでは、日付入力欄・テキスト入力欄やリスト選択欄などの各入力項目をパーツと呼ぶ部品と捉え、そのパーツを自由に組み合わせることで、1つの文書フォーマットを作成するという仕組みを提供した。これにより、スクリプトなどのプログラムに関する特別な知識を必要とせず、誰にでも簡単に、直感的に文書フォーマットを作成することができる。

パーツは、カレンダー／テキストエリア／ドロップダウンリストなど、様々なパーツを20種類以上用意しており、ユーザーの文書体系に合わせてフォームを作成することができる。

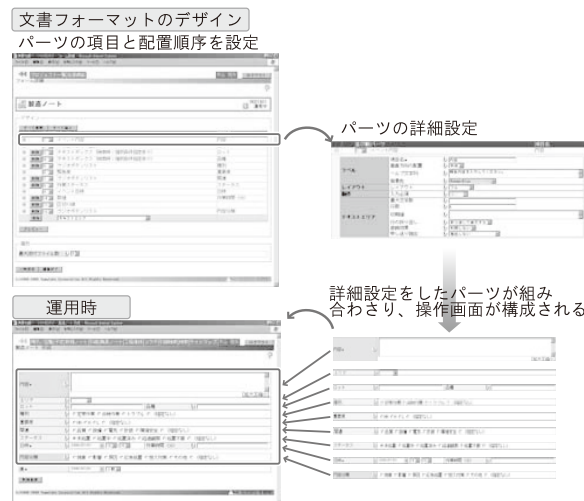


図11 文書フォーマットデザインの仕組み

#### 4.3.2 一覧画面のデザイン

文書の一覧画面においては、検索時に指定する条件項目及び検索結果一覧での表示項目を自由にデザインすることを可能とした。

例えば、タイトル、作成日時や作成者など、目的に応じて一覧表示する情報を設定しておけば、目的の文書が見つかりやすくなるだけでなく、一覧表示するだけで、文書の概要が把握できるようになる。どの項目でソートするか、さらに昇順／降順の指定、表示文字数の設定などの詳細動作についてもカスタマイズすることができる。

#### 4.3.3 文書アクセス権のデザイン

文書に対する詳細なアクセス権限の設定も容易に行うことができ、編集可能／閲覧のみ、など目的や取り扱う情報の質などに応じて柔軟に対応することができる。

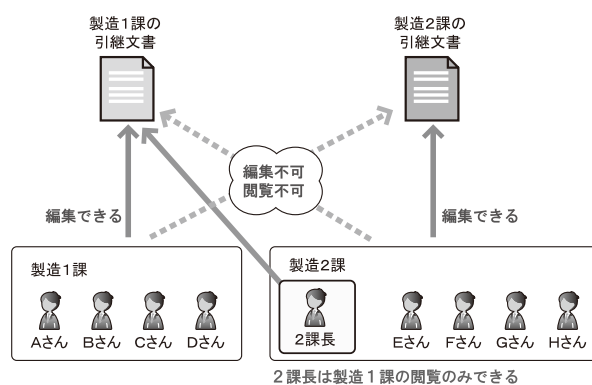


図12 アクセス権の設定例

また、初期設定として、製造現場の運用に必要な以下の画面を標準画面として予め用意しているため、文書フォーマットのデザイン作業を行わなくとも、システム導入後すぐに使い始めることができる。

- ・製造ノート記入画面
- ・引継ぎ業務画面

- ・スケジュール表
- ・ノウハウメモ
- ・製造日報／直報
- ・異常対処報告書
- ・工程進捗情報

文書フォーマットをデザインする際は、一から作成せず、上記標準画面のデザインを雛形としてコピーし、カスタマイズしていくこともできる。

## 5. OKBの開発技術

OKBの開発コンセプトは徹底的なエンドユーザーコンピューティングである。エンドユーザーである製造部門の担当者やスタッフの方が、1日以内のトレーニングで、ユーザーやエリアなどマスタ情報の登録から、文書フォーマットのデザインに至るまで全ての設定作業を行い、運用できる環境を実現している。

ここでは、OKBを運用していく中で特に重要である文書フォーマットのデザインと、そのデザインに従って文書データを検索するためのエンジン開発内容について説明する。

### 5.1 文書フォーマット構築エンジンの開発

エンドユーザーが、文書フォーマットをデザインし運用できる環境を実現するため、文書フォーマット構築エンジンを開発した。文書フォーマット構築エンジンは、デザインパートと運用パートの2つの機能に分かれる。

#### 5.1.1 デザインパート

デザインパートでは、日付を入力することを目的としたカレンダーパーツや、事象報告などの文章を入力することを目的としたテキストエリアパーツなどの各種パーツを自由に組み合わせることにより文書フォーマットを作成する環境を実現している。各パーツに対しては、項目名称や表示色などの基本情報と、動作の振る舞いを決定する詳細情報を設定する。詳細情報については、パーツの種類に応じて設定内容がそれぞれ異なってくる。例えば、テキストエリアパーツの場合は、詳細情報として「値の入力が必須かどうか」、「入力文字数の制限」、「入力文字種類の指定(半角カナのみ、英数のみなど)」などを設定できる。このような設定を各パーツに対して行い、完成した文書フォーマットの定義内容はデータベースに格納、保存される。

#### 5.1.2 運用パート

運用パートでは、デザインされた文書フォーマットの定義内容に従い、運用時に使用する文書作成画面、文書詳細画面を動的に描画、構築する。指定されたパーツを動的にインスタンス化し、基本情報及び詳細情報の設定内容を反映、レイアウトどおりに配置し、画面を構築していくものである。

#### 5.1.3 文書フォーマットの版管理

また、文書フォーマットのデザイン修正履歴は版として管理される。運用途中でパーツを追加した場合でも、過去の文書データがどの版の文書フォーマットを使用して作成され

たものかを識別し、作成時の文書フォーマットを再現して表示する。

### 5.2 文書検索エンジン

文書検索処理における検索項目についてもエンドユーザー自身によりデザインすることができ、それにあわせて動的に検索処理を実行するための文書検索エンジンを開発した。

パーツの組み合わせにより作成した文書フォーマットのうち、どの項目を検索項目とするのか、ロット、装置や日時など目的に応じて様々な項目及びそれらの組み合わせをキーとした検索要求を処理するため、あらゆるパターンに柔軟に対応できるものとする必要があった。文書の登録データはデータベース内に格納されているが、データ問い合わせの際のSQL (Structured Query Language)を、指定された検索項目設定に従い動的に構築し、検索処理を実行するものである。また、キーワードによる全文検索やファイル内検索についてもサポートしており、様々な視点・切り口で網羅的に文書データを検索することを可能とし、素早く情報を入手できる環境を実現している。

さらに、エンジンは拡張性についても考慮しており、将来的にパーツの種類が増えたとしてもエンジンのコア部分には変更を及ぼさずに対応できるように設計及び実装にも配慮している。

## 6. おわりに

今回は、“操業知識ベース OperationKnowledgeBase”について、引継ぎ業務における課題解決へのアプローチ及びそのフレームワークについて解説した。

今後は、他システムとの双方向連携の実現や、蓄積された情報の傾向分析や新たな価値を持つ情報への変換(テキストデータマイニング)等、暗黙知の抽出と活用が行える環境を支援していきたい。

### 参考文献

- (1) 高山仁:引継ぎ業務の電子化による製造現場のノウハウ蓄積と活用支援, 計測技術, 日本工業出版株式会社 (2006年1月号)
- (2) 水上正ほか:人の直感的な判断, 暗黙知の引き出し, 形式化を支援する生産情報ポータルの開発-人を中心としたオートメーションの発展に向けて-, azbil Technical Review (2008)

### 商標

Microsoft Wordは、米国Microsoft Corporationの米国及びその他の国における登録商標です。

OperationKnowledgeBaseは、株式会社 山武の登録商標です。Manufacturing Information Briefingは、株式会社 山武の登録商標です。



著者所属

籠浦 守	アドバンスオートメーションカンパニー エンジニアリング本部ソリューション技術部
尾形 竜太	アドバンスオートメーションカンパニー エンジニアリング本部ソリューション技術部

# ビル省エネルギー支援サービスのための 高度情報処理応用技術の開発

## Development of Intelligent Data Analysis Technology for Solution Services for Saving Energy in Buildings

株式会社 山武

久下谷 任祥  
Hideaki Kugaya

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

太宰 龍太  
Ryouta Dazai

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

松本 邦裕  
Kunihiro Matsumoto

株式会社 山武

梶田 長生  
Chosei Kaseda

### キーワード

省エネルギー支援サービス, データ分析技術, 運転条件最適化技術, 省エネルギー量推計技術

建物の空調消費エネルギーを削減するため、PDCAサイクルをまわしながら省エネルギー支援をするソリューションビジネスに注目が集まっている。このビジネスを促進するため、当社研究部門の保有技術である最適化技術、予測・推定技術を応用して、省エネルギー計画立案・効果見積もり(Plan)及び効果検証(Check)を支援する技術を開発した。ここでは、開発した技術及び適用事例を報告する。

Increasing attention has been focused on solution businesses that assist in saving energy and run through the PDCA cycle for reducing the air-conditioning energy consumption in buildings. To further advance these businesses, we have developed technology for assisting in the energy-saving plan preparation and result estimate (Plan) and result verification (Check) by using optimization technology and forecasting and estimation technology held by our research division. This paper presents this developed technology and examples of its application.

## 1. はじめに

国際的なCO<sub>2</sub>排出規制に対する関心の高まりから、建物の省エネルギーに対する社会的要求が強まっている。

省エネ法では、エネルギー使用量が原油に換算して1,500kl以上の建物では毎年1%以上の省エネルギーを達成する活動を義務付けている。この目標を達成するため、事業者は継続的な検討を進める必要があるが、効果的に進めるためには、省エネルギー対策・法対応など、専門的知識が必要となる。建物によっては、専門員を配置できないことも多いため、山武では、省エネルギー活動のアウトソーシングサービス(省エネルギー支援サービス)を提供している。このような省エネルギー活動においては、運転履歴データを分析する技術やノウハウが重要となることが多い。

本稿では、省エネルギー支援サービスに欠かせないデータ分析技術として、筆者らが開発した運転条件最適化技術<sup>(1)</sup>及び省エネルギー量推計技術<sup>(2),(3)</sup>について報告する。

## 2. 省エネルギー支援サービス

省エネルギー支援サービスとは、継続的な省エネ効果が得られるように、PDCAサイクルを効果的にまわすサービスである。

サービスは以下の流れとなっており、中長期計画書・定期報告書・管理標準など、省エネ法対応業務支援も行っている。

### ・Plan (計画立案)

→ 建物の状況調査, データ収集・解析を行い, 最適な運用改善, 設備投資を計画する

### ・Do (対策の実行)

→ 投資対効果などを加味しながら, 最適な時期に対策を実施する

### ・Check (効果検証)

→ 実施した対策の効果を評価する

### ・Action (改善の実施)

→ 評価結果を考慮し, 適切な改善を実施する

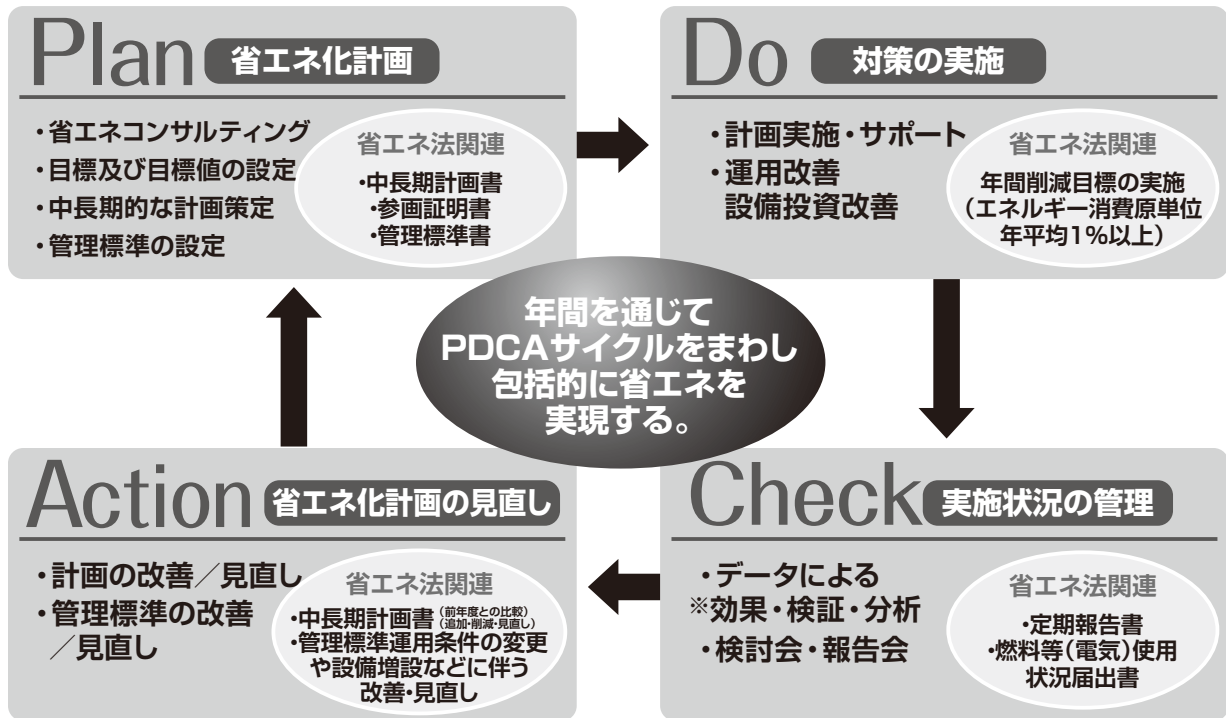


図1 省エネルギー支援サービス

この継続的なマネジメントサイクルにより、建物オーナーは、アウトソーシングによる人件費削減だけでなく、運用改善によるエネルギー削減メリットも享受できる。

### 3. 高度情報処理応用技術

PDCAの中で、特に計画立案(P)と効果検証(C)は、設備や機器のノウハウだけでなく、データに基づく定量的な効果の見積もり・評価を必要とする。しかし、建物の設備は数多くの機器が複雑に関係しあうシステムであるため、分析に必要なデータは、複雑な挙動を示すと同時に、気象条件や建物利用状況の影響も受けるため、単純な分析だけでは対応できないことも多い。

そこで、筆者らは計画立案と効果検証のデータ分析技術をさらに高度化し、分析方法を標準化するために、当社研究部門の保有するアルゴリズムを活用し、運転条件最適化技術(Plan)及び省エネルギー量推計技術(Check)を開発した。

#### 3.1 運転条件最適化技術

省エネ活動における省エネ計画の立案(Plan)に利用できる解析技術として、運転条件最適化技術を開発した。この技術は、最適な風量設定値の算出や空調機の最適起動<sup>(4)</sup>など、最適化が求められる様々な対象について、適用することが可能である。本稿では、熱源の送水温度の最適化に適用した事例を用いて、本技術を説明する。

冷凍機は、通常7℃程度の冷水を作り出しているが、より高い温度で送水すれば、運転効率であるCOPが向上し機器単体としては省エネルギーとなる。一方、熱源システム全体としては、送水温度が高くなると、空調機の冷却能力が

低下するため、冷水の供給量が増加し、搬送動力が増加する。このように冷凍機のエネルギー消費量と搬送動力はトレードオフの関係となっている。さらに、外気温や負荷熱量などの他要因も熱源システムの効率に影響を与えるため、熱源単体の最適な設定値が、全体の最適値とは限らない。

そのため、上記、トレードオフの関係や、複雑な因果関係、機器の制約条件などを考慮して、エネルギーが最小となる最適な設定値を求める必要がある。

##### 3.1.1 これまでの課題

これまで、運転条件最適化技術としては、機器仕様に基づくモデルや運転履歴データを使用したモデルを利用してシミュレーションを行い、条件を最適化する技術などが提案されている。このような技術を利用する場合には、モデル構築という作業が必要となるが、通常、熱源システムでは、多くの機器が、複雑に関係しているため、モデル構築の作業量が膨大となるという課題がある。また、経年劣化、運用変更に合わせて、再度モデル構築する必要があるなど、継続的なエンジニアリングが求められる。

##### 3.1.2 RSM-Sによる運転条件最適化技術

筆者らは前述の課題を解決するべく、図2に示した当社研究部門が保有する最適化技術(RSM-S: Response Surface Methodology by Spline)<sup>(5)</sup>を活用した運転条件最適化技術を開発した。

RSM-Sとは、収集された運転履歴データをもとに応答曲面を生成し、最適条件をシステムティックに導き出す技術である。

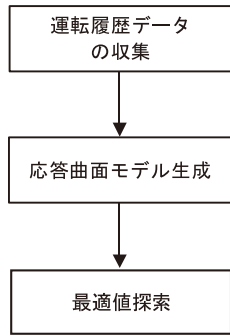


図2 RMS-Sの概要

RSM-Sには、下記のような特徴があり、複雑な振る舞いをするビルの設備データには適用性が高く、設定値最適化における、従来の課題を解決できると考える。

- ・複雑な非線形対象でもモデルを作成できる。
- ・データがばらついていても容易に対応が可能である。
- ・可視化機能が充実している。

ここでは、これまでに蓄積されている運転履歴データをもとに多変数スプラインにより、図3に示すような応答曲面モデルを作成する。RSM-Sでは、多変数スプライン技術を

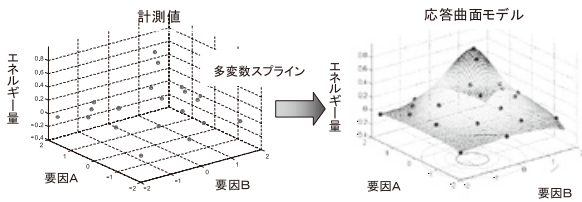


図3 応答曲面モデル

この曲面モデル生成に利用しているため、運転データから滑らかな応答曲面を一意に生成することができ、モデル構築が容易となる。また、応答曲面を可視化できるため、複数の要因とエネルギーの関係を把握することができる。最適値探索では、複雑なトレードオフや制約を考慮したうえで最適値をシステムティックに算出することができる。

### 3.1.3 適用事例

RSM-Sによる設定値最適化技術を適用した事例を以下に紹介する。

建物対象は、延べ床面積15,000m<sup>3</sup>規模のホテル建物である。図4に熱源計装図を示す。

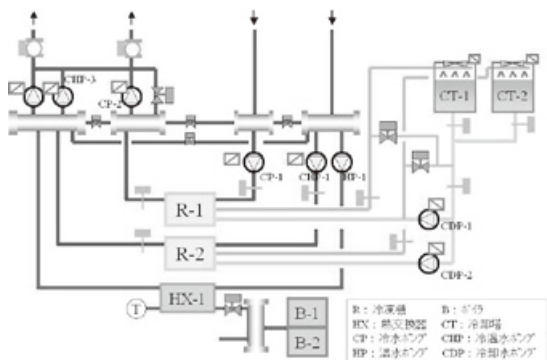


図4 熱源計装図

冷凍機2台のうち、送水温度設定の変更が可能なインバーターボ冷凍機(R-1)を対象として分析を行った。

2008年8月から2009年7月までの1年間のデータを用いて、消費電力量と熱源システムに關係する冷却水温度、送水温度などの運転条件や外的要因との關係を応答曲面としてモデル化した。消費電力量と送水温度、冷却塔出口温度の關係を表す応答曲面を図5に示す。

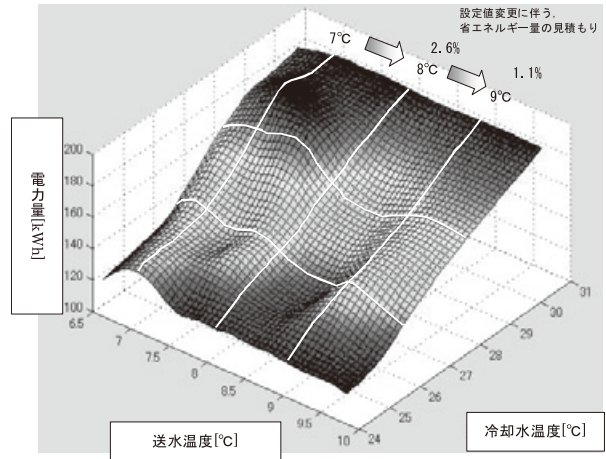


図5 応答曲面

図5より、消費電力量と、送水温度や冷却水温度という複数の要因との関連性を1つの応答曲面として鳥瞰できることが分かる。なお、外気温や負荷熱量などの他の要因との関連性も同様な応答曲面として可視化できる。このように可視化することは、要因の関連性や現象の把握に有効であり、計画立案に役立てることができる。

また、このモデルを用いることで、設備の制約と状況に応じた最適な送水温度を求めることができる。さらに、送水温度を変更した場合のエネルギー消費量のシミュレーションが行え、それぞれの送水温度設定変更時における省エネルギー量を見積もることができる。

図5の事例では、送水温度を7°Cから8°Cや9°Cに緩和することで、年間の省エネルギー量効果がそれぞれ、2.6%、1.1%となることが分かった。

### 3.2 省エネルギー量推計技術

省エネ活動における省エネ効果検証(Check)に利用できる解析技術として、省エネルギー量推計技術を開発した。これまで、省エネルギー量を定量化する手法として、エネルギー消費量の過去の実績との比較や、機器ごとの定格に基づく推計などが行われている。これらの手法は、簡易的な省エネルギー効果の推計には有用である。しかしながら、図6に示したように、エネルギー消費量は、気象条件や利用状況によって大きな影響を受けるため、これが省エネルギー効果を評価する上での誤差となる。そのため、精度良く、改修、改善前後の省エネルギー量の評価を行うには、外部要因の影響を考慮した評価が必要である。

そこで、この課題に対応するために、当社研究開発部門が保有する技術である推定技術(TCBM:Topological Case-Based Modeling)<sup>6)</sup>を用いた省エネルギー量推計技術を開発した。

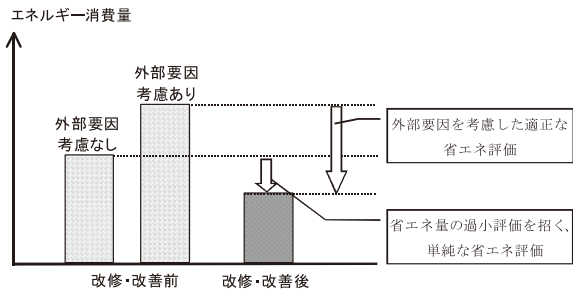


図6 外部要因による省エネルギー推計量の違い

### 3.2.1 外部要因を考慮した省エネルギー量の定量化

エネルギー消費量は、外的要因の影響を受けるため、省エネルギー効果の客観的評価には、改修、改善前後の条件を一致させる必要がある。外的要因の条件を考慮した省エネルギー量定量化を次の手順で行う。

#### (1) 改修前の消費エネルギー特性のモデル化

建物のエネルギー消費を、外部要因を入力、エネルギー消費量を出力としたシステムとして捉え、その入力関係(消費エネルギー特性)を、運転履歴データをもとにモデル化する。

これにより、任意の外的要因の組合せに対するエネルギー消費量を推計することができる。

#### (2) 省エネルギー量の計算

下式にて、外的要因について考慮した省エネ量を推計する。

$$(\text{省エネルギー量推計値}) = (\text{改修前推計値}) - (\text{改修後実績値})$$

改修前推計値とは、改修による改善がなされていないと仮定した場合に、建物が消費するであろうエネルギー量である。改修前推計値は、(1)で求めた消費エネルギー特性のモデルに、改修後の外的要因を含めた実績値を入力し求める。

### 3.2.2 従来手法の課題

建物のエネルギー消費量と、空調負荷に影響を与える外気温の間には相関関係があると言われているが、実際の運転履歴データとしては、図7のように非線形な分布を示すことが多い。

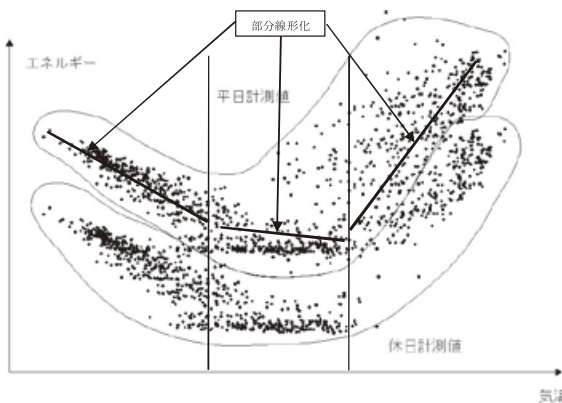


図7 消費エネルギーの部分線形化

従来手法では、エネルギー消費量を外気温、平日・休日などの、条件で分類し、部分的にそれぞれ別の線形モデ

ルを適用(部分線形化)し、非線形な現象である消費エネルギー特性をモデル化する。

しかしながら、従来手法には、部分線形化のための明確な基準がなく、精度の高いモデル化のためには、試行錯誤が必要となる。これは、作業負荷の増大や、分析者による品質のばらつきの原因となりうる。

そこで、筆者らは省エネルギー量の適切な定量化のため、当社研究開発部門が保有する技術である推定技術(TCBM: Topological Case-Based Modeling)を活用し、省エネルギー推計技術を開発した。

### 3.2.3 新しい定量手法の開発

TCBMは、事例ベース推論の考えを応用したブラックボックス・モデリング技術で、運転履歴データを事例という形でデータベース化し、入力データに対する類似した事例を検索することで出力値を推計することができる(図8)。TCBMには下記のような特徴があり、従来手法の課題を解決できる可能性が高い。

- ・位相数学に基づく指標により予測/推定精度に応じたデータ分割が自動的に行われる。
- ・消費エネルギーとその複数要因の組を事例として扱うので、モデル構造など特別なモデリング技術の習熟を必要とせず容易にモデリング可能。

そこで筆者らは、空調負荷予測や下水流入量予測などで実績のあるTCBMを省エネルギー量の定量化に適用することで、従来技術の課題を解決している。

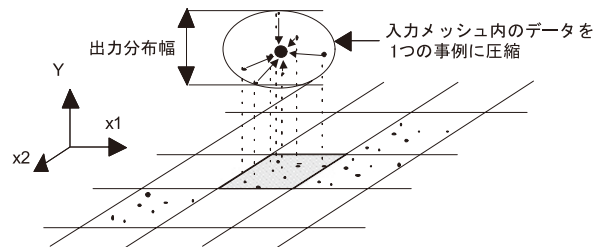


図8 TCBMの概要

TCBMでは、複数の要因をモデルの変数とすることができるため、従来手法で必要な条件分類にもとづく部分線形化を行うことなく、多次元の非線形現象を容易にモデリングできる。図9の例では、曜日を要因とすることで、平日と休日の利用状況の違いをモデリングできていることが分かる。

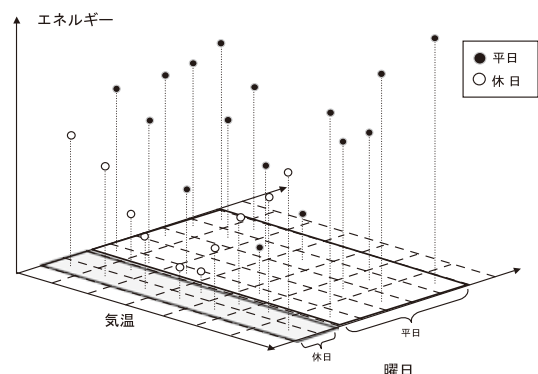


図9 事例化例

### 3.2.4 適用事例

#### (1) 適用対象

部分線形化を用いた従来手法とTCBMを用いた開発手法のモデル化性能を比較するため、実際の建物の運転履歴データを用いた検証を行った。

対象建物は延べ床面積20,000m<sup>2</sup>規模の病院建物であり、熱源には蒸気吸収式冷凍機を使用している。省エネルギー施策として、冷凍機の蒸気消費量とポンプ、及び空調機の電力消費量を削減するために、蒸気吸収式冷凍機の台数制御の最適化を行っている。

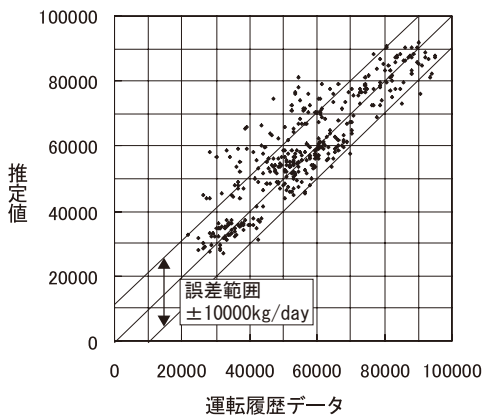
#### (2) モデル作成

従来手法と開発手法のモデル化性能について、評価を行った。ここでは、蒸気消費量のデータを用いて、評価を行った。省エネルギー施策前のデータをモデル作成用データと評価用データのセットに分け、評価用データとモデル推定値との誤差を評価の基準とする。

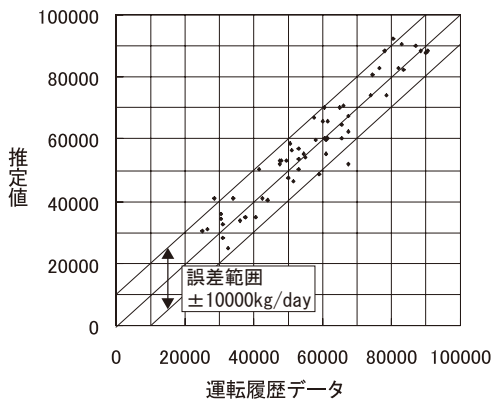
従来手法では、運転履歴データを平日、休日、暖房、冷房の条件によって4つに分類し、この分類ごとに外気温による回帰式を作成した。

開発手法では、外気エンタルピー、外気温度、外気湿度、日照時間、気圧、平日、休日を要因として、TCBMによりモデルを作成した。

従来手法と開発手法について、評価用データとモデル推定値の散布図を図10、精度評価結果を表1に示す。



(a) 従来手法の場合 [kg/day]



(b) 開発手法の場合 [kg/day]

図10 蒸気消費量の推計結果

	従来手法	開発手法
平均絶対誤差 [kg/day]	6214	4441
平均相対誤差 [%]	12.8	9.0

表1 誤差比較(蒸気消費量)

図10を見ると、開発手法の方が、従来手法よりも誤差の全体のばらつきが抑えられていることが分かる。表1の精度評価結果では、従来手法、開発手法の蒸気消費量の推定誤差は、それぞれ12.8%、9.0%であった。

つまり、開発手法は場合分けなど、煩雑で特別な処理を行うことなく、高精度なモデル構築が可能であることが分かる。

## 4. おわりに

本稿では、省エネルギー支援サービスのPDCAにおける、省エネルギー量の見積もり、効果検証を高度化、標準化するために開発した運転条件最適化技術、省エネルギー量推計技術とその実施事例を紹介した。

今後、この技術が、省エネルギー活動のための高度な分析に広く活用され、省エネルギー支援サービスの拡大に貢献していくことを期待する。

運転条件最適化技術については、本稿のようなオフラインの解析だけでなく、オンラインつまり、リアルタイムに適宜、運転条件を最適化するシステムにも活用できる。上記については、現在、国土交通省の平成20年度住宅・建築関連先導技術開発助成事業「学習機能に基づく省エネ性と快適性の最適化制御技術の開発」の一部として、実際のビルにおいて実証試験を実施中である<sup>(7)</sup>。

### 参考文献

- (1) 松本邦裕, 久下谷任祥, 総田長生:制御系解析装置及びプログラム, 特開2007-156881
- (2) 松本邦裕, 久下谷任祥, 総田長生:省エネルギー量推定装置, 方法, 及びプログラム, 特開2007-18322
- (3) 久下谷任祥:外的要因を考慮した省エネルギー量定量手法の開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.687-690(2006)
- (4) 上田 悠ほか:学習/多目的最適化機能を組み込んだ快適性と省エネを両立する室内環境制御技術の開発, azbil Technical Review, Vol.26, No.1, pp.2-9 (2008)
- (5) 総田長生:設計業務におけるデータ活用技術～山武オリジナル応答曲面法 RSM-S～, Savemation Review, Vol.21, No.2, pp.32-39 (2003)
- (6) 筒井宏明, 西村順二:時系列履歴データからのデータマイニング, 計測と制御, 第41巻, 第5号, pp.345-349 (2002)
- (7) 太宰龍太, 総田長生:冷凍機送水温度最適制御の実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1085-1086 (2009)

### 商標

TCBMは、株式会社 山武の登録商標です。

**著者所属**

久下谷 任祥	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
松本 邦裕	ビルシステムカンパニー 環境ソリューション本部
太宰 龍太	ビルシステムカンパニー マーケティング本部
総田 長生	研究開発本部 コアテクノロジーセンター

# 原動力設備の運用最適化パッケージの開発

## Development of Operation Optimization Package for Utility Facility

株式会社 山武 植木 和夫  
アドバンスオートメーションカンパニー Kazuo Ueki

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

株式会社 山武 今福 賢一  
アドバンスオートメーションカンパニー Kenichi Imafuku

### キーワード

ユーティリティ設備, 原動力設備, 連携制御, 需要予測, 最適化, 混合整数計画法, 省エネ, CO<sub>2</sub>削減, コスト削減

グローバルな温暖化ガスの削減が叫ばれている中、各工場では投資効果の大きい省エネ対策を模索している。そうした中で「連携制御」が既存設備を有効活用でき比較的安価な投資で大きな削減効果を期待できる省エネ手法として着目されている。その「連携制御」を実現するものとして、原動力設備(ユーティリティ設備)の需給連携、供給連携を実現し、エネルギーコストやCO<sub>2</sub>排出量を削減するためのパッケージ・ソフトウェア「U-OPT」を開発し、既に実際に適用し成果が得られたので、ここに紹介する。

With the need for global reduction of greenhouse gases, methods of conserving energy with a high return on investment (ROI) are highly desirable for production plants. “Cooperative control,” meaning cooperation between utility supply and demand interests, or cooperation among various utility supply facilities, is one such new method. Simply adding a control and optimization software package to existing facilities enables a remarkable reduction of energy costs and CO<sub>2</sub> emissions.

The U-OPT operational optimization package for utility facilities has been developed to implement cooperative control. It has already been successfully applied to automotive, petrochemical, district heating and cooling (DHC), and other plants. This paper describes the U-OPT software package and its results in actual applications.

## 1. はじめに

地球規模の大気中の温暖化ガス(二酸化炭素、メタン等)の濃度を安定化することを目的にCOP3(第3回締約国会議)が1997年に開催され、京都議定書が採択された。その第一次遵守期間の2008-2012年に既に入っている。日本は1990年対比で、温暖化ガスを6%削減することを約束しているのに対して、現時点では8%近く既に増加しているため、これから14%削減しなければならぬという厳しい状況にある。

政府は、COP3を受けて1997年に改正・強化した省エネ法を、2004年改正で、今まで5業種に限定されていた第一種エネルギー管理指定工場を、業種指定を外し、大型業務ビルも第一種エネルギー管理指定工場に含め、毎年のエネルギー使用に関する定期報告書や中長期計画書の提出を義務付けた。

さらに昨年の2008年には、今まで工場単位の規制であつ

たものを、事業者単位のエネルギー管理を義務づけることにより業務部門に多く見られる中小規模の事業場を数多く設置する事業者を新たに義務の対象に加えた。さらに、企業全体の省エネを見るエネルギー管理統括者を役員クラスから選任し、それを補佐するエネルギー管理企画者を選任することを規定し、事業者の経営判断に基づく効果的な省エネルギーの取組を推進していくように改正した。

これらの改正はエネルギー消費が増加し続ける業務部門を主な対象としているが、エネルギー消費の半分を占める産業部門に対してもさらなる省エネを推進することが期待されており、規制も強められている。

産業部門では、業務部門に比べ省エネルギー対策が進んでいるが、今までは設備や装置の更新の際に、省エネタイプの設備や装置に置き換えを行うという対策が主流であった。しかし、多くの工場では、そうした投資効果の大きな省エネ機器の置き換えはある程度実施済みであり、この不



景気で今後の新たな大きな省エネ投資は行にくい状況にある。そうした中で制御技術を活用した省エネルギー手法が、既存設備を有効活用でき比較的安価な投資で大きな削減効果を期待できる省エネ手法として着目されつつある。特に複数の設備を連携させて無駄なエネルギー使用を削減する「連携制御」は、エネルギー利用の「見える化」によるエネルギー管理の高度化と共に、今後ニーズが大きく拡大すると考えられている。

ここでは、その「連携制御」及び、それを実現するために山武が提供している原動力設備運用最適化システム「U-OPT」について紹介する。

2009年末の締約国会議(COP)では、2013年以降の温暖化対策の枠組みについて話し合いが持たれる。そこで、さらなる大幅な削減が提案されることになり、各工場への省エネの圧力が高まることが予想される。しかし、それを受身でとらえるのではなく、積極的に新技術の導入を試み、利益を生み出す機会であるとしてとらえることが望まれる。

## 2. 連携制御

### 2.1 連携制御とは

図1は、ビルや工場などのエネルギーフローを示している。ビルや工場などでは、電力や燃料などの一次エネルギーを受け入れ、これらを需要側が必要とする仕様の電力や蒸気、冷温水、圧縮空気などの二次エネルギー(ユーティリティ)に変えて、工場の生産システムやオフィスへ供給している。

ユーティリティ供給側には、受配電システム、圧縮コンプレッサ、コジェネシステム、熱源システム(ボイラ、冷凍機、ポンプ、冷却塔など)などの設備群が集中的に配置されていることが多く、それら供給側全体を一般に原動力設備、あるいはユーティリティ設備と呼んでいる。

原動力設備では、需要側の電力、蒸気、冷温水、圧縮空気等の要求に応じて、それらを安定的に供給する役割を担っている。

そのため、当然設備の容量は、需要の最大を賄えるように最大需要に合わせて余裕のある設計がなされている。

しかし、実際の需要は変動し、工場によっては夜間の負荷は昼間の数分の一に下がる場合もある。そうした場合には、設備容量に対して低負荷で運転することになり、システム効率が低くなりエネルギーの無駄が発生する。その無駄を省くため、需要に見合ってユーティリティ設備を連携させ、効率的に運用することにより、高いシステム効率を維持することを目的とするのが「連携制御」である。

図1に示すように「連携制御」は、大きく2つに分けられる。需要に合わせて供給側設備を調整する「需給連携」と、供給側が複数の機器で複雑に構成されている場合にそれらの最適負荷配分を行う「供給連携」がある。

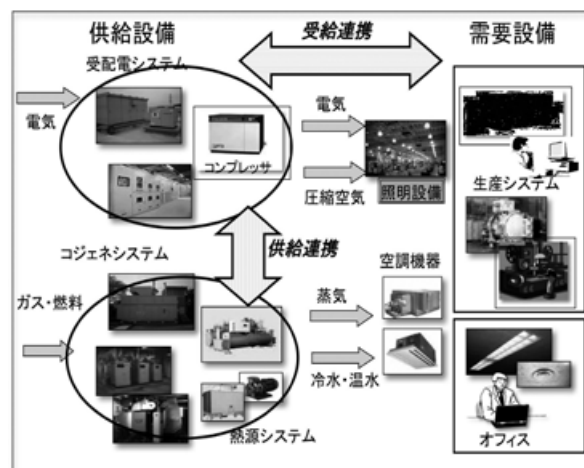


図1 需給連携と供給連携<sup>(1)</sup>

連携制御は、従来独立して動作していたシステム同士を接続し、最適動作をさせるものである。このため、高額な機器の設置が不要で、物理的にはコントローラやパソコンなどで実現され、コストの主体はソフトウェア作成やエンジニアリング費用などである。また、供給設備、需要設備を段階的に連携させることにより、一歩一歩省エネルギーを進めることが可能である。

連携制御は、潜在する無駄を省くように動作するため、無駄の絶対量が大きな施設では、コストパフォーマンス(投資対効果)が非常に高い。このように、連携制御は、既存のエネルギー供給設備を有効に使い、高い省エネルギー効果を実現する革新的な技術である。

### 2.2 連携制御の効果

各種の省エネルギー機器や省エネルギーソリューションの投資効果を(社)電子情報技術産業協会(JEITA)では、図2に示すように炭酸ガス削減単価という指標を用いて比較している。

縦軸の「炭酸ガス削減単価」とは、炭酸ガスを1t削減するために、いくら投資すれば良いかを示している。小さいほど優秀な省エネルギー手段ということになる。横軸は「炭酸ガス削減量」を示す。右側にいくほど、絶対値として大きな削減量を得ることができる。

◆マーカーは、変圧器や熱源装置など機器単体で省エネルギー効果を高めたものの事例である。○マーカーは、連携制御の事例である。

平均的な省エネルギー改修の「炭酸ガス削減単価」は約11万円/t-CO<sub>2</sub>程度である。連携制御はこれに比べて大幅に安価なソリューションであることが分かる。また、◆マーカーの機器単体の導入時に比べても大幅に安価であることが分かる。

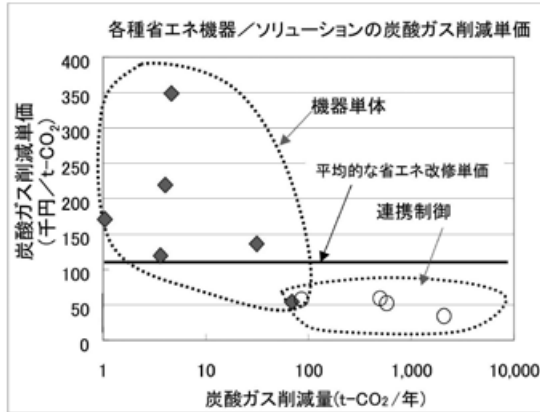


図2 連携制御の効果<sup>(1)</sup>

注1:炭酸ガス削減単価は炭酸ガス1tを削減するために必要な投資金額  
 注2:機器単体の場合は省エネルギータイプと標準タイプの差額で計算。  
 工事費を含まない  
 「BE建築設備」2005年12月号, 2006年1月号記事などより作成  
 注3:連携制御は工事費込み。年間保守費含まず  
 注4:平均的な省エネルギー改修の単価は, 日経産業新聞2006年12月25日  
 より引用

### 3. 山武の提供する省エネソリューション

山武は, 前述の「需給連携」「供給連携」による省エネ, 省CO<sub>2</sub>を実現するために, 原動力(ユーティリティ)設備運用最適化パッケージとして「U-OPT」を開発した。「U-OPT」の機能の全体構成を図3に示す。

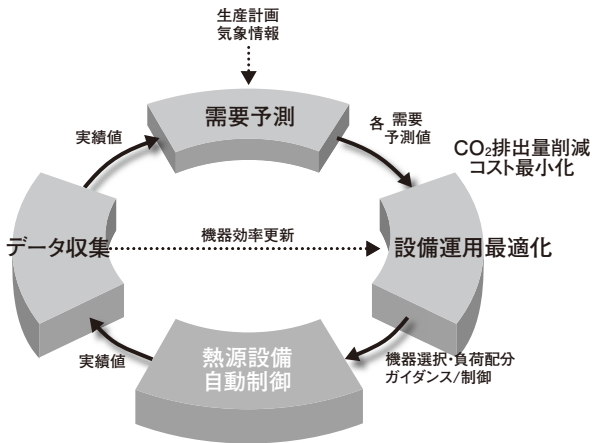


図3 「U-OPT」機能の流れ

「U-OPT」の機能は, 生産計画や気象データなどをベースに将来のユーティリティ需要量を予測する「需要予測機能」と, その予測需要量を満足し, かつエネルギーコストあるいはCO<sub>2</sub>の排出量を最小とする原動力設備の最適運用を計算する「設備運用最適化機能」がある。

「設備運用最適化機能」では原動機器の機器選択, 負荷配分などが出力される。それを実際の運転に反映するのに, 結果をガイダンスシステムとして表示し, 運転員を介して運用する方法(オンラインガイダンスシステム)と, 運転員を介さず, 「U-OPT」から直接, 原動力設備の制御システムに指令を与える方法(最適制御システム)が選択される。

また, 「U-OPT」をオンラインシステムとして実装するには, 設備の運用状況のデータをオンラインで取り込み, かつデータの整合性チェックや機器の特性の変化をチェックする機能を併せもつ「データ収集機能」が必要とされる。

#### 3.1 需要予測機能

需給連携の効果を高めるため, 特に蓄熱槽等のエネルギー蓄積が可能な設備を持つ場合は, 需要量の現在値だけでなく, 将来の需要量変化を予測し, 長い時間レンジで運用最適化を行う必要がある。そのため, U-OPTでは, 「需要予測機能」を備えている。空調負荷であれば, 気象予報情報をベースに冷暖房に必要とされる熱負荷を予測するし, また製造ラインであれば生産計画より計画製造量に必要な電力量, 蒸気量等の需要を予測する。

U-OPTの「需要予測機能」は, 次の特徴を持つ。

##### ●重回帰による予測式

電力や蒸気といった熱源負荷(y)を, 製造量, 気温・湿度といった影響因子(x1, x2, …xn)の重回帰式で予測する。

$$y = a \times x_1 + b \times x_2 + \dots + d$$

##### ●製造カレンダーに応じた予測モデル切り替え

予測精度を高めるために, 平日, 休日, 休前日等異なる代表的負荷パターンごとに予測モデルを持ち, 製造カレンダーに従ってそれらを切り替えて予測に使用する。

##### ●カルマンフィルタによる学習機能

季節変動や製造工程を変更した場合には, 重回帰モデル係数は変化する。その調整をあえて行わないでも, カルマンフィルタによる学習機能で自動的に重回帰モデル係数が更新される。それにより季節変動や製造工程変更への優れた追従性が得られている。

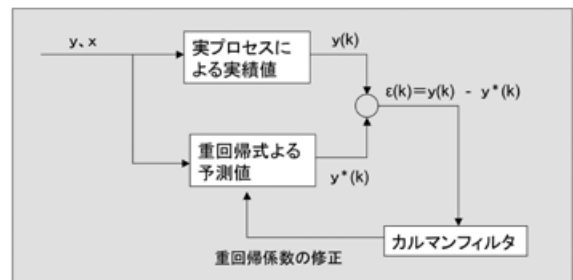


図4 カルマンフィルタによる学習機能

##### ●実績値に合わせた予測値修正

予期せぬ突発的な負荷変動が発生した場合, 予測値と実際の値を比較し, それ以降の予測値を実際の値に合うように修正を行う。

需要予測の精度は, 状況により異なるが, 今までの実績では±5%程度の精度で予測できている。

#### 3.2 運用最適化機能

「U-OPT」では, 最適化アルゴリズムとして数理計画法の1手法である「混合整数計画法」(分枝限定法)を用いており, 機器の負荷配分の最適化のみならず, 機器の起動・停止の最適化も行う。プラントを構成する機器モデル及び各種制約条件の元に, 目的関数である「一次エネルギーコス

ト)あるいは「CO<sub>2</sub>排出量」を最小とする機器の起動・停止、最適負荷配分を算出する。

例えば、下図のような原動力設備の場合、

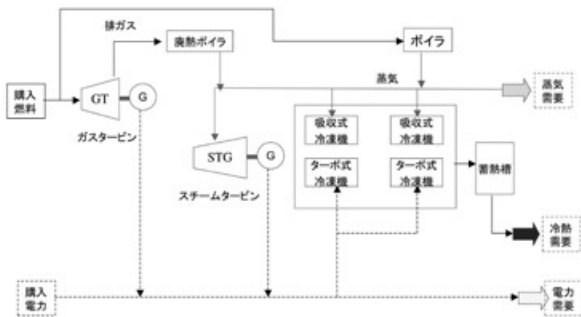


図5 原動力設備例

次の最適化問題を混合整数計画法で解くことになる。

<目的関数>

- ・燃料使用量×燃料単価+電力使用量×電力単価(最小化) あるいは
- ・燃料使用量×燃料単位CO<sub>2</sub>発生量+電力使用量×電力単位CO<sub>2</sub>発生量(最小化)

<機器モデル>

- ・ボイラ、廃熱ボイラ、抽気タービン、ガスタービン、吸気式冷凍機、ターボ式冷凍機、蓄熱槽の機器モデル。機器の非線形特性も、折れ線近似で対応可能。

<制約>

- ・機器制約:機器最大・最小負荷、連続運転制約、連続停止制約、強制運転、強制停止、運転優先順位、燃料選択
- ・全体エネルギーバランス制約
- ・ユーティリティ需要制約:蒸気需要、冷却需要、電力需要

3.3 オフライン検討用ツールとしての「U-OPT」

「U-OPT」は、オンライン運用最適化パッケージとしての適用を考えて開発されているが、そのユーザフレンドリーなインターフェイスから、オフラインツールとして、次の目的で使用することができる。また、オンラインシステムの適用の際にも、その導入効果をオフラインで検証するフェージビリティ・スタディ(FS)を事前に行うのが一般的で、その検討にも「U-OPT」オフラインツールが使用される。

- ①原動力設備の運用の無駄の検証
- ②設備増設、廃棄した場合の経済効果検証
- ③電力契約等最適な契約条件の検討

3.3.1 オフライン「U-OPT」の構成

U-OPTのオフライン適用を説明する前にその入出力環境、モデル構築環境について説明する。シミュレーション・最適化を実施するには、モデル構築とデータ入力が必要とするが、U-OPTのオフラインツールでは、データの入出力はMS-Excelシートで、またモデル構築はMS-Visioを使用してグラフィカルに構築することができる。最適化の目的関数としては「コスト最小化」と「CO<sub>2</sub>排出量最小化」を選択することができ、最適化エンジンとしては混合整数計画法(MILP)を使用している。ボイラや冷凍機といった各熱源

機器のモデルを構築し、ユーティリティの需要量と燃料・電力単価、機器の制約を入力し、最適化を実行することにより、目的関数を最小とする最適機器運用計画、コスト、CO<sub>2</sub>排出量が出力され、MS-Excelシートの形で見るができる。

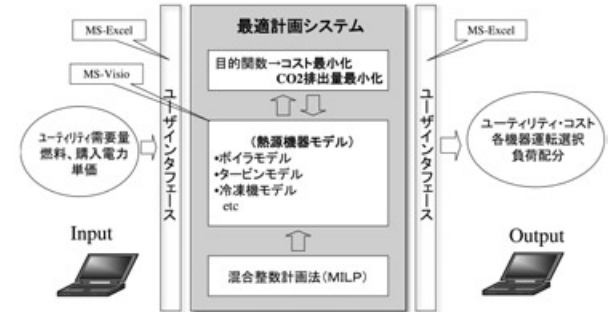


図6 U-OPTオフラインツールの構成

3.3.2 モデル構築

シミュレーションや最適化を行うには、対象となる設備のモデル構築が必要となるが、それは一般的にユーザにとって大きな負担である。

「U-OPT」では、MS-Visio画面でモデル構築がグラフィカルな操作で容易に行えるようになっている。ボイラとか冷凍機といった熱源設備の機器のテンプレートが用意されており、それらをDrag & Dropで配置して、ラインで結ぶことで容易に原動力設備モデルを構築することができる。各機器仕様のパラメータは配置した機器のアイコンをクリックすればMS-Excelシートが開き、そこから入力することができる。

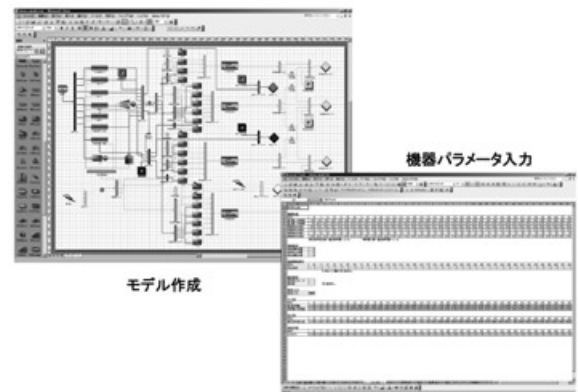


図7 U-OPTオフラインツールモデル作成

モデル構築の容易さは、モデルの保守や変更の上でも重要である。特に、設備変更を行った場合の投資効果を算定するには、モデルへのボイラやタービンの追加等の修正が容易に行えることが必須の要件となる。

3.3.3 オフラインツールの適用

次にオフラインツールの具体的な適用について説明する。

(1) 運用改善効果検証

運用改善効果を検証するために、まず、運転実績データでシミュレーションを行い、コストあるいはCO<sub>2</sub>発生量を計算する。次に負荷のみを実績で固定し、機器の制約条件下で最適化を行い、目的関数(コストあるいはCO<sub>2</sub>発生量)を

最小にする最適運用を算出する。目的関数値の実績値と最適値を比較することによりどの程度改善余地があるかを判断する。

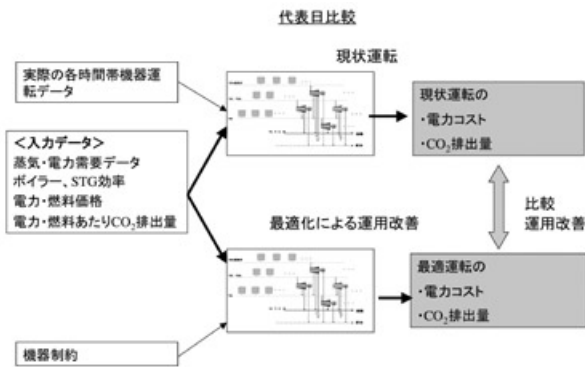


図8 オフラインツールによる現状と最適化の比較

**(2) 設備改善効果検証**

今後予想されるユーティリティ需要を用いて、現状の設備で運用最適化を行った場合と設備改善を実施した場合の運用最適化を行った場合のコストあるいはCO<sub>2</sub>排出量を比較し、設備投資の効果検証を行う。

**(3) 電力契約評価**

製品プロファイルが変わったことによる製造装置変更や蒸気吸収冷凍機を電動ターボ冷凍機へのリプレースなどの原動力設備構成の変更があったときに、現在の電力契約を継続するのが適切であるかどうか、あるいはどのような契約に変更すれば有利であるかを評価するのにU-OPTを活用することができる。いくつかの契約パターンから予想される負荷に対する電力コストを算出する。それによりどのような契約パターンを選択し、契約電力量をいくらにしたら良いかの判断材料とすることができる。

**3.4 オンライン最適化機能**

**3.4.1 オンラインシステム構成**

「U-OPT」ではオフライン検討に使用したモデルをそのまま移植して、図9に示す「オンライン運用最適化システム」として適用することができる。

オンライン運用最適化システムとしては、一定の周期(例えば30分おき)の需要予測で推定した蒸気・電力需要に合わせて最適な原動力設備の最適運用を算出する。最適化結果は「最適ガイダンスシステム」として運転員に出力することも、「最適制御システム」として、運転員を介さずに直接ボイラタービンの負荷設定を行うことも可能である。

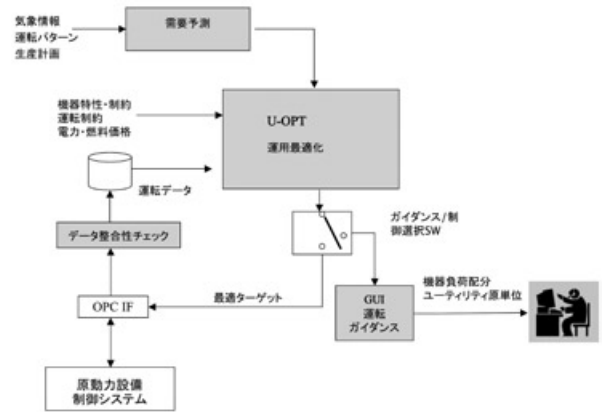


図9 U-OPT オンラインシステム

「オンライン最適化」の適用事例として、組み立て工場である「自動車工場の熱源システム」への適用例とプロセスプラントである「石油精製・石油化学工場のユーティリティ設備」への適用例の2例を紹介する。

**3.4.2 自動車工場への適用事例**

組み立て工場の代表例として、自動車工場での適用事例を示す。対象原動力設備の構成は複数のボイラ、コジェネ設備、吸収式およびターボ式冷凍機、蒸気を温水にする熱交、冷熱、温熱を貯めるための蓄熱槽からなる。

この例では、空調負荷の占める割合が高いということで、「U-OPT」では、機器の最適運用・負荷配分を行う前に、空調負荷に影響の大きい気温・湿度の気象予報情報をオンラインで取り入れて、それをベースに空調に必要な冷熱・温熱負荷を24時間先まで予測する。そしてその予測値をベースに最適化アルゴリズムによりCO<sub>2</sub>排出量(当該工場では、1次エネルギーコストよりもCO<sub>2</sub>排出量削減を優先している)を最小にする24時間先までの原動力設備の運用及び蓄熱槽の蓄熱パターンを決定する。最適計算結果は30分ごとに新たなデータに基づき、更新される(図10)。

最適結果は、冷凍機についてはオンラインで直接起動・停止を行い、水管ボイラについては運転上の制約からガイダンスシステムとして運転員を介して起動・停止を行っている。

「U-OPT」による全体最適化を適用することにより、受電量を契約電力の範囲内におさめ、かつ抽気蒸気量が適切になるようにコジェネを最適負荷で運用する。

また、効率の良いボイラの選択や蒸気の製造状況に応じた冷凍機の優先度変更、蓄熱槽の最適な蓄熱パターンを総合的に考えるなど全体のベストミックスが実現でき、熱源設備全体のシステム効率を上げることができる。

U-OPTの導入により工場全体のCO<sub>2</sub>排出量を5%下げることができ、この成果を受けて、現在他工場にも展開中である。

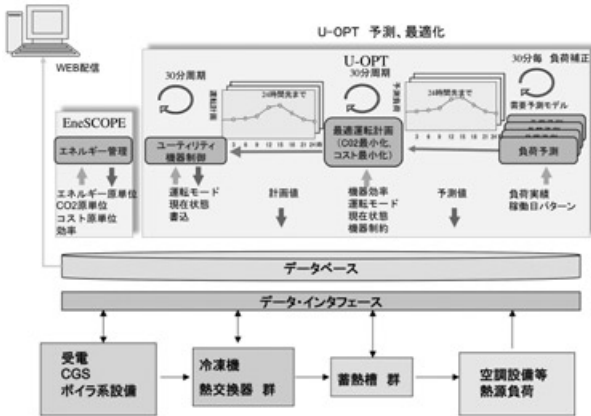


図10 自動車工場へのU-OPT最適制御システムの適用

### 3.4.3 プロセス工場のユーティリティ設備への適用事例

自動車工場の熱源システムの例では、蓄熱槽によるエネルギー蓄積が可能であり、それがバッファとなって、多少の需給のバランスのずれを吸収することができた。しかし、このプロセス工場のユーティリティ設備への適用例では、そういったエネルギーを蓄積する設備がなく、「オンライン制御」を行うには、需給バランスの乱れに即座に対応できる制御への配慮が重要となる。

対象とするユーティリティ設備を簡略して表すと図11のような構成となる。

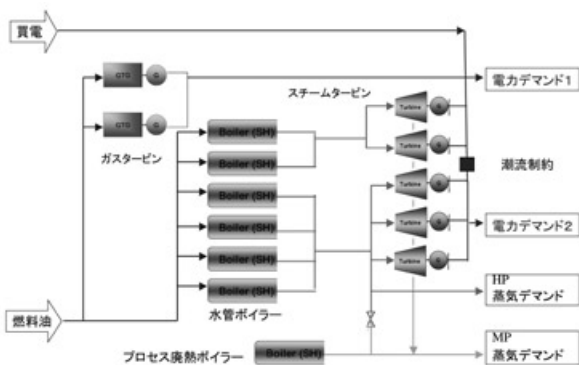


図11 ユーティリティ設備

複数のボイラにより発生させた高圧蒸気を使って蒸気タービンにより自家発電を行うとともに抽気蒸気をプラントに送気している。

ユーティリティ設備の役割は、製造プラントに安定的に蒸気、電力の必要量を供給することである。

同工場では、運用最適化システムを導入することにより、効率が異なる機器の負荷配分の最適化、昼夜の電力価格差を考慮しての自家発電量と購買電力量の調節などにより、エネルギーコスト削減を実現している。

「最適制御システム」の実現には、前述したように、エネルギー蓄積のバッファとなるものがないので、需給のアンバランスに即座に対応できるように、図12に示す「U-OPT」→「制約回避制御」→「DCS制御」の階層構造を適用している。

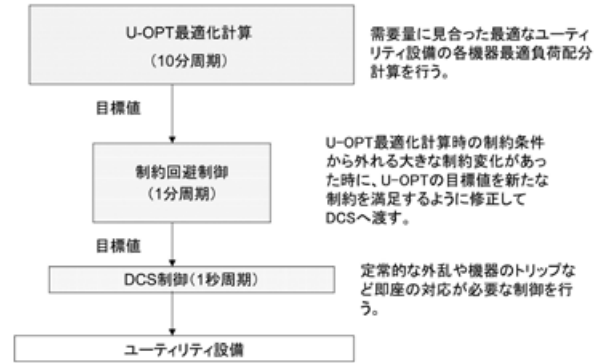


図12 U-OPTオンライン制御階層構造

「U-OPT」は10分周期で定常最適解を算出するため、外乱による需給の細かいアンバランスを吸収することはできない。そのため図13に示すように、「U-OPT」から全ての機器の負荷配分を指令するのではなく、各蒸気ヘッダの圧力制御や受電量制御が行えるように自由度を持たせ、通常の大規模の外乱に対してはDCSレベルの制御で対応できるようにする。

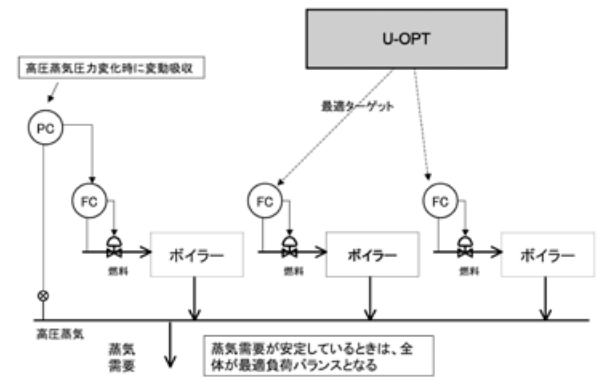


図13 「U-OPT」のターゲットとDCS制御の協調

しかし、廃熱ボイラの突然のダウンや落雷による購買電力の急な供給停止などの大きな外乱が入った場合は、今までは運転員が介入して緊急事態の回避操作を行っており、そういったDCSレベルの制御では対応不可である。

「U-OPT」での最適制御システムが運転員に受け入れられやすく安心感を持たせるシステムとするには、そのような運転員が行っていた回避操作もカバーする必要がある。

そこで、図14に示すようにU-OPT最適化計算とDCS制御の間に、熟練オペレータの大きな外乱時の回避操作ノウハウを基に制御モデルを構築した「制約回避制御」を導入する。

それにより、運転員に安心して受け入れられる最適制御システムが実現できる。また、刻々と変化する電力需要、スチーム需要への追従性が高まり、自動化によりオペレータの負荷が低減されると同時に、ボイラと発電機の運転をリアルタイムで最適化することができる。

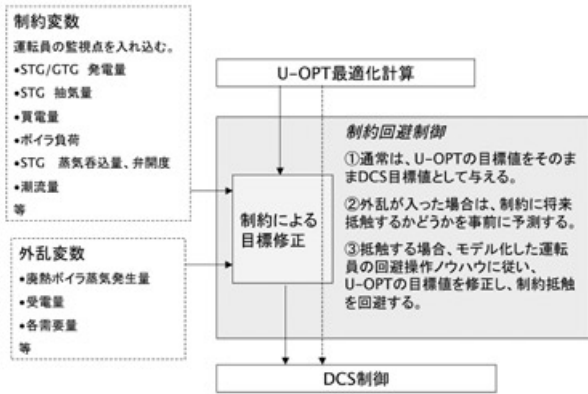


図14 制約回避制御の適用

#### 4. オンラインデータ取り込み

「U-OPT」をオンラインシステムとして適用する場合、運転データをオンラインで取り込む必要がある。インターフェイスソフトを作成することにより、「U-OPT」が直接、既存の運転データベースにアクセスし、データを取り込むこともできるが、山武が提供するOPC対応のエネルギー管理システム「EneSCOPE」を導入すれば、「U-OPT」のオンラインデータ取り込みがスムーズに行うことができ、かつ「EneSCOPE」が持つ次のエネルギー管理機能を使用して高度なエネルギー管理が可能となる。

- ・締め処理等の機能による時間平均データ
- ・エネルギー使用の絶対量管理(各種グラフ表示)
- ・ユーティリティ原単位管理
- ・機器効率管理:プラントレベル効率→機器レベル効率へのドリルダウン機能
- ・機器効率劣化監視・通知機能
- ・エネルギー使用の無駄発見のための解析ツール
- ・外部ツール使用のためのデータフィルタリング・ダウンロード機能

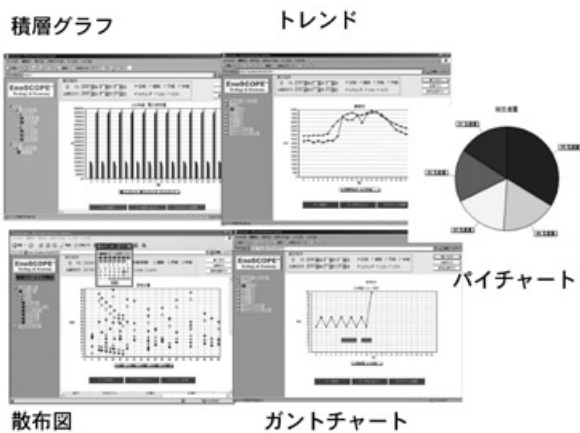


図15 EneSCOPE各種画面

さらに次のメリットがある。

- ・「EneSCOPE」では、「U-OPT」のオフライン使用の場合も、「U-OPT」フォーマットで必要データを出力すること

ができる。

- ・「EneSCOPE」で求めた機器効率を「U-OPT」最適化モデルの機器効率としての採用も容易に行える。
- ・最適化においてデータの信頼性が重要となるが、「EneSCOPE」ではオプションで、そういったデータ健全性チェック機能も行うことができる。

#### 5. U-OPTオンラインシステム導入手順

U-OPTのオンラインシステム導入にあたり、その導入によりどの程度の効果があるのかを事前に評価することが望ましい。山武ではU-OPTのオンラインシステムを提案をする上で、対象設備の設備仕様や代表日の運転データを顧客から受領し、事前検討(フィージビリティスタディ:FS)を実施して投資・効果を予め推算し、十分な効果が出ると判断されて、はじめてオンラインシステム実施の次の段階に進むアプローチを行っている。

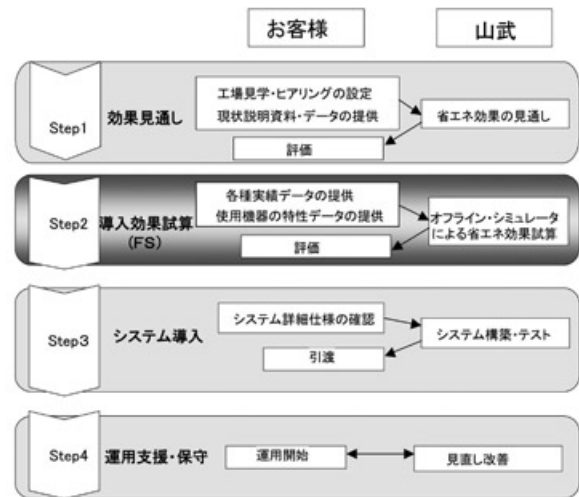


図16 導入手順

FSの実施にあたっては、対象工場について次のような資料を揃えてもらう必要がある。

##### FS実施に必要な資料

- ・熱源システムのフロー図
- ・熱源機器仕様
- ・機器制約、運用制約
- ・各季節のユーティリティ負荷実績(数日分)
- ・各季節の熱源設備の運用実績(数日分)
- ・電力、燃料単価、契約形態

## 6. おわりに

エネルギーの需給連携，供給連携といった「連携制御」を実現するための原動力設備運用最適化システム「U-OPT」の紹介及びその自動車工場や石油精製・石油化学への適用例を紹介した。「U-OPT」は，地域冷暖房(DHC)での実績も多数あり，最近は，半導体工場や製鉄工場等からの適用要求も増えつつある。また需給連携の適用として，生産計画→ユーティリティ設備運用計画の一方向の最適化にとどまらず，生産計画↔ユーティリティ設備運用計画の双方向の需給連携も試みられている。

また，設備運用最適化以外に，オフラインツールとして設備投資評価のツール，電力契約等の見直しツールとしても利用できる。

今後は，パッケージ化をより進め，エンジニアリングコストの削減を図るとともに，山武の持つエネルギー管理システム「EneSCOPE」との連携を強め，「連携制御」という新しい切り口によるエネルギーソリューションツールとして，工場や大型ビルなどへ幅広く適用して行く意向である。

### 参考資料

(1) (社)電子情報技術産業協会(JEITA)制御システム専門委員会省エネルギーWG 2008年度調査報告書より引用

### 商標

U-OPTは，株式会社 山武の商標です。

EneSCOPEは，株式会社 山武の登録商標です。

MS-Visiotは，米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。

MS-Excelは，米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。

### 著者所属

植木 和夫	アドバンスオートメーションカンパニー アドバンスト・ソリューション部
鈴木 康央	アドバンスオートメーションカンパニー アドバンスト・ソリューション部
今福 賢一	アドバンスオートメーションカンパニー アドバンスト・ソリューション部

# 世界最高水準の精度と信頼性を有する ピエゾ抵抗式圧力センサの開発

## Development of Piezoresistive Pressure Sensors with the World's Highest Level of Accuracy and Reliability

株式会社 山武

徳田 智久

Tomohisa Tokuda

### キーワード

ピエゾ, 圧力, ICP-RIE, R付ダイアフラム, 高耐圧, ノッチフリー, 拡散抵抗配線

当社の基幹製品である差圧・圧力発信器の心臓部に搭載されるSiピエゾ抵抗式圧力センサを改良することで、従来品に対して大幅な高耐圧化を達成する理想的なダイアフラム構造とそれを可能にする独自プロセスを開発し、センサの信頼性を大幅に向上させているので報告する。さらに従来のメタル配線の代わりに半導体拡散抵抗を配線とすることで、さらなる精度向上を実現している併せて報告する。

Improvements have been incorporated into the silicon piezoresistive pressure sensors installed in the central unit of differential pressure and pressure transmitters, which are key products of our company. This has enabled the development of ideal diaphragm structures featuring significantly higher pressure resistance and the unique processes making this possible and the realizing of greatly improved sensor reliability. This paper covers these topics and how installing semiconductor diffused resistors instead of conventional metal wires enables even higher accuracy.

### 1. はじめに

差圧・圧力発信器は圧力、流量、液位などの計測に使われる汎用性の高い工業計器であり、世界中で広く採用されている。近年、これらを取り巻く環境は市場のグローバル化や世界規模での生産拠点の変化にともない厳しさを増し、これまで以上に高いコスト競争力と差別化技術による製品力強化が必要不可欠な状況となってきた。そこで、当社で製造・販売している高精度・高機能な差圧・圧力発信器AT9000 Advanced Transmitter Model GTX (以下GTX)等に検出素子として内蔵されるSiピエゾ抵抗式圧力センサの改良を行い、大幅な信頼性、及び精度向上を達成しているのでここに紹介する。



図1 AT9000 Advanced Transmitter Model GTX

### 2. センサ概要

#### 2.1 ピエゾ抵抗式の測定原理

センシング方式として利用しているピエゾ抵抗効果とは、応力による半導体のバンドギャップの変化で説明され、抵抗率が変化する現象である。<sup>(1)</sup>ピエゾ抵抗係数は、応力に対する抵抗率の変化を示す係数であり、物質によって固有の値を持つ。Siの場合では、このピエゾ抵抗係数は、伝導型、温度、不純物濃度によって変化し、さらに異方性を持つ。

当社では、検出素子として、p型Siの拡散抵抗で結晶面(100)を採用している。図2にp型Siの(100)面におけるピエゾ抵抗係数の異方性を示す。この面においては結晶方向が<110>方向の時に最もピエゾ抵抗係数が大きくなり、圧力検出に最適方向となる。逆に結晶方向が<100>の時に、最もピエゾ抵抗係数が小さく圧力感度最小となり、温度センサなどの最適方向となる。

測定原理としては、図3に示すとおり、圧力印加時にセンサチップに形成されたダイアフラムの撓みにより発生する応力を、センサ表面に形成したピエゾ拡散抵抗の抵抗値変化としてブリッジ回路で検出する方式を採っている。発生応力、抵抗値変化率、及びブリッジ出力電圧の関係を式(1)に示す。この式が示すように、ダイアフラムの径方向に発生する $\sigma_l$ と接線方向に発生する $\sigma_t$ との差である $\sigma_l - \sigma_t$ に比例する抵抗値変化率 $\Delta R/R$ に伴う電圧が出力される。



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

( $\pi_{44}$ : <110>のピエゾ抵抗係数)

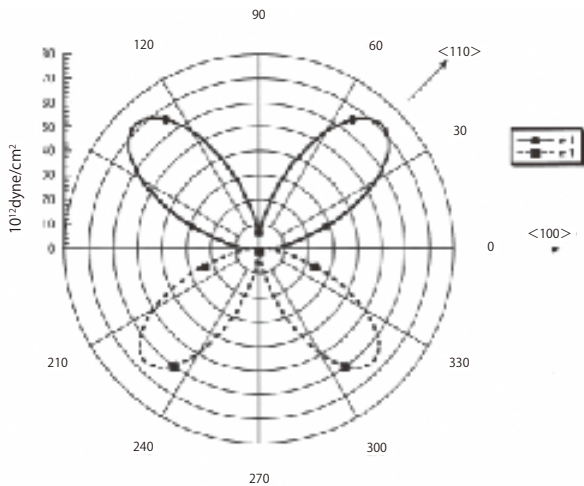


図2 p型Si (100)面のピエゾ抵抗係数

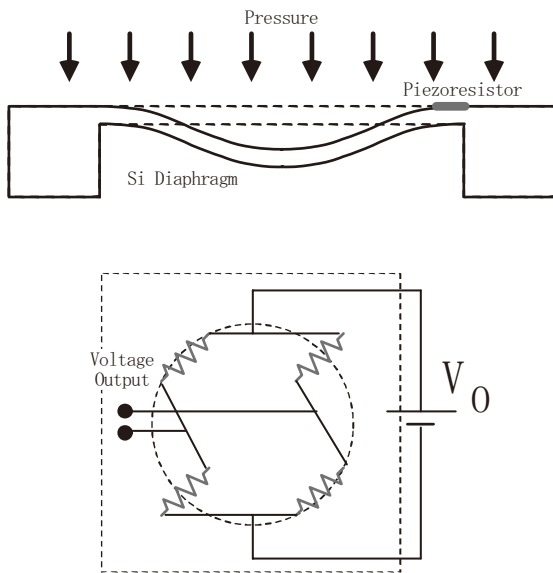


図3 測定原理

## 2.2 センサ従来構造と特徴

当社にて、これまでに高精度・高信頼性を追究することにより得られてきた独自の差別化技術について以下に記載する。

### 2.2.1 センサチップ構造

当社ではSOI (Si On Insulator) ウエハを用いてセンサチップを作製している。これはSiに比べて極端にエッチングレートの低い埋め込み酸化膜(buried oxide:BOX)層でエッチングストップさせることで、ウエハ面内でダイアフラム厚さの均一性を保つためである。しかし、この構造では強度の弱いSiO<sub>2</sub>やSi-SiO<sub>2</sub>界面で応力集中が起こるため、耐圧の低い構造になってしまう。そこで、耐圧向上のためにさらに追加で掘り込むことにより図4に示すような強度の弱いBOX層付近への応力集中を避ける構造としている。また、センサ表面には検出素子が形成されており、アルミ配線によりブリッジ接続されている。

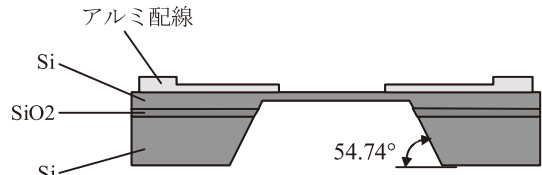
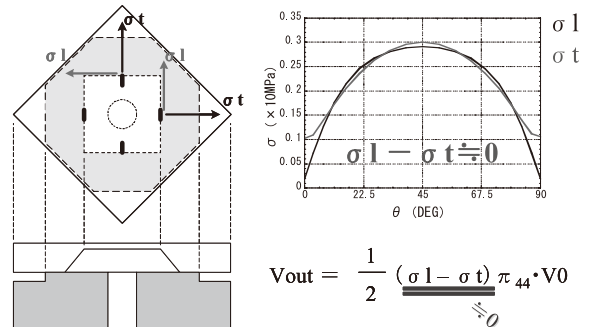


図4 センサチップ従来構造

### 2.2.2 LZS構造

支持台であるガラス台座との僅かな熱膨張係数差やヤング率の違いにより接合界面に生じる歪による誤差を排除する構造をとっている。これをLZS (Low Zero Shift) 構造(図5)と呼び、温度特性及び、静圧特性のSN比が従来比で10倍以上に向上している。当社センサは、チップ材料としてSiを採用し、台座はガラス材を採用している。異種材料を接合している限り、誤差成分である温度や圧縮力により発生する応力を完全になくすことは不可能である。但し、ここで式(1)に再度注目すると、このノイズ成分の低減には、温度や圧縮力により発生する径方向の応力と接線方向の応力が等しく、その差が0であれば良いことが分かる。このことに注目し、センサチップと台座との接合部の形状を最適化することで、 $\sigma_l$ と $\sigma_t$ の値を等しくし、温度や圧縮力により発生する応力によるノイズ成分を極力抑えることのできる構造となっている。



$$V_{out} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma_l - \sigma_t) \pi_{44} \cdot V_0}{\approx 0}$$

図5 LZS構造

### 2.2.3 Si / Glass / Si 三層PKG

センサチップ・台座を压力容器であるステンレス鋼にパッケージしているが、ステンレス鋼との熱膨張係数ミスマッチにより熱応力が発生する。この応力のチップへの伝達を十分に減衰させる目的として、図6に示すように、Siチューブを導入している。これにより、PKGから受ける誤差要因の排除を可能にしている。

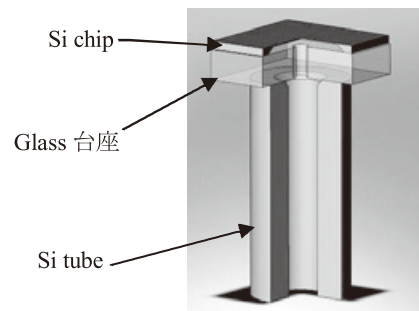


図6 三層構造

### 2.2.4 ゼロ点安定化技術

計測値の信頼性を論じる際、しばしばゼロ点のドリフトが問題になる。当社ではこの問題を解決するため、センサゲージ形成の際のイオン注入プロファイルを独自に最適化し、ドリフト発生の原因であるイオン性不純物に対する耐性向上に成功している。図7に示すように、本来特性を保証していない限界動作領域(125℃)においても17ヶ月以上で0.01%F.S. 以下と工業用差圧・圧力発信器における世界最高水準の安定性、信頼性を実現している(図7)。

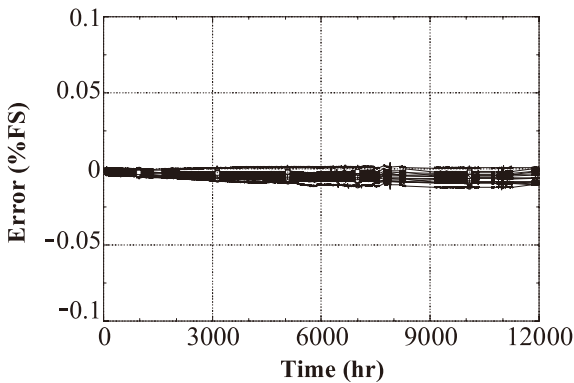


図7 125℃におけるゼロ点のドリフトデータ

## 3. さらなる高信頼性化・高精度化

前述のとおり、我々の開発したピエゾ抵抗式圧力センサは、長年の開発から得た様々な技術を集約した高精度、高信頼性のセンサである。しかし、従来の構造では、最も低い微圧レンジの実現が困難であった。これは、差圧センサのLP (Low Pressure) 側の耐圧が使用圧力の70倍という厳しいスペックの中、スパンと耐圧のトレードオフを達成することが同構造では極めて困難だったためである。一方でスペック内であっても、厳しい使用環境でウォーターハンマーやアコースティックショックなどにも耐える信頼性の高いセンサが求められている。このような要求に応えるため、我々はセンサの耐圧を極限にまで高めた。具体策として、設計上のアプローチ (R付) とプロセス上のアプローチ (ノッチレス) の両方により解決している。さらに低圧レンジになるほどヒステリシスの問題も大きくなっていく。これについても、設計上のアプローチ (配線メタルレス化) により課題解決している。

### 3.1 従来構造の課題点

従来構造のセンサは、アルカリのエッチング液による異方性エッチングでダイアフラムを形成していたため、面方位の関係からエッチング終端部に54.74°の角ができ(図4)、この角が応力集中箇所となるため耐圧が低かった。そこで、高耐圧化を実現する手段として、この角にRをつけ、応力を分散させる構造が有効と考えた。この考えのもと、理想的なダイアフラム構造の実現に成功しているの以下に記載する。

また、従来センサは配線材料にアルミを使用しているため、温度サイクルが加わった際に主にこの異種材料界面に

発生するすべりのためゼロ点シフト (以下サーマルヒステリシス) が発生する。また低圧レンジになるほど、この影響が大きく、最も低圧の微圧レンジでは深刻な問題となる。これに対しても配線に半導体拡散抵抗を導入することでヒステリシスを低減することで解決しているの以下に記載する。

### 3.1.1 新ダイアフラム構造の実現

R付ダイアフラムの構造を実現するために、従来のエッチング手法であるウェットエッチングではなく、ICP-RIEによるドライエッチングを導入した。また、チップサイズは極力小さい方が好ましく、そのためには開口部面積を極力小さくする必要がある。R付ダイアフラム作製プロセスの概要を下記に記載する。

- (1)1次掘り:SOIのBOX層までのエッチング。Bosch Process と呼ばれるエッチングとエッチング側壁保護を繰り返しながら行うエッチング手法を用い、垂直、もしくは逆テーパ形状となるようなトレンチ構造を形成する。これにより、ダイアフラム寸法からの開口部の広がりゼロ以下にしている。
- (2)BOX層の除去:BHF (Buffered HF) によるウェットエッチング。
- (3)2次掘り:等方性エッチング (Non-Bosch Process) による深掘り。等方性エッチングで行うことにより、エッチング時間に伴う寸法のR形状が形成される(図8)。



図8 R付ダイアフラム

但しこの構造では、図9に見られるように、SOIウエハで実施していることによる、ドライエッチングの際にノッチと呼ばれるくぼみが酸化膜界面で発生する。これは従来構造と同じ応力集中箇所となりうるという懸念点があるため、以下で検証した。

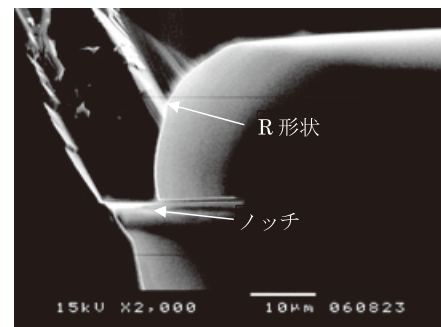


図9 ノッチ構造

ノッチは低圧以下のレンジでは問題ないが、より使用圧の高い中圧レンジでは、LP耐圧が0.9倍と逆に低下してしまうことが耐圧試験結果より分かった。図10にチップ破壊後の断面図を示すが、チップ破壊はノッチ部を起点としていくことが分かる。また、図11にはノッチ形状ダイアフラムとノッチフリーの理想的な形状のダイアフラムのLP印加時の発生応力分布を比較したシミュレーション結果を示している。ノッチ形状ダイアフラムでは、ノッチ部分が新たな応力集中部となり酸化膜の破壊応力を超える応力が発生していることが分かる。それに対しノッチフリー形状ではBOX層領域に酸化膜の破壊応力を超える応力発生は見られない。以上の結果より、LP耐圧低下の原因は、ノッチ形状であり、ノッチが新たな応力集中部となるため、Rによる応力分散効果が生かしきれないためであると結論付けた。またこれに対応するため、ノッチ形状の発生を解消し、尚かつさらなる高耐圧化実現のため、プロセスの最適化により図12のような形状を達成している。

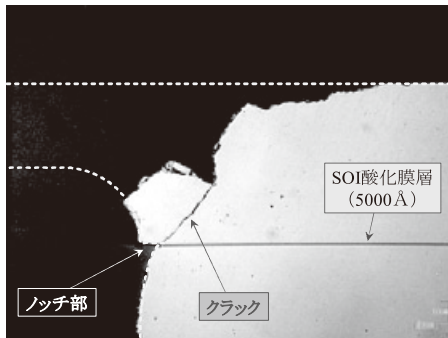


図10 チップ破壊断面観察結果

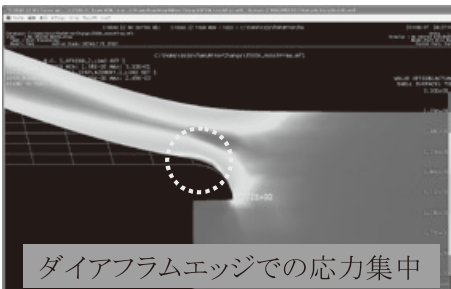


図11 ノッチ有(上)とノッチ無(下)のLP印加時の応力分布シミュレーション結果比較

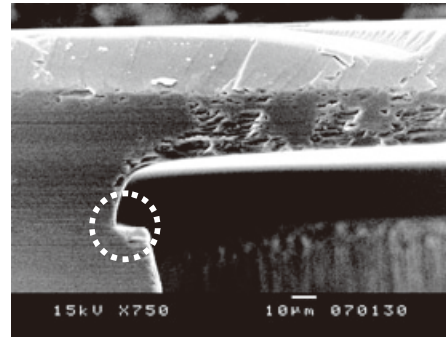


図12 ノッチフリーR付ダイアフラム断面図

### 3.1.2 評価結果

新ダイアフラム構造の耐圧について、各レンジ毎に従来品と比較した結果を表1に示す。全レンジとも従来構造の耐圧を基準としての耐圧向上率で表記している。微圧レンジでは従来構造の6倍以上、低圧レンジでは3.3倍以上、中圧レンジでは2.8倍以上と各レンジ大幅な高耐圧化を達成している。

以上により、従来構造に対して大幅な高耐圧化を実現する理想的なダイアフラム構造であるR付ノッチフリーダイアフラムの作製に成功している。この新ダイアフラム構造の導入により、微圧レンジ実現において課題であったスパンと耐圧のトレードオフを達成している。さらに他レンジにも導入することで、実使用環境で予想されるより強いウォーターハンマーやアコースティックショックなどの過酷な使用環境への耐性が向上され、より信頼性の高いセンサとなっている。

測定レンジ	LP耐圧評価結果 (従来構造比)
微圧	6倍
低圧	3.3倍
中圧	2.8倍

表1 耐圧結果(従来比較)

### 3.1.3 配線メタルレス化

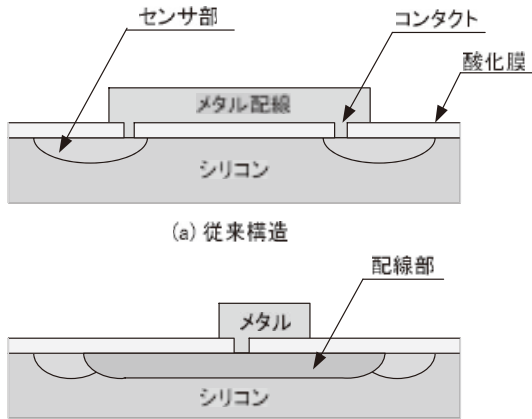
既存センサでは、チップ上に配置した個々のセンサでブリッジ回路を形成するための配線材料としてアルミを用いたメタル配線を採用していた。センサ抵抗はシリコン表面への埋め込み抵抗として形成し、シリコン表面は保護膜としての酸化膜が形成されている。メタル配線はこの酸化膜にコンタクト用の穴をあけ、チップ全面に引き回す構造を採っていた。しかしながら、この方式ではサーマルヒステリシスが大きくなることもあり、この原因が以下の2点であることが分かっている。

- ① メタルと酸化膜界面にストレスが発生する。
- ② メタルで埋め込まれたコンタクト穴が酸化膜とシリコンの界面に熱ストレスを発生させるが、このコンタクト穴が多くなる。

また、低圧レンジになるほど、チップの圧力検出感度が高くなるため、この熱ストレスの影響が顕著に出ることとなる。このため従来構造の低圧レンジではサーマルヒステリシスが大きくなり、最も低圧の微圧レンジ実現に対して、深刻

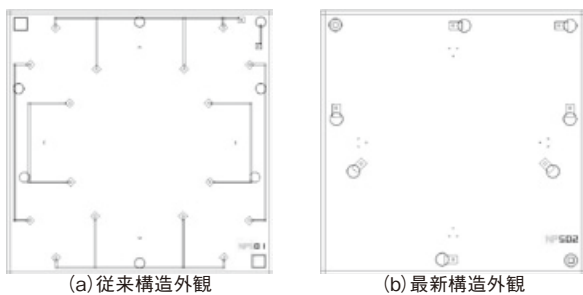
な問題となっていた。そこで、配線としてセンサ素子同様の半導体の拡散抵抗を導入し、可能な限り異種材料を排除することで、サーマルヒステリシスの低減を図った。つまり、図13に示す様に、拡散抵抗を抵抗値、電流パス方向、ブリッジバランス等を考慮して配線として引き回すことで、メタルは外部接続用のボンディングパッド用途のもののみとすることが可能となり、下記の効果が得られる。

- ① メタルが最小限となる。
- ② コンタクト穴数が半減でき、かつ、センサ部より遠ざけられる。



(a) 従来構造  
(b) 最新構造  
図13 チップ配線形成方法

図14に図13の内容を考慮して設計したチップレイアウトを記載する。図で確認されるパターンは主にメタル部であるがメタルが大幅に削減できることが(a)(b)図の比較により確認できる。また、差圧、静圧センサ接続用のコンタクト穴を従来構造に比べて半分以下に減らすことができている。



(a) 従来構造外観  
(b) 最新構造外観  
図14 チップレイアウト

### 3.1.4 評価結果

上記2種類のチップでのサーマルヒステリシスの実測定結果を図15示す。グラフは従来品の最大値を1とした相対比較結果である。ヒステリシス対策が功を奏し半減できていることが確認できる。

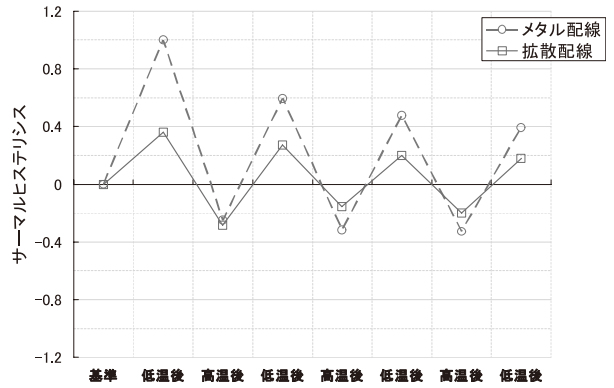


図15 ヒステリシス測定結果

前述の高耐圧化ダイアフラムと合わせることで、微圧レンジの実現が可能となり、圧力センサの全ラインナップを揃えると共に、従来構造に対し、さらなる高精度化を実現している。

## 4. おわりに

新たに理想的なダイアフラム構造とそれを可能にする独自プロセスを導入することで、センサの信頼性を向上させることに成功し、さらに同時に拡散抵抗配線を導入することで、精度向上にも成功している。

今後も世界を代表するピエゾ抵抗式圧力センサの老舗として、さらなる高精度化、高信頼性化、高機能化に向けてあくなき追究を続け、技術に、かつ製品に、より一層の磨きを掛けていく所存である。

### 参考文献

- (1) 米田雅之:ピエゾ抵抗式圧力センサの最適設計, Savemation Review, Vol.18, No2, pp.2-11(2000)
- (2) C. S. Smith:Phys. Rev. Vol.94, No.1, p42-49(1954)
- (3) K. Matsuda, K. Suzuki, Y. Kanda:The 7th International Conference on Solid State Sensors and Actuators, p221-223(1993)

### 著者所属

徳田 智久      マイクロデバイス生産開発部  
研究開発グループ



# 水中環境下におけるトライボケミカル反応を利用した低摩擦・低摩耗技術の研究

## A Study on Low-friction and Low-wear Technology Applying the Tribo-chemical Reaction in a Water Environment

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

大橋 智文  
Tomofumi Oohashi

キーワード  
トライボケミストリー, 摩擦, 摩耗, 表面改質技術, 電動制御弁

近年、ビル空調用途の電動制御弁の開発において、省エネルギー・省資源の観点からバルブの操作トルク低減や長寿命化などが要求されている。そのため、軸受部をはじめとする摺動部材の低摩擦・低摩耗技術の確立が技術開発の1つの方向として位置付けられている。

主に冷温水用途で使用されるバルブの摺動部材には、水中環境における摩擦・摩耗特性の向上が必要不可欠となる。本稿では、水中環境下の摩擦によって誘起される化学反応、いわゆるトライボケミカル反応に着目し、その反応生成物による潤滑効果を利用した低摩擦・低摩耗技術に関する研究結果を報告する。

Recently, concern about energy savings and resource conservation has led development of motor-controlled valves for building air-conditioning applications to focus on the need for reduced operating torque and longer lives for valves. One approach taken has been the technological development of low-friction and low-wear technology for bearings and other sliding parts and materials.

Improved friction and wear characteristics in a water environment is essential for the sliding parts and materials of valves used mainly in heating and cooling water applications. This paper focuses on the so-called tribo-chemical reaction, which is a chemical reaction that is incited by friction in a water environment, and reports on the research results for low-friction and low-wear technology applying the lubricating effects that are products of the reaction.

### 1. はじめに

ビルや工場などの建物空調用途の電動制御弁(VY51シリーズ)において、図1に示すようなトラニオン形式のロータリ弁により、口径15~150Aまでのラインナップを実現している。

電動制御弁の開発における技術的な課題として、アクチュエータの小型化や省電力化、長寿命化があり、その解決策としてバルブの操作トルク低減が必要不可欠となる。

操作トルクの主な要因の1つとして、流体圧を受けたプラグを支える軸受部に発生する摩擦力がある。現状では、低摩擦係数材料であるPTFE (PolyTetraFluoroEthylene:四フッ素化樹脂)をコーティングした金属軸受を使用することで摩擦力を下げている。しかしながら、流体内に存在するさび等の粒子状の異物混入が原因で局所的に面圧が上昇すると、PTFEが激しく偏摩耗し部分的に失われてしまう。そのため、軸受部の摩擦力が上昇し、操作トルクが増加してしまうため、結果的にその増加を許容できる高出力の電動アクチュエータで対応せざるを得ない状況になっている。

このような背景のもと、軸受部をはじめとするバルブ摺動部材の低摩擦化や耐摩耗性などの摩擦・摩耗特性を向上する技術の確立が、1つの大きな技術開発の方向として位置付けられている。主に冷温水用途で使用されるバルブの摺動部材には水中環境における摩擦・摩耗特性の向上が必要であり、本研究では、特に水中環境下における低摩擦・低摩耗技術の確立を試みた。

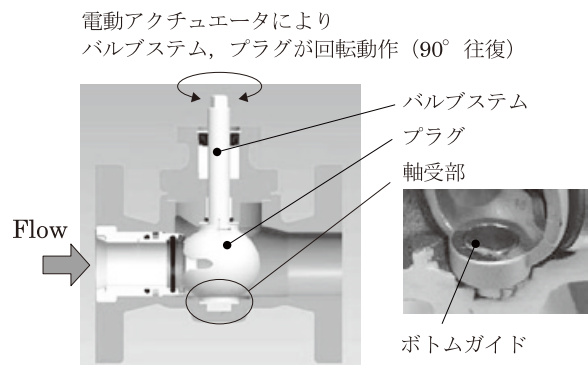


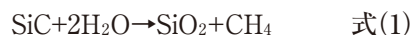
図1 ビル空調用バルブ (VY51) の構造

## 2. 低摩擦・低摩耗化のアプローチ方法

### 2.1 トライボケミカル反応<sup>(1)(2)</sup>

一般的に、物質の表面は摩擦という動的な条件が加わると、その表層付近の原子層は破壊や圧縮などの機械的損傷をうけ、原子同士の結合が切断され化学的に不安定になる。そのため、摩擦条件下では、熱化学反応に本来必要な活性化エネルギーよりも低いエネルギーで、物質表面とその周囲の物質とが反応することが知られている。さらに、摩擦による温度上昇や破壊面からの荷電粒子放射などの作用も加わり、摩擦面はより化学反応を起こしやすい状態となる。摩擦によって誘起される化学反応は一般的にトライボケミカル反応と呼ばれ、通常的环境下では発生しないような反応が起こるのが特徴であり、物質表面の性状が変化したり、反応生成物により摩擦・摩耗特性に大きな変化が現れることがある。

そこで本研究では、主に水中環境での低摩擦・低摩耗性の実現を目的として、摺動面において部材表面のSi(ケイ素)とH<sub>2</sub>Oとが摩擦条件下で下記の化学反応を起こすことを利用する。



上記反応式には大きな活性化エネルギーが必要であり、通常1000℃以上の高温環境と10~100MPa程度の水圧条件下でなければ反応しないが、摩擦条件下では常温でも反応が起こることが知られている<sup>(1)</sup>。この反応によって生成するSiO<sub>2</sub>は非晶質でやわらかく、せん断力が小さいため、反応生成後に潤滑物質として摩擦面に介在し摺動時の接触応力を分散させることができ、低摩擦・低摩耗への寄与が期待できると考えられる。水中環境ではさらに連続してSiO<sub>2</sub>の水和化が起こり、潤滑効果のあるSiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>Oを形成することが推測され<sup>(3)</sup>、より低摩擦・低摩耗化が期待できる。

### 2.2 表面改質技術による機能性Si膜の創製

式(1)と同様の反応を起こす代表的な材料としては、SiC(炭化ケイ素)の他に、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(窒化ケイ素)などのSi系セラミックスが知られているが<sup>(3)・(5)</sup>、一般的にセラミックス材料は非常に高硬度な脆性材料であり、固体粒子の噛み込みによる破壊や耐熱衝撃性の低さなどから、バルブ部品としての適用には難しい面がある。

一方、機械的特性の向上や特定の機能付加を目的として、機械部材の表面をコーティングや熱処理、ショットピーニングなどで特性を変化させる技術として、表面改質技術が知られている。表面の性状のみを変化させることで、部材の特性を保持しつつ、表面には必要な機能を付加することが可能になる。特に近年の環境問題や省エネルギー化に対応するために、部材の摩擦・摩耗特性を向上させる“トライボロジー”分野に関連する表面改質技術が注目を集めている<sup>(6)</sup>。

そこで本研究では、この表面改質技術に着目し、式(1)のトライボケミカル反応が起こるように膜質設計した被膜(以下、機能性Si膜と呼ぶ)をバルブ部材の表面に形成すること

で、その部材の持つ特性(金属材料であるため加工性、耐衝撃性などに優れる)は保持しつつ、水中環境下での良好な摩擦・摩耗特性の実現を目指した。

### 2.3 低摩擦・低摩耗プロセス

図2に、本研究で想定している低摩擦・低摩耗プロセスの概要を模式図を用いて示す。

#### (a) 機能性Si膜の準備:

軸受(ボトムガイド)の摺動表面に、Siを含んだ機能性膜を形成させる。

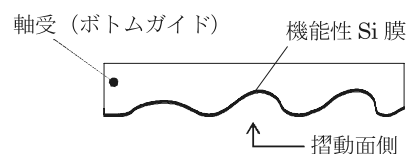
#### (b) 水中環境下での摺動:

軸受(ボトムガイド)と相手材が使用環境下で摺動することで、Siを含有させた被膜が相手摺動材と接触し、表層Si原子が化学的に活性化する。

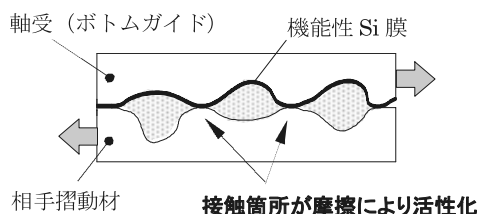
#### (c) 摺動界面における潤滑物質生成:

活性化した表層のSi原子が周囲の水と式(1)のトライボケミカル反応を起こし、SiO<sub>2</sub>の潤滑物質が生成し、摺動界面に介在する。その結果、摺動時の接触応力が分散され、低摩擦・低摩耗性の実現できる。

#### (a) 機能性 Si 膜の準備



#### (b) 水中環境下での摺動



#### (c) 摺動界面における潤滑物質生成

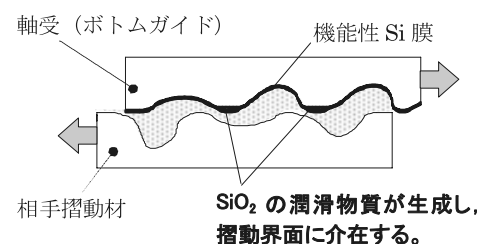


図2 低摩擦・低摩耗プロセス概要

### 2.4 膜質の設計指針

冷温水用途のビル空調用バルブの摺動部材が主に水中環境摺動であると想定されることは先に述べたとおりであるが、配管の向きなどによっては水のない環境で摺動する場合も起こりうる。そのため水中環境だけでなく、乾燥環境(空气中)での摩擦・摩耗特性も無視することはできず、両環境を想定した膜質設計が必要となる。

成膜処理方法にはドライコーティングの1つであるPACVD (Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition: プラズマアシスト化学蒸着法)を用いた。処理温度が約200℃と比較的低温で、基材表面に堆積した後に結晶化するだけのエネルギーが十分でないため、膜内の原子配列は一般的に規則性のないアモルファス(非晶質)となる<sup>(7)</sup>。そのため、原子の結合状態は熱力学的に非平衡(非平衡準安定状態)であり化学的に活性となるため、通常のセラミックスSiCよりも低い活性化エネルギーで反応することが推定される。

また、乾燥環境(空气中)での摩擦・摩耗特性を考慮し、SiとC(炭素)の原子比率を1:1とせず、Siの含有量を減らすことで、膜中のSi-C結合に対してC-C結合の割合を十分に確保した。その理由として、一般的にアモルファス構造を持つ炭素系被膜はDLC(Diamond-like Carbon)と呼ばれ、空気環境中で自己潤滑性を持ち、良好な摩擦・摩耗特性を示すことが知られている<sup>(7)-(9)</sup>。本研究でも膜内成分の炭素量を十分確保しDLC構造を取り入れることで、乾燥環境での良好な摩擦・摩耗特性を得ることを目指した。

### 3. 機能性Si膜の成膜処理

成膜方式は先述のPACVDで、膜厚は約1μm(中間層を含めて約3μm)とした。成膜する基材は量産時を考慮して軸受(ボトムガイド)と同じSUS304を使用した。図3に成膜した機能性Si膜の断面図、図4に表面図のSEM(Scanning Electron Microscope:走査型電子顕微鏡)写真を示す。

一般的にDLC構造を含む被膜は非常に高硬度で、基材のSUS304とは大きな硬度差があり密着性が懸念されるため、下地金属層と金属含有炭素層の中間層を形成することで傾斜的に硬度差をもたせ、密着性を向上させた。なお、下地層と中間層の成膜は、同じドライコーティングであるPVD(Physical Vapor Deposition:物理蒸着法)で行い、機能性Si膜のPACVD工程と連続工程で成膜している。

また、膜の表面は非常に滑らかであり、ドライコーティングで問題視されるドロップレット(表層に付着する微粒子)もほとんど確認されなかった。

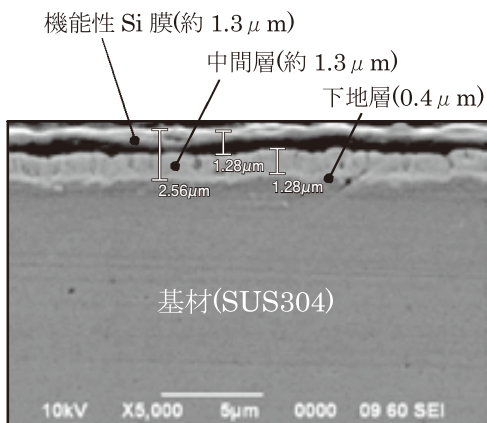


図3 断面SEM像(走査型電子顕微鏡写真)

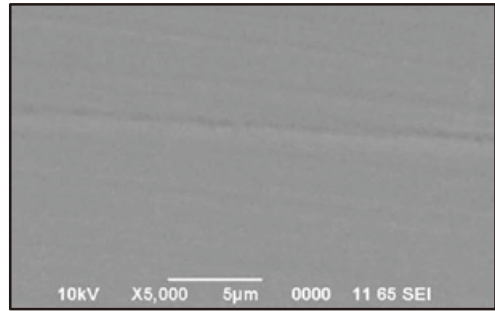


図4 表面SEM像(走査型電子顕微鏡写真)  
 (注:左右に走る筋は基材加工時の切削痕)

### 4. 機能性Si膜の基本性質

表1に機能性Si膜の諸特性を示す。Si含有量は10at%に抑え、乾燥環境(空气中)での特性を考慮しC-C結合の確保を狙った。比較のためSiを含有していないDLCの特性も併記する。

密着性を確認するために、ナノインデンテーション法<sup>(10)</sup>による微小押し込み硬さ試験(試験荷重:1000[mgf])を実施した(図5)。負荷時にはDLCと比較して押し込み深さが深く、除荷時にはほぼ同じ深さに戻っており、比較的大きな弾性回復を示している。このことから、機能性Si膜の方が膜硬度は低く、ヤング率が小さいことがわかる。ヤング率が小さければ摩擦時に与えられる変形エネルギーを弾性変位として蓄積できるため<sup>(11)</sup>、DLCと比べ異物の噛み込みによる局所的な面圧の上昇にも破壊や剥離を起こさずに密着性を確保できる可能性がある。

	機能性Si膜	DLC
Si含有率[at%]	10	0
膜厚(Si膜)[μm]	1.3	-
膜厚(全体)[μm]	3	3
押し込み硬さ(図5)[mgf/μm <sup>2</sup> ]	3200	4600

表1 機能性Si膜の諸特性

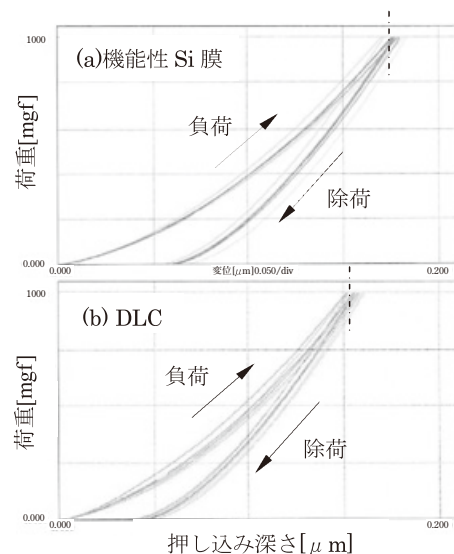


図5 微小押し込み硬さ試験結果(荷重-変位曲線)



## 5. 摩擦特性評価

### 5.1 摩擦係数測定方法

摩擦特性(摩擦係数)を把握するために、摺動部を水中(水道水を使用)に浸漬したボールオンディスク型往復動摩擦摩耗試験(関連規格:ASTM G99-05)を実施した。試験装置の概要を図6に示す。実験条件は表2のように設定した。回転速度を実際のパルプ摺動速度に設定し、水温25℃条件に加え、実使用環境も考慮して55℃の温水環境での試験も実施した。摺動回数に関しては摩擦係数が安定した時点での終了とした。

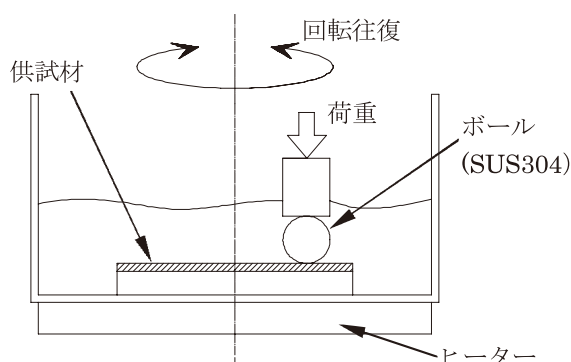


図6 ボールオンディスク型往復動摩擦摩耗試験機

摺動形態	回転往復(90°)
荷重	10N
回転速度	0.26mm/s (0.25rpm)
摺動回数	3000回
周囲環境	空气中, 水道水中
流体温度	25℃±1℃, 55℃±2℃
供試材(ディスク)	SUS304(表面粗さRa0.2μm) + 機能性Si膜
相手材(ボール)	SUS304 (φ6mm)

表2 試験条件

### 5.2 摩擦係数測定結果

摺動回数と摩擦係数との関係を図7に示す。比較のため、供試材(ディスク)に、セラミックスSiC(バルク材)、DLC、及び現行製品で使用しているPTFEを用いた評価結果も合わせて示す。

水中環境であるため、開始直後に境界潤滑(固体潤滑と流体潤滑の混合状態)となり、どの材料でも摩擦係数は一旦下がる傾向にある。機能性Si膜の摩擦係数は非常に低くPTFEと同程度を示しており、さらに、ある程度の摺動回数を経た後に摩擦係数の下降が見られる。一方、セラミックスSiCの摩擦係数は上昇傾向にあり、この条件下ではトライボケミカル反応が起こっていない可能性が高い。

確認試験として空气中環境での結果を図8に示す。機能性Si膜の摩擦係数は、空气中で低摩擦係数を示すDLCと同程度であり、炭素量を十分確保した効果であると判断で

きる。DLCは空气中と水中の摩擦係数はほぼ同じであるが、機能性Si膜は空气中に比べ、水中での摩擦係数が非常に低く1/2程度であり、含有したSiの効果により水中での低摩擦係数を実現していると考えられる。

また、水温55℃の結果を図9に示すが、25℃環境に比べ55℃の高温水環境の方がより低い摩擦係数を示した。一般的には周囲温度の上昇に伴い、表層の原子の振動が激しくなり活性化の影響で摩擦係数は上昇する傾向にあるが、逆に機能性Si膜においては高温水環境の方が若干ではあるが、摩擦係数の低下を見ることができ。表層原子の活性化により化学反応が促進された結果であると考えられる。

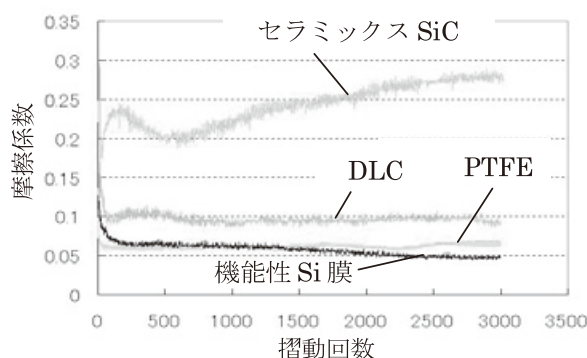


図7 摩擦係数推移(25℃水中)

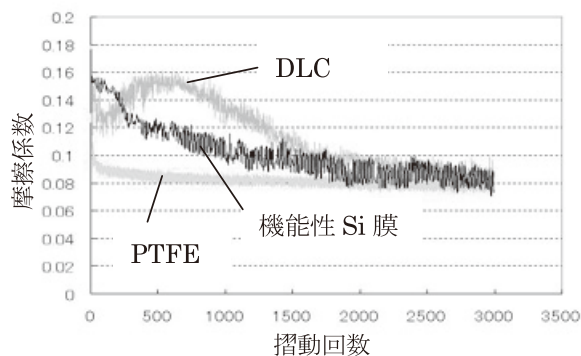


図8 摩擦係数推移(空气中)

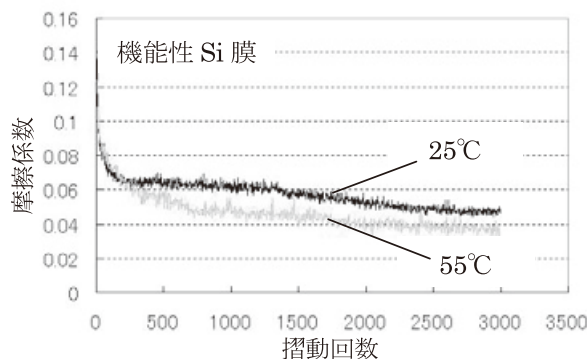


図9 摩擦係数推移(55℃水中)

## 6. 耐久性評価

### 6.1 耐久性評価方法

バルブに適用する上で必要となる膜の耐久性を評価するため、シリンダーオンディスク型摩擦摩耗試験機を用いて長距離の摩擦・摩耗特性の評価を行った(図10)。この試験方法ではサンプル形状が円筒になるため、摺動材同士が常に継続して擦れあうような状況となり、短時間で耐久性を評価することが可能になる。試験条件は基本的にJIS K 7218に準拠するが、摺動距離はバルブ口径150Aの摺動相当距離1.5kmに対して約2倍の距離をとった。

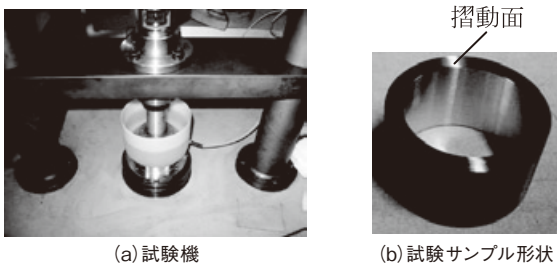


図10 シリンダーオンディスク型摩擦摩耗試験機と試験サンプル(シリンダー側に被膜)

摺動形態	回転(1方向)
荷重	50N
回転速度	0.5m/s (500rpm)
摺動距離	3km
周囲環境	水道水中
流体温度	25°C ±1°C
供試材 (シリンダー)	SUS304円筒 (外径φ26mm, 内径φ20mm) + 機能性Si膜
相手材(ディスク)	SUS304(表面粗さRa0.2μm)

表3 試験条件(耐久性)

### 6.2 耐久性評価結果

長距離での摩擦・摩耗特性の評価結果を図11, 12に示す。摩擦係数は3kmの摺動距離まで安定して0.1以下を維持し、さらに膜自身の摩耗量及び相手材の摩耗量も0.1mm<sup>3</sup>程度と少量であり、セラミックスSiCよりも少なく、DLCと同レベルである。興味深いのが、DLCに比べ摩擦係数が低いにも関わらず、機能性Si膜自身の摩耗量が多いことである。これは、想定した化学反応により表層のSiが消費された結果であると推定される。

さらに、試験後のサンプル写真を図13, 図14に示すが、機能性Si膜(a)の摺動表面は、剥離していないだけでなく、表面が円滑になっていることが確認できる。摺動時の化学反応により相手材との接触箇所(マイクロレベルの凸部)が積極的に削れることで、最終的に円滑な表面が形成されたものと考えられる。また、相手材(b)の摺動部には、摺動跡に沿って付着物が観察された。

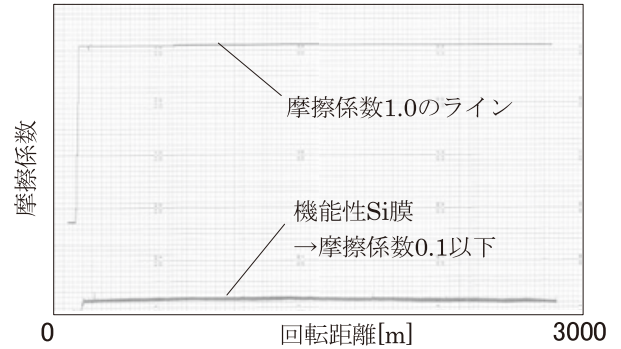


図11 摩擦係数推移(3km 水中)

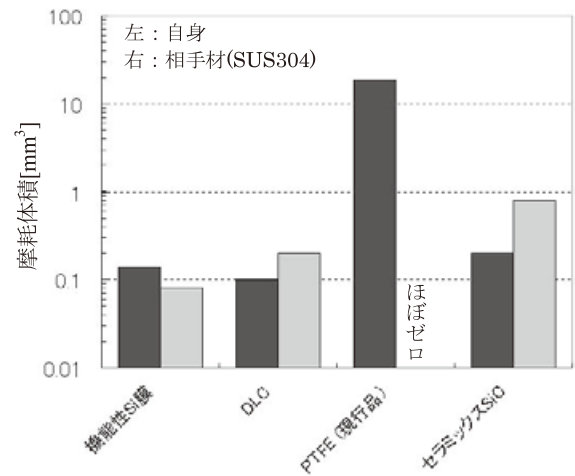


図12 摩耗量(水中3km摺動後)

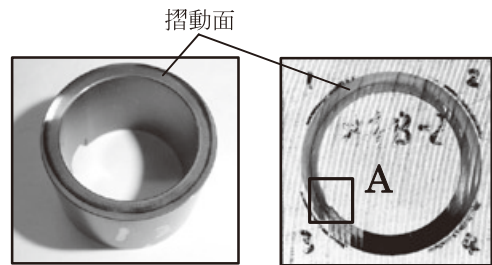


図13 水中摩擦摩耗試験後のサンプル

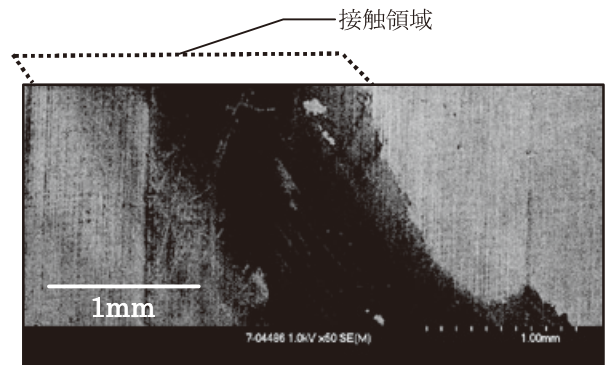


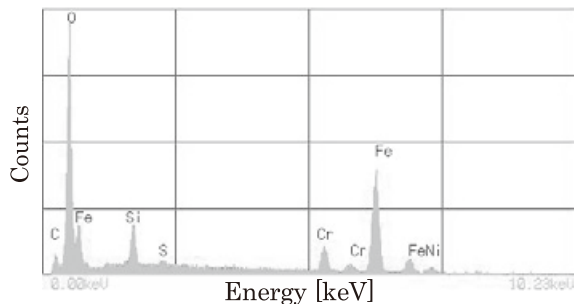
図14 相手材摺動面上の付着物のSEM像(図13(b) A部)

## 7. 反応生成物の解析

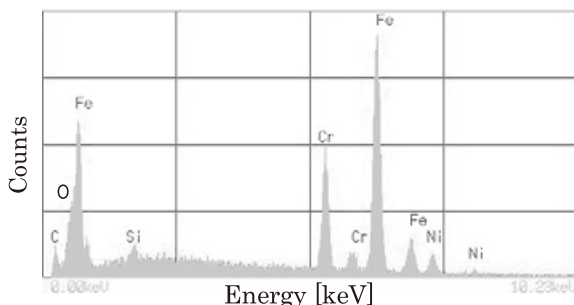
水中摩擦摩耗試験後(シリンダーオンディスク型摩擦摩耗試験)に相手材摺動面に付着した物質を特定するために、まずSEM-EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:エネルギー分散型X線分光法)により、付着物の元素分析(定性分析)を行った。その結果を図15に示す。SEM-EDXは検出深さが数 $\mu\text{m}$ であるため、付着物質だけでなく基材の元素も検出する可能性がある。そのため、比較として基材(SUS304)のみの分析結果も記載する。付着物質(箇所)の元素ピークからは、基材に対してSiとO(酸素)が多く検出されていることがわかる。このことから付着物質は、機能性Si膜から移着した物質であると推定される。

さらに、この移着物質の組成を特定するために、XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy:X線光電子分光分析)を使用し、SiとO(酸素)の結合状態を解析した。図16にSi (2p)の光電子スペクトルを示す。比較のため、機能性Si膜自体の解析結果も合わせて示す。結合エネルギーの値から、物質内のSiは、 $\text{SiO}_2$ と $\text{SiO}_x$ の両方が混在している状態である( $\text{SiO}_2$ :約103eV,  $\text{SiO}_x$ :約102eV)。 $\text{SiO}_x$ は、結合元素がO(酸素)のみではなく、一部が他の元素に置き換わっている状態であり、もとの元素構成から、置き換わっている元素はC(炭素)であると推測できる。文献値<sup>(12)</sup>からは $X=1.5$ に近い組成であると推測される。

以上から、移着物質は $\text{SiO}_2$ (または $\text{SiO}_x$ )であると考えられ、機能性Si膜内で存在していたSiCが、水中のトライボケミカル反応により $\text{SiO}_2$ (または $\text{SiO}_x$ )へと変化し、相手摺動材に移着するなどして摺動界面に存在していたと考える。



(a) 生成物質の元素ピーク



(b) 基材(SUS304)の元素ピーク

図15 生成物質の元素分析

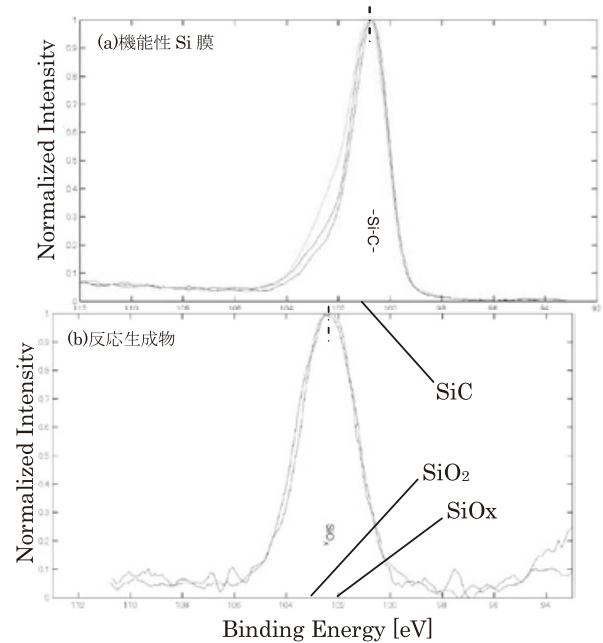


図16 XPSによるSi (2p)の光電子スペクトル

## 8. 考察

本研究では、トライボケミカル反応による潤滑物質生成という仮説を立案し、その検証実験と解析を行なったわけであるが、その結果から機能性Si膜の水中摺動時に起こる低摩擦・低摩耗性は以下の要因によって実現したと考察する。

- ①潤滑物質生成による摺動時の接触応力の分散
- ②反応生成した $\text{SiO}_2$ の剥離による自己潤滑性
- ③ $\text{SiO}_2$ の生成に伴う摩擦面の円滑化

詳細を以下に述べる。

### ①潤滑物質生成による接触応力の分散

水中摩擦摩耗試験後に生成付着した物質の元素分析(図16)により、 $\text{SiO}_2$ または $\text{SiO}_x$ の生成が確認された。従って、立案した仮説の通り、水中摺動時に式(1)のトライボケミカル反応が生じたかと推定される。表層に生成した $\text{SiO}_2$ (または $\text{SiO}_x$ )が軟質な層(潤滑物質)として存在し、接触応力を分散させることで低摩擦性に貢献していたと考える。さらに、シリンダーオンディスク試験においては、連続して水和シリカゲル $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ となりゲル状の潤滑物質として低摩擦・低摩耗性に寄与していたことは十分考えられるものの、一方で、ボールオンディスク試験のような摺動材同士が擦れあった直後に離れ、摩擦面が周囲の水にさらされるような状況では、水和シリカゲル $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ として溶液状に変化した直後に周囲の水に溶けてしまう可能性が高い。このような状況にも関わらず低摩擦を実現していたことを考慮すると、ゲル化せずに表層に生成されたままの $\text{SiO}_2$ (または $\text{SiO}_x$ )としての接触応力分散効果が十分大きいものであったと考える。

## ②反応生成したSiO<sub>2</sub>(またはSiO<sub>x</sub>)の剥離による自己潤滑性

機能性Si膜内の原子同士の結合はC-C、Si-Cが主であり、どちらも共有結合性の結合である。一方、反応生成したと推定されるSiO<sub>2</sub>(またはSiO<sub>x</sub>)はイオン結合性の高い物質であり、共有結合性の高い機能性Si膜との結合力は比較的弱く、繰り返し摩擦を受けることで反応場に留まらずに表層から剥離してしまう可能性がある。つまり、表層にSiO<sub>2</sub>(またはSiO<sub>x</sub>)の化合物として生成した後に潤滑層として存在するだけでなく、摩擦時に積極的に表層から剥離することで、自己潤滑物質としても摩擦力低減に寄与していたと考える。

## ③SiO<sub>2</sub>(またはSiO<sub>x</sub>)の生成に伴う摩擦面の円滑化

6.2項でも述べたが、水中での摩擦摩耗試験後の機能性Si膜の摺動表面が円滑になっていることから、摺動時のSiO<sub>2</sub>(またはSiO<sub>x</sub>)の生成に伴い、相手材との接触箇所(マイクロレベルの凸部)が積極的に削れていくことで、最終的に円滑な表面が形成されたものと考ええる。この円滑な表面が低摩擦係数の要因の1つであると考ええる。

- (6) 熊谷泰:機械設計, Vol.48, No.8, pp.17-22(2004)
- (7) 中東孝浩:表面技術, Vol.53, No.11, pp.715-720(2002)
- (8) A.C.Ferrari, J.Robertson:Interpretation of Raman Spectra of Desordered and Amorphous Carbon, Phys. Rev., B, Vol.61, pp.14095-14107(2000)
- (9) 加納眞:トライボロジスト, Vol.52, No.3, pp.186-191(2007)
- (10) 大村孝仁:表面技術, Vol.51, No.3 pp.255-261(2000)
- (11) E. Rabinowicz:Friction and Wear of Materials. Wiley, New York, (1996) 2<sup>nd</sup> printing
- (12) Fundamental Aspects of Silicon Oxidation (Springer Series in Materials Science Vol.46), Yves J. Chabal, Springer (2001)

### 著者所属

大橋 智文      ビルシステムカンパニー  
開発本部開発2部

## 9. おわりに

本研究では、トライボケミカル反応を利用した水中環境における低摩擦・低摩耗技術の確立を行った。今後は、流量実験設備にて実際の冷温水を流した条件下で、バルブ摺動部に適用して機械部品としての強度や、空気中・水中混合環境での摩擦・摩耗特性、さびなどの異物が混在する環境下での特性を検証していく予定である。

また、低摩擦・低摩耗性の要因に関しても、①～③のどの要因が支配的であるのかは未解明であり、さらなる検証が必要であると考ええる。反応生成後のSiO<sub>2</sub>(またはSiO<sub>x</sub>)の挙動の解明が今後の課題の1つと考える。

### 参考文献

- (1) T.Sugita, K.Ueda, Y.Kanemura:Material removal mechanism of silicon nitride during rubbing in water, Wear, No.97, pp.1-8 (1984)
- (2) 日比裕子:水及びアルコール中のケイ素系セラミックスのトライボケミカル反応と潤滑及び加工への応用に関する研究, 機械技術研究所報告, No.177(1998)
- (3) H.Tomizawa, T.E.Fisher:Friction and wear of silicon nitride and silicon carbide in water, ASLE Trans., No.30, pp.41-46 (1986)
- (4) 社団法人日本トライボロジー学会, セラミックスのトライボロジー研究会:セラミックスのトライボロジー, 養賢堂(2003)
- (5) Z. Xingzhong, L. Jiajun, Z. Baoliang, M. Hezhou, L. Zhenbi:Wear behaviour of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tool material against stainless steel in dry and water-lubricated conditions., Ceram. Int., No.25, pp.309-315 (1999)



# 流量計測・制御機能付きバルブの開発

## Development of Control Valve with Flow Measurement and Flow Control

株式会社 山武 古谷 元洋  
ビルシステムカンパニー Motohiro Furuya

株式会社 山武 大谷 秀雄  
ビルシステムカンパニー Hideo Otani

### キーワード

流量計測, 流量制御, コントロールバルブ, エネルギー管理, 省エネ

主にビル空調において使用される冷温水制御弁に流量計測の機能を追加した製品を開発したので報告する。本製品により各空調機のエネルギーの使用効率をきめ細かく把握できるようになる。また、流量制御動作(従来は開度制御動作)が可能になり、過流量の抑制が図られ省エネルギーに貢献できる。さらに他の空調機の流量変化に影響を受けずに必要流量が維持されるため、居室空間の快適性向上が期待できるようになった。

This paper reports on the development of a product that incorporates flow measurement functions in the heating and cooling water control valves used mainly in building air-conditioning systems. This product can be used to obtain the energy usage efficiency in detail for each air-conditioning unit. It also allows flow rate control operations (previously, opening control operations) to reduce excessive flow rates for contributing to energy savings. In addition, the required flow rate is maintained without being affected by flow rate changes in other air-conditioning units for allowing improved comfort in living spaces.

## 1. はじめに

近年、低炭素社会の実現が急務とされる中、ビル・工場などの建物においても省エネ法の改正などエネルギー管理や省エネに対する要求が急速に高まっている。省エネ法ではエネルギーの管理基準を設定し、その状況を定期的に報告すること、エネルギーの使用に関する合理化の目標に関し、その達成のための中長期(3~5年)の計画を作成し提出することなどが義務付けられている<sup>(1)</sup>。

空調エネルギーの省エネの施策を検討し、施策の実施効果の検証をするには各空調機の熱処理量を計測することが重要となる。また、空調機を流れる冷温水の流れすぎによる搬送エネルギーの無駄や、熱源設備の運転効率の低下を防止することが省エネの観点で重要となる。

このような状況において、冷温水制御弁に流量、温度計測の機能を追加することにより、新たに流量計、熱量計を追加することなく、上記の課題を解決することが可能となった。

本報告で紹介するインテリジェントコンポ アクティブ電動二方弁 流量計測制御機能付 形FVY51(以下FVY51)は従来製品(インテリジェントコンポ アクティブ電動二方弁 形VY51:以下VY51)をベースに流量計測/制御機能等を追加した構成となっている。

図1に製品の外観、図2に製品の構成を示す。



図1 FVY51製品外観

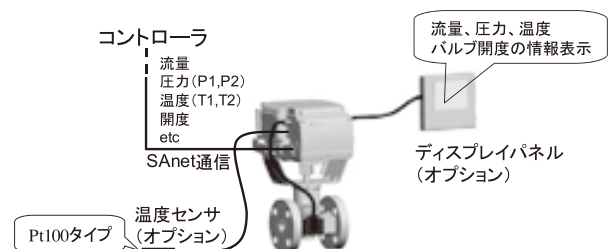


図2 製品の構成

バルブで計測される流量、圧力及び温度情報はSAnet通信<sup>(2)</sup>によりコントローラに送られる。その他オプションとして流量、圧力などの情報を表示するディスプレイパネルや、バルブの温度計測機能と合わせて空調機の出入り口温度を計測するための温度センサが用意されている。

## 2. 製品ラインナップと主な仕様

FVY51の製品ラインナップと主な仕様は以下の通りである。

### 2.1 製品ラインナップ

バルブサイズは口径15A～80Aの6サイズ、Cv値は1.0～125の10種類となっている。

### 2.2 主な仕様

#### 2.2.1 VY51との共通仕様

- ・バルブ本体材質:FC200(ねずみ鉄)
- ・圧力定格:JIS 10K
- ・面間寸法:JIS B 2002 系列6
- ・電源電圧:AC24V
- ・開閉動作時間:63秒(50Hz)
- ・通信:SAnet (電圧伝送)

#### 2.2.2 追加仕様

- ・流量計測  
(精度±5%RD 最大設定流量の10～100%, 差圧範囲30kPa～300kPa)
- ・流体温度計測(精度±1℃ 0～80℃)
- ・流体圧力計測(基準精度±0.5%FS 0～1MPa)
- ・流量制御動作
- ・積算流量演算

VY51とバルブの基本仕様を共通にしたことで、これまでと同じようにバルブを選定できる。既設の設備に対しても配管工事なしに従来製品と本製品の置換えができるなど採用時の費用負担の低減に配慮している。

## 3. 流量計測の技術要素

バルブでの流量計測では一般の流量計と異なり、バルブ開度によってバルブ内の流速や圧力分布が大きく変化する。またバルブの直前にエルボ(曲がり配管)やレデューサ、手動弁などが置かれ十分な直管長がとれない場合も多い。このような使用条件において幅広いバルブ開度、差圧、及び流量範囲で±5%RDの流量計測精度を実現しなければならない。以下に上記の要求仕様を実現するために開発した技術要素を述べる。

### 3.1 流量計測方式

流量を計測するには電磁式、超音波式、渦式、差圧式など様々な方式がある。バルブのように内部流れが非対称かつ開度によって流れの様子が大きく変化する機器では、バルブ内部の絞り機構部(バルブプラグ)で発生する差圧を利

用した差圧式流量計測方式が最適である。図3にバルブを通過する流れの圧力分布を示す。

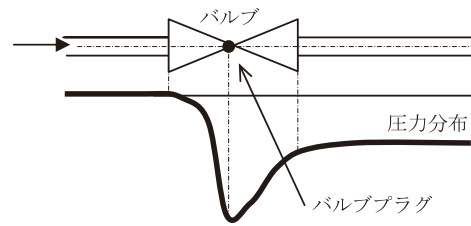


図3 バルブを通過する流れの圧力分布

一般に配管内に置かれたバルブの前後差圧と、そこを流れる流量との間には式(1)の関係が成り立つ。<sup>(3)</sup>

$$Cv=11.57 \times Q \times \sqrt{\frac{\rho}{\rho_w} \frac{1}{\Delta P}} \quad \text{式(1)}$$

Q:流体の体積流量(m<sup>3</sup>/h)

Cv:容量係数

ΔP:バルブ前後の差圧(kPa)

ρ:流体の密度(kg/m<sup>3</sup>)

ρ<sub>w</sub>:水の密度(kg/m<sup>3</sup>)

一般的にCv値はバルブの開度によって異なった値をとる。図4にバルブ開度と相対容量係数の関係の一例を示す。このCv値の特性はバルブによって異なる固有特性である。ここで相対容量係数はバルブ開度100%の容量係数Cv<sub>100%</sub>に対する割合である。

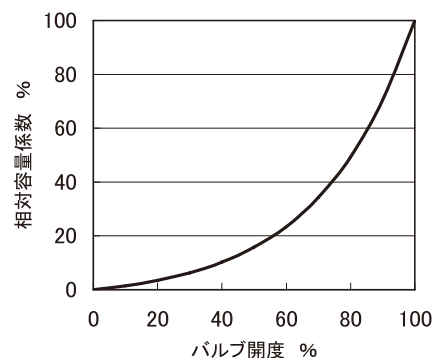


図4 Cv値の特性

また、式(1)における差圧ΔPはバルブの1次側2D、2次側6D離れた位置の圧力差と定義されている(図5)<sup>(4)</sup>。

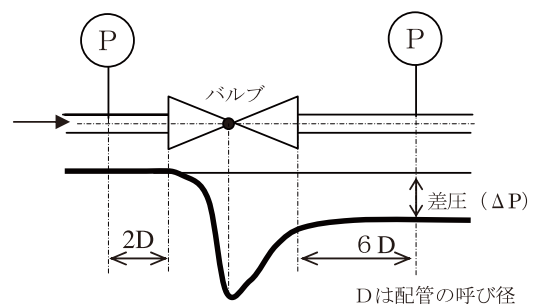


図5 容量係数計測試験条件

本開発でFVY51に採用した流量計測のアルゴリズムを図6に示す。

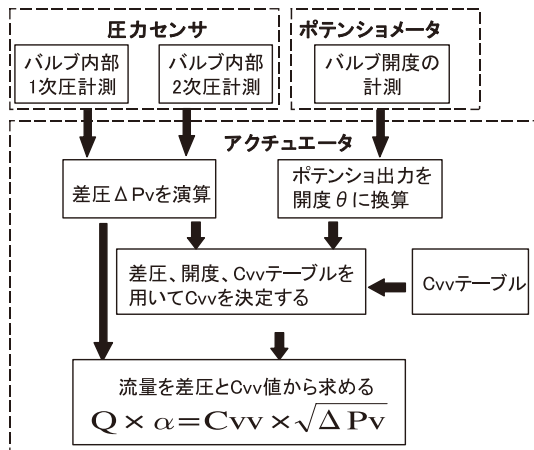


図6 流量計測アルゴリズム

上記アルゴリズムを元に流量計測は以下の手順で行われる。

- 1) バルブ内で圧力を計測し、差圧を求める。
- 2) バルブ開度を計測する。
- 3) バルブ開度と差圧からCv値を決定する。
- 4) 決定したCv値と差圧を(1)式に代入して流量を演算から求める。

### 3.2 圧力の計測

バルブ面間寸法を変えずに限られたスペースで安定した差圧を計測すること、差圧を高い状態で計測することが流量精度を高くする点で重要となる。

#### 3.2.1 1次側圧力の計測

1次側圧力の計測に求められる条件は以下の通りとなる。

- 1) バルブのすぐ手前にエルボ配管(曲がり配管)や手動弁などが置かれた場合など、流れの圧力分布が非対称な状態でも安定した圧力を計測する。
- 2) 高い差圧を得るため、バルブ入口側で流量が絞られていない状態の圧力を計測する。

エルボがバルブの手前に置かれた場合のバルブ入口付近断面の圧力分布を、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を使って計算した。その結果、断面上に非対称な圧力分布(最大で4kPa程度の圧力差)を生じることが確認できた(図7)。圧力差4kPaを流量精度に換算すると約6.5%と非常に大きな影響を及ぼす。

図7の(a)は計算の領域、(b)は等圧線図、(c)はバルブ入口断面の等圧線図である。入口断面の左右で圧力分布が非対称になっていることが分かる。

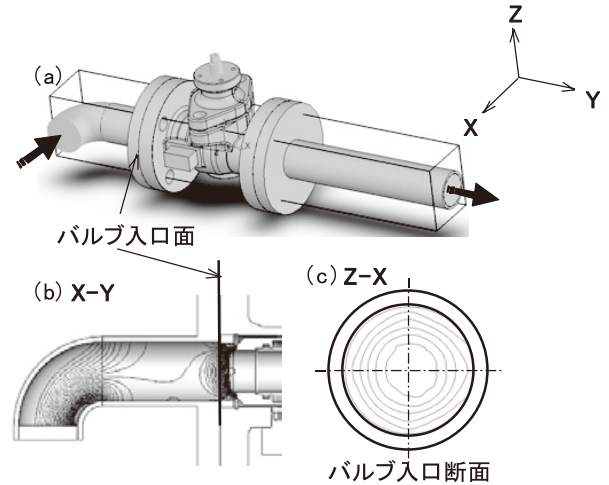


図7 バルブ入口付近のCFD解析結果

このような状態でも安定した1次圧を計測する方法を検討した結果、バルブ入口部の周囲4箇所圧力ポートを設け内部で圧力を平均化する構造を考案した(図8)(特許出願済み)。合わせて圧力ポートをバルブ入口側フランジ部に設けたことで1次圧を高い状態で計測することができた(図9)。

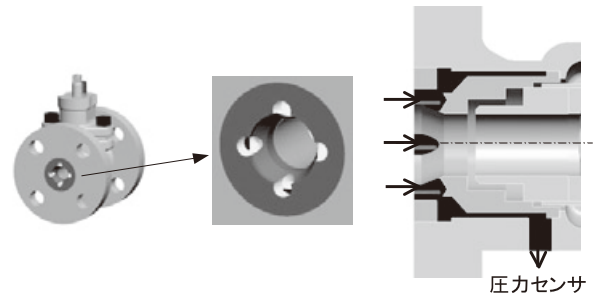


図8 1次側圧力計測部の構造

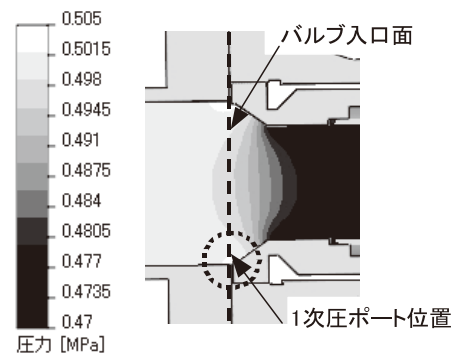


図9 バルブ入口付近の圧力分布



本構造の効果をバルブの手前側がストレート配管の場合とエルボ配管の場合について、実流量試験で確認した。その結果、バルブ手前にエルボがあってもその影響を本構造にて十分低減していることが確認できた(図10)。

開度 %	バルブ 上流配管	差圧 kPa	精度差異
54	ストレート	33	-0.1%
	エルボ	32	
79	ストレート	30	-0.3%
	エルボ	33	
37	ストレート	100	-0.1%
	エルボ	104	
54	ストレート	107	0.7%
	エルボ	106	
79	ストレート	105	-0.6%
	エルボ	101	

図10 バルブ上流配管の流量精度への影響

### 3.2.2 2次側圧力の計測

バルブ内部の流れの様子はバルブ開度によって大きく変化する。図11(a)は速度コンター図、図11(b)は圧力コンター図を示す。図3に示したようにバルブ内部の圧力はバルブプラグを通過した直後に急激に圧力低下し、その直後緩やかに圧力回復する。このような状況で2次側圧力の計測に求められる条件は、以下の通りとなる。

- 1) 動圧の影響を受けない位置で計測する。
  - 2) 圧力分布の差がない位置で計測する。
- 上記1), 2)を全てのバルブ開度で実現する。

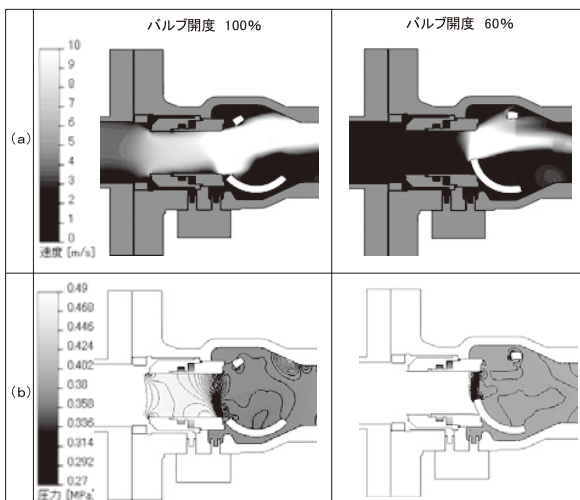


図11 バルブ内の流速分布, 圧力分布

前記条件を満たすため、CFD解析を用いてバルブボディの内側形状の設計を行った。その結果、全てのバルブ開度において安定して2次圧を計測することができる、バルブプラグとバルブボディに挟まれた空間を形成することができた。この位置に2次側圧力ポートを設けることで前記課題を解決した(特許出願済み)。図12(a)は2次圧計測部付近の流速のコンター図及びベクトル図、(b)は等圧線図を示す。

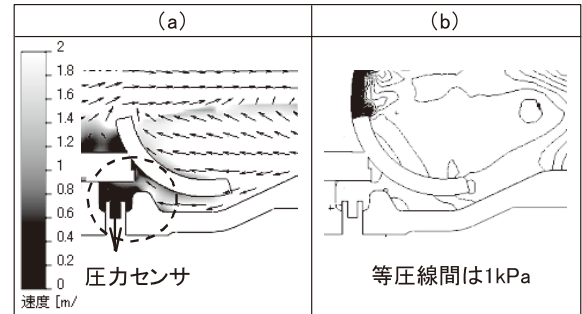


図12 2次側圧力計測部の構造

### 3.3 圧力センサ

FVY51用のセンサに要求される機能は圧力、温度、及び差圧を限られたスペース内で計測することである。

市販のセンサで上記要求を満足させることは困難なため、新たに圧力センサの開発を行った。概要は圧力センサ2個と温度センサ1個を、エンジニアリングプラスチックのケース内にパッケージしたハイブリットセンサである(特許出願済み)。差圧は1次側、2次側の圧力値から演算で求める方式とした。特徴としては小形化のため圧力センサエレメントはオイル封止を必要としない、ステンレス製ダイヤフラム構造のセンサエレメントを採用している(図13)。

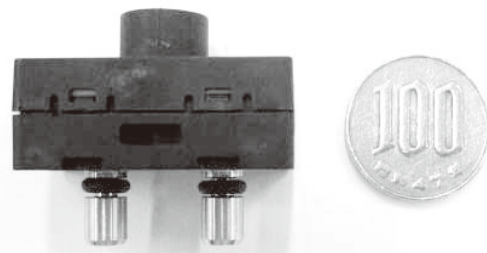


図13 圧力センサ外観

### 3.4 バルブ開度計測

バルブ開度はアクチュエータ出力軸の開度計測用ポテンシオメータで計測する。図14に構造を示す。バルブ開度を高い精度で計測するために、直線性の高いポテンシオメータを用い、組立て方法の工夫によりポテンシオメータのギヤとアクチュエータ出力軸のギヤ部に発生するバックラッシを低減させた。またバルブボディとアクチュエータを組立てる際に発生するバルブ回転方向の位置ずれの影響をなくすために、バルブアクチュエータ組付後に調整を行いポテンシオメータ出力の補正を行っている(特許出願済み)。

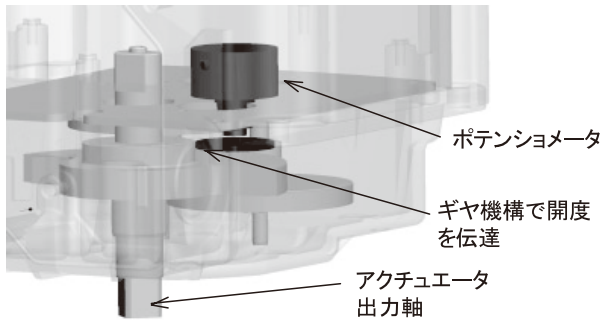


図14 バルブ開度計測部の構造

### 3.5 容量係数C<sub>v</sub>v

一般に図5の試験条件から求められるC<sub>v</sub>値は差圧の影響を受けない。したがってバルブ開度によって一義的に決まる。しかし、本製品のようにバルブ内部の差圧と容量係数の関係を確認すると、2次側圧力を圧力回復の途上で計測しているため差圧によって一定の傾向で変化することが分かった(図15)。図5の試験条件と区別するため、バルブ内の差圧から求める容量係数をC<sub>v</sub>v、バルブ内の差圧を $\Delta P_v$ と定義する。この図における相対容量係数は、差圧 $\Delta P_v=100\text{kPa}$ における値を基準とした。特に差圧100kPa以下の範囲で容量係数C<sub>v</sub>v値の落ち込みが大きい。したがって広い差圧範囲で流量計測を行うためには、容量係数C<sub>v</sub>vをバルブ開度とバルブ内の差圧の関数として取り扱う必要がある。

FVY51においては予め実験から求めたC<sub>v</sub>v値テーブル(図16)を用いて、任意のバルブ開度と差圧におけるC<sub>v</sub>v値を決定している(特許出願済み)。

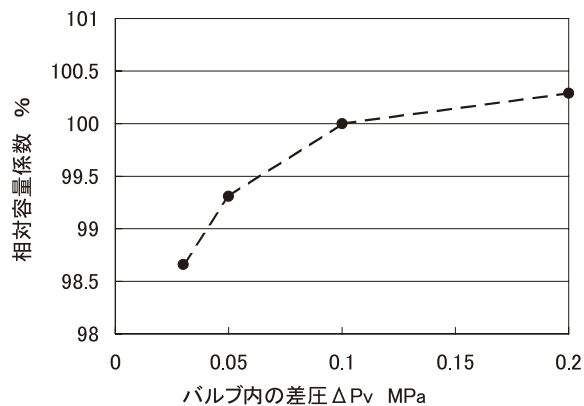


図15 バルブ内差圧と容量係数C<sub>v</sub>vの関係

開度 %	列番	30kPa	100kPa	200kPa
15.26	1	0.000	0.000	0.000
19.47	2	0.121	0.121	0.121
32.63	3	0.944	0.978	1.000
34.74	4	1.081	1.117	1.138
36.84	5	1.249	1.283	1.300
38.95	6	1.439	1.480	1.498
41.05	7	1.629	1.668	1.688
43.16	8	1.819	1.858	1.878
45.27	9	2.009	2.058	2.078
47.38	10	2.199	2.258	2.278
49.49	11	2.389	2.458	2.478
51.60	12	2.579	2.658	2.678
53.71	13	2.769	2.858	2.878
55.82	14	2.959	3.058	3.078
57.93	15	3.149	3.258	3.278
60.04	16	3.339	3.458	3.478
62.15	17	3.529	3.658	3.678
64.26	18	3.719	3.858	3.878
66.37	19	3.909	4.058	4.078
68.48	20	4.099	4.258	4.278
70.59	21	4.289	4.458	4.478
72.70	22	4.479	4.658	4.678
74.81		4.669	4.858	4.878
76.92		4.859	5.058	5.078
79.03		5.049	5.258	5.278
81.14		5.239	5.458	5.478
83.25		5.429	5.658	5.678
85.36		5.619	5.858	5.878
87.47		5.809	6.058	6.078
89.58		5.999	6.258	6.278
91.69		6.189	6.458	6.478
93.80		6.379	6.658	6.678
95.91		6.569	6.858	6.878
98.02		6.759	7.058	7.078
100.13		6.949	7.258	7.278
101.01		7.012	7.261	7.216

図16 C<sub>v</sub>v値テーブル

### 3.6 流量計測精度の向上施策

バルブ内で流量計測するための技術要素について述べてきた。実際の流量計測精度については各部品の個体差、組合せ、及び製品組立て作業などのバラツキが流量計測精度に影響をする。その中でもC<sub>v</sub>v値の特性を決めるバルブプラグ(図17)の個体差とバルブ開度のバラツキが流量精度に大きな影響を与える。

C<sub>v</sub>v値の特性を決定するバルブプラグのポート部は、必要な流量特性を得るために複雑な3次元形状となる。FVY51では寸法精度を考慮してロストワックス鋳造で製作されているが、機械加工に比べ寸法のバラツキが大きくなる。また、バルブ開度は関連する部品点数が多いため開度のずれを0にすることは困難である。

FVY51では安定した高い流量計測精度を確保するため、実流量試験により流量に対するバルブ開度の補正を行っている。

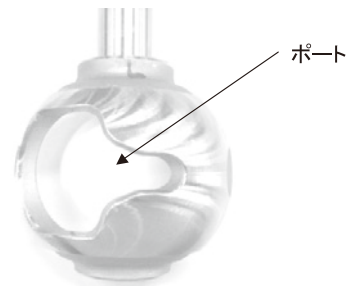


図17 バルブプラグ

### 3.6.1 流量演算の補正方法

具体的な補正方法は以下の手順で行われている。

- 1) 複数のバルブ開度で実際に流れている流量を基準流量計で計測し  $C_{vv}$  値を求める。
- 2) 製品の容量係数テーブルから各バルブ開度における  $C_{vv}$  値を求める。
- 3) 各バルブ開度での  $C_{vv}$  値と  $C_{vv}'$  値の誤差を求め、その誤差の分布幅が最小になるよう容量係数テーブルの開度に一定のオフセット量を加える。図18に概念図を示す。

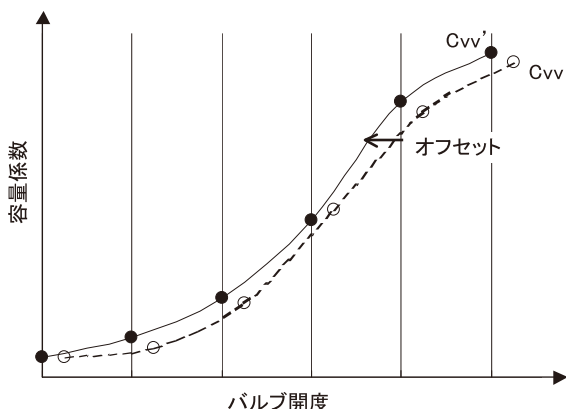


図18 テーブル補正

### 3.6.2 流量計測精度の検査方法

FVY51では出荷検査工程にてバルブ開度10ポイントで流量計測を行い、 $C_{vv}$ 値テーブルのオフセット値を決定し、製品のマイコンに記憶させる。その後、バルブ開度と差圧の組合せ5ポイントで製品の流量精度を確認し合否判定を行う。上記検査行程により製品の流量精度を保証している。図19に製品組立てラインの隣に併設された検査設備の概要を示す。

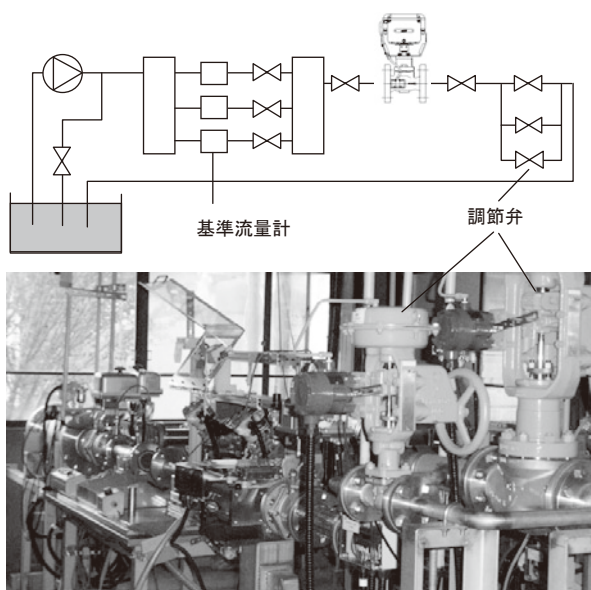


図19 検査設備 概要

### 3.7 流量精度

これまでに述べてきた技術要素により、本製品の流量精度仕様は最大設定流の10~100%、バルブプラグの前後差圧30~300kPaの範囲に於いて $\pm 5\%RD$ を達成した(図20)。(低流量範囲では $\pm 1\%FS$ )

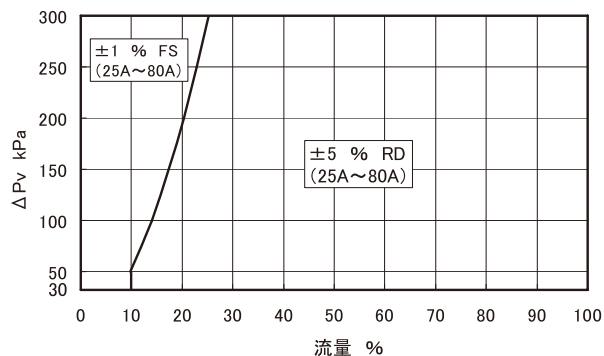


図20 流量計測精度仕様

## 4. 省エネルギーへの貢献

これまでは主にエネルギー管理で重要な情報となる流量計測機能について述べてきたが、ここで本製品のもう1つの大きな特徴となる流量制御動作の省エネルギーへの貢献について述べる。

### 4.1 流量制御動作

FVY51は従来のバルブ開度制御動作ではなく流量制御動作を行う。従来の冷温水制御弁ではコントローラからの出力値に対応したバルブ開度になるまで開閉動作する(開度制御動作)。たとえば、コントローラから100%の設定値が出力されると、バルブは100%開度まで動作する。このときの流量は、一般に空調機的设计流量よりもかなり多くなる。これはバルブも冷温水を搬送するポンプも流量不足による空調能力の不足を避けるために、設計値と同等以上のものを選定する傾向があるためである。一方で空調機の熱交換量は設計流量以上の流量が流れてもあまり増加しない。従ってバルブ開度が100%の場合、空調機的设计流量よりも多くの冷温水が流れるが、設定温度への到達時間は設計流量が流れた場合とあまり変わらない。ここで冷温水の流しすぎによる搬送エネルギーの無駄が発生している。

FVY51では流量を計測しているので、コントローラからの出力値に対応した流量になるように開閉動作する流量制御動作が可能となった。これによりバルブの最大設定流量を空調機的设计流量に合わせることで、流量が最大設定流量に一致するように開閉動作を行う(設定値100%の場合)ので流れすぎが発生しない。

### 4.2 流量制御動作による省エネルギー効果

当社藤沢テクノセンターの7F建てオフィスビルの空調用冷温水系統に約100台のFVY51を設置し、流量制御動作と開度制御動作での空調に関わるエネルギーの差異を評価

するためのデータを収集している。

流量制御動作で運用した日と開度制御動作で運用した日の中から、天気や気温など熱負荷がほぼ同じ日の冷温水の搬送エネルギーを比較した結果、約7%の省エネルギー効果が確認された。

図21に評価した日の空調のデータを示す。開度制御動作の場合、朝の空調立ち上がり時に空調機的设计流量以上の流量が流れている。これに対し、流量制御動作の場合は空調機的设计流量におさえられており、これが省エネルギー大きく寄与している事が分かる。

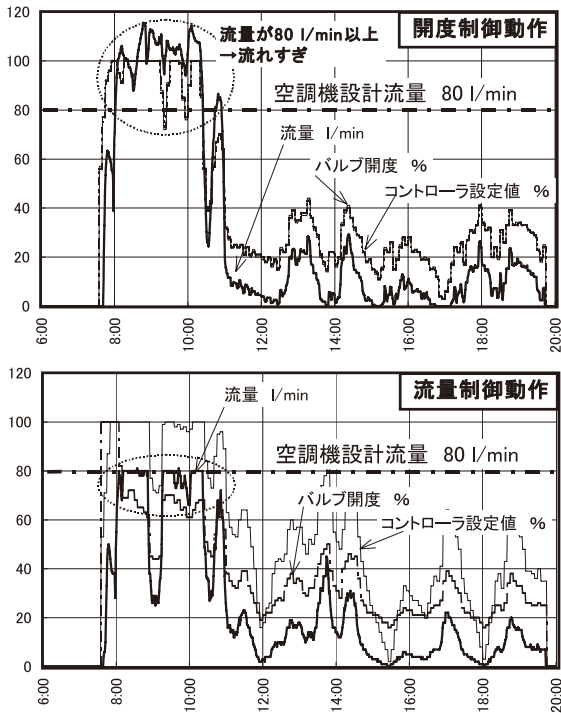


図21 1日の空調データ

## 5. おわりに

FVY51は本稿で紹介した流量計測の技術、またその流量情報を利用した流量制御動作により今後、低炭素社会に向けてさらに重要となるエネルギー管理、省エネに貢献する製品である。

今回、流量計測機能を追加した機種はアクティブシリーズ全体の一部である。順次流量計測機能を追加した機種を充実させ、建物空調のあらゆる場面に対応することで低炭素社会の実現に貢献していきたい。

## 参考文献

- (1) エネルギーの使用の合理化に関する法律、「法第14条」及び「法第15条」
- (2) 沖田、久保田、関根:現場保全作業を効率化するセンサ/アクチュエータの開発, azbil Technical Review (2008)
- (3) 「工業用プロセス弁-第1部:調節弁用語及び一般的必要条件」, JIS B 2005-1:2004
- (4) 「工業用プロセス弁-第2部:流れの容量-第3節:試験手順」, JIS B 2005-2-3:2004

## 商標

インテリジェントコンポ™は、株式会社 山武の登録商標です。

## 著者所属

古谷 元洋	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
大谷 秀雄	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部



# フィールド機器診断の技術動向と 差圧・圧力発信器導圧管詰まり診断技術の開発

## Technological Trends in Field Device Diagnosis and the Development of Blockage Diagnosis for Impulse Lines Connected to Differential Pressure Transmitters / Pressure Transmitters

株式会社 山武

田原 鉄也  
Tetsuya Tabaru

株式会社 山武

青田 直之  
Naoyuki Aota

### キーワード

差圧・圧力発信器, フィールド機器診断, 導圧管詰まり, AT9000

近年、フィールド機器に対し、機器や対象プロセスをオンラインで監視、診断したいというニーズが高まっている。本稿ではフィールド機器のオンライン診断の概要と背景技術を紹介する。また、新たな診断項目として差圧・圧力発信器の導圧管詰まり診断の開発を進めているので、その原理と診断アルゴリズム、及び実流による実験結果を説明する。

Recently, there has been a growing need for online monitoring and diagnosis of devices and target processes for field devices. This paper presents an overview of online diagnosis for field devices and their component technology. Development is proceeding on blockage diagnosis for impulse lines connected to differential pressure transmitters / pressure transmitters as a new diagnosis item, and so this paper describes these basic ideas, diagnosis algorithms, and experimental results using actual flows.

## 1. はじめに

プロセス産業においては、プラントを安全かつ安定に操業するための様々な取り組みが行われている。そこには生産性を高く保つという要求もさることながら、企業の社会的責任という現代社会における要請も大きく背景としてある。しかし現実問題としては、運転員・保全員の減少や高齢化とあいまって、プラントにおける災害件数は年々増加傾向にある。例えば、高圧ガス保安協会の調査では、製造事業所における事故件数が2000年以降、一貫して増加していることが報告されている<sup>(1)</sup>。

一方、FOUNDATIONフィールドバス（以下FF）やHARTをはじめとしたフィールドへのデジタル通信の導入が国内でも始まり、フィールド機器のインテリジェント化による、保全業務の効率化、プラント全体の情報化など多くのメリットがもたらされている。中でも、予知診断による状態基準保全(CBM: Condition Based Maintenance)への期待は高まりを見せている。本稿では、状態基準保全への貢献を可能とする調節弁の診断技術とあわせ、新たに開発した差圧・圧力発信器(以下、発信器)の導圧管詰まり診断技術の紹介を行う。

## 2. フィールド機器診断とデジタルネットワーク化

本章ではフィールド機器診断の基盤となるフィールドネットワーク技術、及びそれを利用した診断に対する当社の取り組みについて簡単に述べる。

### 2.1 ネットワーク技術、規格

従来のアナログ4-20mA伝送を利用したフィールド機器では、単一の値を単方向に通信するのみであったが、HARTやFFを中心とした各種フィールドバス規格の出現により、複数データを双方向にデジタル通信することが可能となった。これにより、インテリジェント化した機器が診断情報に基づいてアラーム発報したり、遠隔のホストシステムから機器状態の収集・監視が可能となり、保全業務の効率化に効果があらわれてきている(図1)。

また、ホストシステムからフィールド機器へのアクセスに関しては、専用のソフトウェアの使用から、EDDL (Electronic Device Description Language)やFDT/DTM (Field Device Tool / Device Type Manager)<sup>(2)</sup>の利用が増加してきた。FDT/DTMはホストシステムや利用するネットワークプロトコルに依存しないインタフェースを規定した国際規格である。DTMを採用することで、ハンディターミナ

ルによる表現を超えた複雑な画面構築が可能であり、グラフなどの機器診断に特化した機能を提供できる。フィールド機器の診断・管理において、重要な技術であると考えている。

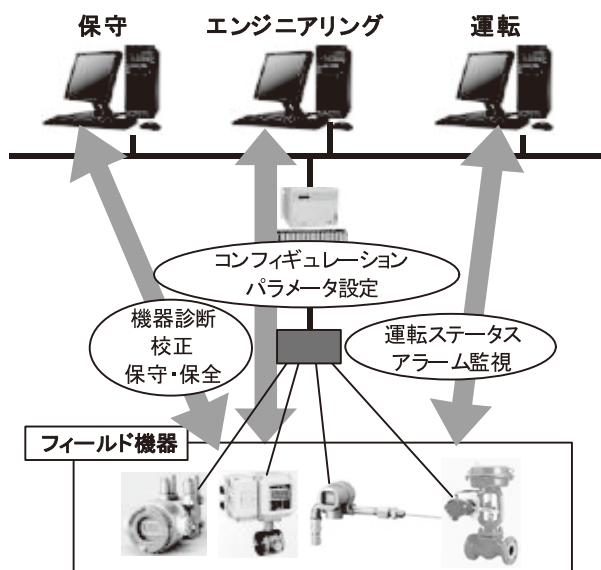


図1 フィールドのデジタルネットワーク化

## 2.2 山武における取り組み

当社においても、HARTやFFに対応したフィールド機器、コントローラなどの製品を展開している。ここでは診断の観点から、調節弁メンテナンスサポートシステム「Valstaff」について簡単に紹介する(図2)。

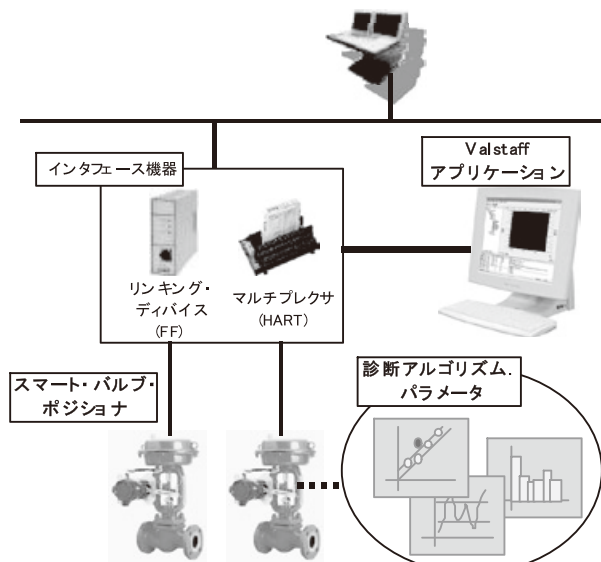


図2 調節弁メンテナンスサポートシステムValstaff

Valstaffは、HARTまたはFF接続により、当社製スマートバルブポジショナAVP3000 Alphaplusと組み合わせて使用される。ポジショナ内では調節弁の稼働状況にかかわる情報、例えば摺動距離積算値、全閉回数、スティックスリップ指標値などを逐次更新している。Valstaffは定期的に上記情報を収集・蓄積すると共に、保全員に対してビジュアル

に表現することで、調節弁に対するメンテナンスの意思決定支援を行うシステムである。

デジタルネットワーク化、及びその上での機器診断という観点から、お客様のValstaff活用事例が報告されつつあるが<sup>(3)(4)</sup>、このようなお客様との協働に研究開発のメンバも参加することで、既存の診断手法の高度化や新たな診断技術の開発に取り組んでいる。

## 3. フィールド機器の診断コンテンツ

前章で述べたようにフィールド機器診断の基盤は整備されつつあり、機器からデータや情報を収集、蓄積したり、それを元にアラームを出したりすることが容易になった。しかし、ユーザにとって重要なのは基盤そのものではなく、基盤の上で実行される診断コンテンツ、すなわち中味である。例えば前章で取り上げたValstaffの場合でも、提供する情報が調節弁の状態や稼働状況と関連の深いものであるからユーザのメリットになるのであって、そうでなければメリットはずっと小さいものになる。よって、診断コンテンツはインテリジェントなフィールド機器の差別化要素として、今後重要性がさらに増すものと考えられる。実際、各社とも様々な診断機能を開発してユーザに提供しており、その種類は近年ますます増加している。

当社においてもフィールド機器の診断コンテンツの充実を図るべく、開発を進めている。図3に診断コンテンツの例を示す。フィールド機器の電子回路や通信インターフェースの自己診断から、センサやアクチュエータの異常検知、測定・操作対象と機器間の接続部分、さらには装置が設置されているプロセスのように、診断の対象は機器の内部から外側へと広がりつつある。また、調節弁のようなアクチュエータに比べ、差圧・圧力発信器のようなセンサ機器では、フィールド機器そのものの故障だけでなく、その周辺の故障や異常もあるため、それらの検知や診断は非常に重要である。

	差圧・圧力発信器	バルブポジショナ	電磁流量計	内部の自己診断
機器内部の回路部分	セルフチェック CPU異常、ROM異常			↓
	A/D変換部診断			
機器自身の動作	センサ異常			↓
	ゼロ点校正履歴 過大圧	スティックスリップ 摺動距離積算 全閉回数 ゼロ点、偏差 内部温度異常		
機器とプロセスの接続部分	導圧管詰まり		空検知	↓
対象プロセス	配管の漏洩、腐食、閉塞 異常振動			
				機器の外側へ

図3 診断コンテンツの一例とその分類

次章ではその一例として、当社で新たに開発している導圧管詰まり診断について紹介する。導圧管は差圧・圧力発信器とプロセスを接続する部分であるが、この部分は発信器まわりのトラブルの多くに関係している<sup>(5)</sup>。導圧管に関する

るトラブルに対して当社ではリモートシールによる導圧管レス計装を提案しているが、様々な事情によりリプレースできず、導圧管を使い続けている箇所は未だに多い。そのため、リモートシール形発信器の開発だけでなく、導圧管の異常診断にも取り組む必要があると考えた。なかでも導圧管の詰まりは発生件数、発生した時の影響の大きさから検知することが強く望まれており、重要な診断コンテンツになると考えられている。

#### 4. 導圧管詰まり診断

本章では導圧管詰まり診断の原理、診断アルゴリズムについて述べ、社内実験設備での実験結果を報告する。また、診断用DTMプロトタイプの開発についても触れる。

##### 4.1 詰まり診断の原理

提案する手法は、発信器で測定される流体圧力の微小な上下動の速さが、導圧管の詰まりにより低下することを利用している(図4)。この原理を採用するメリットとして、圧力や流量などの条件によって診断のしきい値を変える必要性が小さいことがある。これは圧力等が変化しても、上下動の速さが大きく変化しないことによる。

以下、原理をより詳しく説明する。プロセス流体の圧力は通常、不規則に上下動している。流体が乱流状態にある場合は流体内の圧力分布が不規則に変化するので、流れのあるプロセスの多くではこのような振舞いがあると言ってよい。この上下動の振幅は圧力値に比べれば微小といえる程度だが、発信器の圧力センサであればその動きを十分捉えることができる。また、乱流に起因する圧力の上下動は不規則な現象である。そのため周波数解析をしても、特定の周波数だけを含むのではなく、低周波から高周波まで様々な周波数の上下動を含んでいる。

正常時、すなわち導圧管に詰まりがない場合は、プロセス配管の流体圧力がそのまま発信器に伝わる。そのため、圧力の頻繁な上下動が発信器で観測できる。しかし、導圧管が詰まると挙動が変化する。詰まった導圧管のように管路中に細い閉塞区間がある場合、この区間は圧力に対する一種のローパスフィルタとして作用する。そのため、周波数の高い上下動は閉塞区間を通過する際に振幅が減少する。一方で、比較的周波数の低い上下動は閉塞区間を通過しても振幅の減衰幅が小さい。その結果、周波数の高い上下動の割合が相対的に低下するため、検出される上下動は滑らかでゆっくりしたものになる。

この手法の長所は最初にも述べたように、圧力の変化に対する依存性が低いことである。圧力上下動の振幅はその時の圧力値に依存し、圧力が高ければ振幅も大きく、低ければ小さくなる。そのため、導圧管の詰まり診断に用いるためには、圧力値に応じてしきい値を変えたり、正規化するといったことが必要になる。一方、上下動の速さはその振幅とは独立した特性である。圧力の変化に対する上下動の速さの変化量は、振幅の変化量に比べ小さい。そういう点では導圧管詰まり診断に有効な特徴量の1つと考えられる。

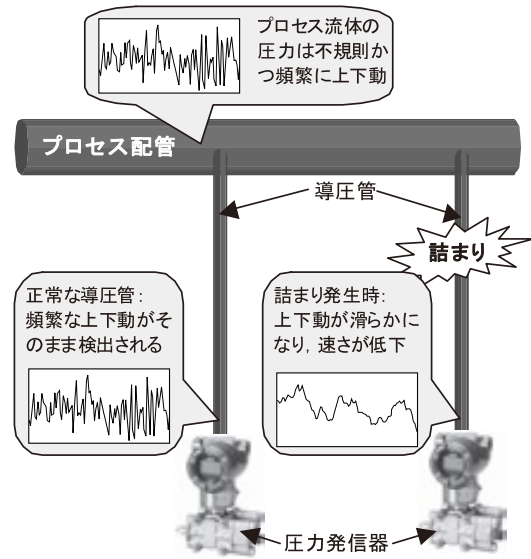


図4 導圧管詰まりによる圧力上下動の変化

##### 4.2 診断アルゴリズムの開発

4.1で述べた原理に基づき、診断アルゴリズムを開発した。アルゴリズムの開発にあたっては、オンラインで実行できるように、できるだけシンプルで処理が軽くなるようにした。例えば、FFT(高速フーリエ変換)による周波数解析は圧力値の精密な分析を可能にするが、比較的長時間かつ大量のデータを必要とし、どちらかといえばオフラインでの解析に向けた手法である。これに対し、開発したアルゴリズムは圧力センサ値の上下動回数をカウントするものであり、比較的単純な演算だけで構成されているため、オンライン診断に向けた手法となっている。以下、アルゴリズムについて順を追って説明する。

まず、圧力センサ値をサンプリングする。次に、サンプリングして得られた圧力値の時系列を一定点数の区間に区切り、区間毎に上下動検出の基準値を決定する。基準値としては圧力センサ値の平均値や中央値などが利用可能である。基準値が決定したら、各区間で圧力センサ値が基準値を横切った回数をカウントする(図5)。

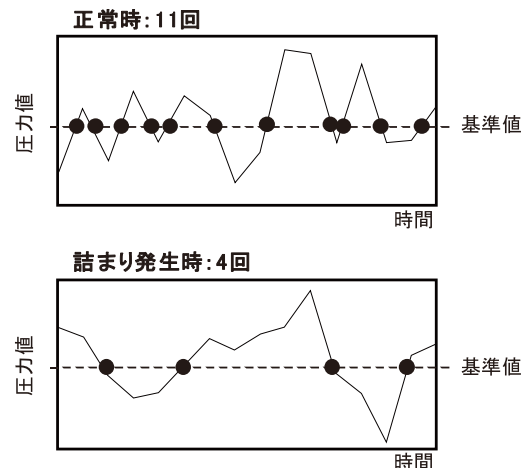


図5 圧力上下動の計数



ここまでで各区間の上下動回数が得られるが、流体の圧力は不規則な挙動をするので、この回数は区間毎にバラツキがある。これは正常時、詰まり時、いずれの場合にもあてはまる。そのため、一区間の上下動回数だけでは詰まりの判定は難しい。そこで、ある程度の数の区間を集め、上下動回数の集合平均を取る。こうすることでバラツキが小さくなり、詰まりの診断が可能になる。

実際には次式のような指標を算出することで、上下動回数のバラツキの影響を抑えている。

$$\frac{\sum(\text{各区間の上下動回数})}{(\text{区間数}) \times ((\text{区間サンプル点数}) - 1)} \quad \text{式(1)}$$

なお、この指標は0から1の範囲の値をとるようになっており、正規化された指標となっている。こうすることで、一区間あたりのサンプル点数が異なる場合についても比較が可能となる。

### 4.3 実流実験の結果

診断アルゴリズムの妥当性を検証するため、水を流体として実流実験を社内で行なった。実験設備の概略図を図6に示す。オフィスから発信器までは導圧管代用の樹脂チューブにより接続した。詰まりの模擬は内径を絞った試験流路(ステンレス製)を作成し、これをチューブの途中にはさみ込むことで行なった。この試験流路を用いることで、様々な程度の閉塞を再現性良く実現できる。また、試験流路を挿入する位置を変えることで、詰まりの位置を変えた場合の実験も比較的容易に実施可能である。本実験ではこの試験流路を高圧側(上流側)、低圧側(下流側)双方の導圧管に挿入した。よって、両側詰まりの模擬となる。また、差圧の違いによる影響を調べるため、差圧が16kPaの場合(流速は1.00 m/s)と6kPa(同0.63 m/s)の場合の2通りで実験を行なった。

図7は4.2で説明した詰まり指標<式(1)>の値を、正常時と模擬詰まり挿入時とで比較したグラフである。模擬詰まりによって指標値が低下したことを確認した。また、指標値は差圧によって多少差異はあるものの、その違いは比較的小さく、実験した2通りの差圧において、同じしきい値で判定できることを確認した。例えば図7の場合、しきい値を0.30~0.35に設定すれば、いずれの差圧でも詰まりの判定が可能である。

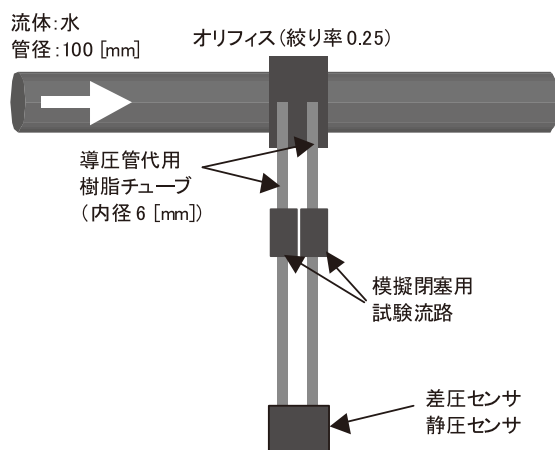


図6 実流実験設備 概略図

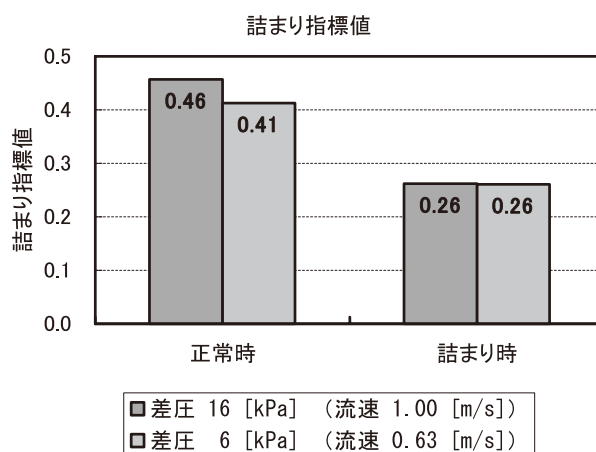


図7 詰まり指標値の比較

なお、この結果は差圧発信器によるものであるが、圧力発信器による実験でも同様の結果を得ている。以上のように、社内での実流実験を通じ、開発した診断アルゴリズムの妥当性を確認した。また、異なる差圧やライン圧でも同じしきい値で詰まりを判定できることを確認した。広い範囲の差圧やライン圧を単一のしきい値でカバーすることができれば、本手法の大きな特長になりうると考えられる。

一方、実験の結果、上下動を検出するためのサンプリング周期が手法の性能に影響することも明らかになった。長すぎるサンプリング周期では上下動が検出できないのは当然だが、短いほど性能が向上するわけではない。対象となる圧力の上下動間隔に比べて過度に短いサンプリング周期では、上下動が適切に検知できず、正常な状態と詰まり状態の区別が困難になるケースがあった。また、流体条件や適用するプロセスによっても適切なサンプリング周期が異なる可能性がある。圧力センサ値のサンプリング周期・方法については今後も研究を進めていく予定である。

### 4.4 導圧管詰まり診断用DTM

アルゴリズムの開発と合わせ、導圧管詰まり診断用DTMのプロトタイプを開発した(図8)。本DTMでは、複雑なGUI構築が可能というDTMの利点を活用し、発信器から収集した診断データを様々な観点から分析するためのプロット機能などを実装した。各診断コンテンツに特化した可視化機能や分析機能をユーザに提供できる点は、DTMのメリットの中でも特に重要なものと考えられる。

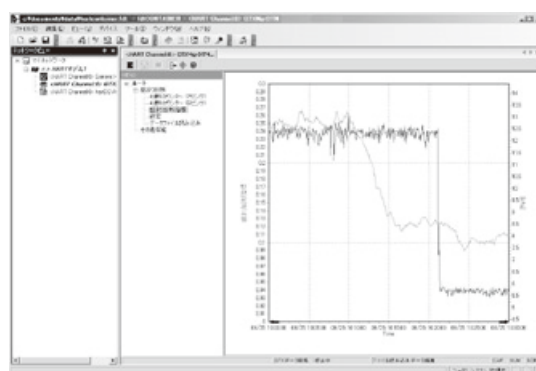


図8 診断用DTMプロトタイプ 画面例

## 5. おわりに

本稿では、フィールド機器診断に関連するデジタルネットワーク技術の概要と当社のこれまでの取り組み、及び新たに開発した差圧・圧力発信器の発信器の導圧管詰まり診断技術について説明した。開発した導圧管詰まり診断手法は、発信器で検出される圧力の微小な上下動の回数に着目したもので、その回数が詰まり発生時に減少することを利用している。この現象を利用した診断アルゴリズムと診断指標を開発し、複数の社内設備で実験による検証を行った。その結果、圧力や流量の条件が変わっても、提案した指標値の変化が比較



図9 AT9000 Advanced Transmitter Model GTX

的小さいことを確認した。今後、さらなる検証が必要ではあるが、運転条件によってしきい値を切り替えなくとも導圧管の詰まりを診断できるような、扱いやすい手法になると考えている。なお、この詰まり診断機能の一部は2010年春に発売予定のFF版AT9000 Advanced Transmitter Model GTX (図9)に搭載される予定である。

今後はお客様の実プラントにおける検証を実施し、導圧管詰まり診断手法の検証や改良を進めていく予定である。また、他の診断コンテンツに関しても、対象フィールド機器の拡大や診断項目の拡充を進め、お客様のプラントにおける保全業務の効率化、及び安全と安心に貢献していきたいと考えている。

## 参考文献

- (1) 高圧ガス保全協会編:高圧ガス事故統計資料・最新の高圧ガス事故集計グラフ(平成10年又は平成17年～平成20年12月), [http://www.khk.or.jp/activities/incident\\_investigation/hpg\\_incident/pdf/jiko2012graph.pdf](http://www.khk.or.jp/activities/incident_investigation/hpg_incident/pdf/jiko2012graph.pdf)
- (2) <http://www.fdtgroup.org/>
- (3) 西村泰治:FOUNDATIONフィールドバスの有効活用に向けて, 計装, Vol. 52, No. 5, pp. 17-20(2009)
- (4) 喜多井剛志:デジタルフィールドソリューションへの取り組み, 計装, Vol. 52, No. 5, pp. 51-55(2009)
- (5) 泉頭太郎:リモートシール形差圧発信機による導圧管レス

計装 vs ダイレクトマウントによる導圧管レス計装, 計装, Vol. 42, No. 2, pp. 32-36 (1999)

## 商標

Valstaffは株式会社 山武の登録商標です。  
HARTはHART Communication Foundationの登録商標です。  
Foundation<sup>TM</sup>はFieldbus Foundationの登録商標です。

## 著者所属

田原 鉄也	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
青田 直之	研究開発本部 コアテクノロジーセンター



# 高安定温度調節モジュールの開発

## Development of a High-stability Digital Temperature Controller

株式会社 山武

岩切 研

アドバンスオートメーションカンパニー

Ken Iwakiri

### キーワード

温度調節計, 安定性, 温度特性, 通信, 小型化, DMC55, 半導体製造装置

半導体製造装置に用いられる温度調節計には、基本性能として指示値に対する高い安定性と再現性が求められる。新製品には従来機種と比較して、配線のしやすさや通信性能の向上等が求められた。また、近年の高性能化に伴い部品点数が増加する傾向があるため、調節計の小型化も要求に加わった。それらの要求に対応するために、ボードタイプの温度調節モジュール「DMC55CVR40」を開発したので報告する。

Temperature controllers used in semiconductor fabrication equipment require high stability and reproducibility as a part of their basic performance. The market is demanding new products with simplified wiring, enhanced communication performance, and other features. In recent years, the number of component parts has been increasing due to the higher performance controller designs, and this has resulted in a demand for more compact controller designs. This paper describes the board-type temperature controller module “DMC55CVR40” which has been developed to meet these needs.

## 1. はじめに

高安定温度調節計として、従来機種であるDMC50が市場投入されてから10年が経とうとしている。DMC50シリーズは半導体製造装置の温度調節計としても採用され、測温抵抗体(Pt100)を温度センサとし、高い安定性と再現性を顧客装置に提供してきた。また、自己発熱の少ないニッケルセンサやPt1000に対応した形番を追加することで、顧客の“より精密な温度制御をしたい”という要求に応えてきた。DMC50では、アナログ入力の指示値の安定性(Pt100: 2.7mK(ミリケルビン), Pt1000:1.7mK)や温度特性(2mK/K)について顧客の支持を得ている。しかし、顧客装置の高性能化に伴い測定点数が増加することで、アナログ入力性能以外の問題点として、サイズや通信レスポンスの悪さ、計装の煩雑さ等の問題が顕在化してきた。これらの問題点を解決すべく、著者らはDMC50の仕様を絞込み、そのリソースを流用することで、上記要求を満たす高安定温度調節計としてワンボードタイプの温度調節モジュール「DMC55CVR40」を開発したので、その概要を報告する。

DMC55は、DMC50のアナログ入力性能を維持したまま、複数のモジュールで構成されていた機能を1枚の基板にまとめ、小型化、通信レスポンスの向上、簡易計装などの顧客要求を満たした。

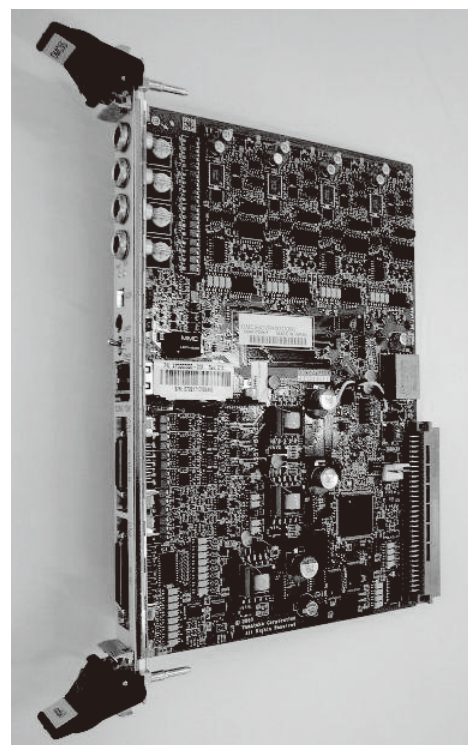


図1 DMC55の概観

## 2. DMC55の概要

DMC55の概要を説明する。半導体製造装置で必要とされる機能をDMC50で実現するには、コントロールモジュール(基板4枚)とコミュニケーションモジュール(基板3枚)

の2つのモジュールを必要としたが、DMC55ではそのほとんどの機能が基板1枚に集約されている。DMC55の回路構成を大きく区分すると以下となる。図2にブロック図を示す。

アナログ入力 (AI)	: 測温抵抗体の抵抗値等のアナログ信号を電気信号に変換する
アナログ出力 (AO)	: 制御出力を出力する
オプション入力 (AUX)	: 商用電源の電圧変動を監視するためのAC入力回路
センサROM (SENS)	: 測温抵抗体の補正情報を読み出すための回路
デジタル入力 (DI)	: DMC55の状態遷移などに使用される
デジタル出力 (DO)	: 電圧パルス出力の代替、警報出力などに使用される
通信 (COM)	: Ethernet, RS-485
ロジック (DIG)	: アナログ入力からの信号を処理し、適切な出力演算をしたり、通信などを制御する
電源 (POW)	: 絶縁型DC/DC、各回路で使用する電源を作る

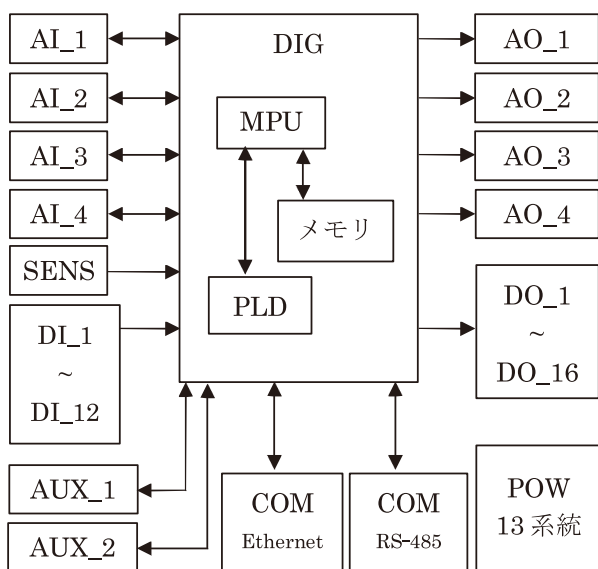


図2 DMC55のブロック図

### 3. 従来機種からの改善点

従来機種(DMC50)と比較し、その問題点及びDMC55で改善した内容について説明する。

#### 3.1 小型化

筐体のないスケルトンタイプとし、コンパクトPCIに準拠することで、小型化を実現した。DMC50のサイズ(54×148×145)と比較すると、約35%小さくなっている。また、DMC50ではEthernetやRS-485を使用して外部と通信する場合、同形状のコミュニケーションモジュールを増設する必要があった。DMC55では、同一基板内にEthernetとRS-485を実装しているため、コミュニケーションモジュールを増設する必要がない。これにより、通信機能を使用する場合、最大で約70%の小型化となる。質量も約40%軽量化した。



図3 DMC55(左)とDMC50(右)

#### 3.2 簡易計装

DMC55はコンパクトPCI対応として本体の脱着を簡易化したことに加え、電源を含むすべてのI/O線をコネクタ接続とした。DMC50はセンサ線の接続部や電源部が端子構造となっており、製品コストや汎用性という面では有利だが、装置組み立て作業やメンテナンス時には、ケーブルの取り付け、取り外しが作業負荷となり、誤配線の要因にもなっていた。全配線をコネクタ化することで誤配線防止と簡易計装を実現した。

#### 3.3 通信レスポンスの向上

半導体製造装置の高性能化に伴い、より精密な温度制御が必要になってきた。そのために制御ポイントは増加する傾向にある。客先装置では、これらの制御状態を監視するために、通信を用いて各指示値や出力値を読み出している。

制御値を読み出す場合、DMC50ではコミュニケーションモジュールを使用して接続する必要がある。コミュニケーションモジュールは各コントロールモジュールとバックプレーンコネクタにて接続され、モジュール間はRS-485にて通信している。装置側から見た場合、このモジュール間通信のRS-485やコミュニケーションモジュール内でのタイムロスがボトルネックとなり、通信レスポンスが悪くなっていた。特に、コントロールモジュールの連結台数が多くなるにつれその影響は大きくなり、通信レスポンスは悪化する。DMC55では同一基板にEthernetとRS-485を実装しているため、上位と直接通信できるようになった。

#### 3.4 低電力化

DMC50ではロジック回路の電源電圧が5Vだったが、DMC55では3.3Vに変更した。現在、ロジックICとしては3.3V駆動が主流であり、選択できる部品の種類も多い。低消費電力の部品を使用することで、Ethernetなどの機能追加分を含めても10%程度の低電力化となった。散在していたロジックICや追加した回路などをPLD(Programmable Logic Device)に集約化し、実装面積の確保と回路変更に伴うリスク低減を両立しつつ、低電力化を実施した。

### 3.5 マルチ入力化

DMC50は汎用製品として開発されたが、顧客の要望により、対応センサ種類の拡充やカスタマイズを行ってきた。その結果多数の形番が存在し、当社だけでなく顧客でも在庫管理などが煩雑になっていた。DMC55は仕様を絞り込むことで必要なセンサ種類を特定し、それらをマルチ入力とすることで1つの形番にまとめることができた。DMC55がサポートしている入力はRTD (Pt100, Pt1000)、直流電圧 (DC0-5V, 1-5V)であり、一般的な温度調節計がサポートしている熱電対や電流入力は使用できない。

### 3.6 ROM内蔵コネクタユニット対応

DMC55では、ROM内蔵コネクタユニット (QN100) に対応した。ROM内蔵コネクタユニットとは、コネクタ (D-SUB) 内部に格納したEEPROMにセンサの補正情報を記録したユニットで、センサと一対で使用され、より精度の高い計測に用いられる。

DMC50には、ROM内蔵コネクタユニットと通信する回路がないため、補正情報はローダを用いてDMC50に入力する必要があり、間違った補正値を入力してしまうリスクがあった。

DMC55では、このリスクを解消するため、ROM内蔵コネクタユニットとの通信を可能にする回路を追加し、電源投入時やコマンド発行時にセンサの補正情報を読み出すことができるように改善した。これにより、接続されたセンサの補正情報を正確に設定でき、顧客要求を満足するとともに従来機種でのリスクを解消した。

### 3.7 基板温度センサの追加

DMC50を含む従来の温度調節計では温度変化に敏感なアナログ回路は製品下部に、発熱する電源回路等は上部に配置するのが一般的で、これは自然排気が前提となっているためである。しかし、DMC55が実装されるラックは強制排気されており常にダウンフローの風が製品にあたっている。

風は風量が一定の場合、部品温度も安定するので、指示値に与える影響は少ないが、風量の変化や温度変化は誤差要因となる。このため、基板の温度を測定するセンサを実装することで、何らかの不適合が発生した際の切り分けの手段の1つとした。DMC55自身の負荷変動や電源電圧の変動なども基板温度変化の原因となりうるため、実際に問題が発生した場合はそれらを勘案しながら原因を見極めていく必要がある。

### 3.8 信頼性向上

#### 3.8.1 ECC付きSRAM

SRAMはデバイスの構造上、ソフトエラーというデータ化けが生じる可能性がある。ソフトエラーとは、宇宙線等の影響によりメモリに保持されている値が変わってしまう現象のことを言う。近年のメモリはこの問題に対応した構造を持つものが増えてきており、発生確率もだんだん小さくなってきている。DMC55では、ECC (Error Check and Correct) 機能がついたSRAMを採用することにより、ソフトエラーに対する信頼性を高めた。採用したSRAMは内部にECC回路が内蔵されているため、仮にソフトエラーが発

生しても、データ読み出し時には、補正した値を読み出すことができる。

#### 3.8.2 FeRAM

顧客が設定するパラメータ等を保存するために、温度調節計には不揮発性メモリが必要である。不揮発性メモリとは電源OFF時にも記録内容を保持できるメモリのことで、FLASHメモリやEEPROM等に代表される。DMC50ではSRAMをバッテリーバックアップすることでデータを保持していたが、DMC55ではバッテリーレス化のために、高速な読み書きが可能な不揮発性メモリとしてFeRAMを使用している。

## 4. 目標性能と評価結果

実機での評価結果を交えながらDMC55の性能を示す。

### 4.1 アナログ入力の安定性

Pt100とPt1000相当の擬似入力として高精度固定抵抗を入りに接続し、指示値を測定した結果の一例を図4と図5に示す。

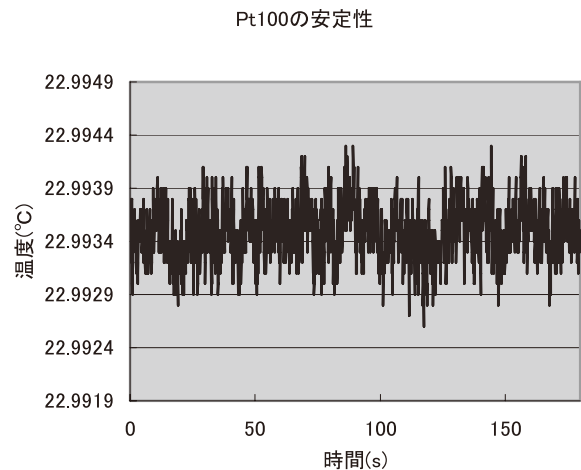


図4 Pt100の指示値の安定性の例

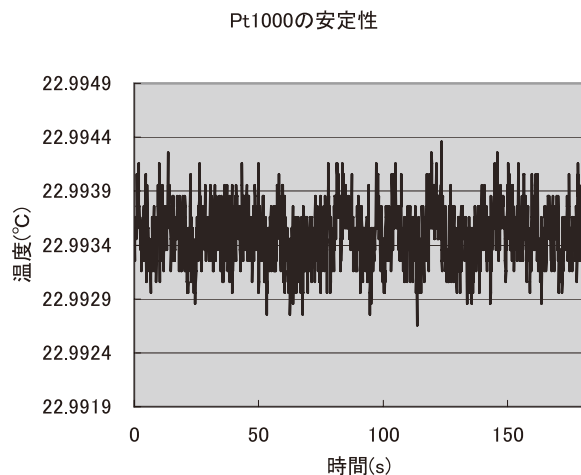


図5 Pt1000の指示値の安定性の例

DMC55では、指示値の安定性をサンプリング周期(100ms)毎に3分間測定したデータの $\pm 3\sigma$ の値で規定する。測定時の環境条件が良く、安定している場合はPt100, Pt1000ともに1.6mK程度の実力である。

#### 4.2 AIの温度特性

DMC55の入力回路は基準電圧と入力電圧を同じ回路で制御周期ごとに測定することで、OPAMPのオフセット電圧等の誤差をキャンセルしている。この機能は、温度変化により生じる誤差についてもキャンセルする事ができる。このことから、温度特性も良好で、実験室の測定レベルでは、ほぼ1mK/K程度の実力を示した。(機器仕様では2mK/Kと規定)下記は23°Cでの指示値を基準として、0°C, 10°C, 40°C, 50°Cの時の指示値との差の一例を示したものである。

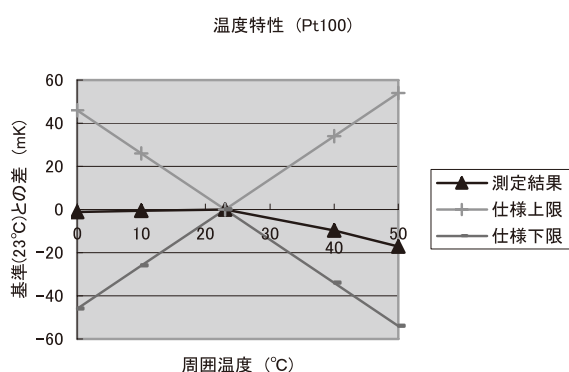


図6 Pt100の温度特性の例

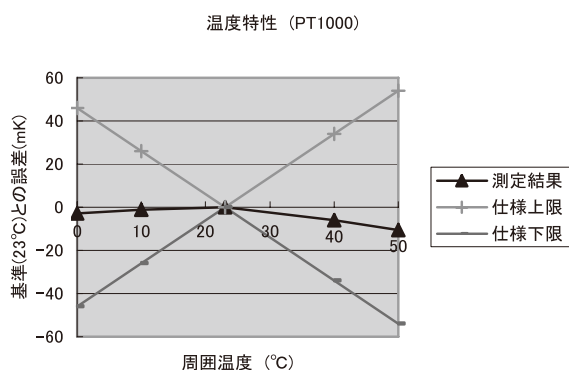


図7 Pt1000の温度特性の例

指示値は周囲温度だけでなく、ラック内の風量によっても変動する。前述したが、DMC55はダウンスローによる強制排気を前提として部品の配置設計をしているため、発熱部品を製品下部に配置している。このため、風量が少なくなると発熱部品の影響を受け、指示値が変化する。図8はダウンスロー用のFANの電源電圧を変化させることで風量を変化させ、その影響を測定した結果の一例である。FANの電源電圧を24V, 12V, 6V, 0Vと変化させ、指示値を測定した。FANの電源電圧が24Vの時の指示値を基準として、FANの電源電圧を変動させた時の指示値との差を示している。

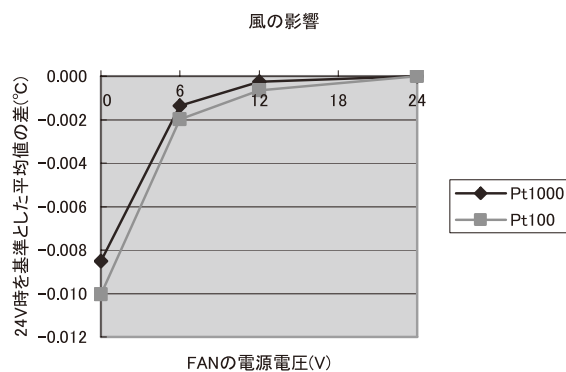


図8 風の影響を示す例

#### 4.3 通信レスポンス

3.3項でも記したが、DMC50では調節計の使用台数が多いと通信負荷が重くなり、レスポンスが悪くなっていた。この点について、顧客からは明確な目標仕様の提示はなかったが、DMC55では、レスポンスを4倍以上速くすることを目標とし、装置本体と個々に通信できるように、基板毎にEthernetのポートを持たせてレスポンス性能を改善した。

DMC50とDMC55の通信レスポンスの差を実機で確認した。この評価におけるAI指示値の更新周期の平均は、DMC50では1.02s, DMC55では0.13sだった。DMC55の方が、7倍以上高速になっていることが分かる。評価方法を下記に示す。

#### 評価方法

下記構成にて、アナログ入力の指示値をそれぞれ2個ずつ(計8個)、20秒間、PCから繰り返し読み出し、それぞれの指示値の更新周期の平均値を求める。

#### 構成

DMC50

- ・コミュニケーションモジュール (COM) 1台
- ・コントロールモジュール (CNT) 4台
- ・HUB, PC 各1台

DMC55

- ・DMC55 4台
- ・HUB, PC 各1台

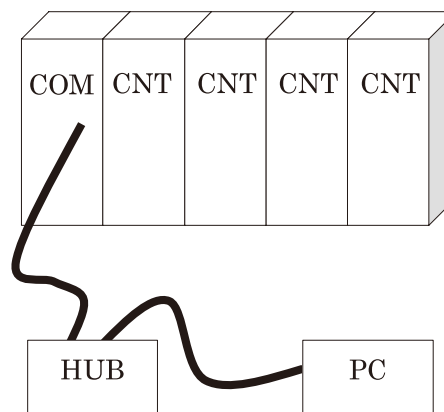


図9 DMC50の構成図

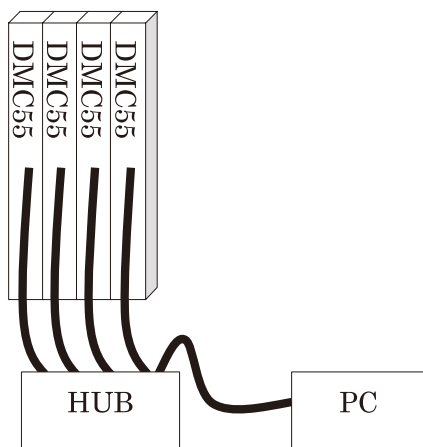


図10 DMC55の構成図

## 5. おわりに

半導体製造装置は性能向上のために測定点数が増加する傾向にある。その結果、センサの配線や出力信号等の信号線も増加し、装置の容積に対し、ケーブルが占める割合が大きくなっている。このため、今後は信号線の省配線化が重要な観点になってくると思われる。省配線化により、装置の小型化だけでなく、メンテナンス性の向上、さらなる測定点の増加やコストダウン等について寄与できると考えている。

### 商標

DMCは、株式会社 山武の登録商標です。

### 著者所属

岩切 研            アドバンスオートメーションカンパニー  
                         開発部開発2グループ





# アクティブ・コンプライアンスデバイスの開発

## Development of Active Compliance Device

株式会社 山武

川瀬 茂  
Shigeru Kawase

株式会社 山武

津村 高志  
Takashi Tsumura

株式会社 山武

小黒 直輝  
Naoki Oguro

### キーワード

ロボット, 組み立て, コンプライアンス制御, センサレス, 力検出, 外乱オブザーバ

ボイスコイルモータを用い、作業内容に応じて機械的特性を自由に変更でき、かつ、力センサなしで、対象作業とロボット間の接触力及び位置を高速、高精度に制御可能なユニットを開発しアセンブリ・セルに搭載した。

作業対象とロボットの間、力と位置の検出・制御が可能なデバイスを設置することにより、組み立て動作の高速化、作業状態の監視、多様な作業への対応が可能となる。

The authors have developed an active compliance device driven by a voice coil motor. It can adjust the mechanical characteristics according to the targeted operation and can control the operation force and position between a robot and a targeted workpiece without a force sensor. Installing the device between a robot and a targeted workpiece makes the robot faster, more intelligent, and more versatile because of its light weight, quick response, and force and position control/sensing ability.

## 1. はじめに

近年、産業用ロボットにおいても智能化の研究が進み、精密組み立てや嵌め合い作業など、従来人手に頼らざるを得なかった作業もロボットで行えるようになってきた。これらを実現する要素技術としてはビジョンやロボットの柔軟制御、力センサ（力覚）を用いた力制御技術が掲げられる。

一例として垂直多関節ロボットのアーム先端とエンドエフェクタとの間に6軸の力センサを設けて機能を実現する装置があるが、ロボットのアーム質量や減速器の摩擦が比較的大きいため、電子部品組み立てなど小さな力で細かい部品を高速にハンドリングするような用途に適しているとは言えない。

今回、高速に位置制御が可能でコンプライアンス（柔軟性）を自由に変更でき、かつ力覚機能を持つデバイス（アクティブ・コンプライアンス）(図1)を開発し、ロボットとエンドエフェクタ（もしくはワーク）の間に設置することで、組み立て作業の高速化、作業状態の監視、多様な作業への対応を可能にしたのでここに報告する。

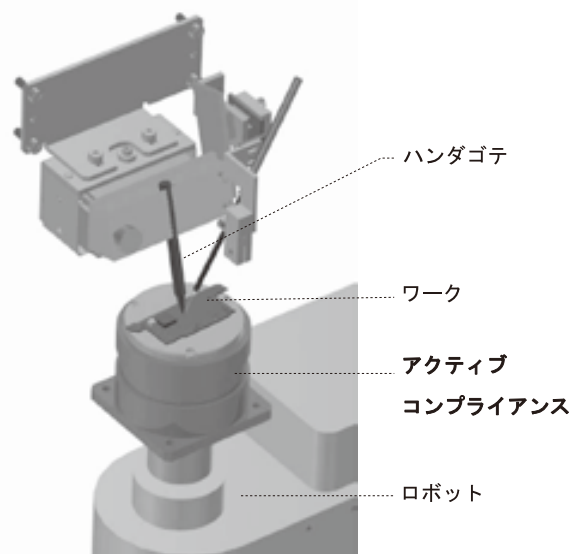


図1 アクティブ・コンプライアンス外観

## 2. 開発の背景

### 2.1 組み立て作業における課題

ロボットを使用する組み立て作業の自動化において、人が教示ボックスなどを用いてロボットに手先位置を覚えさせるティーチングという作業があり、ロボットが正確に教示位置をトレースすることで自動化が実現できる。

ところが部品には寸法誤差があるので、ロボットで正確に位置決めを行っても組み付け位置や高さがずれる場合があります。そのような状態で組み立て作業を行うと過大な力が発生して部品破損につながる。

この問題の対応策として従来下記の方法がとられていた。

- ①ロボットのアーム先端とワークの間にバネを設置し力を吸収する(パッシブ・コンプライアンス)。
- ②ロボットのアーム先端とワークの間に力センサを設置し、過大な力が加わらないようにロボットで制御する。

しかし組み立て作業においてロボットは様々な作業を行うため、①の方法は対象物や作業内容によりその都度バネの種類を変える必要がある。②の方法はロボットの重量が比較的大きく剛性が高いため、急速に対象物に接近させた場合に部品破損の危険性があるため高速なハンドリングが難しい、センサが高価であるなどの難点があった。

### 2.2 課題の解決

これらの課題を解決するためコンプライアンス(柔軟性)を自由に変えられ、かつ高速に位置決めが可能で力覚(力検出)機能を持つデバイス(アクティブ・コンプライアンス)を開発し、ロボットのアーム先端とワーク(もしくはハンド)の間に組み込むことにした。

アクティブ・コンプライアンスの機能・特長を下記に示す。

- ①作業中の力と柔軟性を瞬時に変更し、部品を破損することなく組み立て作業を高速化できる。
- ②ロボットと連携して複雑で高速な動作を行える。
- ③接触力を監視することで作業状態を把握できる。

## 3. 装置概要

### 3.1 装置構成

アクティブ・コンプライアンス(以降AC)はVCM(ボイスコイルモータ)と位置センサ、小型ACコントローラで構成され、ロボットとワーク(もしくはハンド)の間に設置して作業対象物との接触力を制御しながら、嵌め合い、押し付け、ハンダ付けなどの作業を行う。

位置センサは非接触の近接センサを内蔵しており、外部に高価な力センサを設けることなく、近接センサ出力と駆動電流を用いた外乱オブザーバにより作業対象との接触力を推定する。

アクティブ・コンプライアンスの制御はマイクロコントローラで行い、内部処理は主として制御演算部とシステム制御

部とに分けられる(図2)。

制御演算部は外力推定と定電流、コンプライアンス、位置、力制御、PWM変調に必要な演算を行い、システム制御部はアセンブリ・セル全体を制御する上位コントローラとの通信処理や内部ステート、コマンド処理を行う。

上位コントローラはEthernet(UDP)経由でアクティブ・コンプライアンスと指令値や作業力などのデータをリアルタイムに交換し、アセンブリ・セル内のロボットや他のデバイスと協調動作をさせる。

尚、パラレル接続としてPLCインターフェイスも装備した(図3)。

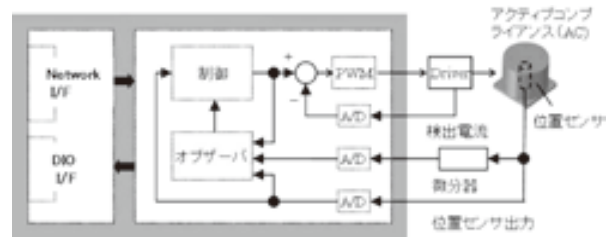


図2 ACコントローラ内部ブロック

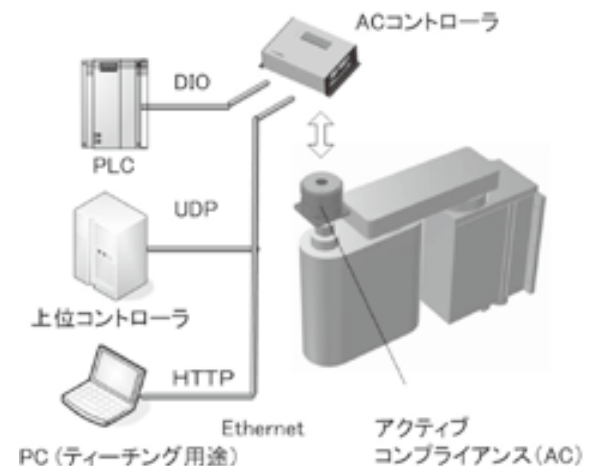


図3 装置構成図

表1にアクティブ・コンプライアンス装置の仕様を示す。

可搬質量	0.5kg
定格推力	10N(最大30N)
動作範囲	±1.5mm
位置繰り返し精度	±0.01mm
コンプライアンス	600~30000N/m
可動部質量	0.1kg
機構部質量	0.6kg
力検出精度	±0.2N(力センサレス)
ホストI/F	Ethernet, DIO(PLC)
主な適用分野	精密部品組み立てなど

表1

### 3.2 ACコントローラ・ハード構成

ACの制御は、装置の要求仕様と制御イコライザの計算負荷を考慮してDSP付のARM966E-Sをコアにもつマイクロコントローラで行うことにした。

ACコントローラのアナログ入力のコイル電流検出器、位置センサ、及び位置を近似微分した速度検出器信号で、マイクロコントローラ内のマルチプレクサを通してA/D変換し取り込む。マイクロコントローラは取り込んだ位置、速度、電流情報に基づき外力推定と定電流、コンプライアンス、位置、力制御に必要な各種演算を行い、得られた操作量を基準にPWM変調した信号でドライバを通してアクチュエータを駆動する。

なお制御演算は一定周期で時間内に行う必要があり、PWM変調の定電流制御ではA/D変換のタイミングも精度よく管理する必要があるため、制御演算は後述する方法によりリアルタイムOSの動作に影響を及ぼすことがないようにしてOS管理外で行う(図4)。

リアルタイムOSではシステム全体の制御と上位コントローラとの通信制御を行い、周辺ハードとしてEthernet接続のためのPHYとパラレル接続のためのBus Bufferがある。

また以上の処理の大半をソフトウェアで実現しているため、ACコントローラの小型化は容易である。

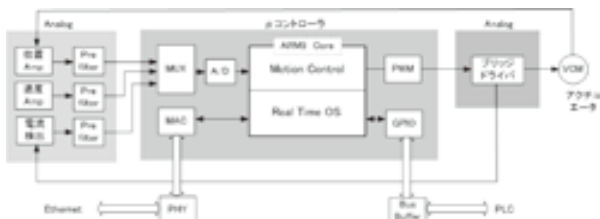


図4 ACコントローラ・ハード構成

### 3.3 ファームブロック及びスケジューリング

図5にACコントローラのファームウェア構成を示す。定電流、位置、コンプライアンス制御や外乱オブザーバ演算などの積和演算処理は最短50(μS)の周期で時間内に処理を終えなければならないため、高速割り込み(FIQ)を使ってリアルタイムOS管理外のモーションコントロール部で行う。

制御演算はリアルタイムOS上で行うことも可能だが、OSのタスク切り換え時間が数(μS)なので50(μS)周期で制御を行う場合のオーバヘッドは10パーセントに達しスループットが低下する。一方高速割り込みFIQのlatency timeは1(μS)程度で影響が少ない(図6)。

上位コントローラからの指令はサーボブロックに渡され、サーボブロックでは指令に応じてモーションコントロール部の制御パラメータや動作モードを変更し所定の制御動作をさせる。

なお制御周辺回路に直接アクセスできるのはモーションコントロール部のみとし、リアルタイムOSからの直接アクセスを禁止すると同時に、リアルタイムOSの管理下にあるリソースはモーションコントロール部から直接操作できないようにすることで、モジュールの独立性を高め信頼性を向上させた。

また制御動作を行いながら上位コントローラとの通信も

リアルタイムで行える様にタスクのローテーションとスケジューリングを行った。

その結果、50(μS)以内に全ての制御演算を行いながら上位コントローラとAC間の通信間隔2(ms)の性能を実現できた。

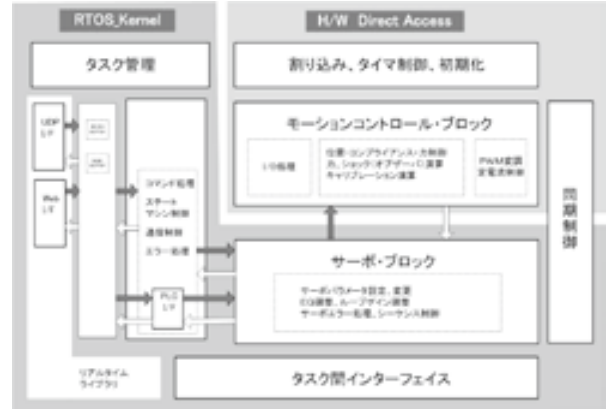


図5 ファームブロック

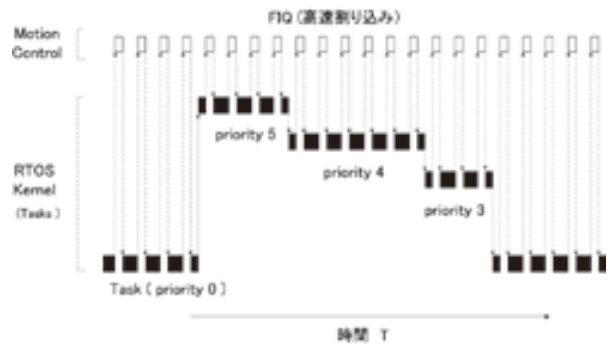


図6 スケジューリング

## 4. アクチュエータ・センサ

### 4.1 アクチュエータ構成

アクチュエータは一对のフラットスプリングで支持されたコイル、ネオジウム磁石、ヨークからなるVCMと誘導型近接センサより構成され、センサを内部ヨークの中心部に配置することで小型化を達成している(図7)。

尚、コイルからの漏洩磁束を極力抑えた設計にした上、センサ周辺を二重シールドすることで磁束飛び込みの影響を実用上問題のない範囲まで抑え近接センサの使用を可能にしている。図8に近接センサの距離特性を示す。

近接センサは非接触で外力を直接受けることがないため作業ミスなどで破損の可能性がない利点もある。

また可動部はヒステリシスの少ないフラットスプリングで支持する構成のため、摺動抵抗の影響を無視でき外乱オブザーバで正しい外力推定が可能となる。

さらにアクチュエータ上下端には可動部位置を制限するストッパを設けてあり、強度が高いためロボットの推力を直接作業対象に加えることも可能である。

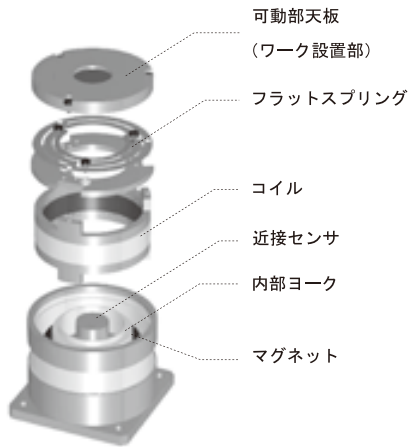


図7 アクチュエータ分解図

#### 4.2 アクチュエータ伝達特性

VCM入力からセンサ出力までのゲイン伝達特性は、サスペンションのバネ定数と可動部質量で決まる一次共振周波数をピークに約 $-40\text{dB/dec}$ で減衰する良好な特性を示している(図9)。位相特性はコイルインダクタンスとサンプリング周期の影響で、 $100\text{Hz}$ 近傍から廻り始めるがインダクタンスによる電流遅れの影響は定電流ループを構成して補正している。

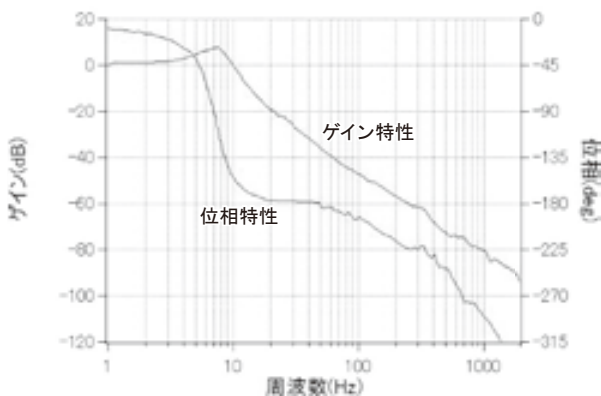


図9 アクチュエータ伝達特性

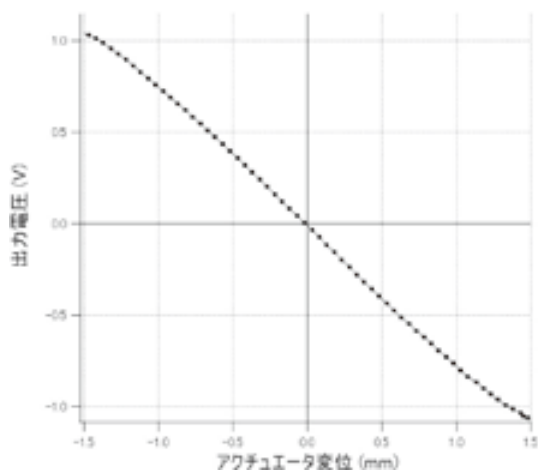


図8 センサ特性

## 5. 制御特性

### 5.1 位置制御特性

図10にアクティブ・コンプライアンスの位置ステップ応答を示す。高速に移動させても短い整定時間で精度よく位置決めが行えるため、ロボットと連携してプロフィールをコントロールすることにより、ロボット単体では難しい複雑な動作を高速で行うことができる。

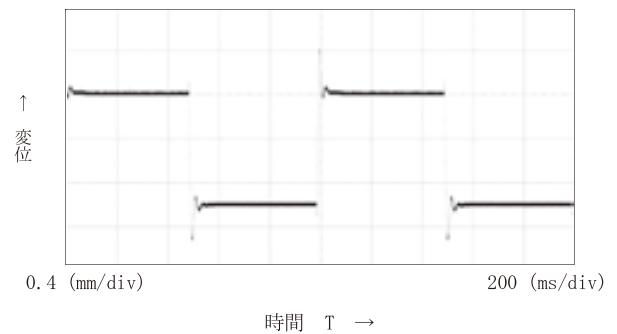


図10 位置指令応答

### 5.2 コンプライアンス特性

図11はコンプライアンス特性で、作業に応じて約 $600\text{N/m}$ から $30000\text{N/m}$ まで柔軟性をコントロールできる。

たとえば精密部品の嵌め合い作業で穴に部品を挿入する場合、部品を破損しない様に柔らかい状態で穴位置を探り、穴にはまった時点でコンプライアンスを高く設定して押し付け動作を行い確実に挿入する。

また可動部が軽量で柔軟性があるため、対象物の近くで移動速度を大きく落とさずに接触させても部品やワークを損傷しないのでタクトタイムを短くできる。

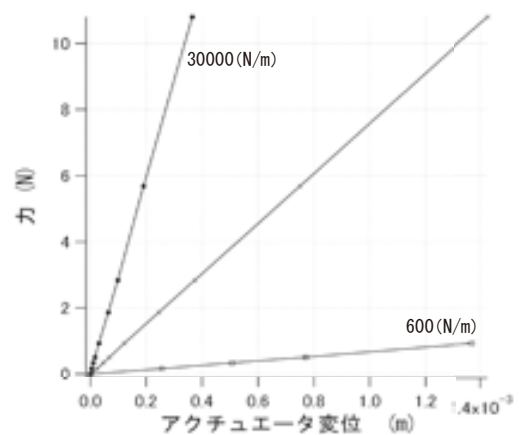


図11 コンプライアンス特性

### 5.3 外乱オブザーバによる外力推定

作業対象と接触している時の外力検出はロードセルなどの力センサを用いることなく、アクチュエータ駆動電流と近接センサ出力より外乱オブザーバで推定して求める。

算出のパラメータはVCMのトルク定数 $K_t$ 、フラットスプリングのバネ定数 $K$ 、可動部の質量 $M$ である(図12)。

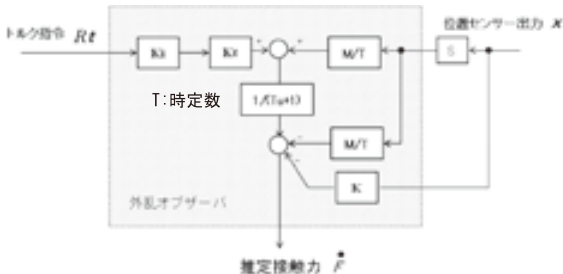


図12 外力推定オブザーバ

アクティブ・コンプライアンス可動部に取り付けたロードセルに外力を加えた場合(図13)のセンサ出力と外乱オブザーバで算出した外力を(図14)に示す。

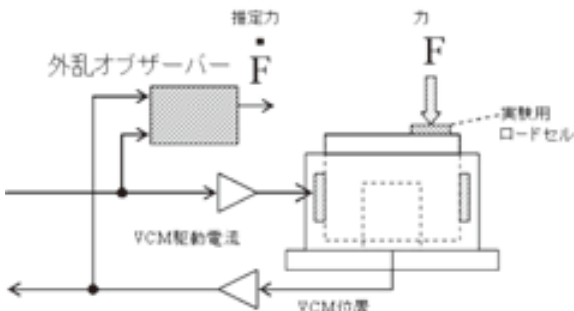


図13 外力推定オブザーバ

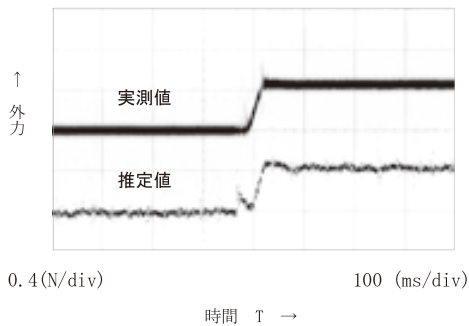


図14 推定外力と実測値

### 5.4 衝突検出

ワークやハンドが対象物と衝突した場合、これを検出してロボットに停止指令を出す衝突検出機能を持たせた。

衝突の判定は可動部速度信号を微分して求めた加速度のレベルと時間幅を基準に行う。

図15に金属棒先端にロードセルを取り付けて自由落下で衝突させた場合のロードセル出力と算出した衝撃力を示す。

加速度の演算は位置の二階微分なので、高域ノイズのフィルタリング処理をしている関係上若干のディレイを伴うが、落下物と接触している間のロードセル出力と計算により求めた衝撃力はおおむね一致している。

この衝撃力 $F (F = Ma)$ が所定の閾値 $F_r$ を一定の時間 $T$ を越えた場合、つまり力積が $F_r T$ を超えたら部品破損の可能性ありと判定し、上位コントローラにロボット停止要求を出すと同時に自ら最大速度で反対方向に移動しショックを低減する。

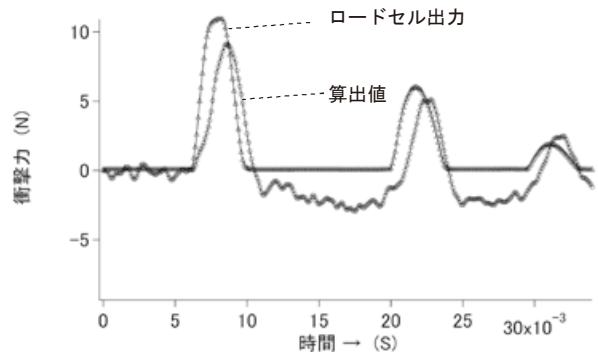


図15 算出衝撃力と実測値

### 5.5 センサキャリブレーション

近接センサの感度ばらつきやオフセットの校正は以下の方法で行う。

アクチュエータの可動部位置を制限する上下端ストップ間の距離は予め決まっているので、可動部を上下に移動し上端ストップ位置におけるセンサ出力 $X_H$ と下端における出力 $X_L$ の平均値を零中心として、出力差 $(X_H - X_L)$ が常に一定になるように内部係数を掛けることで実現する(図16)。

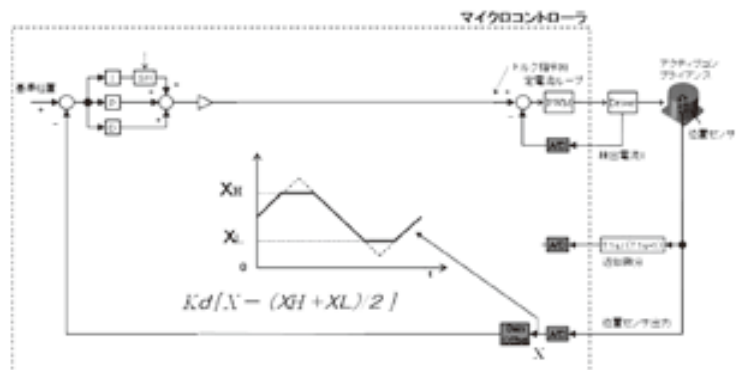


図16 センサキャリブレーション

## 6. ハンダ付け作業への応用

アクティブ・コンプライアンスの力・位置検出機能を用いることで作業中の品質判定も可能である。

たとえばハンダ付け作業はハンダの溶融状態の良否がそのまま品質に結びつくため、作業終了後に画像処理で状態を確認し不良検出を行うが、ハンダ付け作業中はコテ先でハンダ面が隠れてしまうので、画像でリアルタイムに溶融状態を確認することは難しい。

しかしアクティブ・コンプライアンスを使うとハンダ付け作業中の溶融不良を検出できるので、即座に修正を行うことが可能になる。以下にその方法を説明する。

引きハンダ作業はコンプライアンスをハンダ付け作業に適した値に設定し、ロボットをZ軸上方向に移動する(図17)。そして予備ハンダ部分にコテ先が接触した位置よりさらに押し込んで作業に最適な接触力が得られる様にする。

このとき、ごくまれに予備ハンダが十分溶けない場合があり、そのまま動作を継続すると不良になる。

図18にアクティブ・コンプライアンスで検出した引きハンダ作業中の接触力変化を示す。

ハンダが溶融すると接触位置が変わるため、そのときのコンプライアンス値に応じた力の変化となって表れる。

ハンダが溶融している過程では変化が大きく(図18 ①)、溶融してない状態では変化が少ない(図18 ②)。

また、十分溶融していない状態で引きハンダ動作を開始すると、接触位置が予備ハンダ頂点から基板面が変わるため段差が発生し(図18 ③)不良と判断できるので、すみやかに修復作業を行うことが可能になる。

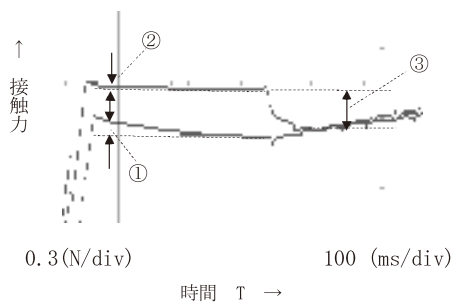


図18 ハンダ作業時の接触力変化

## 7. おわりに

本稿では組み立て作業における柔軟性や力制御の必要性と、それを実現するためのアクティブ・コンプライアンス装置について述べた。またアクティブ・コンプライアンスをアセンブリ・セルに適用することで、その効果と実用性を立証できた。

今回のアセンブリ・セルではアクティブ・コンプライアンスのコンプライアンス、位置決め機能や力検出機能を用いて作業効率を大幅に改善できたが、その高速性を活かすことでさらに作業範囲を拡大することが可能である。

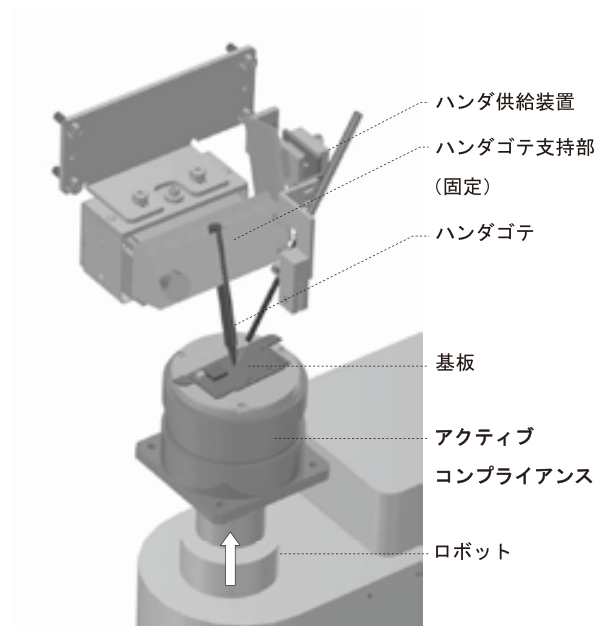


図17 ハンダづけ装置概要

### 参考文献

- (1) ロボットマニピュレータの適応センサレスコンプライアンス制御, 第34回 計測自動制御学会

### 著者所属

- |       |                      |
|-------|----------------------|
| 川瀬 茂  | 生産技術開発部<br>自動化技術グループ |
| 津村 高志 | 生産技術開発部<br>自動化技術グループ |
| 小黒 直輝 | 生産技術開発部<br>自動化技術グループ |

# バイオマスプラスチックへの取り組み

## Application of Biomass Plastics to Industrial Control Product Housings

株式会社 山武

浜野 裕之

Hiroyuki Hamano

株式会社 山武

石塚 保夫

ビルシステムカンパニー

Yasuo Ishizuka

株式会社 山武

宇田川 良吉

Ryookichi Udagawa

### キーワード

バイオマス, プラスチック, ポリ乳酸, 二酸化炭素, 地球環境, カーボンニュートラル, 色差, 温湿度試験, 流動解析, ウェルドライン

「バイオマスプラスチック」とは、トウモロコシのでんぷんなどのバイオマスによって作られる樹脂のことである。成長時にCO<sub>2</sub>を吸収する植物を主な原料とするので従来のプラスチックよりもCO<sub>2</sub>の排出量が少なく、各社において開発と利用が進められているが、耐環境性をより厳しく求められる工業製品への適用事例はまだほとんど見られていない。筆者らは、当社理念である「地球環境への貢献」と低炭素社会へのニーズを踏まえ、これらバイオマスプラスチックによる当社製品への適用を東レ株式会社(以下 東レ と称す)と共同して取り組み、用途を限定すれば従来の樹脂への代替として使用可能な結果が得られたので報告する。

Biomass plastics refer to resin made from corn flour and other biomass. Because the primary raw material of biomass plastics uses plants that absorb CO<sub>2</sub> during their growth, these plastics have lower CO<sub>2</sub> emissions than conventional plastics. Although many companies are moving ahead with development and usage, there are still few instances of application in industrial products where a high level of resistance to environmental conditions is required. Drawing on the need for a low-carbon society and our company's principles of contributing to the global environment, we have taken steps to use biomass plastics with our company's products in cooperation with Toray Industries, Inc. (called "Toray" below). The authors report on the results of how biomass plastics can be used to replace conventional resins for limited applications.

### 1. はじめに

図1に示す通り、光合成によって、CO<sub>2</sub>を吸収して育った植物から樹脂を作れば、その樹脂を使用後に焼却しても、地球上のCO<sub>2</sub>は増加しない。これがカーボンニュートラルの考え方である。今後は、このようなCO<sub>2</sub>排出の抑制や資源循環型社会の実現をさらに加速する必要がある。

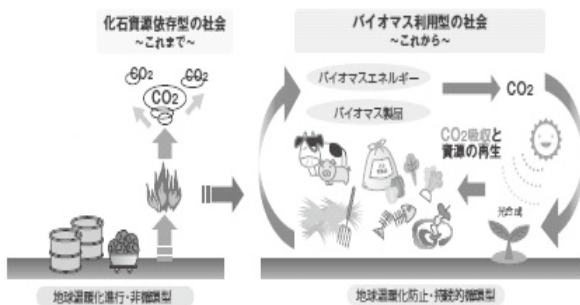


図1 CO<sub>2</sub>の循環する社会(農林水産省HPより)

実際には運搬や製造過程を経ることにより、CO<sub>2</sub>排出量はゼロにはならないが、排出量削減の手段の1つとして、民生品の分野ではバイオマスプラスチックの利用が各社で進められている。しかしながら工業分野では、製品の使用環境や耐久性などの観点から耐熱性、強度、素材価格において満足できるバイオマスプラスチックは少なく、各樹脂メーカーにおいては従来のエンジニアリングプラスチックの性能に近づけるべく開発が継続されている状況にある。筆者らは現在提供されている各社の樹脂材料の特性調査を行い、最終的に選定された樹脂メーカーの東レとともにバイオマスプラスチックの材料特性を改良しながら部品を試作し、従来部品との性能比較評価を行うことで適用の可能性を明らかにした。また、流動解析と実験よりバイオマスプラスチックと従来樹脂との成形性の違いを明らかにし、従来樹脂金型の流用及び生産性の検討も行ったので併せて報告を行う。



## 2. 樹脂材料の選定

高度経済成長期においては、埋立て廃棄による公害発生や埋立地不足の観点より、バイオマスプラスチックには地中での生分解性が求められていたが、今日では、地球温暖化対策としてCO<sub>2</sub>排出量削減が緊急な課題として取り上げられている。本研究においても、当初は生分解が可能な樹脂への代替を目標として調査を開始したが、今日の地球環境を守る観点よりバイオマスの樹脂材料全体に範囲を広げて選定を行った。当社製品への適用の可能性が高いとして候補に上げた各メーカーの樹脂材料を表1に示す。

最終的には強度、難燃性、収縮率などが従来樹脂に最も近い東レのバイオマス樹脂を選定し、試作成形を進めることに決定した。同樹脂の難燃剤には非ハロゲン系材料が使用されており、また難燃性としてもUL規格94-5Vが認定されている。安全性とともに環境保全からも好ましいことも選定の要因となった。

選定した樹脂のバイオマス成分はポリ乳酸が使用されており、従来樹脂に比べCO<sub>2</sub>排出量が約30%、化石資源消費量は約25%の削減が見込まれる。

メーカー	高分子名称	用途
J社	PLA (ポリ乳酸)	乾電池プリスタバック 部品トレイ、キャリアテープ 窓付封筒、CDケース包装
C社	PBS (ポリブチレンサクシネート)	農業マルチフィルム ごみ袋、シャンプーボトル、 食品トレイ 他
S社	PBS (ポリブチレンサクシネート)	フィルム、シート、フィラメント、 不織布、ラミネート、 発泡成形品、射出成形品
M社	PLA (ポリ乳酸)	包装フィルム、化粧容器 農業用シート、 コンポストゴミ袋
U社	PLA (ポリ乳酸)	包装資材、農業資材、 電子機器筐体(携帯ケース)、 事務用資材
東レ	PLA (ポリ乳酸)	包装資材、農業資材、 電子機器筐体(ノートPC 筐体、TVリモコン筐体)

表1 樹脂材料候補一覧

## 3. 評価対象と成形品の試作

### 3.1 対象部品の選定

前述の樹脂材料選定の結果及び現在のバイオマス樹脂の強度や耐熱性の水準を踏まえ、当社製品において耐環境性に求められる性能が比較的緩やかな室内設置型の製品である空調用センサ「ネオスタット」(図2)のカバーへの適用を試みた。

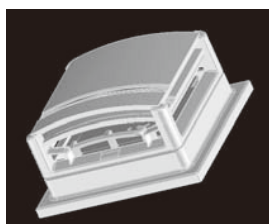


図2 ネオスタットセンサ(中央部)とそのカバー

### 3.2 金型製作

成形試作にあたり当社試作部門で簡易金型を製作した。簡易金型はアルミ材料を使用し、中子による簡易構造(図3)としている。また、3次元CADデータを直接CAD/CAM変換する加工法を用いることにより、短納期を実現している。

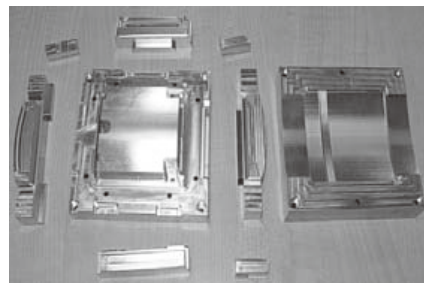


図3 試作した金型

### 3.3 成形

今回の研究開発の目的がバイオマス樹脂の製品への適用の可能性を探ることから、バイオマス樹脂と従来樹脂による部品を各々成形して両部品を比較することでバイオマス樹脂の評価を行うこととした。両材料の収縮率はほぼ同じであり、従来樹脂の金型が使用できれば新たな投資が削減できる。このことから両材料を同じ金型を使用し成形条件の変更で試作成形することも目標とした。図4は試作例である。



図4 試作した部品

評価は部品形状における強度や耐環境性を比較するため、サンプルとして両材料により各々50個程度を試作した。今回選定したバイオマス樹脂は融点や流動性が従来樹脂材料に対して異なっている。このことから、成形時間、成形転写性及びウェルドの発生等にも注目して成形を行った。

### 3.4 流動解析

成形の試作過程では、バイオマス樹脂において成形転写性の不足、ウェルドラインの発生などが明らかになった。図5に示す流動解析により問題点を明確にして射出条件を求めた。修正後の条件では、不適合なく成形が可能となっている。今回の成形条件での差によるコストへの影響は、既存の成形工程、及び現在の生産数レベルからほとんどないことも確認された。試作環境において適切と思われた成形条件を表2に示す。

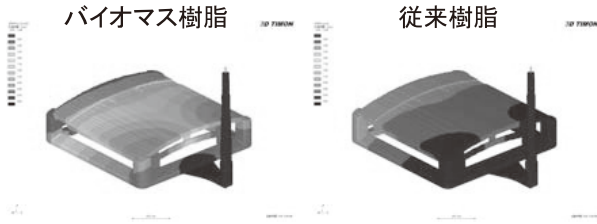


図5 流動解析

材料	射出充填時間[s]	射出ピーク圧[MPa]	シリンダー温度[℃]	型温度[℃]
従来樹脂	0.65	128	270-280	100
バイオマス樹脂	3.21	123	170-240	70

表2 成形条件

## 4. 成形試作品の評価

バイオマス樹脂及び従来樹脂により成形試作された部品を使用して行った評価及び課題の対応を以下に述べる。

### 4.1 耐光性試験

今回選定した部品は太陽光による変色も懸念される。このことからキセノン光を両者へ連続照射して、耐光性を比較した。図6に試験状況を示す。

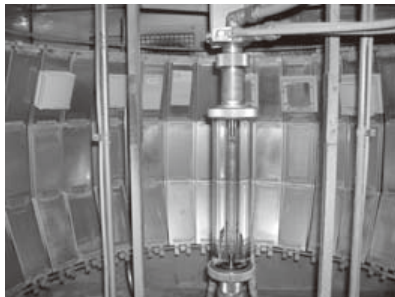


図6 キセノン光照射試験

照射強度は製品に求められる屋外暴露に相当する値で試験し、変色の程度を色差測定法で評価した。

色差は色の知覚的な違いを定量的にあらわしたもので、 $\Delta E^*ab$ の次式で定義される数値で表される。

$$\Delta E^*ab = \sqrt{\Delta L^*2 + \Delta a^*2 + \Delta b^*2} \dots \dots \text{式(1)}$$

(L\*:明度 a\*:赤み b\*:青み)

実験の結果、従来樹脂に比較してバイオマス樹脂に黄色への変化が確認された。このことから紫外線を吸収する光安定剤の使用などによる改質を材料メーカー 東レに行なった。再試験による結果を表3、表4に示す。

改質樹脂と従来樹脂の色差値は差がほとんどなくなり、同等以上の耐光性能が得られた。

	L*	a*	b*	$\Delta E^*ab$
試験前	65.4	0.1	-0.5	7.0
300Hr後	63.6	-1.7	6.5	

表3 試料名:従来樹脂

	L*	a*	b*	$\Delta E^*ab$
試験前	66.2	-0.2	-0.8	6.5
300Hr後	65.2	-1.2	5.5	

表4 試料名:バイオマス樹脂(改質品)

### 4.2 温湿度試験

ポリ乳酸の耐熱温度は一般的に55℃近辺であり、これを成分とするバイオマス樹脂の耐熱性は従来樹脂より劣ることが予想された。このことから製品の使用環境を考慮した試験条件で従来樹脂との性能比較を実施した。

試験条件と結果を表5に示す。

各試験の前後において、割れ、変形、膨れなどの外観上の変化は観察されなかった(変形は定盤の上で平面状から4隅の指触により確認した)。また高温放置試験では従来樹脂の部品に僅かに焼けたような色合い変化が認められ、バイオマス樹脂が従来樹脂より優っていた。

試料	高温放置試験	低温放置試験	高湿放置試験	温湿度サイクル試験
	60℃/96Hr	-20℃/96Hr	40℃・95%RH/96Hr	-20~50 95%RH 24Hr 5cycle
従来樹脂	○	○	△	○
バイオマス樹脂	○	○	○	○

表5 試験条件と結果 ○:差異無し △:やや劣る

### 4.3 強度試験

バイオマス成分であるポリ乳酸は可撓性においても従来樹脂より劣ることから図7に示すとおり、部品の中心部に集中加重を加え、降伏点荷重と撓み量を比較した。試験結果を図8に示す。

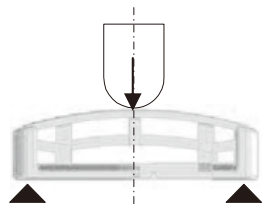


図7 強度試験概念図

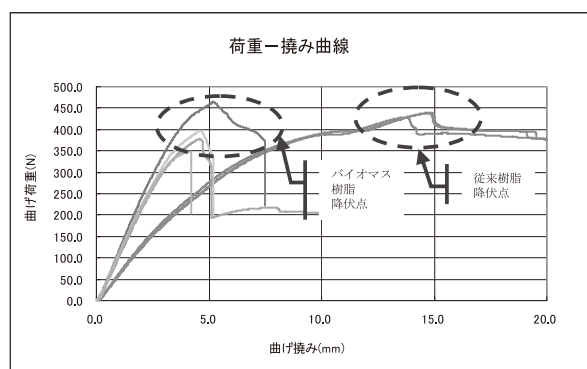


図8 強度試験結果

バイオマス樹脂の降伏点荷重は約400N前後を示しており、従来樹脂とほぼ同等であった。降伏点の撓み量は従来部品と比較して30-50%低かったが4-7.5mmの撓み量を有していた。撓み量をさらに要求される場合は設計上の配慮が必要である。

## 5. おわりに

地球環境負荷の低減を可能とするバイオマス樹脂は、用途を限定すれば工業市場製品に使用されている従来樹脂への代替が可能なが確認できた。

最後に、選定したバイオマス樹脂の耐光性の課題に対して改質に尽力を頂いた 東レ株式会社 植田氏に感謝を申し上げます。

### 参考文献

- (1) 高田:ポリカーボネートの改質, プラスチックスエージ, pp.89-96(2004)
- (2) 草川:自動車のプラスチック化の現状と今後の展望, 工業材料, Vol.52, No.9(2004)
- (3) 岩田:近未来に向けたバイオベースの新産業, 化学経済, pp.70-75(2007)
- (4) ミノルタ株式会社, 計測事業部編:色を読む話

### 商標

「ネオスタット」は株式会社 山武の登録商標です。

### 著者所属

浜野 裕之	材料技術部
石塚 保夫	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
宇田川 良吉	生産技術開発部

# 高温高湿発生技術の研究

## Development of Two-pressure, Two-temperature Humidity Generator

株式会社 山武 伊藤 力哉  
ビルシステムカンパニー Rikiya Itou

株式会社 山武 石塚 保夫  
ビルシステムカンパニー Yasuo Ishizuka

### キーワード

湿度, 二圧力・二温度法, 飽和水蒸気, 不確かさ

高温高湿領域で湿度計測をするニーズが産業市場などで高まっている。そこで高温環境で湿度センサの特性評価ができるように、JIS B 7920に規定されている二圧力・二温度法をもとに湿度発生装置を製作した。100℃以上の領域では飽和水蒸気量が指数的に増加するため飽和状態を作るのが難しい。このため飽和槽の前に前置飽和槽を設置し、空気に含まれる水蒸気量を操作することによって、湿潤空気を飽和槽に投入し飽和槽の飽和条件を探索した。また、この求めた飽和条件から、本装置で発生する相対湿度の不確かさについて見積もったので報告する。

The needs for humidity measurement in high-temperature, high-humidity areas are growing in industrial markets and other sectors. For this reason, we built a humidity generator based on the two-pressure, two-temperature method specified in JIS B 7920 to enable evaluation of the properties of a humidity sensor in a high-temperature environment. In areas where the temperature is 100°C or higher, it is difficult to create a saturation state because the saturated water vapor content increases exponentially. Therefore, a pre-saturation chamber is installed before the saturation chamber for controlling the water vapor content in the air, and damp air is injected into the saturation chamber for finding the saturation conditions of the saturation chamber. In this paper, we present our estimates on the uncertainty of the relative humidity generated by this device from these saturation conditions that were found.

### 1. はじめに

湿度センサはオフィスや居住空間の空調用途では15～35℃程度で多く用いられるが、工業市場を考えた場合、その温度範囲は広く180℃もの高温度領域で使用可能な湿度センサが存在する。しかし、産業技術総合研究所所有の特定標準器では露点温度95℃以下となっており、この温度が基準値の国内最高温度となっている。そのため、95℃以上の高温度領域での湿度計測は、メーカー各社の技術に基づく評価装置で得られた精度に依存している。

そこで、高温度領域での湿度計測の実現にあたって、150℃高温環境下の湿度センサの特性を評価できるように、JISB7920に規定される二圧力・二温度法の原理を用いた湿度発生装置を、高温・高圧条件下で実現する湿度発生装置を製作した。

飽和水蒸気を連続的に生成する一般的な方法として、飽和槽で空気をバブリングしたり、空気の流れを飽和槽内部の水面上を走らせることによって飽和水蒸気を生成する。

しかし、100℃以上の高温度領域では指数関数的に飽和水蒸気量が増加するため、上記の方法では水の蒸発潜熱の授受により飽和槽の水温が低下し、飽和槽の飽和が不完全になる。飽和が不完全であると試験槽へ導いた空気が、実際よりも低い湿度で生成され理論値と一致しない。そのため、本稿では飽和槽の前に予熱した飽和槽(前置飽和槽)を設置し、上記の方法に加えてより完全な飽和となるよう装置を製作した。具体的には前置飽和槽の温度を変化させ、空気に含まれる水蒸気量を操作し、飽和槽に投入することにより、飽和槽の飽和温度特性を求めた。これを飽和温度の不確かさとして見積もり、この装置で実現できる相対湿度の不確かさを見積もった。

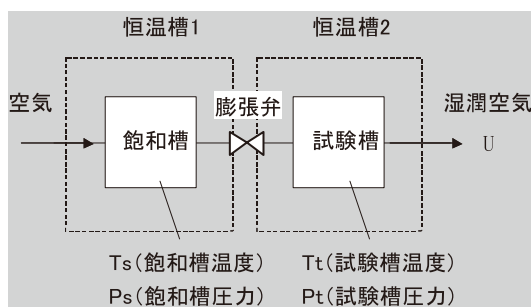


図1 二圧力・二温度法の原理

## 2. 二圧力・二温度法の原理

本装置の湿度発生装置の原理はJISB7920に規定される二圧力・二温度法に基づいている。二圧力・二温度法は産業技術総合研究所所有の特定標準器で用いられており、精密な湿度発生装置の原理として用いられる。

二圧力・二温度法は試験槽よりも低い温度にて水蒸気で飽和された飽和槽内の圧縮空気を圧力膨張弁を介して試験槽へ送る(図1)。

すると、この時の試験槽内の相対湿度は(1)式から求められる。

$$U_w = \frac{P_t}{P_s} \frac{f(P_s, T_s)}{f(P_t, T_t)} \frac{e(T_s)}{e(T_t)} \times 100(\%) \quad \text{式(1)}$$

$U_w$ :湿度値(相対湿度)(%RH)

$P_t$ :試験槽圧力  $e(T_t)$ :試験槽の飽和水蒸気圧

$P_s$ :飽和槽圧力  $e(T_s)$ :飽和槽の飽和水蒸気圧

$f(p, t)$ :圧力p, 温度t時の増加補正係数

$e(t)$ は水の $t^\circ\text{C}$ における飽和水蒸気圧であり、 $100^\circ\text{C}$ 以上の飽和水蒸気圧式はJIS Z 8806ではWAGNER-PRUSSの式で与えられている。

また、 $f$ は増加補正係数である。飽和水蒸気圧式で示される蒸気圧は、水と平衡状態にある水蒸気であり、実際の湿潤空気では水蒸気分子及び乾燥空気分子相互作用による影響と水への溶解の影響があるためこれを補正する必要がある<sup>(2)</sup>。

しかし、増加補正係数は $100^\circ\text{C}$ 以下でR.W.Hyland(1975)にて報告されている<sup>(1)</sup>が、 $100^\circ\text{C}$ 以上の補正値は未知であるため、(2)式のように本稿では $f=1$ とし、増加補正係数の影響が小さい二温度法で実験を行った。

$$U_w = \frac{P_t}{P_s} \frac{f(P, T_s)}{f(P, T_t)} \frac{e(T_s)}{e(T_t)} \times 100 \doteq \frac{e(T_s)}{e(T_t)} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

## 3. 本装置の概略

本装置の概略図を図2に、仕様を表1に示す。

温度設定範囲	50~180℃
湿度生成	~100%RHを目標
耐圧	~1MPa

表1 本装置の仕様

飽和槽と試験槽に圧力容器を用い、それらは恒温液槽を用いて温度を一定に保っている。

加圧された試料空気は、エアドライヤを通してほぼ0%RHになり、レギュレータを介してマスフローコントローラで流量を制御され、前置飽和槽に導かれる。前置飽和槽はヒーターとコントローラで特定の温度に制御され、その中で試料空気をバブリングしている。

前置飽和槽から排出される空気はヒーターで昇温され、飽和槽Iに送られる。飽和槽Iは熱交換及び結露した水を溜める容器として用いている。飽和槽Iから送られる空気は同じ恒温液槽内にある飽和槽IIで再びバブリングすることにより、飽和水蒸気を生成する。飽和槽で発生した飽和水蒸気を、飽和槽と試験槽をつなぐ経路でヒーターによって露点温度以上に昇温させ、結露しないように試験槽に導いている。試験槽は恒温液槽で温度を一定に保っている。また、試験槽内には温度計、圧力計が取り付けられている。これらの構成により任意の温湿度環境を作り出している。

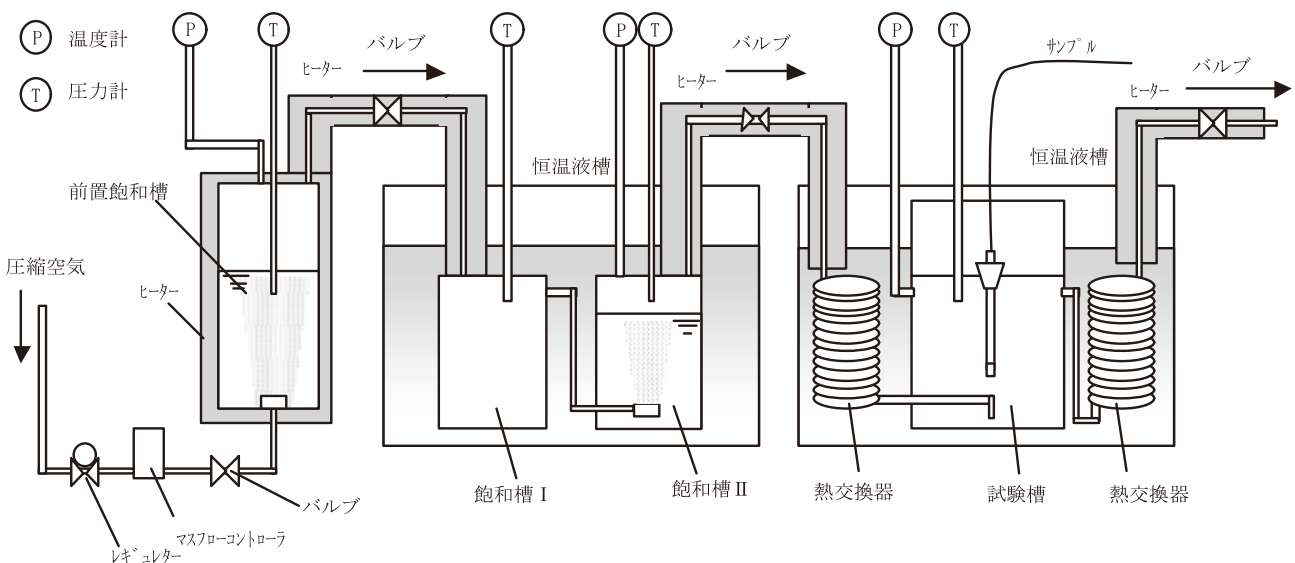


図2 本装置概略図

## 4. 飽和槽の評価

### 4.1 飽和槽温度の確認

飽和の状態とは水から蒸発する水蒸気分子の量と、水に戻り凝結する気体の水蒸気分子の量が平衡している状態である。100℃以上の高温領域では、指数関数的に飽和水蒸気量が増加するため、水の蒸発潜熱の授受により飽和槽の水温が低下する。すると、水面の温度における水の水蒸気圧と水面近傍の空間の水蒸気圧が等しくなくなり、相対湿度の分布が発生することになる。従って、飽和槽が飽和状態にあるか確認するために飽和槽の水温と蒸気温度差を調査した。飽和槽の蒸気と水の温度に差がなくなった時、飽和状態と判断できると考え、その状態を作りだす。

### 4.2 試験方法

相対湿度分布を推量するために、飽和槽の前に前置飽和槽を用意する(図3)。前置飽和槽では飽和槽Ⅱよりも高い温度でバブリングし、空気に水分を含ませた後、飽和槽Ⅱに投入する。これにより、飽和槽Ⅱの内部に水分が過剰にある状態を作りだす。前置飽和槽をヒーターで加熱し、バブリングする時の温度を操作して、前置飽和槽の設定温度( $T_p$ )と飽和槽Ⅱ内部の蒸気温度( $T_2$ )と水温( $T_1$ )の差の関係を調査し、飽和槽の水温と蒸気温度が一致する範囲を求める。

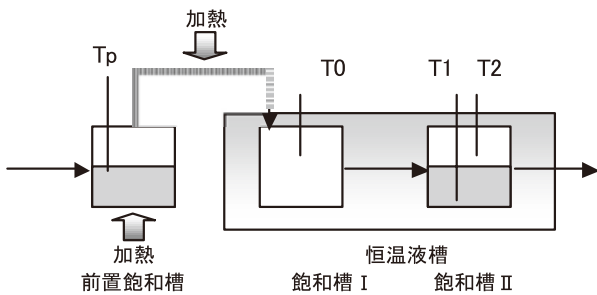


図3 前置飽和槽と飽和

図3の中の $T_1$ 、 $T_2$ に関して次のことが言える。

- (a)  $T_1$ が $T_2$ より低くなる領域。飽和槽Ⅱにおいて蒸発が活発である。
- (b)  $T_1$ より $T_2$ が高くなる領域。飽和槽Ⅱにおいて凝縮熱等により過熱されている。
- (c). (a). (b).の中間
- (b)の状態が、飽和槽Ⅱの内部に水分が過剰にある状況であると考えられ、(c)が最も飽和状態に近いと考えられる。そこで実験では流入する蒸気温度 $T_p$ を操作することにより、 $T_1$ 、と $T_2$ の関係を調査した。

### 4.3 試験結果

試験条件を表2で示した。図4は前置飽和槽の水温 $T_p$ と飽和槽Ⅱの水温 $T_1$ と蒸気温度 $T_2$ の関係を示した結果である。

飽和槽設定温度(恒温液槽)	130℃
試験槽設定温度(恒温液槽)	150℃
飽和槽設定圧力	550kpa
試験槽設定圧力	550kpa
乾燥空気流量	1.0L/min
(試験槽設定相対湿度)	(57%RH)
※前置飽和槽操作	
前置飽和槽設定温度	128~146℃

表2 試験条件

$T_p$ の温度が128~130℃の範囲で、飽和槽の水温 $T_1$ が低下し、それにつられるように気体 $T_2$ の温度が低下する(a)。これは飽和槽Ⅱで蒸発が起きているためである。

その後、前置飽和槽温度の上昇に伴って、飽和槽Ⅱの温度も上昇していくが、途中温度変化が緩やかになる。この間、 $T_1$ と $T_2$ の温度差がなくなっていく(c)。

前置飽和槽温度の132~136℃付近でその差がなくなり、138℃以上で飽和槽Ⅰの温度上昇が顕著に現れ、水温と水蒸気温度の高低が逆転する(b)。

前置飽和槽 ( $T_p$ )と飽和槽Ⅱ ( $T_1$ ), ( $T_2$ )温度

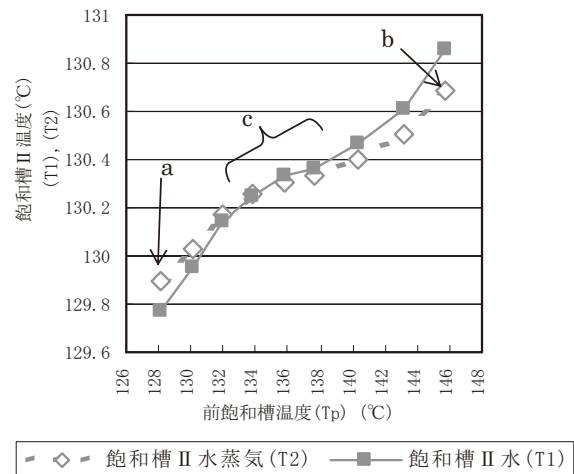


図4 前置飽和槽と飽和槽の温度の関係

(c)の範囲に飽和点があると考えられる。水温と蒸気温度差( $T_1-T_2$ )が0になる前置飽和槽の設定条件を求めるために、前置飽和槽温度 $T_p$ と、水温と蒸気温度差( $T_1-T_2$ )の関係を図5に示した。蒸気温度及び水温の測定には不確かさがあるため、図5中の各プロットに表3で求めた測定時の不確かさの幅を示した。

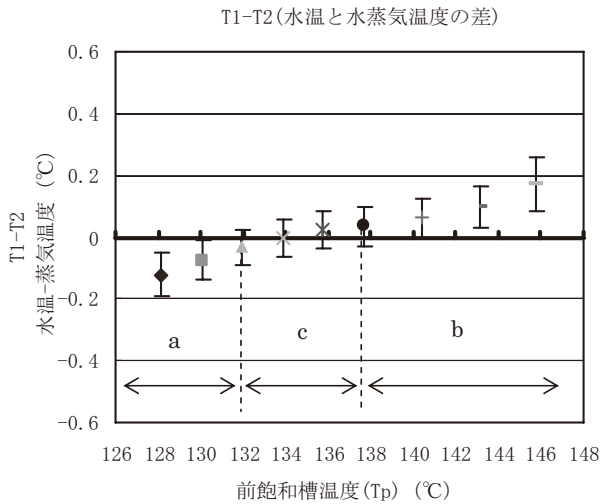


図5 前飽和槽温度と水温-水蒸気の温度差

不確かさの要因	$\sigma$ (°C)	除数
・校正	0.02887	1.732
・分解能	0.00058	3.464
・補完校正値	0.00000	1
・安定性	0.00808	3.464
・自己加熱	0.00160	1

$$u(t) = 0.060(k=2)$$

表3 水温-水蒸気の測定時の不確かさ要因

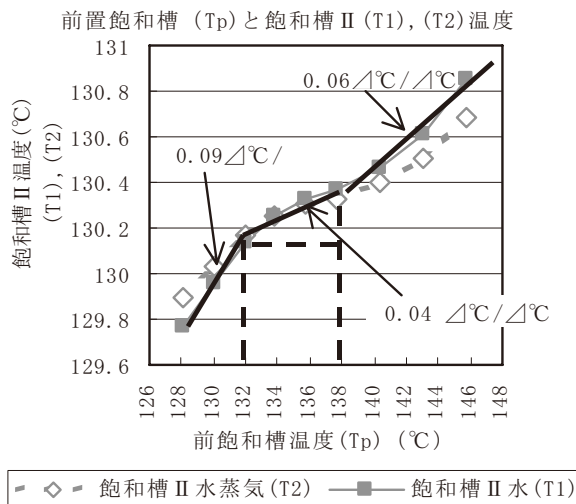


図6 前飽和槽温度と水温、水蒸気の温度

不確かさを考慮した場合、水温(T1) - 水蒸気温度(T2) = 0になる条件は前置飽和槽の設定温度で132~138°Cの範囲にあると推定される。

また、この範囲で飽和温度が、前置飽和槽温度1°Cの変化に対し、飽和槽の水温の勾配は約0.04°C/°Cで変化している(図6)。従って前置飽和槽の温度変動は飽和温度の変

動につながることになるが、この領域は前置飽和槽の温度の振れ幅(±0.1°C程度)に対し最も安定的に飽和温度が得られる領域でもある。実際(a), (b), (c)の測定時の飽和温度の安定性は(c)の領域が最も良く、図5で各プロットの不確かさの幅が小さいのは(c)の領域であり、これは飽和温度の安定性が良かったことに起因している。そのため、この領域に飽和点があると想定した。

### 5. 相対湿度の不確かさ

二圧力・二温度法による湿度発生装置の相対湿度の相対標準不確かさは不確かさの伝播則に従って、式(3)のように表わされる(JIS Z 7920)。

$$u_r(Uw) = \sqrt{u_r(Ps)^2 + u_r(Pt)^2 + \left\{ \frac{e}{e} \right\}_{ts} u(ts) \right\}^2 + \left\{ \frac{e}{e} \right\}_{tt} u(tt) \right\}^2 + u_r \left\{ e(ts) \right\}^2 + u_r \left\{ e(tt) \right\}^2 + u_r \left\{ f(Ps, ts) \right\}^2 + u_r \left\{ f(Pt, tt) \right\}^2}$$

式(3)

$u_r(Uw)$ : 相対湿度の相対標準不確かさ

$u_r(Ps)$ : 飽和槽圧力の相対標準不確かさ

$u_r(Pt)$ : 試験槽圧力の相対標準不確かさ

$\left\{ \frac{e}{e} \right\}_{ts} u(ts)$ : 温度tsの飽和蒸気圧と飽和蒸気圧の導関数の比

$\left\{ \frac{e}{e} \right\}_{tt} u(tt)$ : 温度ttの飽和蒸気圧と飽和蒸気圧の導関数の比

$u_r \left\{ e(ts) \right\}$ : 温度tsの飽和蒸気圧式の相対標準不確かさ

$u_r \left\{ e(tt) \right\}$ : 温度ttの飽和蒸気圧式の相対標準不確かさ

$u_r \left\{ f(P, t) \right\}$ : 圧力p温度t時の増加補正係数の相対標準不確かさ

第5, 6項は飽和蒸気圧式の不確かさ、第7, 8項は増加補正係数の不確かさを表す。

本稿の飽和蒸気圧式の不確かさは、IAPWS(国際蒸気性質協会)“Release on the Skeleton Table 1985, The Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance”に表されている表中のToleranceを用いた。増加補正係数は未知のため、不確かさの見積もりはこの項を省略している。

### 6. 不確かさ要因

測定的主要な不確かさ要因を表4に示す。

不確かさ要因は①測定システム②試験環境③試験行為について検討し一覧にした。

①測定システムは測定に用いた精密温度計や圧力計の不確かさである。②試験環境は、製作した装置固有の特性による不確かさであり、試験槽及び飽和槽内の温度分布、飽和槽の飽和の不完全さ、温度計の自己加熱影響を考慮した。③試験行為については、測定者が試験毎に飽和槽に給水を行う時の給水レベルと飽和槽の飽和温度への影響に関する不確かさである。

ここでは、①測定システム及び③試験行為についての詳細は省略し②試験環境について説明する。

### 6.1 飽和槽の温度分布

飽和槽内部では温度分布があり、この温度分布により、部分的な水蒸気圧分布により、相対湿度の分布が発生することになる。そのため、 $T_p$ の設定を133~136℃の範囲で飽和槽内部の温度分布を調査した。測定点を図7に示す。これらの測定点の4点を同時に測定した。

図8は飽和槽Ⅱの水温と各測定点の温度との差の関係を示している。飽和槽Ⅱの水温1℃の変化に対して、各測定点とも飽和槽の水と水蒸気の温度差は約0.3Δ℃/℃(温度差/水温)で平行に変化している。

相対湿度の算出時の、飽和温度は、これらの測定点の平均値を用いた。また、飽和槽Ⅱの水温とこれらの測定点の平均値を一次近似することにより、飽和槽の温度分布の不確かさとした。

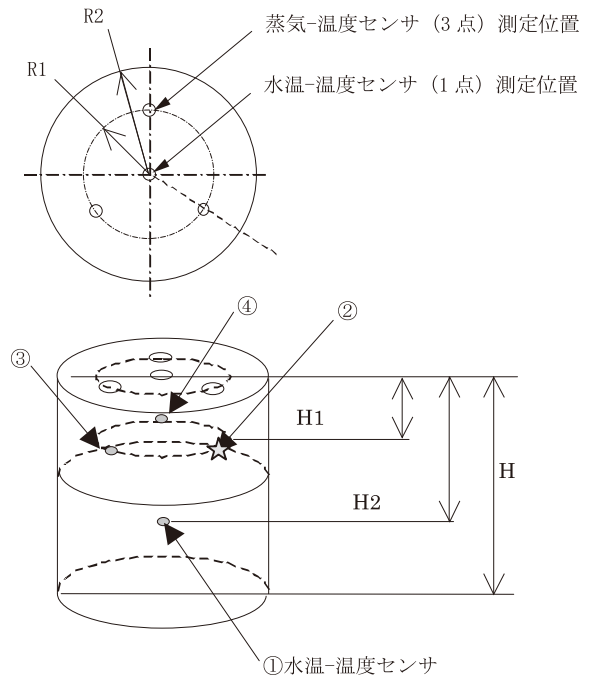


図7 飽和槽内部の測定位置

要素	番号	不確かさの要因	内容	対応
①測定システム				
	1	温度計	温度計の校正の不確かさ	○
	2		温度計の補間による不確かさ	○
	3		分解能	○
	4	圧力計	圧力計の校正の不確かさ	○
	5		圧力計の補間による不確かさ	○
	6		分解能	○
	7		温度依存性	○
②試験・環境				
飽和槽内温度	8	飽和の不完全さ	気体温度と液体温度の温度平衡の不確かさ	○
	9	温度分布	飽和槽内部の温度分布	○
	10	温度計の自己加熱	外挿による不確かさ	○
	11	短期安定性	飽和槽内温度短期安定性	○
飽和槽内圧力	12	短期安定性	飽和槽内圧力短期安定性	○
試験槽内温度	13	温度分布	試験槽内部の温度分布	○
	14	温度計の自己加熱	外挿による不確かさ	○
	15	短期安定性	試験槽内温度短期安定性	○
試験槽内圧力	16	短期安定性	試験槽内圧力短期安定性	○
空気源	17	流量変動	流量の変動による飽和温度平衡の不確かさ	■
③試験行為				
	18	給水量	飽和槽2の水位レベルによる飽和温度のばらつき	■
④その他				
	19	蒸気圧式の不確かさ	飽和蒸気圧式の不確かさ	○
	20	増加補正式の不確かさ	高圧力(空気)下における水蒸気分子及び乾燥空気分子相互作用による影響	■

○は対応 ■は非対応

表4 不確かさの要因



また飽和槽の温度分布の平均値を飽和温度とした場合、蒸気温度と水温には若干の偏差が残る。この分の偏差を水温と水蒸気の温度が一致していない不確かさとして計上した。

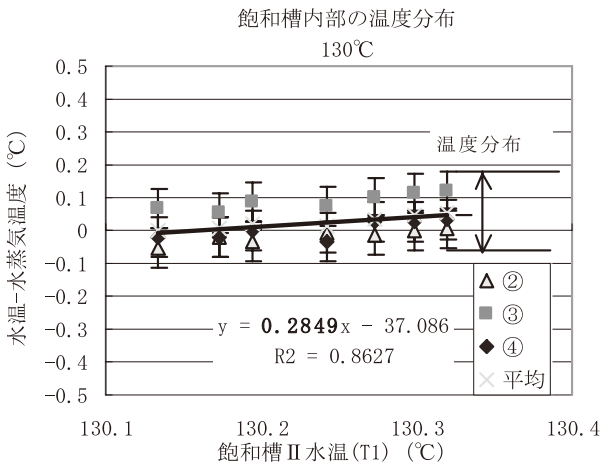


図8 飽和槽水温と飽和槽内部の温度分布

### 6.2 試験槽の温度分布

試験槽内部の温度分布を調査した。測定点を図9に示す。これらの測定点を4点同時に測定した。

繰り返し2回の測定により、温度分布は図10のようになった。

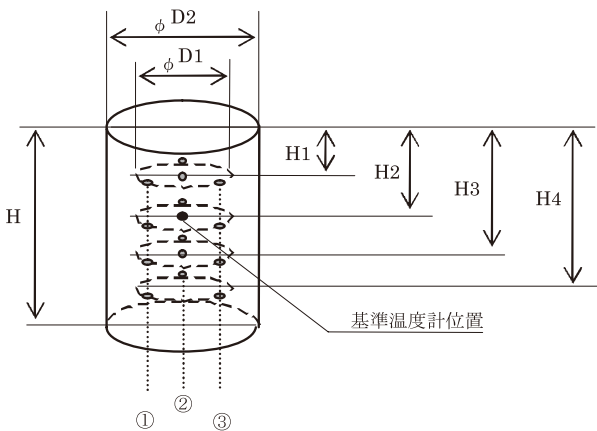


図9 試験槽温度分布測定点

試験槽の蓋の近傍で温度が著しく低下しており、また位置によるばらつきと繰り返し測定のばらつきが大きい。この付近は、外気の影響をかなり受けていると思われる。さらに高湿度で計測をする場合、結露する可能性が高いため改善の必要がある。

相対湿度の算出時の試験槽温度には、基準温度計とこれらの測定点の平均値との偏差を補正して用いた。不確かさの算出はこれらのすべての測定点を試験槽の温度分布の不確かさとして見積もった。

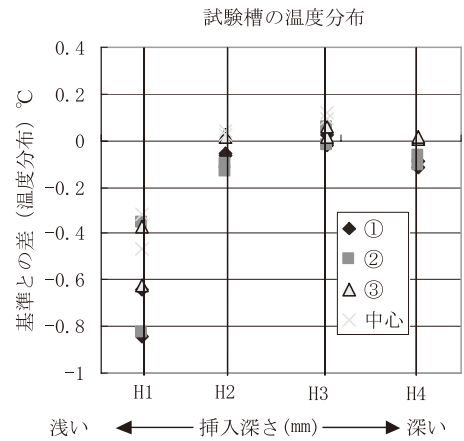


図10 試験槽の温度分布

### 7. 相対湿度の不確かさの見積もり

式(3)により相対湿度の不確かさを算出した。その一例を表5に示す。

150℃-60%RHの測定時、相対標準不確かさは1.7%RH (k=2)だった。また、各部位の温度、圧力の相対標準不確かさの寄与率を図11に示す。温度計の自己加熱の影響は、飽和槽内部、試験槽内部ともに小さく0.1%に満たなかった。最も寄与率が高かったのは、試験槽温度であった。その中でも試験槽の温度分布が大きく含め8割以上を占めている。

これは、試験槽の上部が被測定サンプルを取り付けることができるようにしており、断熱材で覆っているが、試験槽の蓋が大気中にさらされているため、試験槽の上部の温度が低くなる。そのため、上下方向の温度分布が大きくなってしまった。

しかし、これを改善し試験槽の上部の温度分布を、試験槽中部、下部と同等にした場合で試算すると、相対標準不確かさは1.0%RHに減少することが見込まれる。

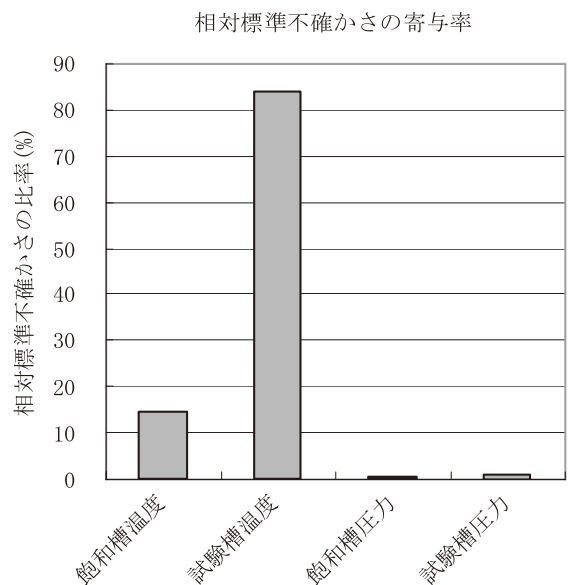


図11 相対標準不確かさの寄与率

## 8. おわりに

本稿では温度150℃圧縮空気550kPa中の湿度発生装置の不確かさを見積もった結果を報告した。

そのために飽和槽の前に前置飽和槽を設置し、飽和槽内部の蒸気の温度と水温が一致する前置飽和槽のヒーターの設定範囲を調査した。次にその範囲で飽和槽の蒸気の温度分布を調べ、温度分布の平均値から飽和温度を求めた。また温度分布の不確かさ及びその平均値が蒸気と水温が一致しない分を飽和温度の不確かさに計上した。

試験槽では試験槽の温度分布を求め、本装置で発生している相対湿度とその不確かさを求めた。

その結果、温度150℃圧力550kPa(空気)の環境で湿度60%RH±1.7%RH(k=2)という結果が得られた。またその時の寄与率を見ると試験槽の温度分布が最も大きく、不確かさをさらに小さくするためには試験槽の温度分布を改善するのがよい。しかし、今回求めた相対湿度は増加補正係数が不明なため、550kPaの空気雰囲気中という限定的な相対湿度である。

今後は圧力レベルを段階的に変化させ、この影響を調べるとともに、湿度センサ及び露点計の温度、圧力依存性を調査していく。また、長期安定性の不確かさ等、データの蓄積を行っていく。

### 参考文献

- (1) (社)日本計量機器工業連合会:湿度計測の不確かさに関する技術セミナー,「技術者養成講習会テキスト」(2003)
- (2) 日本機械学会編:湿度・水分計測と環境のモニタ, 技報堂出版, pp.16~17(1992)
- (3) JIS B 7920(2000)「湿度計-試験方法」
- (4) JIS Z 8806(2001)「湿度測定方法」
- (5) 上田政文:湿度と蒸発, コロナ社, pp.31-34(2000)

### 著者所属

伊藤 力哉      ビルシステムカンパニー  
 開発本部開発2部

石塚 保夫      ビルシステムカンパニー  
 開発本部開発2部

150℃-60%RH測定時の不確かさ													
要素	不確かさの要因		内容	飽和槽	試験槽	対応	寄与率	$\sigma_r$ (相対)	$\sigma_{rh}$	除数	単位	n	
①測定システム													
温度計(飽和槽)	温度計	温度計の校正の不確かさ	○	○	B	1.1012	0.0009	0.0289	1.73	℃	4		
		温度計の補間による不確かさ	○	○	A	0.0019	0.0000	0.0012	1.00				
温度計(試験槽)	温度計	補完時の繰り返し	○	○	A	0.0065	0.0001	0.0022	1.00				
		分解能	○	○	B	0.0001	0.0000	0.0003	3.46				
圧力計(飽和槽)	圧力計	温度計の校正の不確かさ	○	○	B	0.9028	0.0008	0.0289	1.73	℃	4		
		温度計の補間による不確かさ	○	○	A	0.0016	0.0000	0.0012	1.00				
圧力計(試験槽)	圧力計	補完時の繰り返し	○	○	A	0.0053	0.0001	0.0022	1.00				
		分解能	○	○	B	0.0001	0.0000	0.0003	3.46				
圧力計(飽和槽)	圧力計	圧力計の不確かさ	○	○	B	0.0373	0.0002	0.0866	3.46	kPa	4		
		分解能	○	○	B	0.0000	0.0000	0.0029	3.46				
圧力計(試験槽)	圧力計	温度依存性(上記に含む)	○	○									
		圧力計の不確かさ	○	○	B	0.0374	0.0002	0.0867	3.46	kPa			
圧力計(試験槽)	圧力計	分解能	○	○	B	0.0000	0.0000	0.0029	3.46				
		温度依存性(上記に含む)	○	○									
②試験・環境													
飽和槽内温度	温度分布	飽和温度代表値から求まる	○	○	A	0.3090	0.0005	0.0153	1.00	℃	5		
		温度分布の平均値の不確かさ	○	○	A	11.7844	0.0028	0.0944	1.00				
		温度分布による気体温度と	○	○	A	0.6468	0.0007	0.0221	1.00	2			
		液体温度の温度平衡の不確かさ	○	○	A	1.6598	0.0011	0.0354	1.00	3			
		繰り返し	○	○	A	0.0139	0.0001	0.0032	1.00	3			
		飽和の不完全さ	○	○	B	0.0634	0.0002	0.0069	3.46	3			
		温度計の自己加熱	○	○	A	0.1193	0.0003	0.0095	1.00	2			
		短期安定性	○	○	A	0.1193	0.0003	0.0095	1.00	2			
		飽和槽内圧力	短期安定性	飽和槽内圧力短期安定性	○	○	B	0.2855	0.0004	0.2395	3.46	kPa	16
		繰り返し	○	○	A	0.1561	0.0003	0.1771	1.00				
試験槽内温度	温度分布	試験槽内部の温度分布	○	○	A	68.5942	0.0068	0.2516	1.00	℃	15		
		繰り返し	○	○	A	13.0729	0.0030	0.1099	1.00				
		温度計の自己加熱	○	○	A	0.0114	0.0001	0.0032	1.00	3			
		短期安定性	○	○	B	0.0520	0.0002	0.0069	3.46	2			
試験槽内圧力	短期安定性	試験槽内温度短期安定性	○	○	A	0.0978	0.0003	0.0095	1.00	2			
		繰り返し	○	○	A	0.0978	0.0003	0.0095	1.00				
試験槽内圧力	短期安定性	試験槽内圧力短期安定性	○	○	B	0.5985	0.0006	0.3468	3.46	kPa	8		
		繰り返し	○	○	A	0.3661	0.0005	0.2713	1.00				
空気源	流量変動	流量の変動による			■								
③試験行為													
	給水量	飽和槽2の水位レベルによる			■								
④その他													
蒸気圧式の不確かさ	蒸気圧式	飽和蒸気圧式の不確かさ	○	○	B	0.0373	0.0002	0.0866	1.73	kPa	1.73		
		蒸気圧式の不確かさ	○	○	B	0.0373	0.0002	0.0866	1.73				
増加補正式の不確かさ		高圧力(空気)下における水蒸気分子及び乾燥空気分子相互作用による影響			■								
							$\sigma_r(k=1)$	0.82	%RH				
							$\sigma_r(k=2)$	1.73	%RH				

表5 試験槽150℃ 60%RH時の相対標準不確かさの見積もり例

# Technical Review

---

azbil Technical Review azbilグループ技術研究報告書 2009年12月発行号

---

発行日 2009年12月1日(通巻51号)  
発行責任者 岡訓仁 株式会社 山武 経営企画部広報グループ  
編集委員会 委員長：川井健司  
委員：浜野裕之、串田洋司、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、坂井幹、土橋恭彦  
事務局：石川孝志、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

©2009 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。
- 本誌に記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。

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



VOC (揮発性有機化合物) 成分ゼロの  
環境にやさしい100%植物油型インキを使用しました。

PR-1106J (0912-8K-TS)

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。