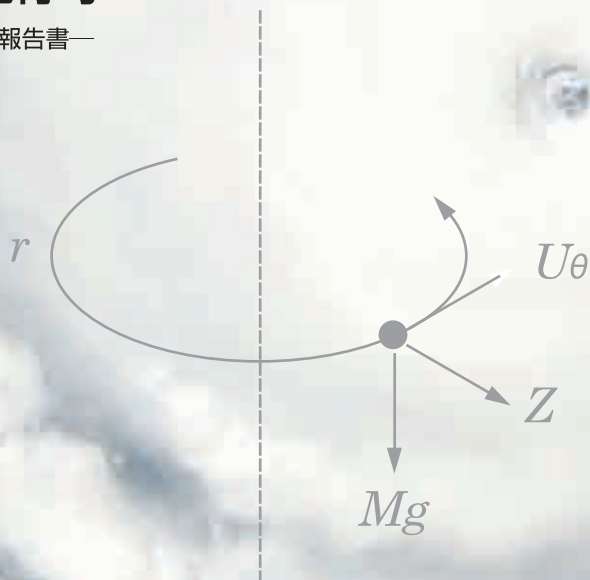


Technical Review

2011年1月発行号

azbilグループ 技術研究報告書—
azbilテクニカルレビュー



$$Z = m U_\theta^2 / r$$

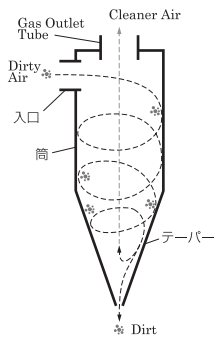
Technical Review

2011年1月発行号

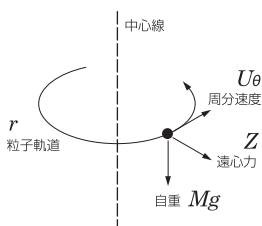
azbilグループ 技術研究報告書
azbilテクニカルレビュー

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



サイクロン方式



遠心力と周分速度、回転半径の関係

1990年代に商品化された「サイクロン式」掃除機は、従来型の「フィルタ式」にあった、フィルタ交換の手間や、目詰まりによる吸引力の低下を無くし、さらに花粉などの微粒子も排除できる画期的なものとして注目を浴び、現在も多くの電機メーカーが開発、発売しています。

サイクロン式掃除機のゴミを分別する仕組みは、遠心力を利用した遠心分離機の応用で「サイクロン方式」を利用したものです。筒状の分離装置の中で高速で空気を回転させることから、自然界のサイクロン(つむじ風)の名が利用されたとされています。

サイクロン方式は、1886年にアメリカのモース(M. O. Morse)により発明され、その応用範囲は広く、掃除機のみならず、工業用にも粉塵分離機などの用途でも使用されています。

これは筒状の容器の中で物体(ゴミ)を含む空気を高速回転させ、遠心力で筒の外壁に追いやられた物体を落下させて回収、その後の綺麗な空気を上部から排出するというものです。

物体が回転すると遠心力(Z)が発生します。その回転速度(U θ)が速いほど遠心力が強くなり、より軽い物体(微粒子)も外壁に追いやることができます。筒の下方はテーパ状に絞られていますが、回転半径(r)が小さくなると遠心力が増すため、その部分に到達した空気は強い遠心力の中に入り、さらに細かい粒子も分別できるようになります。

ここで発生する遠心力は重力の数倍にもなると言われています。この強力な力を利用し、フィルタでは取り除けなかった微粒子のゴミも排除できるようになりました。

Contents

巻頭言：制御からのイノベーション「グローバル制御」の実現に向けて …………… 1
東京大学 情報理工学系研究科 教授 原 辰次

省エネルギー技術

CO₂ 管理を支援する小規模建物向けビルディングオートメーション・システムの開発 …… 2
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー 真木 義郎
ASP 型省 CO₂ サービスと学習型熱源最適化制御 …………… 10
株式会社 山武 近田 智洋 西口 純也 株式会社 山武 ビルシステムカンパニー 平田 眞基 太宰 龍太 中村 瑞 小野寺 博
無線圧力発信器低消費電力化技術の開発 …………… 16
株式会社 山武 木下 靖彦 瀬川 進 田辺 樹 鄭 立
熱源最適化コントローラのためのシミュレーション技術開発 …………… 22
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー 松尾 裕子

計測制御技術

サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発 …………… 28
株式会社 山武 関根 正志 石原 卓也 差波 信雄 谷 武夫
サファイア高温隔膜真空計の開発 …………… 34
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー 吉川 康秀 原田 英史 市原 純 長田 光彦 株式会社 山武 山口 徹
微小流量向け熱式流量センサの開発 …………… 42
株式会社 山武 池 信一
電気式温度調節器の設計技術研究 …………… 48
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー 末武 雅俊 石塚 保夫 東京電機大学 藤田 壽憲
ワイヤレス VAV/FCU システムの開発 …………… 54
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー 柏屋 弘 水高 淳
ドライガス測定ニーズに応える低露点計測技術の向上 …………… 60
株式会社 山武 山口 徹 中垣内 直美 株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー 井端 一雅 金井 良之

安全安心実現のための技術

燃焼安全制御技術を用いたコントローラの開発 …………… 70
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー 熊澤 雄一

生産性向上のための技術

製造データの超効率的解析による高収益生産への挑戦 …………… 76
株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー 山縣 謙一 黒澤 敬 村上 英治
蒸気弁の差圧比係数の検討及びバルブ選定用ソフトウェアの開発 …………… 82
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー 野間口 謙雄 佐藤 慶大 新谷 知紀 加藤 瑞樹 大矢 公紀
社内試作部門の工程管理システムの開発 —見える化の促進とデータベースリンク— …………… 90
株式会社 山武 福辺 卓史 佐藤 一太郎
開発現場の主体的活動によるプロセス支援システムの開発 …………… 94
—プロジェクトへの外乱を含めた計画管理・実施と現場意識の向上— 株式会社 山武 ビルシステムカンパニー 多田 朋之

Contents

Preface:Innovation from Control: Toward Realization of "Globalocal Control"	1
Professor, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo	Shinji Hara

Energy-saving Technology

A Building Automation System for CO₂ Management in Small-Scale Buildings	2
Building Systems Company, Yamatake Corporation	Yoshio Maki
CO₂ Reduction Solutions via ASP and Adaptive Optimization for Variable Water Temperature	10
Yamatake Corporation	Tomohiro Konda Junya Nishiguchi
Building Systems Company, Yamatake Corporation	Masaki Hirata Ryota Dazai Mizu Nakamura Hiroshi Onodera
Development of Low Power Consumption Technology for Wireless Pressure Transmitters	16
Yamatake Corporation	Yasuhiko Kinoshita Susumu Segawa Itsuki Tanabe Li Zheng
Development of Simulation Technology for a Heat Source Optimization Controller	22
Building Systems Company, Yamatake Corporation	Yuko Matsuo

Measurement and Control Technology

Development of the Sensor Chip and Package for a High-Temperature Sapphire Capacitance Diaphragm Gauge ...	28
Yamatake Corporation	Masashi Sekine Takuya Ishihara Nobuo Sashinami Takeo Tani
Development of a High-Temperature Sapphire Capacitance Diaphragm Gauge	34
Advanced Automation Company, Yamatake Corporation	Yasuhide Yoshikawa Hidefumi Harada Jun Ichihara Mitsuhiko Nagata
Yamatake Corporation	Toru Yamaguchi
Development of a Micro Thermal Flow Sensor with a Microchannel	42
Yamatake Corporation	Shinichi Ike
Research on Electric Room Temperature Controller Design Technology	48
Building Systems Company, Yamatake Corporation	Masatoshi Suetake Yasuo Ishizuka
Tokyo Denki University	Toshinori Fujita
Development of a Wireless VAV/FCU System	54
Building Systems Company, Yamatake Corporation	Hiroshi Kashiwaya Jun Mizutaka
Progress in Low Dew Point Measurement Technology for Dry Gases	60
Yamatake Corporation	Toru Yamaguchi Naomi Nakagaichi
Advanced Automation Company, Yamatake Corporation	Kazumasa Ibata Yoshiyuki Kanai

Technologies for Realizing Safety and Peace of Mind

Controller Development Using Combustion Safety Control Technology	70
Advanced Automation Company, Yamatake Corporation	Yuichi Kumazawa

Technology for Better Productivity

Meeting the Challenge of High-Profit Production by Super-Efficient Manufacturing Data Analysis ...	76
Advanced Automation Company, Yamatake Corporation	Kenichi Yamagata Takashi Kurosawa Eiji Murakami
Study of Pressure Differential Ratio Factor of a Steam Control Valve, and Development of Valve Selection Software ...	82
Building Systems Company, Yamatake Corporation	Yoshio Nomaguchi Keita Satou Tomonori Shintani Mizuki Katou Cokey Oya
Development of a Process Control System for a Trial Manufacturing Department	90
- Acceleration of Visualization and Data Utilization by Exchanging Databases Links -	
Yamatake Corporation	Takashi Fukunabe Ichitaro Satoh
Construction of a Process Support System Through Independent Activity at a Software Development Site ...	94
- Project management that allows for interruptions; on-site consciousness-raising -	
Building Systems Company, Yamatake Corporation	Tomoyuki Tada

巻頭言

制御からのイノベーション： 「グローバル制御」の実現に向けて

東京大学
情報理工学系研究科
教授

原 辰次



近年、科学・技術に期待されているのは、「エネルギー・環境・医療問題などの社会的課題の解決」に向けたイノベーションである。私が専門とする制御工学・システム制御理論も例外ではない。制御理論は、ワットの蒸気機関におけるガバナーの安定化を出発点として、古典制御・現代制御、ロバスト制御、非線形制御、ハイブリッド制御と進化を続け、先端科学技術の進展に大きく貢献してきた。日本における制御も、私が卒業した東工大の制御工学科が本年、また私の研究を育ててくれたSICE（計測自動制御学会）が来年、それぞれ50周年を迎える。この半世紀の間、様々な形で科学技術立国としての日本の発展を支えてきた。

一昨年SICE副会長就任を期に、「SICE Anytime Everywhere」という標語を提案した。その心は、SICEがカバーする「計測・制御・システム情報・システムインテグレーション」は、いかなる分野の先端科学技術の発展に欠かすことのできない重要な分野であり、今後その需要や期待は大きく増大していく、という認識である。会長時代はこれを意識し、SICEがその要請に応え、未踏の先端科学技術をリードしていく姿を描いてきた。

研究者としての一つの結論として、新学術領域「グローバル制御」の創成を昨年提唱した。「グローバル」とは、グローバルとローカルを併せた言葉で、「ローカルな計測と制御でグローバルな機能の実現」を目指すものである。これは、「高機能製品の実現」を目指したこれまでの制御から「社会的課題の解決」に貢献する制御へのパラダイムシフトであり、ゴールは「大規模・複雑な社会的課題の解決に向けた新しいシステム理論の創成と系統的・体系的な方法論の確立」にある。

解決すべき社会的問題の対象は、一般に大規模・複雑な動的システムである。このような実世界に対して、計測は局所的にしかできず、また制御も局所的な作用に限定される。このような状況でシステム全体の状態を望み通りにするために重要となるのは、システム全体の状態を予測する機能である。すなわち、ローカルに計測し、その観測量に基づいてグローバルな状態を予測し、そのグローバルな予測値に基づいてローカルに制御するのが「グローバル制御」の基本的アイデアである。その実現のためにはいかに系統的に行う方法論（新しいシステム制御理論）が提供できるかが鍵となる。

例えば、世界規模で人類が直面している地球温暖化問題の一つである「ヒートアイランド対策」を考えてみよう。動的に変化する「都市環境」を最適にすることが目的であるが、それには個々のビルや道路など都市のローカルな構成要素を制御し、街区・地域など適切な階層の環境を最適化する必要がある。しかし、計測できるのは、空間的に分散配置された温度センサや風速センサであり、制御も局所的にならざるを得ない。このとき、何を、いつ、どれだけの分解能で、どのように、計測・制御するかが重要となる。

これを階層的に考えると、ビルの空調からビル全体のエネルギーシステム設計へ、工場のエネルギー循環系の最適化へ、さらには地域の環境問題へと広がっていく。このようなことが系統的に実現できることを夢見ている。

原 辰次（はら しんじ）

1976年東京工業大学大学院制御工学専攻修士課程修了。日本電信電話公社、長岡技術科学大学を経て、1984年東京工業大学助教授、1992年同教授、2002年東京大学教授、現在に至る。ロバスト制御理論、大規模系の分散協調制御、生物制御、計算機援用設計などの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会・IEEE・IFACフェロー、SICE会長(2009年)、IEEE CSS副会長(2009-2010年)。

CO₂ 管理を支援する小規模建物向け ビルディングオートメーション・システムの開発

A Building Automation System for CO₂ Management in Small-Scale Buildings

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

真木 義郎
Yoshio Maki

キーワード

savic-net FX mini, FX, 小規模, CO₂ 管理, ビルディング・オートメーション・システム

エネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネ法）の改正により、小規模の建物においても省エネルギー・省 CO₂ が求められる時代が到来した。一方、既存システムも 1990 年代納入分を中心に更新時期を迎えており、更新需要も高まっている。この様な時代背景において、小規模建物における省エネ・省 CO₂ の要請に応え、既存システムの更新により省エネ・省 CO₂ を促進するため、CO₂ 管理を支援する小規模建物向けビルディング・オートメーション・システム savic-netTM FX mini を開発したので、その概要を紹介する。

As a result of the revision of Japan's energy conservation law (Act on the Rational Use of Energy), energy conservation and CO₂ reduction will be required even of small-scale buildings. Moreover, since the replacement period for our products that were launched in 1990 has arrived, there is an increasing replacement demand. Against this backdrop, we have developed "savic-netTM FX mini," a system that calculates and reduces energy consumption and CO₂ emissions and is swappable with existing models, allowing us to meet the demand for energy savings and CO₂ reduction for small buildings. This paper summarizes the development of the system.

1. はじめに

省エネ法の改正により、2009 年 4 月から従来のエネルギー指定管理工場ごとの規制に加え、事業者単位（企業）での総量管理と消費エネルギーの原単位の削減も求められることとなった。

この法律改正に対応するために、中・大規模ビルにおいては BEMS (Building and Energy Management System) の機能強化によりエネルギー・CO₂ 排出量管理が可能となるが、設備投資の厳しい小規模ビルにおいては、ビルごとに BEMS を入れることは難しい。そのため、小規模ビルでは BEMS 機能を内蔵し、設備監視からエネルギー使用量・CO₂ 排出量の管理、削減まで実現できるオールインワンのシステムが望まれている。また、複数の小規模ビルをまとめてエネルギー管理したいという要求もある。

一方、既存システムも 1990 年代納入分を中心に更新時期を迎えており、更新需要も高まっている。

この様な時代背景において、小規模建物における省エネ・省 CO₂ の要請に応え、既存システムの更新により省エネ・省 CO₂ を促進するため、CO₂ 管理を支援す

る小規模建物向けビルディング・オートメーション・システム savic-net FX mini を開発した。

savic-net FX mini は、

- ①エネルギー・CO₂ の見える化
- ②簡単監視・簡単操作
- ③簡単更新・簡単システム拡張

の 3 つのコンセプトに加え、高品質を達成する取り組みを実施している。その概要を紹介する。

2. savic-net FX mini の概要

savic-net FX mini は、延床面積 10,000m² 規模（管理点数 500 点）の建物を対象とした中央監視装置であり、図 1 のシステム構成例のように空調機コントローラや熱源コントローラをはじめとした各種機器が接続・監視可能である。メインの監視装置である SCSmini (System Core Server mini) には Web サーバを搭載しており、監視用パソコンの Web ブラウザを利用して設備監視を行うことができる。

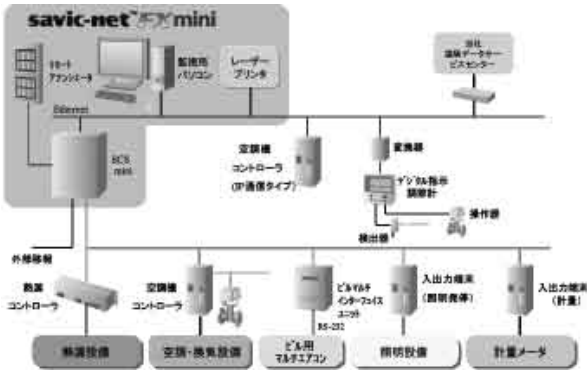


図1.savic-net FX mini システム構成例

機能面では、表1に示すように警報監視などの中央監視装置に求められる機能はもちろん、各種装置の運転状態を把握するのに十分な監視機能を装備しており、空調や電気に関わる範囲で各種制御機能も有している。また改正省エネ法に対応すべく、省エネ・省CO₂のためのエネルギー管理機能も充実している。それらのオペレータインターフェースとして豊富な画面(図2)も提供している。

表1. savic-net FX mini 機能一覧

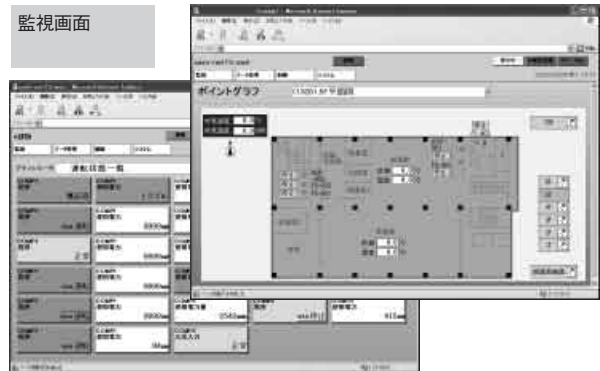
機能	項目	機能概要	
システム	Web機能	Webブラウザによる基本操作と監視	
管理点数	実ポイント:500点	実入出力ありの最大監視ポイント数	
監視	ソフトウェア	発停・設定操作	運転/停止、温度設定、モード切替等の操作、状態の表示
	アラームシエータ表示(集合表示灯)	警報処理	故障機器の点滅表示、ブザー鳴動
		アナログの計測値	温度センサーの計測値の監視
		積算の計測値	電力量、熱量などメータの計測値の監視
		アクセスレベル管理	「表示のみ」表示+操作」性、監視レベルのパスワード設定
		ポイントグラフ表示	グラフィック画面でのポイント状態表示
		ポイントグラフ編集	ポイントグラフ上の表示位置・背景面の編集
		ポイント一覧表示	ポイント種別で一覧表示
		計測値上下限・偏差監視	上下範囲範囲から外れたら計測値の監視(警報発報)
		運転時間・投入回数積算	機器の運転時間、投入回数管理
		連続運転時間監視	給排水ポンプなど連続運転時間を監視、超過時は警報発報
		外部移機	警報発生時に一括警報を挿点番号で出力
	警報E-mail通知	発生警報のE-mailによる通知	
制御	共通	カレンダー制御	平日、休日、特別日1、特別日2のカレンダー情報を管理
		タイムプログラム制御	機器の運転スケジュール制御
		イベントプログラム	設備機器間の運転運転/停止制御
	空調	数値演算	計測点や積算点の四則演算(+、-、x、÷)結果の出力
		論理演算	運転状態点、計測点の論理演算(AND、OR)結果の出力
		季節切替制御	空調・熱源制御用季節モードの年間スケジュール制御
		設定値スケジュール制御	室温設定値の年間スケジュール制御
		空調機最速起動停止制御	空調機立ち上り時のウォーミングアップ時間短縮と早めの停止制御
		熱源最速起動停止制御	空調機最速起動停止と連携した熱源機運転停止制御
		新風運転制御	室内温度が維持できる目標範囲内で空調機間欠運転制御
受電電	外気冷房制御	室内と外気を比較して、外気冷房有効/無効の判断制御	
	停電電処理	停電時の警報抑制、復電時の復旧処理	
	電力デマンド制御・履歴	目標デマンド値の超過抑制(停止、インバータ出力の絞り)制御	
防災	力率改善制御	力率低下の改善(逐相コンデンサの投入/逐断)制御	
	自家発負荷配分制御	自家発負荷余裕時の優先機優先運転/停止制御	
	火災処理	空調・換気設備などの停止、復旧処理	
データ管理	システム履歴	警報、状態変化、操作設定の履歴を管理	
	96時間データ表示・蓄積	全点、過去96時間分のデータを蓄積	
	96時間データ出力	全点、過去96時間分のデータをCSV形式でファイル出力	
	ファンポイントトレンド表示	ポイントごとに蓄積データをトレンド/バーグラフで表示	
	1分マルチトレンド表示	室温設定と計測値など1分蓄積データを同時に6点まで表示	
	日半年報表示・蓄積・出力	日半年報データを蓄積、CSV形式でファイル出力	
	日半年報印刷	日・月・年報を標準形式で印刷(プリンタ、PDFファイル蓄積)	
	エネルギー・CO2換算	発熱量・原油換算値・CO2排出量に換算する係数を管理	
	使用量演算	エネルギー種別ごとにエネルギー使用量を加減算処理	
	エネルギー・CO2総量演算	複数のエネルギー使用量を、発熱量などに換算して合計	

エネルギー管理機能を用いてエネルギー使用量・CO₂排出量を把握した後は、エネルギー使用量・CO₂排出量を削減していくことになる。savic-net FX miniではsavic-net FXのもつ豊富な省エネメニュー(表2)を利用できるようにした。それにより、オフィスビルはもちろんのこと、商業ビル、病院、工場、学校など建物の特性に応じてメニューを組み合わせてエネルギー使用量・CO₂排出量を削減することが可能である。

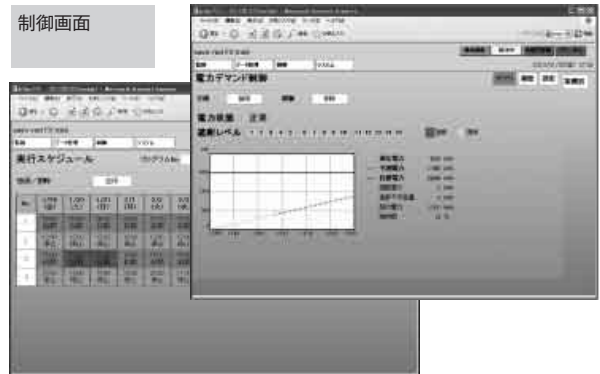
表2. 豊富な省エネメニュー

豊富なメニューで、ビル全体の省エネアップ			
電気・床下設備の省エネ	空調機設備の省エネ	空調/水連立設備の省エネ	室内環境による省エネ
<ul style="list-style-type: none"> 電力デマンド制御 力率改善制御 閉鎖全灯/半灯タイムプログラム制御 	<ul style="list-style-type: none"> 熱源機台数制御 熱源機過熱停止制御 送水温度設定制御 冷却水流量制御 フリークーリング制御 蓄熱調整運転制御 	<ul style="list-style-type: none"> 換気ポンプ台数制御 指定末端圧制御 流量計測制御電圧付アクティブバルブによる空調機ニール流量制御(インテリコネクト) 空調機変風量(VAV)制御 ファン回転数制御 一般気温度ロードリセット制御 緊急換気ファンCO2濃度制御 	<ul style="list-style-type: none"> タイムプログラム制御 空調機最速起動停止制御 外気冷房制御 新風運転制御 自然換気制御 最小外気吸入率制御(CO2濃度制御) ゼロエネジャーベンド制御 設定値スケジュール制御 緊急ロック防止制御 恒温恒湿制御

監視画面



制御画面



データ管理画面

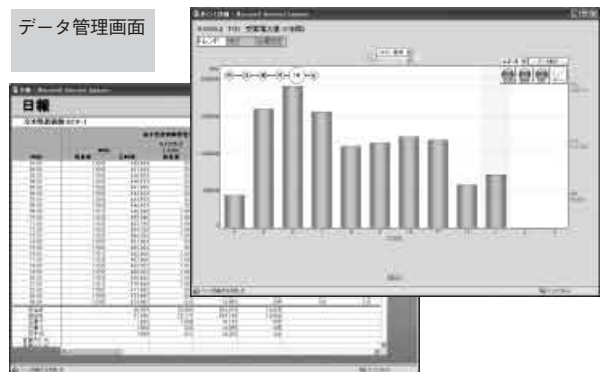


図2. 豊富な画面群

3. エネルギー・CO₂の見える化

省エネ法、地球温暖化対策の推進に関する法律(温対法)の改正に伴い、ビル全体のエネルギー使用量を把握し、省エネ・省CO₂活動を実施する必要がある。savic-net FX miniではエネルギー・CO₂を見える化し、ビル全体のエネルギー使用量・CO₂排出量を容易に把握できる機能を提供している。

(1) エネルギー・CO₂の見える化

省エネ・省CO₂活動は以下の作業を繰り返し実施することでエネルギー使用量・CO₂排出量を削減していく活動である。

- ①エネルギー使用量、CO₂排出量の把握
- ②対策の実施
- ③対策結果の評価

①のエネルギー使用量、CO₂排出量の把握では、エネルギー使用量、CO₂排出量を見たいときにすぐに、容易に把握できることが重要である。

エネルギー使用量、CO₂排出量をすぐに見えるようにするため、図3のようにオペレータが常時見ている監視画面からワンクリックで現在の電力量をグラフ表示できるようにしている。また、データシート形式で見たい場合にも対応するため、ワンクリックで日月年報を表示できるようにしている。

エネルギー使用量、CO₂排出量を容易に把握できるようにするために、グラフの表現力を高めている。図4のように電力量のグラフ表示からワンクリックでエネルギー使用量、CO₂排出量、原油換算量へのグラフに切替ができ、また、今月の使用量や今年の使用量を容易に把握できるように累計値もグラフ表示している。

このようにして把握した結果を元に対策②を実施する。その後、③の対策結果を評価する際にも、対策結果を容易に把握できるように、グラフ上で過去データとの比較表示を出来るようにしており、さらに図4のように比較結果をグラフ上に分かりやすく表示している。

一方、複数の電力量の情報をまとめて見たい場合や、電力量とCO₂排出量、エネルギー使用量、原油換算量の推移をまとめて見たい場合もある。その際には、図5のようにデータシート形式の日月年報表示で見ることできる。この日月年報の画面は後述するヒストリカルツールを利用して、帳票形式で印刷して管理することもできる。



図3. 監視画面からのグラフ・日月年報表示

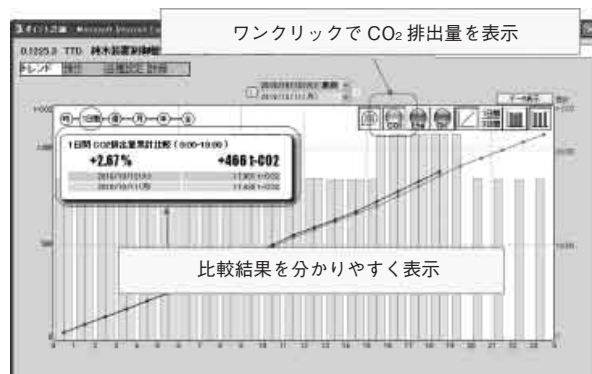


図4. トレンドグラフの比較表示



図5. 日月年報のCO₂排出量等の同時表示

(2) ビル全体のエネルギー使用量の算出

省エネ法、温対法の改正に伴い、ビル全体のエネルギー使用量・CO₂排出量(総量)を把握する必要がある。その算出方法を説明する。

まず総量を演算する前段階として、savic-net FX miniはビルで使用した燃料、熱、ガス、電気などの各種メータのエネルギー使用量を管理点としてシステムに取り込む。メータからのデータ取込みができないシステムについては、手入力エネルギーデータをシステムに投入することも可能である。取り込まれたエネルギー使用量は、システム内でデータ蓄積され、エネルギー・CO₂換算機能(図6)によりエネルギー換算値、CO₂換算値、原油換算量に変換される。さらに、エネルギー・CO₂総量管理機能(図7)で、ビル全体の総量または該当系統ごとに集計される。これらの値は前述のトレンドグラフや日月年報でリアルタイムに画面表示可能であり、総量または該当系統におけるエネルギー使用量の経緯を随時、的確に把握できる。

演算結果の用途としては、エネルギー消費量を的確に把握するだけでなく、原油換算値であれば省エネ法対応の報告書作成に利用することができ、CO₂換算値であれば温対法や東京都の東京都環境確保条例の報告書作成に利用することができる。

なお、総量データの算出方法として、単純に各メータの合計値として算出することも可能ではあるが、電力量に関しては夜間の買電(22時～8時)は昼間買電(8時～22時)よりも省エネ法対応上の一次エネルギー換算係数が低く設定されているのに対応し、同じメータからの入力であっても時間帯別に分別できる機能も装備した。また、同一建物内であっても、テナント分と共用分を切り分けるなどのニーズにも柔軟に対応される様、メータ入力同士の減算にも対応した(例えば受電電力量計とテナント分の電力量計が設置されている場合、受電分からテナント分を引けば、共用部の電力量を計算できる)。これにより、より正確かつ厳密なエネルギー管理が可能である。



図 6. エネルギー・CO₂換算設定画面



図 7. エネルギー・CO₂総量演算設定画面

4. 簡単操作・簡単監視

小規模ビルでは非専任オペレータが操作することが多いと想定されるため、オペレータが直感的に簡単に操作できる必要がある。

そのため、savic-net FX miniでは設備の状態を簡単

に監視、操作できるシンプルで分かりやすい監視機能と、設備の動作履歴やエネルギー使用量・CO₂排出量等を簡単に印刷したり、長期データ蓄積ができるデータ管理機能を提供している。

(1) 簡単監視のソフトウェアアナウンサー

設備の状態を簡単に監視、操作できる基本機能がソフトウェアアナウンサー機能である。

ソフトウェアアナウンサーでは、1つの設備の状態を1つのボタンで表現し、それを複数並べて表示する。高齢の管理者や離れた場所からでも一目で把握できるように、ボタン全体の色を変化させて設備の状態を表現している(従来システムはボタン内の一部の色のみ変化していた)。

ボタンをクリックすることで操作画面やトレンドグラフ画面を表示でき、設備の発停操作やエネルギー使用量、CO₂排出量の把握が簡単に行える。また、オペレータが自由に設備をグループ化したり、ボタンの配置も設定できるため、オペレータ自身で監視しやすい画面を構築することができる。



図 8. ソフトウェアアナウンサー画面

設備の運転状態は、文字(運転/停止)と背景色の变化で分かりやすく表示し、警報発生時には背景色が点滅するとともにブザーが鳴動することで直感的に異常が起きたことが分かるようにしている。

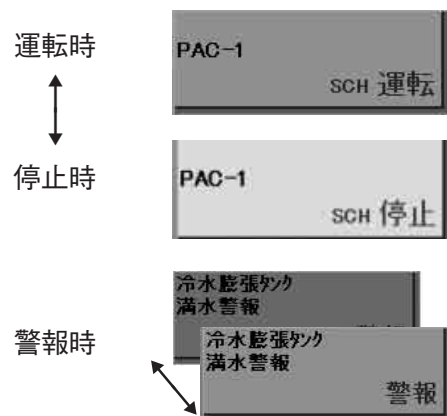


図 9. ソフトウェアアナウンサーの表示

(2) グラフィカル監視のポイントグラフ

設備の状態を平面図/断面図/系統図など、グラフィック形式で表示して監視、操作を行うのがポイントグラフ機能である。

ポイントグラフでは、前述のソフトウェアアナシエータと同様に、設備の状態を高齢の管理者や離れた場所からでも一目で把握できるように、色や表現方法を工夫している。

ポイントグラフを構成している絵・文字・線などのパーツは静止画と動画の2つに分類される。動画は設備の運転状態や設定値、計測値、積算値といったシステムが監視している設備の状態を表す管理点動画と、他のグラフに遷移するためのリンク動画に分かれる。部屋レイアウトや空調機シンボル、空調機名称などは静止画となる。

上位機種の savic-net FX では空調機シンボルなども管理点動画として定義可能だが、savic-net FX mini では設備の状態をより分かりやすく表現するために、管理点動画を統一している。具体的には、図 10 のように、形状を四角で統一し、さらに静止画とコントラストをつけることで、静止画上で管理点動画を目立たせ、設備の状態を一目で把握できるようにしている。

ソフトウェアアナシエータとポイントグラフを併用して監視する場合や、ソフトウェアアナシエータからポイントグラフに監視方法を切り替える場合も想定される。その際にもオペレータが戸惑うことなく簡単に監視できるようにするため、管理点動画の色とクリック時の動作はソフトウェアアナシエータと共通化している。

部屋の間仕切りの変更や、テナントの入れ替えによる名称変更などにも対応できるように、静止画や動画は専用のエンジニアリングツール(ポイントグラフジェネレータ)を使ってオペレータが自由に変更することができ、オペレータ自身で監視しやすい画面を構築することができる。



図 10. ポイントグラフ画面

このポイントグラフジェネレータは、上位機種の savic-net FX 用のツールと操作方法を共通化しており、

savic-net FX のツールに慣れた人であれば、マニュアルを見なくても作業できるようにしている。さらに動画の位置を分かりやすく表示するイメージ表示機能や、設定項目をできるだけ少なくする等の工夫を行っており、オペレータが簡単に操作できるようにしている。



図 11. ポイントグラフジェネレータ

(3) 長期データ蓄積と汎用ファイル出力

SCSmini には 96 時間分の 1 分データや最大 10 年分の日月年報データを蓄積している。それ以上の長期データを蓄積したり、CSV ファイルや PDF ファイルといった汎用ファイルへの出力、及び紙への印刷をするためにはパソコン上で動作する専用のツール(ヒストリカルツール)を利用する。

ヒストリカルツールは SCSmini 本体からパソコンにダウンロードでき、設定情報も自動作成するためダウンロード後、すぐに利用できる。

ヒストリカルツールは SCSmini が蓄積している設備の動作履歴や 1 分データ、日月年報データなどのデータをパソコンに取りだし、CSV ファイル、PDF ファイルでデータ出力したり、紙に印刷することができる。さらに、自動設定をすることで自動的にパソコン上で動作し、オペレータが何も操作しなくても、毎日、自動的に日報を印刷したり、CSV ファイル、PDF ファイルでデータ出力することができる。出力されたデータはハードディスクに保存されるため、ハードディスク容量の制限内で長期間のデータ蓄積が可能である。

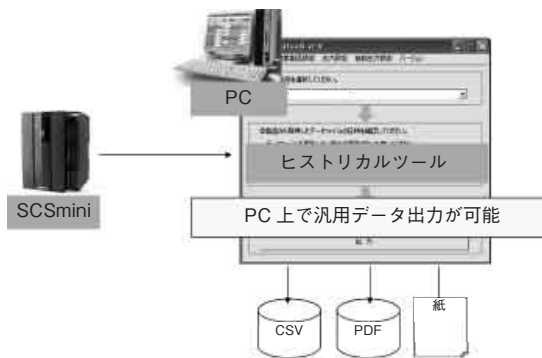


図 12. ヒストリカルツール

図 13. 日報印刷

5. 簡単更新・簡単システム拡張

既存システムからの更新では、低コストで簡単に短時間で更新できることが重要である。

そのため、savic-net FX mini では一部の既存システムのハードウェア資産を再利用可能としており、低コストで簡単に短時間で更新するための機能を提供している。また、更新の付加価値として、柔軟な拡張性も実現している。

(1) ハードウェア資産の再利用

既存システムでリモートアンサンシエータを使用している場合に、リモートアンサンシエータと幹線はそのまま、SCSmini に差し替えるだけで継続して利用可能としている。また、新規に savic-net FX 用のリモートアンサンシエータに更新したい場合にも対応している。このリモートアンサンシエータの再利用機能により、使い慣れた既存システムのハードウェア資産をそのまま継続利用でき、更新時間の短縮と更新コストを低減することができる。

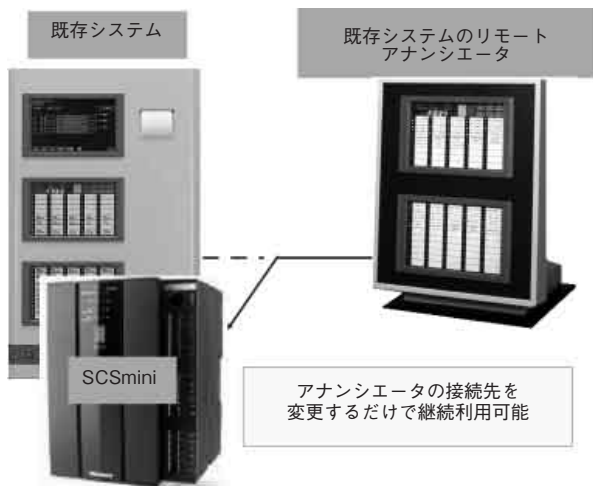


図 14. リモートアンサンシエータの再利用

(2) 既存システムの設定データの自動変換

既存システムから簡単に短時間で更新ができるよう

に、既存システムの設定データを savic-net FX mini 用に自動変換することができる。さらに自動変換が難しい情報は帳票出しする機能も用意している。それにより既存システムの設定内容を確実に savic-net FX mini に引き継ぐことができる。

(3) savic-net FX への接続性・拡張性

savic-net FX mini は 2 章で述べた単体の構成だけでなく、savic-net FX への柔軟な接続性と拡張性を持っている。例えば、複数の小規模ビルに savic-net FX mini を設置し、それらをまとめて管理ビルの savic-net FX で管理することも可能である。また、savic-net FX mini で納入した後に管理点数が増えて savic-net FX mini で収まりきらなくなった場合も、SCSmini を MIS (Management Integration Server) + SCS (System Core Server) に更新することで、それ以外の設備は変更せずに拡張可能である。

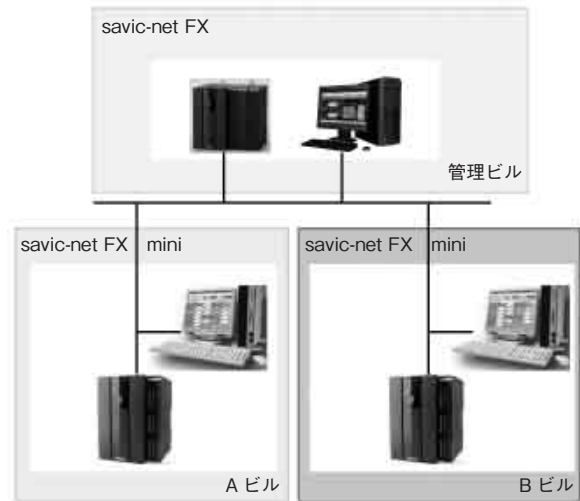


図 15. savic-net FX システムへの接続例

(4) CO₂ マネジメントシステムへの接続性

複数の小規模ビルをまとめてエネルギー管理するには、CO₂ マネジメントシステム（事業者全体の温室効果ガス排出量やエネルギー消費量の総量把握・管理を支援する当社山武のインターネット ASP（アプリケーション・サービス・プロバイダ）サービスを利用することができる。CO₂ マネジメントシステムでは小規模ビルに設置されている savic-net FX mini のデータを当社山武のデータセンターで収集し、インターネットを通じて、お客様のパソコンから、お客様が所有されている複数の小規模ビルのエネルギー使用量・CO₂ 排出量をまとめて管理することができる。

その CO₂ マネジメントシステムに低コストで簡単に接続するために、従来の接続方式では小規模ビル側に専用のデータ収集 PC を設置し、その PC を介してデータセンターに接続していた。savic-net FX mini ではデータ収集 PC を設置せずに直接データセンターと接続で

きるようにしている。この接続機能はCO₂マネジメントシステムのエネルギーデータ自動収集端末機「CO₂モニタリングターミナル」にも活かされている。

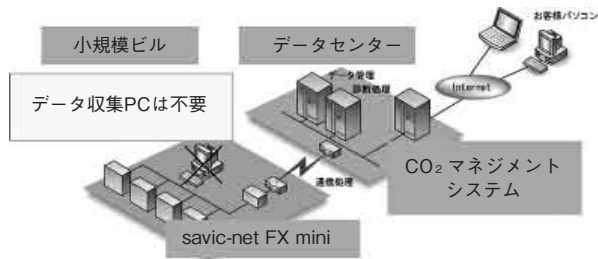


図 16. CO₂ マネジメントシステム接続

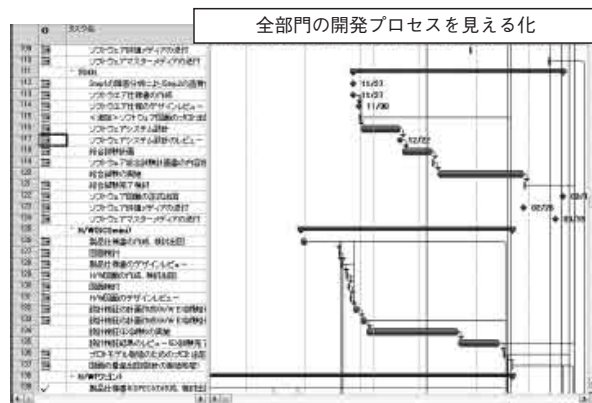


図 17. プロジェクト管理ツールで一元管理

6. 高品質

近年、品質への要求は高まり続けている。特に小規模ビルは常駐管理者がない場合もあり、竣工後にシステムに問題が発生すると気づくのが遅れる可能性があるため、従来製品以上の高品質が求められる。そのため、製品開発時から「開発プロセスを改善することで品質を向上させる」という方針のもと従来の開発プロセスを改善して、開発の上流工程から品質を向上する取り組みを実施している。

また、小規模ビルでは中・大規模ビルに比べて、システムの更新、新規立ち上げに与えられる期間はかなり短い。そのため短期間で品質良く立ち上げができる必要がある。そのための取り組みも実施している。

(1) 開発プロセスの見える化による品質向上

開発プロジェクトでは、開発部門以外にもマーケティング部門や営業、製造、エンジニアリング部門など様々な部門の人がプロジェクトに参加している。そのようなプロジェクトで各部門ごとに作業計画を立て進捗管理を行うと、他部門との連携が必要な作業で待ちが発生し進捗が遅れるなど、開発の最終段階で対応に追われることがある。savic-net FX miniの開発プロジェクトでは、開発に入る前に全部門の作業をプロセスとして定義し、プロジェクト管理ツールで全部門のプロセスを一元管理している。開発の全プロセスを見える化することで、プロジェクトに参加している全員が開発の全プロセスを把握できるようになった。その効果として、他部門のプロセスに関しても問題点を指摘し合えるようになり、部門間の連携が強化されている。また、部門をまたがったクリティカルパスを洗い出し対策を取ることで、開発の最終段階で無理することなく、納期を守ることに成功し、高品質も達成している。

(2) 仕様品質の見える化による仕様品質の向上

高品質を達成するためには、上流工程である仕様の品質を上げることが重要である。しかし、仕様の品質は個人の感覚に依存することが多く、明確な基準を示すのが難しかった。そこで仕様品質を見える化する取り組みを行い、基準以上のレベルを確保しなければ次工程に進めないようにした。具体的には、仕様レビューの場で参加者全員がレビューした仕様書に対して100点満点で点数を付け、基準点以上確保することを完了基準とした。それにより、仕様品質の底上げに成功するとともに、次工程以降の障害件数を大幅に減らすことに成功している。

(3) システム立ち上げ時の品質向上

システムの製造工程の工夫と、立ち上げに使用するエンジニアリングツールの改善により、短期間で品質の高いシステムを納入できるようにしている。

savic-net FX miniを立ち上げるエンジニアリングツールはsavic-net FXを立ち上げるエンジニアリングツールと共通化しており、savic-net FXのエンジニアリングツールに慣れた人であれば、簡単にマニュアルを見るだけで操作できるようにしている。さらにワンクリックでSCSminiを立ち上げる機能も追加し、エンジニアリングツールの表示、設定項目もsavic-net FX mini用に最適化することで、立ち上げ時間の短縮とヒューマンエラーの防止を実現している。

7. おわりに

savic-net FX miniの開発は継続して実施しており、今後、さらなるエネルギー・CO₂の見える化、エネルギー・CO₂の削減機能を開発し、また簡単更新・簡単システム拡張のための開発、高品質への取り組みも実施していく。

<商標>

savic-net は、株式会社 山武の登録商標です。

<著者所属>

真木 義郎 ビルシステムカンパニー
開発本部開発1部
コントローラソフトウェア1グループ

ASP型省CO₂サービスと学習型熱源最適化制御

CO₂ Reduction Solutions via ASP and Adaptive Optimization for Variable Water Temperature

株式会社 山武	近田 智洋 Tomohiro Konda	株式会社 山武	西口 純也 Junya Nishiguchi
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	平田 眞基 Masaki Hirata	株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	太宰 龍太 Ryota Dazai
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	中村 瑞 Mizu Nakamura	株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	小野寺 博 Hiroshi Onodera

キーワード

Web-Inflex, SaaS/ASP, 省エネ / 省 CO₂, 送水温度最適制御, 学習

改正省エネ法への対応に向けて、大規模な設備投資不要で簡単に導入できる省エネ / 省 CO₂ アプリケーション Web-Inflex™ を SaaS/ASP 型サービスで提供している。本稿では、この Web-Inflex の概要について述べる。特に、Web-Inflex のアプリケーションの1つである、熱源の送水温度最適制御アプリケーション『学習型 VWT 制御』について紹介する。また、本アプリケーションのフィールド試験の結果も合わせて報告する。なお、フィールド試験において、約 9% の省エネ効果が得られた。

As a means for compliance with revised energy conservation legislation, we provide Web-Inflex™, an energy-saving and CO₂-reduction application which can be introduced easily without capital investment, via SaaS/ASP. This paper gives an overview of Web-Inflex, focusing especially on "Adaptive VWT control," a Web-Inflex application that optimizes variable water temperature in heat sources. This paper also reports the results of a field test of this Adaptive VWT Control in which it brought about energy savings of approximately 9%.

1. はじめに

国際的な CO₂ 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。

日本においては、2010年4月の省エネ法の改正により、これまでの工場・事業所ごとのエネルギー管理から、企業全体の管理に変わり、エネルギー管理統括者のもと、企業全体としてエネルギー管理体制を推進することが義務付けられた。各企業は、企業全体（本社、工場、営業所、店舗など）の燃料、熱、電気の年間エネルギー使用量を把握し、原油換算で1,500kl以上あれば、そのエネルギー量を届け出て、特定事業者の指定を受ける必要がある。

そのため、これまで原油換算 1,500kl 未満で省エネ法

の対象外であった事業所も、企業全体で1,500kl以上の場合は、省エネ法の対象となり、積極的な省エネへの取り組みが必要となっている。

省エネの取り組みは、これまでの工場・事業所ごとの取り組みから、企業全体の取り組みに変わるため、それらの状況の変化に対応できる、新たな省エネサービスが求められている。

これまでも企業全体のエネルギー管理を行なうための総量管理のサービス「CO₂ マネジメントシステム」など多くの省エネ / 省 CO₂ のサービスを提供してきたが、このような社会状況の下、さらに省エネ / 省 CO₂ を実現する ASP^{*1} による空調制御サービス「Web-Inflex」を開発し、販売を開始した。

Web-Inflex は、SaaS^{※2}/ASP 型のサービスであり、設備投資はほとんどなく簡単に導入することができる。

本稿では、Web-Inflex の概要説明と熱源の送水温度最適制御アプリケーション(学習型 VWT 制御)について、性能評価も含めて紹介を行なう。

※ 1 ASP : Application Service Provider

特定及び不特定ユーザが必要とするシステム機能を、ネットワークを通じて提供するサービス、あるいは、そうしたサービスを提供するビジネスモデル。

※ 2 SaaS : Software as a Service

ソフトウェアの機能のうち、ユーザが必要とするものだけをサービスとして配布し、利用できるようにしたソフトウェアの配布形態。

2. Web-Inflex とは

Web-Inflex とは、顧客ビルと当社のサーバーを専用回線で結び、各種設定の変更や、各種設備の起動/停止及び間欠運転などの自動制御を遠隔から実施することで、遠隔から建物空調設備の省エネ/省CO₂を実現する SaaS/ASP 型の空調制御サービスである(図1)。

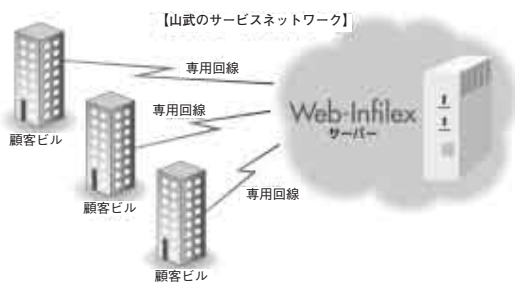


図1. Web-Inflex 構成

(1) Web-Inflex の特徴

- 顧客ビルに専用回線で接続し、遠隔から建物空調設備の省エネ/省CO₂を実現できる。
- 導入は短工期で済むため、設備稼働に支障が少ない。
- SaaS/ASP 型であるため、大規模な設備投資なく手軽に低コストで導入できる。
- 建物単体または、事業者単位(複数建物)でCO₂排出上限値制御に活用できる。

(2) Web-Inflex アプリケーション

2010年4月にリリースしたWeb-Inflexのアプリケーションは、CO₂リミット制御、学習型VWT制御の2つである。今後、さらに省エネ/省CO₂のアプリケーションを追加し、提供していく予定である。次にこれらのアプリケーションについて、概要を紹介する。

・CO₂リミット制御(図2,3)

事業者が設定した目標値に合わせて、建物におけるCO₂排出量を抑えるサービスであり、CO₂の実績値が目標値を超過すると予測した場合は、設備を制御してCO₂を抑制する。

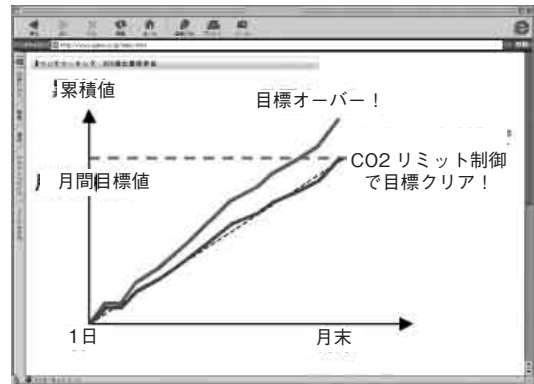


図2. CO₂リミット制御イメージ

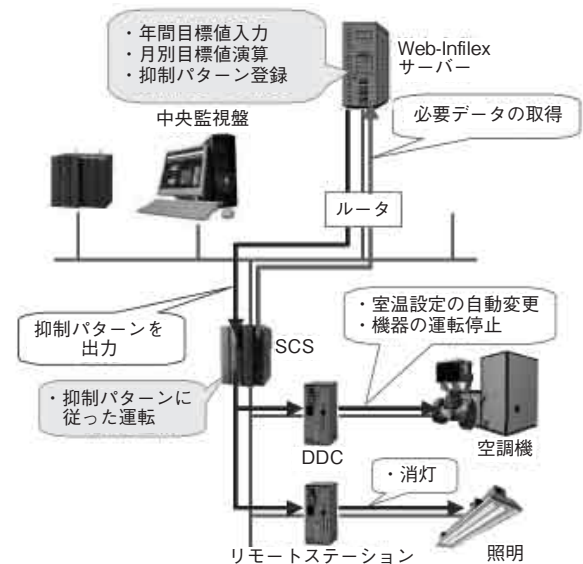


図3. CO₂リミット制御構成図

・学習型VWT^{※3}制御(図4)

熱源の最適化運転を自動的に行なうアプリケーションであり、運転データから作成した最適化モデルにより、熱源の出口温度を最適に制御する。学習機能を備えており、設備の経年劣化や運用変更にも柔軟に対応できる。

※ 3 VWT : Variable Water Temperature
送水温度最適設定制御

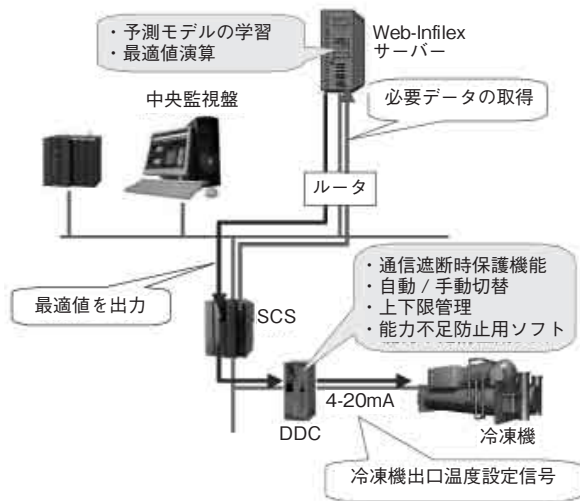


図4. 学習型 VWT 制御構成図

3. 送水温度最適設定制御 (VWT 制御)

本稿では、Web-Inflex のアプリケーションのうち、学習型 VWT 制御についての技術的内容を紹介する。

3.1 送水温度設定の課題

熱源は通常7℃程度の冷水を作り出しているが、冷水送水温度の設定を、より高くすれば運転効率(COP)が向上し、熱源単体のエネルギー消費量を減少させることができる。一方では、熱源システム全体としては、冷水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、冷水の流量が増加し、搬送動力が増加する。このように熱源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(図5)。さらに、外気温や負荷熱量など他の外的要因も熱源システムの効率に影響を与えるため、上記のトレードオフの関係、外的要因の影響、機器の制約条件などを考慮して、熱源システム全体で消費エネルギーが最小となる最適送水温度設定値を求める必要がある。これらの制御をVWT制御という。

実際のビルにVWT制御を適用するには、これらの関係、条件をビルごとに、それぞれ作成する必要があるが、運用方法や機器性能が設計時点とは異なる場合が多く、高度な補正が必要になり、実用面では困難であった。

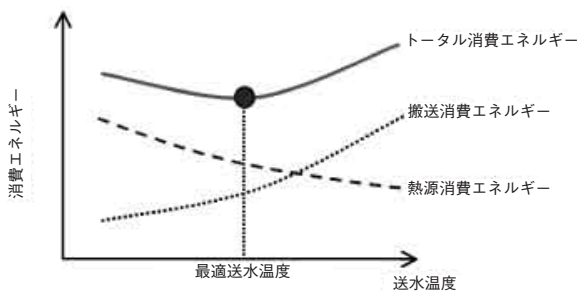


図5. 熱源送水温度と消費エネルギーの関係

3.2 学習型 VWT 制御

この課題に対して、当社保有技術である位相事例ベースモデリング技術(TCBM™:Topological Case-Based Modeling)⁽¹⁾と多次元スプラインによる応答曲面法(RSM-S: Response Surface Methodology by Spline)⁽²⁾を組み込んだ送水温度最適設定制御(以下、学習型VWT制御)を開発した⁽³⁾(図6)。

TCBMとは、入力データ間と出力データ間の類似度合いをもとに、データを事例化するモデリング手法であり、与えられた入力に類似した過去の事例を参照して、必要な出力を導く。こうした事例ベース推論法では、過去に経験した事例ベースの中に入出力関係が内包されているため入出力関係を規定するモデル構造を特別に作る必要がなく、非線形な入出力関係にも対応することができる。

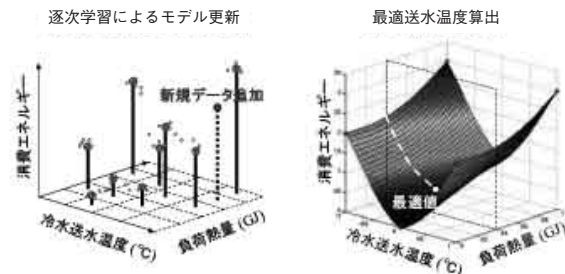


図6. 学習型 VWT 制御の概要

応答曲面法RSM-Sは、少ないデータをもとに最適条件を探索する最適化手法である。RSM-Sは、入出力関係が複雑なシステムにおいて、理想的な実験計画データでなくても、実際に計測された離散的データからすばやく応答曲面モデルを生成でき、かつ再現性のあるモデル構築が可能となる。応答曲面モデルの構築には、式(1)に示す多変数スプラインを利用する。

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^n a_i g(d_i) + \sum_{j=1}^p c_j x_j + c_0 \quad \text{式(1)}$$

ここで a_i, c_j は係数、 p は入力変数 x の次元数、 n はデータ数、 d_i はあるデータ i と任意のデータとの入力変数のユークリッド距離、 $g(d_i)$ はグリーン関数である。

式(1)により応答曲面モデルを生成し、これを最適化演算のための目的関数とすることで、実計測データを利用した最適送水温度設定が可能となる。

学習型VWT制御における本技術の枠組みを図7に示す。提案する制御手法では、熱源の制御状態や負荷熱量などを入力変数とし、熱源システム全体の消費エネルギー量を出力変数とするモデルを構築し、このモデルを目的関数としたときの最適化演算を行なうことで、消費エネルギー量が最小となる送水温度設定値を求める。上記モデルは、入力変数と消費エネルギー量のデータを逐次追加することで更新され、入出力関係を学習する。このような手法を採用することで、ビルごとに多様な設備構成に対応し、また機器劣化

に自動的に対応することができる。

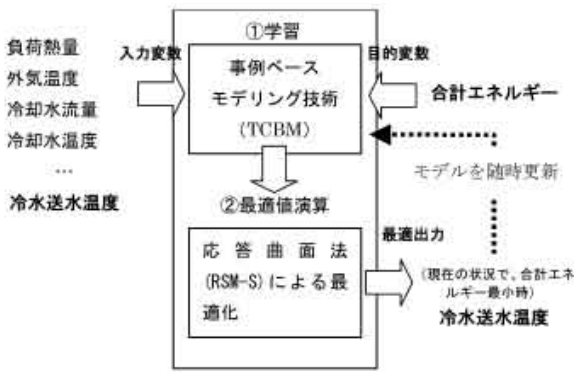


図7. 学習型 VWT 制御の枠組み

4. 適用事例

4.1 対象建物の概要

対象施設は、延床面積約 14,000m² のホテル建物に、本制御を導入し、プロトタイプシステムによる実証試験を実施した。なお、実証試験では冷熱源の主力機であるインバーターボ冷凍機(R-1)のみを送水温度の設定変更の対象とした。

表1に建物概要、図8に熱源計装図を示す。

所在地	静岡県
用途	ホテル
延床面積	約 14,000 [m ²]
熱源設備	インバーターボ冷凍機：冷房 250 USRT 冷温水発生器：冷房 240 USRT 暖房 773 kW 熱交換器：暖房 313 kW 小型貫流ボイラ×2台：752 kW
空調方式	セントラル方式（ツーポンプシステム） 空調機（宴会場・レストラン） 外調機 + FCU（客室）

表1. 建物概要

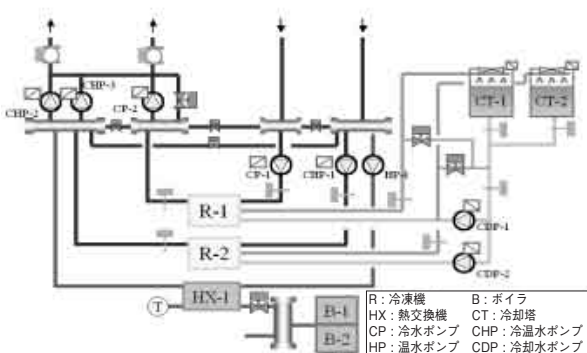


図8. 熱源計装図

4.2 モデル入力変数

学習型 VWT 制御に使用するモデル入力変数、目的変数を表2に示す。入力変数は、熱源システムの計装から全消費エネルギー量と関連が高いポイントを候補とし、その中から相関分析やクラスター分析などの統計的解析により最終的な入力変数を特定した。

入力変数	目的変数
① 負荷熱量	全消費エネルギー量
② 冷却水温度	(= 冷凍機消費電力
③ 冷却水ポンプ INV 出力	+ 冷水ポンプ消費電力
④ 外気温度	+ 冷却水ポンプ消費電力
⑤ 冷凍機送水温度	+ 冷却塔ファン消費電力)

表2. 学習型 VWT 制御の変数

4.3 性能評価

本手法の導入効果を調べるために前述のホテルにおいて、オンラインシステムを導入し、性能評価を行った。

(1) 送水温度緩和状況

図9、図10に負荷が平均的な場合と高い場合における本手法導入後の一日毎の送水温度履歴を示す。

図9では、室内側の負荷熱量の変動が小さく、給気温度が安定している午後には、送水温度が緩和(上昇)されている。一方、午前中は室内の負荷熱量が高く、給気温度が一時的に低くなり、空調機で適切な熱交換を行なうために、送水温度を下げている。

また、図10のように、負荷熱量が特に高い場合には、冷凍機の定格に対する負荷率が高く、送水温度の緩和余地がないため、送水温度の設定が7℃近くになっている状況が確認できた。

これらの結果より、負荷熱量などの環境要因に応じて、冷凍機の送水温度が適切に設定され、動作していることを確認できた。

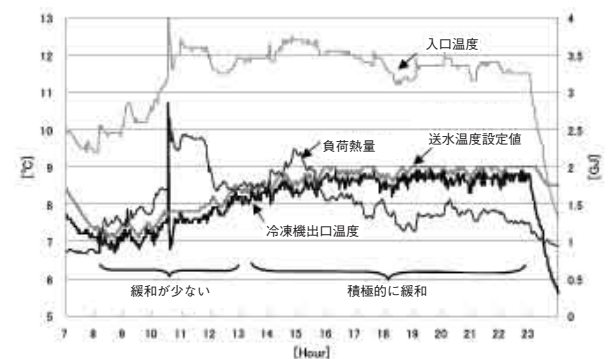


図9. 最適送水温度例 (平均的な負荷の場合)

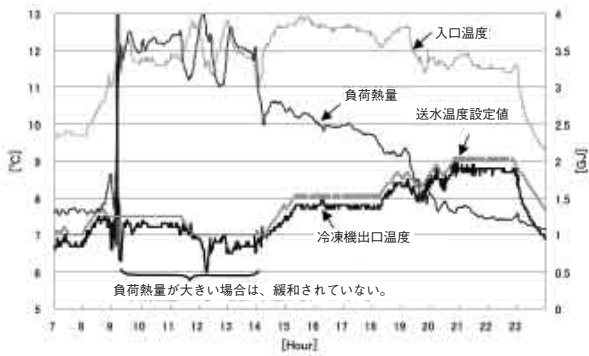


図 10. 最適送水温度例 (負荷が高い場合)

(2) 学習効果

新設の熱源システムへ学習型 VWT 制御を導入する場合を想定し、モデル作成に使用する過去データが少ない状況における学習機能の効果を評価した。

事例ベースモデリングの消費電力量の推定精度が高いほど、熱源システムの特性を反映できており、最適値演算においても、送水温度の算出精度が高くなる。そのため、学習効果の評価は、学習型 VWT 制御導入前の短期間のデータで作成した事例ベースモデル(初期モデル)とデータを逐次的に追加し学習した事例ベースモデル(学習モデル)の消費電力量の推定精度を比較することで行った。

評価の手順は、以下の通りである。

- 過去の運転データから初期モデルを作成
モデル期間：07/10/5～07/10/18, 08/4/22～08/6/19
- 初期モデルをシステムに実装し、学習機能ありでシステムを稼働 (学習モデル)
- リアルタイムに学習モデルで推定した消費電力量と初期モデル(学習なし)のまま推定した消費電力量をそれぞれ算出
- 上記で算出した消費電力量と実際の消費電力量を比較
システム稼働後の精度の分析(二乗平均平方和誤差)の結果を図 11 に示す。

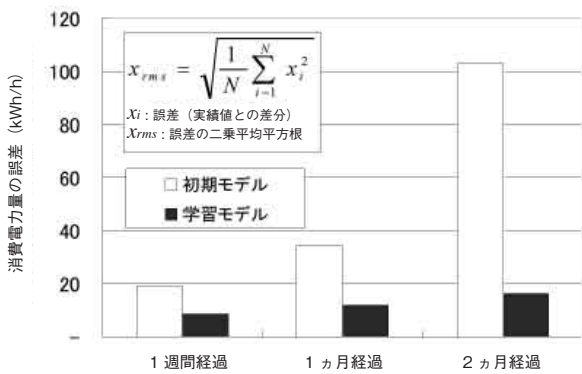


図 11. 学習モデルと初期モデルの精度比較

導入直後は、モデルの作成に使用したデータの期間

と評価時期が近い場合、初期モデル、学習モデルともに、消費電力用を20[kWh/h]の誤差範囲で精度良く推定しているが、期間が経過すると初期モデルは、誤差が大きくなっている。また、学習モデルは、期間が経過しても導入当初と比較し、ほぼ同程度の精度を保持している。この評価結果から、モデルの学習機能により、経時変化に対応でき、導入当初の性能を維持できることがわかる。

(3) 省エネルギー効果

学習型 VWT 制御の省エネルギー効果を算出した。条件は以下の通りである。

- 初期モデルデータ期間：2009/6/1～6/10
- 評価期間
導入前：2008/6/13～7/27
導入後：2009/6/13～8/20

図 12 に、外気エンタルピに対する、本システム導入前(08/6/13～08/7/27)と導入後(09/6/13～09/8/20)の消費電力量を示す。外気エンタルピが同じ条件の場合において、本制御導入後の消費電力量が下回っていることが確認できる。図 13 に示す省エネルギー効果は、導入前の実績値を導入後の外気エンタルピで回帰式により補正した値と、導入後の実績とを比較することで求めた。具体的には、導入前の消費電力量の特性を回帰式により同定し、導入後の外気エンタルピを入力することで、ベースラインの消費電力量を算出し、導入後の実績と比較した。この結果、導入前後で約 9%の消費電力量の削減効果を確認できた。

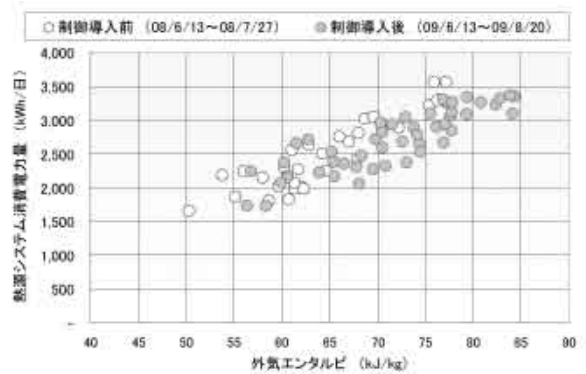


図 12. 消費エネルギー比較



図 13. 省エネルギー効果

5. おわりに

本稿では、SaaS/ASP型省エネ/省CO₂アプリケーションのWeb-Inflexの紹介とそこから学習型VWT制御について概要と適用事例として実際のホテルに対する評価結果を示し、省エネルギー効果を確認した。

外部条件や運用条件の変化への対応については、学習機能により、データを定期的に更新することで、モデル性能が維持されることを確認し、状況変化に対する学習機能の有効性を確認した。

本手法は、熱源システムだけではなく、室内環境の最適化にも広く応用することができるため^{(4)~(7)}、今後は、顧客の省エネ/省CO₂を実現するWeb-Inflexの最適化アプリケーションのラインナップをさらに増やしていく予定である。

学習型VWT制御技術は、国土交通省の平成19年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業「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（応募者：慶應義塾大学，株式会社山武）」の成果の一部である。

<参考文献>

- (1) 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（2002），第41巻，第5号，pp.345-349
- (2) 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（2003），Vol.21，No.2，pp.32-39，株式会社山武
- (3) 太宰 龍太，総田 長生：冷凍機送水温度最適制御の実験，建築学会講演論文集（2009.8）
- (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（2008），Vol.，No2，pp.1-9，株式会社山武
- (5) 加藤彰浩ら，学習機能に基づく空調システムの多目的最適制御に関する研究（第1報）制御手法の概要と中間期における検証実験，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2008.8）
- (6) 太宰龍太ら，学習機能に基づく空調システムの多目的最適制御に関する研究（第2報）冬期における空調機最適起動実験，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2008.8）
- (7) 加藤彰浩ら，学習機能に基づく空調システムの多目的最適制御に関する研究（第3報）給気温度最適化制御のシミュレーション，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2010.9）

<商標>

Web-Inflex は，株式会社山武の商標です。
TCBM は，株式会社山武の商標です。

<著者所属>

近田 智洋	技術開発本部 基幹技術開発部
西口 純也	技術開発本部 基幹技術開発部
太宰 龍太	ビルシステムカンパニー マーケティング本部
平田 眞基	ビルシステムカンパニー マーケティング本部
中村 瑞	ビルシステムカンパニー 開発本部
小野寺 博	ビルシステムカンパニー 開発本部

無線圧力発信器低消費電力化技術の開発

Development of Low Power Consumption Technology for Wireless Pressure Transmitters

株式会社 山武

木下 靖彦
Yasuhiko Kinoshita

株式会社 山武

瀬川 進
Susumu Segawa

株式会社 山武

田辺 樹
Itsuki Tanabe

株式会社 山武

鄭 立
Li Zheng

キーワード

工業用計測器、圧力発信器、無線、低消費電力、間欠駆動、スリープ電流、環境エネルギー発電、エナジーハーベスト

無線圧力発信器における低消費電力化技術の開発に関して報告する。無線圧力発信器低消費電力化のためには、センサ部における間欠駆動の実現と、スリープ電流を最大限に抑制することが重要である。これらの技術開発の結果として、高い精度を達成すると同時に、バッテリーを長寿化できる無線圧力発信器を実現した。また環境エネルギー発電を利用する「バッテリーレス」無線圧力発信器の実現も可能となる。

This paper reports the development of low power consumption technology for industrial wireless pressure transmitters. For realization of low power consumption for wireless pressure transmitters, it is important to drive the pressure transmitters periodically and to reduce the sleep current as much as possible. Long battery life can be realized using this low power consumption technology with high measurement precision. Moreover, this low power technology makes so-called “battery-less” industrial wireless pressure transmitters possible by using the environmental energy generation.

1. はじめに

近年、生産のグローバル化や地球環境の問題などへ対応するため、より少ない投資で高い生産性をもつ工業生産システムが求められている。このため、工場やプラントといった工業分野においても、配線コストが不要な無線通信技術の活用が期待されている。本稿では、工業用無線圧力発信器の開発において重要で、かつ解決困難な課題である低消費電力化技術の開発について報告する。

場合、数年に1回の定期的な検査保守の際以外は、バッテリーの交換ができない場合も多い。したがって、工業用のバッテリー動作機器には、数年間バッテリー交換なしに動作することが求められる。このことから、工業用無線圧力発信器においては、バッテリー動作期間長期化のために低消費電力化技術の向上が必要である。

以上のような観点から、低消費電力化に重点をおいて開発した無線圧力発信器を図1に示す。

2. 工業用無線圧力発信器の開発

バッテリー駆動で動作する工業用無線圧力発信器の開発を考える。無線技術の進歩は目覚ましいものがあるが、現代においても、要求される性能の全てを満たす無線通信技術は実現できない。そのため、工業分野で必要とされる性能に注力した開発を行う必要がある。そこで、プラントを例に、具体的に工業用無線に必要な機能を考えてみる。プラントは1年365日24時間運転を続ける。そのため、バッテリー駆動の機器が導入された



図1. 低消費電力無線圧力発信器

この無線圧力発信器は、計測周期を1秒に設定したとき、10年以上の期間を単一形の電池1本で動作させ続けることが可能である。また、このように消費電力が小さいため、環境に存在する微少なエネルギーを利用した動作も可能であり、バッテリー交換さえも不要な無線圧力発信器も実現できる。

3. 工業用無線圧力発信器の低消費電力化

ここでは、上述の無線圧力発信器開発において、どのように低消費電力化を実現したか、その考え方や実現方法について示していく。

3.1 目標とする平均消費電流の算出

まず、工業用無線圧力発信器をバッテリーで駆動する際に許容される消費電流を見積もる。

今回、圧力発信器を無線化し、バッテリー駆動にするにあたり、「単一形以下のバッテリーによる動作期間10年以上」を1つの目標とした。サイズを単一形以下としているのは、小型・軽量化のためである。動作期間については、市販されている一次電池の保証期間が10年であることによる。

では、この条件で使用できる平均消費電流 I を計算する。計算式は以下の通りである。

$$\text{消費電流 } I[\text{A}] = \frac{\text{バッテリー容量 } [\text{Ah}]}{\text{動作期間 } [\text{h}]}$$

ここでバッテリー容量は、小型で大容量の単一形リチウム電池の使用を考え、実際に存在するバッテリーの公称容量 19Ah を使用する。この値と動作期間 10年を用いて、平均消費電流 I は以下のように求まる。

$$I = \frac{19[\text{Ah}]}{10[\text{year}] \times 365[\text{day}] \times 24[\text{h}]} = 219.8 \times 10^{-6} [\text{A}]$$

この結果から、発信器をバッテリー駆動するためには、わずか $220\mu\text{A}$ 程度の電流により、測定から無線通信までの全てを行わなければならないことがわかる。ちなみに、一般的な2線式の発信器では $4 \sim 20\text{mA}$ の電流信号により通信と電力供給を行っているため、少なくとも 4mA の電流を使用することができる。しかもここには、無線通信で必要とされる電流は入っていない。比較してみると、目標とする機器は、消費電流を2線式の20分の1以下に抑えなくてはならない。

3.2 低消費電力化の考え方

では、どうやって $220\mu\text{A}$ 以下という低消費電流を実現するのか、その考え方を以下に示していく。

図2に、無線圧力発信器のブロック図を示す。電源がつけられたとき、電流はセンサ部、A/D変換部、演算・制御部、液晶表示部、そして無線部の各部で消費されることになる。

仮に、2線式の発信器をそのまま無線化することを

考えてみる。このときの電流消費を模式的に表すと、図3(a)のようになる。各ブロックの消費電流を比べてみると、元々存在しない無線部を除けば、センサ部及びA/D変換部の消費電力が大きい。当然、このままでは消費電流の目標を達成できない。

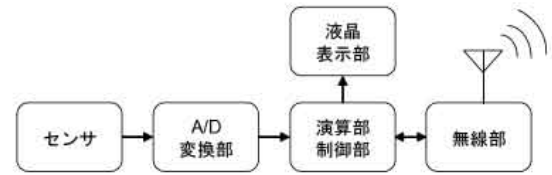
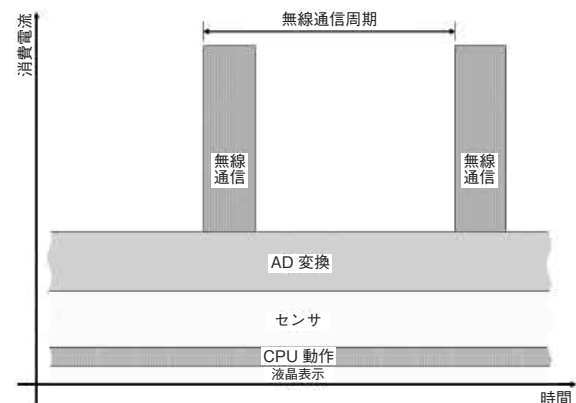


図2. 無線圧力発信器のブロック図

(a) 2線式発信器を無線化した場合



(b) 間欠駆動による低消費電力化

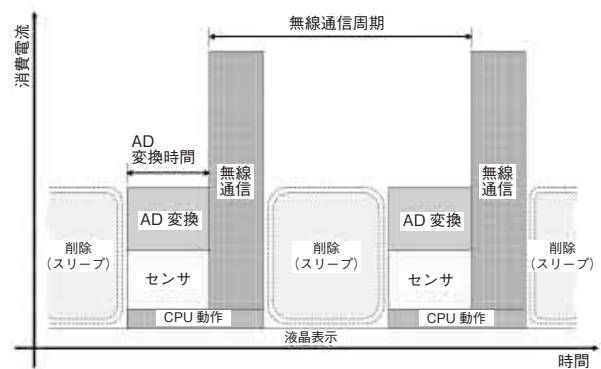


図3. 無線圧力発信器電流消費の模式図

そこで、低消費電力化のために、「間欠駆動」を導入する。元々無線部は電流消費が激しいため、通常、間欠的に通信を行う。そこで、センサやA/D変換部も、これに合わせて無線通信の直前のみ動作させるようにする。こうすることで、「スリープ状態」と呼ばれる、流れる電流の少ない時間を生み出すことができ、消費電流を削減できる。この間欠駆動を導入した際の消費電流削減効果を、図3(b)に示している。重要なのは、間欠駆動によるセンサ部及びA/D変換部の動作時間を短くするほど、高い消費電流削減効果を得られることである。したがって、センサ部・A/D変換部における間欠駆動の実現とその動作時間短縮が、低消費電力化

技術の1つのポイントである。

センサ部及びA/D変換部を含めた発信器の間欠駆動が実現できた場合、もう1つ、低消費電力化のために重要なポイントが現れる。それは、スリープ状態における消費電流（スリープ電流）の大きさである。間欠動作を実現できたとしても、このスリープ電流が大きい場合には、得られる効果が小さいことは容易に理解できる。したがって、スリープ電流を抑制する技術も、バッテリー駆動で10年間動作する低消費電力化を達成する上で重要なポイントである。

以下では、この2つのポイントに関する技術開発について、さらに具体的な内容を示していく。

3.3 センサの間欠駆動実現と動作時間の短縮

バッテリーで駆動する圧力発信器では、間欠駆動に対応できるセンサが必要であると同時に、精度にも気を配る必要がある。そこで、ここでは間欠駆動に対応するセンサの実現方法とその精度について説明する。

今回の開発では、センサ部として差圧センサを選択している。用いたセンサの受圧部を図4に示す。差圧センサは、差圧、静圧、そして温度を測定する3つのSiピエゾ抵抗式センサからなる。このような構成にしているのは、センサが置かれた静圧及び温度に依存することなく差圧を測定するためである⁽¹⁾。

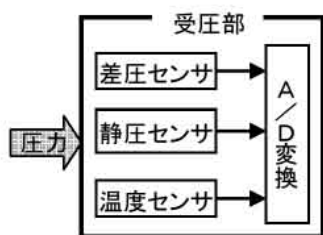


図4. 無線圧力発信器のセンサ構造

間欠駆動を実現するために、従来のセンサ駆動方式である連続駆動との差異を考えてみる。連続駆動の場合、センサの立ち上がりが遅くても、電源供給から十分時間が経過した後に測定すればよい。これに対し、間欠駆動の場合、センサへの通電時間を短くするために、センサに電源を投入した直後に測定を行う必要がある。すなわち、立ち上がりが速いセンサが必要になる。

図5は、開発した間欠駆動用のセンサの立ち上がり時間を示したものである。合わせて、従来の連続駆動用センサの立ち上がりも示している。間欠駆動用センサの立ち上がりが、連続駆動に比べて速いことがわかる。

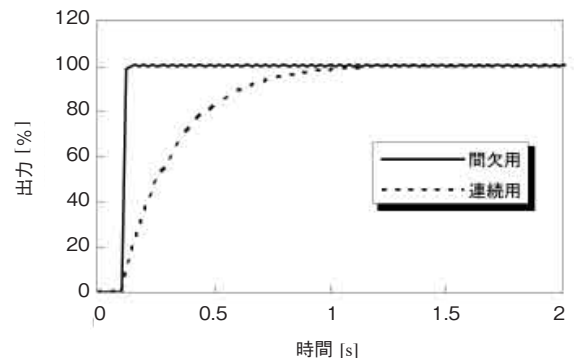


図5. センサの立ち上がり時間の比較

開発した無線圧力発信器の精度について示す。図6は、温度25℃における精度測定の結果である。この図から、開発した無線圧力発信器が、0.01% FS以上の高い測定精度を有していることが確認できる。

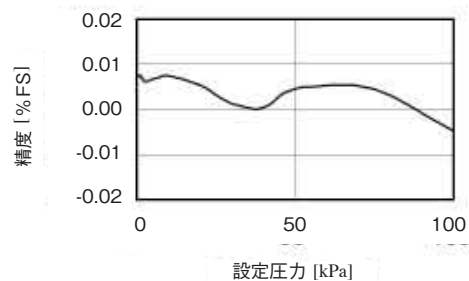


図6. 無線圧力発信器の精度

3.4 スリープ電流の抑制

ここでは、低消費電力化のもう1つのポイントである、スリープ電流の抑制技術について解説する。

スリープ電流に関する説明を行う前に、計測周期について説明しておく。図7は、間欠動作する無線圧力発信器の動作を時間軸上で表した模式図である。

図に示されているように、間欠動作における計測周期は、1周期分の回路動作時間とスリープ時間の和として表せる。

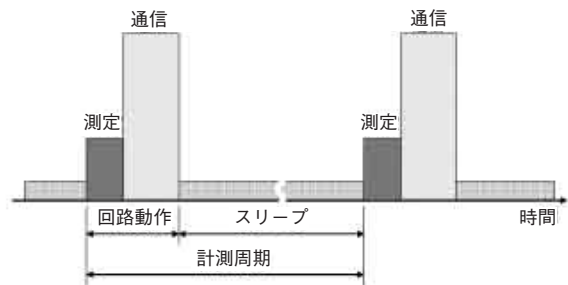


図7. 計測周期の説明

ここで、回路動作時間は、センサの精度や通信データの量など、物理的な要求で決まるものである。したがって、計測周期を短くする場合に削られていくのはスリープ時間であり、消費電流は連続駆動に近づいて

いくことになる。このように計測周期は、バッテリーを用いた機器の動作可能時間と非常に深い関係がある。

次に、スリープ電流を抑制することの重要性を、より具体的に説明する。図8はスリープ電流をパラメータとし、計測周期に対する発信器の消費電流をシミュレートしたものである。シミュレーション条件は、回路における電流消費を30mAとし、その動作時間を5msとしている。

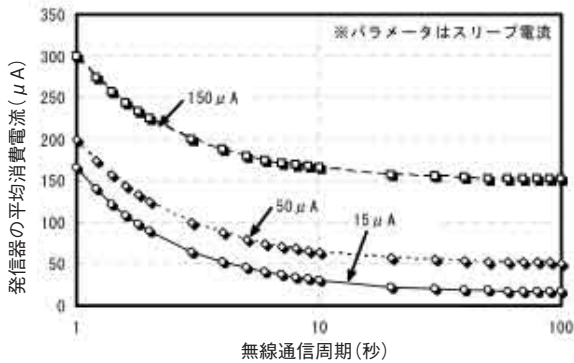


図8. 発信器の消費電流

3.1で計算した目標とする消費電流220 μ Aを基準に考えると、スリープ電流50 μ Aにおいて、やっと計測周期が1秒となる。例えば、監視に用いられる計測器では、計測周期が短いほど早く異常を発見できるなど、短い計測周期を要求されることもある。したがって、無線圧力発信器においても、できるだけ計測周期を短く設定可能にした上で、バッテリーによる機器動作期間を長く保つ必要がある。前述の通り、測定や無線通信に必要な電流を削るのは難しいことから、計測周期を短くするためには、スリープ電流を小さくすることが重要であることがわかる。

具体的なスリープ電流の抑制は、CPUや無線ICに待機電流が小さいものを選定し、不要な電流を流さない回路設計の工夫などにより、徹底的に不要な電流を削ることにより行った。この結果、開発した無線圧力発信器では、全体のスリープ電流が15 μ Aであった。これは、目標とする消費電流220 μ Aの10分の1未満であり、非常に小さな電流値に抑えられていることがわかる。

4. 無線圧力発信器の動作

ここでは、これまで説明してきた低消費電力化技術を組み込んだ無線圧力発信器の全体的な電流消費と、バッテリー駆動での動作可能な期間について説明する。

図9は、開発した無線圧力発信器の1回の測定・通信動作における消費電流を示している。図中9～50msが回路動作(測定+通信)中であり、残りの部分はスリープ状態である。図から、これまで説明してきた間欠駆動を実現できていることが確認できる。

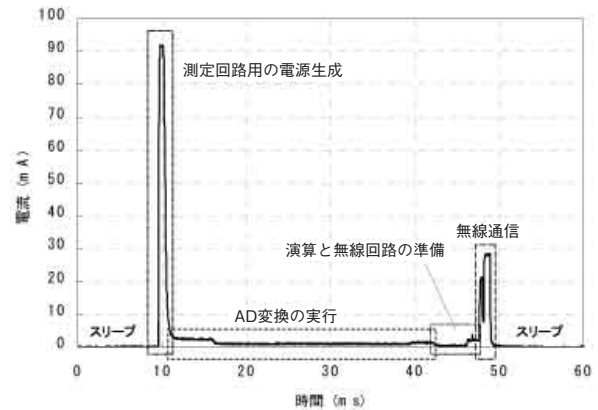


図9. 無線圧力発信器の電流消費

図9において、10ms付近と50ms付近の2つの大きなピークが存在する。

これまでの説明では触れていないが、10ms付近の高いピークは、センサに供給する電源生成のための電流である。これは、センサへの電力供給を間欠的に行っているために現れるピークであり、コンデンサへの突入電流を含むため、大きくなる傾向にある。ただし、センサへ供給される電圧が不安定では測定精度に影響するため、十分に安定するよう注意を払う必要がある。

50ms付近のピークは、無線回路が消費する電流である。無線部に使用されるICには、電波の送受信増幅器が含まれているため、消費電流が大きくなる傾向にある。

これら電源生成及び無線部の電流消費は大きいですが、これ以上小さくできない電流であるため、消費電流を少なくするためには、できるだけ短時間で処理を終了することが重要である。開発した機器では、動作制御プログラム設計の際、この点に注意しており、数msという短時間で処理が終了していることが、図9からわかる。

消費電流が確認できたので、バッテリーによる動作時間を確認してみる。図から回路動作時間の平均電流を計算したところ、およそ3.6mAであった。スリープ電流は15 μ Aであるので、計測周期を T とすると、平均消費電流は以下の式で求められる。

$$I = \frac{3.6[\text{mA}] \cdot 41[\text{ms}] + 15[\mu\text{A}] \cdot (T - 41[\text{ms}])}{T} [\text{A}]$$

計測周期を仮に1秒($T=1\text{s}$)とした場合、平均消費電流 I は約162 μ Aとなる。このとき、バッテリーとして、3.1の計算で用いた単一形リチウム電池(電池容量19Ah)を使用したときの動作期間は、以下のように求められる。

$$\frac{19[\text{Ah}]}{162 \times 10^{-6} [\text{A}] \times 365 [\text{day}] \times 24 [\text{h}]} = 13.4 [\text{year}]$$

すなわち、計測周期1秒以下でバッテリーによる動作時間10年を超える無線圧力発信器が実現できている。

この結果は、工業用無線圧力発信器において最高水準の低消費電力性能である。

なお、この計算により得られたバッテリーによる動作期間は、IEEE802.15.4^④の物理層、MAC層をベースに構築した当社オリジナルのプロトコルで通信を行った場合である。通信プロトコルによっては、無線回路の動作時間が増す場合もあるため、工業用無線の国際標準である WirelessHART や標準化が進められている ISA100.11a などに対応する場合には、消費電流が大きくなる可能性がある。ただし、今回の開発により、発信器側の消費電流をできる限り抑えることができたため、実用に足るバッテリー寿命は十分に見込めると考えている。

5. バッテリーレス無線圧力発信器

無線機器にバッテリーを使用する限り、ユーザーが「バッテリー交換」というメンテナンス作業から解放されることはない。そこで、ここでは、開発した無線圧力発信器の低消費電力性能を利用した、バッテリーを使用しない無線圧力発信器実現への取り組みを紹介する。

バッテリーレスを実現するために、エネルギーハーベスト技術^⑤が利用できる。図10にエネルギーハーベストの概念を示す。



図10. エナジーハーベストの概念

図からわかるように、エネルギーハーベストは、周辺に存在する微少な環境エネルギーを利用して発電し、機器の電源として利用する技術である。人の生活圏であれば明かりがあることは多く、光はエネルギー源として利用しやすい。また、工業分野ではボイラーやコンプレッサを利用することも多いため、熱や振動なども利用しやすいエネルギー源といえる。ただし、周辺環境に存在するエネルギーはどれも微少なもので、取り出せる電力も非常に小さい。そこで、このエネルギーハーベスト技術を利用するためには、本稿で解説してきたような徹底した機器の低消費電力化が必要である。

図11は、一例として太陽電池を組み込んだ「ソーラー発電型バッテリーレス無線圧力発信器」を示している。このように、可能な限り一体化することも、運搬の際のユーザーの利便性を考えると重要なポイントである。



図11. ソーラー発電型無線圧力発信器

図からわかるように、太陽電池の大きさは5.5 × 2cm²と小さいが、照度650lx程度（一般的な事務所の明るさ程度）の室内で動作を確認できている。この程度の太陽電池面積及び明るさで動作が可能であることは、開発した低消費電力化技術を用いることにより、バッテリーレス化実現へと近づけることができたことを示している。

なお、より多くの利便性をユーザーに提供するために、当社では他の環境エネルギーを使用したバッテリーレス無線圧力発信器の実現にも取り組んでいる。その結果として、振動では加速度約1m/s²=0.1g（振幅20μm）という微小振動で、熱では20℃以下という低温度差において無線圧力発信器の動作を確認できている。

エネルギーハーベスト技術を利用したバッテリーレス無線圧力発信器は、環境によってはメンテナンスの全くいらぬ無線計測器を実現できる。ただし、環境エネルギーは不安定なものであるため、異なる複数の環境エネルギーを組み合わせるなど、設置環境に合う機器への安定した電力供給方法を検討する必要がある。

6. おわりに

本稿では工業用無線圧力発信器の低消費電力化技術について紹介し、微少な環境エネルギーでも動作可能なバッテリーレス無線圧力発信器が実現できることを示した。近年、プラントや工場における無線機器利用に注目が集まってきているため、今後もこのような技術開発を通じて、工業用計測器のさらなる利便性をユーザーへ提供していきたいと考えている。

<参考文献>

- (1) 間々田：差圧・圧力発信器の高性能,高精度化技術,
azbil Technical Review(2008), pp24-29, 株式会社
山武
- (2) 鄭：ZigBee 開発ハンドブック(2006), リックテレ
コム
- (3) 沈, 佐々木 宏, 鄭：エネルギーハーベスト技術,
計測制御(2009), V01.48, No. 7, pp579-586

<著者所属>

木下 靖彦	技術開発本部 商品開発部
瀬川 進	技術開発本部 商品開発部
田辺 樹	技術開発本部 商品開発部
鄭 立	技術開発本部 商品開発部

熱源最適化コントローラのための シミュレーション技術開発

Development of Simulation Technology for a Heat Source Optimization Controller

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

松尾 裕子
Yuko Matsuo

キーワード

熱源最適化コントローラ, COP, 熱源, 冷凍機, ポンプ, 制御, 省コスト, 省 CO₂

熱源最適化コントローラ「PARACONDUCTOR™」の特徴的な機能として、熱源システムの最適制御、省エネルギー制御による効果の可視化があげられる。各機能を支えるシミュレーション技術について報告する。

Features of the PARACONDUCTOR heat source optimization controller include optimum control of a heat source system and visualization of the effects of energy-saving control. This paper describes the simulation technologies that are applied to such functions.

1. 熱源最適化コントローラの紹介

熱源システムのエネルギー使用量は建物全体の2～3割を占めており、熱源設備の省エネルギーには大きな期待が寄せられている。山武はこれに応えるため、これまで送水ポンプの省エネルギー制御などを提案してきた。

今回これらの省エネルギー制御に加え、新たに熱源最適化コントローラ「PARACONDUCTOR」を開発した。

図1はPARACONDUCTORシステムの構成図である。PARACONDUCTORは個別機器コントローラの上に追加され、各コントローラと連携しながら制御や可視化を行う。

PARACONDUCTORの特徴的な機能として、「熱源システムの最適制御」「省エネルギー制御による効果の可視化」があげられる。次章以降で、各機能を支えるシミュレーション技術について報告する。

2. 熱源システムの最適制御

2.1 背景

熱源設備の使用エネルギーは大部分が冷凍機によるものである。近年冷凍機本体のCOP^{*1}が向上し、大きな省エネルギー効果を上げている。また建物によって

は中間期・冬期でも冷水負荷があることから、低負荷時のCOPを向上させ、年間を通して省エネルギーを実施することが重要であるとの認識が広まりつつある。

図2の「インバータ機」は、中間期・冬期のCOPが向上した代表例である。インバータ機を導入することにより、中間期・冬期に大幅な省エネルギー効果を期待できる。

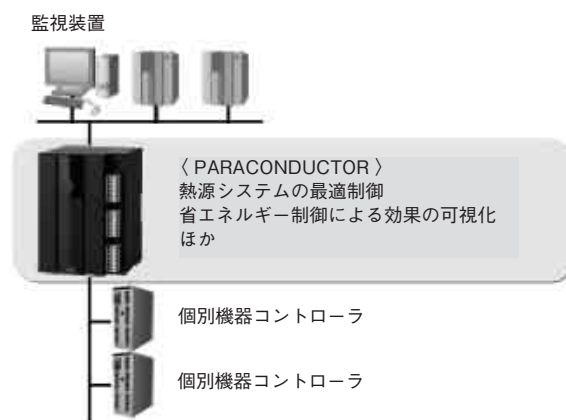


図1. PARACONDUCTOR システムの構成図

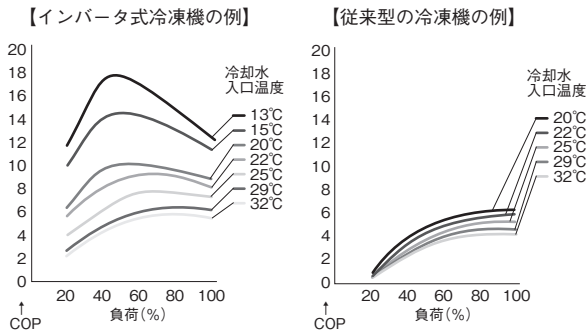


図 2. 部分負荷 COP が向上した機器の代表例

2.2 最小 CO₂ 台数制御

図 3 はインバータ機が 2 台ある熱源システムを想定した、運転台数別の CO₂ 排出量を示したグラフである。1 台分の高負荷付近では、あえて 2 台運転させたほうが CO₂ 排出量が少ないことが分かる。

山武は従来より、熱源コントローラ (PARAMATRIX™) を用いて台数制御を行っている。これまでの台数制御は図 2 の「従来型」を想定し、冷凍機運転台数を減らすほど省エネであると考えてきた。しかしこの制御をインバータ機に適用した場合、冷凍機が高負荷で運転してしまい、低負荷時の高 COP 特性を活かすことができない。

そこで最小 CO₂ 台数制御は負荷・外気条件などから運転台数ごとの CO₂ 排出量をシミュレーションし、熱源システムとしての CO₂ 排出量が小さくなるように運転台数を決定する。結果として 1 台分の負荷でも 2 台運転になるので冷凍機が低負荷で運転することが多くなり、高 COP 特性を活かすことができる。

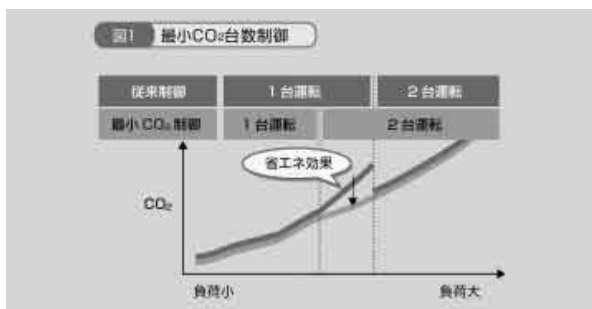


図 3. 運転台数別の CO₂ 排出量をあらわしたグラフ

2.3 シミュレーション技術

2.3.1 利点

最小 CO₂ 台数制御のシミュレーション技術は、制御のエンジニアリングと制御精度に優れている。

冷凍機の COP 特性はメーカーや機種によって異なるので、現場毎のエンジニアリングが必要である。最小 CO₂ 台数制御のシミュレーションは、設備機器の仕様書等に記載されている値を設定値としているので、誰にでもエンジニアリングできるという利点がある。

また最小 CO₂ 台数制御では、冷凍機の運転台数毎の冷却水温度をシミュレーションしているため、台数制

御による冷却水温度の変化も考慮して最適な運転台数を決定でき、結果として省エネルギー制御の精度を向上させることができる。

2.3.2 シミュレーションの流れ

シミュレーションの流れは図 4 の通り。外気湿度・外気湿度・負荷熱量・負荷流量の計測値にもとづき、計測条件における CO₂ 排出量をシミュレーションする。冷凍機・冷却水ポンプのエネルギー使用量は冷却水温度に依存するため、先に冷却水温度を演算し、冷却水温度演算値を用いて冷凍機・冷却水ポンプの CO₂ 排出量を演算する。

別途 2.3.3、2.3.4 に冷却水温度・冷凍機のシミュレーション方法を記載する。

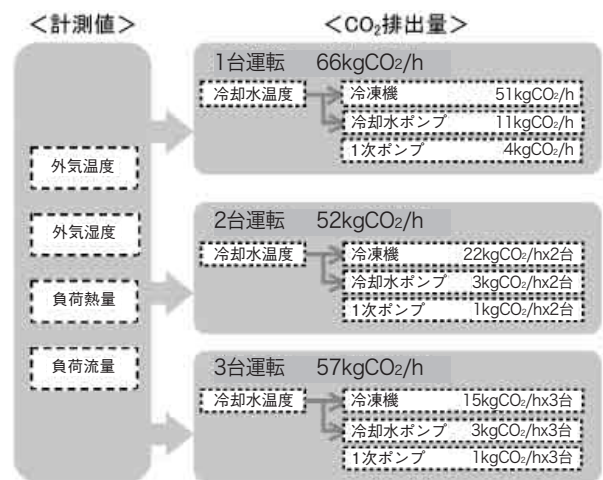


図 4. シミュレーションの流れ

2.3.3 冷却水温度のシミュレーション

冷凍機の COP は冷却水温度で大きく変わるため、CO₂ 排出量のシミュレーションのためには冷却水温度のシミュレーションが必要である。

最小 CO₂ 台数制御のシミュレーションは、放熱量と外気・冷却水のエンタルピ差が比例という冷却塔の特性に則っている。例えば放熱量が一定のときは外気・冷却水のエンタルピ差が一定なので、図 5 のように外気エンタルピが下がれば冷却水温度も下がる。

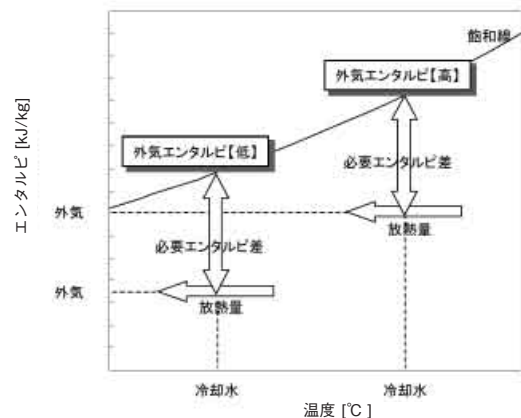


図 5. 冷却水温度のシミュレーション (外気エンタルピ変更)

2.3.1 で記載したように、冷凍機の運転台数ごとの冷却水温度もシミュレーションしている。

冷凍機が1台運転から2台運転になれば冷凍機1台あたりの熱量が半分になるので、冷却塔への放熱量も半分になり、外気・冷却水のエンタルピー差も半分でよい。結果として図6のように、冷却水温度が下がる。

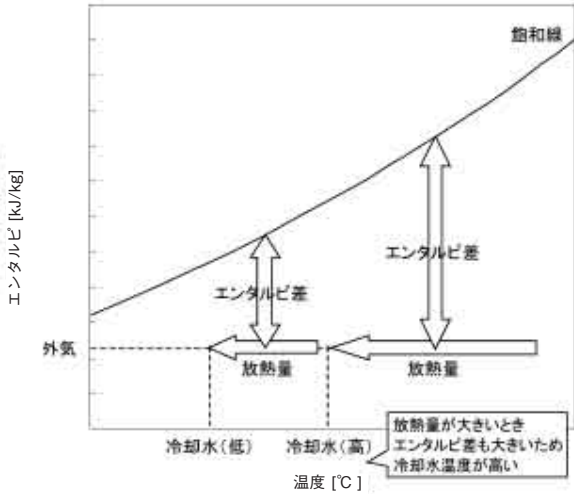


図6. 冷却水温度のシミュレーション (放熱量変更)

2.3.4 冷凍機のシミュレーション

冷凍機によるエネルギー使用量をシミュレーションするにあたり、冷凍機負荷(実測値)・冷却水温度(前述のシミュレーション値)におけるCOPを読み込み、読み込んだCOPを用いてエネルギー使用量を算出する。

冷却水温度としてシミュレーション値を用いるため、2台運転の方が高COPと判断する頻度が多い。この理由は運転台数毎に冷却水温度のシミュレーション値が異なり、COPに影響するためである。例えば図7のように、冷却水温度一定条件でシミュレーションする場合は1台運転が高COPだが、図8のように冷却水温度シミュレーション値を使用した場合、2台運転の方が冷却水温度が低く高COPと判断することができる。

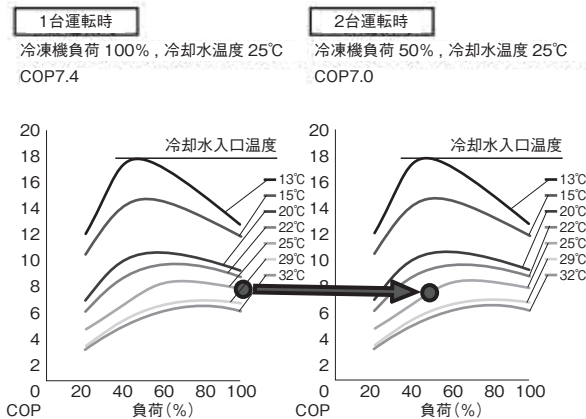


図7. 冷却水温度一定条件の冷凍機 COP

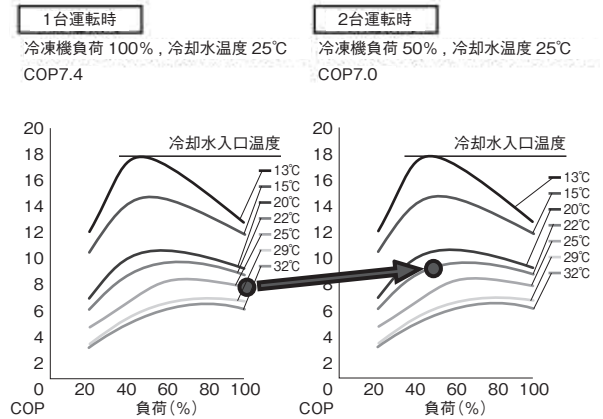


図8. 冷却水温度シミュレーション条件の冷凍機 COP

2.4 実績

2.4.1 冷却水温度のシミュレーション

冷却水温度の実測値・シミュレーション値比較を図9に示す。実測値・シミュレーション値が精度良く一致しているほか、放熱量増加時に冷却水温度が実測値・シミュレーション値ともに上昇しているため、前述のシミュレーション手法が適切と判断できる。

2.4.2 COP

最小CO₂台数制御を評価することを目的に、建物運用中の現場において最小CO₂台数制御・従来制御を切替運転し、負荷率・COPを測定した。

対象現場では等容量のインバータ機2台が設置されており、1次ポンプ・冷却水ポンプともに変流量制御を導入済である。インバータ機の高COP特性は冷却水温度が低いときに限られるため、検証は10月～11月に行った。

従来制御運転中の負荷率・COP測定値を図10に、最小CO₂台数制御運転中の負荷率・COP測定値を図11に示す。

従来制御運転中は高負荷率領域でも運転されていた。一方最小CO₂台数制御運転中は高負荷率領域での運転が無くなり、COPが高い範囲だけで運転することができた。

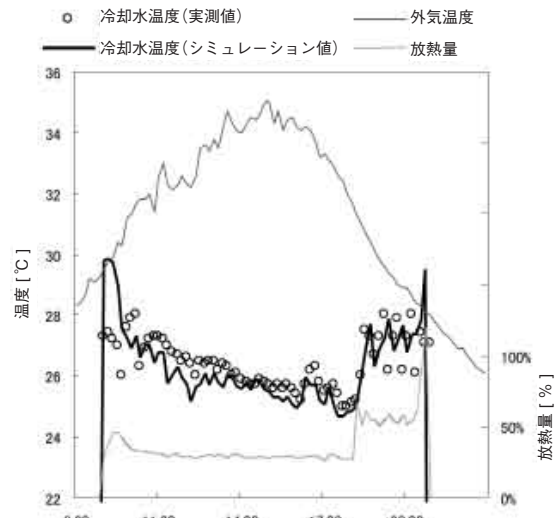


図9. 冷却水温度の実測値・シミュレーション値

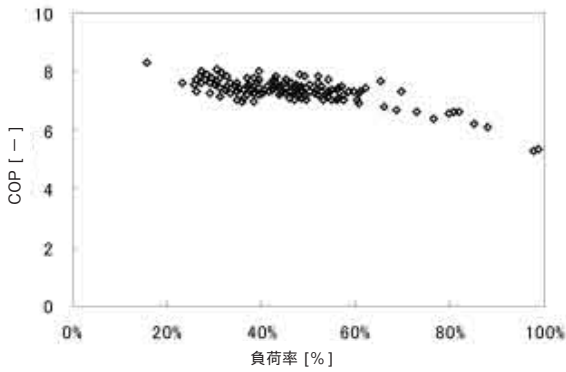


図 10. 従来制御運転中の COP 測定値

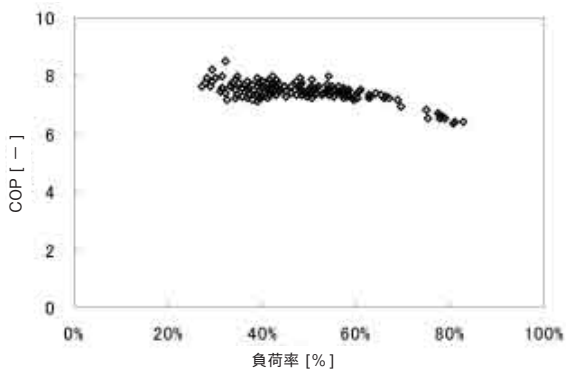


図 11. 最小 CO₂ 台数制御運転中の COP 測定値

3. 省エネルギー効果の可視化

3.1 背景

山武がこれまで提案してきた省エネルギー対策として、送水ポンプ（2次ポンプ、1次ポンプ、冷却水ポンプ）の変流量制御があげられる。

省エネ対策実施後に効果検証を行うにあたり、ポンプの電力使用量を用いることが多い。PARACONDUCTORでも効果検証のため、ポンプの電力使用量をグラフ表示し、制御導入前・制御導入後の電力量を比較している。

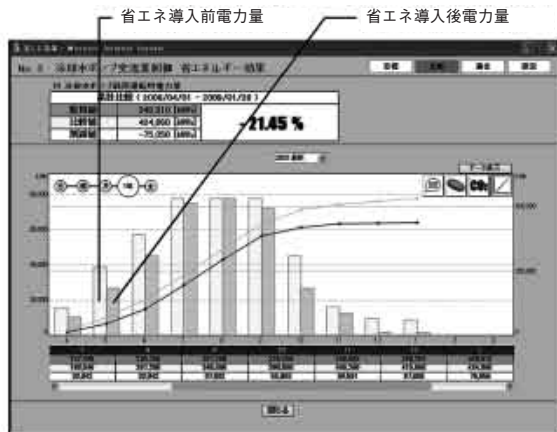


図 12. 省エネルギー効果のイメージ

3.2 課題と解決方法

省エネ対策による効果を把握するにあたり一番客観性が高い方法は、検証対象期間の電力使用量と過去の使用量とを直接比較することである。しかしこの手法には3つの課題がある。

[課題 1] 過去の電力計量値が必要

比較のため、制御導入前の電力計量値が必要である。制御導入前に電力メータが未設置の場合や新築の場合には、電力量を比較できない。

PARACONDUCTORでは課題1を解決するため、「制御導入前のシミュレーション」を実現し、過去の電力計量値を把握出来ない場合でも省エネルギー効果検証を可能とした。

[課題 2] 負荷の増減に左右されやすい

空調負荷によるエネルギー使用量は負荷の増減に左右されるため、過去との比較では省エネルギー効果を把握し難い場合が多い。

一般的にポンプ変流量制御による省エネルギー制御による効果は10～50%程度である。一方猛暑/冷夏の影響でエネルギー使用量は最大15%増減するため、省エネルギー制御による効果を把握できない場合が多い。

PARACONDUCTORの「制御導入前のシミュレーション」は、制御導入後の負荷にもとづき導入前電力をシミュレーションするため、負荷の増減に左右されない省エネルギー効果を把握できる。

[課題 3] 省エネ制御導入後の電力計量値が必要

比較のため、電力メータ設置が必要である。

PARACONDUCTORは「メータ代替のシミュレーション」を可能としたため、電力メータを設置しなくても省エネ効果検証ができる。

3.3 シミュレーション技術の紹介

3.3.1 制御導入前のシミュレーション

山武は特に2次ポンプに対する省エネ制御を充実させており、顧客のニーズに応じた省エネルギー制御手法を販売している。2次ポンプの省エネ制御手法の一覧を下に示す。後に記載の制御ほど高機能で省エネルギー効果が大きい傾向にある。

- ・ 送水圧力一定制御
- ・ 推定末端圧制御
- ・ 末端差圧制御
- ・ 末端差圧カスケード制御
- ・ 流量計測機能付バルブによる末端差圧カスケード制御
- ・ 流量計測機能付バルブによる最小差圧制御
- ・ VWV 制御
- ・ 流量計測機能付バルブによる VWV 制御

省エネ対策として、商用ポンプへ省エネ制御を導入

するほか、省エネ対策実施済の変流量ポンプをさらに高機能の制御へ変更する場合がある。

PARACONDUCTORでは省エネ制御導入前の条件を商用ポンプ・送水圧力一定制御より選択できるようにした。

＜制御導入前が商用ポンプの場合＞

商用ポンプ電力量のシミュレーションでは、ポンプ1台あたりの電力量を一定とみなし、運転台数分の電力量を算出する。

＜制御導入前が送水圧力一定制御の場合＞

制御導入前の条件として、送水圧力一定制御を想定する。送水圧力一定制御を想定したシミュレーションの考え方は、下記のとおりである。

ポンプの試験成績書よりQ-H特性を参照し、送水圧力一定制御を想定したインバータ周波数を算出する。このとき送水圧力一定制御の運転点は、負荷流量の計測値と送水圧力一定制御を想定した圧力設定値より決定する。図13に概要を示す。

次に同じ試験成績書のQ-E特性を参照し、上記インバータ周波数における電力を算出する。図14に概要を示す。

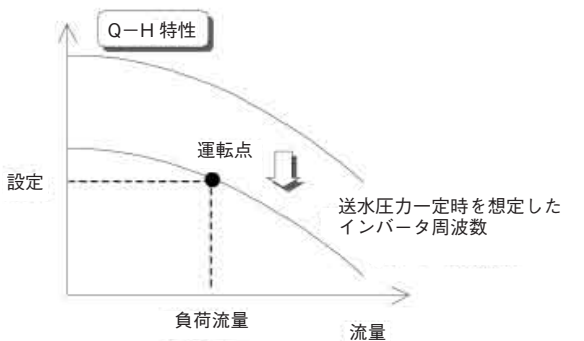


図 13. 送水圧力一定制御のインバータ周波数

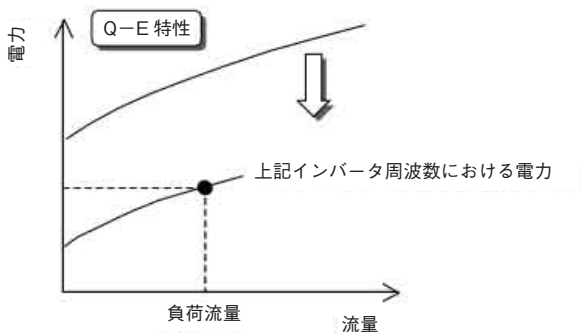


図 14. 送水圧力一定制御の電力

3.3.2 メータ代替のシミュレーション

省エネルギー対策による効果を把握するためには、電力使用量の把握が不可欠である。

PARACONDUCTORの「省エネルギー効果の可視化」はポンプに電力メータを設置する代わりに、制御用の監視・出力値にもとづき電力量をシミュレーションすることができる。

シミュレーションの概要を記載する。

＜冷却水ポンプ＞

配管抵抗が一定の条件においては、ポンプ電力はインバータ出力の3乗に比例する。

冷却水システムの配管抵抗は変化しないため、理論的には電力はインバータ周波数の3乗に比例する。ただしデータを分析した結果、実際は電力とインバータ周波数の3乗は一致しないことが明らかになった。一致しない原因として、冷却塔分の静水頭による影響があり配管抵抗一定とみなせないこと、また低負荷時ほどインバータ損失の割合が大きくなることがあげられる。

しかしインバータ周波数と電力は強い相関をもつことは明らかなので、試運転作業において電力もしくは電流値を計測し、実際の電力特性にあわせて電力パラメータを設定することで、電力メータの代替として使用することができる。

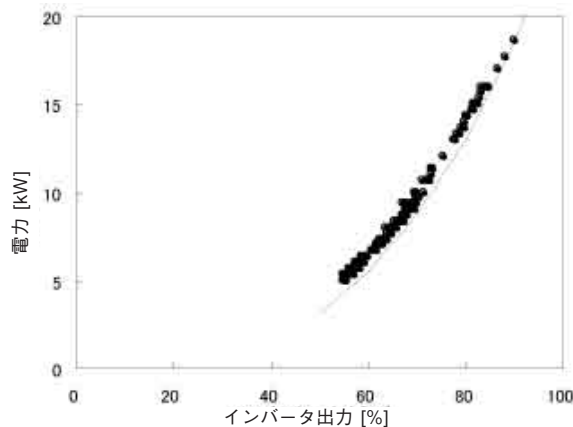


図 15. 冷却水ポンプ

※ インバータ周波数の3乗を点線で表示した

＜2次ポンプ＞

2次ポンプは送水システムに制御弁が設置されているため、冷却水ポンプのように配管抵抗を一定とみなすことができない。そこで試験成績書にもとづき負荷流量・インバータ周波数を用いたシミュレーションを行う。試験成績書のQ-E特性を参照し、負荷流量とインバータ周波数のときの電力使用量を算出する。

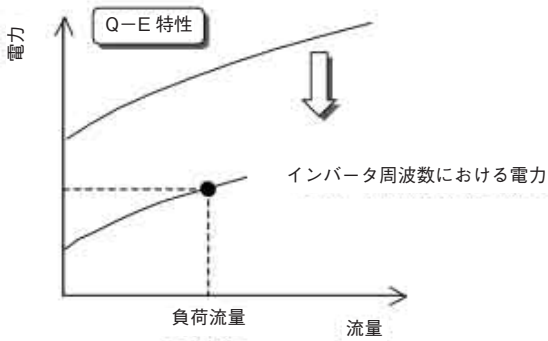


図 16. 2 次ポンプ電力の算出

4. おわりに

空調・熱源設備は建物ごとに設計されており、多種多様な構成になっている。山武は各設備に対する省エネ制御を実現しており、ほとんどの建物に省エネルギー制御を提案できる。

今後は複数設備の制御に取り組み、省エネ制御をさらに拡充したい。たとえばある設備と他設備とで省エネのトレードオフがある場合、他設備もあわせた省エネ制御を実現すれば、省エネ効果を大きくできる。

また設備設計動向への対応も必要である。例えば、近年複数冷凍機で冷却塔を共有する建物が増えている。共有冷却塔の設備においては、冷凍機の運転台数に対して冷却塔の運転台数が多い特徴があるため、冷却塔の容量制御による省エネ効果が見込まれる。

複数設備や共有冷却塔の省エネ制御においては制御対象設備が増えるため、開発（スタディー）、営業（省エネ効果試算）においてシミュレーション技術を活用し、精度の高い省エネ制御を提供できるようにしたい。

※ 1 COP (Coefficient of Performance)

冷凍機の効率を示す。(生成熱量÷投入熱量) で計算する。

<商標>

PARACONDUCTOR は、株式会社 山武の商標です。

PARAMATRIX は、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

松尾 裕子 ビルシステムカンパニー
 開発本部開発1部
 コントローラソフトウェア1グループ

サファイア高温隔膜真空計の センサ素子・パッケージ開発

Development of the Sensor Chip and Package for a High-Temperature Sapphire Capacitance Diaphragm Gauge

株式会社 山武

関根 正志
Masashi Sekine

株式会社 山武

石原 卓也
Takuya Ishihara

株式会社 山武

差波 信雄
Nobuo Sashinami

株式会社 山武

谷 武夫
Takeo Tani

キーワード

サファイア, 隔膜真空計, 静電容量式, 圧力センサ, 高耐食性, 高耐熱性, オイルフリー

腐食性雰囲気や高温という厳しい環境下でも直接使用できる圧力センサを実現するために、センサ素子の材料自体の見直しから着手しサファイアを選定、独自に培ったサファイア MEMS (Microelectromechanical Systems) 技術を活かし工業用単結晶静電容量式圧力センサ素子を開発した。またセンサ素子の特性を維持したまま耐食性・耐熱性・高气密性といった要求を満足した独自のパッケージ技術の確立により高温隔膜真空計の受圧部の開発・実用化に成功したので報告する。

In order to develop a pressure sensor that can be used directly in harsh environments such as corrosive atmospheres or high temperatures, we reexamined sensor chip materials and selected sapphire as the most suitable one, and then developed an industrial single-crystal-based capacitance pressure sensor chip, on the basis of our independently developed sapphire MEMS (microelectromechanical systems) technology. We also established a unique packaging technology that realizes high corrosion resistance, high heat resistance, and high airtightness without affecting the characteristics of the sensing elements. We then developed the pressure receiving part for a diaphragm vacuum gauge for high temperature applications and put the technology into practical use, on the basis of that technology. This paper describes the research and development process mentioned above.

1. はじめに

計測環境の厳しい現場では、高耐食性・高耐熱性で、かつ測定対象に直接使用できる高精度な圧力センサに対する要望が潜在していた。

従来、工業用途として一般的にはシリコンを基材とした圧力センサが用いられてきた。シリコン自体は高耐食性材料ではないため被計測媒体からセンサを保護するために、その多くがダイアフラムを形成したオイル封入構造となっており、高温における計測が困難となる上にセンサ自体が大型化してしまうのは不可避であった。またオイル漏出を危惧し食品や医化学薬品分野、半導体製造分野などからも敬遠されがちであった⁽¹⁾。

このような問題を解決するため我々はセンサ素子の材料自体の見直しから着手し、単結晶工業用サファイア

を感圧部に採用したセンサ素子を開発した。サファイアはシリコンに比べて耐食性、耐熱性の点で極めて優れた材料であるため、従来測定困難であった厳しい環境においてセンサ素子部を直接露出して圧力計測することが可能となった。この特長を活かして、腐食性や高温が要求される半導体製造装置におけるガス圧力計測機器用として「サファイア高温隔膜真空計」の受圧部を開発した。開発した圧力レンジは 0 - 100.00 Pa abs ~ 0 - 133.32 kPa abs である。

センサ自己加熱機能、検出回路や圧力計測技術の詳細は本稿と同時に azbil Technical Review に掲載される参考文献(2)を参照されたい。

		サファイア (Al ₂ O ₃ 単結晶)	シリコン (Si単結晶)	石英ガラス (SiO ₂)	セラミックス		
					Al ₂ O ₃	SiC	Si ₃ N ₄
耐熱性	大気中上限可使温度(°C)	1950	~400	1200	1400-1750	1600	1200
耐食性	耐酸性	◎	△	△	○	○	○
	耐アルカリ性	◎	×	△	○	△	△
機械的特性	ヤング率(GPa)	470	170	74	300-410	300-460	200-320
	ビッカース硬度(GPa)	23	11-12	7.5	15-23	20-24	12-18
	曲げ強度(室温)(MPa)	690	530	40-70	250-740	500-930	600-1100
電気的特性	比抵抗(室温)(Ω・m)	10 ¹⁴	2.3×10 ³ (半導体)	10 ¹⁶	10 ¹⁴	10 ⁻² (半導体)	10 ¹¹

表 1. サファイアと他材料の材料特性の比較⁽¹⁾

2. サファイアの特性

Al₂O₃ (酸化アルミニウム) は γ -Al₂O₃ など多くの多形が知られているが、いずれも 1,000°C 以上の高温では最も安定な結晶構造の α -Al₂O₃ となる。耐食性セラミックスとして知られているアルミナセラミックスは α -Al₂O₃ の焼結体である。 α -Al₂O₃ の単結晶は、天然にも存在し、宝石として良く知られている。酸化鉄、酸化チタン、酸化ニッケルなどの不純物が含まれると青色や黄色を呈し“ブルーサファイア”、“イエローサファイア”などと呼ばれている。酸化クロムが不純物として含まれると赤色を呈し“ルビー”と呼ばれている。

添加物を含まない α -Al₂O₃ の単結晶は無色透明であり、“ホワイトサファイア”または単に“サファイア”と呼ばれ、人工的に製造され工業材料として広く使用されている。本稿で記載しているサファイアは、このホワイトサファイアのことである。

表 1 にサファイアと他の材料特性の比較を示す。サファイアはシリコンだけでなく他の耐食耐熱性セラミックスと比較しても、耐食性、耐熱性に優れた材料である。耐食性の点では、サファイアが単結晶であることも貢献している。例えばアルミナセラミックスは、主材料はサファイアと同じ Al₂O₃ であるが、粒界などに存在する Al₂O₃ 以外の焼結助剤などの成分が耐食性の制限になり、サファイアよりも耐食性が劣る。

また、サファイアは機械的強度も優れている。金属ダイアフラムを用いた圧力センサの受圧部では繰り返しの変形が強いられ、金属に見られる塑性変形が起ると精度の悪化を招く。サファイアは、シリコンと同様の完全弾性体であり、弾性特性を示す脆性的な破壊は 900°C 程度の高温度域まで優先するのでこのような問題は発生しない。以上のように、腐食性や高温雰囲気中で直接圧力計測ができるセンサ素子材料としてサファイアは極めて優れた材料であるといえる⁽¹⁾。

3. センサ素子

隔膜真空計のセンサ素子構造と製作技術の概略を紹介する。センサ素子の製作プロセスと製作技術詳細は、参考文献 (3) を参照されたい。

3.1 センサ素子構造

サファイア圧力センサ素子は図 1 に示すよう圧力を受けて撓む薄板 (ダイアフラム) 及びコンデンサを形成するための窪み (キャビティ) をもつ台座部からなりそれぞれに形成された電極によって 2 つのキャパシタが構成されている。1 つはダイアフラムの中央に配置され印加圧力の大きさに応じて静電容量値が変化する感圧キャパシタ、もう 1 つはダイアフラムの端付近に配置された参照キャパシタである。感圧キャパシタの持つ静電容量を C_x、参照キャパシタの持つ静電容量を C_r とする。この 2 つのコンデンサは面積を調整して容量値が等しくなるよう設計してあり、ダイアフラムが圧力を受けると理想的には外側の参照キャパシタ (C_r) はほぼ変化せず、中央の感圧キャパシタ (C_x) のみが増加する。センサ出力は C_x 自体ではなく、C_x-C_r または (C_x-C_r)/C_x として与えられる。この C_x-C_r の差分を出力とすることにより基材の熱による膨張や外部からの電氣的ノイズの影響をキャンセルすることができる。

基材が等方的で内部応力がゼロならば、周辺を固定した半径 a の円板が均等圧 p を受けた時の微小撓み量 w は中心からの距離 r の関数として下記のような一般式が与えられている。

$$w(r) = \frac{p}{64D} (a^2 - r^2)^2 \tag{1}$$

ここで D は曲げこわさで、基材の厚さを h、ヤング率を E、ポアソン比を ν としたとき、

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \tag{2}$$

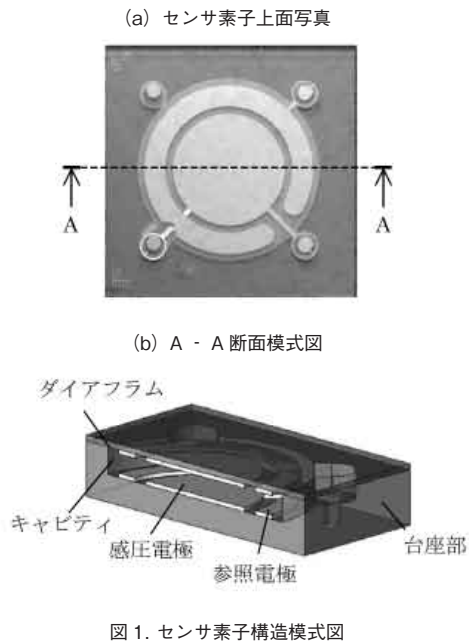


図1. センサ素子構造模式図

と表される。圧力が印加されたときのキャビティとダイアフラム間の距離はこの $w(r)$ を圧力が印加されていないときのキャビティ深さ d_0 から差し引くことにより得ることができる。したがって感圧キャパシタ C_x (半径 r_0) 及び参照キャパシタ C_r (内半径 r_1 、外半径 r_2) は半径方向の積分を用いて以下のように表される。

$$C_x = 2\pi \int_0^{r_2} \frac{\epsilon_0 r dr}{d_0 - w(r)} \quad (3)$$

$$C_r = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \frac{\epsilon_0 r dr}{d_0 - w(r)} \quad (4)$$

ここで ϵ_0 は真空の誘電率である⁽⁴⁾。

3.2 センサ素子製作技術

サファイアが耐食性に優れた高強度材料であるということは、裏を返せば極めて加工し難い材料であるといえる。サファイアはMEMSデバイスにおける各種製作技術の蓄積が少なく、図1の構造を実現するために様々な製作技術を独自に開発する必要があった。

ダイアフラムと台座部の接合は、接合界面にろう材やガラスなどの異種材料を介さない直接接合にて実施した。界面に異種材料が存在すると、耐食性や耐熱性に悪影響を及ぼしサファイアの特長を損なってしまい、また被接合体と接合材料との熱膨張率の違いによる熱応力が発生するなどのセンサ特性悪化の原因にもなる。

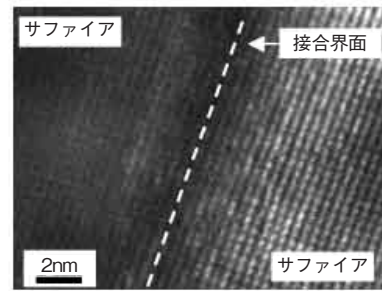


図2. サファイア直接接合部の断面TEM像

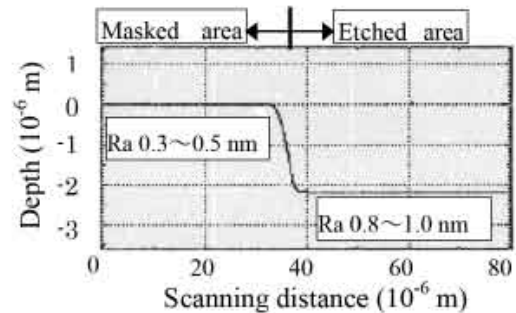


図3. キャビティ測定結果

図2に直接接合の断面観察結果の例を示す。断面TEM(Transmission Electron Microscope)像からサファイア同士が原子レベルで接合されている事がわかる。

電極を格納するキャビティの製作はドライエッチングにて形成している。エッチング領域の面が荒れていると局所的な電極間ギャップのばらつきや、電極のパターニング不良の原因となる。図3にキャビティ形成後測定結果を示す。表面の粗さはRa 1 nm 以下を達成しており、これにより高精度に設計値どおりの静電容量値を得る事ができる⁽⁵⁾。

4. センサパッケージ

4.1 概要

図4に隔膜真空計のパッケージング構造の断面模式図を示す。隔膜真空計は圧力レンジが0 Pa - 100.00 Paレンジのように非常に微小なものもあり、パッケージングによるセンサ素子への応力等の影響を極力低減させる必要がある。また半導体プロセスで用いられるエッチングガスやクリーニングガスに耐えうる部材選定・接合方法の確立が必要である。接ガス部にはサファイアと、金属の中では耐食性・耐熱性に優れたNi基合金を使用している。本構造を実現するために、接合界面に介在物を使用しない2種類の接合の開発を行った。

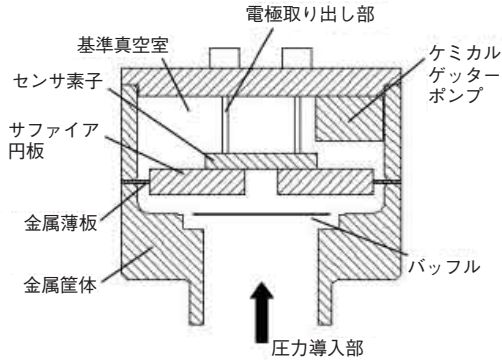


図4. センサパッケージ断面模式図

隔膜真空計は絶対圧計であり、リファレンス圧力を高真空に長期間保つ必要があるが、これを維持するための気密性の高い接合方法の確立と、外部からのリークやリファレンス室壁面からの放出ガス・透過ガスなどの排気が必要となる。排気にはケミカルゲッターポンプを採用している。独自に開発した真空封止技術とケミカルゲッターポンプ活性化により基準真空室は高真空に保持されている。

また、圧力導入部から固形物のセンサ素子への直接の衝突を避けるためバッフルを設けている。

4.2 接合

(1) センサ素子パッケージングにおいて外部からの機械的・熱的ストレスの軽減のためセンサ素子は直接金属に接合せず、同材料であるサファイアの円板に接合される。接合方法は耐食性で劣るガラス・ろう材などの介在物を使用しない手法で実施した。図5にサファイア円板／センサ素子の接合部断面観察結果を示す。このFE-SEM(Field Emission-Scanning Electron Microscope)像からは明瞭な接合界面は判別できない。図6にTEM像を示すが、原子レベルにおいても良好な接合状態が確認された⁽⁶⁾。

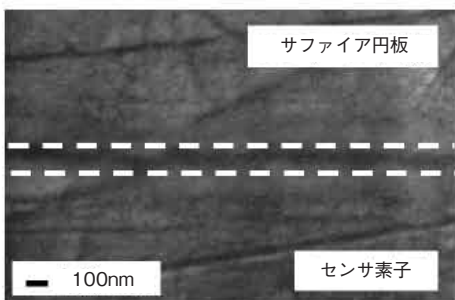


図5. サファイア円板 / センサ素子接合部の断面 FE-SEM 像

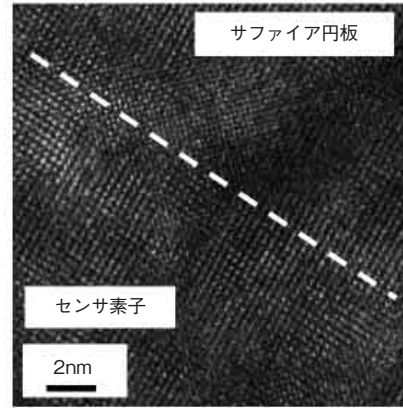


図6. サファイア円板 / センサ素子接合部の断面 TEM 像

(2) センサパッケージ筐体は金属で構成されているためサファイアと金属の接合は必須である。センサ素子への機械的・熱的ストレスを低減させるために、サファイア円板は十分に薄い金属薄板にいったん接合され、金属薄板はその端部を金属筒体と固定される。サファイア円板と金属薄板の接合は耐食性・耐熱性が要求されるので、介在物を使用しない接合を開発し適用した。図7, 8に接合部断面観察結果を示す。SEM像ではサファイアと金属の組成の違いを反映した界面が明瞭に観察されるが、TEMにてより拡大してみると原子レベルでの接合を確認することができる。

いずれの接合も隔膜真空計として必要な強度、耐食性、耐熱性、気密性を有していることを確認した。

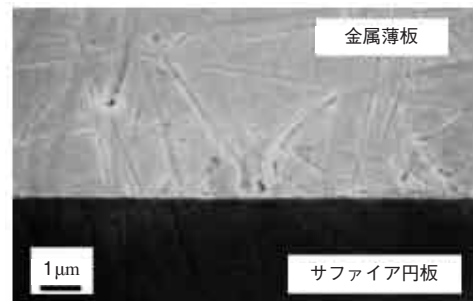


図7. 金属薄板 / サファイア円板の断面 FE-SEM 像

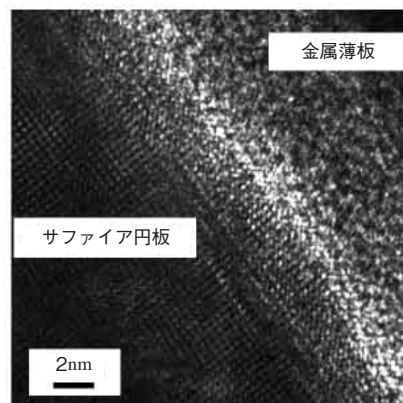


図8. 金属薄板 / サファイア円板の断面 TEM 像

5. 受圧部特性

開発した圧力レンジは、

0 Pa - 100.00 Pa ~ 0 Pa - 133.32 kPa である。

ここでは温度や機械的ストレスなどの悪影響を最も受けやすい最小レンジである 0 Pa - 100.00 Pa レンジの基本特性・信頼性特性の評価結果を示す。

5.1 基本特性

図 9 に 200 °C 自己加熱における圧力特性の計算値と実測値を示す。計算値は 3.1 に示した微小撓みモデルから計算した。実測値と計算値が良く合致していることから理論計算どおりの特性が得られている事が確認できる。

5.2 信頼性特性

図 10 に 200 °C 自己加熱における長期ゼロ点安定性の結果を示す。1000 時間後でも ± 0.1 % F.S. 以内であり極めて安定している事がわかる。

図 11, 12 に 200 °C 自己加熱における圧力サイクル試験におけるゼロ点変化量, スパン変化量の結果を示す。印加圧力は 0.1 Pa \leftrightarrow 350 Pa で 100 万回繰り返した。ゼロ点・スパン変化量ともに ± 0.5 % 以内に納まっており、これによりセンサ素子におけるサファイアダイアフラムの優れた弾性特性が検証できた。

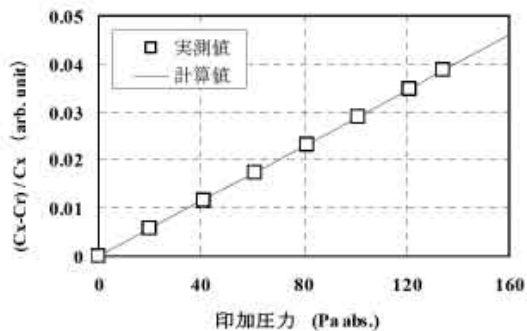


図 9. 200 °C におけるセンサ圧力特性

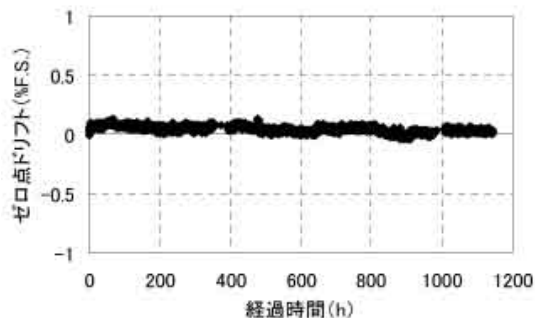


図 10. ゼロ点安定性 (200 °C)

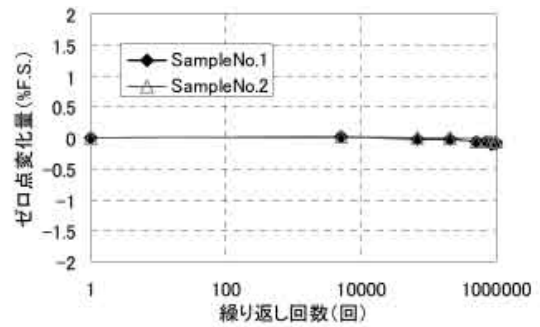


図 11. 圧力サイクル試験結果 (ゼロ点変化量)

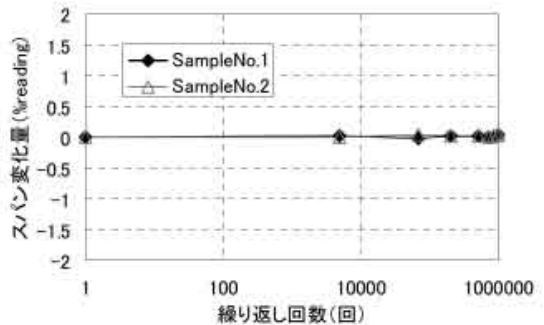


図 12. 圧力サイクル試験結果 (スパン変化量)

図 13, 14 に 200 °C 自己加熱における大気圧サイクル (約 100kPa) 試験におけるゼロ点変化量, スパン変化量の結果を示す。半導体製造プロセス等で真空計が使われる場合、繰り返されて印加される過大圧はチャンバ開放時の大気圧である。本試験の結果では測定レンジの約 1000 倍の過大圧印加 100 万回に対して、ゼロ点・スパン変化量ともに ± 0.5 % 以内に納まっている。

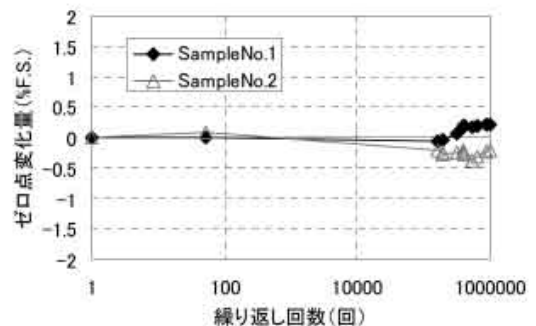


図 13. 大気圧サイクル試験結果 (ゼロ点変化量)

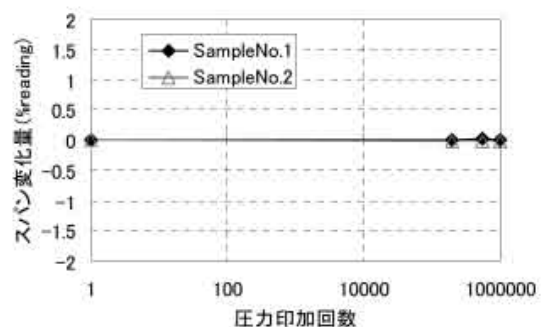


図 14. 大気圧サイクル試験結果 (スパン変化量)

図 15, 16 に 200℃ 自己加熱における過大圧サイクル (300kPa) 試験におけるゼロ点変化量, スパン変化量の結果を示す。印加圧力は 100Pa 以下⇄300kPa で, 各圧力の保持時間を 30 min とし, 250 回繰り返した。ゼロ点・スパン変化量ともに ± 0.5 % 以内に納まっており十分な耐性を持っていることが確認できた。

これらの結果より, サファイア材料の完全弾性特性を活かしたセンサ素子の優れた特性がパッケージされた状態でも実現できていることを示し, 本パッケージ構造の有効性が検証できた。

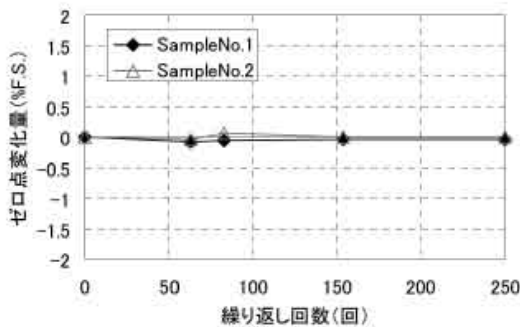


図 15. 300 kPa サイクル試験結果 (ゼロ点変化量)

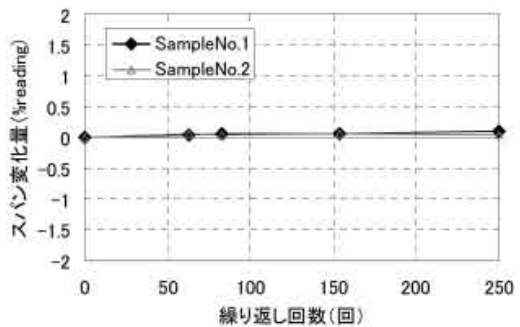


図 16. 300 kPa サイクル試験結果 (スパン変化量)

6. おわりに

サファイア加工技術やパッケージング技術開発を行うことにより, 高耐食性, 高耐熱性, 高再現性, 高精度である主に半導体製造装置分野向けの高温度型隔膜真空計受圧部を実用化することに成功した。

半導体製造装置分野以外においても, 300kPa のすぐれた繰り返し圧力特性を活かし, 医薬品製造機器等に広く採用され始めている。このように医薬, 食品, ファインケミカルといった分野への応用も今後期待される。

現在, 市場ニーズにもとづき, より高い自己加熱温度やより低圧力のレンジ等を開発中である。今後も開発中の機種の実用化を目指すとともに, サファイアの特長を活かした圧力センサ以外の各種センサにも幅広く応用していきたい。

7. 謝辞

サファイア加工技術における基礎的な技術開発においてご協力及びご指導いただいた東海大学の安永教授, 堀澤専任教授, またパッケージにおける基礎的な技術開発においてご協力及びご指導いただいた東海大学の有賀教授, 湘南工科大学の藤津教授 (現: 東京工業大学), Lawrence Berkeley 国立研究所 Tomsia 教授並びに Saiz 博士 (現: Imperial College London) に感謝の意を表す。

<参考文献>

- (1) 木村: MEMS マテリアルの最新技術 監修 江刺正喜, シーエムシー出版, pp.44-51 (2007)
- (2) 吉川, 原田, 市原, 長田, 山口: サファイア高温隔膜真空計の開発, azbil Technical Review (2011), pp.34-41, 株式会社 山武
- (3) 添田: サファイアを用いた高耐食性静電容量式圧力センサ, Savemation Review (2001), Vol.19, No.2, pp.36-43, 株式会社 山武
- (4) 石原, 長田: 高温型サファイア隔膜真空計の開発, 第 23 回センシングフォーラム (2006), pp.130-135
- (5) M. Soeda, T. Kataoka, Y. Ishikura, S. Kimura, Y. Yoshikawa, M. Nagata, Sapphire-Based Capacitive Pressure Sensor for High Temperature and Harsh Environments Application, Proceedings of the IEEE Sensors 2002 Conference, pp.950-953 (2002)
- (6) T. Ishihara, M. Sekine, Y. Ishikura, S. Kimura, H. Harada, M. Nagata and T. Masuda, Sapphire-based Capacitance Diaphragm Gauge For High Temperature Applications, Transducers '05 Digest of Technical Papers volume 1, pp.503-506 (2005)

<著者所属>

関根 正志	技術開発本部 商品開発部
差波 信雄	技術開発本部 商品開発部
石原 卓也	技術開発本部 商品開発部
谷 武夫	技術開発本部 商品開発部

サファイア高温隔膜真空計の開発

Development of a High-Temperature Sapphire Capacitance Diaphragm Gauge

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー 吉川 康秀
Yasuhide Yoshikawa

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー 原田 英史
Hidefumi Harada

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー 市原 純
Jun Ichihara

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー 長田 光彦
Mitsuhiko Nagata

株式会社 山武
山口 徹
Toru Yamaguchi

キーワード

サファイア, 隔膜真空計, 静電容量式, 圧力センサ, 高耐食, 高耐熱, 単結晶

センサ材料として単結晶サファイアを使用し高精度, 高信頼性, 小形, 軽量を実現した主に半導体製造プロセス用途向けの自己加熱タイプの静電容量式 COVAC™ サファイア高温隔膜真空計を開発したので報告する。単結晶サファイアは極めて高い耐食性, 耐熱性を有し, また優れた機械的特性も有しているため, 腐食性ガスや高い温度の苛酷な環境下でも高精度であり長期安定性の優れた真空計を実現した。またマイクロプロセッサを用いた信号処理により, 直線性に優れ温度特性の少ない高精度な計測を実現した。

Using single-crystal sapphire as the sensor material, we have developed the self-heating COVAC™ High-Temperature Sapphire Capacitance Diaphragm Gauge, which is high-precision, highly-reliable, small-sized, lightweight, and intended to be used mainly in semiconductor manufacturing processes. Single-crystal sapphire possesses extremely high corrosion resistance and heat resistance and also possesses excellent mechanical characteristics, so that it provides high precision even in harsh environments such as corrosive atmospheres or high temperatures, allowing us to succeed in realizing a long-term stable vacuum gauge. We have also realized high-precision measurement with high linearity and high tolerance for temperature changes, by means of signal processing using a microprocessor.

1. はじめに

半導体デバイスを製作するプロセスのエッチング工程や成膜工程では, 各種の材料ガスが使用され, その圧力を正確に計測し制御する必要がある。これらの材料ガスは腐食性ガスである場合が多い。また反応ガスの固化による堆積を防ぐために多くの場合は, 高温に加熱しておく必要がある。半導体製造プロセス用途向けの隔膜真空計はこれらの過酷な環境下においても正確な計測が要求される。

当社ではこれらの要求を満足させるために, センサ材料として高耐食, 高耐熱である単結晶サファイアを使用し高精度, 高信頼性, 小形, 軽量を実現した自己加熱タイプの静電容量式 COVAC サファイア高温隔膜真空計を開発したので報告する。

主な仕様を以下に示す。

圧力レンジ: 0 - 100 Pa abs ~ 0 - 133.32 kPa abs

自己加熱温度: 125 °C ~ 200 °C

精度: 0.25 % Reading ~ 0.5 % Reading

図1に開発した製品の外観を示す。



図1. COVAC サファイア高温隔膜真空計外観

2. サファイアセンサチップ及びパッケージ構造

サファイアは結晶構造の分類がコランダム構造をとる、無色透明な $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の単結晶のことを言う。サファイアは耐酸、耐アルカリ性に優れ、高温使用にも耐えられる優れた材料であり、また単結晶であることから機械的特性にも優れており、過酷な環境で使用される圧力センサには最適な材料である。

しかしながら丈夫である材料ということは、その反面加工することが非常に難しい材料である。そのため圧力センサとして実用化することは困難であった。しかし当社ではサファイアをエッチングする技術や、耐食性や耐熱性を落とさずにサファイア同士、及びサファイアと金属を接合する技術を開発することに成功した。そのため実用レベルの商品を開発することができた。

サファイアの加工技術や構造の詳細については本稿と同時に azbil Technical Review に掲載される、参考文献(1)を参照願いたい。

2.1 サファイアセンサチップ

図2にサファイアセンサチップの外観を、図3にその模式断面図を示す。

センサチップは感圧ダイアフラムと、コンデンサを形成するためのキャビティをもつベースで構成され、どちらもサファイアを構成材料としている。キャビティはドライエッチングで形成され、ダイアフラムとベースのサファイア同士の接合は耐食性、耐熱性を落とさない直接接合により接合されている。センサの大きさは約 10 mm \square 、ダイアフラムの直径は約 8 mm である。

ダイアフラムとベースには対向した金属電極が形成されており、感圧容量 C_x と参照容量 C_R の2つの容量を構成している。感圧容量はダイアフラムの内側に形成され圧力により容量値が変化する。参照容量はダイアフラムの外側に形成され、圧力により変化しにくく補正のために用いられる。感圧容量と参照容量について式(1)の計測をすることにより、材料の熱膨張による温度特性を抑えることができ、誤差の少ない圧力計測ができる。

過大圧力が印加されたときは、ダイアフラムが対向するベースにぶつかり破壊されることが防止されるため高い耐圧性能を保有している。キャビティは参照圧力室と導通している。

$$\frac{C_x - C_R}{C_x} = \frac{\varepsilon \cdot F \cdot \frac{S}{d \cdot (1 - \alpha \cdot P)} - \varepsilon \cdot F \cdot \frac{S}{d}}{\varepsilon \cdot F \cdot \frac{S}{d \cdot (1 - \alpha \cdot P)}} = \alpha \cdot P \quad \text{式(1)}$$

- ε : Permittivity in Cavity
- F : Thermal expansion coefficient of sensor material
- S : Area of electrode
- d : Distance between electrodes
- α : Deflections coefficient of diaphragm
- P : Applied pressure

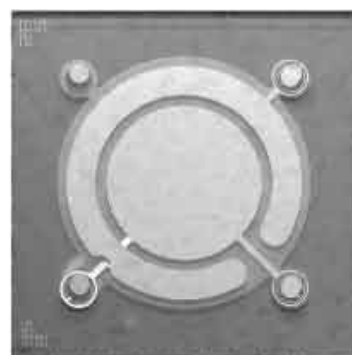


図2. サファイアセンサチップ 外観

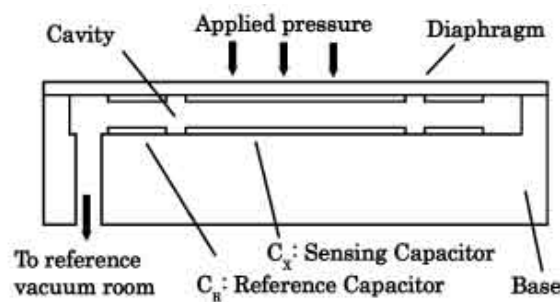


図3. サファイアセンサチップ 模式断面図

2.2 パッケージ構造

図4にパッケージ構造模式断面図を示す。

センサチップは機械的ストレスを軽減するため、一旦チップと同じ材料のサファイア円板で受けて、さらにその円板を金属薄板を介して金属筐体に接続している。チップとサファイア円板のサファイア同士の接合、及びサファイア円板と金属薄板の接合は耐食性、耐熱性を落とさない接合技術にて接合されている。

絶対圧力を計測するため、ケミカルゲッターポンプにより参照圧力室は高真空に保持されている。

固形物のセンサチップへの直接の衝突を避けるため配管にはバッフル板が設置されている。

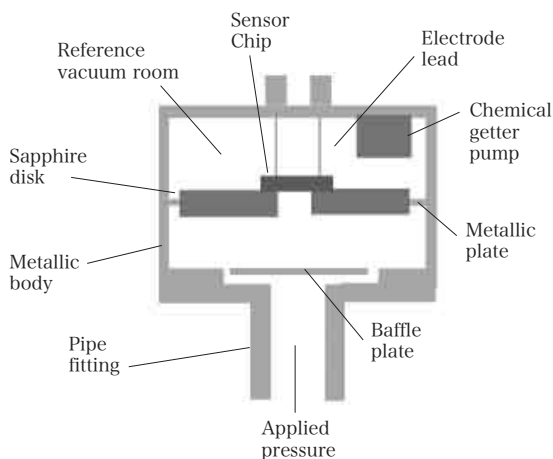


図4. パッケージ構造模式断面図

3. 検出回路

3.1 検出回路要求事項

開発したセンサは表1に示されるように、微小圧力の0 Pa ~ 100 Paレンジにおいては、約40 pFのベースキャパシタンスに対して、フルスケール圧力印加によって1 pF程度の微小容量変化しか発生しない。よって製品要求性能の±0.25 % Reading以内を満たすためには±0.1 fF以内の容量変化を正確に計測する回路が要求される。そのため寄生容量や様々な外乱要因に影響されず微小容量が安定して測定できる回路が必要になる。応答速度は63 %応答にて20 msの高速応答が要求されるため安定した微小容量を高速に計測する必要がある。

またセンサはヒーターにより高温に加熱されているため、検出回路をセンサ近傍には配置できない。そのためセンサと回路の距離が離れた状態でそれを実現する必要がある。

3.2 開発した検出回路の動作原理と特長

外乱要因に影響されず、安定した微小容量を高速に検出するために、いくつかの技術開発を検討しそれを実現した。以下にその概要について記載する。

開発した検出回路のブロック図を図5に示す。図5はCx - CRを計測するブロックを示している。

- ・センサ容量のCx, CRの片側の端子には正弦波波形の電圧を印加している。正弦波波形はCPUで演算されたΔΣ方式で生成したコードをD/Aコンバータに出力することにより、高調波歪の少ない信号を形成している。さらにその信号はバンドパスフィルタにて、よりノイズの少ない信号をセンサに供給することにより、安定したセンサ出力を得られるようにしている。
- ・Cx, CRのもう片側の端子は電荷増幅器に接続されている。その信号ラインは電荷増幅器により仮想接地となる構造をとっており、接地電位での静電シールドを有効にし、寄生容量の影響を受けないようにしている。
- ・電荷増幅器はCx, CRに流れる電流を電圧に変換し、

Cx, CRに比例した振幅の信号を出力する。

- ・電荷増幅器の出力は差動増幅器に接続されCx - CRの信号をとりだすとともに、静電シールドでもシールドしきれない寄生容量を介して侵入してくるノイズをキャンセルしている。
- ・差動増幅器の出力はバンドパスフィルタでさらにノイズを除去している。
- ・バンドパスフィルタの出力は、正弦波波形で同期された同期検波回路に接続され、整流された後にローパスフィルタでDC信号に変換される。

同期検波回路では信号を整流するとともにノイズ成分をキャンセルしている。

- ・ローパスフィルタの出力は1 ms高速サンプリングの24 bit A/Dコンバータにてデジタル信号に変換し、マイクロプロセッサに入力している。
- ・CxについてもCx - CRと同様に計測されマイクロプロセッサにて(Cx - CR)/Cxが演算される。
- ・さらにマイクロプロセッサでは、デジタルフィルタによりノイズを除去するとともに、式(2)に示す多項式演算によりセンサの直線性、センサの温度特性、回路の温度特性を補正している。
- ・多項式演算式の演算処理には特殊な浮動小数点を使用することにより、高精度かつ高速応答の補正演算を実現している。

表1. 0Pa ~ 100 Paレンジのセンサチップ特性及び製品要求性能

Cx, CR Base Capacitance	40 pF
Cx Pressure Sensitivity	Δ 1 pF / 100 Pa
Product accuracy	0.25 % Reading at 125 °C
	0.5 % Reading at 200 °C
Response speed	20 ms / 63 %
Self heating temperature	125 °C ~ 200 °C

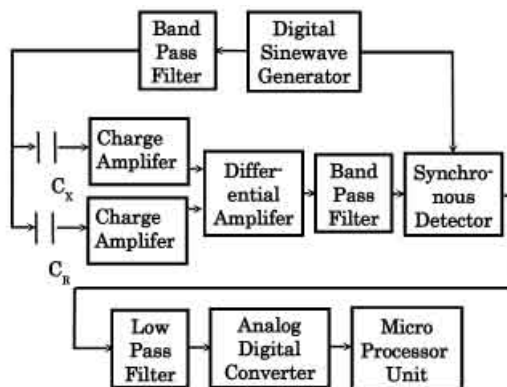


図5. 検出回路ブロック図

$$P = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n A_{ijk} \cdot V_o^i \cdot V_s^j \cdot V_c^k \quad \text{式 (2)}$$

P : Pressure Value
 A_{ijk} : Coefficient
 V_o : $(C_x - C_R) / C_x$ Value
 V_s : Sensor Temperature
 V_c : Circuit Temperature

3.3 性能確認

図6に圧力特性の評価結果を示す。微小圧力の0 Pa ~ 100 Pa レンジにおいて、自己加熱 200 °C の高温環境下で、読み値の精度である [% Reading] 値にて ± 0.1 % 以内の良好な性能が確認できた。

図7に周囲温度特性の評価結果、図8には自己加熱温度特性の評価結果を示す。こちらも微小圧力の0 Pa ~ 100 Pa レンジにおいて、周囲温度や自己加熱温度を変化させても、ゼロ点、スパン(圧力感度)ともに ± 0.1 % 以内の変化であり良好な性能が確認できた。

図9に応答速度の評価結果を示す。ステップ入力の圧力印加はできないため、応答速度 20 ms の基準真空計との比較評価を行った。63 % 応答にて基準真空計より 5 ms 速い結果であったので、応答速度 20 ms 以下の高速応答が実施できていることが確認できた。

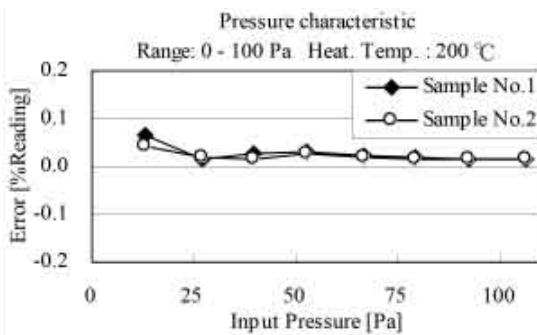


図6. 圧力特性評価データ

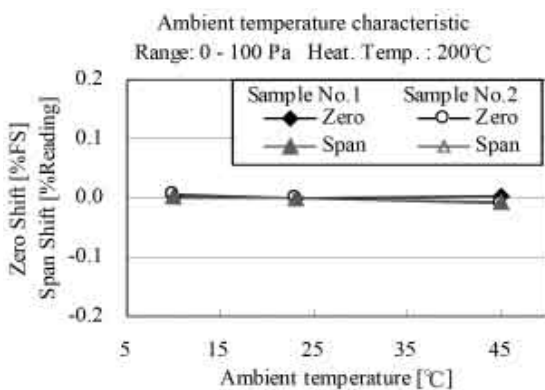


図7. 周囲温度特性 評価データ

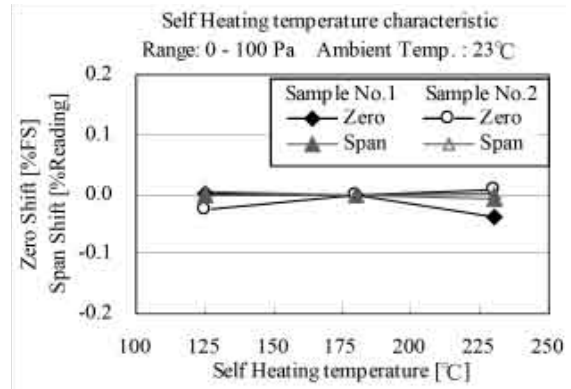


図8. 自己加熱温度特性 評価データ

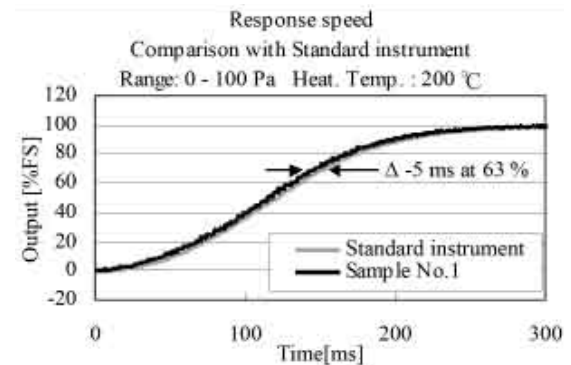


図9. 応答速度 評価データ

4. 自己加熱機能

半導体製造プロセスにおいては、反応ガスの固化による堆積を防ぐために多くの場合は装置を高温に加熱しておく必要がある。そのため隔膜真空計の内部においても堆積を防ぐためにヒーターを内蔵し、センサを高温に加熱する自己加熱機能を有している。その温度はガスの種類やプロセス条件によって異なるので用途に合わせた加熱温度設定が必要である。

4.1. 自己加熱構造

圧力センサには温度特性があるため、温度センサで温度を計測し、前項で述べたように圧力センサの温度補正を実施している。それにより温度によらず正確な計測を実現している。

しかしながら温度特性の要因はセンサチップのみならず、パッケージ部にもあるため、ある程度の広い範囲の温度分布が一定でないと正確な温度補正は実施できない。よって温度分布が一定となる自己加熱構造が必要となり、なおかつそれは外乱があっても均熱が維持される必要がある。特に大きな外乱としてユーザーが配管継手部を加熱する場合があります、それによっても均熱が保たれることが必要である。

図10に自己加熱構造を示す。

パッケージの回りに空間を設け、その回りに熱伝導の良い黄銅の恒温ケースを設け、そのケースにヒーターを取付け、パッケージの加熱を間接的に行う構造を採用

した。その結果パッケージ全体が均熱になり易い構造を実現している。

図11及び表2に熱シミュレーターにより配管継手部を加熱した場合の温度分布をシミュレーションした結果を示す。配管継手の加熱がない場合も、配管継手を200℃で加熱した場合も、温度特性に影響のある、センサチップ、サファイア円板、金属薄板の温度分布は±0.1℃以内のわずかなものであり、良好な均熱特性が得られることが確認できた。

図12に実際に配管を加熱し製品の特性を評価した結果を示す。微小圧力の0 Pa ~ 100 Paレンジにおいて、ゼロ点及びスパン(圧力感度)ともに、±0.1%以内の変化であり良好な性能が確認できた。

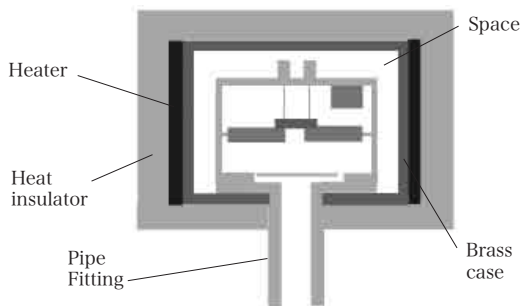


図10. 自己加熱構造

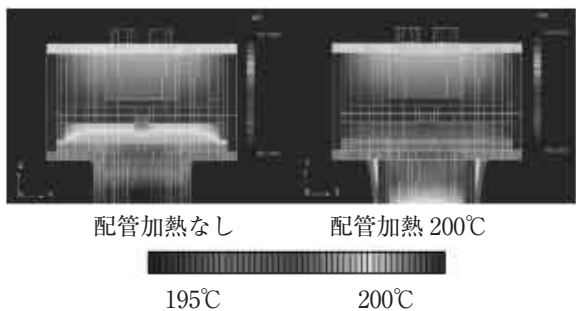


図11. 配管継手加熱シミュレーション図

表2. 配管継手加熱シミュレーション結果

自己加熱温度 設定温度	配管加熱 温度	センサチップ, サファイア円 板, 金属薄板部温度分布
200℃	加熱なし	199.9℃ ~ 200.0℃
200℃	200℃	199.9℃ ~ 200.0℃

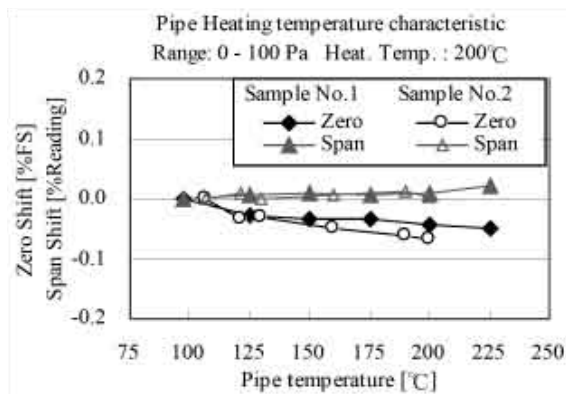


図12. 配管継手加熱特性 評価データ

4.2. 温度制御

自己加熱温度制御は次のような性能が要求される。

- ・自己加熱温度構造を工夫しても、温度制御が不安定であると、均熱性を保つことはできず、正確な温度補正を実施できない。よって安定した温度制御が必要となる。
- ・電源投入後に安定するまでの時間がかかりすぎると、装置の稼働率を高くすることができないため、速いウォームアップが必要となる。
- ・電源電流により装置側の計測に影響を与えないために、フィルタでヒーター電流が平滑できる高速な時間比例制御周期が必要となる。

安定した温度制御でかつ速いウォームアップを実現するために、自己加熱温度制御はマイクロプロセッサでのデジタルPID演算による時間比例制御を行っている。デジタルPID演算の各常数は電源電圧や加熱温度設定値に連動し自動的に変更され、外乱に影響されず安定した温度制御を実施できるようにしている。また時間比例制御はマイクロプロセッサ内蔵のハードウェアによるPWM(Pulse Width Modulation)とファームウェアによるPWMを組み合わせた2重PWM方式を採用し、約100kHzの高速の時間比例周期で、かつ約4,000分の1の制御出力分解能を持つ時間比例制御を実施し、高速かつ安定した温度制御を実現した。

図13に電源投入後の自己加熱温度のウォームアップを測定したデータを示す。オーバーシュートもなく30分以内の速いウォームアップを確認できた。またウォームアップ後は±0.1℃以内の安定した温度制御が実現できていることが確認できた。

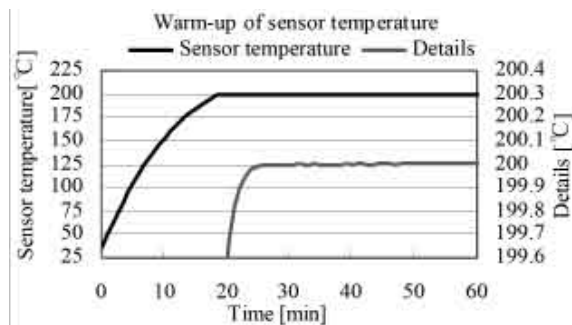


図13. 自己加熱温度の立上げ特性 評価結果

5. 真空標準

サファイア隔膜真空計が計測している真空の範囲は 1 Pa ~ 133 kPa である。しかしながら 1 Pa ~ 5,000 Pa の真空領域では、測定原理や測定系（配管の長さや温度分布など）に測定結果が影響されるため、計測のトレーサビリティを高精度で確保することが難しい。

よって当社では、先進国の国家計量標準供給機関の真空領域の標準器と同じ原理【膨張法】の装置を製作し、真空標準のトレーサビリティを確立した。

図 14 に製作した膨張法装置の外観図を、図 15 に膨張法の原理図を示す。

膨張法の基本原理は Boyle-Mariotte の法則を利用したものである。図 15 に示すように、体積比が既知の大小の 2 つの容器にバルブを介して連結されている容器 1 と容器 2 がある。

- ① 容器 1 に既知の圧力を導入する。
- ② 容器 2 は真空ポンプで真空引きしておく。
- ③ 容器 1 の入口と容器 2 の出口のバルブを閉じる。
- ④ 容器 1 と容器 2 を接続しているバルブを開き、容器 1 内の気体を容器 2 に膨張させる。

上記の①～④の操作によって膨張させた圧力は、既知である体積比、初期に導入した圧力値及び容器内の温度により、式(3)で求められる。

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad \text{式(3)}$$

さらに④の状態から容器 1 と容器 2 の間のバルブを閉じて、②～④の作業により膨張が繰り返えされ正確な圧力(真空)を発生することができる。

しかしながら、容器の微小なリーク、容器の放出ガス等の様々な要因により、誤差が発生してしまう。特に温度変化については微小な温度変化(分布)が大きな誤差となってしまう。

当社では、その誤差を極力少なくするために、微小リークや放出ガスが少ない装置を製作した。また容器内の温度分布が発生しないように工夫するとともに、容器内に複数の温度計を取り付けて温度補正ができるように改善した。またこの温度計と初期に導入する圧力を正確に測定する圧力計の信頼性が、④の状態（真空の値）を特定するのに非常に重要になってくる。それを実現するためには、正確に校正された温度計及び圧力計を使用することが必要となるが、当社の計測標準センターは、計量法に基づく校正事業者登録制度による登録事業者であり、そこで温度計及び圧力計を高いレベルで正確に校正することが可能である。それらの計測技術を駆使することにより正確な真空標準を実現することができた。

図 16 には製作した膨張法で校正した 0 Pa ~ 100 Pa レンジのサファイア真空計を用いて、産業技術総合研究所の真空標準と比較校正した結果を示す。その差異は

± 0.06 % Reading 以内で一致しており、膨張法において正確な真空標準が実現できている事実を確認することができた。

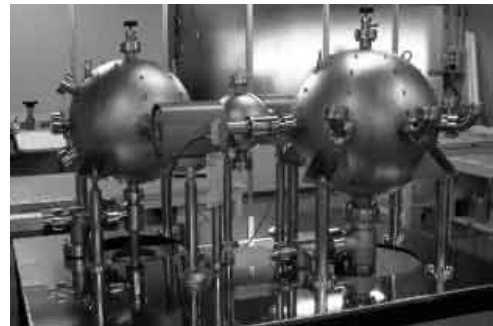


図 14. 膨張法装置 外観

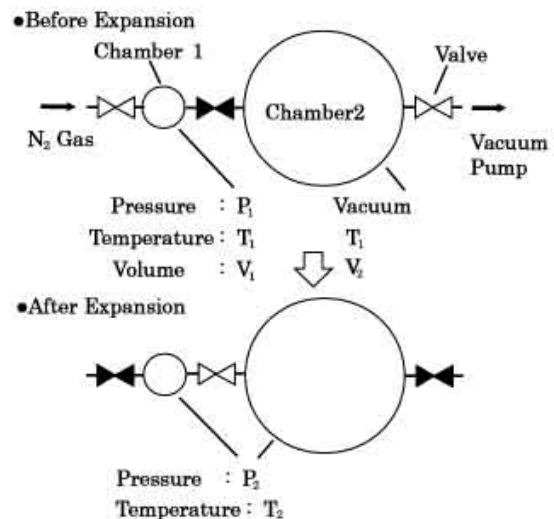


図 15. 膨張法原理図

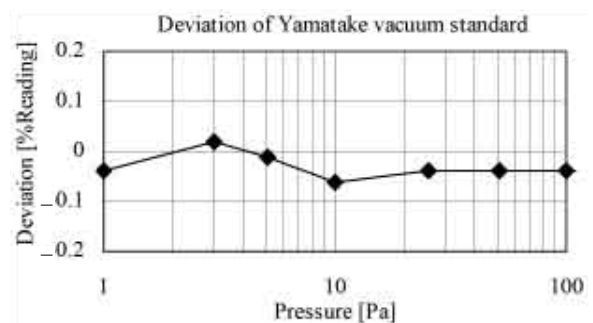


図 16. 産業技術総合研究所との比較校正結果

6. 熱遷移

真空領域の圧力計測において注意すべきものとして熱遷移現象がある。

図 17 に示すように、2 つの容器を管で繋いだ場合、大気圧付近の粘性流領域においては、気体分子は運動

量で平衡状態にあるため、2つの容器間に温度差があっても式(4)に示すように圧力は等しい。しかし、圧力が下がり分子流領域になると、力を伝える物質が少なくなる。そのため運動量が制限され、部分的に熱的な平衡状態には達するが、運動量としては非平衡状態となる。そのため、2つの容器間に温度差があった場合は、式(5)で表せる圧力差が生じることになる。

さらに粘性流領域と分子流領域の間にあたる中間流領域においては、式(6)に示すように、容器間を接続する管の直径やガスの種類によって圧力(真空)の値が影響される複雑な式となる。このため自己加熱型の隔膜真空計は、センサ部が加熱されていることから、被測定容器との温度差が発生した場合、被測定容器とセンサ部に圧力差が生じることとなる。

図18に被測定容器が23℃、自己加熱温度が125℃と200℃の場合に発生する圧力差を示す。これによると10 Pa以下では1% Reading以上の大きな圧力差が発生することがわかる。

そのため、隔膜真空計を校正する際には、被測定容器の温度は自己加熱温度と同じ温度にてして圧力差が発生していない状態で校正を実施する必要がある。

しかしながら生産ラインにおいては様々な自己加熱温度の機種を校正する必要があり、機種ごとに被測定容器の温度を変更していると多くの時間がかかり、非常に生産効率が悪くなってしまふ。

よって当社の生産ラインでは自己加熱温度の機種によらず、容器の温度は23℃とし、容器の温度を正確に測定し熱遷移で発生する圧力差を補正し校正を実施している。

当社が実施するこの校正方法の妥当性を確認するため、図19に被測定容器の温度が23℃にて熱遷移補正をして校正した製品と同じものを使って、理想的な校正条件【被測定容器を自己加熱温度と同じ温度にして熱遷移による圧力差が発生していない状態】で値を比較検証した結果を示す。

製品の仕様である125℃において±0.25% Reading及び200℃において±0.5% Readingを十分満足している結果となっており、正しく熱遷移の補正ができていることが確認できた。

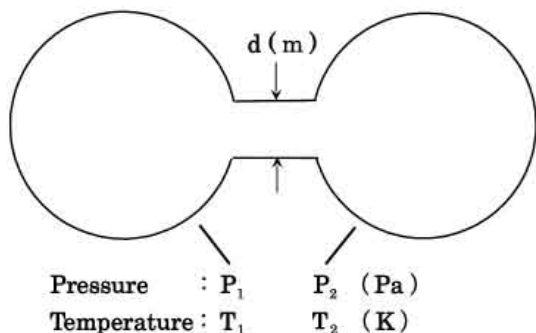


図17. 熱遷移説明図

$$\text{粘性流領域} : \frac{P_2}{P_1} \cong 1 \quad \text{式(4)}$$

$$\text{分子流領域} : \frac{P_2}{P_1} \cong \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad \text{式(5)}$$

中間流領域 :

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{A \cdot X^2 + B \cdot X + C \cdot \sqrt{X} + \sqrt{T_2/T_1}}{1 + A \cdot X^2 + B \cdot X + C \cdot \sqrt{X}} \quad \text{式(6)}$$

$$X = 7.5 \cdot P_2 \cdot d$$

A, B, C : ガス種, 温度による係数

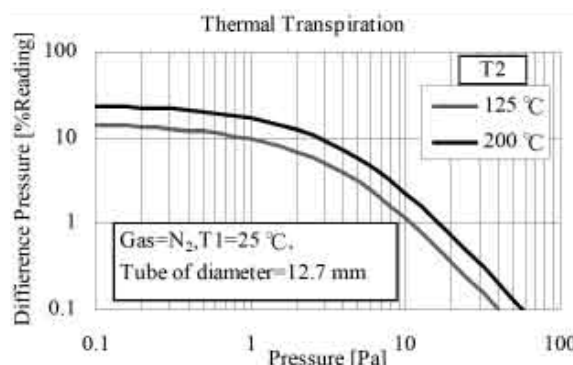


図18. 隔膜真空計における熱遷移による圧力差

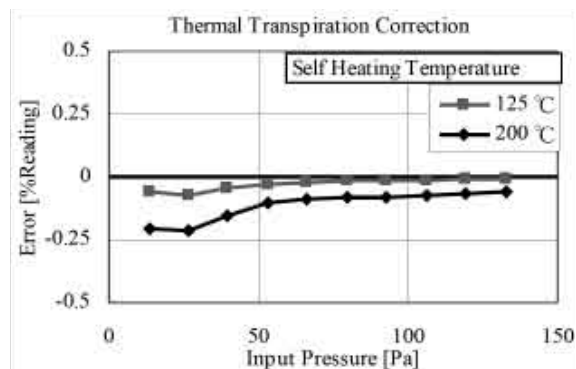


図19. 熱遷移補正の検証結果

7. 付加機能

7.1 ゼロ調整機能

図20に製品の上面図を示す。2つのゼロ調整方式が実施できるスイッチを製品上面に配置し、ユーザーの使用法に合わせてゼロ調整を実施できるようにし利便性を向上させた。

・ Auto ゼロ調整方式

Auto ゼロ調整スイッチを押すと自動的にその時の値をゼロに合わせるので、簡単にゼロ調整が実施できる。

・ アップダウンゼロ調整方式

Up スイッチ及び Down スイッチを押すと出力が変化するので、トリマーで調整する方法と同じような調整ができ、下記のような Auto ゼロ調整が使用できない場合に使用できる。

- 計測器のズレも含めて、指示値をゼロに合わせたい場合。
- 高真空のゼロの環境ができないため、比較する標準器の値に合わせることでゼロ調整を実施する場合。
- ゼロにバイアスをかけたい場合。

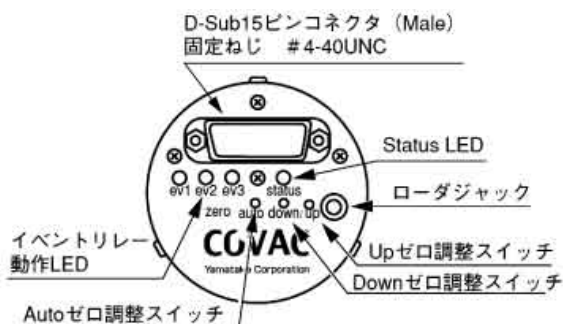


図 20. 製品上面図

またゼロ調整を実施した際に、ゼロ調整の状態をステータス LED で視認できるようにした。

- ・ 緑点滅
ゼロ調整が正常に実施できた場合。
- ・ 橙点滅
ゼロ調整が正常に実施できたが、調整できる限界に近づいている場合。この橙点滅は事前に交換時期を知らせる役割としても使用できる。
- ・ 赤点滅
ゼロ調整ができる範囲を超えてしまった場合。この赤点滅は、ゼロ調整ができず交換が必要となる。
- ・ 赤橙交互点灯
ウォームアップが完了していない、印加されている圧力が計測範囲外など、ゼロ調整の実施条件が整っていない場合。これにより誤ってゼロ調整を実施してしまうことを防止できる。

7.2 自己診断機能

マイクロプロセッサで下記に示す自己診断を実施しており、異常があった場合は、ステータス LED で異常を表示するとともに、イベントリレーでアラームを出力することができる。これによりユーザー装置の安全な稼動に寄与できる。

- ・ 警報状態 (使用環境が正常でない可能性がある)
 - 温度異常 (電子回路, センサ, ヒーター温度)
 - 自己加熱制御温度異常, 電源電圧異常
- ・ 故障状態 (製品が故障している可能性がある)
 - ヒーター断線, センサ断線
 - 電子回路異常, メモリ故障

8. おわりに

当社では、サファイア加工技術、微小容量検出技術、信号処理技術、温度制御技術、真空計測技術、を開発す

ることにより、高耐食性、高耐熱性、高再現性、高精度のサファイア高温隔膜真空計を商品化することができた。

現在、より高い自己加熱温度の製品や、より低圧力レンジの製品等々を開発中である。それらの開発中の製品も含め、今後はさらにユーザーの価値を提供するためより良い商品を開発していきたい。

<参考文献>

- (1) 関根, 差波, 石原, 谷: サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発, azbil Technical Review (2011), pp.28-33, 株式会社 山武
- (2) 添田, 石倉, 増田, 木村, 長田: サファイアを用いた高耐食性静電容量式圧力センサ, Savemation Review(2001), Vol.19, No.2, pp.36-43, 株式会社 山武
- (3) 石原, 長田: 高温型サファイア隔膜真空計の開発 (2006), 第23回センシングフォーラム, pp.130-135
- (4) Y.Yoshikawa, S.Kimura, Y.Ishikura, T. Kataoka, M.Soeda, M.Nagata, T Masuda: Low Capacitance Measurement Circuit for Sapphire Based Capacitive Pressure Sensor, PROCEEDINGS OF THE 20TH SENSOR SYMPOSIUM(2003), pp.127 ~ 130
- (5) 米永: 低圧力の計測標準に関する調査研究, 計量研究所報告 1999年第48巻 第2号 (第200号) 別冊
- (6) 平田: 真空標準とトレーサビリティ, 真空 41-3(1998) 347
- (7) T.Takaisi and Y.Sensui: Thermal Transpiration Effect of Hydrogen, Rare Gases and Methane, Trans. Faraday Soc., 59(1963)2503
- (8) K.F.Poulter, M.J.Rodgers, P.J.Nash, T.J.Thompson and M.P.Perkin: Thermal transpiration correction in capacitance manometers, Vacuum 33-6(1983) 311-316

<商標>

COVAC は、株式会社 山武の登録商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|----------------------------------|
| 吉川 康秀 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部開発7グループ |
| 原田 英史 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部開発7グループ |
| 市原 純 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部開発7グループ |
| 長田 光彦 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 山口 徹 | 環境・標準化推進部計測標準センター |

微小流量向け熱式流量センサの開発

Development of a Micro Thermal Flow Sensor with a Microchannel

株式会社 山武

池 信一
Shinichi Ike

キーワード

マイクロフローセンサ, 微小流量, 質量流量, 熱式, 微小流路, MEMS

当社で開発に成功した熱式マイクロフローセンサ™は様々な質量流量計製品に搭載され顧客への価値提供を行っている。今回センサチップ上に微小な流路を形成する流路一体構造を実現することによって、これまで課題となっていた5cc/min以下の微小流量域においても、高精度に安定した計測が可能な熱式流量センサの開発に成功したので報告する。

Previously we have developed micro thermal flow sensors which are being used by many customers in various types of mass flow meter products. More recently, by integrating a microchannel onto a sensor chip, we have succeeded in developing a thermal flow sensor characterized by high-precision and stable measurement even in a flow range from 0 to 5 cc/min, which had been regarded as a challenge. This paper describes the development of this sensor.

1. はじめに

近年、地球環境保全のために各種の施策が推し進められている中で、CO₂排出量削減などを目的とした省エネルギーの必要性が一段と高まっており、その1つの手段として燃料、動力、熱交換の媒体及び原料などとして使用されている種々の流体の流量管理がますます重要になっている。ところが、流量の計測は温度や圧力の計測に比べて手間やコストがかかり、測定対象や流量レンジなどの点で汎用性が少ないものが多い。さらに、流量計の選定や設置には専門の知識やノウハウが必要であるため、流量計測が満足に行われていないことも多く、高精度で簡便に流量計測を行いたいというニーズがますます増加している。

また、流量の計測方法としては一般的なものだけでも10種類以上のものがあるが、そのほとんどが体積流量を計測するものであり⁽¹⁾、真にエネルギー効率に関係する質量流量を計測している例は意外に少ない。

そのような状況の中、当社ではMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術で製作した微細構造の気体用熱式流量センサである「マイクロフローセンサ」を開発し、それをを用いた流量計、流量制御装置を製品化し、様々な現場でお客様の課題解決に貢献してきた⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。図1に当社におけるマイクロフローの製

品群を示す。近年、気体流量計測へのニーズはますます多様化しており、流量レンジもさらに拡大し、高精度な計測が要求されている。MEMS技術を応用し製作された熱式流量センサの開発事例は多数報告されているが⁽⁵⁾、微小流量域を高精度に計測できる流量計を実現した例は少なく、MEMSセンサの特長の1つである高感度な特性を十分活かしてきれていないのが現状である。

このような課題を解決すべく、流路の形成方法を工夫し、微小な流路を一体化した新たな熱式流量センサを開発したので報告する。



図1. マイクロフローセンサ製品群

2. マイクロフローセンサの概要

まず MEMS 技術を応用した熱式流量センサの構造と特長、動作原理について、当社で開発したマイクロフローセンサを例にあげ説明する。

2.1 マイクロフローセンサの構造と特長

マイクロフローセンサは、シリコンマイクロマシニング技術と薄膜技術により製作された1辺が1.7mm、厚さ0.5mmの高感度、高速応答、小型、低消費電力などの特長を有する気体用熱式フローセンサである。図2にその基本構造の概略を、図3にセンサチップ上面の拡大写真を示す。

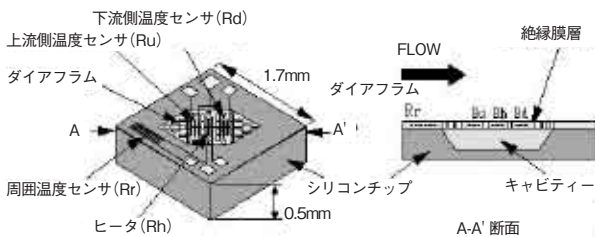


図 2. マイクロフローセンサの基本構造

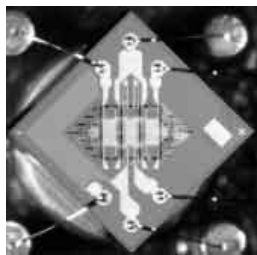


図 3. センサ拡大写真

シリコン基台中央の深さ約 $200\mu\text{m}$ のキャビティ(空洞)上には、窒化シリコンでできた厚さ約 $1\mu\text{m}$ のダイアフラムが作られており、その中央にヒータ、ヒータの両側に温度センサが形成されている。また、シリコン基台上には周囲温度センサが形成されている。ヒータ、温度センサ及び周囲温度センサは、測温抵抗体として信頼性が高い白金薄膜で形成され、その抵抗値から温度を知ることができる。

キャビティはシリコンの異方性エッチング技術により形成されており、ダイアフラムには多数のスリットが形成されている。これは、製作上エッチング液を導入する必要があるためであり、性能上の理由としては、圧力特性のキャンセルと熱絶縁のために設けられている。

熱式センサの性能向上には、MEMS 技術によるマイクロ化が必要不可欠であり、検出部の熱容量を非常に小さくできるため、感度、応答性、省電力性などが飛躍的に向上する。また、一度に多数の微細構造を高精度で製作することができるため、性能のばらつきも小さくなる。

しかし、このセンサの高性能を生み出している要因

は単に精密に小さく作ったからということだけではなく、熱伝導率が約 150W/mK と高いシリコンをヒートシンクとして基台に使用し、キャビティ上で計測部を支持するダイアフラムの熱伝導率がシリコンのおよそ10分の1程度と低い上に $1\mu\text{m}$ という薄さであり、しかも多数の熱絶縁用スリット付きの窒化シリコンを使用しているところにある。この構造により、温度変化する部分をダイアフラム部のみに限定することができ、ダイアフラム中央とシリコン基台間のわずかに数百 μm の距離において、数十～数百度の温度差を数 mW の電力で瞬時に作るができる。

2.2 動作原理

一般的な動作方法は、図4(a)のようなヒータ定温度制御回路を用いてヒータを周囲温度センサで検出される流体温度よりある一定温度(例えば 60°C 程度)高く制御し、そのときの上下流温度センサの抵抗値差を図4(b)のような抵抗ブリッジからなるセンサ出力回路により電圧差として取り出すというものである。

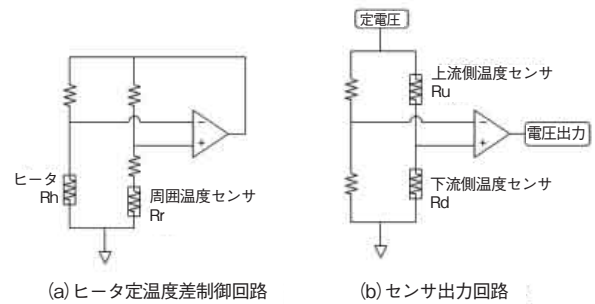


図 4. 基本的な動作回路

流れが無いときは、図5(a)のようにヒータの上流側・下流側に均一な温度分布ができていますが、流れがあるとヒータの上流側・下流側の温度分布の対称性が崩れ、図5(b)のように上流側が下流側より低い温度分布になる。このときの上下流温度センサの温度差(抵抗値差)が、センサ上面を流れる気体の質量流速(流速 $U \times$ 密度 ρ と定義する)の関数となる。

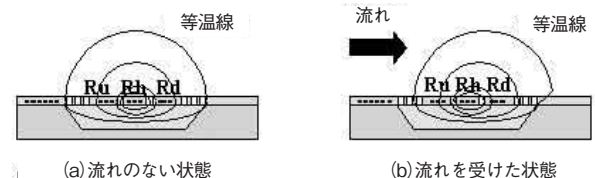


図 5. 動作原理 (概念図)

なお、ヒータの両端電圧を出力とすることにより、熱線流速計のように1素子型のフローセンサとして使用することも可能であり、より高流速までの計測が可能である。しかし、1素子型は外乱や製造のばらつきの影響をそのまま受けてしまうので、流速ゼロのときの出力変化が大きく、精度・再現性などの点で問題が

ある。それに対し、上記の方式では均一に作られた2つの温度センサの差動出力をとっているため、流速以外の外乱(温度・圧力変化, 自然対流, 電気的ノイズなど)や製造のばらつき, 及び素子の経時変化の影響がキャンセルされ、流速ゼロのときの出力が安定し、非常に高精度で再現性の良い計測ができる。このことにより、1mm/s という超低流速の検出も可能となる。また、対称構造のため、逆流の計測も可能である。

3. 流量計測方法と課題

3.1 従来の流路構造とセンサ取付け方法

マイクロフローセンサを流量計として構成するためには、その目的に合わせた以下の機能を持つ流路が必要となる⁽²⁾。

- (1) 測定する気体の流れ方向とマイクロフローセンサの計測方向を合わせて、マイクロフローセンサを機械的に固定する。
- (2) 流量計測範囲に応じて流路の直径(断面積)を決め、流路内の平均流速をマイクロフローセンサの流速計測範囲に合わせる。
- (3) 流れの乱れを小さくし、流速分布の偏りを矯正することによって流れを整流する。
- (4) マイクロフローセンサの直前で流路内壁面の速度境界層を排除し、流速分布をフラットに近づけ、センサが常に層流境界層内(境界層発達の初期段階)に位置するようにする。

(1) ~ (4) に示したような、用途に合わせたフローチャンネルにマイクロフローセンサを設置することにより、流路内の平均流速、流路径、整流機構、流体の種類などによって決まるセンサ近傍の流速勾配が、非常に高い再現性で流量の関数になる。よって、流量とセンサ出力の関係を調べておくことにより、上流・下流側配管の条件及び配管内の流れの遷移(層流⇔乱流)に関係なく高精度で広いレンジアビリティの流量計測が可能になる。図6に従来から製品に適用されている基本的な流路構造を示す。

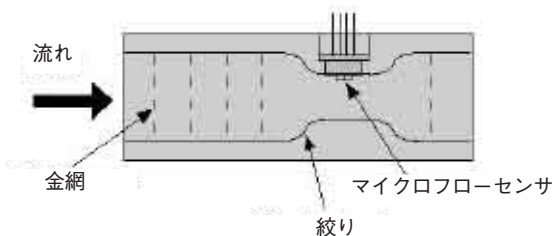


図6. 基本流路構造

3.2 微量流量計測における課題と解決策⁽⁶⁾

上述したようにマイクロフローセンサはセンサ上を流れる流体の流速に応じた出力が得られる。高精度な流量計測を行う場合、適切な流速を確保し、センサ出力に対する振動等の外乱の影響を極力低減する必要がある。3.1で述べたセンサを流路に挿入する従来の方式においても、流路の断面積を小さくしていくことで数百 ml/min 程度の流量レンジまでは適切な流速が確保でき、高精度な計測は可能であった。しかしながら、数十 ml/min さらにはそれ以下の微量流量域でも適切な流速が確保できるように流路断面積を小さくすると、計算上目標とする流路は現行の1/240程度にする必要があり、センサ自身の大きさよりも小さくなってしまいうため、従来のセンサ挿入型は構造上不可能である。したがって、劇的に流路断面積を小さくし、微量流量域でも高精度な計測を達成するためには、抜本的に流路の形成方法を変更する必要がある。

そこで、本開発ではセンサ上の流路断面積を小さくする方法としてMEMS技術によって微細な流路を製作し、その流路をセンサ上に一体化する方式を考案した。以下、その具体的な構造と製作方法について説明する。

4. 微小流路の構造と製作方法

図7(a)に微小流路の構造図を示す。長さ10mm, 幅5mm, 厚さ1.5mmの長方形の板の左右に直径1mmの流体流入, 流出用の貫通穴が形成されている。2つの貫通穴をつなぐように図7(b)に示すような断面形状が0.5mm × 1.0mmの矩形の流路が形成されている。

本開発において流量レンジの仕様は5ml/minと20ml/minの2つを目標としたが、微小流路は上記1種類の寸法で双方のレンジに対応できるように設計を行っている。

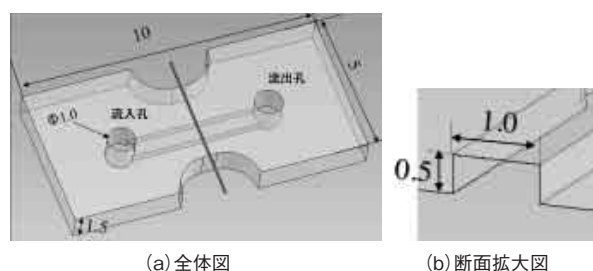


図7. 微小流路構造

具体的な製作方法は以下の通りである。流路はSiとホウ珪酸ガラスの2ピース構造から成り立っている。まず図8(a)に示すようにSi基板に楕円形の貫通長穴を形成する。この貫通穴はICP-RIEエッチングによって形成されており、Siに対して垂直性の高い、高アスペクト比の形状を精度良く加工することが可能である。流路断面積の形状ばらつきが大きいと、流れる流量がセンサ間によってばらつくこととなり、器差増大の原因となってしまふ。したがって、流路断面積の形状を

寸法精度良く加工することは非常に重要である。

一方、ホウ珪酸ガラス基板には、サンドブラスト加工によって図8(b)に示すような流入-流出口を形成しておく。図8(c)に示すように、この2つの基板を陽極接合することで微小な流路構造を実現している。なお、すべての製作プロセスをウエハレベルで一括製作し、最後に個片に分割する方式をとることによってコストの削減を行っている。

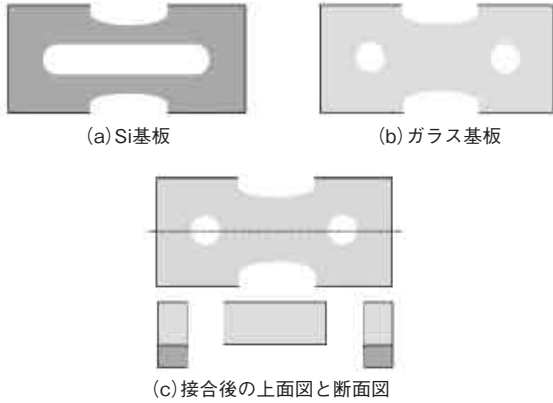


図 8. 微小流路製作方法

5. 流路一体化の方法

先に述べた微小流路と流速センサとの一体化の方法について説明する。流速センサはチップ中央に2.1で述べた従来センサの構造・形状を踏襲したダイアフラムが存在し、ヒータと上下流2つの温度センサからなる流速検出部が配置してある。微小流路との接合部を確保するために流路形状に合わせ周辺のSi基台部分を拡張した長方形形状となっている。図9に流速センサ外観図を示す。



図 9. 流速センサ

微小流路と流速センサを接合する方法として、陽極接合など種々の方法が考えられる。今回の開発ではパターン段差の埋め込みが可能で、アウトガスの発生が無い材料を選定した結果、低融点ガラスを用いた接合方法を採用している。図10に流路一体化後のセンサ外観図を示す。



図 10. 微小流路一体化センサ

接合部に十分な強度、気密性があるか確認を行った結果、破壊圧力は20MPa以上、Heリーク検査による気密性は $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下と、流量計として使用する上で十分な強度と気密性を実現できていることを確認できた。

6. 評価結果

製作したセンサの流量特性を図11に示す。横軸が流量(ml/min)、縦軸がセンサ出力(V)である。グラフから数 ml/min 以下の微小流量域から20ml/minを超える流量域までセンサ出力が飽和することなく十分な感度が得られ、広範囲な測定が可能であることを確認できた。

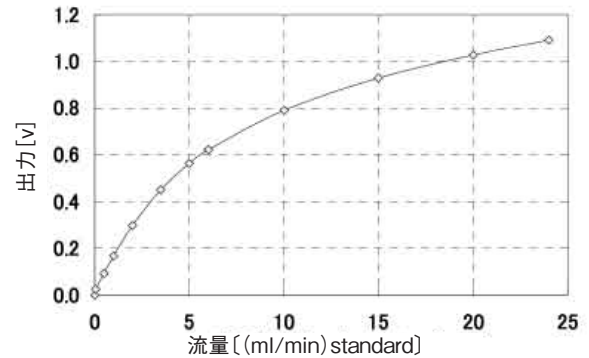
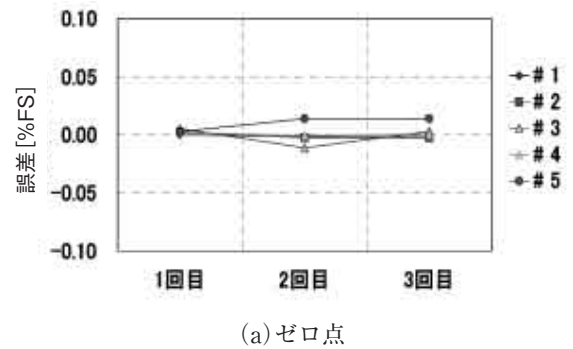
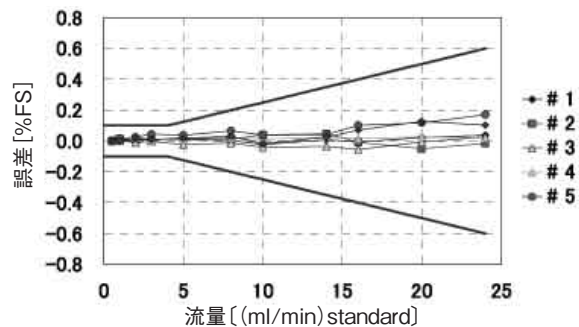


図 11. 流量特性測定結果

次に測定精度について評価した結果を示す。図12は電源ON/OFFをある一定期間内で繰り返した後、ゼロ点とスパンそれぞれについて測定再現性を確認したものである。



(a) ゼロ点



(b) スパン

図 12. 測定再現性の確認結果

図12(a)はゼロ点の測定再現性である。0.05% FS以下の非常に安定した特性が常に得られていることが確認できる。図12(b)はスパンの測定再現性である。こちらも全流量域において0.2% FS以下という良好な測定再現性が得られている。

以上の結果から、本開発のセンサが流量計として非常に高精度な測定が可能であることを確認できた。

7. 応用製品の紹介

当社ではこのセンサを搭載したマスフローコントローラ CMQ™-V シリーズ(図13)を用意しており、真空成膜装置、分析装置等における微量の計測制御が必要なアプリケーションで採用いただいている。製品の主な仕様を以下に示す。

CMQ-V 微量流量タイプ仕様

5ml/min, 20ml/min 【Air/O₂/N₂/Ar】
20ml/min, 50ml/min 【H₂, He】

- ・ 精度 ± 1% FS
- ・ 再現性 ± 0.5% FS
- ・ 制御性 500msec



図13. マスフローコントローラ CMQ-V シリーズ

8. おわりに

流速センサの性能を最大限に引き出す理想的な流路構造を考案し、その製作プロセスを開発した。さらに流路と流速センサを一体化する接合プロセスの開発も行った。その結果、微量流量を高精度に計測可能な流量センサを実現できた。MEMS型の熱式流量センサとしては世界的にみても画期的な性能を達成できたと考えている。今後もあくなき追求を続け、様々な場面において顧客の課題解決に貢献していく所存である。

<参考文献>

- (1) 川田裕郎 ほか, 流量計測ハンドブック, 日刊工業新聞社, pp.7 ~ 11
- (2) 「マイクロフローセンサ」特集号, Savemation Review (2001), Vol.19, 株式会社山武
- (3) 松山裕, 実用流量測定, 省エネルギーセンター, pp145 ~ 154
- (4) 植松時雄, 水力学 (第2版), 産業図書, pp52 ~ 56
- (5) N.T.Nguyen: Micromachined flow sensors-a review Flow Meas.Instrum., Vol.8, No.1, 1997
- (6) 中野正志他, 微小流路を一体化した熱式流量センサの開発, 第26回センシングフォーラム(2009), p177

<商標>

マイクロフローセンサは、株式会社山武の商標です。
CMQは、株式会社山武の商標です。

<著者所属>

池 信一 技術開発本部
基幹技術開発部
センシング技術グループ

電気式温度調節器の設計技術研究

Research on Electric Room Temperature Controller Design Technology

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

末武 雅俊
Masatoshi Suetake

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

石塚 保夫
Yasuo Ishizuka

東京電機大学

藤田 壽憲
Toshinori Fujita

キーワード

電気式温度調節器, ダイアフラム, マイクロスイッチ, ANSYS, 非線形弾性解析

電気式温度調節器(以降、温度調節器と略す)は空調機や操作器と接続するだけで簡易な計装制御を行うことが可能だが、構成要素の持つ非線形性の特性によりその計算、予測が難しい事が設計、品質向上への課題となっている。本稿では当社製 ON-OFF 型電気式温度調節器「ネオスタット™ TY600XZ」の構成要素である、感温ダイアフラムとマイクロスイッチについて有限要素法による特性シミュレーションを行い、評価を行った結果、温度調節器の設計への有効性を確認したので報告する。

Electric room temperature controllers enable easy instrumentation and control simply by connecting them with air conditioners and a control box. However, difficulty in calculation or prediction of characteristics of components due to their nonlinearity remains an obstacle to design and quality improvement. We have implemented characteristics simulation of the temperature-sensitive diaphragms and microswitches which are components of Neostat™ TY600XZ, an ON/OFF type electric room temperature controller, by means of the finite element method, and found that such simulation is useful for the design of electric room temperature controllers. This paper describes the result of the study.

1. はじめに

電気式温度調節器は、検出部にダイアフラムやバイメタルを用い、その温度変化による膨張や変位によって駆動し、調節部もマイクロスイッチやポテンショメータで構成されていることから、調節器自体としては電気的エネルギー消費をしないものである。

今日、白金抵抗体などの電子式センサとマイコンの組み合わせによる高精度・広計測範囲の電子式計装があるが、電気式温度調節器は簡易な空調計装による温調市場(ビル空調含む)に用いられている。

電気式温度調節器の設計においては、検出部における大変形問題、出力部(マイクロスイッチ)における可動ばねの飛移り座屈問題など、構成要素が非線形性の特性を有することから、特性の計算、予測が難しいという問題がある。従来、これらの特性計算の式が導出されているが、単純形状やある特定の用途、条件に限定され

ており、組付け時にかかる力なども考慮できないため、実際の設計にそのまま適用しても誤差が大きく、結果として、目的とする特性を得るために試行、微調整などが多くなることを余儀なくされており、調節器の設計、品質向上への課題となっている。

一方、数値計算の発達に伴い、有限要素法(Finite Element Method, 以下FEM)によるダイアフラムやスイッチ単体での特性解析は常態化している^{(1)~(4)}。しかしながら、本電気式温度調節器のように両者を組み合わせた場合については前例がなく、明確な計算方法も確立されていない。加えて、感温ダイアフラムの変形は圧力センサ用のダイアフラムなどに比べ変形量が大きく、また、使用しているマイクロスイッチについても、今回使用するセンターメンバを有するタイプについての特性解析は調べた限り報告されていない。

本報告では、当社製 ON-OFF 型電気式温度調節器「ネオスタット TY600XZ」(図1)について、ANSYS Mechanical (ANSYS, Inc.) を用いて、その構成要素である温度検出部、出力部の特性について、まずは個別にシミュレーションし、最終的に両者を連成させることによって電気式温度調節器の特性予測を行い、今後の設計への有効性を検討する。



図1. ネオスタット TY600XZ

2. 構造と原理

図2に TY600XZ の構造と動作原理を示す。この温度調節器は感温ダイアフラムを検出部とし、マイクロスイッチを制御出力部とするものである。

感温ダイアフラムは2枚のダイアフラムの周端部を溶接で接合し、その空間にボタンを封入したものである。ボタンは気液二相の平衡状態にあり、温度に応じて蒸発し、ダイアフラム内の蒸気圧力と変位を変化させる。両ダイアフラムの中心には支柱が設けられ、この一端を固定し、他端をマイクロスイッチに押し当てる。すると図のように、温度が上昇するとダイアフラムが膨張、変位しマイクロスイッチを押すので、ある温度 T_1 でマイクロスイッチが切り換わり、オン状態となって空調機が作動する(この場合は冷房制御)。その後、温度が低下していくと、ダイアフラムが今度は収縮していき、ある温度 T_2 でマイクロスイッチはオフ状態に復帰し、空調機は停止する。この動きにより、調節器は周囲温度を一定の温度範囲($T_1 \sim T_2$)に保とうとする。これが ON-OFF 型電気式温度調節器の原理である。

2.1 感温ダイアフラムとマイクロスイッチ

感温ダイアフラムの概観を図3に示す。ダイアフラムは円形であり、所定の板厚と外径を有し、材質はステンレスである。ダイアフラムの波形状は円弧近似で製作される。この円弧半径と波ピッチは外周になるほど大きい。また2枚のダイアフラムの波形状は相似形である。

本調節器に用いられるスイッチはZ型マイクロスイッチである。スイッチは図4に示すようなセンターメンバを有する可動ばねを用い、材質はベリリウム銅である。可動ばねはセンターメンバ付近から曲げ加工が施され

ている。この曲げられた面の上下に接点を取り付けられている。マイクロスイッチの構成を図5に示す。可動ばねは1本のリベットで固定され、メンバは圧縮され、その先端は支持部のV溝に引掛けられている。図に示した位置で感温ダイアフラムからの荷重を受ける。この荷重により可動接点は上側または下側の接点と接触状態が変化する。また図には示さなかったが、マイクロスイッチの動作を微調整できるように上側接点の位置と回転支点の位置はねじによって調節できる構造となっている。

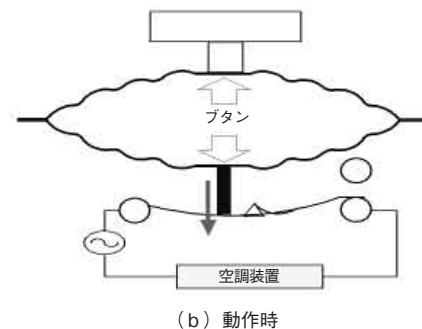
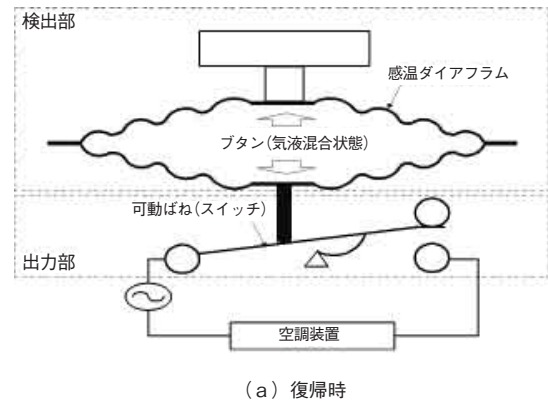


図2. TY600XZの構造と原理



図3. 感温ダイアフラムの概観



図4. 可動ばねの形状

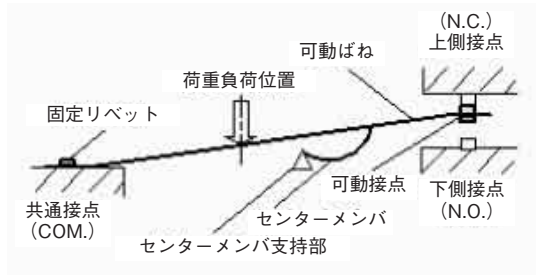


図5. マイクロスイッチの構成

3. 感温ダイアフラムの解析

3.1 解析モデルと方法

感温ダイアフラムの解析モデルを図6に示す。

上側及び下側ダイアフラムに分けて解析を行った。それぞれの結果を加え合わせることでダイアフラム変位を得た。上下のダイアフラムとも軸対称の二次元ソリッドモデルとして取り扱った。解析モデルの周端は溶接部までとし、その境界条件は固定端と定めた。荷重条件としてダイアフラムとボタンガスとが接する部分に圧力（ゲージ圧）と、中心部にマイクロスイッチからの反力荷重を与えた。材料定数は使用しているばね用ステンレス鋼の特性データ（製品仕様）から定義した。

解析を行うにあたり、適切なメッシュ分割方法を調べるために数通りの条件で解析を行った。その結果、テトラメッシュ、サイズはメッシュ外形線長さを0.06 [mm]にして自動分割した場合に、図6のように断面方向には4～5分割程度となり、円弧形状も滑らかに近似できることがわかった。総節点数は、およそ32000点である。また大変形解析時に一部の要素が極端に変形するなどのエラーを生ずることもなく、これ以上メッシュ粗さを密にしても解析結果に差がほとんど見られない（収束している）ことから、この条件で解析を行い、評価を行うこととした。

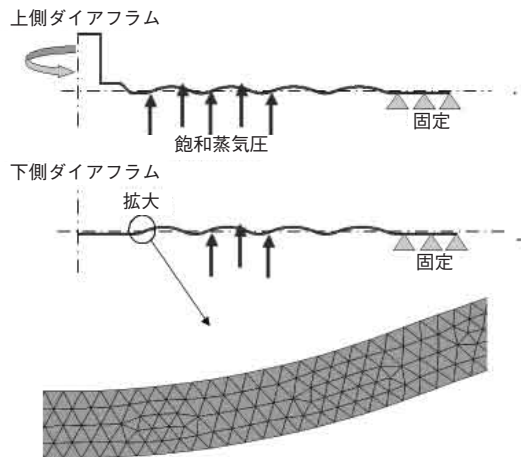


図6. 感温ダイアフラムの解析モデル

3.2 解析結果

解析において入力する条件は圧力荷重だが、実験で与える条件は温度であり、評価を行うには圧力荷重を温度へ変換する必要がある。温度と圧力の関係は前述のようにボタンの飽和蒸気圧で決まる。そこで飽和蒸気圧線図を表す Wagner-Pruss の式⁽⁵⁾を用いて、解析結果の圧力を温度に変換して実験と比較した。参考として図7に温度制御器の使用範囲において飽和蒸気圧線図を計算した結果を示す。図8には実験時同様に、組付け時に4.5[N]の荷重を中心部に受ける場合の感温ダイアフラムの解析と実験結果の比較を示す。

センサは常温で既に膨らんでおり、実験の場合は解析の様に平坦な状態から変位を測定することは困難である。そこで実験を行う下限の温度である7[°C]のときの変位を基準として、そこからのセンサ変位をダイヤルゲージにより測定した。測定は温度が安定するように水中で行った。3個の感温ダイアフラムを測定し、その平均値を示した。器差は最大でおよそ3.7%であった。FEMによる解析結果と実験結果との差異は6%以内に収まっており、十分な精度で解析できることがわかった。差異の要因として、プレス後の残留応力あるいは溶接部を固定端とした境界条件の与え方などが考えられる。

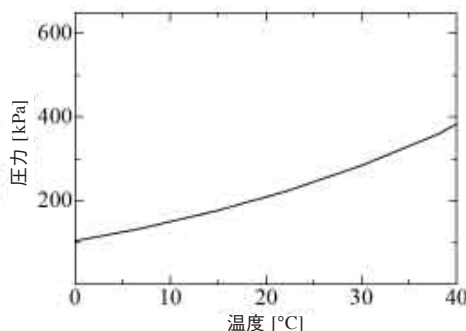


図7. nボタンの飽和蒸気圧線図

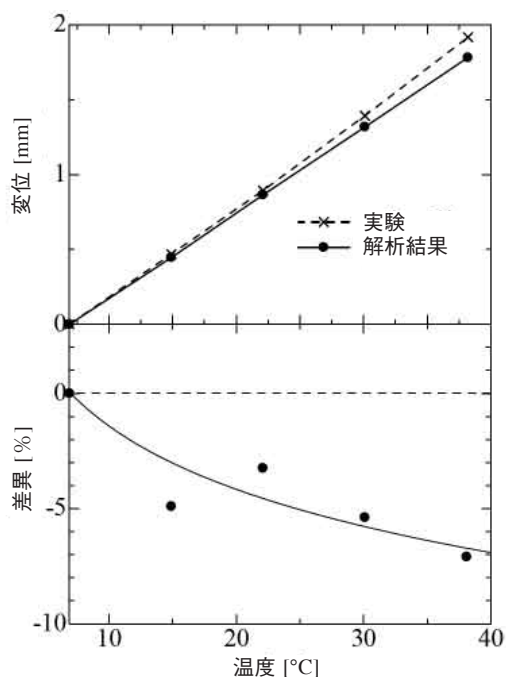


図8. 感温ダイヤフラムの特性解析結果

4. マイクロスイッチの解析

4.1 解析モデルと方法

マイクロスイッチは2章で述べたように可動ばねが歪んだ状態で取り付けられ、常に応力がかかっている。その状態で温度センサの変形による力が加えられることによって、可動ばねのスナップアクションによる瞬間的な接点の切り換わりが成り立っている。解析上も同様な考え方が必要であり、まず可動ばねを応力などの印加がないフリー状態から取り付け状態まで変形させる解析を行い、応力のかかった状態にする。その後、感温ダイヤフラムからの変形荷重による座屈解析を行うという、2ステップでの解析を行う必要がある。

図9に取り付け状態となっていない解析モデルを示す。解析モデルは、可動ばね部分をシェルモデル、可動接点、上下側接点は3次元ソリッドモデルで作成した。リベットで留められている部分を固定端として扱い、リベットを円柱で簡易的に表現している。メッシュサイズは自動分割機能を用いて自動分割を行い、荷重がかかる、変形の度合いが大きいと予測される部分についてはメッシュの細分化を行った。節点数は約2500点である。材料定数は可動接点、上下側接点を銀として、可動ばねを一般的なベリリウム銅として定義した。

まず、この解析モデルを用いて取り付け状態の変形解析を行い、可動接点と上側接点とが接触した、図10に示す取り付け状態を作り出す。この状態から感温ダイヤフラムとの接触位置に集中荷重を定義し座屈解析を行った。

4.2 解析結果

図11にマイクロスイッチの解析結果を実験結果とともに示す。横軸は集中荷重が掛かる場所での変位を表す。変位は集中荷重がない場合を原点に取っている。図においてグラフが不連続となっている部分で座屈が生じスイッチが切り換わる。縦軸はスイッチが切り換わる設計上の中心荷重を1とし、無次元化した。2章で述べたように上側接点と下側接点はねじによって位置が微調整される。この位置によりスイッチの切り換わる加重を調整し、一定の荷重範囲に収まる様にしている。この荷重範囲の上限と下限を破線で示した。実験においてねじはスイッチが動作する範囲のほぼ中央となるように調節した。解析においては設計図面上での調整範囲の中央に上下接点が位置するよう条件を与えた。

実験結果が示すように同様な調整を行ってもマイクロスイッチの各部品の個体差により切り換わる点は完全には一致しないことがわかる。解析結果と比較するとスイッチが切り換わる変位は2つの実験の間にある。また、マイクロスイッチのばね特性を表す変位-荷重の傾きも実験とほぼ一致している。切り換わる荷重については示した実験結果よりは低めの値をとるものの、上下限範囲内であり、かつそれらの中央値に近い。マイクロスイッチの動作と復帰の変位の差 (ON-OFF制御時の動作すきま) も実験値とよく一致している。データとしては示さないが、解析上で上下接点の微調整を行ったところ、下側接点の位置を上側に移動させると荷重幅が、上側接点も上側とすると変位幅が実験値に近づいた。以上のことから、FEMによる解析結果は実際のマイクロスイッチの挙動をよく表しており、設計への有効性がうかがえる。実験との差異の要因として、実物の接点位置が、個体差や組付け調整などにより解析モデルと差が生じてしまったことや、可動ばねの曲げ加工部の残留応力などが考えられる。



図9. マイクロスイッチの解析モデル



図10. 取り付け状態への変形解析結果

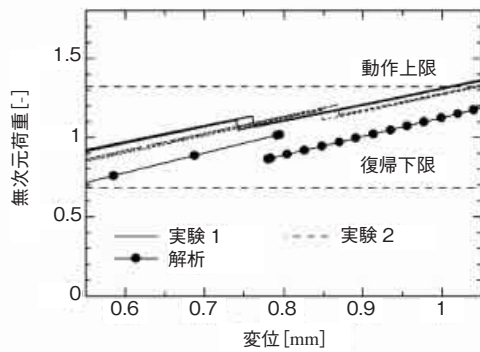


図 11. マイクロスイッチの特性解析結果

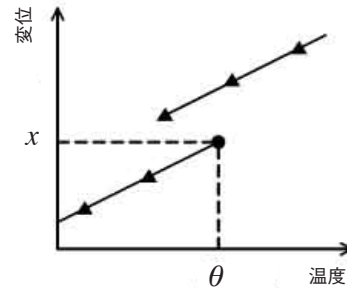
5. 温度調節器の解析

温度調節器を設計する際に必要となる特性は図 12 (a) のようなマイクロスイッチのオンオフ動作と温度の関係である。3 章と 4 章の解析を同時に行うことは、2 次元モデルと 3 次元モデルの混在や解析の収束性などの問題から現状では困難である。そこで別々に解析し、結果を解析者側でやり取りさせることによって双方向連成解析を行うことを考える。3 章の解析により図 12 (b) のように温度と感温ダイアフラム変位の関係が求まる。ただし、図中の $f' \sim f''$ のようにスイッチから受ける荷重により変位の特性は変化するので、荷重が決まらなると変位は求められない。一方、マイクロスイッチの座屈解析を行うと、図 12 (c) に示した通りスイッチに掛かる荷重とスイッチ変位の関係は一意に定まる。感温ダイアフラムの支持体は剛体とみなせるためスイッチ変位はダイアフラム変位に等しい。今、最終的に得たい図 12 (a) を (c) と見比べると、横軸が荷重から温度になっており、対応する荷重から温度を求めていけばよいことがわかる。そこで荷重を次の手順で温度に変換する。

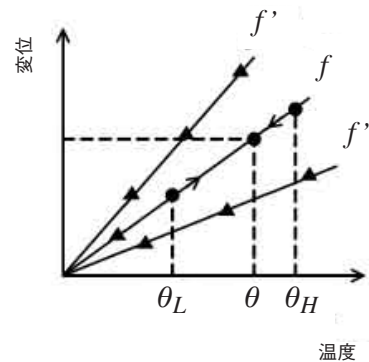
- 1) 図 12 (c) において変換したい荷重 f と変位 x を選ぶ。
- 2) 荷重、言い換えればスイッチ反力 f がわかっているので、図 12 (b) から、その変位 x に対応する温度が求められる。
- 3) 実際には図 12 (b) は連続的ではなく、解析を行う点でのみで得られる。そこで数値解析を利用して求める。具体的には変位 x 以上となる温度 θ_H と、以下となる温度 θ_L を適当に決め、これらを初期値として二分法⁽⁶⁾により温度 θ を得る。
- 4) これをいくつかの点で行えば図 12 (a) の特性が得られる。

解析結果を図 13 に示す。二分法の繰り返しは温度と変位の関係がほぼ直線であることから数回で 1% 以下の誤差に収束した。4 章で述べたようにマイクロスイッチの特性は固体差により異なり、そのためマイクロスイッチが動作してから復帰するまでの温度幅も違う。実験により得られている温度幅を破線で示した。また温度幅の中心値を取り、その値を 1 とし、マイクロスイッチが復帰したときの温度を 0 とし、温度は無次元化して表示

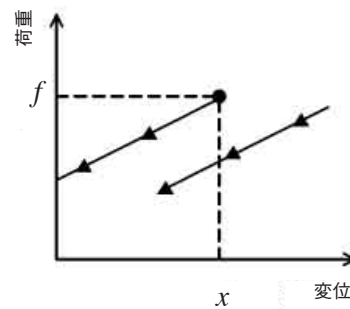
した。図より、解析結果は中心値よりは小さくなるもの実際に得られる動作範囲に収まっている。上下の接点位置を調整すれば、温度幅も実験値に近づくことが予想される。以上のことから、今回提案した解析方法により、温度調節器の特性を予測できることがわかった。



(a) 温度調節器の特性



(b) 感温ダイアフラムの特性



(c) マイクロスイッチの特性

図 12. 温度調節器の特性解析手法

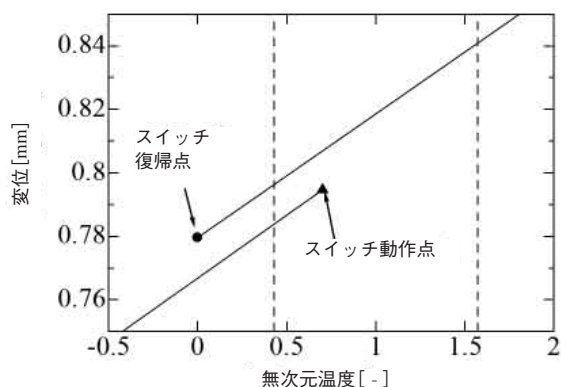


図 13. 温度調節器の特性解析結果

<著者所属>

末武 雅俊	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
藤田 壽憲	東京電機大学 教授 工学部機械工学科

6. おわりに

本研究では、電気式温度調節器に用いられる感温ダイヤフラムとマイクロスイッチの特性についてFEMによる解析を行った。得られた特性は、実際の特性とほぼ一致しており、特性解析の有用性を確認することができた。これにより、今後の後継機の設計開発時には精度のよい特性予測が可能となり、最適な特性設計と試作設計回数の削減が見込まれる。

<参考文献>

- (1) 浜田, 瀬口, 山河: 一般軸対称かくのたわみ問題 (第2報, 波形ダイヤフラムとペローズの解析) (1967), 33-250, pp.871-880, 日本機械学会
- (2) 原田: 小形圧力センサ用バリアダイヤフラムの設計とその成形技術, Savemation Review (1998), pp.84-89, 株式会社 山武
- (3) 道田, 山口, 栗丘, 各務: 複合アーチばねの研究 (第1報, 単一アーチばねとZ型マイクロスイッチ用可動ばねの静的動作特性) (1977), 43-369, pp.1716-1726, 日本機械学会
- (4) 宇野: 皿ばね(クリック板)の開発に適した応力解析手法の開発(2006), 29, CD-ROM
- (5) 日本化学会編: 化学便覧基礎編改定5版(2004), pp.177-183, 丸善
- (6) 平田, 須田, 竹本: パソコンによる数値計算法 (1982), pp.61-62, 朝倉書店

<商標>

ANSYS 及び ANSYS Mechanical は、ANSYS, Inc. または米国及び他の国にある ANSYS, Inc. の子会社の登録商標です。

ネオスタットは、株式会社 山武の商標です。

ワイヤレス VAV/FCU システムの開発

Development of a Wireless VAV/FCU System

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

柏屋 弘
Hiroshi Kashiwaya

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

水高 淳
Jun Mizutaka

キーワード

Wireless, ZigBee, ダイバシティ, VAV, FCU, 空調システム

梁やダクトなど金属製の障害物がある居室天井裏でのワイヤレス通信は、見通しのある屋外などの環境に比べ、電波強度が極度に減衰するため伝送距離が著しく短くなる。今回、天井裏においても良好な通信品質を確保可能なメッシュダイバーシティ通信技術を開発・適用することで、有線システムと比べ工事期間を大幅に短縮可能なワイヤレス VAV/FCU システムを開発したので報告する。

In wireless communications, radio field intensity is extremely low and the transmission range is severely limited places like an attic having metal obstacles such as beams or ducts, compared with that in the open air. We have developed a mesh network diversity communication technology that ensures good communication quality even in such attic spaces. Based on this technology, we developed a wireless VAV/FCU system that can be constructed in far less time than wired systems. This paper describes these developments.

1. はじめに

近年、大規模化／高層化が進む高層ビルに関しては、建築工法等の技術開発により、フロアあたり建築工程 3～4 日が実現しており、空調設備もこれら短工期に対応する技術開発が進んでいる。計装工事分野も例外ではなく、以下の様な取組みにより施工の効率化を図っている。

- ① 天井スラブにケーブル支持材料を施設し配線する「天井内ころがし配線工法」
- ② 結線部分コネクタ化
- ③ 制御盤サブパネル化

これらは配管／配線／結線作業を低減するための工夫であるが、作業そのものをなくすことができれば、さらなる計装工事効率化が実現する。

居住者にとっての快適性と省エネルギーの点から、オフィスの空調制御としては、VAV(Variable Air Volume), FCU(Fan Coil Unit)を用いる制御が主流となっており、その実現のため当社では VAV コントローラ (Inflex™VC), FCU コントローラ (Inflex™FC), 連携制御コントローラ (Inflex™ZM) 空調機コントローラ (Inflex™GC) を提供してきている。

現在、天井裏での取り付け作業を省略するため VAV/FCU ユニットに VAV/FCU コントローラを先行して取り付けているが、その後の通線／結線のための作業工数が未だ大きい。

そこで今回、VAV/FCU ユニット設置後に、電源を投入し、後述する施工調整ツールを用いてアドレス等の通信パラメータを設定するだけで自動的に通信を確立できる、ワイヤレス VAV/FCU システムを開発した。

設置作業と電源工事以外の作業を省くことが可能となり、結果として、居室内の計装工事に関して 50% 以上の効率化を図ることが可能となる。

2. システム構成

ワイヤレス VAV/FCU システムの概略を図 1 に示す。天井裏に設置される VAV/FCU コントローラ、機械室の制御盤内に設置される連携制御コントローラ及び空調機コントローラで構成される点は従来の有線システムと同様である。

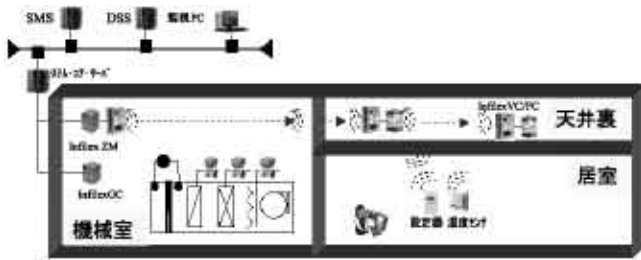


図1. システム概略図

本システムの特徴はワイヤレスアダプタと呼ばれるワイヤレス通信用アンテナモジュールを各コントローラに接続することで、コントローラ通信やセンサ通信がワイヤレスとなる点にある。なお、ワイヤレスアダプタの電源はコントローラから供給され、バッテリーは不要である。

2.1 構成機器

ワイヤレス VAV/FCU システムを構成する機器は、下記の4製品である。

- ① ZM アダプタ
InflexZM と InflexVC/FC とのコントローラ通信をワイヤレス化するための (InflexZM 用) アダプタ。
- ② VC/FC アダプタ
InflexZM と InflexVC/FC とのコントローラ通信及び、InflexVC/FC とセンサ/設定器とのセンサ通信をワイヤレス化するための (InflexVC/FC 用) アダプタ。
- ③ ワイヤレスネオパネルⅡ
VAV/FCU 用のワイヤレス設定器
- ④ ワイヤレスネオセンサⅡ
室内温度計測用のワイヤレス温度センサ



図2. ZM アダプタ, VC/FC アダプタ



図3. ワイヤレスネオパネルⅡ



図4. ワイヤレスネオセンサⅡ

2.2 ネットワーク構成

InflexZM を核とする空調系統毎に無線のサブネットワークを形成する構成とした。有線システムにおける各 SC-bus のネットワークを1つの無線サブネットワークとする形である。中央監視からは、有線システムと全く同一の見え方となる。

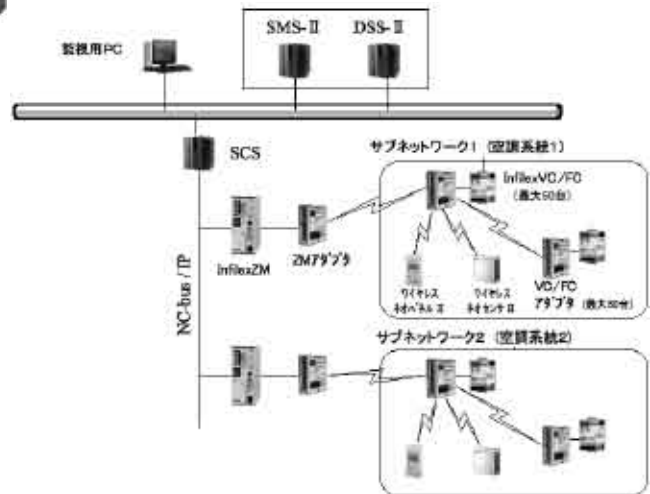


図5. ネットワーク構成

3. 居室内のワイヤレス通信

3.1 ワイヤレス通信の適用対象

ワイヤレスで接続する VAV ユニット, FCU ユニット, InflexZM は、居室内および機械室に点在している。

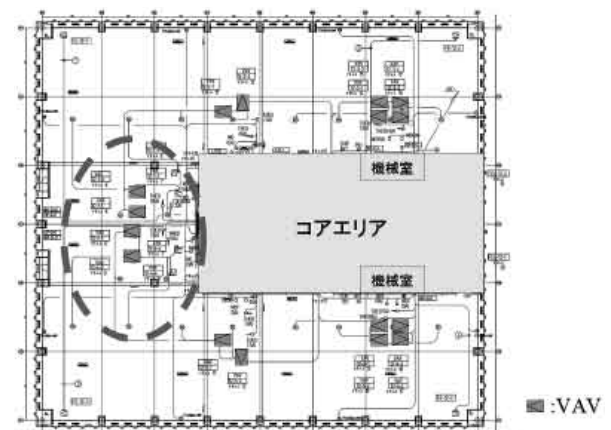


図6. フロアレイアウト例

ワイヤレス通信で用いる電波であるが、金属製の障害物があると透過せず反射するため、電波が減衰し伝送距離が短くなる。たとえば図6のようなフロアレイアウトがあった場合に、点線で囲った VAV ユニットと機械室内の InflexZM の間には、エレベータ等の金属製機器が多いコアエリアがある。直接通信させることは期待できない。

また、機械室から直線距離が数十メートル離れた場

所に VAV ユニットが設置される場合もあり、直接通信させるには遠く、伝送距離の制約から安定した通信ができないことが想定される。

こうした事情から、機械室内から、個々の VAV ユニット、FCU ユニットまでを直接ワイヤレスで通信させる方式よりも、ワイヤレスメッシュネットワーク方式がビル空調システムのワイヤレス化には適していると判断した。

3.2 ワイヤレスメッシュネットワーク

近年、無線のメッシュネットワークが登場してきている。ワイヤレスメッシュネットワークとは、ある通信ノードが目的の通信ノードと直接通信できない場合、バッテリーのように他の通信ノードが中継しながら通信していく通信方式である。

システム稼働後に障害物が設置されたり、中継していた通信ノードが故障したりし通信が途絶えても、迂回路に通信ルートを作り替えることで継続通信できることを特徴とする。

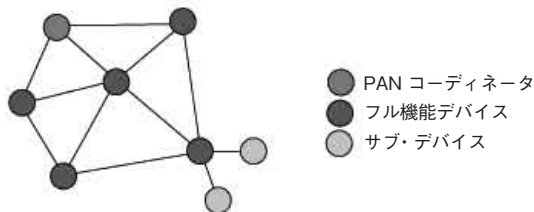


図 7. ZigBee のメッシュネットワーク

ワイヤレスメッシュネットワークの1つとして、米国 ZigBee アライアンスが規格化した ZigBee がある。MAC 層以下の下位レイヤーには、Bluetooth や無線 LAN などと同じ 2.4GHz 帯を利用する IEEE 802.15.4 を用いる。通信速度は最大 250kbps という比較的低速な通信であるが、8 ビット CPU にも搭載可能な低コスト性と、電池駆動でも数年動作可能という低消費電力を訴求点として、ビルオートメーション機器や、家電のリモコンなどへの適用を狙っている。

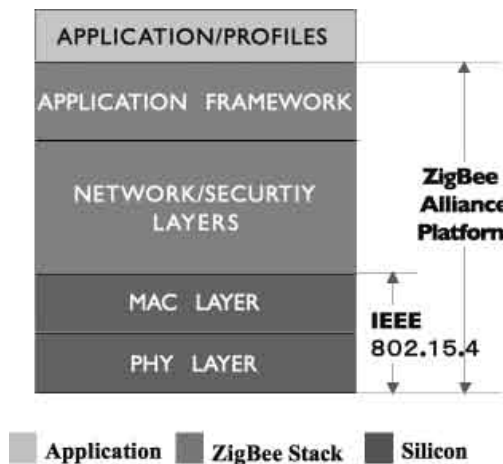


図 8. ZigBee のプロトコルレイヤー構成

前述した居室内での無線通信に必要な要件を満足し、安定した通信品質を得ることを目的に、ワイヤレス VAV/FCU システムの通信方式のベースとして ZigBee を採用することとした。

4. 室内の電波伝搬

4.1 電波伝搬にとっての天井裏の状況

空間を電波が伝わっていくことによりワイヤレス通信が可能となる。電波は波動エネルギーであり、送信点と受信点を結ぶ直線上だけでなく、その直線を中心とした回転楕円体の空間(フレネルゾーンと呼ばれる)を通して伝搬していく。

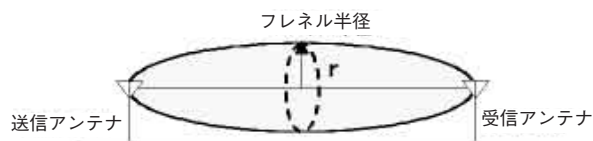


図 9. フレネルゾーン

電波のエネルギーの大部分はこのフレネルゾーン内を通過して伝達されるため、その空間内に障害物があると受信電界強度が十分に得られなくなり通信エラーの発生要因となる。たとえば障害物がフレネルゾーンの半分を覆った場合には、理想的な自由空間での電波伝搬に比べ伝搬損失が 6dB 増えることとなる。一般に、十分な受信電界強度を得るためには障害物で覆われる部分が 40% 以下であることが必要だといわれている。このフレネルゾーンの大きさであるが、送信点と受信点の中間地点での最大半径(フレネル半径)は

$$\text{フレネル半径} = \frac{\sqrt{(\lambda \times D)}}{2}$$

λ : 波長

D: 通信距離

で計算できる。

今回のワイヤレスシステムの適用対象である VAV 及び FCU であるが、居室天井裏におよそ 7~14m 間隔で設置される。仮に伝送距離が 15m だとすると、良好な通信品質を得るためには見通しがあるだけでなく、半径 68.5cm の障害物のない空間が必要となる。

伝搬距離(m)	フレネル半径(cm)
1	17.7
5	39.5
10	55.9
15	68.5
20	79.1
25	88.4
30	96.8

図 10. 伝搬距離とフレネル半径

しかしオフィスの天井裏は、電波伝搬にとってはあまり好ましくない環境である。建築構造物である柱や梁は金属体であり電波にとっては障害物である上に、その間を縫うように走っている空調ダクトや排煙ダクトも金属体である。電波伝搬にとって天井裏は障害物だらけであり、安定した通信品質を確保するのが極めて難しい環境なのである。



図 11. オフィスの天井裏

4.2 VC/FC アダプタの取付

コントローラ通信をワイヤレス化するための VC/FC アダプタは、VAV ユニットの外側にネジ止めを取り付ける事とした。VAV ユニットと一体化し現場に設置することで工事期間の短縮につながるからである。



図 12. VC/FC アダプタの VAV ユニット取付け

しかし VAV/FCU ユニットは金属できており、無線機器をその近くに設置することは、アンテナの指向性を乱し送信特性を著しく低下させることとなる。障害物の無い屋外であれば数 km は伝送距離が出る無線システムであっても、このような形で天井裏に設置すると、安定した通信品質を確保しようとすると十数 m 程度の距離でしか出なくなってしまう。

4.3 マルチパスフェージングの発生

屋内環境は電波伝搬にとっては過酷な環境である。マルチパスフェージングという現象が発生するためである。

天井裏の梁やダクト、室内のキャビネットやロッカー等の金属製什器といった障害物に加え、天井や床自体にデッキプレートと呼ばれる金属板が使われている。

電波は金属体にぶつかると透過せずに反射する。送信機から受信機まで、電波は様々な経路（マルチパス）

を通して伝わっていく。

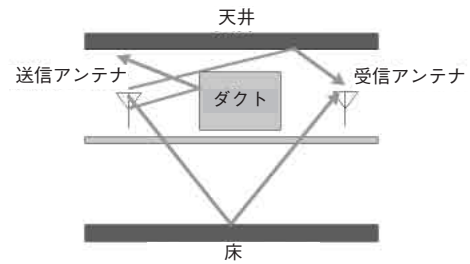


図 13. 居室内のマルチパス

反射なしに伝わる直接波、1 度 2 度と反射を繰り返しながら伝わる波など様々な波がある。それらが受信機のアンテナで受信・合成されることになるが、経路長が異なるため位相差が発生しており、その合成波は振幅方向、時間軸方向で歪んでしまうことになる（フェージング）。

このマルチパスフェージングの結果、わずかに受信アンテナの位置を変えるだけで受信電界強度が大きく変化する現象が発生する。図 14 に x-y 平面上でアンテナを移動した場合の受信電力強度の測定結果を示した。位相が打ち消し合い受信電界強度が著しく減衰する地点（ヌルポイント）が発生している。このような場所無線器を設置すると、通信エラーが発生することになる。

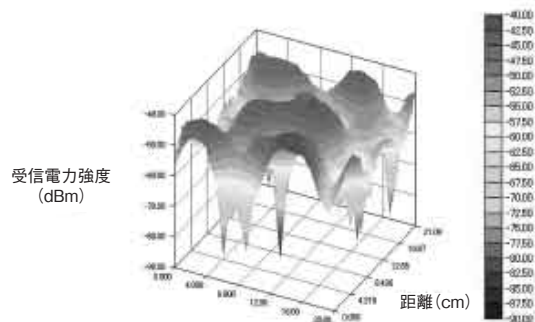


図 14. 受信電力強度の分布 (X-Y 平面)

この受信電界強度の場所による変化は、常に一定しているわけではなく時間変動している。人の動作や、キャビネットやロッカーなどの扉の開閉、換気扇等の回転などの影響を受け時間変化する。

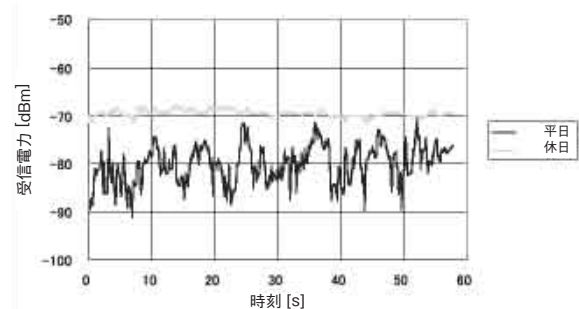


図 15. 受信電力変化の時間変化

受信電界強度の時間変化は、人の多い平日では激しく絶えず大きく変動し、人の少ない休日では比較的安定している。

5. メッシュダイバーシティ技術

これまで述べてきたように、ワイヤレス VAV/FCU システムを適用する居室天井裏での電波伝搬には下記の問題があった。

- 1 天井裏障害物による受信電界強度の低下
- 2 VAV ユニット直付けでのアンテナ指向性の乱れによる受信電界強度の低下
- 3 マルチパスフェージングによる受信電界強度の時間変動とヌルポイントの発生

これらの問題を解決するため、メッシュネットワークと2本のアンテナを用いる空間ダイバーシティ方式を組み合わせた、メッシュダイバーシティ技術を開発した。

5.1 受信電界強度の改善

送信機と受信機間に見通しがいい場合、受信電界強度はレイリー分布に従うことが知られている。

アンテナを2本用意し、受信した電波の受信電界強度の強い方を採用する空間ダイバーシティを用いることで平均受信電界強度が3dB改善し、また、受信成功率99%で通信させるのに必要なフェージングマージンが17dBから10dBへと7dB改善する。

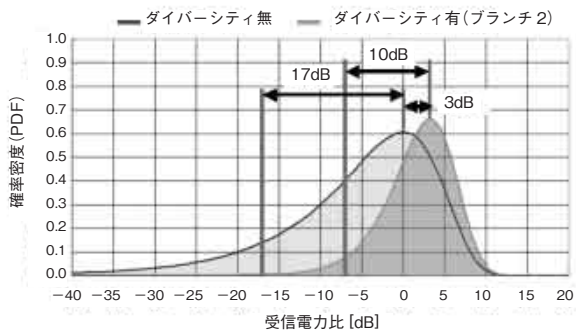
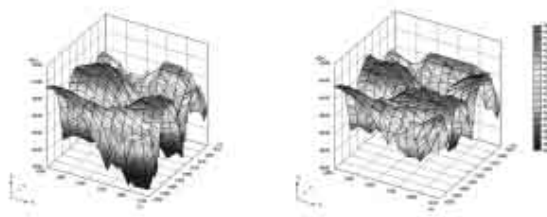


図 16. レイリー分布とダイバーシティによる改善

これより空間ダイバーシティ方式を採用することで、天井裏の通信と VAV ユニットへの取付けにより短縮した伝送距離を改善するのが有効であることが裏付けられる。

空間ダイバーシティの効果を実測データに対して適用した結果を図 17 に示した。z 軸は x-y 平面上の各地点での受信電界強度を示している。空間ダイバーシティの適用後に、受信電界強度が悪い点が改善されてほぼ無くなるのがわかる。



(a)送信ダイバーシティ無 (b)送信ダイバーシティ有
図 17. ダイバーシティによる受信電界強度の改善

5.2 マルチパスフェージングの時間変動対策

ZigBee には、受信電界強度の低下等で通信品質が悪化した場合に、代替ルートへ通信ルートを切り替えるルーティング機能がある。しかし図 15 に示した様に、マルチパスフェージングによる受信電界強度は人の移動等の影響で短時間で大きく変動するため、ルートの切替えだけで対応することは難しい。

代替ルートを決定するためのルーティングテーブルの更新(ルート探索)を行うには2秒程度の時間が必要となるが、この間通信ができなくなるため、人の移動に合わせて短期間で更新し続けていくことは難しいからである。

受信電界強度の瞬時低下による通信エラーの発生を防ぐためには、ルーティング機能とは別の仕組みが必要となる。

そこで今回、人の移動等による短時間での受信電界強度の変動に対応可能な空間ダイバーシティ制御を開発しメッシュネットワークと融合させた、メッシュダイバーシティ技術を開発した。概念的には下記のような動作となる。

- ・ MAC 層レベルでの通信エラーの発生を監視し、短時間で利用アンテナを切替える (ダイバーシティ機能)
- ・ 一定期間継続して通信エラーが解消しない場合に、ルート探索し迂回ルートに切替える (メッシュネットワーク機能)

このメッシュダイバーシティ技術によりコントローラ通信やセンサ通信をワイヤレス化した場合、安定した通信品質を保証できるのか、その検証のために数か所の商用ビルでの電波伝搬計測と、当社3事業所で長期フィールドテストを行った。その結果、居室天井裏という悪環境下でも高い通信品質を確保できることが検証できた。

6. 施工調整ツール

VC/FCアダプタであるが、VAVユニットやFCUユニットの外側にネジ止めされた状態で現場天井裏に設置される。目標である工事期間の短縮を実現するには、電気工事や内装工事などの他工事の進捗とは無関係に調整ができるようになっていくことが望ましい。理想を言えば、他の工事がすべて完了した後に、空調システムの調整を開始できる柔軟性があると良い。

そのためには天井板が敷設された後、天井裏に上らずに床から調整作業ができるようになっていく事が望まれる。



図 18. ワイヤレスチェッカー

こうした要望を具現化するため、下記機能を持つワイヤレスチェッカーを開発した。

① 天井裏の VC/FC アダプタの探索機能

ツールの周囲に存在する VC/FC アダプタを検索・表示する。工場出荷時の VC/FC アダプタは、MAC アドレスが異なるだけで人が理解できる識別情報は設定されていない。

そのためボタン操作で VC/FC アダプタのブザーや LED の鳴動 / 点灯で確認し、アドレス等の識別子を設定可能にするための機能を提供する。

② ワイヤレス通信パラメータ設定機能

本システムは、空調系統毎に無線のサブネットワークを形成する構成をとる。このワイヤレス通信を動作させるのに必要な、各サブネットワークを識別するための識別子 (PAN ID) や周波数チャンネル等のパラメータ設定を行う機能を持つ。

③ VAV/FCU コントローラのパラメータ設定機能

VC/FC アダプタに接続している InflexVC や InflexFC のパラメータ設定する機能。これにより、VAV/FCU ユニットの動作確認も可能となる。

このツールを提供することにより、天井板が敷設された後でも、ほぼ天井裏に上ることなく調整作業を行えるようになり工事期間短縮が可能となる。

7. おわりに

これまで述べた通り、今回開発したワイヤレス VAV/FCU システムの提供目的は、空調工事期間の大幅な短縮にある。新築ビルへの適用はもちろん、既設ビルにおいてもテナントを入居させたまま空調設備のリニューアル工事を行うことも狙っている。

既存の工事作業プロセスにとらわれず、作業プロセスを改革していくことにより、一層の工期の短縮を図っていきたい。

<商標>

ZigBee は、ZigBee Alliance の日本における登録商標です。

Bluetooth は、ブルートゥース エスアイジー、インコーポレイテッドの日本における登録商標です。

Inflex は、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

柏屋 弘	ビルシステムカンパニー 開発本部開発 1 部 コントローラソフトウェア 2 グループ
水高 淳	ビルシステムカンパニー マーケティング本部 プロダクトマーケティング部

ドライガス測定ニーズに応える 低露点計測技術の向上

Progress in Low Dew Point Measurement Technology for Dry Gases

株式会社 山武	山口 徹 Toru Yamaguchi	株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	井端 一雅 Kazumasa Ibata
株式会社 山武	中垣内 直美 Naomi Nakagaichi	株式会社 山武 アドバンスオートメーションカンパニー	金井 良之 Yoshiyuki Kanai

キーワード

湿度、露点、トレーサビリティ、不確かさ、高精度、測定の信頼性、露点制御

近年、ドライな気体の湿度計測を必要とする産業界において、従来の品質維持・歩留まり改善といった目的に加え、低炭素消費社会の実現に向けた省エネの観点から、より精緻な露点の計測と制御が求められている。ビル空調や産業用調湿で経験豊富な山武としてこれに応えるために、JCSS (Japan Calibration Service System) 登録事業者である当社計測標準センターで確立されている露点の校正範囲 (-10℃~+23℃) を低露点領域 (-50℃~-10℃) に拡張するための技術向上を計った。この成果をもとに、平成20年度に独立行政法人製品評価技術基盤機構 (NITE) が実施した技能試験に参加し、好成績を修めることができた。この結果から産業界へ低露点領域の校正を提供する目処が立った。

In recent years, industry's need for more precise dew point measurement and control when determining the moisture of a dry gas has increased due to the desire to conserve energy and achieve a low-carbon society, as well as for purposes such as quality control and yield improvement. As a company specializing in building automation and industrial humidity control, Yamatake has taken steps to meet this need by refining the technology used at its Measurement Standards Center, which is a JCSS*-accredited dew point calibration laboratory (for -10 to 23 deg. C.), in order to calibrate the low dew point range (-50 to -10 deg. C.). Yamatake passed the proficiency testing which was administered in 2010 by the National Institute of Technology and Evaluation (NITE), and will soon begin to provide low dew point calibration service.

※ JCSS: Japan Calibration Service System

1. はじめに

ここ数年、計測の信頼性についての議論が非常に多くなっている。この背景には、日本の製造業が得意とする「ものづくり」において、「もの」の要求レベルの向上に伴って、「づくり」の原点のひとつである「正しく計測する」ことに求められるレベルも上がってきているからだと考えられる。

製品開発を生業とする当社にとって、「良い製品」の開発を行うためには、「正しく計測する技術」とそれを支える「計測標準の維持・管理技術」が合わせて重要であり、場合によってはそれらを同時に開発することが必要である。

2. 世の中の低露点計測ニーズの高まり

湿度は、温度と並んで温熱環境の代表的な指標の1つである。従来より、25℃ 50% rhで代表される、いわゆるマイルドな空気の湿度計測は広く一般的だが、近年、よりドライな空気の湿度計測のニーズが高まってきている。

例えば、吸湿性の高い原材料を取り扱う医薬・化学・食品加工業、熱処理炉の酸化・還元雰囲気調湿を行う鉄鋼・非鉄金属産業、水分やケミカルコンタミネーションを嫌う材料を取り扱うボタン電池・リチウムイオン電池・有機ELなどの製造業などがその代表例であろう。

こういった現場では、従来の品質維持・歩留まり改善

といった目的に加え、低炭素消費社会の実現に向けた省エネの観点から、より精緻な露点の計測と制御が求められるようになってきている。

こういった社会の要請に応えるために、当社では従来より提供している鏡面冷却式露点計ファインデュー(FINEDEW™)シリーズの計測露点範囲をさらに低露点領域に拡張するための開発を進めてきた。

この様な計測機器の開発においては、先に述べたように、以下の3つの要素をバランスよく実現しなければ達成することが困難です。

- ① コアとなるセンサ開発技術
- ② そのセンサを正しく校正する技術
【国家標準にトレーサブルな値を付ける】
- ③ センシングを正しく行うための周辺技術
【正しく測定するためのノウハウ】

本稿では、これまで進めてきたファインデュー(FINEDEW)の低露点への計測範囲の拡張開発で実施してきた内容について、特に上記②③を中心に報告する。

3. 湿度の国家標準供給のしくみ

日本の計量法に、湿度は政令単位（法定計量単位と同等に扱われる単位）として定められている。

そして日本の湿度の特定標準器（国家標準）は、茨城県つくば市にある産業技術総合研究所（以下、産総研）が保管する標準湿度発生装置群であると、経済産業大臣によって告示されている。

そのため日本の湿度の国家標準は、産総研が実現し、その湿度標準に産業界が測定結果を照らし合わせ（以下、校正という）、「もの」づくりを正しく行うことができる「しくみ」が成り立っている。

図1に産総研が供給する湿度標準の概略図（露点範囲）を示す。

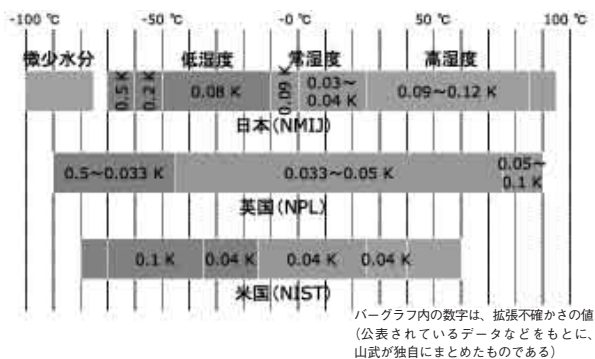


図1. 各国の湿度国家標準，供給範囲

図1は、すべて露点で書き表されているようにみえるため誤解がないよう補足説明をすると、

- a. 常湿度領域と高湿度領域は「露点」
- b. 低湿度領域は「霜点」
- c. 微量水分領域は「モル分率」

上記のa～cの概要がわかることを目的に温度として表している。

これらの理由を簡単に説明すると、a.の常湿度領域と高湿度領域は空気中にある水分が結露を生じる温度、すなわち「露点」で表すことが一般的であり、b.の低湿度領域は、空気中の水分が凍ることによって霜となるため「霜点」で表すことが一般的である。

c.微量水分領域は、上記の2つとは少し条件が異なり、空気中の水分量があまりにも少ないため霜点で表すとばらつきなどを含めた正確な値を示すときに不都合が生じることもあり「モル分率」で表されている（図1の微量水分領域は、霜点相当値で表記している）。

この図1を見ても、世界的にリードしていると言われている国家計量標準研究機関を擁するイギリスやアメリカと比べて、日本の国家計量標準（湿度：供給可能な露点範囲、露点の不確かさ）は遜色ない、むしろリードしているといえる。

このような産総研の機能である計量標準の基礎研究の日々の積み重ねがあるからこそ日本の「ものづくり」の基盤が支えられてきたと言っても過言ではないだろう。

話しを国家標準供給のしくみに戻すが、湿度の国家標準の値は、計量法に基づくJCSS制度によって、一般ユーザーに提供されている。

そのトレーサビリティの概略図を図2に示す。

2010年8月現在、日本では当社を含め6社が湿度の区分でJCSS登録事業者になっているが、校正サービスを提供している露点の範囲(下限値)は、-10℃までであり、今回の開発を進める上で参照する湿度標準が無いことが大きな問題・課題となった。

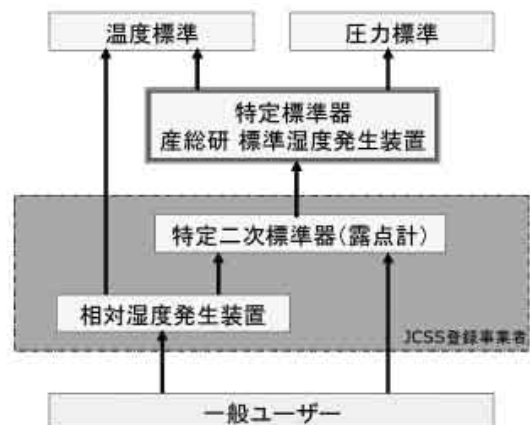


図2. わが国の湿度のトレーサビリティ体系

4. 現在の当社湿度標準及び当社の校正事業

当社は長年にわたり湿度センサの開発のため、産総研によって校正された「露点計」と自社で校正を行った「湿度計」と「分流式の発生装置」を用いて、感湿素子や湿度発信器の評価試験を行ってきた。

これらの開発や評価において蓄積した技術を元に、2004年5月に湿度のJCSS認定を取得した。

その後、2004年12月に圧力で認定事業者になったが、計量法の改正に伴い認定事業者の呼び名が、登録事業者になったことや更新審査などのタイミングを利用し国際相互承認(MRA)対応の校正事業者として2007年2月には温度、2007年7月に湿度で再度登録を行った。

さらに2008年11月には電気の分野でもJCSS登録を取得し、現在4つの分野において、JCSSの校正事業を行っている。

azbilグループでは、計測標準センター以外でもJCSSの登録事業を行っている。その事業区分、最新の登録状況については、独立行政法人製品評価技術基盤機構（以下、NITEという）のWEBサイトにも公開されているので、検索できるURLを以下に紹介する。

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

湿度分野におけるJCSSの校正対象の種類と、登録を受けている範囲を図3に示す。

JCSS 制度上の区分と種類		弊社登録範囲	
校正手法の区分の呼称	種類	校正範囲	最高測定能力 (k = 2)
湿度測定器等	露点計	露点 -10℃以上 23℃以下	0.16℃
	電子式湿度計	校正温度 20℃以上 25℃以下において 相対湿度 10%以上 50%以下 ただし、露点温度 -10℃以上 23℃以下の 相対湿度	0.6%
		校正温度 20℃以上 25℃以下において 相対湿度 50%超 90%以下 ただし、露点温度 -10℃以上 23℃以下の 相対湿度	1.0%
	熱伝導率式湿度計		
	通風乾湿計		
	湿度発生装置		

図3. JCSS 制度上の校正対象種類と当社登録内容

現在、湿度のJCSSで校正が認められている種類は図3の5種類であるが、当社ではその中の露点計と電子式湿度計を校正対象としている。

図3にある“最高測定能力”とは、最良の性能を有した校正対象を校正した場合に実現できる校正結果であるが、この表現が非常にわかりにくいのでここで簡単に説明しておく。

当社の技術能力で保有する設備や環境条件で露点計を校正した場合、最高測定能力(k = 2)は0.16℃であることの意味は、

- ① 当社が保有する標準器「露点計」
- ② 設備「湿度発生装置」
- ③ 想定可能な最も性能の良いとされる校正対象「露点計」上記①と②を使用して③を校正した場合、その校正結果

は、95%の信頼水準で“校正結果の±0.16℃”の範囲に入るということを示している。

一般的に製造メーカーや校正事業者の“測定のレベル”や“校正結果の良し悪し”は、測定者の知識・技術・能力を除くと、以下の3つの要素で決定されることが多い。

- ① 標準器の性能
- ② 測定系・校正環境
- ③ 校正対象の性能

この測定のレベルや測定精度は“校正の不確かさ”で表すことができる。

この“校正の不確かさ”を求めるには6章であげる図7のような“バジェット表”と呼ばれる表がよく使われる。

このバジェット表は顧客や校正依頼者と校正の信頼性について議論する場合などに用いられるが、この詳細は6章の技能試験の項目で詳しく述べる。

5. 今後の当社湿度標準

当社は計測・制御機器の開発、販売、メンテナンスを中心に事業をしていることもあり、様々な物理量の測定を行う必要がある。

これらの測定作業は、生産工場や研究施設にとどまらず、お客様の工場（以下、現地という）に伺って、計測・制御機器のメンテナンスを行うときにも実施している。

その現地で行うメンテナンスの一環として行っていた校正サービスにも、JCSS校正のニーズが高まっているため、一部の作業に対してJCSS現地校正サービスが提供できるよう、電子式湿度計の現地校正に関する登録を申請中である。

これに加えて、2010年の年末にかけて-50℃～-10℃（霜点）の低露点領域についても登録申請の準備を進めているところである。

また、中露点領域の登録においては、最高測定能力を図4のように変更する予定である。

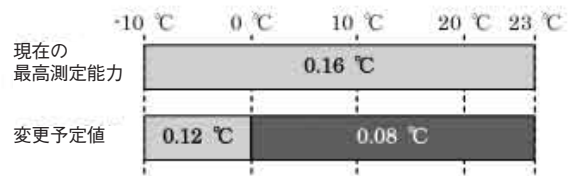


図4. 現在の最高測定能力と今後の予定（中湿度）

これは、以前に行った湿度の再登録時にいくつかの管理方法を見直し、再評価を実施したところ、その結果（安定性、再現性など）が、2004年にはじめて認定を取得した時に行った評価結果と比較して、大変良い結果が得られたことによるものである。

この時の結果から、再登録時に小さな不確かさで申請することも可能だったが、測定監査や時間の制約などが

ら最高測定能力は初期に申請した不確かさの値で再登録を行った。

しかし、これらの評価内容を裏付ける結果が、後述する、2009年度に行われた湿度の定期技能試験により実証されたため中露点の最高測定能力も現在の0.16℃よりも、小さい値で登録することが可能と予測している。

当社の現在と今後の標準供給体系を図5に示す。

6. 技能試験結果

2009年度には、湿度の技能試験が中高湿度の露点(-10℃~+50℃)、低湿度の霜点(-70℃~-10℃)の範囲で実施された。

湿度の技能試験はISO/IEC Guide 43 (JIS Q 0043)に適合するプログラムで、少なくとも4年に一度、定期的に行われ、登録事業者または登録を受けようとする事業者は参加が義務付けられ、校正の技術能力が評価されることになっている。

その湿度の技能試験の流れ(概略)を以下に記す。

- ① 十分安定していることが評価された露点計(以下、伸介器という)を、NITEが準備する。
- ② その伸介器を産総研で校正(値付け)する。
【この時点では、産総研での校正結果は伏せられている】
- ③ NITEは技能試験に参加した事業者に伸介器を送り、参加事業者は、参加事業者の校正環境で校正を行う。
- ④ 参加事業者は所定の期間で校正を完了させ、その校正結果をNITEに提出する。

⑤ 数社(場合によってはすべて)の参加事業者の校正が完了したら、伸介器を、産総研に送り再度、校正(値付け)を行う。

【伸介器が健全な状態であることを確認する】

⑥ NITEが、それぞれの参加事業者の校正結果と産総研の校正結果とを比較し、妥当な校正ができていのかどうかを評価し、測定能力を確認する。

①~⑥が技能試験の簡単な流れであるが、⑥の評価方法を説明すると、参加事業者の校正結果は参照機関である産総研の校正結果と比較され、その差が不確かさの範囲内であるかどうかにより合否判定が下される。

具体的には、以下の式(1)によるEn値を算出し、その値が±1以内であれば技術能力が満足するものとして合格とみなされる。

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

|En| ≤ 1 : 満足

|En| > 1 : 不満足

X_{lab} : 参加事業者の測定値

X_{ref} : 参照機関(NMIJ)の参照値

U_{lab} : 参加事業者の測定値の拡張不確かさ(k=2)

U_{ref} : 参照機関(NMIJ)の測定値の拡張不確かさ(k=2)

当社は2009年に実施された湿度の技能試験において、-10℃~+23℃の露点範囲と、-50℃~-10℃の

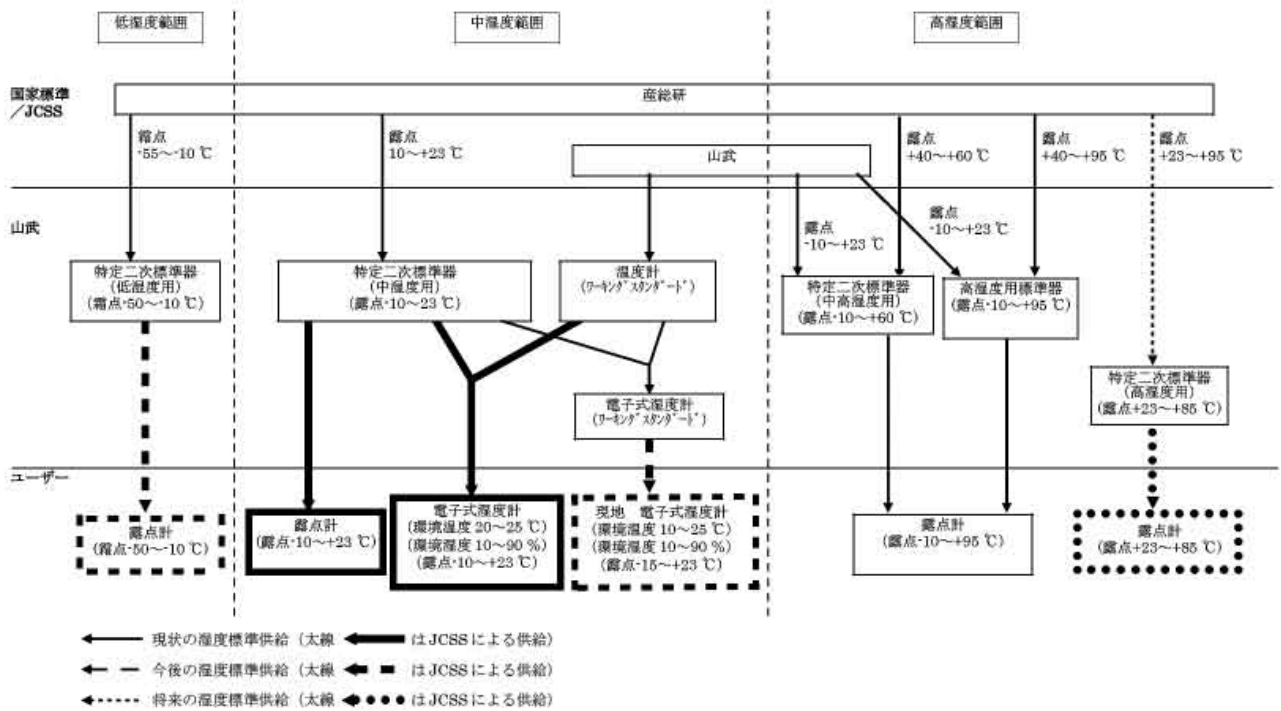


図5. 現在の標準供給体系と今後の予定

霜点範囲で参加した。

この技能試験時の当社の校正結果を図6に示す。

この図6は縦軸が校正結果の差異、すなわち産総研の参照値が0℃となっている図である。

したがって、この0℃のラインに、参加事業者がNITEに提出した不確かさを示す縦のバーが、クロスしていれば、合格していることが確認できる図となっている。

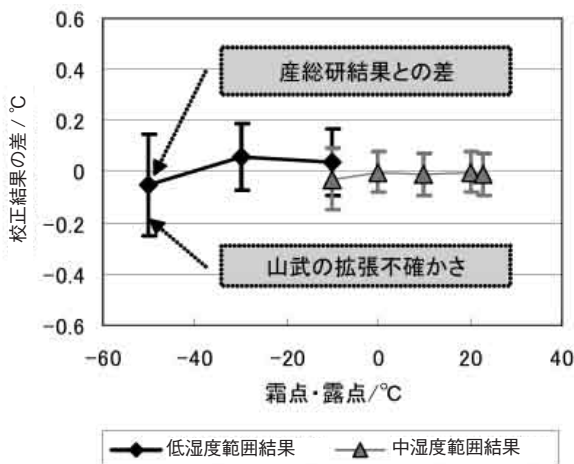


図6. 技能試験結果

この図6をみると、現在JCSSの登録事業を行っている露点-10℃～+23℃の範囲では、産総研の校正結果と良く一致していることが、お解りいただけると思う。

また、鏡面冷却式露点計では非常に測定が難しいと言われている低露点領域(-50℃)においても、良い校正が実施できていることが確認できた。

今回、初めて行われた低湿度の霜点範囲の技能試験において、産総研との差は拡張不確かさの範囲内に入っているため、低湿度の霜点範囲でもJCSSの登録事業者として校正事業を行っていく技術的な準備ができていることが確認できたと考えている。

参考までに、この技能試験において使用したバジェット

ト表(一部)を図7に示す。

この図7は略語を多く使っており、誤解を招く恐れがあるので簡単に説明を加える。

すでに4章で説明したとおり、校正結果の不確かさは、大きく分けて以下の3つの要素になる。

- ① 標準器の性能
- ② 測定系・校正環境
- ③ 校正対象の性能

①標準器の性能を細分化すると、図7の $U_{s1} \sim U_{s5}$ の要因が挙げられる。

U_{s1} は標準器(露点計)が示す値に含まれる不確かさであり、主に産総研で校正されたときの不確かさを考慮する。

U_{s2} は、産総研で校正された時から、実際に当社の測定環境で使用するまでの期間に経年変化(ドリフト)が発生するため、その変化量を考慮する。

U_{s3} は、実際の校正において、データを読み取る間、バラツキ量を考慮する。

U_{s4} は、校正条件を変えて測定をした場合の一致度合い(既知の補正量は補正する)の標準偏差を考慮する。

U_{s5} は、当社の標準器(露点計)は、表示分解能が0.01℃の桁数であるため、これ以下の桁(0.001℃)はわからないため、これらの量を考慮する。

②測定系・校正環境は、産総研で校正した環境と当社で校正中の校正条件が異なることや、実際の校正中に起こる様々な変化に対して、校正結果(露点)がどの程度の影響を受けるのかを定量化する項目である。

U_{m1} の発生ゆらぎは、発生装置から発生される空気中の霜点に時間的な変動があると、標準器、校正対象の応答性の違いなどにより、異なる霜点の値を示す可能性がある。そのため、霜点の変動量を考慮する必要がある。

U_{m2} は、測定空間に圧力差があることによって、霜点に変化するため、この圧力差の影響を物理的な根拠から

	霜点	-50℃	内容
標準側	U_{s1}	標準器校正	0.0400 標準器(FINEDEW)を上位標準(産総研の国家標準)で校正した時の不確かさ
	U_{s2}	標準器長期安定性	0.0200 標準器(FINEDEW)が次の校正周期までに変化することに関する不確かさ
	U_{s3}	標準器短期安定性	0.0250 標準器(FINEDEW)の短期的なばらつきによる不確かさ
	U_{s4}	標準器再現性	0.0244 標準器(FINEDEW)を繰り返し測定した場合の再現性による不確かさ
	U_{s5}	標準器の表示分解能	0.0029 標準器(FINEDEW)の最小表示分解能に関する不確かさ
環境	U_{m1}	発生のゆらぎ	0.0296 発生露点の時間的な変動による不確かさ
	U_{m2}	差圧の影響	0.0084 発生口と露点センサ内の差圧から来る不確かさ
	U_{m3}	試験槽温度変化の影響	0.0292 飽和槽温度の変化による不確かさ
校正時	U_{k1}	校正結果のばらつき	0.0140 繰り返し校正をした結果による不確かさ
	U_{k2}	校正対象の分解能	0.0029 校正対象の最小表示分解能による不確かさ
	U_{k3}	被校正器の短期安定性	0.0250 校正対象の短期的なばらつきによる不確かさ
U_{eff}	合成不確かさ	0.0765	各不確かさを合成(二乗和し平方根をとった)したもの
ν_{eff}	有効自由度	407	今回の結果が何回繰返しを行ったのと同様の結果であるかを算出したもの
k	包含係数	1.97	95%の信頼水準を得るための係数
U	拡張不確かさ	0.1504	校正結果の不確かさ(信頼水準95%)

図7. 低湿度用露点計の技能試験時バジェット表

露点への影響量を考慮する。

U_{m3} は、飽和槽の温度変化によって、霜点に与える影響量を考慮する。

③校正対象の性能は、前記した①と②がもつ不確かさの成分を含んだ結果が表れるが、切り分けることが難しいため殆どの場合、校正結果のバラツキに含まれる。

U_{x1} は、繰り返し校正を実施した結果の標準偏差をバラツキ量として考慮する。

U_{x2} は、 U_{s5} でも説明したとおりだが、校正対象機器が0.1℃の表示分解能の場合、表示値が-50.0℃であったとしても、-49.9500…から-50.0499…の間のどこを示しているかは不明であるため、その量を考慮する。

U_{x3} は、校正対象機器におけるバラツキ量で、内容は U_{s3} と同様なので説明は省略する。

これらの要因をすべて合成したものが、 U_c 合成標準不確かさとして表されるが、ここで注意すべき点がある。

それは③の校正対象の性能の項目で説明したとおり、校正結果のバラツキには、①と②の成分も含まれるため、校正対象機器に対して妥当(適切)な校正が実施できたのか、否かを確認しなければならないということである。

通常、繰り返し測定を行い、その平均値で結果を算出するが、平均値は校正結果の推定値である。

この校正の繰り返し回数が無限大に大きい場合、その推定値は限りなく最良の推定値に近づくと考えられるが、実際には限られた回数しか測定できない。

そのため、推定値自体にバラツキがあり推定値そのものの妥当性が求められる。

この妥当性を確認する1つの方法に有効自由度で表す方法がある。

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

v_{eff} : 有効自由度

$u_c(y)$: 合成標準不確かさ

$u_i(y)$: 校正データから算出する個々の標準不確かさ

v_i : 校正データから算出する個々の標準不確かさの自由度

この有効自由度から、 t 分布表を利用し95%の信頼水準にあたる包含係数 k を導くことができる。この包含係数 k を合成標準不確かさ u_c にかけて、拡張不確かさ U が算出できる。

$$U = k \times u_c$$

7.1. 技能試験に用いた「低露点ファインデュー(FINEDEW)」の紹介

今回の技能試験には、新規に開発を行った鏡面冷却式露点計「低露点ファインデュー(FDW20)」を用いた。



図8. 低露点ファインデュー外観

一般的に、鏡面冷却式露点計は高精度で露点の測定が可能であるが、低露点領域では応答性や安定性が悪くなることが知られている。

ところが、この低露点ファインデュー(FDW20)は、下記にあげる山武独自の技術により、精度、応答性、安定性を飛躍的に高めることができた。

- ① 鏡面や鏡面温度センサ、鏡面冷却器などの露点検出部を超小型化したことにより、低露点領域(微小水分)の結露を安定的に発生させることが可能。
- ② 極細投受光同軸光ファイバーと高感度光電センサにより、結露の高感度検出を実現。
- ③ 高性能制御回路により、高精度温度検出、高速応答性及び高い制御安定性を実現。

なお、技能試験に先立ち、産総研において低露点ファインデューのjcss校正を実施した結果、良好な結果を得ることができたので、参考までにjcss校正証明書を図9に示す。

この校正結果や技能試験の結果が良いだけでなく、一般ユーザーが使用する観点から見ても、これまでは計測にのみ使用されてきた鏡面冷却式露点計だったが低露点領域で、高速応答が可能となったことから、露点制御の高精度センサとしても使用することができるという顧客価値が提供可能となった。

8. 低露点の計測技術を向上させた周辺技術

8.1 発生装置周囲温度の影響

技能試験に使用した低露点用の湿度発生装置は、分流式で試料空気や飽和槽などの温度制御を行わないタイプの発生装置を使用したため、校正環境のわずかな温度の変化によって、試料空気の飽和具合に変化が生じ安定

した湿度発生ができないことが問題となり、この問題を解決するためには2つの改善事項を同時に実施する必要があった。

1つは校正環境の温度制御の向上である。

これには当社の精密空調制御システムを使って恒温槽を作成し、その中に湿度発生装置を入れることで解決した。

もう1つは、飽和槽の外側に厚さ約10mmの断熱材で覆い熱の流出入を緩やかにした。

これらの改善ができてきていることの確認のために、飽和槽と断熱材の間に、Pt100Ωの温度計を貼り付け温度を測定した。


その測定結果を図10と図11に示す。

恒温槽内に湿度発生装置を設置する前は室温の影響により、測定ごとに飽和槽壁温度に違いがあったが、恒温槽設置後はほぼ一定の値に制御できていることがわかる。

温度スケールを細かくした図11からも、恒温槽設置前と後では、飽和槽周囲の温度制御幅にも違いがあり、恒温槽設置前が±0.1℃以上の変化があるのに対して、恒温槽設置後では±0.02℃程度に収まっていることがわかる。

この恒温槽によって、飽和槽周りの温度安定化に十分な効果を発揮した。

総数2頁の1頁
第106026号



校正証明書

依頼者名	株式会社 田武
依頼者住所	神奈川県藤沢市川名1丁目12番2号
校正実施場所	独立行政法人産業技術総合研究所つくば中央第三実用所
特定二次標準器名	露点計
製造者名	株式会社 山武
型式・器数番号	本体FDW10-B005 (No.0005) センサFDW-XL0005 (No.XL0005)
校正方法	2頁のとおり
校正実施動作	2頁のとおり
校正結果	2頁のとおり
受付年月日	2009年12月4日
校正実施年月日	2009年12月9日～2010年2月1日


以上に相違ないことを証明する

校正責任者
計量標準総合センター

北野 寛

北野 寛

発行所
東京都千代田区霞が関一丁目1番1号
独立行政法人
産業技術総合研究所



理事長 野間口 孝

発行日 2010年2月3日

この証明書は、計量法第136条第1項に基づき特定標準器による校正の結果を示すものである。
事後の承認なしに、この証明書の一部のみを複製してはならない。

総数2頁の2頁
第105026号



1. 校正方法
JIS B 7920に記載された二温度生の原理による標準湿度発生装置（恒湿用）(H0-LH5)が発生するガスを露点計に導入して校正を行った。
2. 校正結果

標準の値 (露点) (°C)	露点計の指示値 (°C)	偏差 (°C)	偏差不確かさ (k=2) (°C)
-55.00	-54.77	0.23	0.20
-50.00	-49.81	0.19	0.08
-40.00	-39.88	0.12	0.08
-30.00	-29.93	0.07	0.08
-10.00	-10.00	0.00	0.08

(備考) 校正実施年月日 2009年12月9日～2010年2月1日
被校正器 本体 型式: FDW10-B005 製造番号: N0.B005
センサ 型式: FDW-XL0005 製造番号: N0.XL0005
偏差は、露点計の指示値から標準の値を引いたものである。
不確かさは、発生装置の不確かさと校正時の不確かさを合成したものである。
偏差不確かさは、包含係数k=2として求めた。
3. 校正実施条件
 - (1) キヤリアガスは亜亜である。
 - (2) 標準湿度発生装置の露点を、標準の値±0.1℃以内に設定し、校正を行った。
 - (3) 湿度計はITS-90、絶対湿度圧式はSontagの式を用い、露点修正係数は207ressponの式を用いている。
 - (4) 露点計の指示値は、デジタル出力を計算機に取り込んで求めた。
 - (5) 標準湿度発生装置の発生するガスを露点計へ導入するには、0.5MPaまで接続されたステンレス管（外径12.7mm、長さ合計約1.9m）、及びスリッパローグロック継手により接続されたステンレスB4管（外径6.35mm、長さ約0.1m）を用い、露点計のガス入口へスリッパローグロック継手により接続した。出口側は流量調節弁と露点計を通して大気中へそのまま放出した。試料流量は0.5L/minであった。試料の圧力は常に大気圧よりわずかに高く、発生装置の出口で101.3kPa～102.3kPaの範囲であった。サンプリングホースの圧力降下の修正を行った。
 - (6) 露点計セルケースの温度は-10℃とした。
 - (7) 校正を始める前に依拠器による露点の補正を行った。
 - (8) センサ裏面の水の状態を確認して、測定した。
 - (9) 測定中の測定室の温度は17.9℃～25.3℃の範囲内、相対湿度は約22%～34%の範囲内であった。

以上

図9. 低露点ファインデューのjcass校正証明書

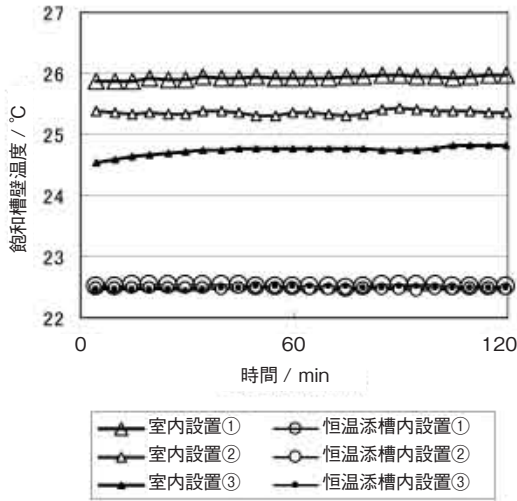


図 10. 設置場所による飽和槽周り温度の違い (1)

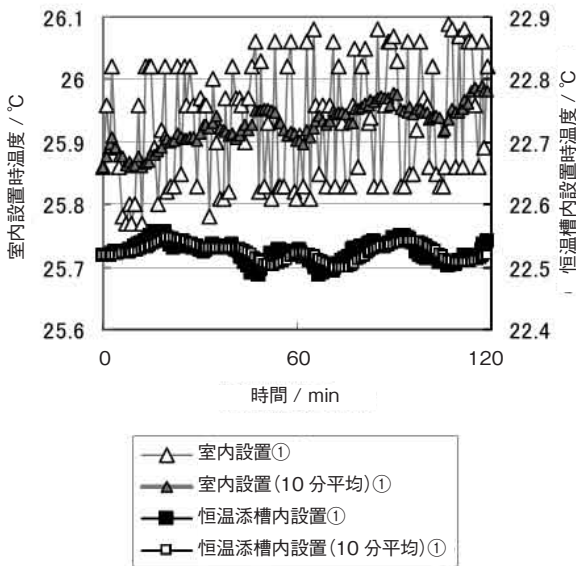


図 11. 設置場所による飽和槽周り温度制御の違い (2)

8.2 サンプリングチューブによる露点への影響

霜点 -30°C 付近から、それ以下の低露点を測定する場合は、ガス中の水分量が非常に少ないため、ちょっとした水分に測定結果が大きく左右されるため測定には様々な注意が必要である。

その注意の1つとして、露点計につなぐ配管の内部でおこる水分吸着や脱離による影響があげられる。

今回は、それらの影響を確認するため、いくつかの実験を行なったので代表的な結果を報告する。

8.2.1 露点計につなぐ配管材料と長さの影響

露点計につなぐ配管材料と長さをいくつか替えて、霜点 -55°C から -50°C を測定した結果、配管材料や長さによって測定結果や応答性に影響が出ることが確認できた。

今回確認した配管材料はステンレス EP管(内部電解研磨)、ステンレスフレキシブル管、銅管、フッ素樹脂チューブチューブの4種類で、フッ素樹脂チューブチューブについてのみ長さを0.5 mと10 mの2種類使用した。

【実験 1】：配管の種類による霜点の違い	
測定霜点	約 -40°C
配管材質	フッ素樹脂チューブ ステンレス EP 管 銅管
配管長さ	10 m ただし、フッ素樹脂チューブのみ 0.5 m も追加で同時に実施
配管径	内径： 4.35 mm 肉厚： 1 mm
測定環境条件	$25^{\circ}\text{C} / 50\% \text{ rh}$ ただし、フッ素樹脂チューブ 10 m のみ $25^{\circ}\text{C} / 95\% \text{ rh}$ も追加で同時に 実施
【結果】：図 12 の結果が示すように $25^{\circ}\text{C} / 50\% \text{ rh}$ 環境においたステンレス EP 管、銅管、フッ素樹脂チューブ 0.5 m の測定値に大きな差なかった。それに対し、フッ素樹脂チューブ 10 m は、高い測定値を示した。特に、 $25^{\circ}\text{C} / 95\% \text{ rh}$ の環境においたフッ素樹脂チューブ 10 m は、 0.6°C ほど高い霜点を示した。	

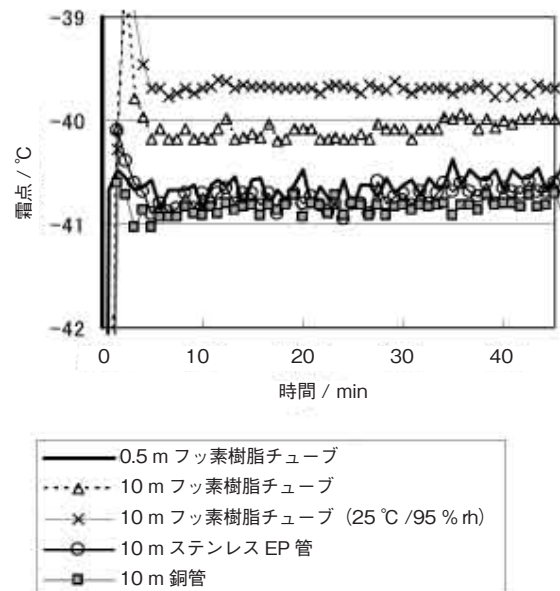


図 12. 配管種類による霜点の違い

【実験2】：周囲温湿度の変化による霜点の違い	
測定霜点	約-55℃
配管材料	フッ素樹脂チューブ
配管長さ	0.5 m と 10 m
配管径	内径：4.35 mm 肉厚：1 mm
測定環境条件	0.5 m チューブ：25℃ /50% rh 10 m チューブ：40℃ /95% rh から 25℃ /95% rh に変化させた。
【結果】 ：実験1の結果(図12)に加え、図13の結果が示すように10 m フッ素樹脂チューブは周囲の温湿度の変化によって測定値に大きな変化が現れることが確認できた。	

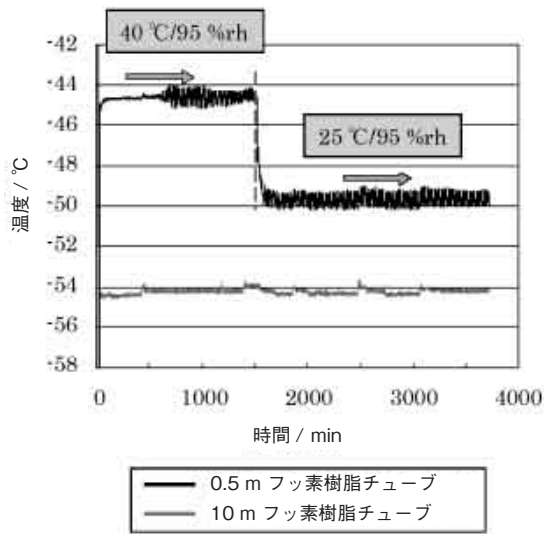


図13. 周囲温湿度の違いによる霜点計測の違い

【実験3】：配管の種類による応答性の違い(1)	
測定霜点	約-50℃ ⇒ -40℃
配管材料	フッ素樹脂チューブ ステンレス EP 管 銅管
配管長さ	10 m ただし、フッ素樹脂チューブのみ 0.5 m も追加で同時に実施
配管径	内径：4.35 mm 肉厚：1 mm
測定環境条件	25℃ /50% rh ただし、フッ素樹脂チューブ 10 m のみ 25℃ /95% rh も追加で同時に 実施
応答性評価の 測定条件	霜点：-50℃から-40℃へ 発生霜点を変更
【結果】 ：図14の結果が示すように、配管長さによる応答性に違いはあったが、配管種類による応答性に違いはなかった。ただし、10 m フッ素樹脂チューブはオーバーシュートしており、樹脂への吸着・脱離が金属と比較して大きいと考えられる。	

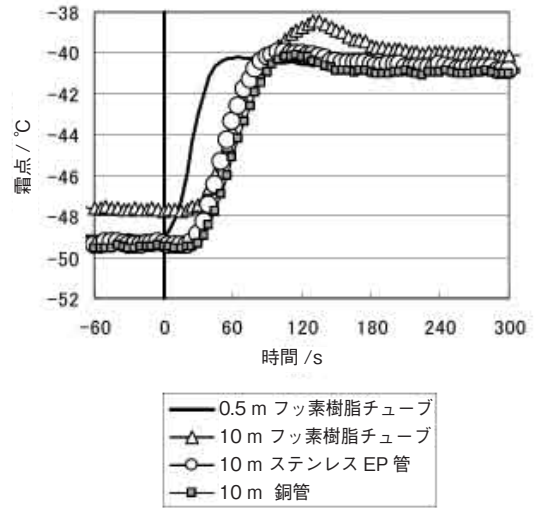


図14. 配管種類による応答性の違い(1)

【実験4】：配管の種類による応答性の違い(2)	
測定霜点	約-50℃ ⇒ -40℃
配管材料	ステンレス EP 管 ステンレス フレキシブル管
配管長さ	10 m
配管径	内径：4.35 mm 肉厚：1 mm
測定環境条件	25℃ /50% rh
応答性評価の 測定条件	霜点：-50℃から-40℃へ 発生霜点を変更
【結果】 ：図15の結果が示すように、同じ長さのステンレス管でも、フレキシブル管では応答性が遅いことが確認できた。配管内側の表面積の影響と考えられる。	

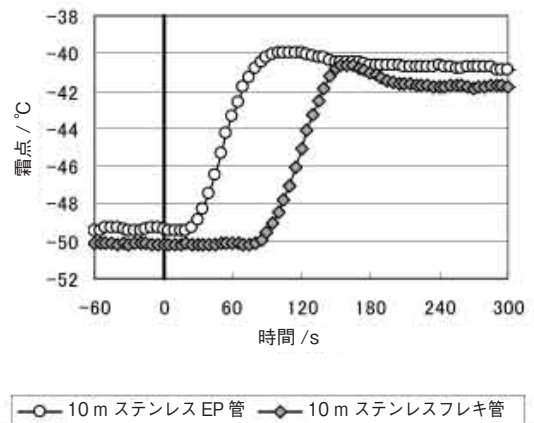


図15. 配管種類による応答性の違い(2)

これらの実験から低露点領域では露点計までの配管材料の材質は透過がなく、水分の吸着が少ないものを使い、長さを短くすることが重要であることが再認識できた。

9. おわりに

本稿では、露点計測範囲を拡張するために取り組んだ技術向上について、周辺技術の検討を含めて紹介した。

一般的に、計測という行為はできて当たり前だと思っている人が多いかもしれない。しかし、要求されるレベルが高くなれば、そう簡単なことではない。当社では、開発部と計測標準センターが得意分野で協業し、より良い「ものづくり」を進めている。そして今後とも、より良い「ものづくり」を通じて、お客さまとともに価値をつくり、信頼をいただけるよう努力していく所存である。

<解説>

- (1) JIS Z 8806 では「湿潤空気の水蒸気圧に、水の飽和水蒸気圧が等しくなる温度」のことを「露点」と呼んでいるが、そのほか「露点温度」と呼ばれることもある。
- (2) JIS Z 8806 では「湿潤空気の水蒸気圧に、氷の飽和水蒸気圧が等しくなる温度」のことを「霜点」と呼んでいるが、そのほか「霜点温度」と呼ばれることもある。
- (3) 広義には、「露点」・「霜点」を総称して「露点」とよぶことがある。
- (4) 「jcss (スモールジェーシーエスエス) 校正証明書」は、国立標準研究所または指定校正機関等が発行する jcss ロゴマーク付の校正証明書で、JCSS 制度で登録を受けた校正事業者が発行する JCSS ロゴマーク付きの「JCSS (ラージジェーシーエスエス) 校正証明書」と区別されている。

<参考文献>

- (1) Calibration and Measurement Capability, Thermometry Japan NMIJ, The BIPM key comparison database, Nov. 2009 独立
- (2) 北野寛, 湿度標準の現状と供給範囲の拡大, AIST Today, Mar.2005
- (3) Calibration and Measurement Capability, Thermometry United Kingdom NPL, The BIPM key comparison database, June 2010
- (4) S. Hasegawa and J.W. Little, The NBS Two-Pressure Humidity Generator Mark 2, Journal of Research of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry, Vol.81A, No.1, Jan.-Feb. 1977
- (5) 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター計量認定課：平成 20 年度 JCSS 技能試験手順書
- (6) 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター：試験所間比較による技能試験報告書（中高湿度用露点計）JCPT-99-1
- (7) 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター：

試験所間比較による技能試験報告書（低湿度用露点計）JCPT-99-2

- (8) 飯塚幸三監修：ISO 国際文書 計測における不確かさの表現ガイド, 日本規格協会
- (9) 山口徹, 伊林洋志, 新沢陽介, 江口忠登美, 磨田光夫：現場技術者のための計測技術入門, 日本規格協会

<商標>

FINEDEW は、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

山口 徹	計測標準センター
中垣内 直美	計測標準センター
金井 良之	アドバンスオートメーションカンパニー 開発部 開発7グループ
井端 一雅	アドバンスオートメーションカンパニー マーケティング部

燃焼安全制御技術を用いた コントローラの開発

Controller Development Using Combustion Safety Control Technology

株式会社 山武

アドバンスオートメーションカンパニー

熊澤 雄一

Yuichi Kumazawa

キーワード

燃焼安全, 火災検出器, 安全, 制御, メンテナンス, フェールセーフ, スタートチェック

工業用燃焼炉(以下、工業炉)の燃焼安全制御機器としてバーナインターロックモジュール(RX-L)とバーナコントロールモジュール(RX-R)を開発した。RX シリーズは従来からの燃焼安全制御にもとづいた安全性確保と、省スペース/省配線のユーザの利便性向上、様々な設備へ柔軟に対応できる制御性、メンテナンス性の向上を製品コンセプトとして開発を行った。

本稿ではその設計及び背景となる燃焼安全について報告する。

We have developed a burner interlock module (RX-L) and a burner control module (RX-R) as combustion safety control devices for industrial combustion furnaces. The key concepts behind the development of the RX series are (1) ensuring safety based on conventional safety control, (2) improving user convenience through compact design and reduced wiring, (3) flexible controllability capable of accommodating various types of facilities, and (4) improvement of maintainability. This paper describes the design of the above-mentioned modules and the background concept of combustion safety.

1. はじめに

従来から山武では欧米の燃焼安全規格に準拠した燃焼安全技術を独自に確立して、製品開発・販売を行い社会に貢献してきた。これまで燃焼安全規格は海外(特にアメリカのUL規格、欧州のEN規格)で先行して規定されていたが、日本でも工業用燃焼炉の安全通則(JIS B 8415)が2008年11月に改正され、工業炉を設計・製造するメーカーや使用するユーザーはJIS規格に規定された設備のリスクアセスメントの実施など、従来設備からの安全見直しを行わねばならず、大きな負担となっている。

RX シリーズは、燃焼設備を改正JISに対応するための考慮があらかじめされている初めての燃焼安全コントローラである。さらに、従来製品では外付け部品やコントローラを外部計装することにより実現していた、マルチバーナや火災の個別監視計装なども標準機能としてサポートし、ユーザーの計装負担を軽減している。ユーザーはあらかじめ、作り込まれている安全機能を専用ソフトウェア(パソコンロード)から選択することで、該当する設備に要求される安全機能や制御仕様を実現

できる。

一方、内部設計では、マイコンを使用した安全設計・燃焼制御の技術を確立し、従来のアナログ回路安全設定・燃焼制御方式では実現できなかった、制御性/拡張性を向上させた。



図 1. RX シリーズ外観
左から RX-L バーナインターロックモジュール
RX-R, バーナコントロールモジュール×3台

2. 燃焼安全

2.1 概要

燃焼設備とは熱風・高温雰囲気を作り出す設備で、可燃性の燃料と点火源を持つことから、爆発のリスクを含む装置である。よって可能な限り爆発などの事故を防ぎ安全に運転するための制御装置が必要となる。RX シリーズなども含む広義の燃焼安全装置とはバーナなどの燃焼設備を安全に運転するために使用されている装置で、装置の目的は「爆発を防ぐこと」となる。

バーナ等、燃焼装置において爆発を防ぐためには爆発の3要素「燃料・空気・点火源」のうち少なくとも1つ以上を制御して、爆発が発生しない条件を作り出すことが肝心である。ただし、「空気」は地表上のどこにでも存在するため簡単に燃焼室内に侵入する。また、燃焼装置を運転している場合は常に炉内が加熱され赤熱しているため、「点火源」が存在することとなる。

したがって、爆発を防ぐ現実的な方法は「燃料」の制御ということになる。炉内に噴出した燃料はすべて燃焼させて、炉内に未燃燃料を蓄積させない。一方、炉内に噴出した燃料が燃焼されなかった場合、すなわち点火の失敗や、運転中に何らかの原因でバーナが断火してしまった場合は、燃料の供給を直ちに停止すればよい。

2.2 安全機能

山武の燃焼安全用コントローラはすべて上記の設計思想の元に開発されており、RX シリーズでもこれを踏襲している。燃焼安全用コントローラに必要な基本的な機能を以下にまとめる。

(1) 燃焼監視と安全遮断

炉内に未燃燃料を蓄積させないため、バーナが断火した場合に直ちに燃料を遮断する。この動作は火炎検出器、コントローラ、安全遮断弁を適切に組み合わせて使用することにより実現する。

(2) シーケンスによる燃焼装置の起動・運転・停止

コントローラはバーナを安全に起動→運転→停止するためのシーケンス（運転手順）を持つ。誰が操作しても、安全に起動・運転・停止できるように、コントローラのシーケンス及びタイマ時間は運転時に固定されており、安全を確保している。

(3) 安全起動

燃焼装置の起動時にコントローラは火炎検出器回路異常（疑似火炎信号の有無）がないか自己点検し、正常であれば起動し、もし何らかの異常があれば、起動を阻止する。この自己点検は燃焼装置の起動毎に行われ、1回/1日以上の起動/停止を繰り返すバッチ運転の燃焼装置に適用している。それに対し、24時間以上の連続運転（燃焼を止めない）の燃焼装置の場合は、連続自己点検（ダイナミック・セルフチェック）方式の機能のあるコントローラ、火炎検出器を使用する。

燃焼安全用コントローラの基本動作は安全確認形となっており、動作前あるいは動作中に安全であることを確認できる場合にのみ、点火動作や燃料供給を継続する。一旦、コントローラが安全確認できない状態になった場合は、安全機能に従い速やかに燃料遮断し燃焼器機を停止する。

2.3 RX の安全設計の特徴

従来の燃焼安全コントローラは安全機能を実現するため、ハードウェアを主体とした安全設計を行ってきた。ハードウェアを主体とした設計を行った場合、比較的単純な電子部品を使用して制御部を構成するため、FMEA (Failure mode and effects analysis)を実施することにより、構成部品が故障した際の安全動作への影響を検証でき、あらかじめ危険動作を除去できることがメリットであった。

一方、燃焼設備の多様化・多機能化にともない、今日の燃焼制御コントローラには、従来からの安全動作はもとより、あらゆる燃焼設備に対応するため拡張性の高さ、省スペース・省配線・通信機能などメンテナンス性向上などが求められるようになった。

このような新たな要求に対応するため、RX シリーズでは従来の電子部品ベースの設計ではなく、マイコンベースで設計を行った。

ただし、マイコンなどの複合電子デバイスは非常に多くの半導体素子から構成されているため、その故障モードを特定することが困難である。そのためFMEAなどの個々の部品故障から影響を検証することが困難である。つまり、故障時にどのように動作するかあらかじめ予測がつかないという問題がある。

そこで、RX シリーズではバーナ制御システムの欧州規格 EN298 や EN13611 のマイコン及びそのソフトウェアの障害対策に適合することと、独自のアーキテクチャを導入することにより、従来製品と同等の安全性を確保することとした。

なお、周辺回路については従来の部品故障解析を行い、部品故障時に不安全動作がないように設計を行った。

3. 設計

3.1 冗長化 CPU 設計

RX の制御部は独立して動作するマイコンの相互監視による冗長化 CPU 設計を用いている。これによりマイコン内部の故障、内部メモリの故障や演算実行部の故障を相互に検出できるようになり、安全確認しながらのコントローラの動作を行えるようになった。両コントローラは相互に状態を監視し、互いが正常であることを確認した場合のみ動作を継続する。

3.1.1 制御判定部

入力信号を受け、燃焼シーケンスを実行し、負荷を出

力するリレー駆動を行うのが制御判定部である。

制御部は完全に二重化している。単に二重化しているだけでなく、相互に制御データを交換し双方に矛盾が無いが常時監視している。

また、燃焼制御コントローラにとって重要なタイミング情報は、CPU間の比較及び専用クロック素子との比較も行い多重チェック構造として、正しさを保証している。

3.1.2 インターロック入力

インターロック入力は外部からの安全確認信号を入力する重要な機能である。インターロック入力回路においては、インターロック開放(安全確認信号が遮断)の場合に、制御判定部が停止を出力できないことが直接の危険動作である。よって入力回路の部品故障などがあった場合にも制御判定部で検出できるように、インターロック接点に電氣的なパルス信号を印加する入力回路を採用している。インターロック短絡状態で回路が正常に動作している場合、制御判定部のパルス信号出力に対して、入力も同じパルス信号である(図2)。

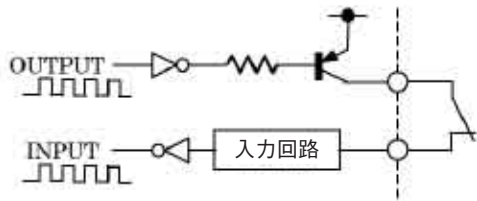


図2. インターロック入力正常時

入力インターロック開放や回路構成部品の故障(図3)などが発生した場合は、制御判定部に帰ってくる入力電気信号がHIレベルかLOレベルに固定されるため、パルス信号が途絶える。RXの制御判定部は規定のパルス信号がないことから、安全確認信号遮断(安全が確認できない)と判断して、機器を停止する。

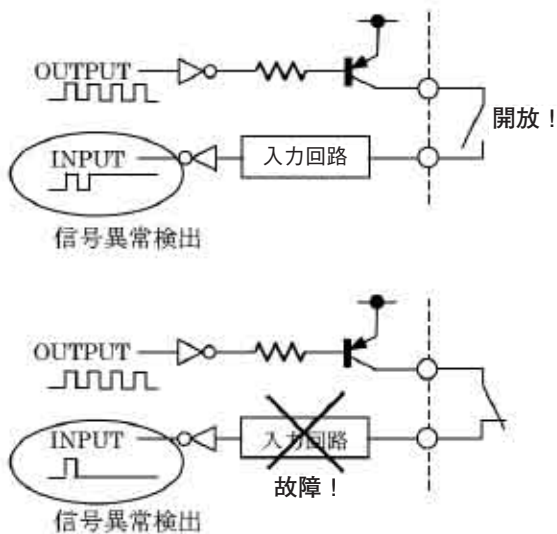


図3. インターロック入力異常

3.1.3 インターロック情報伝達

RXシリーズはRX-Lに入力されたインターロック情報を複数のRX-Rに伝達する。インターロック入力は重要な安全確認信号であり、伝達先のモジュールでもその情報の正確性とリアルタイム性が重要である。たとえば、インターロック開放(安全確認信号遮断)は速やかに各モジュールに送信され燃料供給を停止しなければならない(図4)。

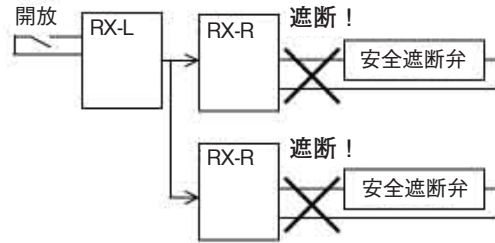
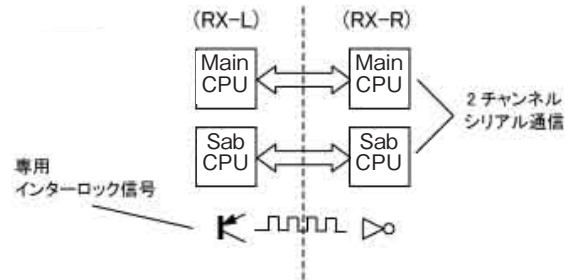


図4. インターロック開放から遮断

インターロック情報は各CPUをつなぐ2チャンネルの通信と専用のインターロック信号で構成している(図5)。

通信ではCRCコードによる誤り検出、シーケンスコードを用いた不正順序検出、時間内のデータ更新チェックなどにより通信の安全性を確保している。ただし通信リトライ、タイムアウトなど通信特有のタイムラグが発生するため、インターロック信号を設け遮断タイミングなどリアルタイム性を保証している。

正常時



異常時

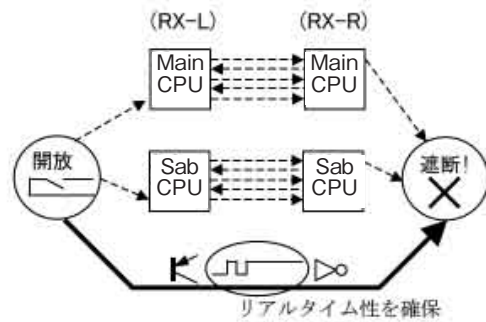


図5. インターロック情報伝達

3.2 燃焼関連の入出力

3.2.1 火炎検出部

火炎センサには AUD300(アドバンスド UV センサ)を用いることにより、火炎センサとシャッタ機構によるダイナミックチェック(火炎信号の常時監視)を行うことが可能である。通常、燃焼安全用コントローラはバーナ火炎検出中に燃料を供給し、火炎が遮断した場合燃料を遮断する。もし、火炎センサが火炎検知側で故障した場合には、バーナ断火してもコントローラは故障した火炎センサに従い火炎ありと判断して燃料供給を継続してしまうため大変危険である。

UV センサには火炎信号を検出し続ける故障モード(ON 故障)と、まったく火炎信号を検出しない故障モード(OFF故障)があるが、AUD300 と RX を組み合わせるとシャッタ機構を利用して、2つの故障モードを連続でチェックすることができる。

- ・火炎を検出した場合 → シャッタを閉じる
- ・火炎を検出できない場合 → シャッタを開く

ダイナミックチェック方式のサイクルを以下に示す(図6)。

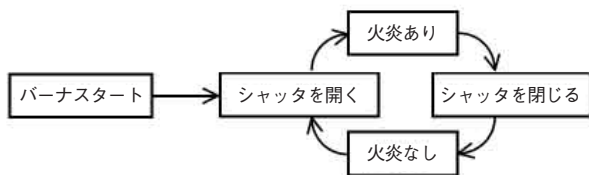


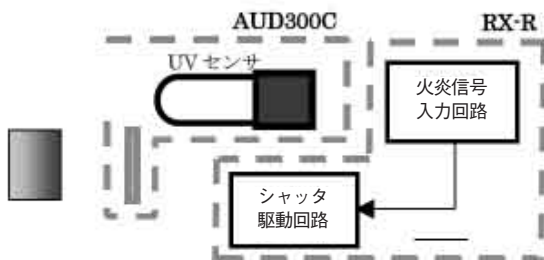
図6. ダイナミックチェックの仕組み

3.2.2 火炎検出判定

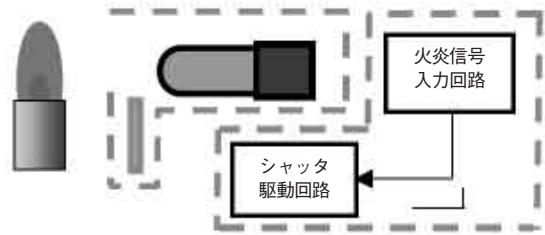
RX-R では上記ダイナミックチェック方式の周期的な動作を電気的なパルス信号に変換して制御判定部の二重化 CPU に入力し、火炎検出の判定を行う(図7)。

部品故障や火炎センサ故障でダイナミックチェックサイクルが途切れ、電気的に一方向に信号がはりつた場合でも、制御判定部で容易に故障検出することができる。また、バーナ断火時のフレームレスポンス(バーナ断火から安全遮断弁の通電遮断)は安全上特に重要なタイミングであるため、制御判定部のマイコン内部タイマだけでなく、電気回路によるアナログタイマの結果もマイコンへ取り込みタイマの多重化を構成している。

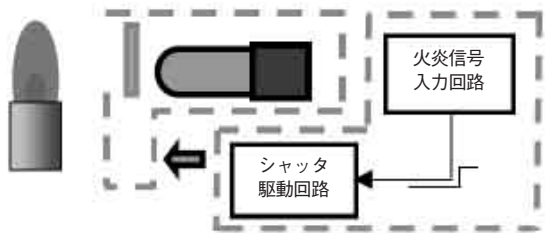
①火炎なし(シャッタ開)



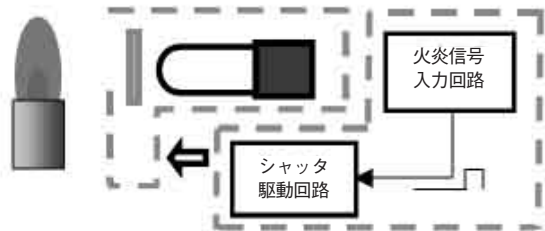
②着火から火炎センサが火炎検知



③シャッタを閉じる



④火炎センサが消炎検知



⑤シャッタを開く

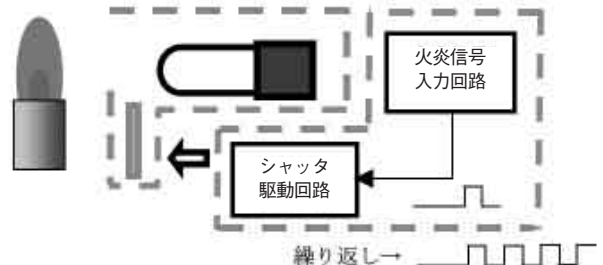


図7. 火炎検出動作

以下②~⑤の繰り返し、生成される電気信号が制御判定部に伝達され、火炎検知処理を行う。

3.2.3 リレー出力部

RX の安全機能は最終的に安全遮断弁を閉じる = 燃料供給を遮断することにより実施される。したがって RX に内蔵している負荷出力用リレー接点の溶着故障は、最も危険な故障の1つである。そのため RX-R では燃焼シーケンス動作開始前に安全遮断弁出力用リレー接点の開閉をチェックし、正常に負荷を ON/OFF できることを確認してから動作を開始するようになっている。

また、安全遮断弁の出力は両切り接点構成(リレー K1 と K2)として、単一のリレー接点故障では通電しない

構成としている。

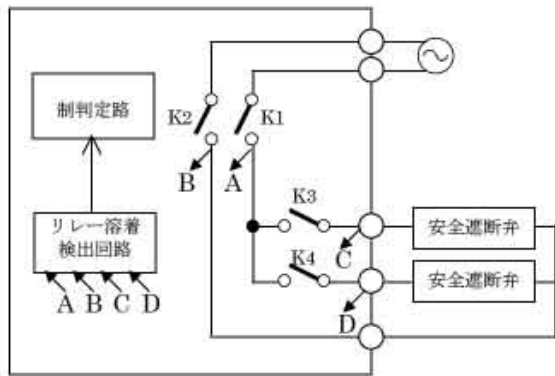


図8. リレー接点構成

たとえば、リレー K1 接点の溶着故障が発生した場合、RX の制御判定部は溶着検出信号 A を確認することにより K1 溶着と判定して K2, K3, K4 リレーを遮断することにより燃焼用負荷への電源供給を遮断する。

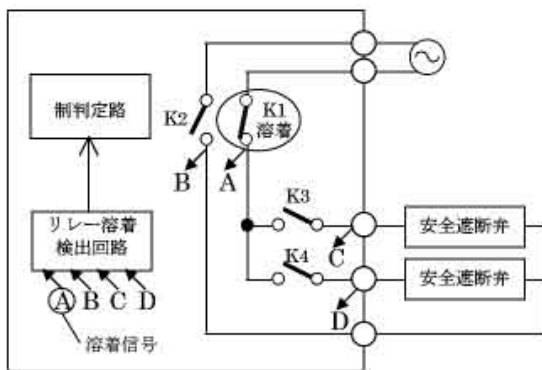


図9. リレー溶着時の検出

このように、RX では複数のリレーで安全遮断弁への通電を遮断できる接点構成をしており、かつ各リレー接点のフィードバック信号を監視しているため、意図しない安全遮断弁への通電(燃料供給)の危険は非常に小さい。

4. おわりに

本製品は山武の燃焼安全装置としてはじめての、マイコンベースのコントローラであり、従来どおりの安全設計を残しつつ、従来と比較して非常に多くの動作モードを持ち各種燃焼設備に柔軟に対応することができることが最大の特徴である。今後は UV 以外の火炎検出器対応など、RX シリーズをさらに発展させ、複雑化、高精度化する燃焼設備に安全かつ使いやすい製品を開発していきたい。

<参考文献>

- (1) 株式会社 山武 COMPO CLUB, 燃焼安全の基礎知識, <http://www.compoclub.com>
- (2) JIS B 8415 : 2008 工業用燃焼炉の安全通則
- (3) ダイナミックセルフチェックバーナコントローラの開発, Savemation Review (2005), 株式会社 山武

<著者所属>

熊澤 雄一 アドバンスオートメーションカンパニー
開発部開発 8 グループ

製造データの超効率的解析による 高収益生産への挑戦

Meeting the Challenge of High-Profit Production by Super-Efficient Manufacturing Data Analysis

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー

山縣 謙一
Kenichi Yamagata

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー

黒澤 敬
Takashi Kurosawa

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー

村上 英治
Eiji Murakami

キーワード

EES, FDC, EEQA/M, 統計処理, 切り出し, 代表値化, VM

半導体製造に代表される設備産業では、複雑なバッチ処理工程の組み合わせにより、製造ラインが構築される。さらに、市場の細やかなニーズに応えるために膨大な製造データ管理による品質改善が求められている。本稿では、独自のデータ解析手法を採用したプロセスデータ解析ツール Orchard Tequira™ による顧客品質向上へのアプローチについて述べ、膨大かつ複雑な挙動を持つデータの収集、データの容易な切り出し、特徴付け(代表値化)、統計処理、品質向上につながる管理状態の実現、これら一連の作業の一気通貫処理など要素技術の組み合わせにより構築したシステムによる課題解決方法について論ずる。

In industrial facilities, especially those for semiconductor manufacturing, production lines are constructed by combining complicated batch processes. In addition, quality improvements in order to meet the fine points of market needs require the management of enormous amounts of manufacturing data. This paper describes our approach to the improvement of product quality by making use of Orchard Tequira™, which adopts a unique data analysis method. This paper also discusses a solution method using a system that is established by combining elemental technologies such as the collection of huge amounts of complexly changing data, easy data extraction, characterization (calculation of representative values), statistical processing, actualization of controlled states that leads to quality improvement, and uninterrupted sequential execution of such processes.

1. はじめに

最先端の半導体製造プロセスでは歩留まりの改善と装置稼働率の向上が大きな課題となっている。諸問題の解決手段としてEES (Equipment Engineering System : 装置エンジニアリングシステム) が存在する。EESにより装置の稼働率改善につながる装置特性が可視化される。

山武では、独自のデータ解析手法を採用したEESである、Orchard Tequiraを開発し顧客の製品品質向上へ向けたソリューションを展開し、国内の最先端半導体製造プロセスの諸問題解決を支援している。

本論文の構成は、次のとおりである。第2章に現在抱えている製造データ管理・分析における諸問題について論じる。第3章にこれら諸問題を解決する手段として当社が開発したEESを紹介する。第4章にまとめと今後の予定を述べる。

2. 製造データ管理・分析における諸問題

最先端の半導体市場は実質的なビット単価ベースでは年率10%という非常に高いレベルのコスト低減を定常的に求められている特殊な市場であり、その実現のために半導体製造業各社は技術革新にしのぎを削っている。その市場における競争の典型は、ムーアの法則、

あるいは、More Than ムーア(図1)で推し進められている半導体素子の微細化であり、そのトレンドから外れないように市場にデバイスを供給し続けることが必要である。

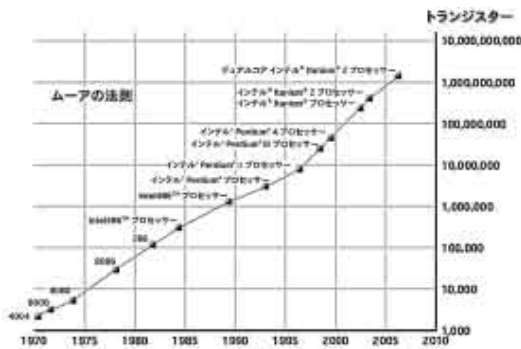


図1. ムーアの法則

(<http://www.intel.com/jp/technology/mooreslaw/> より引用)

半導体製造工程は、いわゆる設備産業の集合体であり、半導体製造装置が、各製造工程における品質のバラつきそのものを握っているといえる。

近年、バラつきのない製造装置で均一の処理を施すことにより品質のバラつきを最小にすることができるという思想に基づき、半導体製造装置が装置を稼働させる際に制御しているパラメータや、処理中にモニタできるセンサからの信号を1秒間隔あるいは数ミリ秒間隔という短周期で記録し、装置そのものの異常を検知したり、装置で加工される半導体の歩留まりに影響を及ぼす情報を検知したりする取組みが一般的に行われるようになってきた。このデータ収集システムはEquipment Engineering System(EES)と呼ばれ必要な仕様等も SEMI あるいは Selete といった団体から半導体装置メーカーに対する要求事項として提唱されるようになった⁽¹⁾。

EES の活用の方向性としては、Fault Detection and Classification(FDC)と呼ばれ、主には半導体メーカーが製造工程の監視手法として用いるケースがある⁽²⁾。

また、半導体装置メーカーと半導体メーカーとの間で半導体製造装置の品質を保証するための手段としてEESを活用する取り組みはEEQA(Enhanced Equipment Quality Assurance)と呼ばれる⁽³⁾。

EES は、1つ1つの半導体製造装置が巨大なシステムであることから、そのデータの質と量(パラメータ数)がまず問題になる。従来は1つの工程である処理を施したときの処理条件の値として、1回の処理中の値を平均して1つの値に丸め記録していたため、パラメータ数が数百あったとしても、データの数として1回の処理当たり数百の値が記録されているだけであった。これに対し、EESは時系列のプロセスデータを短周期で連続的に取得するようになり、半導体製造工程におけるプロセスデータの量は従来に比べ桁違いに膨大になった。

またデータの質に関してみても、従来は、工程に問

題がありそうなときに振り返って、データを確認するために保存する程度だったのに対し、問題を検知したら、装置の稼働率に影響する「着工停止」シグナルとして使われる On-Line FDC 等に活用するようになったため、要求されるデータの信頼性とその活用方法の種類も増大した⁽⁴⁾。

「FDC 等を行うために EES データをどう取り扱えば良いか」という視点に立って実際に取得した EES データを見てみると、また、別の問題に直面する⁽⁵⁾。

即ち、より細かく装置の機器を監視し、デバイスに対する影響まで検知できるようにするために、バッチ生産方式が主で、設定されたレシピに従って変化するパラメータを監視する。従来どおりの幅の広いエラー・バンド管理では無理で、目標値に対して追従しているかどうかの厳密な管理が必要になる。レシピで目標値が変わってもその変わった目標値に対する追従性等をきめ細かに制御する必要がある。

それを実現するには多種多様な着眼点に基づいたパラメータを抽出できる(切り出す)ことが EES ツールに求められている。

図2に示す様に、1回の単純なバッチ処理から取得したデータを監視するためにも、立上り/下がりや追従性に着目した6項目程度の着眼点が指摘されている。

パラメータを切り出した後で特徴を表すために用いる代表値化に関しても、目的に応じて柔軟な対応が求められる。

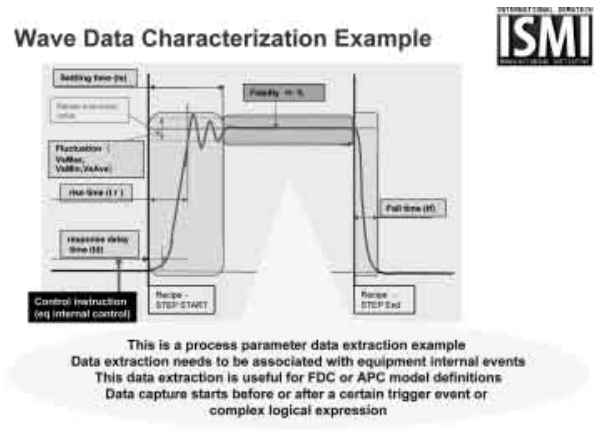


図2. バッチ処理データの監視例

(2009 12/1 ISMI Next Generation Factory e-Manufacturing ワークショップより引用)

さらには、装置は生き物のように正常でもドリフトするケースを想定しておく必要があり、いったん作ったFD(Fault Detection)モデルを臨機応変にリモデルすることにより、より厳密な管理を実現するという視点も外せない。

そして、現状では正確な物理モデルが作りにくい部類にある多くの半導体製造工程の管理指標は少なくとも統計的に裏づけられたものでなければならない。

以下に列挙すると

1. EES は、1 製造装置あたり数百、場合によっては 1000 を超えるパラメータのデータを高品位に 1 秒以下の粒度で管理できなければならない。
2. EES データには、温度、圧力、流量といったプロセスパラメータだけでなく、バルブの開閉、ロボットの動きを示すシーケンス情報、さらには装置のメンテナンスの情報等多岐に渡る情報が含まれる。
3. EES データに要求される時系列的な粒度は多岐に渡る特徴から、数ミリ秒レベルまで細かいものも含まれる。
4. データの切り出し～代表値化が簡単にできる必要がある。
5. 代表値化後のデータの統計的分析を容易に行い、見直し～再検討のサイクルを効率的に行えなければならない。
6. 取得したデータはロットや時期等多様な切り口でまとめて任意に比較解析ができなければならない。
7. FDC (Fault Detection and Classification) を実現するためには、EES データ単独ではなく、工程で処理した結果等、他の検査装置やシステムからの情報を適宜加味して解析できる柔軟性が必要である。
8. 解析結果をスムーズに活用できなければならない。

なお、山武は、Savemation Review 2005 年 8 月号記載の活動を継続して半導体メーカーと行っている⁽²⁾。さらには半導体メーカー、半導体装置メーカーと連携した共同研究等を多数行っており、市場におけるニーズについては常に余すことなく把握した活動を継続している^{(6),(7),(8)}。

3. Orchard Tequira

3.1 Orchard Tequira の構成

Orchard Tequira の標準的構成を図 3 に示す。Orchard Tequira は大きく 2 つのサブシステムから構成されている。Modeler はユーザーインターフェースを備え、データを可視化したり、解析を行ったりして、管理モデルを作成する機能を持つ。Executor は、Modeler で作成した管理モデルを自動的に実行して、プロセスの管理を行うサブシステムである。

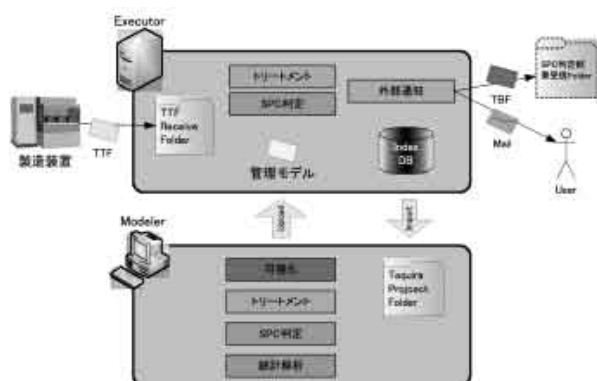


図 3. Orchard Tequira の構成

3.2 大規模データへの対応

前節で述べたとおり、センサから定周期で取得される装置の稼働情報は非常に膨大であり、また、製造装置ごとに計測すべき項目が異なることが普通である。

このように膨大かつ、計測項目が装置ごとに異なるようなデータを、従来のリレーショナルデータベース (以下 RDB とする) を使用して安価に管理することは困難である。

前述したような装置の稼働情報の解析においては、対象とするウエハに対する処理の記録が重要となる場合が多い。

そこで、Orchard Tequira では、図 4 に示すように、RDB をデータのインデックスとして利用し、データについては、解析を行う際に意味のある単位のファイル (Tequira Binary File) として管理するアーキテクチャを採用する。このようにデータを管理することで、過大なデータを DB に蓄積することなく、解析を行うのに都合のよい形で保存することができる。

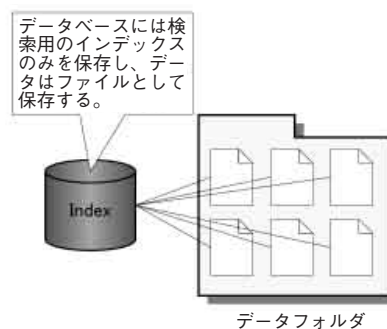


図 4. Orchard Tequira のデータ管理方法

3.3 Modeler

本節では、Orchard Tequira のなかで、ユーザーが直接操作するアプリケーションとなる Modeler の主な機能を紹介します。

3.3.1 データの可視化・解析

取得された製造情報や代表値を結果ビューの画面で表示できる (図 5)。

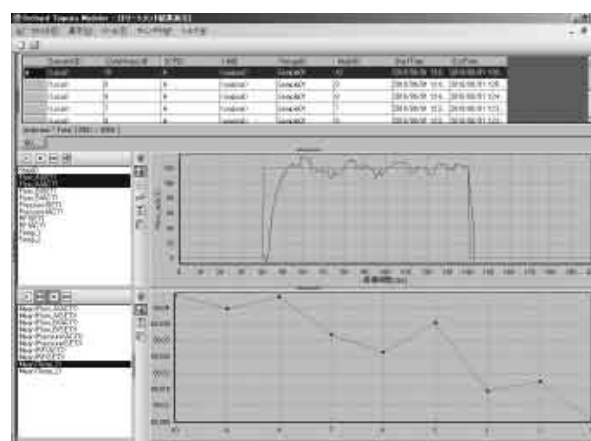


図 5. 結果ビュー

結果ビューでは、装置から取得された製造情報や、Executorによって計算された代表値を、ユーザーと対話的に確認することができる。これにより、装置の動作の確認や、異常な処理が行われたウエハを特定したりする操作を素早く行うことができる。

また、Orchard Tequiraの統計解析機能を利用すると、「代表値間の挙動の関係」や「代表値を説明変数、製品品質を目的変数とする重回帰分析」などを簡単に実行でき、装置挙動の統計的性質や、品質情報を対象とするVirtual Meteorology (VM)を簡単に構築することができる。使用できる統計解析手法は、基本統計量、相関係数、主成分分析、重回帰分析等、一般に良く使われる手法である(図6は相関係数機能の対散布図の例)。

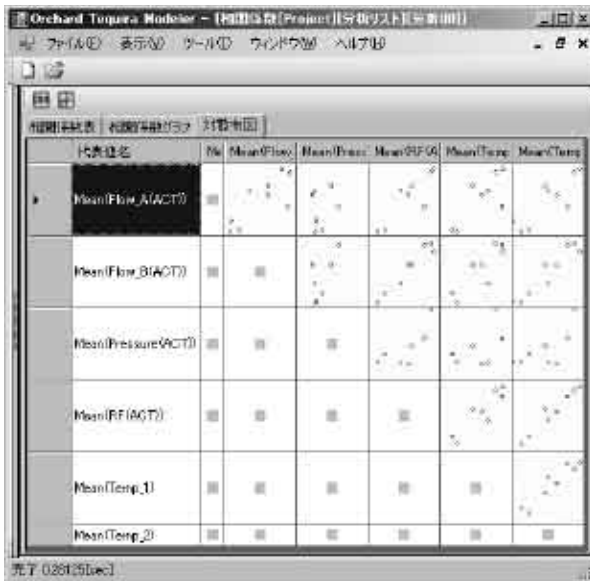


図6. 対散布図の例

3.3.2 代表値化

Orchard Tequiraでは、図2の例のように製造情報から代表値をプログラムを記述することなしに簡単に作成することができる。また、3.3.1で説明したように、もともとなる製造情報や計算された代表値を対話的に表示できるため、代表値の算出アルゴリズムの微調整などを直感的に行える。

図7に代表値算出設定の例を示す。これは、図2で示した、動特性から特徴量を算出する場合の設定例である。

この設定では、Delay, Raise, Setting, Unstable, Stableの各区間の定義と、それらの時間、Unstableにおいては、Flow_A(Act)の最大値、最小値、平均値、Stableにおいては、Flow_A(Act)の標準偏差を計算するような設定となっている。



図7. 代表値算出設定の例

3.3.3 SPC 管理

Orchard Tequiraでは、計算された代表値をもとにして、製造品質の管理を行うための機能として、SPC (Statistical Process Control) 管理機能がある。SPC管理機能では、算出された各代表値に対して、3レベルでのバンド管理及び、WECOルールによる傾向管理を行うことができる(図8)。

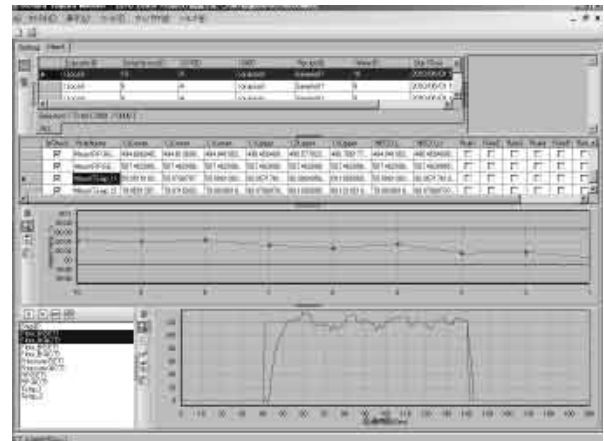


図8. SPC 判定画面の例

3.4 Executor

ExecutorはModelerで作成した管理モデルを使用して、製造プロセスを監視するサブシステムである。装置から取得された製造情報をもとに代表値を計算し、各代表値のSPC判定方法を自動的に実行して、製造プロセスが正常に動作していることを監視し、異常発見時に装置に対して対処することができる。

4. おわりに

Orchard Tequira のデータの可視化機能と代表値化機能を利用することで、膨大な装置の稼働情報を、装置管理のキーとなる挙動に合わせた代表値に集約し、プロセスや、装置の挙動・故障の管理を効率的に行ったり、ソフトセンサを簡単に構築したりすることができる。将来は、製造データをリアルタイムに代表値化し監視することで、プロセスを高品位化することを目指す。

<参考文献>

- (1) 装置エンジニアリング・システム ユーザシステム 要求仕様書(2003), pp.120-151, 株式会社半導体先端テクノロジーズ SEMI 規格
- (2) 鹿島 亨他: 半導体市場向け, 歩留まり向上 FDC システム, Savemation Review(2005), pp.76-83, 株式会社 山武
- (3) 装置導入時の品質保証高度化要求 (装置 QA の高度化 (社)電子情報技術産業協会(2004), 株式会社半導体先端テクノロジーズ (Selete)
- (4) 装置データを使う業務の効率向上に関する検討 (2009), 株式会社半導体先端テクノロジーズ (Selete)
- (5) The Enhanced Equipment Quality Assurance (EEQA) Methodology, Semicon Japan 2009 e-Manufacturing Workshop(2009)
- (6) Katsuhisa Sakai et al: The way to improve the effectiveness of a comprehensive FD system , AEC/APC Symposium Asia 2009
- (7) Toru Kashima: Anomaly Detection Using Average Normal Profile of Time-Series Process Data, AEC/APC Symposium Asia 2009
- (8) Katsuhisa Sakai et al: Comprehensive plug and play FD system realized Predictive Maintenance, ISSM 2008

<商標>

ORCHARD は、株式会社 山武の商標です。
Tequira は、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

- 山縣 謙一 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1グループ
- 黒澤 敬 アドバンスオートメーションカンパニー
営業本部営業技術部
アプリケーショングループ
- 村上 英治 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1グループ

蒸気弁の差圧比係数の検討及び バルブ選定用ソフトウェアの開発

Study of Pressure Differential Ratio Factor of a Steam Control Valve, and Development of Valve Selection Software

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

野間口 謙雄
Yoshio Nomaguchi

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

佐藤 慶大
Keita Satou

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

新谷 知紀
Tomonori Shintani

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

加藤 瑞樹
Mizuki Katou

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

大矢 公紀
Cokey Oya

キーワード

調節弁, サイジング, 差圧比係数, 圧縮性流体, バルブ選定用ソフトウェア (AVALS)

蒸気などの圧縮性流体を扱う調節弁のサイジングを精度良く行うためには弁固有の差圧比係数が必要であり、サイジング計算も煩雑となる。差圧比係数を求めるためには、空気を高差圧で大量に流せる試験設備が必要となる。そこで今回、数値流体解析を用いて差圧比係数を求め、そのうち小口径バルブについては社内実験室に実流量試験設備を設置して試験を行い、値の確からしさを確認した。また、この差圧比係数を用いて精度の高いサイジング計算ができるソフトウェアを開発したので、その内容について報告する。

For high-precision sizing of a control valve for compressible fluid such as steam, a valve-specific differential pressure ratio factor is necessary and sizing calculations become complex. Test facilities capable of flowing a large amount of air with a high pressure difference are also needed to calculate differential pressure ratio factors. We calculated differential pressure ratio factors using computational fluid dynamics, and verified the accuracy of such factors for small-bore valves using test facilities for actual flow rate measurements which we have newly installed in our on-site laboratory. We also developed software that enables high-precision sizing calculation using the differential pressure ratio factor. This paper describes the study and development mentioned above.

1. はじめに

調節弁とは、流体(水や蒸気など)の流量を連続的に変更(制御)するための機器である。

空調制御において、調節弁は空調機の制御や熱源系の制御に多く用いられ、重要な位置を占めている。したがって、計装・制御機器の特性・環境条件や流量、圧力条件を考慮した最適な調節弁を選定することが非常に重要である。必要な弁容量よりも小さな調節弁を使用した場合には流量不足が発生し、また、過大な弁容量の調節弁を使用した場合にはハンチングを起こすなど、制御性の悪化を招くことになる。使用時の流量、圧力などの条件から最適な弁容量の調節弁を選定する必要がある。

これまで蒸気などの圧縮性流体における調節弁のサ

イジング式は、FCI (Fluid Controls Institute Inc.)⁽¹⁾によるものとIEC⁽²⁾(IEC 60534-2-1)又はANSI/ISA⁽³⁾により規格化されたものが存在したが、JIS B 2005-2-1 (2005)⁽⁴⁾では、IECにより規格化された精度の高いサイジング式が定義された。このIEC式では弁固有の差圧比係数を用いることによりサイジングを行う。

本稿では、CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体解析)と実流試験により蒸気弁の差圧比係数を求めた結果について報告するとともに、IECのサイジングを容易に行うことができるバルブ選定用ソフトウェアを開発したので、その内容について報告する。

2. 圧縮性流体のサイジング式

圧縮性流体のサイジングでは、(1)、(2)式により C_v 値を計算する^{(2)、(4)}。

$x < F_\gamma x_T$ のとき

$$C_v = \frac{W}{2.73 \times \left(1 - \frac{x}{3F_\gamma x_T}\right) \sqrt{x \times p_1 \times \rho_1}} \quad (1)$$

$x > F_\gamma x_T$ のとき

$$C_v = \frac{W}{2.73 \times 0.667 \sqrt{F_\gamma x_T \times p_1 \times \rho_1}} \quad (2)$$

ただし、 W : 質量流量 [kg/h]

x : 差圧比 $= \Delta p / p_1$

Δp : 弁前後差圧 [kPa]

p_1 : 弁1次側絶対圧力 [kPa]

F_γ : 比熱比係数

$F_\gamma = \gamma / 1.40$, γ : 流体の比熱比

空気では、 $F_\gamma = 1$

x_T : 差圧比係数

ρ_1 : p_1 における流体の密度 [kg/m³]

弁の1次側圧力を一定に保ちながら2次側圧力を徐々に下げていくと、差圧比 x がある限界値で弁内の最縮流部で流れが音速に達し、さらに下流側圧力を下げても質量流量が増加しない閉そく流（チョークフロー）となる（図1）。この非閉そく流から閉そく流になる限界の差圧比は弁の形状によって異なる弁固有の係数である差圧比係数 x_T と比熱比係数 F_γ の積で表される。

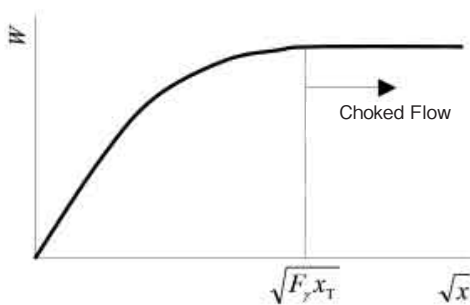


図1. \sqrt{x} と質量流量 W の関係 ($p_1 = \text{一定}$)

比熱比係数は比熱比 1.40 である空気を基準にした係数である x_T を補正するための係数である。(1)、(2)式で C_v 値を精度良く求めるためには、弁固有の係数である x_T を精度良く求めることが重要となる。

3. 差圧比係数の検討

3.1 CFD による差圧比係数の検討

差圧比係数 x_T を実験で求めるには、ある程度高い上流側圧力の空気を、供試弁に対して高い弁前後差圧で流す必要があり、その装置は大掛かりなものとなる⁽⁵⁾。そこでまず最初に、CFD により x_T を求めた。

使用した解析モデルを図2に、解析条件を表1に示す。解析モデルは上流側に長さ $2d$ (d : 配管呼び径) の配管、下流側に長さ $6d$ の配管を取り付けたモデルとした。境界条件として1次側圧力 p_1 と2次側圧力 p_2 を与え、計算で求めた1次側境界断面における平均流速と平均密度と境界断面積を用いて求めた体積流量 (normal: 0°C - 1気圧) Q [m³/h] を求めた。

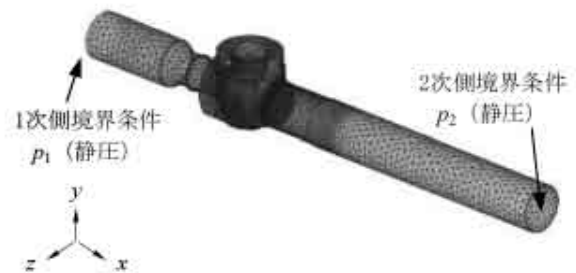


図2. 解析モデル

表1. 解析条件

ソフトウェア	SCRUYU/Tetra V7 (株式会社ソフトウェア クレイドル)
計算格子	非構造格子
解析方法	有限体積法, 定常解析
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
流体	空気
基準温度	293.15 [K]
1次側境界条件 p_1	300 [kPa]

アクティブル™ 電動二方弁の25A (定格 C_v10) について計算した結果を以下に示す。

YC を(3)式で求める。

$$YC = \frac{Q}{21.2 p_1} \sqrt{\frac{MT_1 Z}{x}} \quad (3)$$

ただし、 Y : 膨張係数

$$Y = 1 - \frac{x}{3F_\gamma x_T} \quad (4)$$

C : 容量係数 (= C_v)

Q : 体積流量 (normal) [m³/h]

M : 流体のモル質量

空気では $M = 28.97$ [kg/kmol]

T_1 : 上流側流体温度 [K]

Z : 圧縮係数, 空気では $Z = 1$

差圧比 x に対する YC の計算値を求めたものを図3に示す。

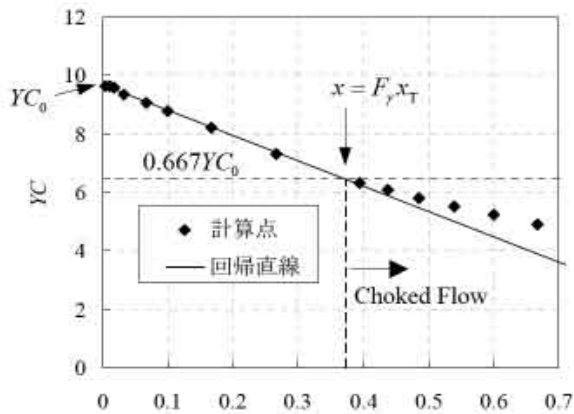


図3. x - YC の関係 (CFD による計算値)

計算で求めた YC - x の関係(計算点)から回帰直線をあてはめる。 YC_0 は $x = 0$ のときの YC であり、 $YC = 0.667YC_0$ となる $x = F_\gamma x_T$ から $x_T = 0.37$ が得られた。

また、 $x \approx F_\gamma x_T$ における弁内のマッハ数のコンター図を図4に示す。図4より、弁内絞り部での最大流速が音速に達し、チョークフローを起こしていることがわかる。

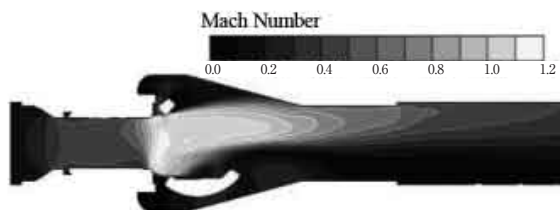


図4. $x \approx F_\gamma x_T$ における弁内のマッハ数コンター図

3.2 差圧比係数の実流試験による確認

実流試験の概要を図5～7に示す。



図6. 試験設備 (エアタンク)

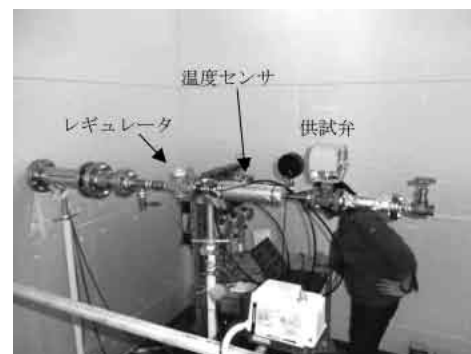


図7. 試験設備 (供試弁まわり)

エアタンクに工場空気 (最大 0.6 [MPa]) を貯めたあと、上流側の手動弁を開放し、所定の p_1 , Δp ($=p_1 - p_2$) になるようにレギュレータと2次調節弁を調整し、その時の圧力、流体温度、流量を連続して計測した。また、圧力は JIS B 2005-2-3⁶⁾ で規程する位置にて計測した。

CFD と同様、アクティブ電動二方弁の 25A (定格 $Cv10$) について、(3)式により YC を求め、差圧比 x に対する YC の関係を求めたものを図8に示す。

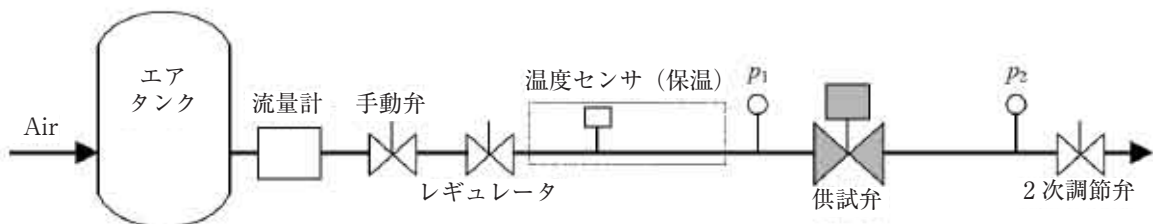


図5. 実流試験装置の概要

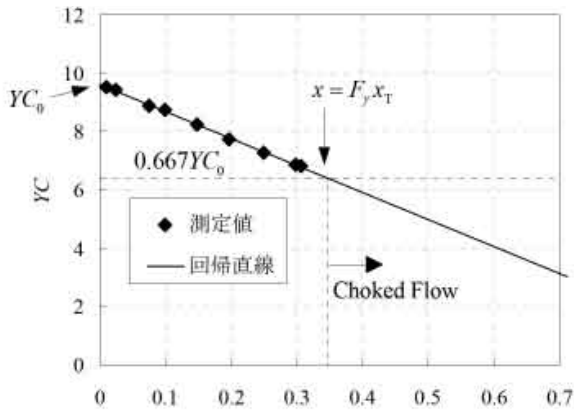


図 8. x - YC の関係 (実流試験結果)

図 8 より, $x_T = 0.35$ が得られた。

3.3 差圧比係数の検討結果まとめ

蒸気用途の調節弁であるアクティブル電動二方弁 (形 VY51) の差圧比係数 x_T 値の一覧を表 2 に示す。40A (定格 $Cv25$) 以下において, 差圧比係数 x_T 値の実流試験結果は CFD による計算値と良く一致することがわかった。15A ~ 80A まで弁内構造は類似形状であることから, 設備の能力上, 実流試験が困難な 40A (定格 $Cv40$) 以上の口径については CFD により x_T 値を決定した。

表 2. 形 VY51 の差圧比係数 x_T 値の一覧

口径	定格 Cv	差圧比係数 x_T	
		CFD 結果	実流試験結果
15A	1	0.62	0.61
	1.6	0.53	0.50
	2.5	0.46	0.42
	4	0.42	0.43
	6	0.42	0.40
25A	10	0.37	0.35
	16	0.33	0.29
40A	25	0.38	0.38
	40	0.29	-
50A	65	0.25	-
65A	95	0.31	-
80A	125	0.34	-

4. バルブ選定用ソフトウェア (AVALS™) の開発

4.1 ソフトウェアのコンセプト

バルブ選定用ソフトウェア (AVALS) は, 自動制御を円滑に行うために, 空調機の制御や熱源系の制御などの計装アプリケーションに最適な調節弁を選定する機能を提供する。

ソフトウェアのコンセプトをまとめると以下の通りである。

- ① 製品の特性・環境条件に応じた最適な調節弁の形番を検索することが可能。
- ② 操作が簡単で形番検索時間を大幅に削減。
- ③ 選択された形番のアクチュエータ, バルブの主な仕様, オプションの確認が可能。
- ④ 仕様取扱説明書にリンクしているので, スピーディーに詳細な仕様確認を実現。
- ⑤ 計算が複雑な蒸気弁のサイジング (Cv 計算) が可能。



図 9. バルブ選定用ソフトウェア画面例

4.2 調節弁選定の流れ

調節弁の選定は, 一般に以下のような手順で行う。

第 1 に, 調節弁の形式を決定する。

調節弁には, 大型のもの, 高差圧に耐えられるもの, リーク量が少ないもの, フェールセーフ機能を有するものなど, 多くの形式のものがある。

調節弁の形式を決定するためには, 適用する計装アプリケーションの目的にあった形式の調節弁を選定する必要がある。

バルブ選定用ソフトウェアでは, 適用する計装アプリケーションを選択する機能を有しており, 計装アプリケーションを選択することで目的にあった形式の調節弁に絞り込むことができる。図 10 に計装アプリケーションの選択画面を示す。



図 10. 計装アプリケーション選択例

第 2 に, 調節弁のサイズを選定する。

バルブ選定用ソフトウェアでは, 流体条件 (水/蒸気, 流量, 差圧など) を入力することにより最適な大きさの調節弁を選定することができる。

第3に、選定した調節弁に関して、耐圧・クローズオフレイティングなどのチェックを行う。

調節弁の1次側にかかる圧力によって、調節弁の圧力定格を選定する必要がある。

バルブ選定用ソフトウェアでは、調節弁の仕様の入力に耐圧を選択する項目を用意しており、圧力条件に合った調節弁を選定することができる。



図 11. 調節弁の仕様入力項目

また、調節弁の一次圧が低く、差圧が大きい場合は、キャビテーションエロージョンの発生が懸念される。キャビテーションの発生状態は(5)式に示す JIS B 2005-8-2 (IEC 60534-8-2⁽⁸⁾)で規定されている圧力比 x_F で表すことができるため、(5)式を用いて圧力条件を確認し、選定した調節弁の採用の可否を判断できる機能も用意している。

$$x_F = \frac{\Delta p}{p_1 - p_v} \quad (5)$$

ただし、 Δp : 弁前後差圧 [kPa]

p_1 : 弁1次側側絶対圧力 [kPa]

p_v : 流体の飽和蒸気圧 (絶対圧) [kPa]

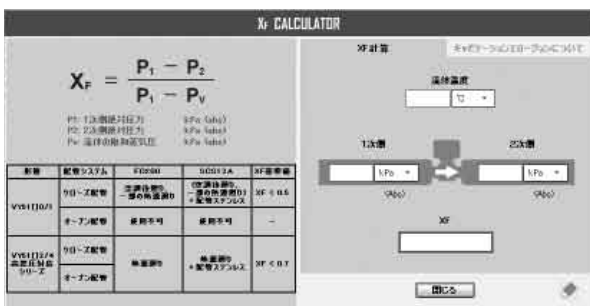


図 12. 圧力比 x_F の確認

4.3 Cv 値計算 (水/蒸気)

調節弁の容量は一般に Cv 値で表され、形番(接続口径、定格 Cv 値)を決めるには与えられた流体条件から必要 Cv 値を計算して選ぶことになる。

(1) 通過する流体が水の場合

水の Cv 計算式を(6)式に示す。

$$C_v = \frac{0.7 \times Q}{\sqrt{\Delta p}} \quad (6)$$

ただし、 Q : 体積流量 [L/min]

Δp : 弁前後差圧 [kPa]

水の Cv 値計算画面を図 13 に示す。流量、差圧を入力して水の Cv 値計算を行う。空調機や熱交換器などのコイル廻りであれば、熱量、温度差から(7)式により流量に自動的に換算して、Cv 値を算出する。

$$Q = \frac{60000 \times P}{\rho \times c \times \Delta T} \quad (7)$$

ただし、 Q : 体積流量 [L/min]

P : 熱量 [W]

ρ : 水の密度 [kg/m³]

c : 水の比熱 [J/kg·K]

ΔT : 温度差 [K]

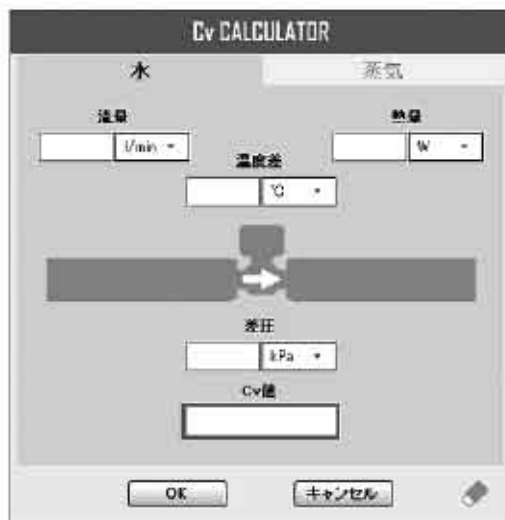


図 13. Cv 値計算画面例 (水の場合)

(2) 通過する流体が蒸気の場合

(1)、(2)式で示した蒸気の Cv 値計算式は、計算をする前に調節弁固有の値である x_T 値を定義しなければならない。そのため、計算する前に流体条件や配管サイズから弁サイズ、定格 Cv 値を想定する必要があるが、これは非常に困難である。ある定格 Cv 値の調節弁の x_T 値を想定し Cv 計算を行ったあと、Cv 値が大きすぎる又は不足した場合には、その前後の定格 Cv 値の調節弁の x_T 値を用いて繰り返し Cv 計算を行う必要があるため非効率である。

バルブ選定用ソフトウェアでは、図 14 に示すとおり流体条件である流量、1次側絶対圧力、2次側絶対圧力を入力するだけで x_T 値を意識せずに複雑な蒸気の Cv 値計算を効率的に行うことができる。

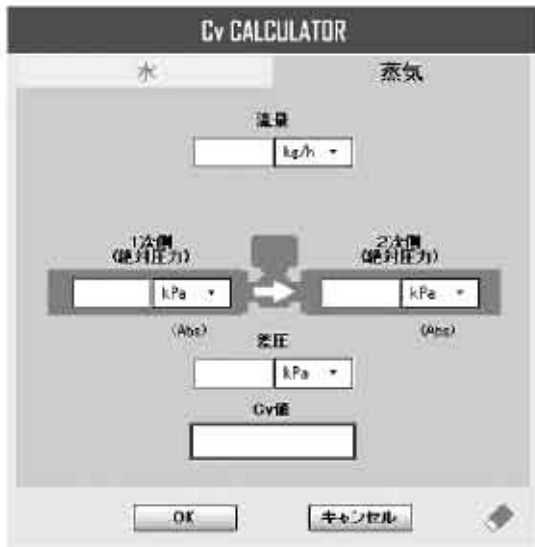


図 14. Cv 値計算画面例 (蒸気の場合)

5. おわりに

(1) 差圧比係数について、CFD と実流試験の結果が良く一致することがわかった。その結果、実流試験が困難な口径の調節弁においても、CFD により差圧比係数を求めることができた。

(2) バルブ選定用ソフトウェア(AVALS)により、使われる用途に応じて、難解な計算式を意識せずに、当社でラインナップしている調節弁の中から最適なものを選択することができる。

このため、設計や現場などで調節弁を選定する際の強力な味方になり、選定や仕様確認のための時間を大幅に削減する。

当社の調節弁を選定する際には、是非ともご活用いただきたい。

4.4 検索結果

図 15 に計装アプリケーション、アクチュエータ仕様及びバルブ仕様の各項目を入力し、検索した画面結果を示す。破線枠で囲った部分が調節弁の機種を絞り込んだ結果である。絞り込んだバルブ及びアクチュエータの詳細な仕様が表示される。グレー表示にて選択している形番を明示し、写真で製品イメージを表示する。

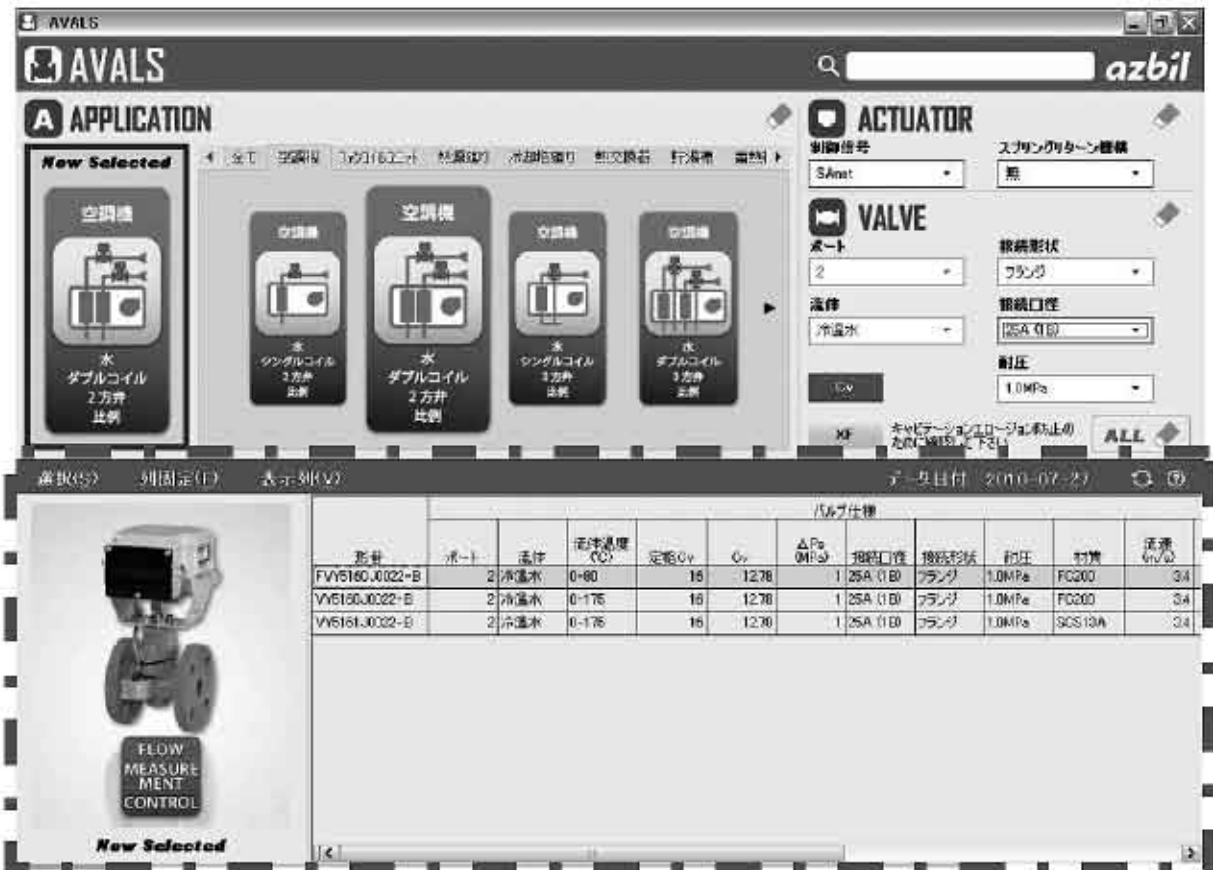


図 15. 検索結果画面例

<参考文献>

- (1) Fluid Controls Institute Inc. : Recommended voluntary standard formulas for sizing control valves, FCI 62-1(1962)
- (2) Industrial-process control valves – Part 2-1:Flow capacity – Sizing equations for fluid flow under installed conditions, IEC 60534-2-1(1998)
- (3) Flow Equations for Sizing Control Valves, ANSI/ISA-S75.01(1985)
- (4) 工業プロセス用調節弁 – 第2部：流れの容量 – 第1節：取付け状態における流れのサイジング式, JIS B 2005-2-1(2005)
- (5) 石塚：調節弁の流路形状と差圧比係数, Savemation Review(1983), Vol.1, No.2, pp.48-56, 株式会社 山武
- (6) 工業プロセス用調節弁 – 第2部：流れの容量 – 第3節：試験手順, JIS B 2005-2-3(2004)
- (7) 工業プロセス用調節弁 – 第8部：騒音 – 第2節：調節弁の液体流動騒音の実験室における測定, JIS B 2005-8-2(2008)
- (8) Industrial-process control valves – Part 8:Noise considerations – Section 2:Laboratory measurement of noise generated by hydrodynamic flow through control valves, IEC 60534-8-2(1991)

<商標>

SCRUYU/Tetra は、株式会社ソフトウェアアクレイドルの商標です。

AVALS は、株式会社 山武の商標です。

アクティバルは、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

野間口 謙雄	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
佐藤 慶大	ビルシステムカンパニー マーケティング本部 プロダクトマーケティング部
新谷 知紀	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
加藤 瑞樹	ビルシステムカンパニー マーケティング本部 国際マーケティング部
大矢 公紀	ビルシステムカンパニー マーケティング本部 国際マーケティング部

社内試作部門の工程管理システムの開発 — 見える化の促進とデータベースリンク —

Development of a Process Control System for a Trial Manufacturing Department

– Acceleration of Visualization and Data Utilization by Exchanging Databases Links –

株式会社 山武

福辺 卓史

Takashi Fukunabe

株式会社 山武

佐藤 一太郎

Ichitaro Satoh

キーワード

ラピッド試作, 見える化, データベース, QCD の向上

当社の開発試作部門では社内向けに試作品提供を行っている。その依頼方法として社内イントラネットに接続している PC からいつでも、どこでも、依頼ができ、依頼品の進捗確認ができるシステム「ラピッド e-システム」を構築した。このシステムの仕様は固定化されたものではなく、常に作業にあわせて変化していくものとしている。その概要について報告を行う。

Our development and trial manufacturing department provides a prototype production service within the company. Additionally, we have established “Rapid e-System,” a prototype production request system that enables our clients to make requests and monitor the progress of the requested prototype production from anywhere at any time through PCs which are connected to our Intranet. The specifications of this system are not fixed but designed to be always changeable according to actual operation. This paper gives an overview of the system.

1. はじめに

当社の開発試作部門では、図1に示したミッションに基づき商品開発のスピードアップに貢献すべく「ラピッド試作」と名付けた社内向けの試作サービスを行っている。その内容は機械加工にはじまり、組み付け、はんだ実装に至るまで広く行っている。この試作サービスは当初、紙で受付や費用処理を行っていた。そのため、依頼者は試作するたびに事務所へ行かなければならない状態であった。さらに、わざわざ他の事業所から依頼に来るケースまで存在した。また、試作をするたびに帳票を作成し、実績を集計システムに投入する作業を行っていた。工程設計は担当者の勘と経験に頼っていたため、作業者各人及び設備の負荷状況を把握できておらず、その結果として納期回答の返事は「できると思います、がんばります」など、あいまいな表現になっていた。そのような納期回答ではミッションである商品開発のスピードアップには貢献できない。

そこで我々は、スピードに着目した工程管理システム、「ラピッド e-システム」を開発したので紹介する。

Mission

商品開発における試作品の提供を顧客視点に立ったスピード感を持って行う事により、モノづくり力による製品創出「商品力」強化支援を行う。

【モノづくり力】

- 材料・加工・工法（試作～量産試作）に関する製品提供
- 治工具・金型に関する製品提供
- 設備設計・製作に関する製品提供

図1. 開発試作部門のミッション

2. システム導入前の課題

まず、システム導入前に改善のための業務分析を行った。そこで以下の問題が判明した。

- (1) 依頼した製作物の進捗状況が判らない
 - ① スケジュール
 - ② 進行状況など
- (2) 全体の実状(人, 設備)が見えず正確な計画が立てられない
 - ① 同じ日に処理できない負荷を計画してしまう
 - ② 優先順位を付けた計画が立てられない
 - ③ 計画が限られた人しかできない
- (3) タイムラグ
 - ① 依頼を紙で行っていたので、実際の計画への反映に時間がかかる

3. 開発コンセプト

開発にあたり、コンセプトを「web上でいつでも、どこでも、リアルタイムで依頼と進捗確認ができるシステム」とした。

- (1) スピードの実現
 - ① 依頼者(開発部門)の希望納期の実現
 - ② 試作部門に持ち込まれる特急依頼に柔軟に対応
- (2) 顔が見えるシステム
 - ① 誰が担当, 加工, 試作
 - ② 不明な点は直ぐ相談(誰からの依頼か?)
- (3) 過去のデータの有効活用
 - ① 製作手順
 - ② 段取り
 - ③ 加工条件
 - ④ 過去の失敗事例
- (4) 依頼者へのフィードバック
 - ① 試作時の作業のやり易さやコメントを設計者にフィードバック

4. システムの構築

一般にこのような業務に関するシステムは、業務を十分に分析してから構築されるものである。このようなシステムは業務を標準化してそれに沿ってシステムが作成される。一度標準化され、システム化された業務内容は逸脱が許されない。しかし、常に業務改善を行なっているため、システムもそれに従って追従させていく必要があった。

その要件を以下に記す。

- ① 依頼者の方と我々がイントラネットを通じて同じシステムを利用して受発注でき、お互いの情報をweb上でかつリアルタイムに見ることができるシステム
- ② ユーザーが自ら開発及びカスタマイズして使用できるシステム

- ③ 試作業務及び試作業務にかかわる業務を改善することが目的であるので、

- 1) 試作業務の運営管理
- 2) システムの構築
- 3) その時々にあわせて表示を変える

が同時に実施できるシステム

ハードウェアは、1台のサーバーマシンでwebサーバーとデータベースサーバーを共有する構成にしている。そのサーバーに各クライアントPCがアクセスする。システムのカスタマイズなどは権限を持ったユーザーがクライアントPCからシステムにログインして行うことでシステムの安全性を確保している。

5. システム詳細

図2はシステム全体の概念図である。

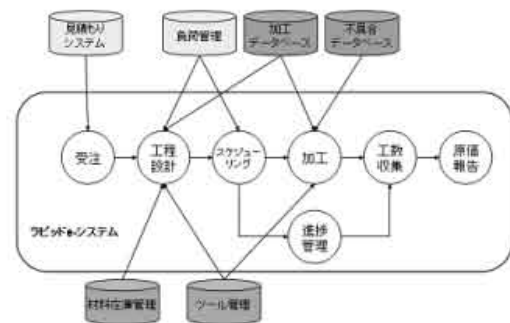


図2. システム全体図

5.1 ラピッド e-システム

まず基本システムである「ラピッド e-システム」について紹介する。

依頼者からの依頼登録、工程設計、工程進捗管理、工数集計など図2の枠で囲まれた機能を持っている。また、このシステムはメール発信機能もあり、依頼に対しての受注受付、製作完了時にメールがリアルタイムに発信されるので、依頼者が状況を知ることができる。図3はラピッド e-システムの依頼一覧を表示させた画面であり、進捗状況が優先的に表示されるようになっている。

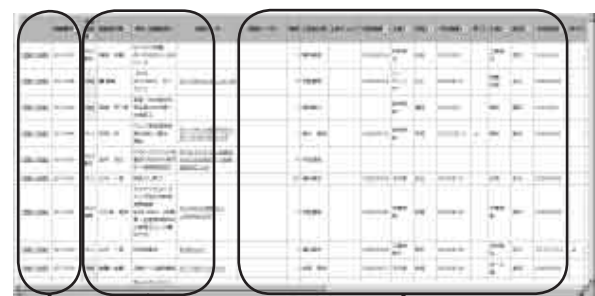


図3. ラピッド e-システムの画面イメージ

5.2 負荷管理システム

負荷管理システムは、

- 1: 誰が
- 2: いつ
- 3: どの依頼で
- 4: どの設備を使用するか

を“見える化”するためのシステムである。それにより人と機械の過負荷や重複を解消している。なお、負荷管理システムはスケジューラのように「何時から何時まではこの設備を使用する」といった管理はしていない。「この日に何時間この機械を使用して行う」といった管理である。生産部門ではなく試作部門であるために、依頼ごとに作業内容が異なる。優先順位も刻々と変化する。そのため、ある程度の作業予測は付くが、完全にスケジューリングすることはできない。

そこで導入したのが、「ゆるやかな管理」である。工程設計者と工程担当者が随時コミュニケーションを取り、作業と設備使用の優先度を決めている。この管理方法は再計画が容易でやりやすく、緊急対応が入ってきた場合に速やかに他の依頼の再計画を含めて対応ができる。図4が負荷管理システムの画面イメージである。

The screenshot shows a complex interface with multiple columns representing different equipment or processes and rows representing time slots. The data is organized into a grid, with various text entries indicating usage status and details for each cell.

図4. 負荷管理システムの画面イメージ

5.3 不具合防止データベース

試作の手戻りをなくしスピードアップに貢献するために、不具合防止データベースを構築した。

このシステムは、過去の失敗から学べるよう、「いつ、誰が、どの工程で、どの設備で、どの依頼で、どのような不具合を起こしたか」を記録するのにとどまらず、対処方法やその結果を記録している（図5）。

The screenshot shows a table with several columns. Three specific areas are highlighted with rounded rectangular callouts and labels below the table: '不具合品情報' (Defect Product Information) on the left, '原因・現象' (Cause/Phenomenon) in the middle, and '対策進捗状況' (Countermeasure Progress Status) on the right. The table contains detailed text entries for each row.

図5. 不具合防止データベース画面イメージ

不具合対策システムを活用した品質向上アクションのフローを以下に記す。

1. 不具合が発生し、発生担当者が本システムに内容を登録する。
2. 内容をみて品質担当者が緊急度を設定する。
3. 発生担当者が対処法を記載し、対策案の納期を品質担当者が設定する。
4. 発生担当者が対策案を記入し、品質会議にて内容が討議される。
5. 品質会議にて対策案承認後、全員に連絡。対策喚起の掲示物などが行われる。

また、本システムはラピッドe-システムとリンクしており、ラピッドe-システムに登録されている情報を自動的に読み込み、データとして蓄積していく。作業や工程設計者は、困ったときに、データベースを検索することで、過去の事例を参照し、判断の参考とすることができる。

5.4 ツール管理システム

ツール管理システムは先述の課題としてあげられていないが、試作品提供のスピードアップを目的に作ったシステムであり、探すムダ、在庫のムダを減らすことができるものである。

当社の試作部門では、工具も“見える化”するために工具（刃具）を共用化してきた。

しかし「何がどれだけあるか」が把握できていたために、この依頼品加工に必要な工具があるのかないのか、工具の状態はどうなっているのか、現物を確認するまで分からなかった。場合によっては在庫品があるにも関わらず購入してしまい、なおかつ納品されるまで加工が止まってしまう事例も多くあった。

加工現場での探すムダを解消するために、全工具を棚卸し、システムに情報を入力し、管理している。システム上ではすべての工具が

1. 保管場所
2. 使用可否
3. 使用中かどうか、また誰が使用しているか

などが図6の画面イメージのように表示され容易に確認できる。また、他の依頼で使われたくない場合は使用予約もできるので、自分が使うときになってすでに破損していたなどという問題も回避できる。

工具発注もこのシステムの情報を活用しており、在庫種・量の適正化など在庫管理に役立てている。

工具番号	工具種類	工具情報	予約状況
A001	手回し	型番: ABC-001, メーカー: XYZ	予約済
A002	電動	型番: DEF-002, メーカー: ABC	予約済
A003	手回し	型番: GHI-003, メーカー: DEF	予約済
A004	電動	型番: JKL-004, メーカー: GHI	予約済
A005	手回し	型番: MNO-005, メーカー: JKL	予約済
A006	電動	型番: PQR-006, メーカー: MNO	予約済
A007	手回し	型番: STU-007, メーカー: PQR	予約済
A008	電動	型番: VWX-008, メーカー: STU	予約済
A009	手回し	型番: YZA-009, メーカー: VWX	予約済
A010	電動	型番: BCD-010, メーカー: YZA	予約済
A011	手回し	型番: EFG-011, メーカー: BCD	予約済
A012	電動	型番: HIJ-012, メーカー: EFG	予約済
A013	手回し	型番: KLM-013, メーカー: HIJ	予約済
A014	電動	型番: NOP-014, メーカー: KLM	予約済
A015	手回し	型番: QRS-015, メーカー: NOP	予約済
A016	電動	型番: TUV-016, メーカー: QRS	予約済
A017	手回し	型番: WXY-017, メーカー: TUV	予約済
A018	電動	型番: ZAB-018, メーカー: WXY	予約済
A019	手回し	型番: CDE-019, メーカー: ZAB	予約済
A020	電動	型番: FGH-020, メーカー: CDE	予約済
A021	手回し	型番: IJK-021, メーカー: FGH	予約済
A022	電動	型番: LMN-022, メーカー: IJK	予約済
A023	手回し	型番: OPQ-023, メーカー: LMN	予約済

工具種類
工具保管場所
工具情報
型番, メーカー,
径 etc.
予約状況,
使用履歴

図 6. ツール管理システム画面イメージ

5.5 材料在庫管理システム

通常試作に使用する材料はその依頼にあわせて都度購入している。大きめの材料から削りだすと費用と時間が余分にかかってしまうためである。

しかし、スピード対応をミッションとしている社内試作部門としては、材料の入荷を待てないほど急ぎの試作対応や不具合のリカバリーを行うために、敢えて材料の在庫を保有している。

しかし在庫を持つということは、同時に探すムダなどの各種ムダを発生させる危険性がある。そこで、材料在庫管理システムを構築、新規購入品だけでなく、今まで放置されていたものや、端材を含めて材料在庫が管理された状態を作り上げた(図7)。

マテリアルショップ材料在庫	
SUS303 板材	
T-4	T-5
T-6	T-8

図 7. 材料在庫システム画面イメージ

画面イメージに示すように、材質・形状・在庫寸法(サイズ)が一覧できるようになっている。

短納期の相談が来たときには、その場で材料在庫を確認、必要に応じて素材の変更ができ、材料調達期間を省略、一層のスピード対応に貢献している。

さらにこのシステムそのものを web 上で社内にも公開しているので、依頼者が事前に材料を確認して依頼時に指定することもできる。急ぎの場合には設計者が在庫から材料を指定することで、大幅な時間短縮をすることが可能となっている。

6. まとめ

今回紹介したシステムにより、商品開発のスピードアップに貢献してきており、その件数は年々増えてきている(図8)。

このシステムは使用者自らが考えて構築して運用しており、スピードの観点から常に改善を行ってきている。

現在は、依頼前に費用と納期を事前に知りたい、という要求にスピーディに応えるため、web 上で使用できる簡易見積もりシステムなどを検討中である。

今後とも他にないスピードで商品開発に貢献できるよう、

- 1: QR コードによる工程進捗管理
 - 2: ネットワーク化による現場改善
- など新機能の追加・既存機能の改善を進めていく予定である。

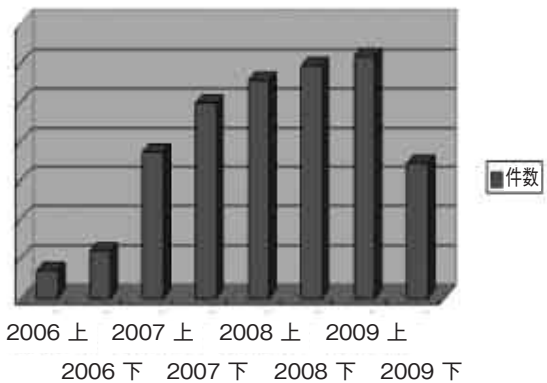


図 8. 依頼件数の推移

<参考文献>

- (1) 鈴木康平, 佐竹喜悦, 高谷浩志, 高橋静雄: 成形・金型モデル化工場における高度デジタルネットワークの先進的活用, 成形加工シンポジア(2005), pp. 243-246.

<著者所属>

- 福辺 卓史 技術開発本部
工程開発部試作技術グループ
- 佐藤 一太郎 技術開発本部
工程開発部試作技術グループ

開発現場の主体的活動による プロセス支援システムの開発

—プロジェクトへの外乱を含めた計画管理・実施と現場意識の向上—
Construction of a Process Support System Through Independent Activity at a Software Development Site
- Project management that allows for interruptions; on-site consciousness-raising -

株式会社 山武
ビルシステムカンパニー

多田 朋之
Tomoyuki Tada

キーワード

開発業務改革, プロセス支援システム, 開発現場中心, 外乱対策, 計画管理と実施, 開発業務の見える化, 共同作業推進, 協力会社協調, 品管部協調

新製品開発中に過去製品の保守に追われる「負のサイクル」からの脱出を目的として、開発担当者が自分達の問題と真に向き合い「開発現場」に中心を置いた主体的な改善活動を他部署と共同実施した。

要因・課題分析の結果いくつかの施策を提起し、その具現化のための手段として開発現場が独自に「プロセス支援システム」を開発・構築し、実プロジェクトへの適用を行った。その結果「負のサイクル」からの脱出に有効な手段であることが確認できたので、本活動で抽出した課題と解決策、本活動と構築したシステムの特徴、およびその効果を報告する。

To escape the negative cycle that can occur in software development when the maintenance of past products interrupts the development of a new product, bottom-up improvement activities were held throughout the software development section.

As a result, We developed and built a process support system and started trial use on actual projects. This article describes the problems encountered, their solutions, and the process support system achieved through these activities.

1. はじめに

長年組込み系のコントローラソフトウェア開発に従事し、関連したプロジェクトの中で数多くの手痛い失敗経験を積んできた。この貴重な経験を活用し負のサイクルからの脱出を目的として、約1年前に社内開発メンバーと協力会社とが協調して品質改善活動を始めた。本活動には以下特徴がある。

- ・ 開発現場／担当者主体・中心のボトムアップ活動
- ・ 自分達の問題として課題に向き合う
- ・ 協力会社、品管部署、その他部署と協調して活動
- ・ 外乱を含めた計画管理、個人作業の見える化
- ・ 実開発担当者による開発支援 Web システムの構築

当初、通常の品質施策(ナレッジ整備、CASE ツール導入など)を地道に行っていたが、現状分析、議論を進めていく中で、まず「個々の品質向上施策を生かすため

の土台(環境・意識)づくり」が必要との考えに至った。この「土台」とは「やるべきことをやるべきタイミングで、かけるべき時間をかけて正しく実施するための環境・意識」ともいえる。

なお、本活動の1つの特徴として「プロジェクトへの外乱対策」がある。プロジェクトに関わっている各担当メンバーにはそれぞれ個別の複雑な背景(環境・風土・歴史・性格)があり、その状況に応じて各種外乱を受ける。その結果「計画の立案と実施」や「担当者の意識」にも影響を与えていることが再確認され、プロジェクト進行中の外乱認識・対策が必須との見解に至り各種施策を実施した。

さらに、本活動の成果として開発業務を包括するプロセス支援システム(Web 共同作業システム)がある。「自分達の手で素早く作り、実現場に合うものに育てる」を指針に、実開発業務の傍ら作業を進め、実際のプロジェクトに適用しながら効果を検証し改善を進めた。本システムは構築そのものが元々の目的ではなく、各種課題を

解決する手段として「必要に迫られ生まれてきた」ものであるため、真に現場で使えるシステムへと成長している。

なお、本論文の中で掲載しているシステムの画面／イメージ図はプロト版の物を使用しているため、運用版の画面とは異なる。

2. 要因概略分析

実担当者の作業時間計測、業務観察、ヒアリングなどを実施し、「負のサイクル」の発生要因を図1の連関図にまとめた。その結果「計画が悪い」、「製品の品質が悪い」の2つを主要因として取り上げ、その要因を「計画の立案」「計画の実施」「外乱」「担当者の意識」の4つのカテゴリに分類した。4つのカテゴリ毎に要因の概略説明を行う。

2.1 計画の立案

元々業務を始める前に計画する習慣がない担当者もいるが、市販ツールなどを使用して計画する習慣がある担当者でも経験不足でタスクの時間見積もりが悪かったり、作業項目を洗い出せていないなど計画自体が悪い実態を確認した。

2.2 計画の実施

担当者が多忙になるとやるべき作業を見失うことが多い。これは今やるべき作業が優先度などを含めて整理して管理されていないことや、各種外乱の影響も大きいことを確認した。

またリーダー、管理者からすると計画の進捗状況が正確に把握できないため、管理（指示、助言）するタイミングを逸することがある。これは進捗状況の報告がリアルタイムでなく、かつ悪い状況を出すことを避ける意識にも要因があることを確認した。

2.3 外乱

プロジェクト担当者が受ける各種外乱（定常、保守、突発業務など）により、新製品開発に計画していた活動時間が取れず、開発が計画通り進まない状況が発生している。定常業務、保守業務共にある程度発生工数を予測することは可能だが、その予測工数は概して楽観的な工数となっている場合が多く、開発業務を圧迫している実態が確認された。

また開発業務を優先させ保守業務を滞らせた結果、クレームに火が付き客先報告なども含め余計な工数が発生している実態も確認された。

2.4 担当者の意識

担当者の意識低下が計画の実施に影響を及ぼしている実態を確認したが、その要因は様々で個人によっても大きく異なっていた。例えば担当者が個人作業に注力してしまうことで、得意分野や簡単な作業を優先してしまうことや、早期の「気付き」がないことでの重大な手戻りが発生している実態を確認した。

本活動では「主体性の低下」「個人作業中心」「品管部門の参画度」「設計コンテンツ（プロセス・チェックリストなど）が使える物になっていない」の4つに要因を絞って検討した。

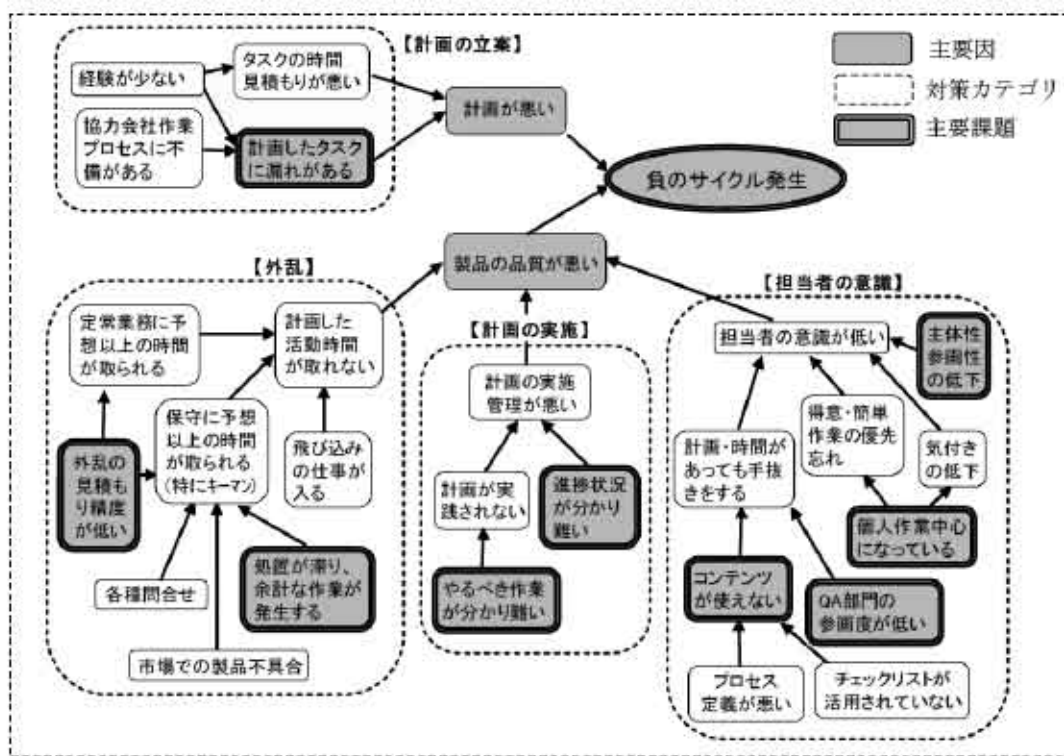


図1. 要因連関図

3.3 「外乱」 要因と対策

3.3.1 外乱が計画に入っていない

(1) 要因詳細分析

開発担当者はプロジェクト進行中に様々な外乱（定常業務、突発業務、保守作業など）を受けている実態を作業時間計測から確認した。無尽蔵に時間が使えた時代とは違い開発業務にかけられる時間自体が限られてきている中で、外乱が多発するとプロジェクトメンバーは外乱中心の作業形態となり真のプロジェクト作業に使用する時間が僅かとなる。

メンバーの作業時間計測結果（図6）からも、発生する外乱の多くが実際より小さく見積もられていることや、結果的に「プロジェクトにかけられるべき時間」が確保できなくなっている実態が確認された。

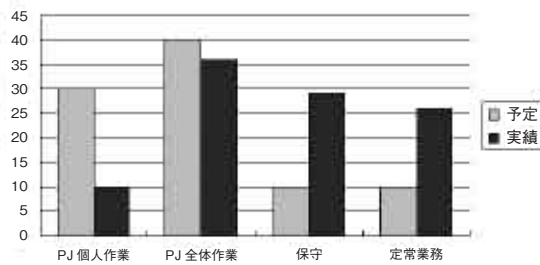


図6. 作業時間計測結果

また外乱は特にプロジェクトキーマン（主担当者／リーダー／見識者）に多く発生するが、キーマンの性格、責任感、マンパワーなどで外から見えなくなっていることが多く、そのようなキーマンが参画しているプロジェクトでは、将来への負債が日々作り込まれている可能性（リスク）もある。

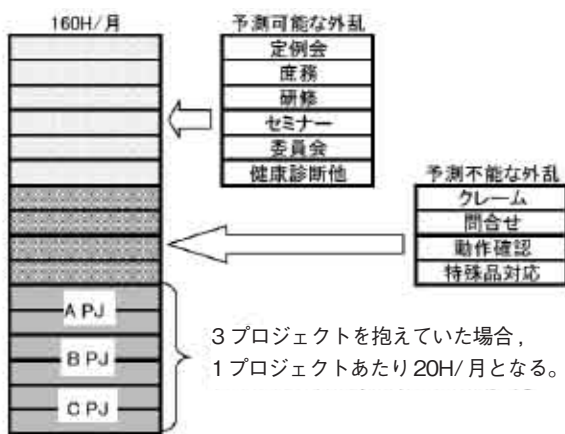


図7. 外乱による稼働時間の消失イメージ

(2) 対策：外乱を精度良く計画に盛り込む

予測不能な外乱管理（保守・リスク・課題管理）と予測可能な外乱管理（庶務、定常業務など）をシステム内に持ち、外乱発生時に関係者が、担当者・目標期限・

目標工数などを設定することで、各個人の計画に反映されるシステムとした。

（実画面は大幅更新中のためここには掲載しない）

本機能では同時に複数の他メンバーに期限付で業務を設定可能とし、確実に担当者自身の計画に盛り込まれるよう運用付けている。ただしこのとき他メンバーへの作業投入は必ず事前（事情により事後）に口頭にて状況・背景などを説明することを徹底し、関係者間の関係が悪化しないよう留意している。

3.3.2 処理が滞り余計な作業が発生する

(1) 要因詳細分析

調査依頼などが多発した場合、いくつかの「クレーム」に対して処理を停滞させてしまうことがある。処置に長時間を要した客先クレーム処理状況を調査した結果、処理期間が長くなるほど最終処理の工数が増大する傾向が見られた。これは処置に時間が掛かった理由を含めた社内外への調査報告書作成、客先訪問（陳謝）などの時間が多々発生するためである。

また実製品の調査・問合せ状況を観察した結果、正式に発行管理されない非公式な情報が実際には多く、その中に重要な情報があることも確認した。さらに各種問合せに関して社内見識者に協力を仰いだ結果、即解決する事例もいくつか見られた。

調査・問合せ種別	件数
正式な調査・問合せ件数	5
非公式な調査・問合せ件数	39
非公式な問合せが重大クレームにつながった件数	1
社内見識者に問合せることで解決した件数	3

表2. 調査・問合せ種別件数（5ヶ月間）

(2) 対策：外乱への迅速な対応

非公式な情報も含めた調査・クレーム管理機能をシステムに持ち、品質保証部、開発、協力会社が協調して使用することで迅速に分析、回答できる処理フローとした。また製品作成時に作成者が気付いた製品内在リスク（特殊環境下での稀な障害など）を自由に登録できる画面も用意し、先での有効なナレッジとして蓄積できるようにした。

さらに、調査依頼が投入された時点で製品種別毎に登録された見識者に対して「お伺い」通知を行う仕組みの実装も進めている。

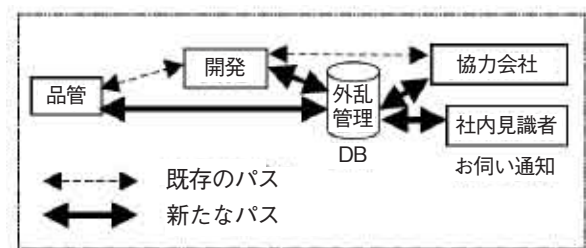


図8. 調査・クレーム管理フロー概略

3.4 「担当者の意識」要因と対策

3.4.1 設計コンテンツが使えない

(1) 要因詳細分析

チェックリストは存在するが体系化／棚卸されていないため、ルール上使用はしているがほとんどがチェックするだけの作業となっている実態と、各成果物が作成された後にチェックする工程となっているため、せっかく良い指摘が出て手戻りを避けるための言い訳作業（理論武装）に工数と知力を使用している実態を確認した。

(2) 対策：設計コンテンツを見直し活用度を高める

チェックリストを「該当部署の文化・風土」「製品の持つ特性」に合わせることで実担当者・開発現場が真に使えるものに変更した。具体的には該当製品の成功・失敗（障害）事例と見識者の経験知を集約しガイドラインという形へ変更し、各詳細プロセスにガイドラインをリンクでき、かつ本ガイドラインを誰でも簡易に育てられる（追加・変更できる）システムとした。

また成果物完成後にチェックする手順から成果物作成各開始前／作成中に確認する手順へ変更し、ベテラン／リーダーと実担当者が共同で確認する場を設けることで、気付きを誘発し、同時に指導・教育・技術継承を実践する機会を創造できる仕組みとした。

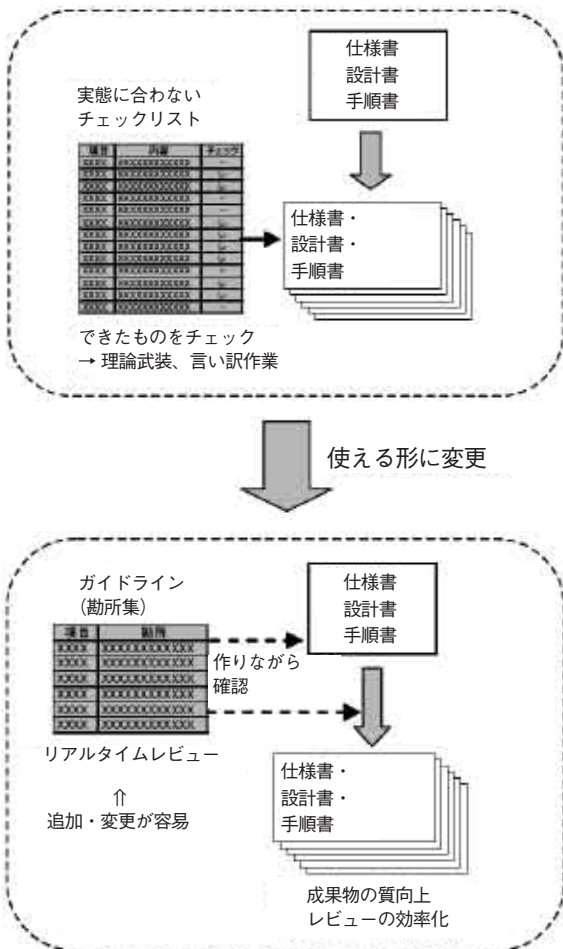


図9. チェックリストからガイドラインへ

3.4.2 個人作業中心になっている

(1) 要因詳細分析

自分の興味のある作業、得意な作業、簡単に片づけられる作業などを優先・注力した結果、重要な作業の放置などの悪状況が発生していて、品質低下、業務遅延、手戻り発生要因のひとつとなっていることを確認した。

また「作業抜け／忘れ」は担当者のみならず作業依頼者にも「催促する、叱る」など精神的負荷になっている実態も確認し、チーム力の低下につながる可能性も無視できないと考えた。

これらの要因を「個人作業中心の仕事の仕方」にあると捉え、その結果「自己管理能力の低下」や「気づきの低下」などを招いていると考えた。

(2) 対策：個人作業の見える化と共同作業の推進

自己管理能力強化のために、開発担当者が今やるべきこと、優先度、現在の状況、先の時間（空き）状況、を常に把握するための「見える化機能」をシステムに追加した。具体的にはプロジェクト管理、外乱管理、定常業務管理の情報を統合し、そこから各個人の作業を抽出した「見える化／見せる化」機能と、注意喚起・通知する機能を実装した。またプロジェクト／定常／保守の作業比率を予定と実績でグラフ化する機能の実装も進めている。

さらに、共同作業の推進のため、システムの画面を一緒に見ながら計画の立案、実施、各種成果物のチェック、課題管理を行う運用を提起した。本システムを介すことで、会って対話する共同作業の場を創造し活性化と気づきの誘発を狙っている。

(実画面は大幅更新中のためここには掲載しない)

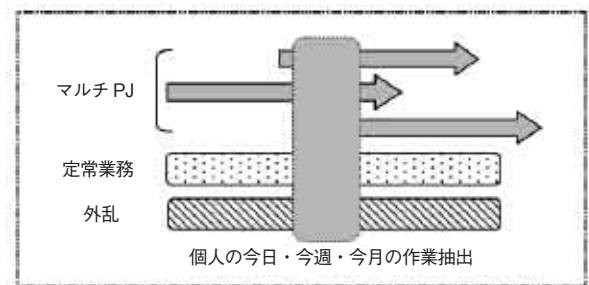


図10. 外乱も含めた個人作業予定の見える化

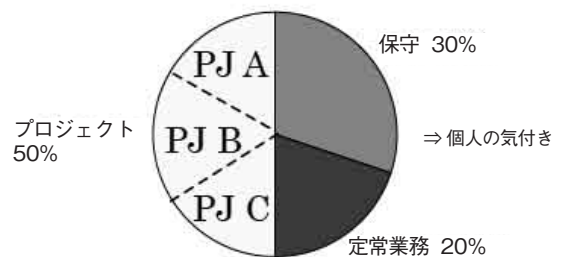


図11. 作業配分比率表示例

3.4.3 品管部門の参画度

(1) 要因詳細分析

近年、品管（品質管理）部門からの新たな品質メトリクス収集など各種施策が増えているが、開発担当者にとってはせっかく効果のある施策であっても「やらされ感」が拭えず「(心理的な) 外乱」となっている実態を確認した。要因として品管部門と開発部門の協調体制の弱さを指摘する声がいくつかあった。

(2) 対策：品管との共通プラットフォームの作成

品管部門と開発部門・協力会社が共同で使用できるプラットフォーム作りを実施した。具体的には品管部門と共同で検討し合意した品質メトリクス値（作業工数、レビュー結果、障害検出件数など）、発生した課題などを、開発担当者が各プロセス実施中にタイムリーに入力でき、特定プロジェクトもしくは全プロジェクトの情報として各種視点で表示／出力可能とし、品管部門も能動的に収集可能とする機能を設けた。

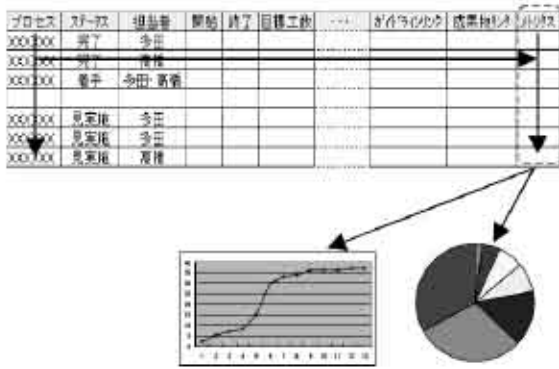


図 12. プロジェクトメトリクス設定・収集イメージ

3.4.4 主体性、参画性の低下

(1) 要因詳細分析

業務のマニュアル化、多忙状態などにより開発担当者が受動的な姿勢になった結果、自ら何かを作り出す・考える力が弱まり、成長感、達成感、参画意識の低下を招いているとの意見が多数あった。

(2) 対策：プロセスの主体的な選定、自律的な実施

開発担当者が自ら開発モデル（ウォーターフォール、スパイラルなど）、詳細プロセスなど仕事を設計・立案できるシステムとし、主体的・自律的な運用を権利（義務）付けた。実際にはベテラン／リーダーなどと共同で、標準（マスター）プロセスから詳細プロセスを選択し「仕事をデザイン」していくが、あくまで主体が担当者本人となるよう運用を徹底している。

4. プロセス支援システム概略紹介

抽出した各種課題に対応するために、プロジェクトメンバー（協力会社含む）が共同で使える Web システムを自分達の技術力を使って簡易に構築した。現在はプロト版試行からのフィードバックを得て改訂した実用版を試行中である。

以下に本システムの特徴的な点をまとめておく。

- ・共同作業 Web システム（PJ メンバ、協力会社）
- ・プロセス中心（PJ 中心） & 担当者中心
- ・外乱管理（保守・定常業務）を実装
- ・各種通知・アラート機能を実装
- ・個人の作業負荷計測、個人作業の見える化
- ・メトリクスの収集・計測・見える化
- ・「現場／実態」にシステムを合わせる→使える
- ・内製化によるランニングコスト低減、変化追従

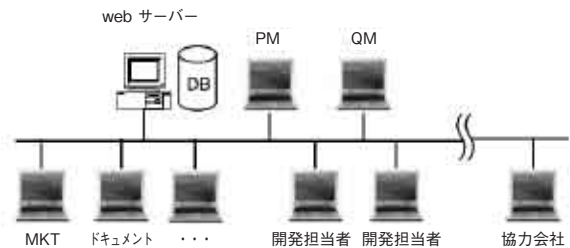


図 13. システム構成図

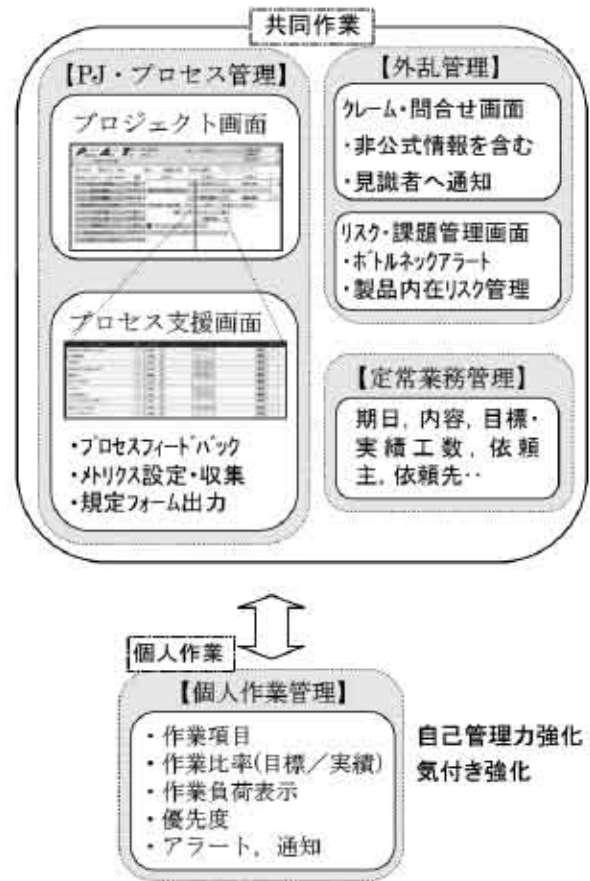


図 14. プロセス支援システムの両面構成概略

その他の有効な機能を抜粋して紹介する。

(1) フォローアップシート管理

BSC 開発本部では各種レビュー、打合せなどで発生したアクション事項を「フォローアップシート」というフォームで管理しているが、シートが増えるとアクション項目の見通しが悪くなりアクション項目が滞りがちとなる問題があった。本システムではフォローアップシートの一元管理を実現している。

具体的にはシステム内にフォローアップシート作成機能を設け、プロジェクト毎、担当者毎に残件表示、アラート通知、認可通知など行っている。

(2) ボトルネックアラート機能

特定個人の負荷状況などによりプロジェクトのアクション項目が放置された場合、該当担当者によって該当プロジェクトが大きな影響を受ける。この対策としてプロジェクト毎にフォローアップシートの残件担当者が1名/2名になった場合、該当担当者にボトルネックになったことを通知する機能の実装を進めている。

(3) 週報、月報機能

個人作業リストなどから、週報、月報としてまとめて表示、出力可能とする機能の実装を進めている。

本リストを見ながらチームミーティング、グループミーティングなどで実績アピール、状況確認、助言/対策が可能となる。

(4) ユーザーステータス機能

今日の自分の状況（負荷/精神状態）、居場所、帰宅予定時刻、Twitterなどが入力でき、チーム・プロジェクトメンバーでの情報共有と活性化を図る。

状況を長期でグラフ化し個人へフィードバックする機能も作成予定である。

ユーザー	<input type="text" value="多田 朋之"/>
状況設定	       
場所	<input type="text" value="AM: 半休 PM: ずっと会議"/> <input type="button" value="登録"/>
退社予定	<input type="text" value="19:30(希望..)"/> <input type="button" value="登録"/>
コメント	<input type="text" value="週末に日光に行きました。混んでたあ.."/> <input type="button" value="登録"/>

図 15. ユーザーステータス登録画面

(5) 課題管理

プロジェクト/製品/保守などに絡んだ各種課題を管理する機能を持つ。現在の担当者（ボールのありか）、期限管理、課題解決までの履歴、各種通知機能を実装し、確実に課題が解決・消化される仕組みとしている。また、リスク管理機能のリスクが顕在化した場合、該当案件を課題管理へ移行する機能の実装も進めている。

5. 効果検証

現在、試行結果からシステムを改良し実プロジェクトへの適用を再開した段階のため、定量的な効果検証までは至っていないが、使用者の定性的な意見も踏まえその効果の一部を述べる。

(1) 自己管理能力・計画の立案・実施が強化された

ある程度のボリューム/難易度のある作業・課題が発生した際に、まず計画・登録（着手予定、期日、担当者）することが、該当作業/課題の解決、納期順守につながることを真に体感できた。その結果メンバー・協力会社担当者共に、計画してから作業する習慣がついてきている。

(2) 保守作業の迅速な対応が可能となった

外乱管理機能を品管・協力会社と協調して試行した結果、公式・非公式な調査依頼への迅速な回答が実現できている。特に当社キーマンがいなくても品管と協力会社間で情報が伝わることで、解析着手までの時間が大幅に短縮されている点の効果が大きい。

(3) メトリクス収集が容易になった

プロセス実施毎に確実にメトリクスを記録する作業が習慣化され、開発担当者は各フェーズ終了時にメトリクス収集に奔走する必要がなくなり、品管部署は本システムにアクセスすることでタイムリーに品質状況が確認（監査）でき、機会を逸せずにプロジェクトへの助言/指導などが実施できることを一部メンバーの試行を通し確認した。

(4) 教育効果が出ている

ガイドラインには実例なども掲載されているためその運用に際しリーダーや担当者間での対話が活性化され、気付きなどの付帯効果が確認されている。実担当者からも教育効果が高いとの感想が出ている。

(5) 活性化されてきた

開発業務の見える化により個々人の作業状況が透明化されたことでメンバー内での対話が増加している。また課題管理、チームステータス機能などにより共同作業の比重が高まってきている。

(6) 運用意識が高くなってきた

システムを実担当者主体で構築したことで、開発担当者自身の運用意識が高く、かつ「計画を作ること自体が安心につながる」ことを体感したことでさらなる運用の促進につながっている。また開発・運用コスト（ライセンス費）の低減、社内規定など変化への追従、社内システム・品管との連携、などが容易で、このあたりにも市販ツールとは違う優位性がある。

6. おわりに

「負のサイクル」からの脱出を目的として「開発担当者が自分達の問題と真に向き合い」主体的な品質改善活動を実施し、その成果として「プロセス支援システム」を構築・試行した。

その結果、Webシステム上でプロジェクトメンバーが共同で「やるべきことを確実に進めて行く仕組み」は、担当者の意識向上、品質の向上・底支え、技術(ナレッジ)の蓄積・継承、コミュニケーション強化や、世に数多くあるプロジェクト管理系システムの共通課題である「システムの保守コスト、定着と継続、現業への追従性、変化への対応」にも優位性があることを確認した。そのため開発業務推進のための「ひとつの手段」として有効であり、継続使用により「負のサイクル」からの脱出も可能と結論づけた。

特に、長年の高負荷状況の中で「良くない」開発業務習慣(先楽後苦)が身につけている担当者には有益な手段として提供できるものと思われる。

また開発業務革新のひとつの手段を提起することで、現状の仕事のやり方を見直すきっかけとなり、本活動のひとつの目的である「開発担当者の意識向上」にも寄与できるものと感じている。

なお、本活動に際しては、ソフトウェア開発業務にシステム/ツールを導入することの「是非の見極め」も大きな課題であった。

本システムは「共同使用することで効果を発揮する」仕組みのため、メンバー全員で共通手段として使用する必要があるが、「品質向上のための手段は“やらされ感”を持つことで本来の目的を達成できなくなる」傾向があることや、各部/グループ/チーム/個人、それぞれが長年の歴史・経験から最適化している仕組み、手法、文化もあり、そこに外から変化を与えることによるモチベーション問題も議論になった。(例えば個人作業項目やスケジュール管理は、紙のノートを使用して効果的な運用を習慣化している人は多いし、MSPJ/エクセルでのスケジュール管理も一般的である)

以下はメンバーで考察した他の課題の一部である。

- ・システムに頼ることで、返って主体性、コミュニケーション低下を招かないか?
- ・「見える化」が「見えただけ」に終わらないか?
- ・市販ツールを使用すれば十分ではないのか?
- ・社内ITインフラ乱立状態の中、さらに新たなインフラの使用が認められ受け入れられるか?
- ・システムのお守りは担当者の負荷にならないか?

以上のように開発業務を統一プラットフォーム上で共同実施する上での課題はいくつかあるため、現場担当者が少なからず「抵抗感」を抱くことは自然である。そのため、自分達の仕事に合わせた道具とルールを自分達の知識と技術を使って共同で整備していくことの

メリット、それにより解決される課題、期待される効果、目的、などが真に伝わるよう努めると共に、開発担当者の実作業の省力化(効率化)にも寄与することで、負のサイクルからの脱出はもとより、ライフワークバランス向上にも貢献できるプラットフォームになるよう注力することが重要であると考えている。

最後に、本活動は開発担当者が主体的(ボトムアップ的)に実施してきたため、実業務の傍らの作業となり担当者の負荷を増大させ、社内の位置づけも曖昧で障壁にぶつかることもあった。また活動参加者の職種、職務も大きく違うことから、要求事項をシステムに落とし込む際にはトップダウンの施策とは違う調整上の難しさがあった。ただし課題が多かった分、このようなボトムアップ活動が実を結んだ際の効果も大きいものと期待している。

6.1 今後

今後は、試行を継続していく中で抽出された課題にひとつひとつ向き合い、システムで解決できるもの、運用でカバーできるもの、風土・意識改革が必要なもの、など体系化して考察を続け対策していく予定である。

特に開発業務を共通プラットフォーム上で共同実施していく上でのモチベーション問題など「人の気持ち・意識」についても主に開発担当者の立場で深く考察し、運用指針の整備を行うと共にシステム継続使用の是非も含め検証したい。

6.2 謝辞

本活動の推進、プロセス支援システムの構築にあたり、議論・ヒアリングへの参加、プロト版の試行参加、システム構築など多大なるご協力を賜りましたBSC開発2部セキュリティグループメンバー員、所属長、社内各部署の関係者、社外講師様、協力会社担当者の方々に謝意を表する。

<著者所属>

多田 朋之 ビルシステムカンパニー
開発本部開発2部

Technical Review

azbil Technical Review azbil グループ技術研究報告書 2011 年 1 月発行号

発 行 日 2010 年 12 月 1 日 (通巻 52 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 編集長：阿波俊一郎

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、加藤紀人、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

©2010 Yamatake Corporation All Rights Reserved Printed in Japan

●本誌から無断転載・複製はご遠慮ください。

●本誌に掲載した名称の中には、それぞれの各社が商標として使用している場合があります。

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



VOC (揮発性有機化合物) 成分フリーのインキを使用して印刷しました。

PR-1106J (1012-8K-PG)

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。