

# 差圧・圧力発信器の高性能,高機能化技術

## Technology for improving the performance and functionality of the differential pressure/pressure transmitter

株式会社 山武

間々田 浩一  
Koichi Mamada

### キーワード

差圧・圧力発信器,AT9000,高精度,高速応答,CommPad,機能安全規格

発売以来100万台以上の販売実績を誇るスマート形差圧・圧力発信器を大幅に改良し,様々な市場要求に対応可能な差圧・圧力発信器AT9000を開発したので報告する。本稿では,①世界最高レベルの性能を実現した高精度,高速応答における技術的な取り組み,②ユーザに様々な利点をもたらす使いやすい機能,操作性とデザイン,③機能安全に関する国際規格であるIEC61508適合について紹介する。

Since introducing the smart differential pressure/pressure transmitter, we have registered outstanding sales of more than one million units. Now, we have succeeded in making significant improvements to the unit and completed the AT9000 that is capable of meeting the diverse demands of the market, the details of which are reported below. This paper contains explanations of: (1) The technologies we applied to ensure high accuracy and the high-speed response of the transmitter, which enabled a performance that is among the highest in the world; (2) The user-friendly functions, operability, and design of the advanced transmitter that provide an array of benefits for users, and; (3) AT9000 complies with IEC61508, the international standard for functional safety.

## 1. はじめに

当社では,1983年に世界初となるスマート形差圧・圧力発信器を発売した。以来,全世界に100万台以上が納入され,ユーザから高い評価を頂いている。これまで差圧・圧力発信器(以下,発信器)は,圧力,流量,液位などの計測に使われる汎用性の高い工業計器として,世界中で広く採用されてきた。また,他の工業計器と同様に小型化,高性能化,高機能化の技術進歩を遂げてきた。近年では,発電設備のタービン周りなどに使用する高速応答形や,安全計装システムに対応するために,機能安全に関する国際規格であるIEC61508に適合した製品の要求もますます高まってきている。今回このような市場要求に即して,新形の差圧・圧力発信器AT9000 Advanced Transmitter Model GTX(以下,AT9000)を開発したので,その概要を報告する。本稿では高精度,高速応答における技術的な取り組み,使いやすく,人に優しい機能,操作性とデザイン,機能安全に関する国際規格IEC61508適合について紹介する。



図1 AT9000の外観

## 2. 発信器の概要

発信器の概要を説明する。図2に発信器のブロック線図を示す。発信器の構造は大きく区分すると、差圧の状態量を電気信号に変換する受圧部と、受圧部から出力された信号を処理してアナログ出力信号(4-20mA出力)を発信する発信部の二つから構成されている。導圧管などから送られた差圧は、ダイヤフラムから封入液を介して、センサに伝えられる。センサに伝えられた差圧、静圧、温度の状態量は、それぞれのアナログ電気信号に変換される。更にA/D変換部によりデジタル値に変換され、MPUに取り込まれる。MPUでは、内部メモリに格納されている受圧部特性データ(キャラクタリゼーション・データ)を用いて、差圧の真値を計算する。計算された値はデジタル量としてD/A変換部に送られる。D/A変換部でアナログ値に変換され、4-20mA出力として発信される。

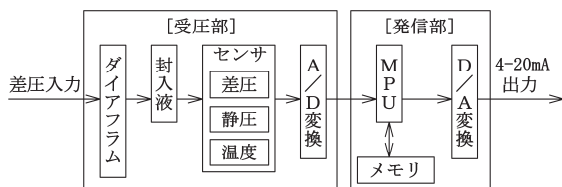


図2 発信器のブロック線図

## 3. 性能の向上

AT9000の開発において、特に注力した項目に高精度、高速応答がある。これらの開発内容について説明する。

### 3.1 高精度の実現

AT9000では、山武独自の補正関数同定手法であるキャラクタリゼーションシステム、A/D変換部およびD/A変換部の新規開発により、世界最高レベルの精度0.04%を実現している。

#### 3.1.1 キャラクタリゼーションシステムの新規開発

AT9000では、センサに長期安定性、再現性、耐久性などに優れた特性を示し、従来から長年にわたり実績のあるSiピエゾ抵抗式圧力センサを採用している。このセンサ性能を最大限に引き出すために、キャラクタリゼーションシステムの新規開発を行った。

まず、キャラクタリゼーションの概要を説明する。キャラクタリゼーションシステムのブロック線図を図3に示す。AT9000のセンサは差圧、静圧、温度センサを一つのチップに内蔵した複合機能センサである。AT9000ではこれらのセンサ出力をA/D変換部でデジタル値に変換して、MPUにデジタル信号を送っている。このうち、差圧センサは計測対象の差圧に対して最も感度が高いが、温度、静圧などの周囲環境によっても値がシフトする特性を持つ。そこで、温度、静圧センサの出力を用いて、これらの周囲環境の影響を除去することで正しい差圧の値を計算する必要がある。ここで、

$$\begin{cases} \text{差圧センサのA/D変換後出力:P} \\ \text{静圧センサのA/D変換後出力:S} \\ \text{温度センサのA/D変換後出力:T} \end{cases} \begin{cases} \text{差圧 :PV} \\ \text{静圧 :SP} \\ \text{温度 :Temp} \end{cases}$$

とすると、

$$\begin{cases} P=f(PV,SP,Temp) \\ S=g(PV,SP,Temp) \\ T=h(PV,SP,Temp) \end{cases} \cdots(a)$$

と表現でき、各々のセンサにおいて、f,g,hの関数が分かれば、(a)式の連立方程式を解くことによって

$$PV=F(P,S,T) \cdots(b)$$

(b)式、つまり真の差圧を表す出力関数が求められる。出荷前の補正工程では、AT9000が使用される周囲温度・静圧環境を再現し、受圧部1台1台について各センサ出力を測定することで、関数f,g,hの同定および出力関数Fの決定を行っている。なお、出力関数Fは複雑な非線形特性をもち演算負荷が膨大になるため、近似多項式を生成することで、製品への実装を可能としている。

次にキャラクタリゼーションシステム新規開発による精度の向上について説明する。キャラクタリゼーションシステムにおいて、出力精度に影響する誤差要因としては、

- ・入出力のデータ測定誤差
- ・出力関数を近似多項式にすることで生じる近似誤差

がある。精度の向上を実現するためには、目標精度に対してこれらの誤差を十分小さくする必要がある。新規にキャラクタリゼーションシステムを立ち上げるにあたり、入出力のデータ測定誤差については、構成する環境試験設備、計測モジュールに独自のチューニングを施し、測定誤差、変換誤差の影響を最小限にして、精度の向上に対応できるシステムとすることに成功した。また、このキャラクタリゼーションシステムに加え、後述するA/D変換部の性能向上によってAT9000の高精度化を実現している。

出力関数の近似誤差については、通常、出力関数を求める際、P,S,Tの各センサ出力を測定するポイントを追加することや、近似多項式自体を高次数化することで、誤差を最小限にすることができる。しかし、測定ポイントを増やすことは生産能力の低下に繋がり、また近似多項式の高次数化は演算量を増やすことになり、応答速度が遅くなってしまふ。そこでAT9000では、測定ポイントの最適化に加え、未測定ポイントのデータ補間をする際に誤差設計が行える技術を開発し、出力関数の高精度化、更には多項式の次数の最適化を行

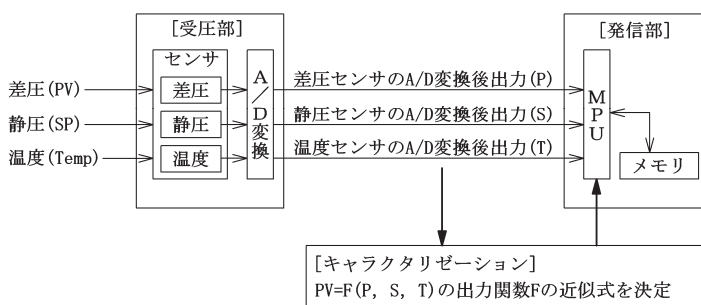


図3 キャラクタリゼーションのブロック線図

った。これにより、高精度を維持しつつ演算量の低減が実現できた。

### 3.1.2 A/D,D/A変換部の改良

精度の誤差要因の一つにA/D変換,D/A変換誤差がある。この誤差を縮小し、前述のキャラクタリゼーションシステムによる測定精度をより高める必要がある。AT9000では、A/D変換部,D/A変換部について、従来から蓄積してきた独自のA/D,D/A変換回路技術をさらに改良し、双方の分解能およびリニアリティーを改善することにより、精度の向上を実現させている。

### 3.1.3 性能確認

AT9000の代表機種であるGTX31Dの精度実測データを図4に示す。それぞれ、精度0.04%の設定レンジである0kPa~100kPa,0kPa~10kPaのデータ,および設定可能最小スパンである0kPa~0.5kPaのデータ(精度0.65%)を測定した。いずれも世界最高レベルの精度を十分に満足する良好な特性を確認できた。

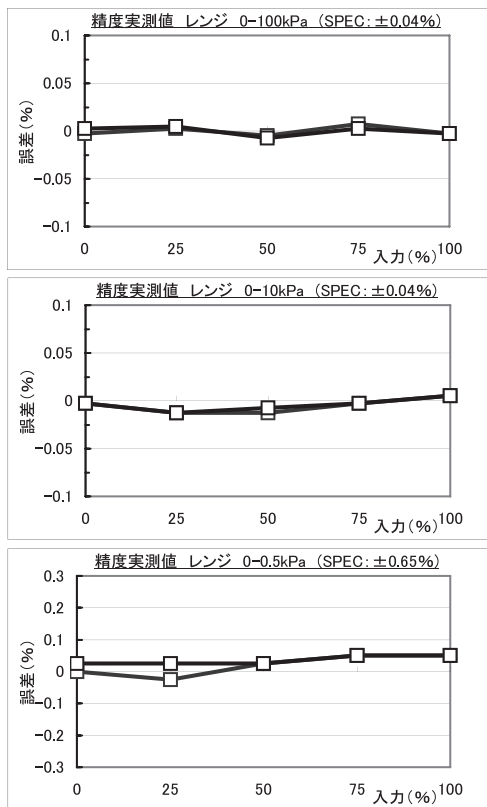


図4 AT9000の精度実測データ

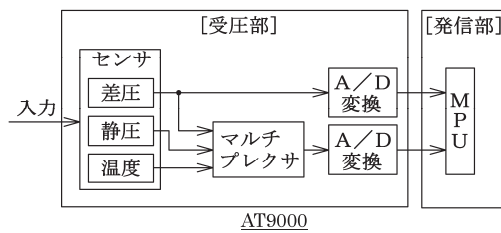
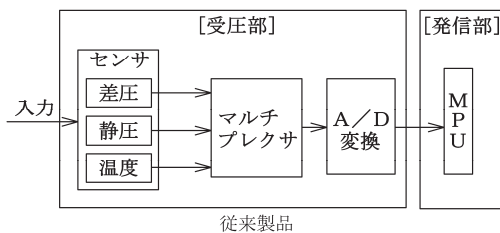


図5 A/D変換部のブロック線図

## 3.2 高速応答

AT9000では、A/D変換回路の改良,低消費電流設計による動作クロックの高速化,演算式の効率化,受圧部機構の改良などにより、スマート形では世界最速となる応答性85msec(実測の平均値,63.2%応答)を実現している。

### 3.2.1 A/D変換回路の改良

応答性を上げるためには、差圧信号のサンプリング周期を速くする必要がある。A/D変換部で取得する信号は、応答性に特に影響する差圧以外にも、補正用を使用している静圧,温度がある。図5にA/D変換部について、従来製品とAT9000のブロック線図を示す。従来製品では、センサからの3つの信号をマルチプレクサにより順番に切り替えて、データを取得していた。AT9000では、A/D変換回路を2個使用して、片方を差圧計測専用とし、もう片方を補正のための静圧,温度計測用,および診断のための差圧計測用とした。また、A/D変換回路も高速タイプのもを採用した。これらにより、従来よりも差圧信号のサンプリング周期を1/5に短縮できた。

### 3.2.2 低消費電流設計による動作クロックの高速化

応答速度を上げる方法の一つに、MPUの動作クロックを上げる方法があるが、同時に消費電流も上昇してしまうというトレードオフがある。一般的に2線式の工業計器は4mA以下の消費電流で回路を動作させる必要があり、単純に動作クロックを上げることはできない。このため、従来製品以上の低消費電流設計が必要となった。AT9000では、MPUや表示器用ICなどにおける低消費電流電子部品採用や、当社独自で設計したゲートアレイの採用,アナログ/デジタル回路の改良により、低消費電流化を実現している。特にゲートアレイは、内部の駆動電圧のみ低電圧電源を使用して動作させる回路や、機能集約によるゲート数の削減,回路,配線などの集積化などの設計を行った。これらにより、高機能を保持しながら低消費電流化が可能となり、MPUの動作クロックを従来に比べて高速化できた。

### 3.2.3 演算式の効率化

3.1.1項で前述したように、新規開発の補正関数同定手法を用いたキャラクタリゼーションシステムにより、出力関数の近似式を効率化できた。また、F/Wのプログラム全体の見直しも行い、データ処理の効率化を図った。この演算式の効率化および3.2.2項の動作クロックの高速化により、高精度を実現するとともに、演算部の処理時間を従来に比べて1/7に短縮できた。

### 3.2.4 受圧部機構の改良

受圧部は、圧力をダイアフラムで受け、ダイアフラムの変位に

応じて内部の封入液が移動し、センサに圧力を伝える機構になっている。このセンサ伝達の応答を速くするためには、封入液移動速度を上げる必要がある。AT9000では、封入液の通過領域を増やし、且つ過大圧にも耐えうる構造に改良した。これにより従来と比較して受圧部の応答時間を1/5に短縮できた。

### 3.2.5 特性の確認

図6にAT9000の応答性実測データを示す。このデータから78~90msec(平均85msec,63.2%応答)というスマート形では世界最速の応答性を確認できた。

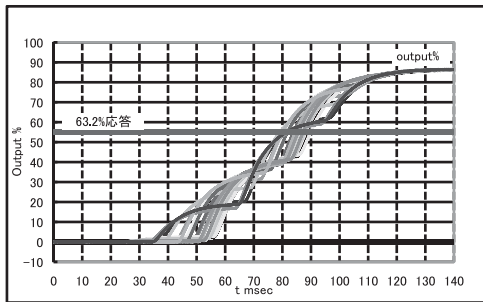


図6 応答性実測データ

## 4. 機能、操作性、デザインの向上

ユーザでは、国際間の企業競争力を高めるため、設置、メンテナンス作業の簡易化、効率化により、作業時間やトータルコストを削減したいという要求がますます強くなってきている。また、計器、計装の異常を未然に、または早急に発見できる機能が望まれている。このような市場要求から、AT9000では、利便性の高い機能を充実させ、使いやすく、人に優しい製品の開発に重点をおいた。

### 4.1 構造

#### 4.1.1 小型・軽量化

発信器の小型、軽量化は設置場所を選ばない、運搬や設置が容易、保管場所が削減可能などのユーザーメリットがある。AT9000では電気部品の小型化、電気回路の集積化によりプリント基板を縮小し、プリント基板の組立構成を見直すことで、従来製品より25%軽量化した。また、この軽量化により耐振動性も向上できた。

#### 4.1.2 配線噛み込み防止構造

設置やメンテナンスなどで発信器に配線する際、電線や圧着端子の断線を回避するために、電線を必要な長さより長めに端子部に引き込んでおき結線することはよく行われる。この際、余った配線がカバーのねじに噛み込んでしまう可能性があった。噛み込みは外から見ても分からないため、構造上防止できる設計を検討した。AT9000では、端子部カバーにめねじ構造を採用している。図7に、おねじ構造とめねじ構造の端子部カバー図を示す。おねじ構造の場合、カバーを締める際に、カバーのねじに配線があたり噛み込む恐れがあるが、AT9000で採用しためねじ構造の場合、その心配がないことが分かる。

また、メンテナンス時はカバーを外して作業をすることが多いが、おねじ構造の場合、カバーのねじが外側に向いていて傷が付きやすく、最悪の場合本体に組み付けなくなる可能性がある。AT9000のめねじ構造は、ねじが内側に向いているため傷が付きにくく、このような問題を回避している。更にカバーの横幅が増えたため、手でグリップしやすく、カバー付け外し作業を容易にしている。

#### 4.1.3 環境設計

社会的貢献の観点から、非常に多くの企業が環境活動に積極的になってきている。環境活動の一環として、使用済みになった計器を材料毎に分解し、リサイクル率を上げたいというユーザの要望も増えてきている。AT9000では、部品の組立性を上げると同時に、使用後の廃棄時に行われる分解作業の効率も考慮した設計を行った。図8に、AT9000発信部の部品構成を示す。ねじを多く使用し、樹脂、プリント基板、金属ケースなどの異種材料部品を分解しやすい構造とした。また、従来製品と同様に欧州RoHS指令に対応しており、環境負荷低減に寄与している。

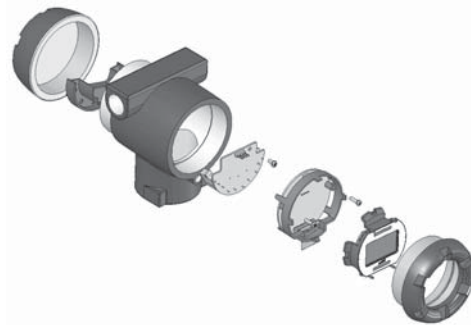


図8 発信部の部品構成

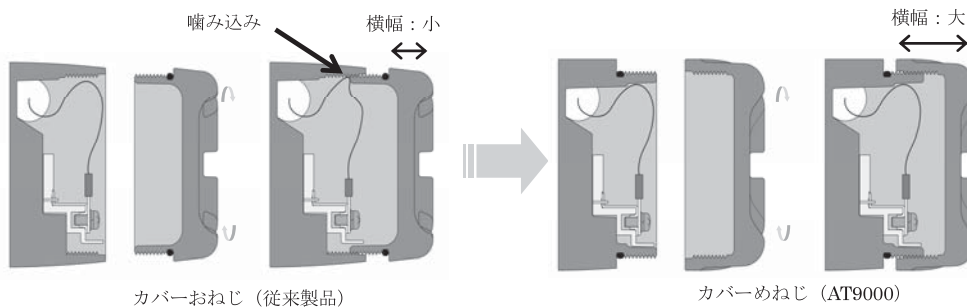


図7 端子部カバー構造

#### 4.2 診断履歴機能の搭載

AT9000では、ゼロ点校正履歴や、過大圧、異常温度などのエラー診断履歴情報を内部メモリ(E<sup>2</sup>PROM)に保存する機能を有している。これらの情報は当社製コミュニケーターCommPadを使用することにより、確認、データ収集することができる。この機能を使用することにより、例えば、過大圧などの過去に発生したエラー情報から、ユーザがその原因と対策を明確にしやすくなった。また、ゼロ点校正値の履歴やそのグラフ表示機能から、ゼロ点の推移を確認できる。これは、発信器の交換周期のタイミングを推測する指針になり、ユーザにおけるメンテナンス性の向上やコスト削減に役立つ。図9にCommPadとその表示例として、ゼロ校正履歴グラフを示す。

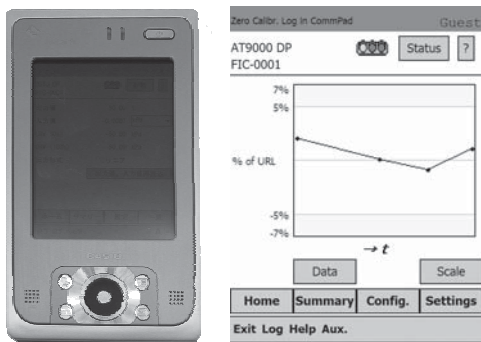


図9 CommPadと表示例

#### 4.3 外部ゼロ/スパン調整

発信器は本体の取付姿勢や、特にリモートシールなどの受圧部の設置位置により、現場でゼロ点の調整を必要とするケースがある。AT9000では、現場でのゼロ調整の作業性を考慮して、内蔵指示計の上下に調整スイッチを設け、指示計を見ながら、窓ガラス越しにゼロ調整、およびスパン調整可能となるようにした。スイッチは従来製品から使用実績のある磁気感应式を採用した。動作方法は、図10のように付属のマグネットスティックをゼロまたはスパンスイッチに近づけることにより行う。また、このような方式の場合、従来のような機械的可動部がないため、部品劣化や操作ミスによる可動部破損も回避できる。



図10 外部ゼロ調整時

#### 4.4 内蔵指示計

内蔵指示計は、ユーザが発信器の出力値、正常、異常状態などの情報を容易に現場で確認できる利便性を有している必要がある。図11にAT9000の内蔵指示計デザインを示す。従来品よりも表示面積を1.5倍、情報量を4倍にして、表示を見やすくした。表示可能な項目は

- ・差圧、圧力の5桁デジタル値
- ・%, 圧力単位 (kPaなど), 任意の単位 (m<sup>3</sup>/hなど)
- ・ゲージ圧 (G), 絶対圧 (abs)
- ・べき数 (×10, ×100, ×1000)
- ・バーグラフ表示 (5%間隔)
- ・ライトプロテクト表示 (鍵マーク)
- ・エラー履歴の有無 (旗マーク)
- ・診断時におけるアルファベット表示
- ・出力開平 (OUT√), 表示開平 (DISP√)

となる。特にアラーム発生時に、内蔵指示計のアルファベット表示により、現場で発信器の状態を的確に把握できるようになった。これは、ユーザにおける設置作業、メンテナンス作業の軽減につながる。図12にアラーム表示の一例として、過大圧印加時の表示を示す。

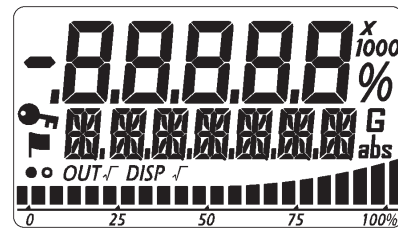


図11 内蔵指示計

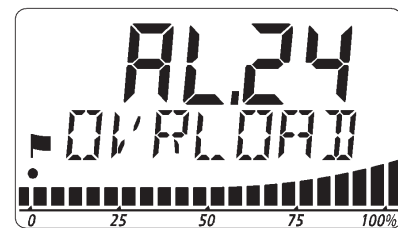


図12 アラーム表示例(過大圧印加時)

#### 4.5 アラーム出力機能

AT9000から新たに追加された機能の一つにアラーム(接点)出力がある。これは、例えばあらかじめ設定した上下限値の範囲を超えた場合、4-20mA出力とは別にオープンコレクタの接点出力から情報を外部に出力することができる。AT9000に採用されている接点回路は、内部回路と外部接続回路がフォトカプラによりアイソレーションされている。そのフォトカプラの駆動にはある程度の電流を流す必要があるが、低消費電流設計のために、他の箇所で使用した電流を再利用する独自の回路によって、新たに電流を必要とすることなく、接点回路を動作させている。

## 5. 機能安全規格IEC61508の適合

AT9000は,安全性を高め,更に今後要求が高まる安全計装システムにも対応するよう,機能安全に関する国際規格であるIEC61508 (JIS C 0508)に適合した開発を行った。IEC61508に適合するためには,次の故障を抑制,回避するよう設計しなければならない。

- ・Systematic Failure (系統的故障)
- ・Random H/W Failure (偶発的故障)

Systematic Failureは原因に対して決定論的に関連する故障で,製品の安全ライフサイクル全体において文書化や開発・生産体制の管理,製品評価,資質などについて規格の要件を満たさなければならない。Random H/W Failureは構成部品などの劣化などにより,時間に関して偶発的に発生する故障で,SFF (Safe Failure Fraction, 安全側故障率)や,PFDF (Probability of Failure on Demand, 要求時に安全機能を実行できない確率)などが具体的な指標になっている。

これらを満足するために,Systematic Failureについては,ソフトウェアの静的解析ツールの使用,徹底した故障挿入試験の実施に加え,全安全ライフサイクルにおける徹底した文書化と,その管理システムの見直しを行った。Random H/W Failureについては,全故障モードについて分析を行い,その結果に基づき自己診断機能の強化,回路の冗長化,低故障率部品の採用などを実施することでSFF,PFDFの要件を満足させ,安全性の向上を行った。詳細例をあげると,アナログ電源,デジタル電源電圧値の診断,D/A出力値のリードバック機能,そして,3.2.1項で前述したA/D変換回路を2個内蔵することによる冗長化などがあり,その他H/W,S/Wにおいても多くの自己診断機能を具備している。

これらの結果,AT9000は認証機関TÜVより,安全度水準SIL2 (Safety Integrity Level 2)の認証を取得している。

## 6. おわりに

AT9000は,本稿にて紹介した技術,設計により,飛躍的に性能,機能を向上させることができた。また規格についても,今回紹介した機能安全規格の他,各国の防爆規格,EMC規格などにも対応しており,幅広いアプリケーションで対応可能な仕様となっている。省エネルギー化が求められる昨今では,プラントなどでの計測機器性能がますます重視されると同時に,その利便性,操作性,メンテナンス性からのトータルコスト削減も注目されている。今後,このようなユーザの要求に応えられるよう,製品開発を進めていきたい。

### 参考文献

- (1) 中川, 溝口:「小型差圧・圧力発信器」, Savemation Review, Vol.14, No.2, pp.2-7, 山武(1996)
- (2) 河内, 阿波, 宮沢:「マイコン内蔵型差圧・圧力発信器」, Savemation Review, Vol.2, No.2, pp.35-40, 山武(1984)
- (3) IEC61508 Part1-7 (1998/2000)

### 商標

CommPadは,株式会社 山武の登録商標です。

### 著者所属

間々田 浩一      アドバンスオートメーションカンパニー  
プロダクト開発部  
開発プロジェクト3グループ