

© 1984 ISIJ

## 最近の工業計測センサ



大野 勇\*

## Current Sensors in Industrial Measurement and Control

Isamu OHNO

## 1. はじめに

最近のセンサの動向はデジタル化（アナログ出力型から周波数，またはデジタルコード出力型へ），固体化（構造型センサから物性型センサへ），オプトエレクトロニクス化（光ファイバを利用した光出力型の実現）などが主体であり，さらにマイクロエレクトロニクス化（検出部と情報処理部の一体化・複合化による高機能の実現）を手段としたインテリジェントセンサ（判断する能力をもつセンサ）開発へ向けての激しい胎動を見せている<sup>1)</sup>。

このうち固体化は半導体機能素子によつて，単純な構成で必要機能の実現を図ろうとするもので，今後小形・低コストのセンサを開発するためにきわめて有望な手段である。しかし，現段階では精度，信頼性の面で解決しなければならぬ問題が残されており，当面，家電や自動車用など，コスト要求の厳しい分野に進出すると思われる。

このような理由により，精度，信頼性，耐環境性への要求の厳しい工業計測の分野では構造型センサが主体であり，また圧力，流量，レベルなど力学的変量の測定も多いこともあつて，将来とも構造型の影響は強く残るものと思われる。しかし工業計測用の各分野において，上記の新しい動向は急速に実現されつつあり，センシングシステムを含めた全計測制御システムの機能の向上が期待される。

本稿は現在の工業計測センサを主として測定対象（温度，圧力，流量など）別に分類し，最新の機器を紹介することによつて，その動向を具体的に解説するものである。

## 2. 温度センサ

中ないし高温測定を対象とした熱電対，測温抵抗体については大きな動きがなく，比較的話題に乏しい。その理由は熱電対が典型的な物性型センサであり，すでに古くから固体化が達成されていたためと見ることができ

る。温度センサについては下記の点が着目される。

## 2.1 放射測温のトレーサビリティ管理

トレーサビリティの橋渡しをする高精度・高信頼度の放射温度計として，シリコン単色放射温度計の実用温度標準の設定が行われ<sup>2)</sup>，また実用型定点黒体炉の開発により<sup>3)</sup>，冶金学上から要求される精度の再現が可能となった。目下得られている再現性は前者が 0.3 K，後者が 0.2 K である。

## 2.2 放射率の補正

放射測温は Planck の放射公式や Stefan-Boltzmann の法則に準拠するものであるから，放射率が変化すると誤差が発生する。多くは実験などで確認した放射率が維持されるという仮定に立つが，放射率は炉内の熱放射のやりとりで大きく変化する。

放射率  $\epsilon_2$ ，絶対温度  $T_2$  なるストリップが，放射率  $\epsilon_1$ ，絶対温度  $T_1$  なる炉壁と平行対峙するとき，これを全波長帯型の放射温度計（Stefan-Boltzmann 則に準拠）で測温するときの見かけ放射率は

$$\frac{\epsilon_2 + \epsilon_1(1 - \epsilon_1)(T_1/T_2)^4}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1\epsilon_2}$$

となる。 $T_1 = T_2$  のとき上式は 1 となり，空洞放射条件が満足されるが，炉壁温度の方が高いと見かけ放射率は 1 以上に，低いと 1 以下になる。とくに  $\epsilon_2$  の小さい光輝熱処理炉の場合には，見かけ放射率の変化が大きい。なおこの傾向は単色型でも 2 色型でも，式が多少異なるが同一である。

この問題を解決するために，ストリップの一部を凹面鏡で覆い， $\epsilon_1 = 0$  とすると見かけ放射率が 1 になることを利用した測温が，以前から利用されていたが，凹面鏡をストリップにすれすれに設置することが困難であつた。

文献<sup>4)</sup>記載の例は，炉壁の窓をとおしてストリップ面にたいして同一法線角をなす位置に（すなわち鏡面反射関係の位置に），放射温度計および平面反射鏡を設置し，反射鏡のまえに置かれたセクタを回転して反射を断続させ，セクタ開閉時の放射温度計の出力の変化から，スト

昭和 58 年 12 月 5 日受付 (Received Dec. 5, 1983) (依頼解説)

\* 横河北辰電機(株)取締役研究開発部門 工博 (Research & Development Div., Yokogawa Hokushin Electric Corporation, 2-9-32 Naka-cho Musashino 180)

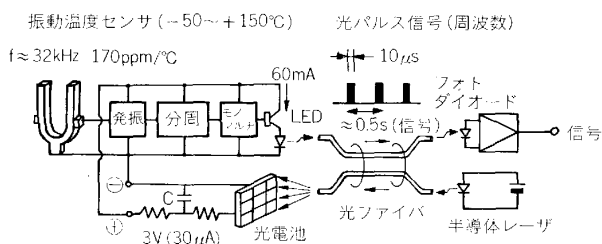


図 1 振動式光駆動温度トランスデューサ

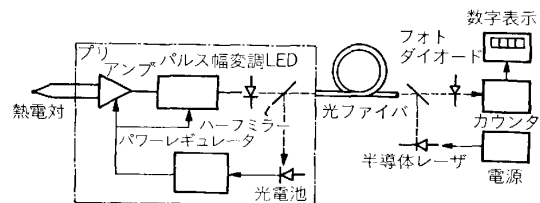


図 2 熱電式光駆動温度トランスデューサ

リップ真温度および法線角方向放射率を求めている。  
 ちなみに放射率は波長によっても放射角度によっても変化する。波長によらず一定のものを灰色体（1なら黒体）という。また法線角の余弦に比例するものを乱反射体といい、光沢のないものはこれに近い。本例では炉内雰囲気無酸化性から酸化性に変化させ、放射率を 0.32 から 0.86 まで変化させたときの測温誤差を 5 K 以内にすることに成功している。構成や補正演算の詳細は文献を参照されたい。

2.3 極低温用センサ

超伝導その他、極低温領域へのニーズの拡大にともない、新しい測温抵抗体、熱電対が開発された。測温抵抗体としては PtCo 抵抗素子 (Co : 0.5 mol%) を使い、2~300 K まで使用できる。また熱電対としては AuFe (Fe : 0.07 mol%)—クロメルを用い、1~280 K で使用可能である。

2.4 光駆動温度トランスデューサ

光ファイバのもつ本質安全防爆性、無誘導性を利用したフィールド伝送システムが注目されている。図 1 は音叉の振動数が温度で変わることを利用したもので、発振周波数を分割して光パルスとして伝送する。図 2 は熱電対をセンサとし、パルス幅変調による光パルスを送るもので<sup>5)</sup>、ハーフミラーによつてファイバを 1 線化してい

る。ちなみにアンプ駆動用の光供給パワーは数 mW で、完全に本質安全防爆性が保たれる。

このほか温度を直接光に変換するセンサとして、半導体のバンドギャップが温度に依存し、したがって光の透過率が温度で変化することを利用したものも開発された。半導体としては GaAs を用い、0.8 μm 帯の赤外線を使っている。

3. 差圧・圧力センサ

差圧・圧力伝送器には、封入液によつてパルセーションダンピング（脈動除去）とオーバーレンジプロテクション（過大入力防止）を行うタイプと、ドライタイプの純圧力センサとがある。とくに前者はプロセス用として多用されるが、ダイヤフラムの変位を電気信号に変換する方式により、容量型と拡散型に 2 分された観がある。

3.1 容量型差圧・圧力センサ

図 3 に代表的な容量型の原理構成を示す<sup>6)</sup>。ただし、感圧ダイヤフラムをはさむ静電容量の差で変位を検出するため、差動キャパシタンス型ともいわれる。接液ダイヤフラムのスティフネス（ばね剛さ）は十分に小さいから、差圧は感圧ダイヤフラムにかかり、感圧ダイヤフラムは差圧に比例した微小変位をする。このため固定電極と感圧ダイヤフラムとの静電容量  $C_L$ ,  $C_H$  が変化し、これをダイオードブリッジ  $D_1 \sim D_4$  で検波し、直流出力をうる。オーバーレンジプロテクションは、感圧ダイヤフラムが固定電極に密着することにより行われる。

容量型差圧伝送器は代表的な構造型センサである。すなわち感圧ダイヤフラムや固定電極の寸法が直接特性に影響する。そのかわり高度の機械加工技術によつて、高い精度を実現することができる。

3.2 拡散型差圧・圧力センサ

図 4 a, b は代表的な拡散型の原理構成を示す。この場合にも同図 a に示すように、主要な受圧要素は剛性の高いシリコンダイヤフラムである。シリコンダイヤフラムは同図 b に示すように 4 個の拡散抵抗（ピエゾ抵抗ともいう）を拡散形成し、ブリッジを構成する。圧力によつてシリコンダイヤフラムにひずみが発生すると、ピエゾ抵抗効果によつて抵抗値が変化する。応力にたいする抵抗変化率をピエゾ抵抗係数といい、拡散抵抗の不純物

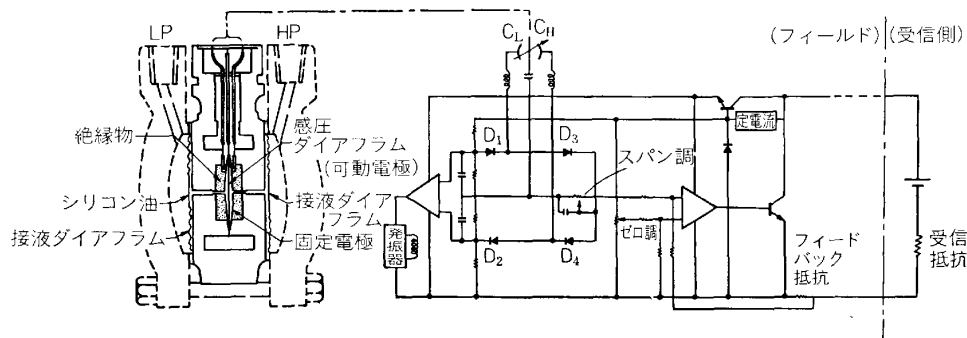


図 3 差動キャパシタンス型差圧伝送器

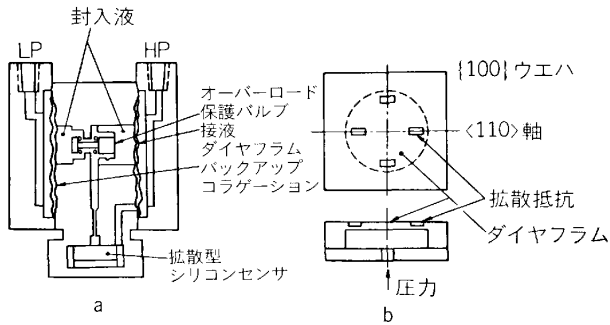


図 4 拡散型差圧伝送器

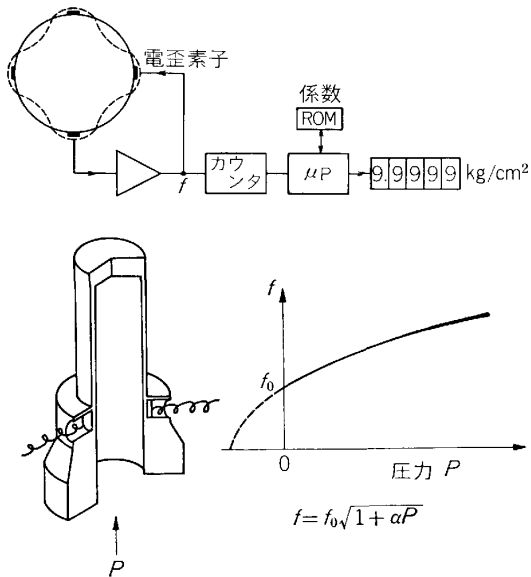


図 5 円筒振動式圧力センサ

濃度に大きく依存するが、濃度が一定なら変化しない。すなわち拡散型は代表的な物性形センサである。

シリコンは高度の弾性体で、塑性変形を起こすことがない。そのかわり脆性体であるために過大入力で破壊する。これを防ぐために接液ダイヤフラムの変位をバックアップコラゲーションで拘束するとともに、オーバーロード保護バルブが働いて、シリコンダイヤフラムにかかる過大差圧を制限するようになっている。

最近開発された差圧伝送器で、センシングエレメントを複合化し、差圧のほかに静圧や伝送器温度を検出し、それらをデジタル演算して静圧変動誤差、温度誤差を補償したものもある。この場合、デジタル I/O をかいて外部とインタフェースすることができ、ゼロ、スパンの変更、リニア/開平出力の切換、故障検出などが遠隔操作できるようになっており、インテリジェントセンサへの 1 つの足がかりとして注目される<sup>7)</sup>。

### 3.3 振動式圧力センサ

振動式センサは信号のデジタル処理が容易であるため、マイコンと組み合わせて各種の情報処理を行わせるのに、きわめて便利である。図 1 に示した振動温度センサもその 1 例であるが、図 5 に円筒振動式の圧力センサ

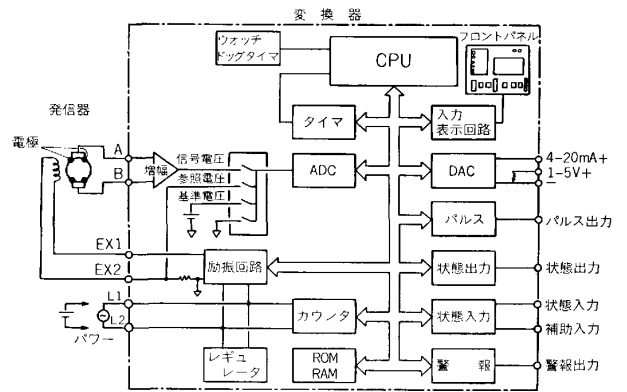


図 6 マイコン搭載電磁流量計の構成

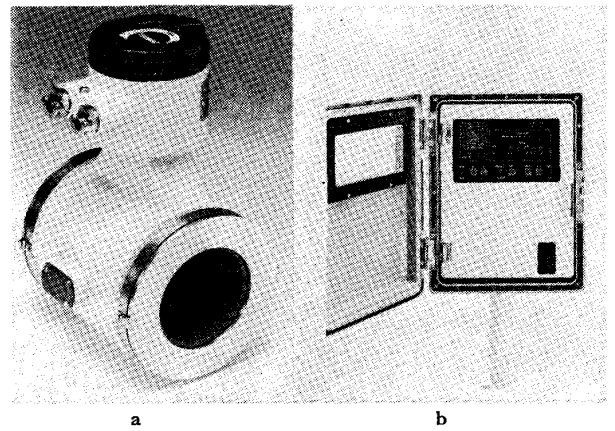


写真 1 マイコン搭載電磁流量計外観

を示す<sup>8)</sup>。これは、金属円筒の共振周波数が、内圧で変化することを利用したものである。円筒側面に 4 個の圧電素子を取りつけ、発振を起こさせると、振動数が内圧のみに依存し、測定流体の密度、円筒自身の弾性常数に依存しないことを利用したものである。現在大気圧の測定にたいして、1 年間の経年変化を含めて 0.01% の精度を得ることに成功している。

## 4. 流量センサ

### 4.1 電磁流量計

マイコンを組みこんで機能の拡大を図つたものが、メーカーからあいついで発表された。図 6 にその 1 つの例を示す<sup>9)</sup>。電源の交直両用、アナログ電流・電圧およびパルス出力、レンジの自動切換、励振周波数の切換その他、マイコンの処理能力を活用した豊富な機能が揃つた。また多電極 (1 個を 2 個にする) による高精度を実現するとともに、面間距離の短縮を実現している。写真 1 a にその発信器を、b に変換器の外観を示す。写真 a の例からも明らかなように、配管のフランジで挟みこむフランジレス型が定着しだしている。

一方機能を簡素化し、マイコン型変換器を発信器にとりつけた一体型も 2~3 発売されている。さらに内管をプラスチックで作つた簡素なものもある。また金属でバ

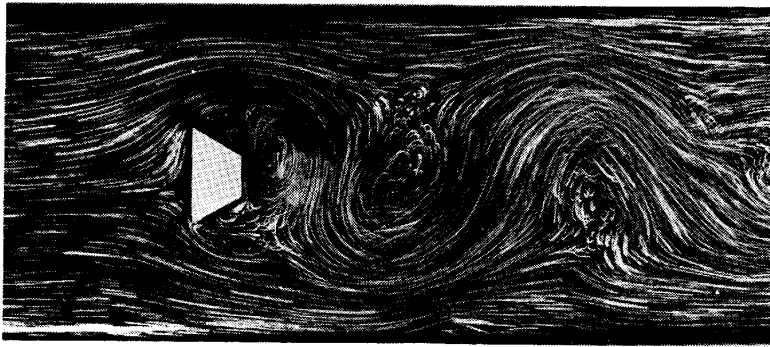


写真 2 台形柱による渦発生

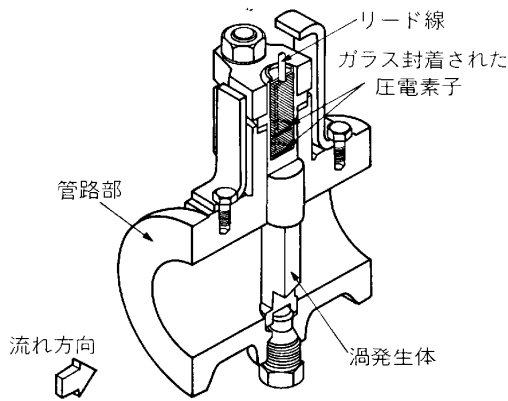


図 7 カルマン渦流量計

ックアップされたセラミック製の内管を使ったセラミック電磁流量計は、絶縁ライニングがないため、ライニングのはがれの問題を回避でき、耐食、耐負圧の面で期待される。さらにライニングレスの金属管に電流を流し、発生起電力と等しい管内面電圧となるように自動平衡させる電磁流量計も研究されている<sup>10)</sup>。

4.2 カルマン渦流量計

流れを円柱や角柱などの柱状障害物でさえぎると、後方にカルマン渦が交互に発生し、その発生周波数が流速に比例することはよく知られている。写真2は台形柱による渦発生の可視化写真である。図7はこれを利用したカルマン渦流量計で、渦発生体自身がカルマン渦によつて流れと直交する方向に応力を受けるので、渦発生体の1端に装着された2個の圧電素子によつて、ノイズを相殺しながらカルマン発振の周波数を検出するものである。

カルマン渦流量計は比較的広いレンジャビリティをもち(条件にもよるが精度0.5%で1:15)、パルス出力型、電流出力型など機種も豊富に揃つており、最近急速に利用がひらけている。また計量研究所を中心にリングカルマンの基礎研究も行われている。これは管と同軸にリング状の障害物をおき(リングと管内壁のあいだにすきまをおく)、リング状のカルマン渦を発生させるものである。

4.3 超音波流量計

超音波流量計のマイコン化も各社から発表されてい

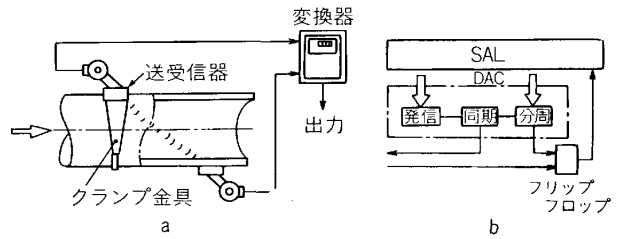


図 8 超音波流量計

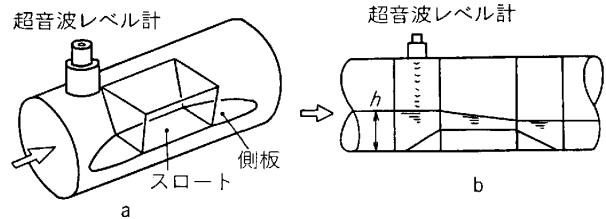


図 9 パーマ・ポーラスフリュウム

る。方式としてはシングアラウンド、時間差、ドプラーの3方式があり、条件に応じて使い分けられる(たとえば気泡や汚物の多い液はドプラーが適するが、清水では反射する異物がないから使えないなど)。

図8 a, bは時間差型の代表例を示す。同図aのように超音波送受信器はクランプ金具で管の表面にクランプオンされ、約45°の角度で上流、下流間に超音波パルスのやりとりをする。上流から下流へ向かうとき、反対のときのパルス到着時間の差から流速を求めることができる。到達時間はわずかなので、それを高精度で測定するために、同図bに示す回路がマイコンで構成される。詳細は文献に譲るが<sup>11)</sup>、時間のデジタル発生器SALの出力をDA変換し、到達時間と一致させることにより、時間のデジタル出力を得ている。これによりマイコンで高精度の演算ができる。

4.4 その他の流量計

下水の流量測定は従来は省略されることが多かつたが、開水路用にパーマ・ポーラスフリュウムが開発され、公共企業体を中心に普及しつつある。図9 a, bにその構造および原理を示す<sup>12)</sup>。円管内に台形断面をもつスロートを置き、スロートと管内面は側板で接する。流速が表面波速度を超えると、流量は上流側揚程hのみ

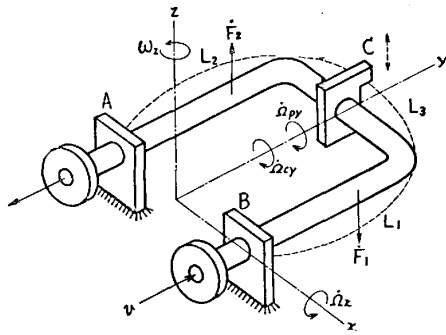


図10 コリオリ・プレセッション式質量流量計

で決まるから、超音波レベル計で測定し、変換器で流量リニア信号を出す。

地方自治体の場合などでは、はじめは人口が少なく、流量がきわめて小さい。この場合にはスロートのうゑにインサートフレュームをはめこみ、フルスケールを縮小して使う。

スラリーや気送粉体の質量流量を知るニーズは以前から大きかったが、かならずしも有効な方法がなかった。図10はコリオリ力とプレセッション力を利用した質量流量計<sup>13)</sup>である。A、Bで地板に固定されたU字管に流体を通し、C点に上下振動を与える。U字管は可撓でA、Bを中心として、x軸のまわりに $\dot{\Omega}_x$ なる振動角速度が発生する(ドットはC点駆動力と同周期であることを示す)。

U字管のL<sub>1</sub>部分を通る流体は半径が増大するので、流速v、密度ρに比例したコリオリ力 $\dot{F}_1(\propto \rho v \dot{\Omega}_x)$ を生じ、L<sub>2</sub>部分ではこれと逆相の $\dot{F}_2$ を生じる。したがってy軸のまわりに、それらを合計したトルク $\dot{\Omega}_{cy}$ が発生する。一方流体の半回転運動(L<sub>1</sub>→L<sub>3</sub>→L<sub>2</sub>)によつて $\omega_z(\propto v)$ なる回転速度が発生し、yのまわりに $\dot{\Omega}_{py}(\propto \rho v \dot{\Omega}_x)$ なるプレセッショントルクを生じる。C点の振動駆動力を一定にしておけば、振幅は質量流量ρvに反比例する。

質量流量計には密度ρと容積流量qを個別に測定して乗算する方法と、ρvに比例した力を検出する方法があるが、後者は流体をペローヤシーベルジョイントをかいして可動部分に導くため、耐圧、精度の点で限界があったが、図10の例はむりのないメカニズムを使っている点に大きな特徴がある。

図11はおもに固気二相流を対象とした質量流量計である<sup>14)</sup>。絶縁管の外側に電極を置き、静電容量を測るとそれは密度に依存する。同様の電極を距離lだけ下流に設置し、両者の電圧のゆらぎの相互相関関数を求めると、最大ピークを与える遅れ時間τ<sub>m</sub>はl/vになるから、密度との積から容積流量を求めることができる。

### 5. レベルセンサ

レベル計の主体は差圧・圧力伝送器であり、腐食性や

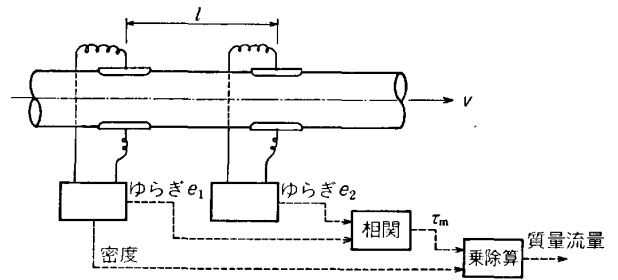


図11 固気二相流用質量流量計

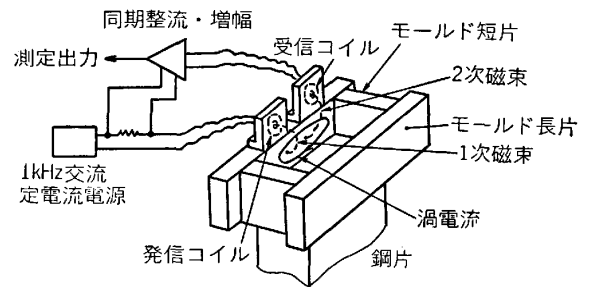


図12 電磁式モールドレベル計

沈でん物付着などにたいしてはエアパーズや水パーズで対処することにより、大部分のプロセスに対応できる。また下水処理などにたいしては、超音波レベル計が有効に機能している。

しかし鉄鋼業では塊体、粉粒体などいわゆる“むずかしいプロセス”が多く、高炉装入レベル、コークスホップレベルなど、それぞれ特殊の方式で対応している。

連続鑄造プロセスにおけるモールドレベルの計測は、安全上きわめて重要であり、これまでγ線式、熱電対式、渦電流式などが用いられてきたが、電磁式があらたに加わった。まだ実績は少ないが、モールド内にセンサを挿入しない点が特長である。図12にその原理を示す。1kHzで励振される発信コイルの1次磁束により、モールドに渦電流が流れるが、湯面以下は高温で比抵抗が高いため渦電流は小さい。湯面よりうゑのモールドを流れる渦電流による2次磁束により、受信コイルには励振交流と逆相の電圧が発生するから、これを同期整流してレベルを測定する。

### 6. その他の工業計測センサ

液体用密度計としては古くから差圧式、または気泡式密度計が用いられている。一例として連続酸洗プロセスの酸濃度測定として、レンジ1~1.2g/cm<sup>3</sup>の気泡式密度計を用い、ほぼ満足すべき結果を得ている。しかし化せん・合せんなどのプロセスでは、スパン0.1以下の狭レンジを必要とすることも多く、フロート式の特殊密度計が用いられる。

図5で紹介した円筒振動式圧力計を測定液中に漬けて発振をさせると、密度だけに依存した発振周波数が得られる。この場合粘度が大きいと見かけ密度が増大する

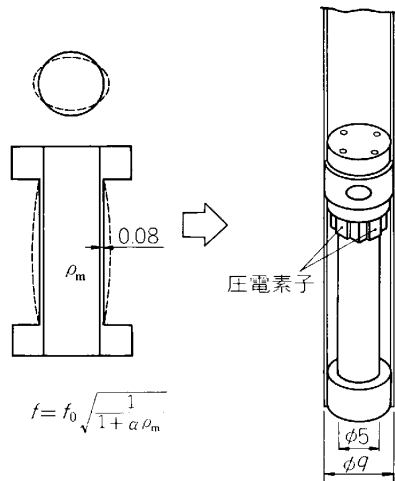


図13 円筒振動式密度計

が、励振パワーを一定にしておくと振幅が粘度のみに依存することを利用して、粘度の補償ができる。実験では  $\pm 5 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$  の精度が得られており、狭スパン、高精度密度計として期待できる。図 13 はこれを用いたポータブル型の密度計である。

## 7. おわりに

現在工業計測に多用されているセンサについて、新しい方式のものを中心に概説した。取りあげるべき項目が多く、そのすべてを尽くすことはできなかつた。

終わりに本稿をまとめるにあたって、当社技術部門衣笠晨策理事の労を多とするものである。

## 文 献

- 1) 大野 勇: 計装・制御技術会議 Session 4 資料 (1982), p. 4-1-1
- 2) 佐久間史洋, 服部 晋: 計測自動制御学会論文集, 18 (1982), p. 482
- 3) 佐久間史洋, 服部 晋: 計測自動制御学会論文集, 18 (1982), p. 52
- 4) 井内 徹, 田中富三男, 渡辺国俊: 鉄と鋼, 69 (1983), S 1156
- 5) 秋山浩二, 大手 明: 第 22 回 SICE 学術講演会予稿集 (1983), p. 207
- 6) 横河北辰電機編: Technical Information, TI 1C3A1-01 (1982)
- 7) 河内 淳, 角谷意雄, 山内治男: 第 26 回自動制御連合講演会予稿集 (1983), p. 431
- 8) 池田恭一: 計測自動制御学会論文集, 18 (1982), p. 710
- 9) 横河北辰電機編: Bulletin 1E4AO (1983)
- 10) 山崎弘郎, 本多 敏, 金 東治, 秋山忠次: 計測自動制御学会論文集, 19 (1983) 5, p. 394
- 11) 秋山忠次, 大和田博, 東野博文: 第 22 回 SICE 学術講演会予稿集 (1983), p. 745
- 12) 黒森建一: 計測技術, 11 (1983) 10, p. 91
- 13) K. O. PLACHE: Mechanical Engineering (1979) Mar., p. 36
- 14) 岩村忠昭: 相関流量計による固気二相流の流量計測, 講演 (第 22 回 SICE 学術講演会計測部門企画) (1983) 7 月 28 日 (予稿なし)