

デュアルレンジマスフロー コントローラー

Dual Range Mass Flow Controller

田中 誠* *Makoto Tanaka*
徳久泰一* *Yasukazu Tokuhisa*
後藤崇夫* *Takao Gotho*

半導体製造プロセスの多様化から、従来小流量用と大流量用の2台のMFC (Mass Flow Controller) を用いて流量制御を行っていた広い流量範囲を1台で制御可能な高精度と高速応答性を有するMFCの開発要求が半導体製造装置メーカーからあり、開発に着手した。センサーのゼロ点安定化と使用域の最適化、および流量の多点校正化による流量精度向上と、マイクロプロセッサとアナログ回路を複合したPID制御方式による広いレンジでの高速応答性の確保で、要求に答えるMFCを開発することができた。

開発品はデュアルレンジMFCと名付け、 SiH_4 、 NH_3 、 O_2 、 WF_6 などのガスで装置のキーコンポーネントとして採用されている。

Because manufacturing processes of semiconductors are diversifying, a MFC (Mass Flow Controller) which has high accuracy and quick response even in such wide flow range as 2 MFCs (small flow rate MFC and large flow rate MFC) are usually used is required. Then a semiconductor device maker requested to develop a new MFC.

To comply with customers' request, we improved the accuracy of flow rate by stabilizing the zero point of sensor, optimizing the usable range of sensor and calibrating at many points. And we also developed the hybrid PID control method of microprocessor and analog circuit to make a MFC respond very quickly in wide range.

The developed product is called "Dual Range MFC". The Dual Range MFC is adopted as a key component of semiconductor devices that use the gases such as SiH_4 , NH_3 , O_2 , WF_6 , etc.

① 緒 言

半導体製造では線幅の微細化や歩留まり向上の目的で SiH_4 、 NH_3 、 O_2 、 WF_6 、 Cl_2 などのガスで大流量と小流量を素早く切り替えてチャンバーに流入させる新プロセスが採用され始めている。

従来のMFC (Mass Flow Controller) はフルスケール流量 (制御可能最大流量) に対する比率の小さい流量で使用すると、流量精度低下と応答時間が長くなる問題があった。

そこで、小流量と大流量を精度良く高速でコントロールするには、フルスケール流量の異なる2台のMFCを並列に配管して、流量によってMFCを切り替える方法が使われていた。しかし、この方法は流量切り替え時に流路の切り替えを伴うため、流量変化がスムーズでなく上記新プロセスには不向きである。

また、新プロセスを既に販売したMFC配管ラインが1台分しかない既設の装置に適用する場合には、2台のMFCを切り替える方法は大きかりな改造となる。

以上の背景から1台のMFCで小流量から大流量まで

精度良く制御でき、かつ、全流量域で高速応答するMFCが必要となった。

開発にあたり克服しなければならない技術的課題は低流量での精度向上と応答時間の短縮であったが、表1に示す従来よりの積み上げ技術の組み合わせにより短期間で技術課題を克服した。

開発品はデュアルレンジMFCと名付け、 SiH_4 、 NH_3 、 O_2 、 WF_6 などのガスで装置のキーコンポーネントとして採用されている。

表1 技術課題と克服手段

Table 1 Technical problems and solutions

技術課題	克服手段
低設定域の精度向上	・流量センサーゼロ点の安定化 ・流量センサー使用域の最適化 * 多点校正の採用
低設定域の応答時間短縮	* 流量域別にPID定数を切替 * 学習機能による高速化 * アナログPID制御とデジタルPID制御の複合による本質高速化

* マイクロプロセッサ搭載により具体化

* 株式会社桑名クリエイティブ サムリサーチ

* Kuwana Create Co.,Ltd Sam Research

② MFC (Mass Flow Controller) の基本構成

MFCの基本構成を図1に示す。

MFCは流量を検出する流量センサー部と流量を調整するコントロールバルブ部、および外部器機からの流量設定信号を取り込み流量センサーからの出力信号と比較し、コントロールバルブに開度指令を出力する制御部から構成される。

流量センサーはステンレス細管にFe-Niなどの発熱抵抗線を巻付けたもので細管内を流れるガスが発熱抵抗線から熱を奪い発熱抵抗線の抵抗値が変わることを検出原理としている。

開発品のバルブ部は積層圧電体を駆動体としており、0VDC印加で全閉、150VDC印加で全開となる。当社独自のYET101を材料としたダイヤフラム直接シール構造のコントロールバルブである。

制御部は従来アナログ回路だけで構成されていたが近年、MPU (マイクロプロセッサ) を搭載したデジタルタイプのものが開発されてきている。

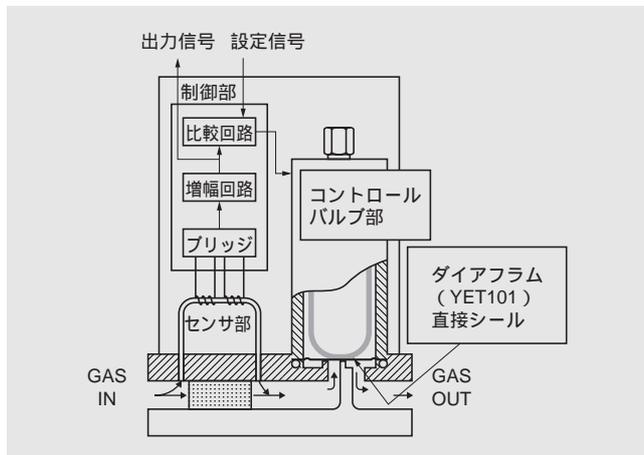


図1 MFCの基本構成
Fig. 1 Basic structure of MFC

③ 従来型MFCの問題点

従来のアナログ制御回路式のMFCを広い流量範囲で使用した場合以下の2点の問題がある。

(1) 低設定で精度が悪い

図2に従来MFCの精度を示す。精度は $\pm 1\% \cdot FS$ (フルスケール流量に対して $\pm 1\%$)となっておりフルスケール流量に近いところでは高精度であるがフルスケール流量の $\frac{1}{10}$ では $\pm 10\%$ の精度となる。

流量が低いほど精度が悪くなるのは流量センサーのゼロ点ずれ、および直線性のずれが全流量域に対して同量の影響を及ぼすためである。

(2) 低設定で応答速度が遅くなる

図3に従来MFCの流量ゼロからのステップ応答時の流量設定信号、流量出力信号を示す。

従来MFCは設定信号が小さくなるほど、ガスが流れ始めるまでのむだ時間が長くなり流量が設定値に達するまでの時間が長くなる問題がある。

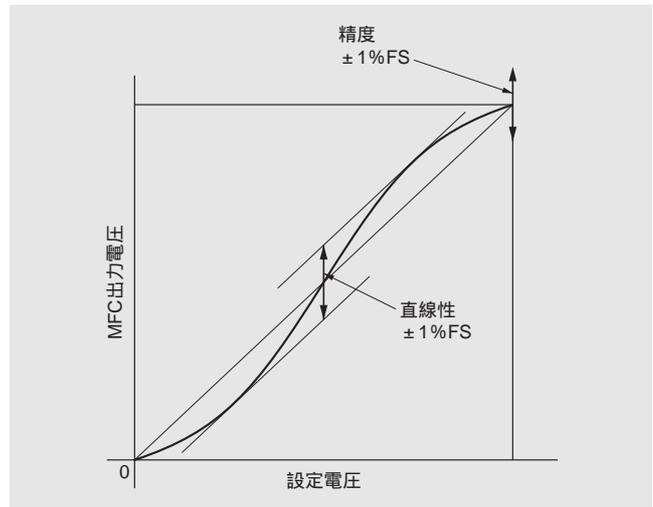


図2 従来MFCの精度
Fig. 2 Accuracy of previous MFC

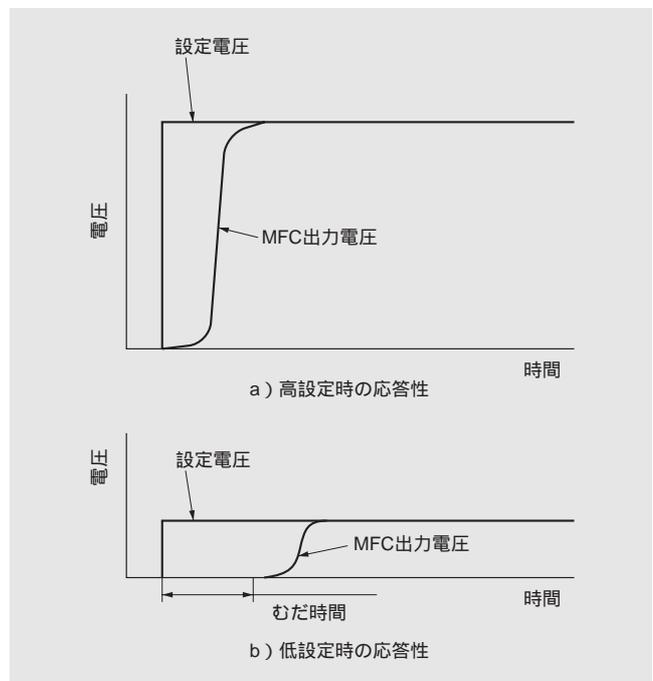


図3 従来MFCの応答速度
Fig. 3 Response time of previous MFC

④ 低設定域の精度向上策

以下の3点の方法で低設定域を精度向上させた。

- (1) 流量センサー使用域の変更
- (2) 直線性の多点補正化
- (3) 流量センサーゼロ点の安定化

以下の項でそれぞれの内容を報告する。

⑤ 流量検出原理

図4に流量センサーの構造図、検出原理図を示す。

ガスはステンレスパイプの中を上流側から下流側に流れる。ステンレスパイプ中央部に上流側、下流側2本の

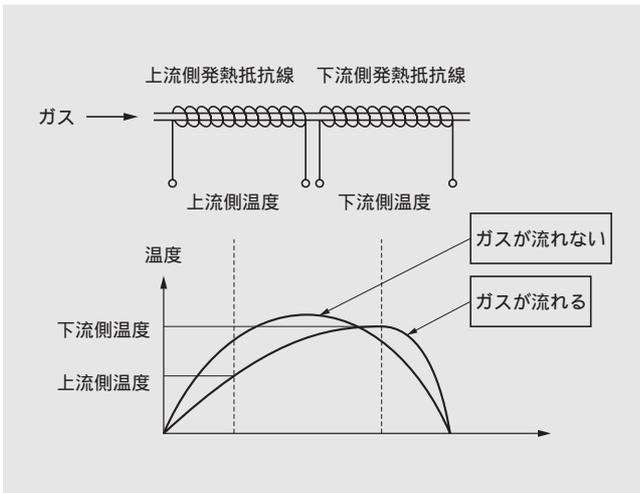


図4 流量センサーの検出原理
Fig. 4 Flow detective principle of flow sensor

発熱抵抗線を巻き付けてあり、一定電流を流して発熱させ周囲温度より約60K高温になっている。ガスが流れないとき、発熱抵抗線の温度分布は上流と下流でバランスし等温度となっている。ステンレスパイプの中をガスが流れるとガスによる熱移動が生じ、上流側の発熱抵抗線より下流側の発熱抵抗線の温度が高くなる。このときの上流側と下流側の発熱抵抗線の温度差すなわち抵抗差はパイプ内を流れるガスの質量流量にほぼ比例する。

⑥ 流量センサー使用域の変更

図5に流量センサーの出力特性を示す。

センサー出力電圧は極小流量では流量に比例するが流量が増えるにしたがって出力電圧がサチュレートし直線性が低下する。従来の標準的なMFCでは直線性の許容範囲である約5mL/min (N₂ガス) をセンサーのフルスケールとして使用してる。

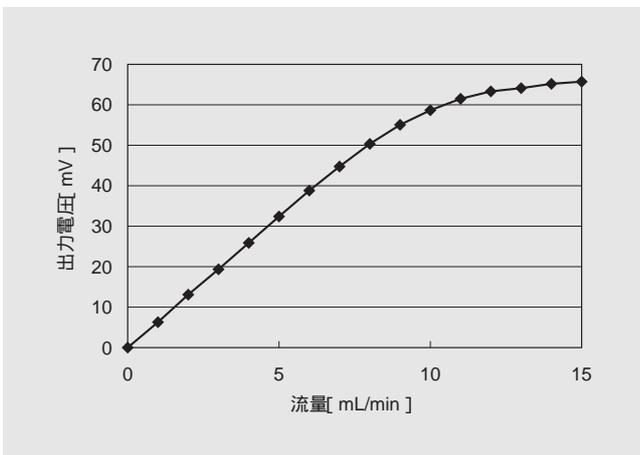


図5 流量センサーの出力特性
Fig. 5 Output characteristic of flow sensor

MFCのフルスケール流量は客先指定により10mL/min ~ 100 L/minの範囲で各種あるが、どのMFCでもフルスケール流量を流した時に、センサーには約5 mL/minのガスが流れるように、センサーと並列に層流素子(センサーパイプと同径のパイプを複数本束ねたもの、図7参照)を配置しガスをセンサーと層流素子に分流させている。層流素子のパイプ本数はMFCのフルスケール流量が大きくなるほど多くなる。

デュアルレンジMFCではこの層流素子のパイプ本数を標準MFCより少なくしてセンサー使用域を従来標準MFCの5mL/minから約3倍の15mL/minまでオーバーレンジして使用することとした。

図6にセンサーのフルスケール流量による直線性とゼロ点ずれの影響度の違いを示す。

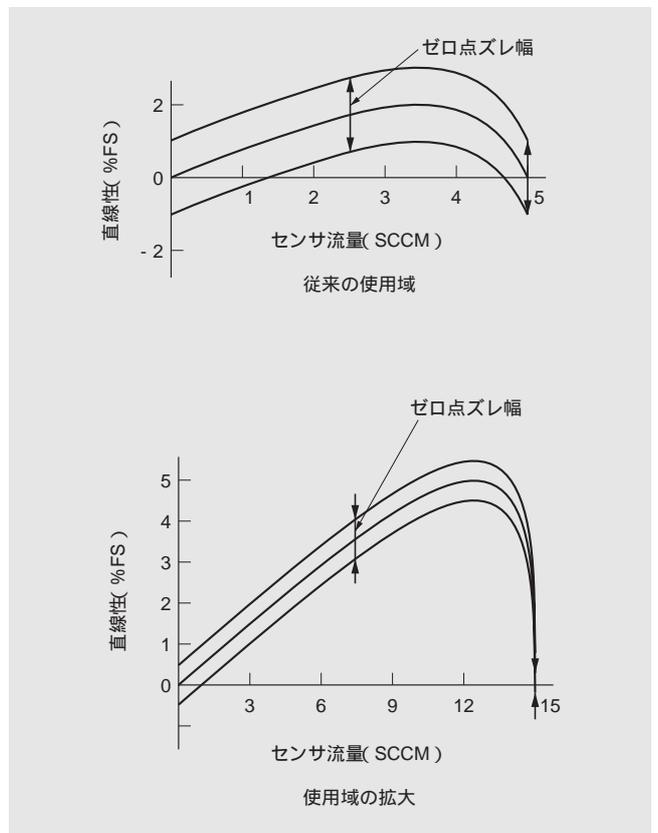


図6 センサーの使用域による直線性とゼロ点ずれの違い
Fig. 6 Difference between linearity and shift of zero point by use range of sensor

図5の標準的なセンサーの使い方と比べ大流量域の直線性は悪くなるものの、低設定時の精度に大きく影響するゼロずれ影響は約1/3に抑えられる。

今日、装置メーカーからの開発要求が大流量側の精度より小流量側重視であること、直線性は項で述べる多点校正により従来より精密に補正できることからセンサーをオーバーレンジして使うこととした。

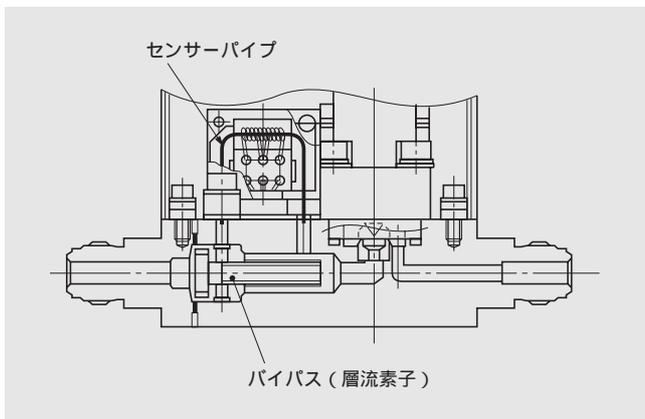


図7 層流素子とセンサーの分流
Fig. 7 Branch of bypass and sensor

⑦ 直線性の多点補正化

センサー出力は回路により増幅し、直線性の補正を行って使用している。従来MFCのアナログ回路による直線性の補正回路はフルスケールの50%の1点校正であった。

デュアルレンジMFCはセンサー使用域を従来アナログMFCの3倍に広げている（ 項で述べた理由による）ため、従来と同じ1点調整の直線性補正回路では図8に示すように補正が不十分である。

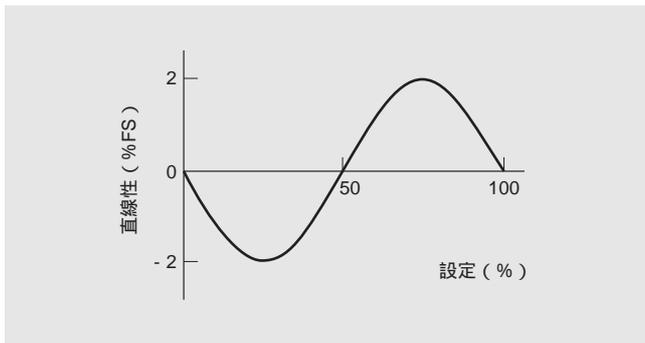


図8 従来MFCの直線性補正方法（1点校正）
Fig. 8 Linearity correction method of previous sensor

そこで、マイクロプロセッサを搭載し、直線性の補正方法を図9に示す多点校正にした。

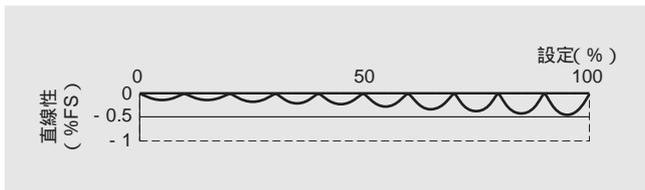


図9 デュアルレンジMFCの直線性（多点校正）
Fig. 9 Linearity of dual range MFC

マイクロプロセッサを搭載したMFCは、精度、直線性の向上、デジタル通信への対応、異常監視等ニーズの多様化に対応するため、数年前から商品化されており、デジタルMFCと呼ばれている。デジタルMFCの回路構成図を図10に示す。

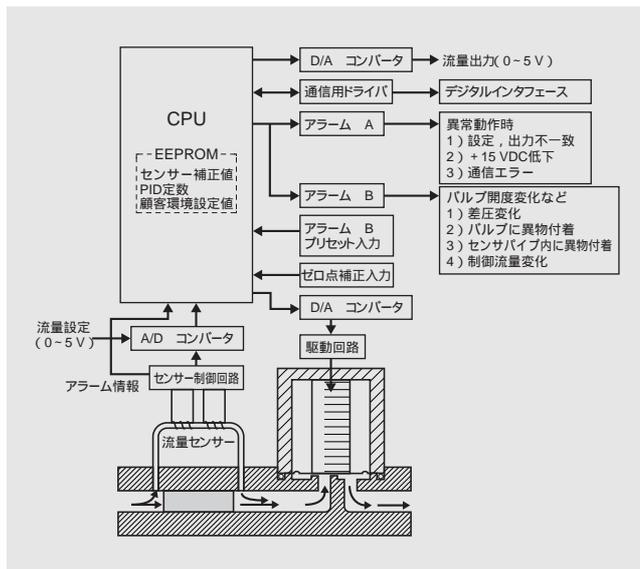


図10 デジタルMFCの回路構成
Fig. 10 Circuit structure of digital MFC

⑧ 流量センサーのゼロ点安定化

(1) ゼロ点ずれの起こり易さ

流量センサーのゼロ点の経年によるずれを小さくすることは、MFCに求められている本質的な性能上の課題であるが、その検出原理上これをゼロとすることは難しく、各社ともゼロ点の調整ボリュームをユーザーに解放し、定期的に調整することで必要精度を維持している現状である。

ゼロ点ずれは上流、下流の感熱抵抗の抵抗バランスが初期状態から変化することで生じる。この対策が困難な理由は感熱抵抗線の抵抗値に対してガスが流れた時の抵抗値変化が極めて小さいため、経年変化によるわずかな抵抗値変化が大きく影響してしまうことである。図11に感熱抵抗の抵抗値変化とゼロ点ずれ量の関係を示す。問題となるゼロ点ずれ量はフルスケールに対して0.1%のずれであり、抵抗値変化率では7.5ppmの微小変化である。

(2) ゼロ点安定化対策

ゼロ点ずれの原因は感熱抵抗線の抵抗値が経年により変化することであるが、問題となる変化率は7.5ppmと小さいため、抵抗値の変化した原因を物理的に測定することは極めて困難である。感熱抵抗線の抵抗値は周囲温度や抵抗測定時の微小電流によっても影響を受けるため抵抗値の測定さえも7.5ppmの精度で行うことは困難である。

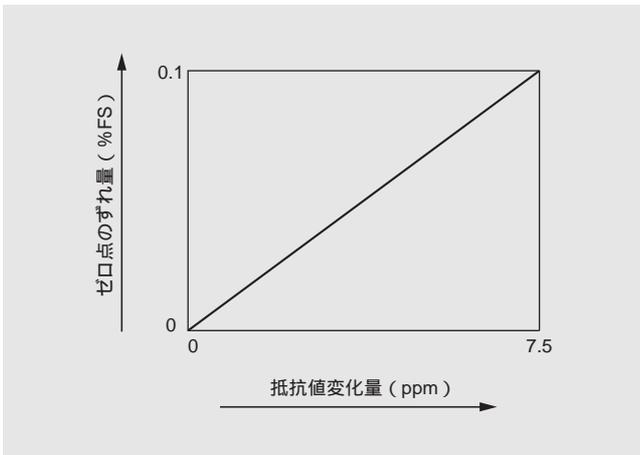


図11 感熱抵抗の抵抗値変化とゼロ点ずれ量
Fig. 11 Shift amount of zero point v.s. change amount of resistance value of heater resistance

そこで、安定化対策として、考えられる抵抗値の経年変化要因をできる限り一定の製造条件で管理し、かつ製作したセンサーのゼロ点を長期に評価し、製造条件との相関を得ることを長年進めてきた。

表2に効果のあったゼロ点安定化対策を示す。

表2 ゼロ点ずれ要因と安定化対策
Table 2 Main causes of shift of zero point and countermeasures

要因	対策
<ul style="list-style-type: none"> 抵抗線ポリイミド絶縁皮膜の熱的特性変化 絶縁ワニスの熱的特性の変化 断熱材の熱的特性の変化 センサーコイルへの機械的ストレスによる熱伝達率の変化 	<ul style="list-style-type: none"> a. エージング条件の最適化 b. 絶縁ワニスの厚み定量化とパイプ表面形状の安定 c. 高耐熱断熱材の選定と定量化 d. スクリーニングの実施

a. エージング条件の最適化

絶縁ワニス、ポリイミド、断熱材の熱的特性を安定状態とするためセンサーは全品エージングを実施している。エージング条件設定の根拠を表3に示す。

表3 エージング条件設定の根拠
Table 3 Reasons for making aging conditions

エージング条件	条件設定の根拠
センサー周囲温度	使用最高温度をベースに適正マージンをプラスして設定
感熱抵抗線温度	絶縁ワニス耐熱温度から設定
加温時間	エージング中のゼロ点測定結果より適正時間を設定 図12に測定結果を示す
ゼロ点安定化特殊エージング	ゼロ点ずれの要因分析より、特に影響の大きい要因を対策する特殊なエージング方法を考案した

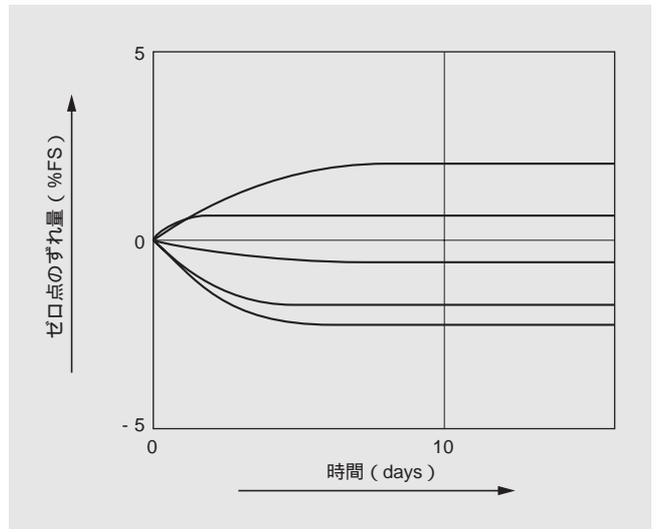


図12 エージング中のゼロ点変化
Fig. 12 Shift of zero point during aging

b. 絶縁ワニスの厚み管理とパイプ表面形状の安定

絶縁ワニスはセンサー構成部材の中で最も耐熱温度が低く熱的特性が変化しやすい。しかも発熱抵抗線とSUSパイプ間の伝熱部材でもあることから熱的特性の変化は発熱抵抗線からSUSパイプへの放熱量を変化させることになり、ゼロ点変動の要因となる。

したがって絶縁ワニスはパイプと発熱抵抗線の絶縁を保つ範囲でできる限り薄い方がよい。また絶縁性能はパイプ表面の形態によって大きく影響を受ける。

表面形態を管理したパイプと管理しないパイプでワニスの厚みを変え絶縁耐圧試験を行った結果、表面形態を管理したパイプは管理しないパイプに比べてワニスの厚みを薄くすることができることが判った。

c. 高耐熱断熱材の選定と定量化

断熱材は発熱抵抗線周囲の空気の対流による流量の誤検出を防ぐ目的で発熱抵抗線周囲に充填している。

断熱材に求められる特性はその用途から、熱容量が小さいこと、熱伝導率が小さいこと、耐熱温度が高いことである。

当社の流量センサー断熱材には上記の特性のほか、断熱材の定量化、定位置化が確実にできることを重要な条件と位置付け、特殊なセラミックペーパーを採用した。

その結果、上流下流の放熱アンバランスによるゼロ点ずれ、断熱材のズレによるゼロ点ずれの起こりにくい設計となっている。

d. スクリーニングの実施

ゼロ点安定化対策を施したセンサーの最終検査工程として、実際の使用条件でゼロ点の安定度を測定するスクリーニング工程を設けた。

スクリーニングは如何に正確にゼロ点の経年変化だけを測定するかに的を絞る、その測定方法を確立した。

流量センサーのゼロ点は経年変化によるズレのほか、周囲温度依存性もある。当初一定温度に設定した恒温槽内でゼロ点を連続測定することを試みたが、高温槽内の

温度は設定が一定でもある幅でふれていることからゼロ点のズレが周囲温度の影響によるものか、経年によるものか判別がつかない問題があった。

採用したスクリーニング方法は、経年によるゼロ点ズレと周囲温度によるゼロ点ズレを判別できる測定条件を決めて周囲温度の影響を受けないようにした。スクリーニング期間は3週間とし、合否判定は測定系の再現性の限界である0.1%とした。期間、基準については今後検査データを解析し見直していく。

⑨ デジタルPID制御による応答時間短縮

制御回路にマイクロプロセッサを搭載し、通常のPID制御に、従来のアナログ回路では実現できなかった以下の制御アルゴリズムを加えて応答時間の短縮を行った。マイクロプロセッサを搭載したデジタルMFCの回路構成図を図10に示す。

(1) 従来MFCの応答むだ時間

図13にコントロールバルブの電圧 - 流量特性を示す。

電圧の低い部分では電圧を上昇させても流量がほとんど変化しない領域がある。これはバルブの漏れ止めに必要な面圧を弁座とダイヤフラム間にかけており、この間では電圧を上昇させても面圧が小さくなるだけでバルブ開度はほとんど変化しないことによる。

図14に通常のPID制御（従来MFC）をさせた場合の流量ゼロからのステップ応答波形とバルブ電圧を示す。設定信号ゼロの状態の時バルブ電圧はゼロであり、流量出力信号もゼロである。設定信号が立ち上がると設定信号と流量出力信号に差が生じ、バルブ電圧が上昇し始める。バルブ電圧上昇速度は設定信号と流量出力信号の差に応じて比例的に決まり、差が多きいと急勾配に上昇し差が小さいと緩やかに上昇する。ここでバルブの電圧 - 流量特性には前述の電圧を上昇させても開度がほとんど変化しない領域があるため、電圧上昇開始からガスの流れ始めるまでの間にむだ時間を生じる。このむだ時間は電圧上昇速度の緩やかな低設定のときに長くなる。

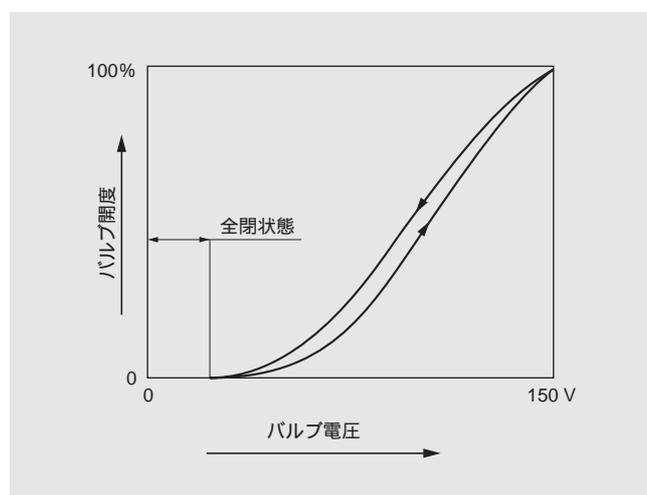


図13 コントロールバルブの電圧 - 流量特性
Fig. 13 Flow v.s. voltage of control valve

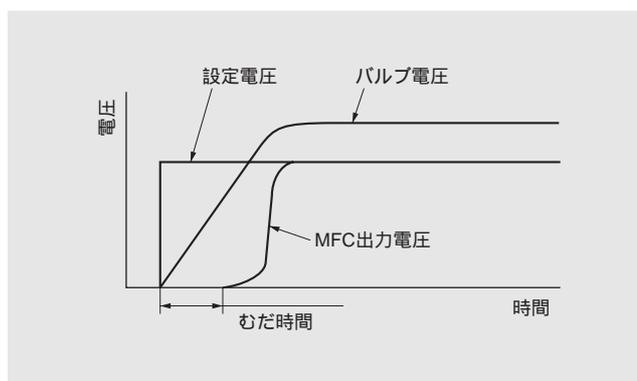


図14 従来MFCステップ応答時のむだ時間
Fig. 14 Loss time at step response of previous MFC

(2) バルブ流れ出し電圧学習機能によるむだ時間排除

デュアルレンジMFCでは(1)のむだ時間排除するため、ガスが流れ始める時のバルブ電圧（流れ出し電圧）をMPUに記憶させ、流量ゼロからのステップ応答時には通常のPID制御に入る前に流れ出し電圧の直前までバルブ電圧を一気に上昇させ、その後PID制御に入るようにした。また流れ出し電圧はガス種やガスの圧力、バルブ特性によって変化するので、毎回の制御時にこれを読み取り、記憶を更新させる流れ出し電圧学習機能を設けた。

本機能を搭載した場合の流量ゼロからのステップ応答波形を図15に示す。むだ時間はほぼゼロとなっている。

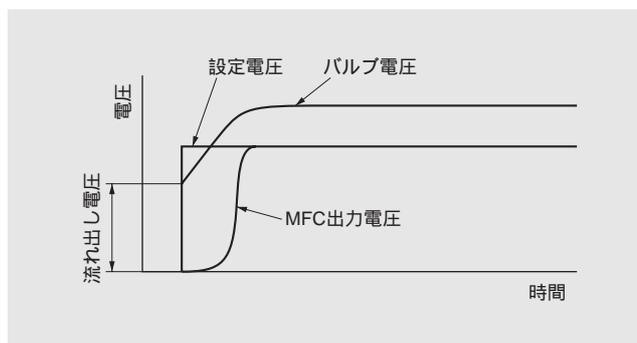


図15 バルブ流れ出し電圧学習機能搭載のステップ応答
Fig. 15 Step response of MFC with learning function of valve voltage just before flow

(3) 従来MFCのP定数（全設定域で共通）

PID定数の内P定数は本来コントロールバルブの流量/電圧によって決めるべきものである。

MFCのコントロールバルブの電圧-流量特性は図13に示すように傾きは一定ではなく小流量でゆるやかで大流量で急勾配となる。したがってP定数は低設定値で小さくし高設定値で大きくするべきである。

流量設定値によってP定数を切り替える回路は従来の

アナログMFCでは回路が複雑になり実装面とコスト面で困難であるため採用できず、P定数は全流量域で一定となっている。

使用するP定数は 流量/ 電圧の大きいフルスケール流量での適正值をつかっている。従って低設定ではバルブの制御速度が必要以上に遅くなり、ガスが流れ始めてから、設定流量に至るまでの時間が長くなる。またむだ時間も長くなっている。

逆にP定数を低設定側の適正值にすると、高設定側ではオーバーシュートや、ハンチング（流量が設定値に定まらず上下を繰り返す）を生じる致命的な動作不良となる。

(4) P定数の切り替え機能による低設定域高速応答化

デュアルレンジMFCはMPU内に5%、10%、25%、50%、75%、100%の各流量設定値でP定数を設定するテーブルを持ち、MFCの調整時にP定数を設定できるようにした。テーブルの流量設定値間の中間値のP定数は上下の流量設定値のP定数から直線式で演算している。P定数テーブル形式を表4に示す。

表4 PID定数テーブル
Table 4 PID constants

設定% 定数	5	10	25	50	75	100
P	P1	P2	P3	P4	P5	P6
I	I1	I2	I3	I4	I5	I6
D	D1	D2	D3	D4	D5	D6

各設定値の間の定数は上下の定数から直線で演算

⑩ デジタルPID制御の欠点

で述べたマイクロプロセッサによるデジタルPID制御は全設定域で応答速度がほぼ一定であり、従来アナログMFCでは実現出来なかった高速応答性を実現することができた。また半導体製造装置の新しいプロセスにも採用され、実用上問題ないことが確認されている。

しかしながら、従来のアナログMFCにはなかった以下の欠点があることが特殊な半導体製造装置でのテストで明らかになった。

- (1) 制御が連続ではなく10msecごとの間欠であること、PID演算に使用している流量信号はセンサー出力をAD変換しマイクロプロセッサに取り込んでいるため遅れがあること、により本質的にはアナログMFCより応答性が悪く、ガス圧力の変化などで急激に流量が変化した場合にはアナログMFCより流量変化に対する追従性が遅い結果となった。図16に圧力変化時の応答波形を示す。

- (2) バルブの流れ出し電圧を学習し、流量ゼロからのステップ応答時にバルブ電圧を流れ出し直前まで持ち上げてむだ時間をなくしているが、流れ出し電圧を誤学習すると、オーバーシュートを発生したり、極端に応答性が遅くなったりすることがある。

例えば、MFCの上流側に別の開閉弁がありMFCのステップ応答指令と同時に上流側バルブの開指令が出た場

合、MFC内には上流側バルブ開と同時にガスが流れ込み、流量センサーはこのガスを検知して、そのときのコントロールバルブ電圧を流れ出し電圧と誤学習してしまうことになる。

この例で誤学習を防止するにはMFCへのステップ応答指令より前に上流側バルブを開くなど、装置側のシーケンスの変更が必要となり、従来MFCとの互換性の問題を生じた。

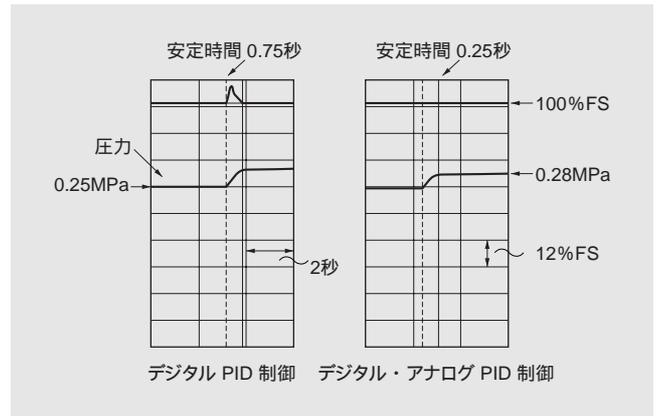


図16 デジタルMFC欠点（圧力変動への追従性）
Fig. 16 Fault of digital MFC (Fokkowing to pressure change)

⑪ デジタル・アナログPID制御方式の開発

デジタルPID制御からの改良点を以下に示す。

- (1) センサー出力信号と流量設定信号を比較してバルブ電圧を決定するPIDフィードバック制御ループは連続処理で信号に遅れのないアナログ回路とした。
- (2) 流量設定信号はいったんマイクロプロセッサに読み込み、P定数テーブルから流量設定値に応じたP定数を取り出し、アナログ回路上のP定数（抵抗）を切り替えるようにした。

PIDフィードバック制御ループをアナログ回路構成としたことで本質的な応答性向上が図れ、設定値によってP定数を切り替える機能だけで、バルブ電圧学習機能を使わなくても実用上問題ない高速応答性を得ることができた。

⑫ 結 言

半導体製造では線幅の微細化や歩留まり向上の目的でSiH₄、NH₃、O₂、WF₆、Cl₂などのガスで大流量と小流量を素早く切り替えてチャンバーに流入させる新プロセスが採用され始めている。

従来のMFC（Mass Flow Controller）では、小流量側の精度、応答速度の点でこの新プロセスには対応できず、小流量から大流量まで高精度で高速応答するMFCの開発要求が装置メーカーよりあった。

当社では従来より取り組み一部は製品にも組み込み実

績のある以下の基本技術を完成させ、まとめ上げることで短期間にニーズに答えるMFCを開発することが出来た。

- 1) 流量センサーのゼロ点安定化技術の深耕
- 2) 流量センサーの基本特性の把握と、ニーズに併せたセンサーの使い方
- 3) マイクロプロセッサ搭載による直線性の向上
- 4) 低設定でも高速応答が得られるPID制御方式の開発
- 5) 従来より実績のある詰まりや再液化などのトラブルの少ないバルブ構造

開発品はデュアルレンジMFCと名付け、大流量と小流量を切り替えて流すプロセスではなくてはならないMFCとなり、装置メーカー、デバイスメーカーの標準採用が進みつつある。

参考文献

- 1) 1997 SEMI Standards 第3分冊 製造装置(ハードウェア)設備及び安全性 P267, P268, P175 ~ 180
- 2) 風間, 他 日立金属桑名工場 研究報告第456号P23, P24, P28 ~ P33