

Feature Article

特集論文

小型静電容量式圧力センサ

畑板 剛久

多機能化・高度化・複雑化された現代の工業製品において、物理現象や状態を取り込み信号変換するセンシング技術は、最も基本的で重要な技術の一つと言える。中でも、多くのガスや液体をコントロールして行う半導体/FPD/LED/太陽電池パネル製造プロセスでは、圧力センサは必要不可欠な構成要素である。堀場エステックではマスフローコントローラをはじめとする各種流量・圧力制御機器に搭載可能な小型で低コスト、高信頼性の静電容量式圧力センサを開発した。

はじめに

マルチチャンバ化された近年の半導体製造装置では、圧力変動によるマスフローコントローラの流量精度への影響が大きな問題となっている。従来はラインレギュレータ、圧力センサをマスフローコントローラ前段のガスラインに個別に取り付けて対応していた。しかし、ガスラインの小型・軽量化、高性能化、低コスト化への要求から圧力変動影響を受けないマスフローコントローラを求める声が大きくなっており、それに応えて堀場エステックでは圧力変動影響を受けない次世代マスフローモジュール SEC-Z700シリーズとCRITERION D200シリーズをリリースした。どちらにも内部に小型の圧力センサが組込まれており、SEC-Z700シリーズには今回、自社開発した静電容量式圧力センサが搭載されている。

従来より製品化されている圧力コントローラへの用途はもちろん、堀場エステックの主力製品であるマスフローコントローラにも圧力センサが搭載されることで、組込用圧力センサの需要は大幅に増加し、今後もその重要性が増すことは明らかである。

堀場エステックが開発した静電容量式圧力センサは、小型、高感度、高耐圧、高い安全性といった組込用圧力センサとしての重要な要素を備えており、多くの製品への展開が期待されている。流体計測・制御分野でトップサプライヤーを目指す、HORIBA Groupにとってキーコンポーネントのひとつである。

本稿では、静電容量式圧力センサの測定原理の説明から堀場エステック製センサの特長、量産化に移行する上でキーとなった製造技術について述べる。

静電容量式圧力センサについて

静電容量式圧力センサ

静電容量式圧力センサ(キャパシタンスマノメータ)とは、圧力の変化に応じて変形するダイアフラムの変位量を静電容量(キャパシタンス)の変化として計測し、圧力に換算する方式のセンサである。ダイアフラムの変位量から圧力を直接計測する構造であることから、被測定ガスの種類に関わらず計測することができるため、複数のガス種や混合ガスの圧力を測定するのに適している。

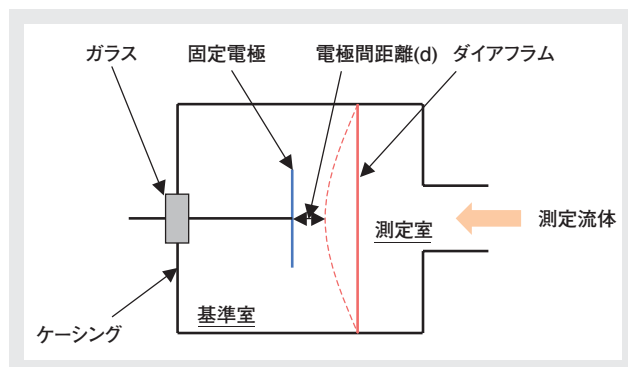


図1 静電容量式圧力センサ 内部模式図

構造

代表的な静電容量式圧力センサの構造を図1に示す。圧力センサ本体はダイアフラム基準室と測定室に隔てられており、基準室側にダイアフラムと微少な距離(d)において固定電極が配置され、ガラス封着によりケーシングと絶縁されている。絶対圧計では、基準室は外部から密閉されており、大気圧の変動影響を受けない。測定室側の圧力が基準室の圧力より高くなると、ダイアフラムは基準室側にたわみ、固定電極とダイアフラム間の距離が小さくなって、その間のキャパシタンスは増大する。測定室の圧力が低下するとダイアフラムのたわみは小さくなりキャパシタンスは減少する。この変化を電圧変化として読み取ることによって圧力を測定する。

静電容量と電極間距離の関係式を以下に示す。

$$C = \epsilon S / d$$

C : 静電容量 ϵ : 基準室の誘電率
S : 電極面積 d : 電極間距離

式に示されているように静電容量は電極面積Sに比例し、電極間距離dに反比例する。このことから、より高出力のセンサを作るためには出来るだけ電極面積Sを大きくし電極間距離dを小さくする必要がある。また、円形ダイアフラムとたわみの関係は周囲固定の円形平板たわみ式から、以下の通りとなる。

$$W = 3P \cdot a^4(1 - \nu^2) / (16E \cdot h^2)$$

W : ダイアフラム中心位置のたわみ P : 圧力
a : ダイアフラムの半径 h : ダイアフラムの厚み
 ν : ダイアフラムのポアソン比 E : ダイアフラムの縦弾性係数

周囲固定円形平板のたわみの模式図を図2に示す。

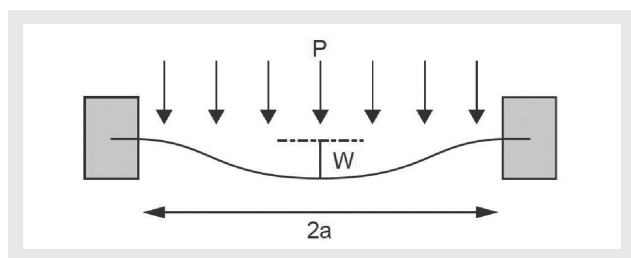


図2 周囲固定円形平板のたわみ

ダイアフラムのたわみは半径の4乗に比例し、厚みの2乗

に反比例する。大きな変位量を得るにはダイアフラムの径を大きくして、厚さをうすくする必要があるがそれに伴い圧力が印加された時の内部応力も増大してしまう。内部応力が材料の耐力を超えると塑性変形を起こしセンサの再現性が得られなくなるので、測定する圧力レンジに応じた適切なダイアフラム設計が必要となる。また、内部応力に対して十分な強度を持った材料選択も重要である。

堀場エステック製圧力センサの特徴

マスフローモジュール Z700シリーズに搭載された静電容量型圧力計の外観を図3に主な仕様を表1に示す。

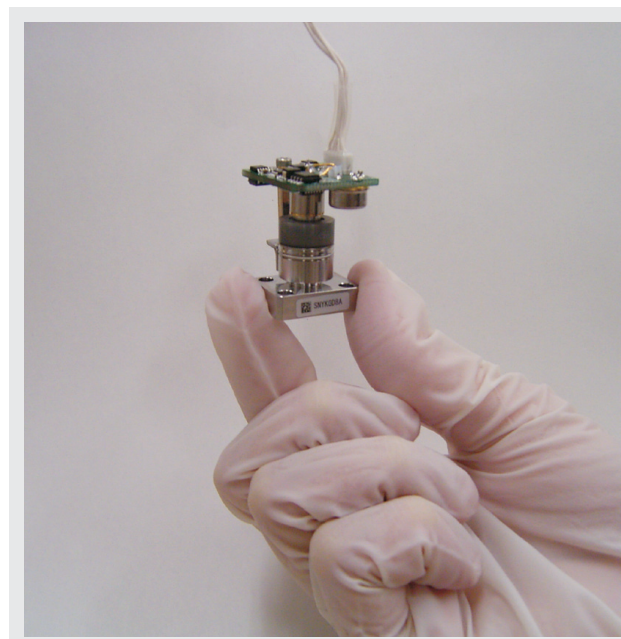


図3 外観

表1 Z700搭載圧力センサの主な仕様

フルスケール	700kPaA
スパン幅	≥1.5V
精度*	±1%F.S.
保証耐圧力*	フルスケールの2倍
破壊圧力	フルスケールの5倍
温度影響*	≤0.5%F.S. (20℃~50℃. 20℃での出力を基準)

* : Z700搭載の出力仕様

小型・高感度

非常にシンプルな構造を採用することで、ヘッド部の外径が13mm以下と超小型のセンサヘッドを実現した。また、歪み式など他の方式より比較的高出力が得られる静電容量式であることに加えて、電極とダイアフラム間の距離を

Feature Article 特集論文 小型静電容量式圧力センサ

自社開発したガラス封着技術で極限まで小さくすることで、小型にもかかわらず高感度なセンサとなっている。

高耐圧・高信頼性

ダイアフラムに材料強度が非常に高い特殊高性能合金を採用することで、小型・高感度のセンサにも関わらず高耐圧と高い安定性を実現している。金属製ダイアフラムは古くから多くの実績があり信頼性が高く、材料強度の高い特殊合金は、小型化に伴って板厚を薄く設定したダイアフラムでも十分な耐圧を確保している。また、耐食性にも優れており、多種の腐食性ガスを使用する半導体製造プロセスでの使用にも適している。

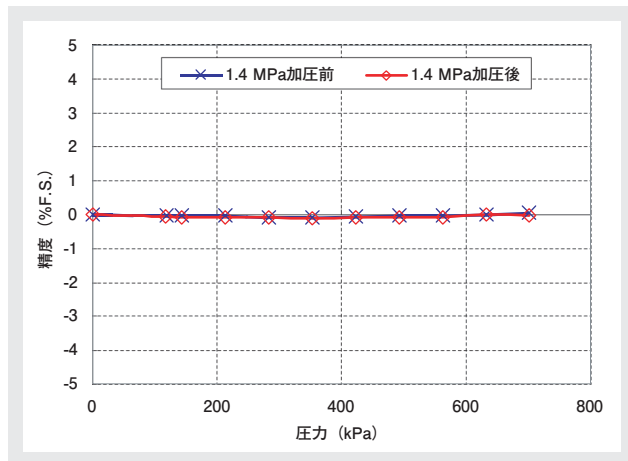


図4 1.4MPa(F.S.の2倍)加圧前後の精度変化

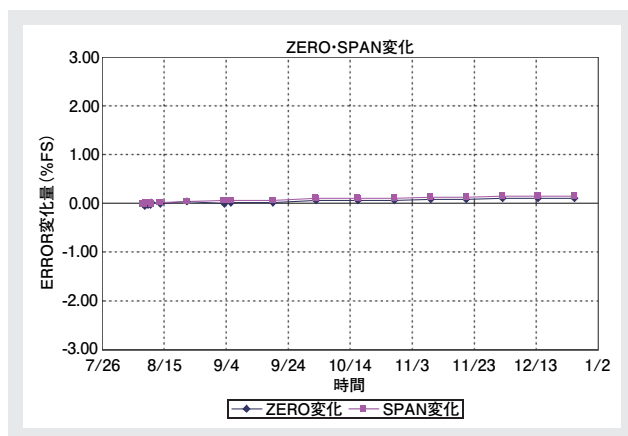


図5 繰返し加圧による安定性試験(0⇔700kPa 250万回)

オイルレス

小型で低価格の歪み式圧力センサでは、力を伝達する媒体の内部にオイルを使用しているタイプのものが多い。

それに対して、堀場エステック製センサでは静電容量式を採用しており、オイルを一切使用しておらずガスラインやチャンバへの安全性が高い。

製造技術の確立 (半導体レーザ溶接・ガラス封着)

静電容量式圧力センサは構造上、オイル封入タイプの歪み式圧力センサと比較して高価になる傾向がある。堀場エステックでは組込み用センサとして有利な特長は保ちつつ、できるだけコストを下げるためにいくつかの新たな社内製造技術を確立した。その中でも特に、品質を確保するために重要な半導体レーザ溶接技術とガラス封着技術について説明する。

半導体レーザ溶接

静電容量式圧力センサの最も重要な製造技術の一つとして、ダイアフラムと本体との接合技術が挙げられる。精密でクリーンな仕上りが要求される半導体製造関連部品の溶接方法としては、主にTIG溶接、電子ビーム溶接、レーザ溶接などがあるが、堀場エステックでは、溶接方法として今後普及する可能性が高い半導体レーザ溶接を採用した。

半導体レーザ溶接機の構造

半導体レーザ素子(レーザダイオード:LD)の出力は単体では数W程度とCO₂レーザやNd:YAGレーザと比べて遥かに小さいので、加工用途に利用するためにはレーザダイオードを数十個、横に並べて集積したレーザダイオードバーや、そのバーを十数枚積層してレーザスタックとして使用する。図6に半導体レーザスタックの内部イメージを示す。さらに各素子からでたレーザ光は集光レンズによって溶接用途にも使用できるエネルギー密度になるまで集光される。

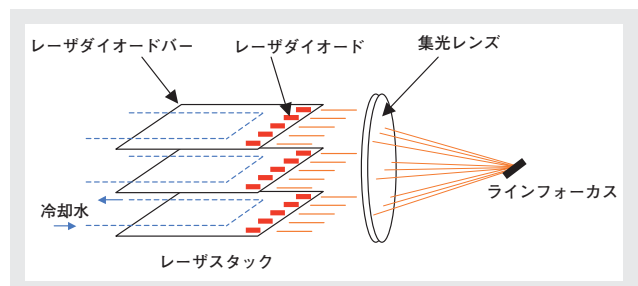


図6 半導体レーザ溶接機 内部イメージ

半導体レーザー溶接の特徴

半導体レーザー溶接の最大の特長はエネルギー変換効率の高さである。CO₂レーザー溶接やNd:YAGレーザー溶接のシステム効率が10%以下であるのに対して、半導体レーザー溶接は約30%と高い。また、発振波長がCO₂、YAGと比較して短波長であるため、金属への吸収が良い。半導体レーザー素子からの発光を直接集光するシンプルな構造であるため信頼性が高く、メンテナンスコストが低い。レーザーダイオードバーやスタックからのレーザー光を光学系で集光させる構造から、ビーム形状が横長になってしまう特徴があるが、圧力センサのようにダイアフラム等の薄膜を円周上に溶接するのにはむしろ適しており欠点とはならない。これらの点から半導体レーザー溶接を採用することは圧力センサを量産する上で非常に大きなメリットになると考えられる。

ガラス封着

堀場エステック製の圧力センサは、固定電極の絶縁封止にガラス封着を用いている。金属とガラスの接合を応用したガラス封着技術の歴史は古く、真空室や封止室を使用する多くの装置や部品に使用されてきた。ガラス封着を利用した絶縁気密端子は数多くのメーカーから発売されており、標準品であれば安価に入手することができる。しかし、小型で高感度の圧力センサを実現するためには、固定電極とダイアフラム間の距離(電極間距離)をできるだけ小さくし、ミクロンオーダーでのコントロールが必要となる。堀場エステックでは電極間距離に大きな影響を与え、また、製品の品質と歩留まりに直結するガラス封着工程を社内技術として確立することで、高感度・高品質で低コストな圧力センサを実現することが可能となった。

おわりに

この度、紹介した静電容量式圧力センサは、特殊高性能合金を使用したダイアフラムと非常にシンプルな構造のセンサヘッドにより、高感度かつ小型の圧力センサを実現することができた。また、独自の製造技術を社内に確立することで、高性能センサを安定的に供給することが可能となった。

本センサは、堀場エステックの次期主力製品と位置付けられるプレッシャーインセンシティブ対応マスフローモジュール Z700シリーズに搭載され、圧力ベースで流量計

測部に新方式の差圧検出方式を採用しているマスフローモジュールCriterionシリーズや各種圧力コントローラへの展開が期待されている。

センサ開発に伴い確立した半導体レーザー溶接技術や精密ガラス封着技術はHORIBA Groupに幅広く応用可能な基礎技術であるため、今後の高機能・高品質な新製品開発にも貢献できるものと考えられる。



畑板 剛久

Takehisa Hataita

株式会社堀場エステック
開発本部 VEGA プロジェクト
ジョブリーダー