

技術資料

1、 piezoアクチュエーターとは

piezoアクチュエーターは電気エネルギーを変位や力といった機械エネルギーに変換する素子です。その特徴は以下に挙げられます。

- ・変位分解能（サブナノメートル以上）
- ・高速応答性（0～数十kHz以上）
- ・発生力（最大数十ton）
- ・高効率（機械的動作ロスが無い）

圧電材料の歴史・用途

19世紀、水晶に圧力を加えると電圧が発生するということから圧電効果は発見されました。用途としては、主に圧力センサーやライターの発火用素子、マイクロフォンなどがあります。圧電材料に電圧を印加することで、圧力を発生する逆圧電効果は、最初はソナーなど超音波振動子として実用化されました。

そして現在、圧電材料は広く各分野に生かされています。

- ・光ファイバーの光軸合わせ
- ・光学・レーザー部品の位置決め
レンズフォーカスの制御
反射ミラーの制御
- ・精密加工
対象物の位置決め
加工刃物の位置制御
- ・細胞工学・遺伝子工学
マイクロマニピュレーター
- ・精密バルブ駆動
- ・インクジェット
- ・超音波・その他の振動生成
微細加工、振動制御
- ・piezoモーター
- ・SPM顕微鏡

他にない優れた性質を持つpiezoアクチュエーターですが、それらの特徴を生かす為に、piezo素子の特質・性能を十分に理解してご検討ください。

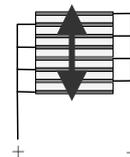
2、 piezoアクチュエーターの種類

piezo素子にはさまざまな構造のものがありますが代表的なものについてご紹介します。

piezo素子は電氣的には容量性負荷なので、駆動piezoドライバの選定には注意が必要です。選定方法については後述の「piezoドライバの選定」を参照ください。

積層piezoアクチュエーター

圧電材料を薄く積層しそれぞれに電極を配置することで駆動電圧を低くしたタイプです。



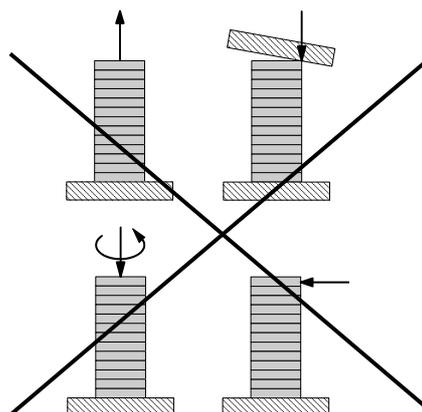
特徴

- ・最大変位量は全長の0.1%程度
- ・発生力が大きい
- ・高速応答性
- ・低駆動電圧

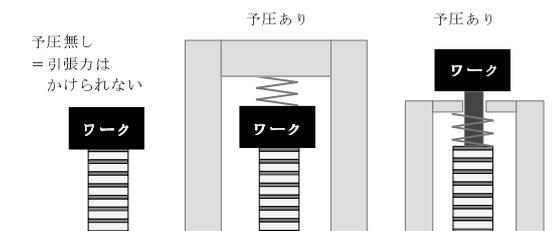
注意点

- ・静電容量値が比較的大きい
- ・変位軸の圧縮方向以外の外力「引張り、片当たり、トルク、曲げ等」に弱い

悪い設置例（矢印は外力）

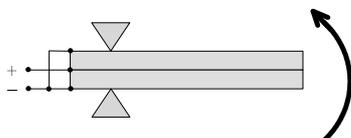


特にpiezoアクチュエーターをダイナミックに振動させる用途では、慣性力などの影響で不用意な外力がpiezoアクチュエーターに働かないよう注意が必要です。通常はpiezoアクチュエーターへ予圧を与えたり、変位を正確にワークへ伝達するガイド機構などを用いることで危険な外力を抑制します。



バイモルフピエゾアクチュエーター

ピエゾ板を2枚張り合わせた構造で、一方は長手方向に伸び、もう一方は縮む動作をすることで屈曲変位します。



特徴

- ・変位量が～数 mm と大きい

注意

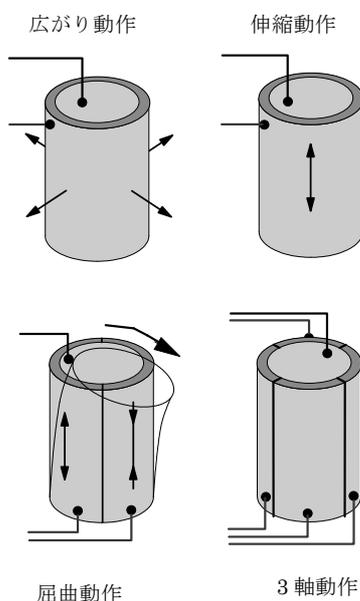
- ・発生力は小さい
- ・応答速度は数百 Hz 程度
- ・動作が円弧状

応用例

- ・織り機の糸制御、バルブ駆動、圧電ポンプ

チューブタイプピエゾ

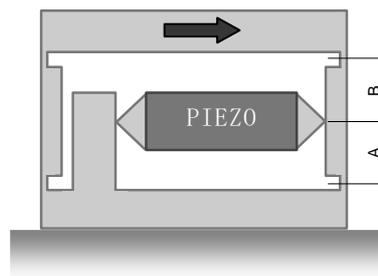
円筒型のピエゾ素子の内面と外面に電極を配置します。外側の電極を分割したものはバイモルフピエゾと似た動きとなり屈曲変位を発生させます。3軸動作する素子もあり、SPM顕微鏡・インチワーム・ミラー制御などに用いられています。



ガイド機構、および変位拡大機構

ピエゾアクチュエーターの変位を下図のような一体弾性ヒンジを用いたガイド機構に伝達します。単一の素材から高精度加工された機構は、「優れた直進性・摩擦レス・磨耗レス・バックラッシュレス・高剛性」等の特徴をもって高分解能な動きを得ることができます。

また、下図の A・B の長さを変化させることで変位倍率を得る事ができます。



特徴

- ・大きな変位量が得られる
- ・ピエゾの静電容量値を小さく抑える
- ・高い直進性
- ・機構に機械的ロスが無い
- ・高い変位分解能

3、ピエゾアクチュエーターの基本特性

変位量

ピエゾアクチュエーターは電圧を印加することで変位を発生します。

(例)

積層ピエゾアクチュエーターは全長の 0.1% の最大変位量が得られますが、200 μ m の変位量を得るには全長 200mm ものピエゾアクチュエーターが必要となります。しかし、変位拡大機構をもつ MZ-200L ピエゾアクチュエーターは、260 μ m の大きな変位量にもかかわらず本体の変位軸寸法はわずか 35mm です。

分解能 (Open Loop)

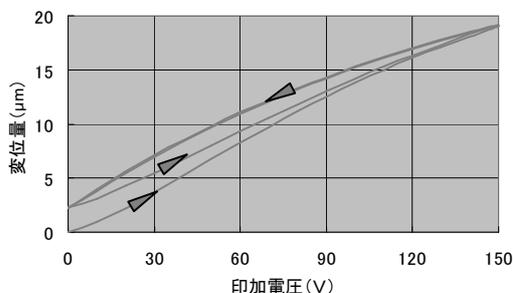
ピエゾアクチュエーターはサブナノメートル以上の変位分解能を有しています。電圧を印加することで動作するため、印加電圧のノイズはそのままピエゾアクチュエーターの変位分解能として現われます。

おおよその変位分解能を以下の式で予測します

$$\text{分解能} = \frac{\text{ストローク} \times \text{電圧ノイズ}}{\text{駆動電圧レンジ}}$$

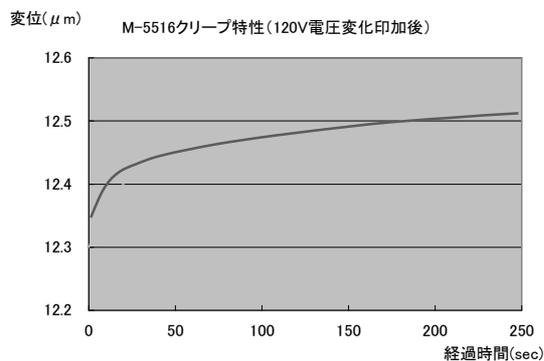
ヒステリシス

ピエゾアクチュエーターの変位特性をグラフに表しています。印加電圧と変位量の関係は完全な比例ではなくヒステリシス特性がみられます。ヒステリシスは変位量のおよそ10%現われます。



クリープ

クリープとはピエゾアクチュエーターにステップ状の電圧変化を印加したとき、下図に見られるような長時間にわたる変位変化です。その量は、電圧変化量、電圧変化の符号などによって変化します。



連続振動や電圧変化パターンのある繰返しなどの場合にはオープンループ制御でも変位再現性が得られる場合があります。

静電容量値

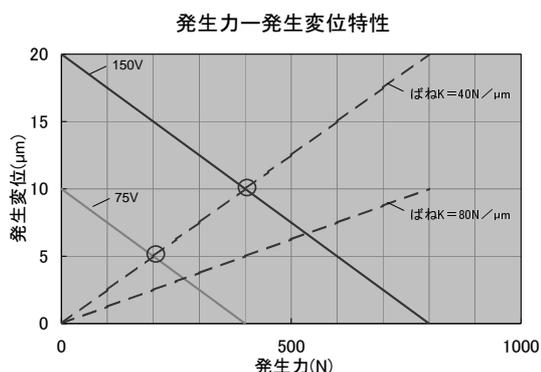
ピエゾアクチュエーターは構造は平行平板コンデンサと同じで電氣的に容量性負荷です。

スティフネス

ピエゾアクチュエーターの変位軸の剛性をスティフネスとして表します。その値は「発生力・外力を受けた時の変位、共振周波数」などと関係があります。

発生力

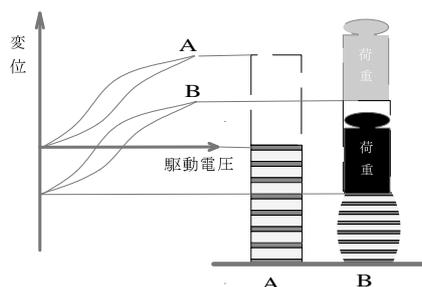
ピエゾアクチュエーターの発生変位が最大の時(最大電圧印加時)に、変位をゼロ位置まで戻す力を最大発生力といいます。言い換えると「最大発生力はピエゾアクチュエーター両端を完全拘束して最大電圧印加した時に発生する力」となります。つまり最大発生力が発生している時に発生変位はありません。



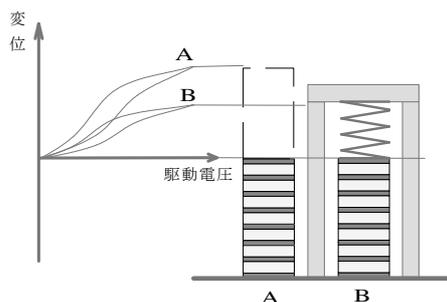
図は「ピエゾアクチュエーター(最大変位量 20μm、スティフネス 40N/μm)の発生力-発生変位特性を印加電圧別にあらわしています。破線は外部拘束物(ばね)の剛性を表していて、その交点は外部拘束物がある状態での発生力・発生変位をあらわします。より高剛性の外部拘束物(傾斜の少ない破線)がある時には発生変位は減少し、発生力は大きくなります。

外力と変位

死荷重が与えられたとき初期位置は変化しますが、その位置からピエゾアクチュエーターは最大変位量まで動作します。



ばね性の外力が存在するとピエゾアクチュエーターが変位することで反力が変化するためにピエゾの変位量は図のように減少します。ばね定数とピエゾのスティフネスのバランスでこの変位ロス量は変化します。



共振周波数

ピエゾアクチュエーターの共振周波数 (f_0) は spring / mass 振動理論でモデル化すると下式で求められます。ピエゾアクチュエーターにワークを載せる場合には、増加質量を計算式に加算しおよその共振周波数を推測できます。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M_0}}$$

k - ピエゾスティフネス (N/ μm)

M_0 - 質量 (kg)

f_0 - 共振周波数 (kHz)

ピエゾアクチュエーターは共振周波数では使用できません。共振周波数またはそれに近い周波数では、ピエゾアクチュエーターの変位振幅は非共振時よりも極端に大きくなります。不測の変位量振幅によってピエゾアクチュエーターはダメージを受ける可能性があります。安全に使用できる周波数の目安は共振周波数の約 30% 以下です。

応答速度

ピエゾアクチュエーターの最大応答速度は、その共振周波数 (使用条件における) により決まります。

$$T_{\min} \approx \frac{1}{3f_0}$$

T_{\min} - 最大応答速度

f_0 - 共振周波数

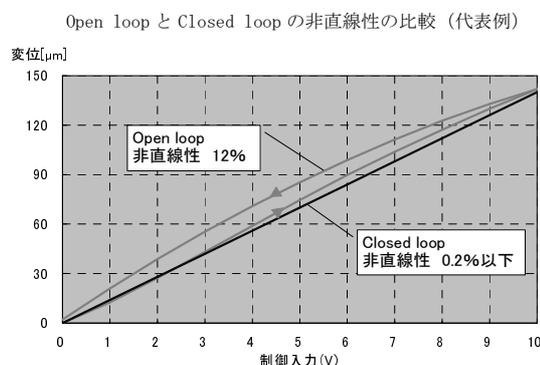
優れた応答性は振動制御、衝撃力生成、高速スキャン動作、高速バルブ制御などに利用されています。高速応答させる際には、流れる電流量も大きくなるのでピエゾドライバも十分な電流容量を持った選択が必要です。詳しくは「ピエゾドライバの選択」を参照ください。

ピエゾアクチュエーターの自己発熱

ピエゾアクチュエーターの自己発熱は振動周波数・変位振幅量の増加とともに増えます。停止時・低速動作時にはほとんどありません。使用温度範囲を超えないようご使用ください。テストデータを元にアドバイスできますのでお気軽にご相談ください。

4. Closed-Loop 制御 (変位フィードバック)

ピエゾアクチュエーターの位置変化を変位センサーで読み取りし、指令信号との誤差を減らす制御です。これを Closed-Loop 制御と呼びます。これにより「ヒステリシス・クリープ・外力変動による位置変化」等を減らした高精度・高安定な動作を得られます。



変位センサー

『ひずみゲージ』は主に機構の変形部に配置され、その出力値変化を元に Closed loop 制御します。高精度な制御ができ、特に低コストです。スペースをとらないのでこれを内蔵しても装置を小型化できる利点があります。

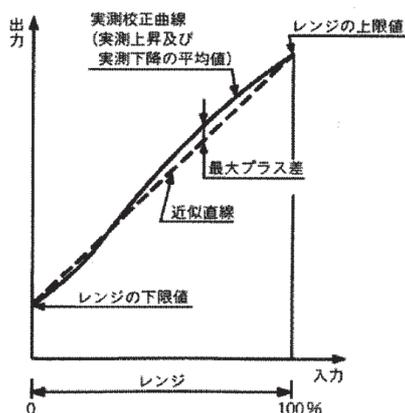
『静電容量型変位計』は変位箇所を非接触測定して Closed loop 制御します。そのため極めて高精度・高安定な制御が可能です。

分解能 (Closed-Loop)

ピエゾステージを CLOSEDLOOP で静止させた時の動きを外部の高精度静電容量型変位計で測定します。高精度静電容量型変位計出力で 6 秒間測定した時の実効値を分解能とします。

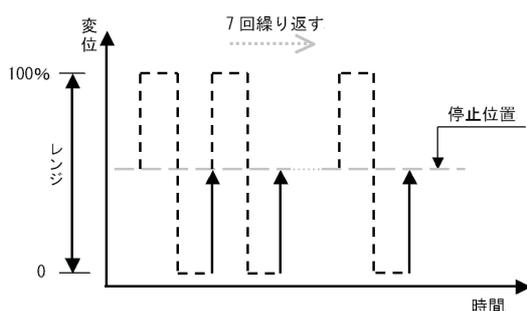
非直線性

始点から終点（フルストローク）までの一定方向に順次位置決めを行い（往路）、更に終点から始点まで同じように位置決めを行います（復路）。それぞれの基準位置と実測変位量の差を測定。始点と終点の偏差を0に補正後、その最大値と最小値の差に1/2乗じ、±をつけて表します。



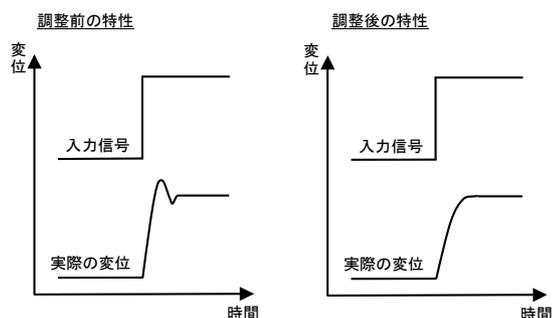
繰り返し位置決め精度

任意の1点に同じ方向からの位置決めを7回繰り返す。その停止位置を外部変位計で計測して変位を求めます。最大誤差と最小誤差を足した値に1/2を乗じ、その値に±をつけた値を繰り返し位置決め精度とし変位で表します。



Closed-Loop 周波数特性

通常、Closed-Loop 周波数特性は「ピエゾアクチュエーターの機械的特性・ピエゾドライバの特性・変位センサーの特性・お客様のご要望」等の情報をもとに、工場出荷時に最適に調整し出荷されます。



5. ピエゾドライバの選定

出力電圧レンジ

ピエゾアクチュエーターの駆動電圧にあわせて選択します。

電流容量

● 静的駆動の場合

数 Hz 以下のゆっくりとした動作においては、電流が極めて小さくなるので、ピエゾドライバの電流容量が問題になる事はほとんどありません。

● 正弦波駆動の場合

下記の計算式で電流最大値を求める事ができます。

$$I_{rms} = \pi \cdot f \cdot C \cdot V_{p-p} \cdot 1/\sqrt{2}$$

V_{p-p} : peak-peak 駆動電圧 (V)

C : 静電容量値 (F)

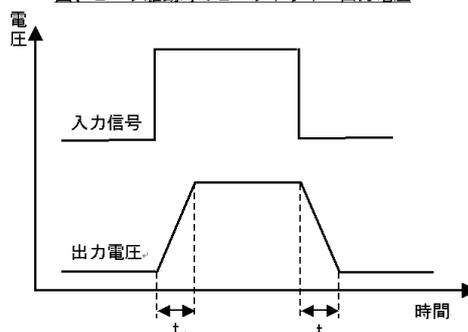
I_{rms} : 実効値電流 (A)

f : 駆動周波数(Hz)

● ステップ駆動の場合（応答速度重視）

下記の計算式で応答速度を満たすための電流最大値を求める事が出来ます。ある電圧変化を希望時間で印加するには、ピエゾアクチュエーターに相応の電流をながす必要があります。その為には最低限必要な電流容量をもったピエゾドライバの選定が必要です。

図、ピエゾ駆動時のピエゾドライバ出力電圧



上記の波形のように、応答時間 t で変位させたい場合には、以下の計算式で必要な電流値を求めます。

$$I = \frac{(C \times \Delta V)}{t}$$

ΔV - 電圧変化 (V)

I - 電流 (A)

C - 静電容量値 (F)

t - 応答時間 (sec)

出力電流の各表現方法の説明

● 最大電流

ピエゾドライバが抵抗負荷において DC で連続して流せる最大電流。

表記例：± 1.3 A

● ピーク電流

一定期間に一定の繰り返し時間で流せる電流。

(当社のカタログ値では、1 msec に 10Hz 以下で繰り返し流せる電流となります。)

表記例：± 2 A_{pk} (1msec)

● 実効値電流

ピエゾドライバが容量負荷において AC (正弦波) で連続して流せる最大電流。

$$\text{実効値電流} = \pi \cdot f \cdot C \cdot V_{p-p} \cdot 1/\sqrt{2}$$

V_{p-p} : peak-peak 駆動電圧 (V)

C : 負荷の静電容量値 (F)

I_{rms} : 実効値電流 (A)

f : 駆動周波数 (Hz)

表記例：1.67 A_{rms}

● 平均電流

ピエゾドライバが容量負荷において AC (正弦波) で連続して流せる平均電流。

平均電流 = 実効値電流 ÷ 1.11

表記例：1.5 A_{avg}

ピエゾドライバの主な機能

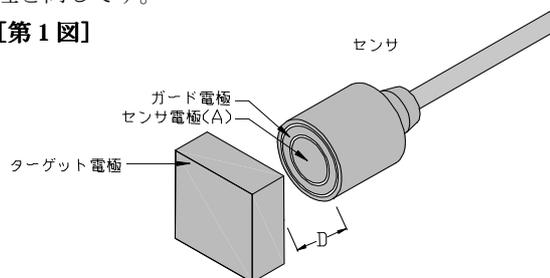
- ・電圧増幅 (外部信号入力時)
- ・定電圧出力
- ・4 象限電流出力 (容量性負荷に対応)
- ・広帯域周波数特性 (DC~MHz)
- ・低ノイズ
- ・オフセット電圧機能
- ・フィードバック回路
- ・保護回路

6. 静電容量型変位計

基本原理

静電容量型変位計はコントローラとセンサプローブで構成されています。測定方法は基本的にコンデンサの原理と同じです。

【第 1 図】



静電容量型変位計ではセンサとターゲットを平行な電極とみなし、その 2 極間に形成される各電極の面積、電圧、媒質の誘電率(測定電極とターゲット間の媒質—通常は空気となる)、変動する静電容量値は次のような関係式となります。

$$Q = CV \dots \dots \dots (1)$$

Q : 電荷量 (C)

C : 静電容量 (F)

V : 端子間電圧 (V)

静電容量の関係式は以下のようになります。

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{D} \dots \dots \dots (2)$$

ϵ_0 : 誘電率

A : センサ電極の面積 (m²)

D : センサ電極、ターゲット電極の距離 (m)

センサ電極面積 (A)、誘電率 (ϵ_0) が一定であれば、静電容量値とセンサ電極、ターゲット電極の距離 (D) は反比例します。また静電容量 C に電流 I を流した時、コンデンサの端子間電圧 V は

$$V = \frac{I}{2\pi f C} \dots \dots \dots (3)$$

となります。

(2)を代入すると

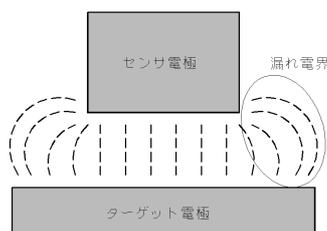
$$V = \frac{ID}{2\pi f \epsilon_0 A} \dots \dots \dots (4)$$

電流 I が一定であれば、端子電圧 V はセンサ電極、ターゲット電極の距離 (D) に比例します。

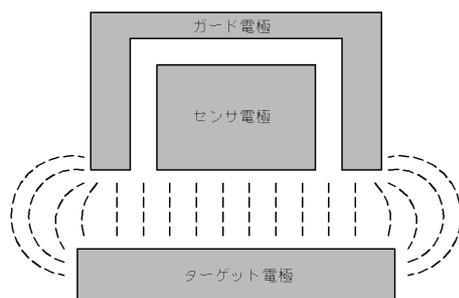
計測原理

基本原理にあるように測定対象物の位置変化を静電容量値の変化として測定し、アナログ電圧に変換して出力します。理想通りに動作すれば、端子間電圧 (V) と距離 (D) は完全に正比例の関係となりますが、実際には第 2 図のようにセンサ電極とターゲット電極間に漏れ電界がでできます。

【第 2 図】

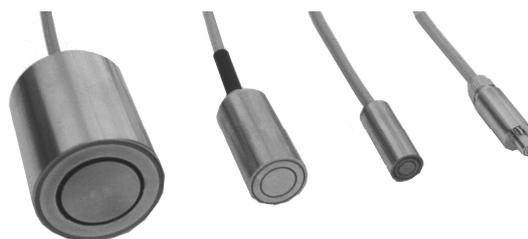


【第 3 図】



これを軽減するため第 3 図のように擬似センサ電極となるガード電極を用意します。ガード電極はセンサ電極と同電位に保たれて機能します。こうすることでセンサ電極内の漏れ電界を軽減でき静電容量値 (C) と距離 (D) の関係を理想値に近づけることができます。またコントローラ側で CV 変換を行い直線性補正回路を設けることでさらに理想直線に近づけることができます。

注意点としてセンサ電極とターゲット電極の平行度が保たれていないと、片側の電極エッジの漏れ電界が大きくなり誤差となります。センサ電極とターゲット電極の静電容量を検出するため、距離は平均化した値となります。そのため小さい面積のターゲットとの距離を測定するにはセンサ電極面積をより小さくする必要があります。測定用途に最適なセンサを選ぶことで、高精度な測定を行うことができます。

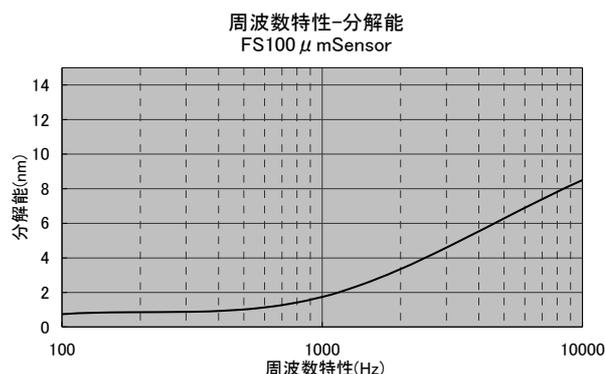


主な特徴

① 高分解能

ダイナミックレンジによってはサブナノメートルの分解能を持ち、レーザ干渉計に匹敵します。ナノテクノロジーにおける精密位置決め、姿勢制御に適しています。第 4 図のように周波数特性によっても分解能が変わります。

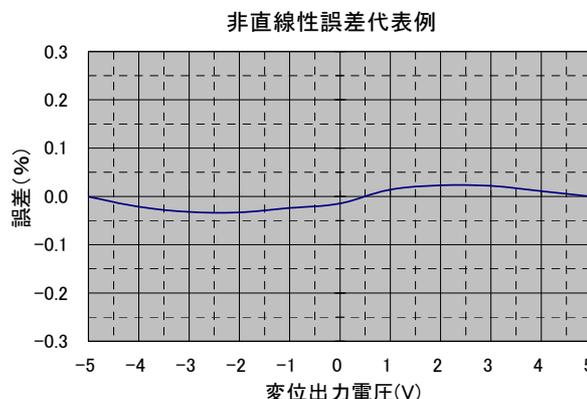
【第 4 図】 応答周波数代表例



② 非直線性誤差

標準製品の直線性はキャリブレーションされており、非直線性誤差 $\pm 0.1\%$ 以下となります。

【第 5 図】 非直線性誤差代表例



③ 非接触式

測定対象とのセンサ面の静電容量を検出するため非

接触で測定できます。測定対象に摩擦等の負荷や損傷を与えません。

④測定距離が短い

測定フルスケールは約 10 μ m～2000 μ m となっています。ダイナミックレンジが増えると原理にあるようにセンサ電極の面積を大きくする必要があります。またノイズもそれに応じて増えてきます。そのためレーザー干渉計や接触式変位計に比べ短い距離を測定するのに適しています。

⑤高速応答

高速動作、高速振動の測定適しています。

⑥小型

センサプローブが単純な構造なため小型で製作することができ他の装置に組み込み易く、また軽量です。

⑦測定対象物の制限

測定対象がセンサ外形より大きいこと、また導電物（半導体も可能）である必要があります。測定対象物の表面仕上げ状態や反射率などの影響を受けません。

⑧低価格

レーザー干渉計と比較すれば 1/10 以下のコストに抑えることができます。

用途

主に変位測定として、ストローク、振動、厚み、そり、偏芯の測定をすることができます。そのため板厚測定、水平度測定、軸ブレ測定に使用されます。特に精密ステージに組み込み、制御するのに適しています。センサプローブやコントローラ自体も小型なため、静電容量型変位計コントローラを精密ステージのサーボコントローラに接続し、最適なダイナミックレンジのセンサプローブをステージに組み込むことにより、高精度な制御を行うことができます。高速応答、測定距離、ピエゾステージの材質（導電性）の面でピエゾステージに組み込むときは、性能を十分発揮することができます。

7. その他

- 文中の計算式で得られた値は理論的なものです、必ず余裕を持った製品選定をしてください。
- ご不明点は弊社営業部までお気軽にご相談ください。ピエゾアクチュエーターの選定からピエゾドライバの選定までアドバイス致します。