

Piezoelectrical and Electrostrictive Stack Actuators and Ring Actuators

(和文 翻訳版02/3改定)



New developments (製品開発)	5
1. Short notes on product range (製品案内)	
1.1. Actuator designs	6
1.2. General actuator data	7
1.2.1. Low voltage actuators	7
1.2.2. High voltage actuators	7
1.2.3. Electrostrictive actuators	8
2. Comments on technical data (用語説明)	
2.1. Voltage ranges, polarity	9
2.2. Stroke	9
2.3. Mechanical prestress, maximum force loads	10
2.4. Force generation, blocking force	11
2.5. Stiffness	12
2.6. Resonances	13
2.7. Electrical capacity	13
2.8. Open loop Sensitivity	14
2.9. Lifetime, reliability	14
2.10. Thermal properties	16
3. Options (オプション)	
3.1. Actuators for high mechanical powers: option HP	17
3.2. Actuators with extremely stable operating characteristics	18
3.3. Actuators with very wide temperature range/High temperature versions HT	18
3.4. Modified low voltage actuators	19
3.5. Low temperature option TT	19
3.6. UHV compatibility	19
3.7. Actuators with position detection: option PD	19
3.8. Actuators with internal force detection	20
3.9. Power actuators with internal heat management, option "ThermoStable"	20
3.10. Actuator operation in aggressive media	21
3.11. Special materials for casings	21
3.12. Custom designed actuators	22
4. Characterization and comparison of piezo actuators (特徴と比較)	
4.1. Basic considerations	23
4.2. Materials	24
4.3. Actuator preparation	25
4.4. Comparison of low and high voltage actuators	27
5. Mounting procedures (取り付け方法)	29

Actuators are arranged according to increasing stack diameters

A. Stack types piezo actuators

D 1: Low voltage types for OEM purposes	30
D 2: Low voltage actuators with preloaded casings VS	32
PSt 150/4/... VS9	32
PSt 150/5/... VS10	33
PSt 150/7/... VS12	34
PSt 150/10/... VS15	35
PSt 150/14/... VS20	36
PSt 150/20/... VS25	37
D 3: Piezocartridges: Low voltage actuators in casings with front mount threading	38
FPSt 150/4/... M8x0.5	40
FPSt 150/5/... M10x0.75	40
FPSt 150/5/... M12x0.5 (former versions MPSt-BD)	40
FPSt 150/7/... M14x1	41
FPSt 150/10/...M18x1	41
D 4: Low voltage electrostrictive stacks	42
ESt 150/5/... VS10	42
ESt 150/7/... VS12	42
ESt 150/5/... M12x0.5 electrostrictive stacks, front mount cartridge versions	43
D 5: High voltage stack actuators	44
PSt 500: max. operating voltage 500 V	
PSt 1000: max. operating voltage 1000 V	
<i>Bare stacks without casing:</i>	
PSt 500/5/...and PSt 1000/5/...	44
PSt 500/10/...and PSt 1000/10/...	45
PSt 1000/16/...	46
PSt 1000/25/...	46
PSt 1000/35/...	47
<i>High voltage actuators with casing and internal prestress:</i>	
PSt 500/10/... VS18 and PSt 1000/10/... VS18	48
PSt 1000/16/... VS25	50
PSt 1000/25/... VS35	51
PSt 1000/35/... VS45	52

B. Ring actuators (stack type hollow cylinders)

D 6: Low voltage ring actuators	53
<i>Bare ring actuators (without casing)</i>	
HPSt 150/14-10/...	53
HPSt 150/20-15/...	54
<i>Low voltage ring actuators with internally prestressed casings VS:</i>	
HPSt 150/14-10/... VS22	55
HPSt 150/20-15/... VS35	56

D 7: High voltage ring actuators	57
<i>Bare ring actuators without casing:</i>	
HPSt 500/10-5/...and HPSt 1000/10-5/...	58
HPSt 500/15-8/...and HPSt 1000/15-8/...	59
HPSt 1000/25-15/...	60
HPSt 1000/35-25/...	61
<i>High voltage ring actuators, with casing, internally prestressed VS:</i>	
HPSt 500/10-5/... VS18 and HPSt 1000/10-5/... VS18	62
HPSt 500/15-8/... VS22 and HPSt 1000/15-8/... VS22	63
HPSt 1000/25-15/... VS35	64
HPSt 1000/35-25/... VS45	65
D 8: Electrostrictive low voltage ring actuators	66
HESSt 150/15-8/... bare rings, without casing	66
HESSt 150/15-8/... VS22 casing with internal prestress	66
C. Accessories	
Electricals	67
Mechanics	68
Optic adaptors for ring actuators	69
Screw-in front adaptors SE for stacks with casings VS	70
Other PIEZOMECHANIK Products	71

New Developments(製品開発)

30%のストローク増加

ピエゾメカニックス社のスタックアクチュエーターは、従来のユニポーラ(単極)と比較しバイポーラ(双極)とすることで動作範囲が広くとれ、従来製品に比較し少なくとも30%のストローク増加となりました。

この動作モード用に、新たにSVRシリーズ電源が用いられています。

大きなスティフネス(硬度)・負荷・発生力及び予備負荷

改良されたピエゾの材料と製造技術によって、従来の同じシステムより、より大きな負荷を制御出来るようになりました。特に重負荷、高電圧作動のアクチュエーターにおいては、新たな積層技術の採用により、硬度が大幅に改善されました。

特別な要求により、硬度はほぼ理論上の限界にまで達しています。

機械的予備負荷(Prestress)を増すことにより、ピエゾメカニックス社のスタックアクチュエーターは、性能が向上し、より引張応力の大きな用途に使用できます。バイポーラ動作の採用により、他のメーカーのスタック製品と比較すると、最大発生力は30%増加しました。

新しい材料

ピエゾアクチュエーターは既に多くの分野で使われています。超精密位置決め装置、重量物の振動制御、燃焼機器の高温バルブ制御などです。

これらの最適化されたシステムにおいて、それぞれ異なった材料特性を必要とし、一つのPZT材料では満足することが出来ません。

ピエゾメカニックス社は、低容量の PZT材料、パワー材料、高温で信頼性の高い、しかも温度・負荷変動に対する不変な特性をもった PZT材料等を提供します。

ピエゾメカニックス社は、どのようなアプリケーションにも対応することが出来ます。

特別な熱性質をもったアクチュエーター

ピエゾメカニックス社は常日頃、ピエゾアクチュエーターの応用パラメーターに関する開発を続けています。その一つの結果として、ユニークな温度特性を持つアクチュエーターが開発されました。

低いCTE高電圧アクチュエーター

温度膨張係数が約1 ppm/Kの材料

高負荷用途向け内部熱効率のよいアクチュエーター

オーバーヒーディングによる致命的な破壊が起きにくい広いダイナミックレンジを持ったアクチュエーター

高温仕様

標準高電圧アクチュエーターは 170 まで、耐熱仕様材アクチュエーターは200 (短時間では220)まで使用できます。

1. Short Notes on Product Range(製品案内)

1.1 アクチュエーターデザイン

スタック

スタックアクチュエーターは、それぞれ独立した多層圧電素子・エレクトロストリクティブセラミックから出来ています。通常その断面は円形、または長方形をしています。

決められた極性の電圧が印可されるとスタックは軸方向に伸びます。(d33効果)
伸長率は2%にまで達します。
セラミックスタックの取り付け方向は、常に軸方向に力が加わるように取り付けます。

アクチュエーターの名称: PSt A/B/C

A:最大動作電圧

B:アクチュエーターの直径

C:ストローク長 0V/max電圧

リングアクチュエーター、空洞スタック

バルクスタックと原則として同じ積層構造をしています。その中心には穴が空いています。この穴の目的は、光学的アライメント、または電氣的・機械的設計を容易にするためです。更なる利点は同じ面積のバルクスに比べ、径が大きく取れることです。この事は曲げや剪断応力に対して安定度が増し有利です。特に、細長いアクチュエータでは、電氣的容量の低下、電力消費の低下が期待出来有利です。

自己発熱が予想されるダイナミックな使い方において、リング構造は冷効率のより広い柔軟性を確保出来ます。

ストロークなど、アクチュエーターとしての性能に関して言えば、リングアクチュエーターの方が性能は優れています。

(PZT 内外側メタライゼーションチューブ)

アクチュエーターの名称: BPSt A/B1-B2/C

B1/B2 外径/内径

予備荷重構造のケーシングアクチュエーター

ピエゾセラミックスタックをケーシングすることは、一般的に機械的衝撃、周囲環境からの影響から本体を保護します。ピエゾスタックは、素子を重ね合わせた構造で、ある種の内部予圧/予備荷重が必要で、この機構をケーシングに組み込むことが出来ます。この事により、本来ピエゾアクチュエーターには備わっていない張力を扱うことを可能にし、外からの引っ張る力、ダイナミック動作時の張力を発生することが出来ます。これにより、より一層ピエゾメカニクス社のピエゾ素子は使いやすい物となります。

アクチュエーターの名称: PSt...VS D

D ケーシングの直径(単位 mm)

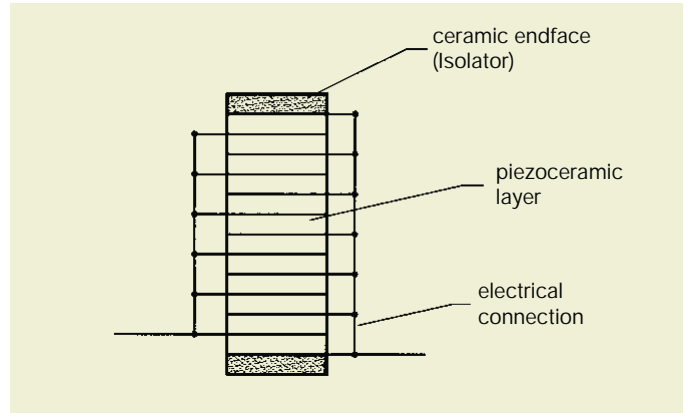


Fig. 1: アクチュエーターのスタック構造

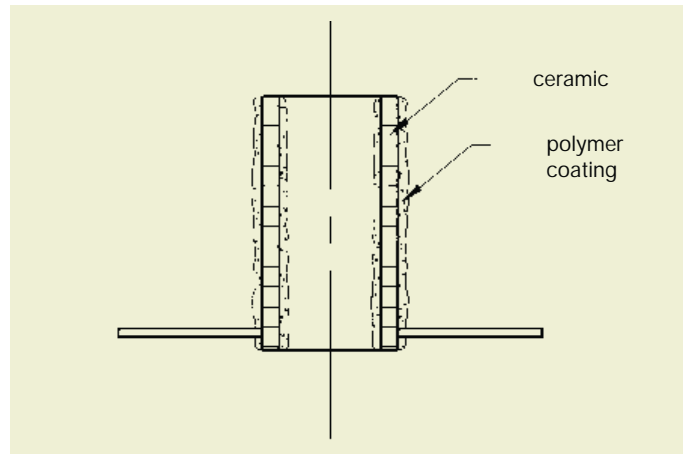


Fig. 2: リングアクチュエーター

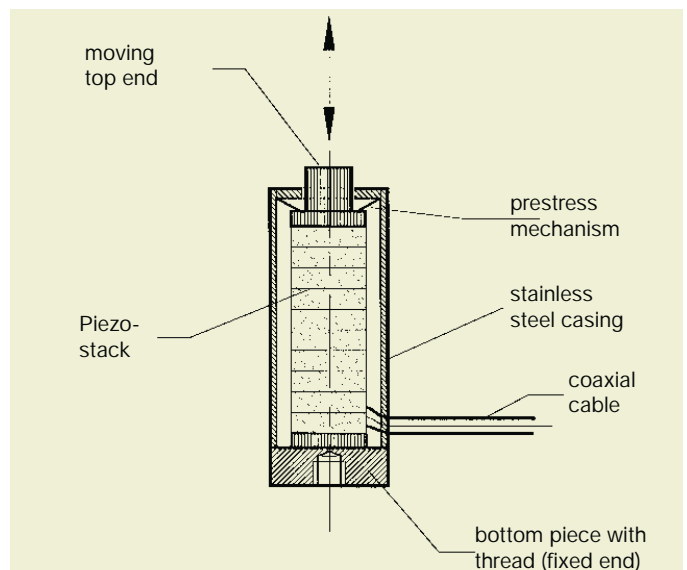


Fig. 3: 予備荷重構造のアクチュエーター

1.2 General actuator data

1.2.1 低電圧アクチュエーター

基本的な製造技術：

モノリシック薄層素子/co-fired 技術

動作電圧：

(-)30 V ~ (+)150 V (特注品 (+)200 V)

分極電圧 (-)45 V

(+)：電圧極性 = アクチュエータ順方向極性

(-)：電圧極性 = アクチュエータ逆方向極性

予備荷重による張力の増加：

最大電圧の20%

動作温度範囲：-50 ~ +100

キュリー温度：約150 (高温キュリー温度

アクチュエータは特注に応じます。)

セラミックスタック/リングの軸方向熱膨張係数

(短い電極)：約 -3 ppm/K

ケーシングアクチュエーターは熱膨張が

金属下部から先端断片まで均一

真空雰囲気中で使用可

材料オプション：セクション 3.4 参照

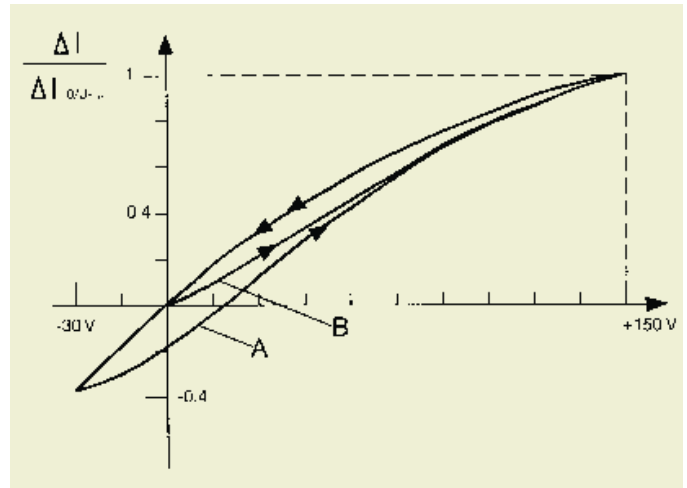


Fig. 4:

低電圧アクチュエーターのストローク/駆動電圧
(相対変位 1 対 電圧 0 V/ U_{max})

A. バイポーラ動作範囲 (-)0.2 U_{max} ~ (+) U_{max}

B. ユニポーラ動作範囲 0 V ~ (+) U_{max}

1.2.2 高電圧アクチュエーター

製造技術：

ディスクリットスタッキング

動作電圧：

Types (H)PSt 500 : (-) 100 V ~ (+) 500 V

Types (H)PSt 1000 : (-) 200 V ~ (+) 1000 V

アクチュエーターの分極電圧：

(H)PSt 500 : (-)200 V

アクチュエーターの分極電圧：

(H)PSt 1000 : (-)400 V

高分極電圧アクチュエーター：(coercive fields) 特注

(+)：電圧極性 = アクチュエータ順方向極性

(-)：電圧極性 = アクチュエータ逆方向極性

予備荷重による張力の増加：

最大電圧の15%

上昇電圧に対する良好な直線性

ケース無しスタックの動作温度範囲：

-60 ~ +120 特注仕様 +170

ケース付きスタックの動作温度範囲：

-100 ~ +170

キュリー温度約 330

セラミックスタック/リングの軸方向熱膨張係数

(短い電極)：約 1ppm/K

ケーシングアクチュエーターは熱膨張が

金属下部から先端断片まで均一

真空雰囲気中で使用可

材料オプション：セクション 3.1 ~ 3.3 参照

最硬度(スティフネス)アクチュエーター特注製作可

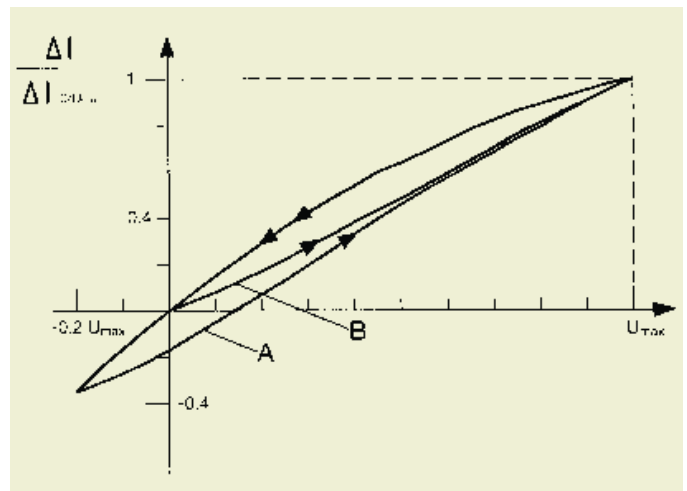


Fig. 5:

高電圧アクチュエーターのストローク/駆動電圧
PSt 500 und PSt 1000

A. バイポーラ動作範囲 (-)0.2 U_{max} ~ (+) U_{max}

B. ユニポーラ動作範囲 0 V ~ (+) U_{max}

1.2.3 エレクトロストリクティブアクチュエーター

エレクトロストリクティブセラミック PMN-PT は piezo セラミックと同様な電気-機械変換効果があります：電気信号は、機械的な動き、または力に変換されます。理論上 PZT の位置決め精度に制限はありません。(詳細はセクション2.2を参照して下さい。)

エレクトロストリクティブセラミックは PZT素子と比較すると簡単な操作制御では次のような利点があります：ストローク/駆動電圧特性で、ヒステリシスが非常に小さく(約2%)、しかもステップ電圧印加直後のクリープ特性が良く、約一桁違います。残念なことに、このような長所も限られた動作温度環境、室温、に制約されます。従ってエレクトロストリクティブ素子は研究所など、主に光学制御等に使われています。

パーセントオーダー以下の位置決め精度を必要とする場合エレクトロストリクティブセラミック素子もPZTアクチュエーター同様、フィードバック制御が必要となります。PZTアクチュエーターは動作温度範囲、ストレイン、低静電容等多くの優位点があります。

動作電圧範囲：150V バイポーラ
動作温度範囲：20 ~ 35

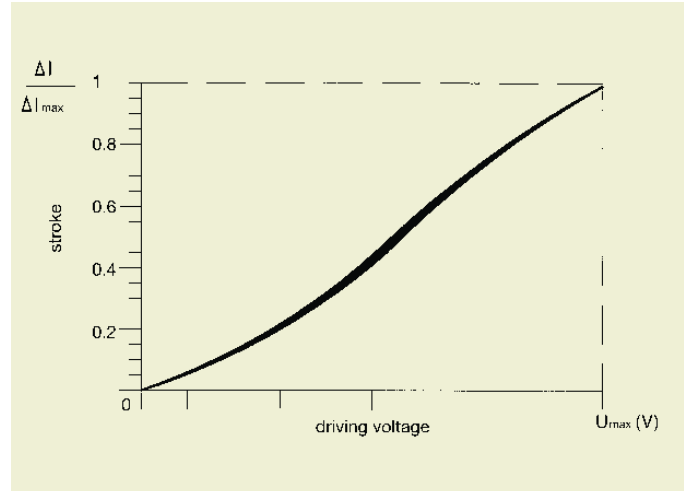


Fig.6 a: エレクトロストリクティブアクチュエーターのストローク/電圧特性 ユニポーラ動作時

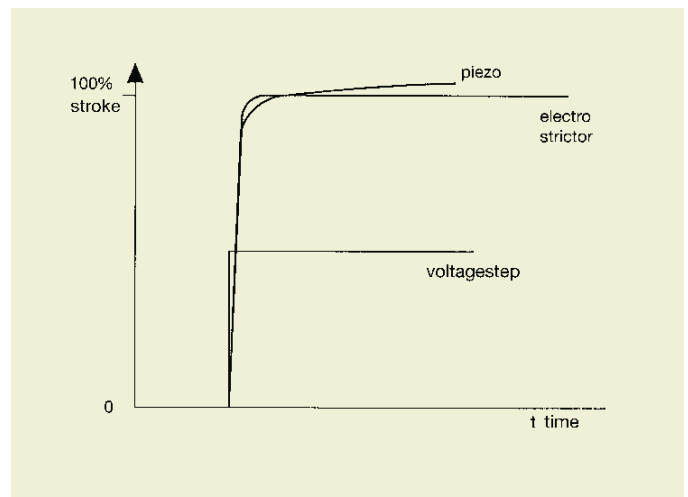


Fig.6 b: エレクトロストリクターと piezo アクチュエーター PZT とのクリープ比較 PZT のクリープ現象はステップ電圧印直後、数秒で始まりその後減少する。この値はステップスロークのパーセントオーダーに達します。

2. Comments on technical data(用語説明)

2.1 電圧範囲、極性

一般的によく知られた、パイモルフベディング圧電素子、超音波発生器、あるいはピエゾトランスフォーマー等ピエゾセラミック製品は、しばしばバイポーラ信号で駆動されます。この特徴はピエゾアクチュエーターにも応用され、通常のユニポーラ動作モデルよりより、さらに広いストロークが得られます。さらにバイポーラ動作の長所は、スタティック動作モードでのスタックの信頼性・寿命の向上が上げられます。

ピエゾスタックは一般的に極性が重要で：アクチュエーターにかけられる順方向最大電圧を定義します。逆極性の電圧は、最大定格電圧の約20%まで掛けることができます。

これは、標準のユニポーラ駆動素子と比較すると、ストローク、押し荷重発生力共に30%の改善が見られます。特別なPZTアクチュエーターで、逆極性電圧の高い材料があり、アプリケーションによってはドライバー回路を簡素化します。

アクチュエーターの消極を避けるために、非常に高い温度(カタログで規定された最高温度の70%より高い温度)で使われるとき、高い逆電圧をかけることは避けてください。

2.2 ストローク

データシートでは A/B 二つのストローク値が表示されています：

- ・ A: バイポーラ動作による最大ストローク値
(-)0.2U_{max} ~ (+)U_{max} 例えば (-)30V ~ (+)150V
 - ・ B: ユニポーラ動作によるストローク 0V ~ (+)U_{max}
- ストレインは、個々のアクチュエーターの (ストローク/アクチュエーター)の有効長で決まります。ピエゾアクチュエーターでは、約 2%のストレインがあります。ストローク長は、軽い静止負荷(最大荷重の10%)、室温にて測定されます。

材質によりアクチュエーターのストロークは異なり、負荷の変動、温度上昇により増減します。一方、代替材質で多彩な動作条件に対し影響を受けにくい材質(セクション3.2/3.3参照)が工業用途に多く使われるようになってきました。

位置決め、ヒステリシス

ピエゾアクチュエーターのストローク/電圧の関係には、ヒステリシスがあり、つまり印加電圧の上昇時と下降時ではストロークが異なります。この現象はPZTシステムの固体物理学の結果であり、これらすべてのセラミック素材で見受けられます。典型的な高ストレインアクチュエーターの材料は 10 - 15%のヒステリシスを示し、これは(ダイヤグラム/最大ストローク)比の最大値として定義されます。

標準アクチュエーターは次の通りです：

- ・ 低電圧アクチュエーター：
(-)30 V ~ (+)150 V
(特注: (-)50V ~ (+)200V)
- ・ 高電圧アクチュエーター：
(-)100 V thru (+)500 V
(-)200 V thru (+)1000 V

(+): 電圧極性 = アクチュエーター順方向
(-): 電圧極性 = アクチュエーター逆方向

ケース無しのアクチュエーターではリード線の色で極性を表します：

赤： + 黒： -
(エンドフェイスは絶縁されています:従って、設計にあたって、電気的な考慮は必要ありません。)

ケーシングされたアクチュエーターでは、リード線には同軸ケーブルが使用されていて、外側のシールド線はケースに接続されています。ピエゾメカニックス社のアクチュエーターは芯線が + 極です。(- 極接続もオプションにて製作いたします。)

エレクトロストリクター

エレクトロストリクティブアクチュエーターの極性はありません。素子の伸長は、印加極性に関係なく動作します。従ってエレクトロストリクティブアクチュエーターは、バイポーラ動作のストローク拡張はありません。

低電圧レベルにおいても、ヒステリシス現象は最大レベル時と同様常に残りますが、電圧変化が最大動作電圧範囲のおよそ 10%よりも小さくなると、ヒステリシスは減少します。(低電圧の振る舞い)

位置決め素子として、このようなヒステリシスは望ましくない要素です。理由はヒステリシス曲線は動作条件、電圧の大きさ、サイクルタイム、負荷、温度などに依存するからです。通常、データシートに示された特性は、室温、無負荷、ショートサイクルタイムで取った時のデータです。

前述した "低電圧の振る舞い" 効果は、実負荷・温度上昇などのもとでは極端に大きくなります。

一定の環境下で、周期的なサイクリング動作をするアクチュエーターにおいては、1パーセントよりもかなり良い再現性を達成することができます。リニアライゼーションは補正入力を使うことで可能です。

高い歪み率と低いヒステリシスを示す唯一の利用可能なセラミック材料がエレクトロストリクティブ PMN-PT です。(セクション 1.2.3参照)

よく質問される事ですが、原理的に 10% ものヒステリシスがある素子を使って、どうやって超精密位置決めが出来るのですか？

これはピエゾアクチュエーターの持つ、無限の位置決め分解能によるものです。どんな無限に小さい入力信号変化でも、無限に小さい動きに変えることができます。

ピエゾによる超精密位置決め秘訣は、現在の位置情報を、位置センサーで精密に取得する事です。

その実際の位置情報と、理想的目標位置情報を限りなく比較し、誤差が検出される限りアクチュエーターの入信号を制御し、最終目標を達成する事です。

ピエゾによる超精密位置決めは、ある種のフィードバック制御に基づく技術です。

しばしば見られる事に：オペレーターは、電圧調整ノブを必要な効果が得られるまで回す事です。この場合、印加電圧の値は何の意味もありません。ここで分かる事は、位置決めシステムの限界/精度を左右するのはアクチュエーターではなく、むしろシステムで使用される位置センサー、機器のメカニズム、および電源の特性で決まります。

この事は何故、高価な理想的なリニア制度の良いアクチュエーター/再現性のよいアクチュエーターが成功しない理由です。

アクチュエーターが使われる環境には、補償されなければならない外的悪影響因子はいくつもあります。(温度、負荷変化に起因するドリフト、音響雑音等)したがって超精密位置決めをするには、位置検出、フィードバックコントロールは、これら外部要因に誘発された逸脱を検出するのに必要です。アクチュエーターが理想的な、無限で相対的な位置決め感度を持たない事は、重要ではありません。ピエゾ素子が持つヒステリシス/クリーピング等の欠点もまた補償する事が出来ます。

位置検出は、光学的(精密格子測定スケール、干渉計)なまたは電氣的(ストレインゲージ、渦電流探知器、容量センサ)な方法があります。また、その他の方法も使う事が出来ます。走査顕微鏡のトンネル効果電流テクニックを応用したサブ分子レベルの位置センサー等も考えられます。

2.3 Mechanical prestress, maximum force loads

常時スタックに掛かる、いかなる圧縮力でも予備圧力 (prestress) と呼びます。一般的なアプリケーションには、スプリング機構により予備圧力の掛かったスタックアクチュエーターをお勧めします。

予備圧力の掛かったアクチュエーターの特徴は：

1. 硬度の増加(特に高電圧アクチュエーター)、ストロークの増加等の性能の改良(ピエゾの材質による)
2. スタックピエゾ素子の弱点である、引張応力性能の補償。張力によるピエゾセラミックの破壊の防止。曲げ衝撃、軸方向以外力の衝撃に対するアクチュエーターの耐久性能の向上。

単に機械的な予備圧力/予備荷重を与える事で、高いダイナミックな動作(高周波振動、パルス動作)で操作出来ます。それは、高い引張応力が加速力を生じるからです。予備荷重が無い場合は、アクチュエーターに大きな押す力/引っ張る力が交互に掛かり、すぐに壊れます。

適切な予備圧力メカニズムのデザインは、ピエゾアクチュエーターの知られざる側面です。これらの原理はアクチュエーターが、より強い発生力と、硬度を増す事が出来ます。また、強すぎる予備圧力と硬度はアクチュエーターのストロークを小さくする結果となります。(セクション 2.4参照)

ピエゾメカニクス社の予備圧力付き標準アクチュエーター PSt...VS は最大定格荷重のおよそ10-20% の予備圧力を掛けています。

アクチュエーターは、このレベルまでの張力を扱うことが出来ます。ピエゾのフロントプレートには、スタックからの押し上げ力が掛かっていて、張力は伝わらない構造になっているため、静的オーバーストレスは、セラミックスタック構造に何のダメージも及ぼしません。

さらに大きな予備圧力を必とするアプリケーションもあります：例えば重たい負荷をアクチュエーターの先端に固定し、ダイナミックな制御をする時です。ここで予備圧力は、アクチュエーターが縮むサイクル(リセット時間)以内に重い負荷を十分迅速に加速し、元の位置まで戻すに必要なレベルまでなくてはなりません。

概算の計算式は：

$$F_R = m \quad \Delta l / \Delta t^2$$

m	負荷
Δl	ストローク
Δt	最小リセット時間

基本的に予備圧力は、カタログに記載された最大負荷まで出す事が出来ます。

1つの簡単な基準は、アクチュエーターの対称なプッシュ/プル力の性能を得るために50%の予備圧力を使用することです。さらにその上、予備圧力は外部より加える事が出来ます。多くの場合、全体のメカニズムがアクチュエーターに対する予備圧力として役に立ちまた、振動力による機械的なバックラッシュは排除されます。

Maximum compressive load

ピエゾアクチュエーターは、固体の性質により軸方向の非常に大きな力に耐えられます。ピエゾアクチュエーターの振る舞いは、予備/負荷などの条件によってある程度変わります。これは使用されるピエゾセラミックのタイプによっても異なります。いくつかの材料は機械的なローディングに対し顕著なストロークの増加を示すが、他のタイプは負荷の変動にかなり鈍感です。どんな材料が使用されるのかはアプリケーションによります。

アクチュエーターの最大荷重レンジは次のように定義されます。無負荷状態で、ストレインが縮小しない静的圧縮力レンジです。なお強い力において、最大の歪は著しく減少します。そのような条件のもとでも、セラミックは破壊されませんが、アクチュエーターとしての性能は低下します。

さらなる局面は、ゆがみに対する長さ/直径比が高いスタックの安定性である。一般的に、最大負荷定格を大幅に越えることの無いようお勧めします。

最大負荷は主に、ピエゾアクチュエーターのアクティブな断面に依存します。

特にケーシングしていない裸のピエゾセラミックを大きな負荷で使う場合、負荷の偏りがなく、ピエゾ断面均等に負荷が掛かるように配慮が必要です。

2.4 Force generation, blocking force

前の章2.3では、アクチュエーターが動いている時、負荷が一定で、スタックの力のバランスが変化しない場合の負荷性能を扱いました。

これらは、これから議論するケースと厳密に区別されなければなりません。それはピエゾアクチュエーターで発生する力が変化する場合です。

ピエゾでの力の発生は、設置の際特別な配慮を必要とします。：

ピエゾアクチュエーターの負荷は、機械的なアレンジメント、もしくは明らかな硬度を示す弾性媒体でなければなりません。：

発生力は、アクチュエーターの伸張状態によって異なります。言い換えれば、力が発生します。

ピエゾアクチュエーターによって発生する、量子的な力/ストロークの関係は、絞られたメカニズム $S(E)$ に対するアクチュエーターのスティフネス $S(A)$ の關係に依存します。

注意：アクチュエーターでの力の発生は、単にアクチュエーターのストロークのみによって可能です。最大押し荷重の発生時はストロークはゼロとなります。(Blocking)

Blocking force:

アクチュエーターが、理論的に無限に堅さで固定することで、その動きを妨げられると、印加電圧に従った起動は、力の発生に完全に変換されます。

この力がいわゆる " ブロッキングフォース" と呼ばれ、おおざっぱには印加電圧に比例します。

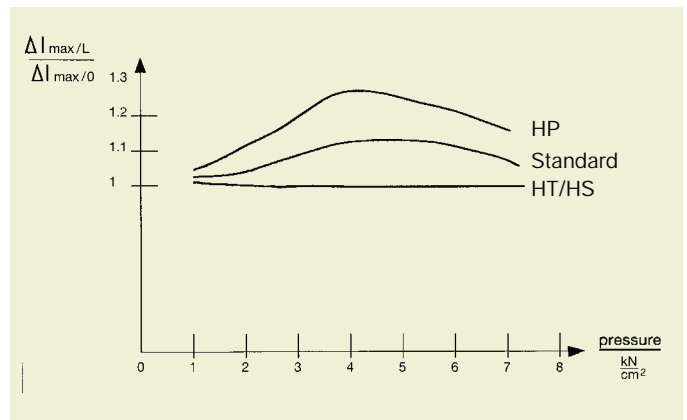


Fig.7: ピエゾ材料のストレイン/負荷との関係：HT/HSとHP (セクション3.1~3.3/高電圧アクチュエーター参照)最大動作電圧にて測定、無負荷のストレインにノーマライズ

IMAX/L: 負荷状態のストレイン

IMAX/0: 無負荷状態のストレイン

データシートでは、ブロッキングフォースは (-)0.2U_{max}から (+)U_{max}を通る最大の印加電圧による達成可能な力と定義されます。

ユニポーラ動作(0 V thru (+) U_{max})での達成可能な力は、ブロッキングフォースの約70%です。

アクチュエーターの動作点 A(達成可能なストロークと力)は、スティフネス線 $S(E)$ (N/ μ m)とアクチュエーターの特性 I_{max} -FBとの交点から得られます。

最大のストローク I_{max} と、アクチュエーターのブロッキングフォースFBはデータシートに記載してあります。

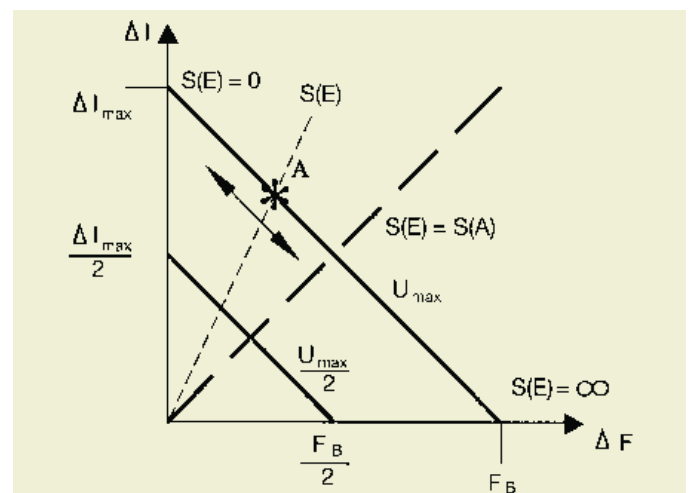


Fig.8: フォース力発生とストローク - 印加電圧 U_{max} and $U_{max}/2$ によるアクチュエーターとの關係

基本的な3つのケースについて、押し荷重力 - ストロークダイヤグラムの使用法を例証します。:

1. 例: S(E)=0 アクチュエーターの硬度に比較し、スティフネスが無視できる場合。

これは、2.3章で述べたケースの、フォースがゼロの場合に当てはまります。

一定の不変な負荷は許容できます。そして、アクチュエーターは最大のストロークを示します。うまく設計されたアクチュエーターの予備圧力システムは、この状況を把握出来ます。このケースに関する別の例は、マスピースによるアクチュエーターの荷重です。

2. 例: S(E)= アクチュエーターの強固なクランピング

アクチュエーターがブロッキング状態にある場合で、アクチュエーターは、ストロークを発生出来ず押荷重のみ発生することが出来ます。

Technical comment:

実際にブロッキングは、単に材料の限られた硬度による受動的クランピングのため起きません。したがって、述べられた最大の力は実際のシステムで達成することは出来ません。データシートに記載されたブロッキング力から、押し荷重力 - ストロークダイヤグラム(fig.8)を作成することが出来ます。

3. 例: S(E)=S(A)

これは、アクチュエーターから作動装置に、物理的な仕事最大限伝播出来た、非常にマッチしたアクチュエーターシステムのケースです。得られるストロークは最大のストローク l_{max} の半分であり、結果として、ブロッキング力の FB の半分です。

データシートで与えられているブロッキング力 FB は、アクチュエーターの評価のための、スティフネスS(E)の最大の電圧で 2つのテストリグの 2の異なるポイントA (図8参照)から推定されます。

静的な予備圧力は、最大定格荷重力のおよそ25%です。

2.5 スティフネス(硬度)

スティフネスは、 piezoアクチュエーターの弾性スプリング定数の別の表現です。

スティフネス S は、固体の弾性モジュール E の寸法に關係して次の式で表すことが出来ます:

$$S = E \cdot D / L$$

D アクチュエータースタックの断面
L アクチュエータースタックの長さ

アクチュエーターの硬度は、負荷の変動に起因する、不必要なストローク長の変化を最小にするため、また piezoのストローク、発生力の効率的変換に重要な要素です。

co-fired技術低電圧アクチュエーターの硬度は、同じサイズの標準高電圧アクチュエーターよりも、通常高い値です。これは、高電圧アクチュエーターは、金属セラミックの化合物構造で出来ており、co-fired技術低電圧アクチュエーターは高密度セラミックから出来ているからです。(非常に薄い金属の中間層は無視できます。)

しかし、"高電圧素子は、理論上の限界に近い最大の堅さを示す" 特別なテクニックは利用可能で、このことは指摘されなければならない。piezomechanics社は、そのようなスペシャルシステムのご要望に応じます。

piezoアクチュエーターの硬度の測定は、セラミックでのpiezomechanics相互作用と、機械的な環境が結果に著しく影響を及ぼすため、測定パラメータの正確な定義を必要としています。

例えば、それが開いている電気導線で加圧されるか、または一種の電圧供給に關連づけられるとき、アクチュエーターの硬度は異なります。

アクチュエーターの硬度は次の事柄に關連しています:
1. 顕著な硬度を示す機械的対象物と、相互作用によるストロークの減少。

2. 外部から、異なる負荷の影響によるアクチュエーターの長さの変化
3. 負荷状態でのアクチュエーターの共振の振る舞い

4. 静荷重、例えば予備圧力などによる、最初からのアクチュエーターの長さの減少

事実上、硬度パラメーターは fig.8 に示す別の異なる動作点 "A" を定義するのに使用されます。この点は、2つの相互弾性システム(アクチュエーター硬度S(A)と受動メカニクス硬度S(E))の力のバランス点を表します。

実際のアプリケーションに關係のあるカタログデータを得るためには、アクチュエーターの硬度は、セクション2.4に示す、ブロッキング力の評価を記述した同様な実験状況から得られます。

公差は +/- 20%

アクチュエーターと、負荷との力の均衡は次の通りです:

$$(l_{max} - l_{eff}) S(A) = l_{eff} S(E)$$

l_{max}	カタログに記載されたアクチュエーターの最大ストローク
l_{eff}	付属メカニズムに伝達されるアクチュエーターの有効ストローク
$S(A), S(E)$	アクチュエーター及び受動メカニズムの硬度
$l_{max} - l_{eff}$	伝達メカニズムとアクチュエーターの相互弾性に起因するロス

2.6. Resonances

カタログでは、無負荷で一端は固定、もう一端はフリー状態でのアクチュエーターの基本的な軸方向の共振周波数を示します。

共振周波数は、数ボルトの信号(小信号励振)での印加で行って下さい。自由に保持されたスタックの共振周波数は2倍になります。

実際は、無負荷でのアクチュエーターの共振周波数は重要ではありません。システムに組み込んだ場合、どんな付属物でも共振周波数を下げることになります。

さらに、アクチュエーターの作動により引き起こされる、付属メカニズムの共振は抑えられます。

ステージ・ミラーマウント等、機械光学部品に組み込まれたリセットスプリングは、100Hz オーダーでの共振周波数を示します。

さらに、より大きい直径のスタック、リングに関しては、半径方向の共振モードに注意を払わなければなりません。

スタックの軸方向の寸法に比べ、直径が著しく大きい場合、径方向の共振周波数は軸方向よりも低い場合があります。径方向共振は、アクチュエーターの圧電効果により、入力信号に匹敵する大きさの起電力を発生し、オリジナルの入力信号に重反します。

そして、径方向共振は軸の動きに影響を及ぼします。実装されたアクチュエーターの基本的な軸方向の共振周波数は、次式で予測することが出来ます。：

$$F_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{m}}$$

F_{res}	共振周波数
m	負荷重量
S	アクチュエーター硬度

自由に動けるスタックに比較し、負荷を接続したアクチュエーターの共振周波数は低くなります。

低い信号レベルで大きなストロークを得るために、しばしばピエゾスタックの共振現象を利用することができます。品質・ゲイン・抑揚などの要素は10倍のオーダーになります。共振動作をさせるアクチュエーターシステムは、セラミックスタックに機械的なオーバーストレスが掛からないよう注意が必要です。このことは、スタックの伸張は最大ストローク定格を超えてはいけません。

Technical remark:

以下の簡単な方法によって、実機にセットされたピエゾでの共振の振る舞いを評価することが出来ます。：

1. システム上のピエゾアクチュエーターに、ファンクションジェネレーターからの出力、数 Volts の振幅信号をかける。

この入力信号は、オシロスコープでモニターして下さい。ファンクションジェネレーターからの出力がシステムの共振周波数に一致すると、供給信号が歪みます。

2. ピエゾアクチュエーターは、力センサーとしても働き、接続されたオシロスコープに現れます。システムのメカニズムにわずかな振動を与えると、システムのリング現象をモニターすることができます。

2.7. Electrical capacitance

アクチュエーターの静電容量のは公称値は、ダイナミック励起電流を測定することで知ることが出来ます。(kHz レンジ 1.2V シグナル振幅(小信号励振))

通常実験は、室温無負荷で行われます。

公差は+/-20%

しかしながら静電容量は、使用条件による強誘電体ピエゾセラミックの誘電率の変動により変動します。

一般的に、静電容量次の理由で増加します。：

- 電圧信号振幅の増加(大信号応答)

- 温度の上昇
- 圧縮負荷力の増加

これらの効果は個々のセラミックの構成によります。

傾向は、PZTセラミックのキュリー温度が低ければ低いほど、上記効果がより敏感になります。

かなり安定した材料は、セクション 3.2 で記述されるセラミック HS です。

How to interpret actuator's "capacitance"

良く知られている事ですが、ピエゾアクチュエーターは駆動電源から見ると、コンデンサーのような物で、発生する力の大きさは、フェーズシフトの無い入力信号の振幅に比例します。したがって、ピエゾアクチュエーターは電源にとって、電気発生負荷です。

共振が起こる時だけ、この簡単な「コンデンサー」記述は、同等なLCR振動回路に変更されなければなりません。通常静アクチュエーターの電容量の値は、ダイナミックな動作をさせる場合の(信号を変化させる場合)駆動電源の容量の算出に使われます。この場合、消費電力と電流は、振幅幅と周波数に比例して増えます。

基本的な関係は：

$$i = C \, dV/dt$$

静電容量Cに対する電圧変動
電流変化*i*との関係を表す

と：

$$W = 1/2 \, C U^2$$

エネルギー:W 静電容量:C
チャージ電圧:V

アクチュエーターが繰り返し周波数 f で発振しているとき、入力電力は Wf になります。(アクチュエーターの放電周期では、電力を電源に戻す)

これがピエゾセミックの特性で、この電力の一部(およそ 5%~10%)が熱に変わります。

高いダイナミック運転による過熱の危険性は、スタックの放熱管理によってのみ解決できます。

電源構成がLE、RCVシリーズ、または同等なタイプからパワー電源にかかわるとき、自己発熱への対策について議論しなければなりません。低パワー SVR 高精度電源による運転は、スタックの自己発熱のリスクはありません。

あいにく、ダイナミックなアプリケーションで使われるアクチュエーターの比較と選択が、カタログに記載されている静電容量値のみで行われるのは、あまりにも単純化しすぎた方法です。上で概説されるように、パワーバランスは、駆動条件(アクチュエーターのストローク率、印加電圧など)、アクチュエーターの構造、ピエゾ材質に著しくよることがあります。単なる静電容量の値のみに捕われ、この複雑な考慮の欠落は、不幸にもアクチュエーターと電源のミスマッチな選択に通じ、故障、さらにシステムの損傷につながります。

ピエゾアクチュエーターの、すべての異なった潜在的アプリケーションと、操作手順に関して、一般的な製品の選択には、このカタログの記述の範囲を超えています。ダイナミックなピエゾの作動の構成を設計する際援助を必要とするならば、我々の技術者に連絡してください。

2.9. Lifetime, reliability

前述したように、ピエゾアクチュエーターの詳細な特性は動作条件に依存します。これは、寿命と信頼性を決定する要素になります。

現在のところ、ピエゾアクチュエーターの信頼性は、2つの極端な動作条件で定義されます。:

一方は、高い活性電圧での安定な状態。もう一方は、潜在的な加速力に起因する高い内部の機械的ストレスによる高いダイナミックサイクル。

信頼性と寿命を改良することは、アクチュエーター開発におけるテーマの1つです。

2.8. Open loop Sensitivity

パラメーターで Open loop Sensitivity(開ループ感度)は、ナノメートル、サブナノメートルといった非常に精密な位置決めをする場合に重要です。

セクション 2.2 に述べられるように、ピエゾを使ったシステムの位置決め精度は、セラミックスタックによる制限では無く、電源や付属するメカニズムに依存するものです。

開ループ感度は、駆動電源の出力信号に乗ってくる、ノイズレベルに起因する、アクチュエーターの位置決め精度における理論上の限界と定義されています。

このカタログで用意されたデータは、高精度アンプ SVRに基づいています。

開ループ感度は、他の電源/アンプと共に使うと変わります。

ピエゾシステムにおいて、位置決め精度論議する場合、指摘したいのは、アクチュエーター精度以外のその他の影響、温度変化による付属メカニズムのドリフト、押荷重の変化、振動、ベアリングの摩擦など、が精度を決定する要因となります。

A. High dynamic cycling

この動作モードは、ピエゾスタックカリングで作用する、高い加速力によって特徴付けられます。

近い将来、ピエゾの一般的な応用に、ピエゾトリガーディーゼル燃料噴射があり、そこでは制御バルブがピエゾにより、最大ストロークを μ 秒レンジで制御しています。この応用の初期で、典型的な故障メカニズムは、セラミック内のクラック(ひび)で、これが原因でスタック内部での電気短絡を引き起こしました。

別のクラックのメカニズムは、アクチュエーターの表面での、外的electrodingに関連しています。

電極の分裂はアクチュエーターを非活性化します。ダイナミックサイクリング動作における、スタックの信頼性を決定する基本的な事項は、最大負荷規格の50%から100%の範囲での、スタックへの十分な予備圧力です。

ダイナミック動作のアクチュエーターの信頼性は通常、規定された動作条件のもとで、達成したサイクル回数で定義されます。動作条件は、厳格な振幅、立ち上がり/立ち下り時間、繰り返し周波数、を管理された方形波励起、厳格な予備圧力、動作温度等です。

B. Static operation

ほとんど一定の位置を保つ応用で、長時間決められた位置を保持するため、高い電圧が掛かりっぱなしのスタックではしばしば、過小評価励起が起こります。この状況は通常、フィードバック制御で安定化メカニカルシステムで起きます。

ピエゾテクノロジーの現状では、セラミックスタックの表面が大気に直接接触するのは問題が大きい場合があります。環境湿気がスタックのコーティングを貫通する等、電気回路でのこのような物質との相互作用は、漏洩電流を招きます。

これらは時間と共に電氣的安定性を悪化させ、最終的にはスタック内に修復できない絶縁破壊・短絡を招きます。

スタティックな状態でのアクチュエーターの寿命は、通常決められた環境条件、例えば湿度、温度等の環境のもとで、一定の駆動電圧を掛けた状態での動作時間で定義されます。

新しいアプリケーションは、制御バルブや、ダイナミックサイクリングでの、アクチュエーターの冷却用に、燃料などの液体に浸す事の出来る新しいデザインによるスタックです。

大気中でのテストデータから推定することは、このケースは新しい駆動条件のために完全に再調査されなければならない事です。

実際のほとんどの動作条件では、いままで述べた厳しいケースとは異なります。前述された寿命と信頼性の数値は、概略値として参考にして下さい。

したがって、寿命は個々のケースで熟慮することをお勧めします。

一方、ユーザはアクチュエーターの信頼性を増す追加測定をすることが出来ます。：

- ・ ストレインの減少：
ストローク長 10 μm を必要としている場合、最大ストローク長 20 μm のアクチュエーターを半分の電圧で駆動することで、2つの利点が得られます。：
電界強度の減少による、スタティック動作での信頼性が向上、及びダイナミック動作での電力消費による自己発熱の減少。
- ・ バイポーラ駆動で、高いピーク電圧を掛けないで下さい。：
例：低電圧アクチュエーターでは、ユニポーラ駆動 (0V. ~ .+150V) とバイポーラ駆動 (-30V. ~ .+100V) では、ほぼ同じストローク量を示します。後者の方が、アクチュエーターに掛ける駆動電圧が低いため、信頼性は向上します。

バイポーラ駆動は、前述した長期のユニポーラ駆動で生じた、電気化学プロセスによる劣化を部分的に修復します。

- ・ 予備操作がいらぬ：

ピエゾアクチュエーターを使用しないときは電気を切ってください。

- ・ 水(結露)、電解質とスタックの接触を避けて下さい。

リングアクチュエーターのむき出しの内側の表面を注意して下さい。

- ・ スタックのクリーニングには、アセトンでなく、isopropanol を使用して下さい。乾燥は注意して下さい。
ピエゾメカニックス社のアクチュエーターは、信頼性と寿命に関しては非常に優れています。
ピエゾメカニックス社は、セラミックスタック表面での多くの問題の解決に努力してまいりました。結果として、優れたコーティングを使用した非常に安定した表面絶縁技術を生み出しました。
現在のテストは、大気中及びディーゼル燃料中で、スタック間にDC 2kV/mm励起電圧を掛け 5000時間以上問題なく実験は続行されています。
これらの素晴らしい結果から、通常の条件下では、数万時間も寿命を推論することができます。
アクチュエーターの保管寿命は無制限です。
ピエゾメカニックス社のアクチュエーターは、ここ数年の間、電気通信産業における通常の産業環境下で故障率 1%以下で動き続けています。

ピエゾメカニックス社のアクチュエーターは、ダイナミック動作において、2.5kV/mm以上の電界に相当する高いストレインのもとで 1010 サイクル以上の素晴らしい安定性を示すことで知られています。

2.10. Thermal properties

高温における piezoアクチュエーターの安定性は、piezoセラミックの特性のみで決まらず、絶縁コーティング、電極、接着剤等の材料によっても変わります。

多くの場合、セラミックのキュリー温度は制限要素にはなりません。産業分野での応用の重要なファクターは、アクチュエーターが広い温度変化に耐えるだけではなく、特性の変化が小さいことです。ここで、材料 HS は無敵である。(第3.2章を参照) 極低温の状態でのアクチュエーターの使用は標準のアプリケーションです。

Thermal expansion

低電圧アクチュエーターは、わずかな負の軸方向熱膨張係数 -3ppm/K を持った、軸方向に成型された PZT セラミックの形振りを示します。(端子間短絡にて測定)

個別素子を積み重ねた高電圧アクチュエーターは、セラミック/金属/接着剤構造のためより高い値を示します。電極と接着剤のプラス方向の温度係数は、アクチュエーターの温度係数をわずかにプラス(約 $+1\text{ppm/K}$) にします。他メーカー製品の高電圧アクチュエーターは時々多すぎる粘着層による非常に大きい熱膨張を示します。ケーシングがあるアクチュエーターでは、金属製のエンドピースが、アクチュエーター全体の熱膨張に貢献しています。インバー合金の使用によって、この効果を最小にすることができます。

Selfheating

piezoアクチュエーターは、ダイナミック動作では駆動パワーに比例した自己発熱をし、これは駆動周波数・振幅で大きくなります。

劇的な自己発熱の傾向は、標準アクチュエーターに見られるように、セラミックスタックの唯一の機械的な接触であるエンドピースを通して放熱する、アクチュエーター内部の熱処理の不備によっていっそう高められます(fig.9参照)。

この方法での放熱は、PZT セラミックの低い熱伝導率と、ケースとセラミックスタックとの間に出来るエアギャップのため、きわめて悪いものとなります。

結果的に、オーバーヒート防止のため piezoアクチュエーターの運転には厳しい頻度制限が付きます。標準の低電圧アクチュエーターで、中間径のアクチュエーターを 200Hz /フルストロークで運転するとオーバーヒートを起こす傾向があります。

piezoアクチュエーターを、高い周波数/大きな振幅でダイナミックな、しかも長時間運転する場合は、連続した piezoスタックからの放熱管理が必要です。

この解決には、piezoメカニクス社のアクチュエーターが提供するユニークな "ThermoStable" (3.9オプション参照)が有効です。

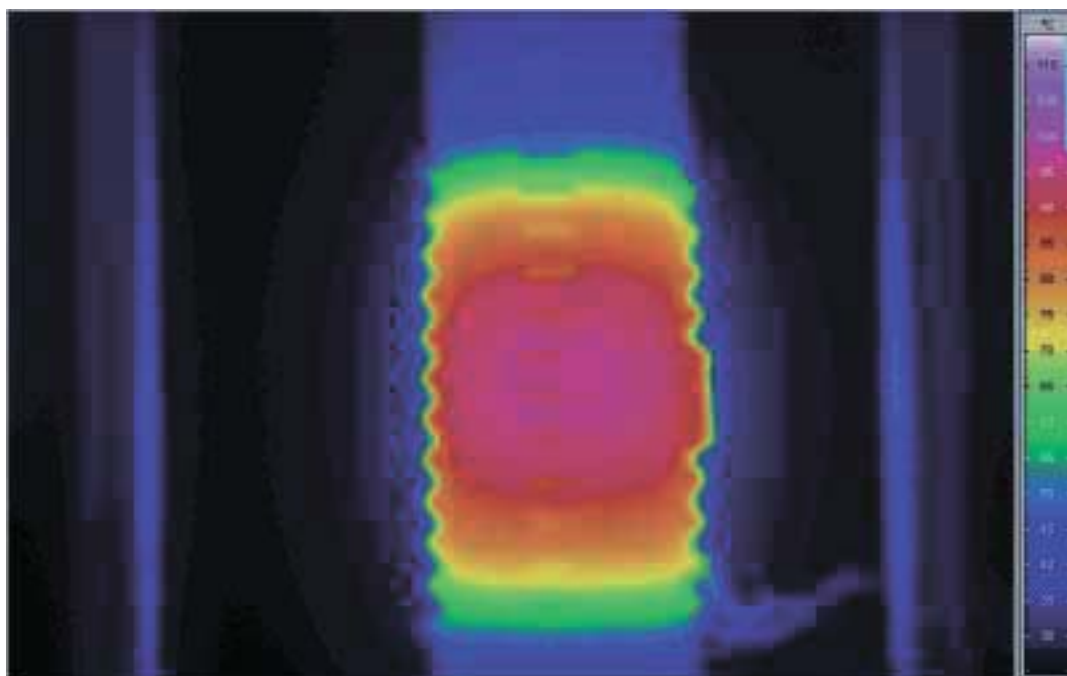


Fig.9: $1000\text{V}/150\text{Hz}$ で駆動した piezoスタック PSt 1000/16/40 の IRサーモグラフィ熱画像 (従来通りの取り付けでエンドピースの熱平)スタック中央での温度約 100 徐々に温度が下がりエンドピースでの温度 30

3. Options (オプション)

3.1. Actuators for high mechanical powers 高出力HP仕様 option HP (高電圧アクチュエータのみ)

高能率なPZTセラミックを使うことで、HP アクチュエータは、ストローク、押し荷重とともに高揚し最適化することが出来、物理的なワークの増加に匹敵します。修飾されたアクチュエータ HP は、ダイナミックな運動制御、非共鳴振動発生、アイソレーション、キャンセレーション(アクティブダンピング)等に使用されます。HP. 材は、標準材料に比べピエゾストレインが大きく、負荷時のストロークの顕著な増加が起こります。駆動条件によっては、セラミック HP の機械力の発生は標準の材料よりも最大 50% 高くなります。システムと同等な電気エネルギーを結合するために、同じサイズの標準アクチュエータと比べ、静電容量はおよそ 60% 大きくなります。

HPの材料の、最大の運転温度は130 度です。通常、修飾されたHPアクチュエータは“ThermoStable”オプション、と共に使い、ダイナミック動作時の電力消費に対応します。

アクチュエータの消極電圧
(H)PSt 500...HP: (-)150 V
(H)PSt 1000...HP: (-)300 V

高出力アクチュエータの設計では、この短い序論の範囲を超えた、多面的な考慮を必要とします。適切なシステムを設計するに援助が必要であるならば、我々のスタッフに何なりとご相談ください。

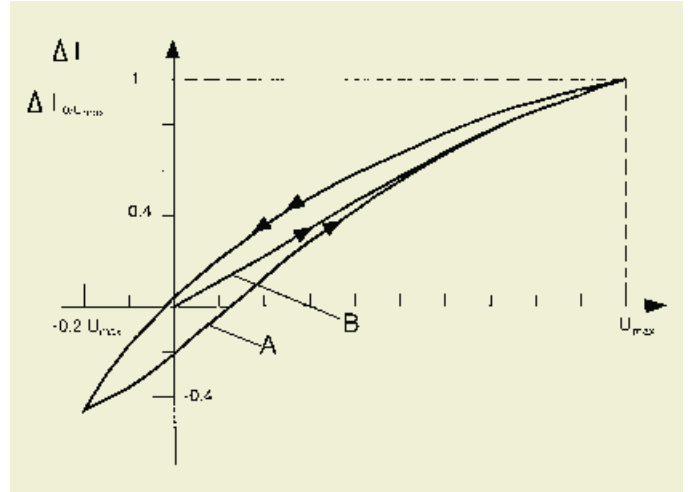


Fig.10:
修飾高電圧アクチュエータ HP. のストローク/押し荷重力のダイヤグラム. 相対ストローク=.1.at.Umax
A. バイポーラ動作 (-)0.2 Umax ~ (+)Umax
B. ユニポーラ 0V ~ (+)Umax

3.2. Actuators with extremely stable operating characteristics (高電圧アクチュエータのみ)

工業用途において、アクチュエーターはある条件のもとでは、周囲温度の大きな変動など、不変な作動の特性を必要とするのを除いて、必ずしもピーク性能を要求される訳ではありません。

ピエゾメカニクス社は、非常に安定したセラミックの"HS"を提供いたします。HSは、動作温度範囲が広く、負荷変動に強いが、ストローク/押し荷重の発生力は若干劣ります。

これらのパラメータの変化は保証温度・負荷の範囲で10%以下で、標準材料の20%と比較すると小さい値を示します。標準のセラミックと比べて、達成可能なストレインは僅か減少するだけです。

セラミック HS の特筆すべき事は、高い保持力です。これは、反対向きの電場に対して(消極に対して)高い安定性を示す事と定義できます。

実際にはこれは、(-)400Vまでの高い逆電圧を掛ける事が出来ることを意味します。(標準の材料の倍の電圧)この特徴は、プラス/マイナス対称なバイポーラ駆動(プッシュ/プデュアルアクチュエーター)が可能になり、十分なストレインも得られます。

その上、±400V範囲の振動モード動作では、オフセット電圧も必要なくなります。

このゼロオフセット電圧レベルは、長時間の運転において、非常に高いアクチュエーターの信頼性を可能にします。

温度範囲: 100 ~ +170

HS アクチュエーターの動作範囲

(H)PSt 500/...HS (-)200V ~ (+)500V

(H)PSt 1000/..HS (-)400V ~ (+)1000V

保持(消極)電圧

(H)PSt 500/...HS: (-)275 V

(H)PSt 1000/..HS: (-)550 V

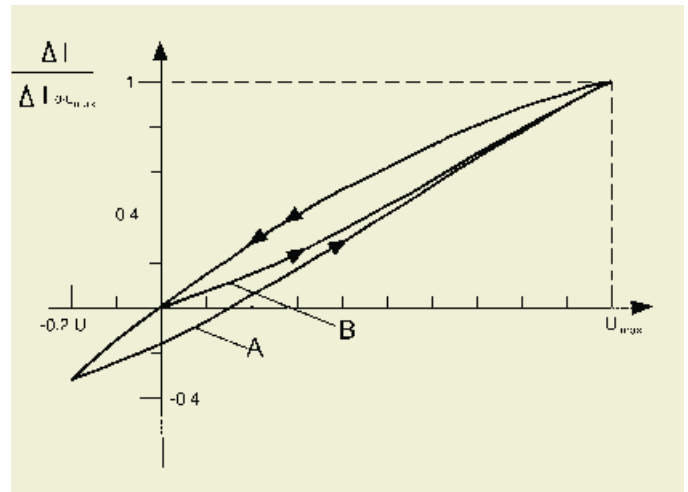


Fig. 11:

高電圧アクチュエーターHS のストローク/押し荷重力ダイアグラム 相対ストローク = 1 at U_{max}

A. バイポーラ動作 (-)0.2 U_{max} ~ (+) U_{max}

B. ユニポーラ動作 0V ~ (+) U_{max}

3.3. Actuators with very wide temperature range/High temperature versions HT (only high voltage types)

温度範囲: -100 ~ +200

(+220 短時間)

セクション3.2で述べた HS セラミックに高温グレードの添加物を混ぜる事に、化合物体の構造及びエレクトロディングを改良しています。

HT アクチュエーターの最大のストローク変化率は、動作温度 0 /200 でわずか 5%です。静電容量は50%大きくなります。HT アクチュエーターは、プレロードされたケーシングに優先的に使用されるます。

3.4. Modified low voltage actuators

特注により、セラミックの改良による低電圧駆動アクチュエーターの制作を致します。

- ・ 高温度キューリー/高温度動作仕様
- ・ 誘電率が小さく、静電容量の小さな仕様
- ・ (-)50V ~ (+)200Vの高ストレイン拡張電圧仕様

ピエゾメカニク社では、200V仕様の電源ユニットも制作しております。

ストローク電圧特性はセラミックのHP(セクション3.1)と同様です。

3.5. Low temperature option TT

低電圧/高電圧アクチュエーターは、液体ヘリウム温度以下の低温動作仕様に改良する事が出来ます。

3.6. UHV compatibility

ピエゾメカニク社の標準アクチュエーターは、真空雰囲気中でも何の制限なく使用できます。高真空(UHV)で使う場合は、アウトガスの少ない材料で構成できます。また、UHVモデルはある温度までベーキングが可能です。

3.7. Actuators with position detection: option PD

ピエゾメカニク社のアクチュエーターの大半は、ポジション検出のため、フルまたはハーフホイーストンプリッジ回路構成のストレインゲージを取り付ける事が出来ます。ピスコン(PosiCon)フィードバックコントローラーと一緒に使う事で、アクチュエーターの直線性を改善し、0.1%オーダーの位置決め精度でお使い

いただけます。ピエゾアクチュエーターに貼られた、ストレインゲージで検出できる限り、アクチュエーターのヒステリシスとクリーピング排除され、またシステムへの外部からの影響は補償されます。

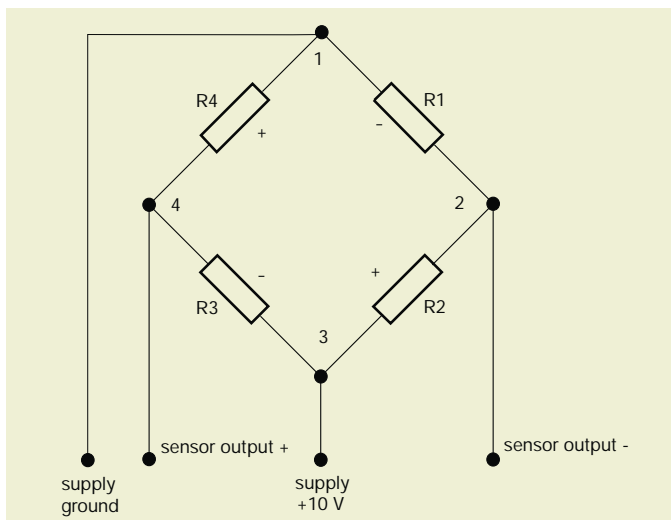


Fig.12: 位置の検出図のためのストレインゲージのホイーストンプリッジの構成

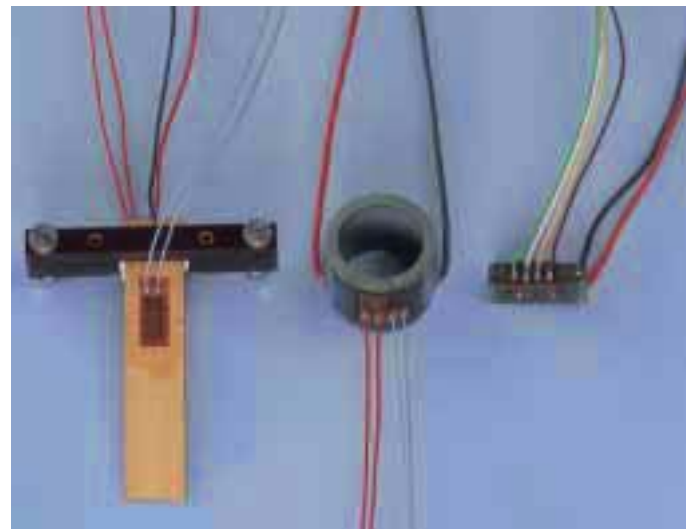


Fig.13: ストレインゲージを表面に貼った種々のアクチュエーター

3.8. Actuators with internal force detection

アクチュエーターの、ダイナミックな負荷運転での力のバランスには興味を持てます。ピエゾセラミックの可逆性を使用して、アクチュエーター内の力の検出のための精確なアレンジメントを得ることができます。また、力の検出にも応用することができます。実際に、セラミックのスタックの一部分は、作動部分と電気的に切り離されています。この小さいアクチュエーター部分はチャージ・電圧検出目的のために別に接続されて、その結果、スタックの中で力の変化に関する情報を外部に伝えます。

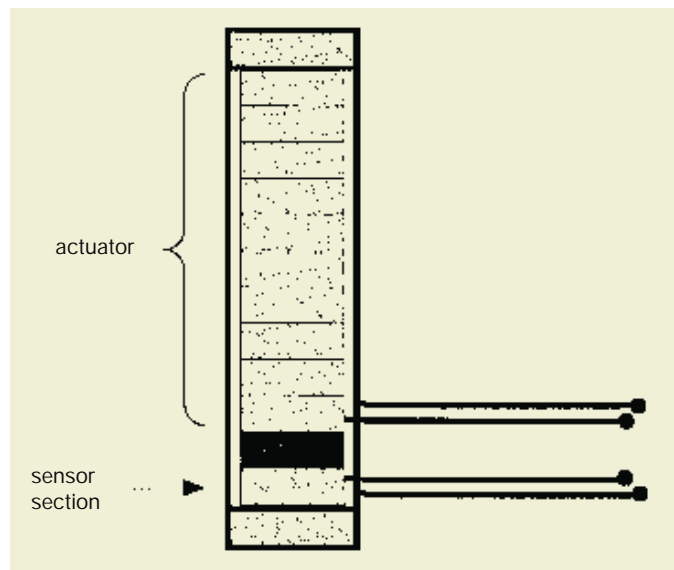


Fig.14: 押し荷重センサー組み込みアクチュエーター

3.9. Power actuators with internal heat management, option "ThermoStable"

2.10章で示した通り、効率的な内部の熱の管理は、ピエゾアクチュエーターのダイナミックでハイパワーな応用において欠く事の出来ないことです。これには、ピエゾメカニクス社の "ThermoStable" 改良技術が対応できます。主な局面は、セラミックのスタックの表面から金属ケーシングまで熱の効率的な伝播である。それから、従来の方法によって熱を取り除くことができます。その結果、セラミックのスタックの中のどんな局所発熱も防がれ、非常に高いパワーレベルでの運転においても、オーバーヒートによる損傷がありません。

セラミックからケーシングまでの温度差は、およそ10です。

即座の結果は以下の通りであります：

- 単にケーシング温度を測定する事で、アクチュエーターの発熱状態を測定することができ、内部の温度測定は必要ありません。
- アクチュエーターケーシング内に、冷却媒体を流す必要はありません。膨大なアレンジメントは避けられます。

"ThermoStable" 修飾は銅のケーシングと結合されるとき、取り付けメカニズムの下部断片を通して熱は効率的に伝達されます。このバージョンの寸法は、標準アクチュエーターの寸法と同じであります。パワーアプリケーションへは、既存アクチュエーターの単なるアレンジメントの変更で対応出来ます。代替の方法として、ケーシングに強制空冷用フィンを使用する事も出来ま。

Example

アクチュエーターPSt 1000/25/80 VS 35(公称静電容量:約2 μ F)、標準のセラミックに、強制空冷フィン付き、及び"ThermoStable"ケーシング例(fig.15参照):

- ・スイッチング増幅器 RCV 1000/6 (1000 V/6 A) と使うと、ダイナミック動作(80 μ m/1000V 周波数 900Hz)でケース温度上昇はわずか95 $^{\circ}$ Cです。

温度上昇は、定格よりはるかに下回る。(ケーシングで約140 $^{\circ}$ C)

- ・更なるケーシングのスタックから、放熱方法が可能のため、数千ヘルツのストローク操作は可能です。

LEまたはRCVアンプ、または同等な電源が使用されるアプリケーションにおいては、アクチュエーターに"ThermoStable"修飾を使う事をお薦めします。



Fig.15: "ThermoStable"のテクニックを使用したアクチュエーターの熱対策のための異なった構成。
左側:銅のケーシングが使われたアクチュエーター
右側:強制空冷装置のための空冷フィンがあるアクチュエーターケーシング

3.10. Actuator operation in aggressive media

ピエゾアクチュエーターは時々、ピエゾ駆動インジェクションバルブのように、液体燃料などの化学薬品を扱うのに機械に使用されます。

アクチュエーターは時々これらの液体と直接接触します。これらの液体は、他メーカーのアクチュエーターでは故障を引き起こす場合があります。

ピエゾメカニク社のスタックは、セクション"2.6 信頼性"で述べた通り、適切な表面処理が施されているため影響はありません。

ピエゾメカニク社は、有機物液体等に対してスタックの安定性を確保するために、アクチュエーターの追加変更をお受けしています。

3.11. Special materials for casings

ピエゾメカニク社は、標準のステンレスの代わりに、インパー、アルミニウム、チタニウムなどの特別な金属を使用したケーシング部品の変更にも応じます。

3.12. Custom designed actuators

特注に応じ、ピエゾメカニックス社は、防水の仕様、スペースアプリケーションのための表面凸凹処理、材料テストなどの特別なアプリケーションのためのそれらを最適化するために広範囲の変更をお受けします。



Fig.16: アクティブな振動キャンセルのための、大断面の特注設計されたアクチュエーター、100kニュートンの非常に高い負荷、56mmの直径

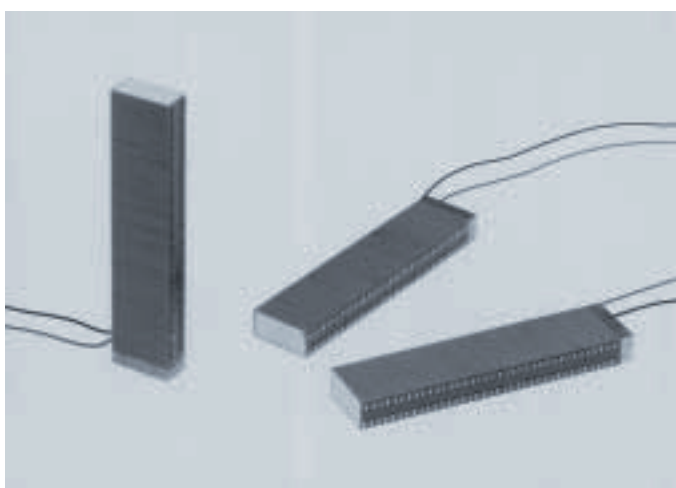


Fig.16 a: 長方形断面のアクチュエーター

4. Characterization and Comparison of Piezo Actuators (特徴と比較)

4.1. Basic considerations

一般的な用途で、ピエゾアクチュエーターの基本的な特徴付けにおける闘争は、アクチュエーターの電気-機械パラメーターとの相互作用の複雑さが一方にあり、他方、誰にでも解る"いかに簡単な表現でピエゾアクションを説明するか"と言う要望です。

この闘争は、アクチュエーターが実験室で、光学装置を一定レベルの力で準定常的な方法により、超精密位置決めで使用された長い間明白ではありませんでした。大きな負荷変動が工業環境、例えば広い温度変化など、アクチュエーターをダイナミックな応用で使う場合は、状況は基本的に変わります。

特に、ピエゾ弾性特性のスタティックとダイナミックな力の相互作用と、アクチュエーターのストロークパルスへの反応は、ピエゾアクチュエーターを初めて扱う人には理解するのが少々難しい事柄です。しかしながら、特にこれらの相互作用(または非線形)が、アクチュエーター性能を上げる機会であるので、にこれらのポイントを慎重に研究するのはまたとない機会です。

1つの例は、通常カタログで規定されている"無負荷"値と比べて、高負荷下におけるピエゾアクチュエーター料のストロークの増加です。

別の例は、アクチュエーターのバイポーラ動作です。：今まで、ユニポーラ動作モードを推奨してまいりました。理由単に、非常に高い温度など、特殊な動作条件において、バイポーラ動作のいくつかの制限についての詳細な議論を避けるためです。結果的に、光学機器等のラフな位置決めにおいて、ストロークにおける30%の可能性が浪費されています。

原則として、それぞれのアクチュエーターの PZTセラミックの分子式によって決められた特性は、多次元の方角にて表されるべき物であります。

この事が混乱を引き起こす場合があるように、特別なアプリケーションの場合は我々の技術スタッフに連絡する事を勧めいたします。

更なる混乱は、アクチュエーターの製造各社が、アクチュエーターのパラメーターのを独自の方法で規定し、どんな測定方法で、どんなパラメータが測定され、測定条件はどのようなのか、その上他のデータから理論的に推論されたスペック等の事実です。

いくつかの問題と不明確なことは、PZTセラミックは、10-20%の範囲で特性が非直線性を示すという事実から出て来ます。単なる直線性モデルでは、より少ない情報になります。：

1つの例は、セラミックの圧電性のストレイン性能を記述した d33値がしばしば引用されます。

通常表示されているデータは、数ボルトの小さい励起信号による実験だけで、決定する値で非現実的です。実際にアクチュエーターは、セラミック内の important domain wall orientationを含む、大きい電圧信号で活性化され、結果としてはるかに大きなストレインを発生させ、このことは標準のd33値には含まれていません。

別の経験では、そのように計測されたアクチュエーターのスペックは、単純過ぎるモデルを使用したり、非現実的な高性能データの結果を導き出し、時として矛盾します。これらは次に示すように、実際には確かめることが出来ません。

co-fired低電圧アクチュエーターの処理は、バルクPZT材の持つ、理論上の限界に近い弾性特性をもたらすプレス/焼結技術に基づいています。

即座の結果は、寸法10x10x20mmのco-firedスタックは、サプライヤーの如何にかかわらず、いつもほとんど同じ弾性特性(硬度およそ220N/μm)を示します。

しかし、いくつかのメーカーは非現実的な値、2倍高い値で運用しています。

アクチュエーターのユーザは、要求動作条件をカタログ仕様に記載されたデータテストデータ条件と詳細に比較し、誤解の無いようにするべきです。

アクチュエーターのを合理的に比較するには、ストレインと電電界状態について確かめるために、外形寸法とアクチュエータースタックの活性領域の内部の構造に関する情報を必要とします。

特にケースシングされたアクチュエーターにおいては、通常、この情報はほとんどのサプライヤー提供していません。

結果的に、アクチュエーターのミスマッチの潜在的リスクがあります。ピエゾメカニクス社データは、現実に関連したテスト項目を提供しています。

4.2. Materials

” PZTセラミック ” の名称は、幅広い化合物の総称です。Lead (Pb)-Zirconium-Titanate-ceramic(チタン酸ジルコン酸鉛セラミック)の特性は、これらの基本的な酸化PZTの割合や、また別の応用に関して添加物を加えることで変えることが出来ます。

セラミックのタイプは、周囲パラメーターのの変化に対し、影響の少ない特性を、またはある動作条件のもとで最大の性能を発揮するよう最適化することが出来ます。後者の側面は、工業用途における PZTアクチュエーターにとって、ますます重要になる要素です。

時おり、改善されたアクチュエーターの性能の論議は、例えば %オーダーの非常に大きなストレイン(PZTの10倍)、またはダイナミック動作で自己発熱のない低消費アクチュエーターを “super.piezo.materials” と称賛しています。これらのは(例えば、monocrystalline ferro.electrics)は事実利用可能であるが、一般的な化合物ではなく、高価で実用上の制約が多い材料です。これは単に、固体(アクチュエータースタック)を伸張するために必要な、%オーダーのエネルギー転送によって示されます。

これに必要な電界の強度は、標準的なピエゾのレベルをファクター 5以上超えます。

言い換えれば：150V仕様の低電圧スタックのセラミック構造に、700V以上の電圧をかけることに相当し、非常に困難な絶縁問題をもたらします。

近未来には、幅広い産業分野において、多くの電磁誘導方式のアクチュエーターは、PZT システムに置き換わるでしょう。

PZT-システムの中で、ストレインとパワー効率の改良を期待することができますが、それはほんのわずかで、アクチュエーターの設計で、最大ストレインレイトはせいぜい 2% ほどです。

ダイナミック動作において発生する自己発熱の問題は、連続的な熱処理によってのみ解決することが出来ます。

Electrostriction:

エレクトロストリクティブ材は周知の通り、限られた許容範囲での電気-機械セラミック材として知られていて、特別な局面では非常に優秀な性能を示すが、一方一般的な用途には限られています。

PMN-PT(ニオブ酸マグネシウム鉛固体溶媒にチタン酸鉛、Relaxor-セラミック) は、良好な直線性、小さなヒステリシステ、小さなクリーピング等、位置決め用途には魅力的な性能を示します。

残念ながら、これらの特性は室温近辺の、非常に狭い温度範囲に制限されます。

したがって現在、エレクトロストリクションは、光学半導体業界の安定した研究室などの条件下で、限られた位置決め装置などに使われています。

4.3. Actuator preparation

多くの顧客はアクチュエーターの性能を、あるセラミックの材料パラメーター、例えばストローク、静電容量等で定義しています。しかしこれは不十分な観点です。信頼性、出力定格と言ったような性能局面は、スタックを使うのテクニックに数多く関連しています。この事は、セラミックだけではなく、多くのアクチュエーターの周辺オプションが提供される、その事実によって示されます

以下の例で、準備のテクニックの重要性を例証することができます。

a. デラミネーション(薄層状化)

アクチュエーターの開発歴史上、スタック上の接続用内部電極で、セラミック自体の引っ張り限界より、はるかに小さな張力で分離することが報告されました。

これは、金属とセラミックの接続部の接着欠陥によって引き起こされます。

ピエゾメカニク社の低/高電圧アクチュエーターは、薄層状化への高い抵抗を示します。ストレス制限は、普通のPZTセラミック料の特性だけによって決まりません。

b. クラッキング、破裂、供給電極のバーニング:

すべてのスタックは、電氣的にスタックのすべての素子を接続するために、配線か供給電極が、スタックのサイド表面か円周に付いています。

これらのサイド電極は、アクチュエーターが振動するとき、機械的なストレスを受けることがあります。

不適当な電極のデザインは、ストレスを生み電極材の故障へとつながります。そしてアクチュエーターは、電極の破裂かクラックのため故障することがあります。

材料の部分的弱化は、ダイナミックな励起に関連する大きなチャージ電流のため、電極の部分的なオーバーヒートを引き起こす場合があります。

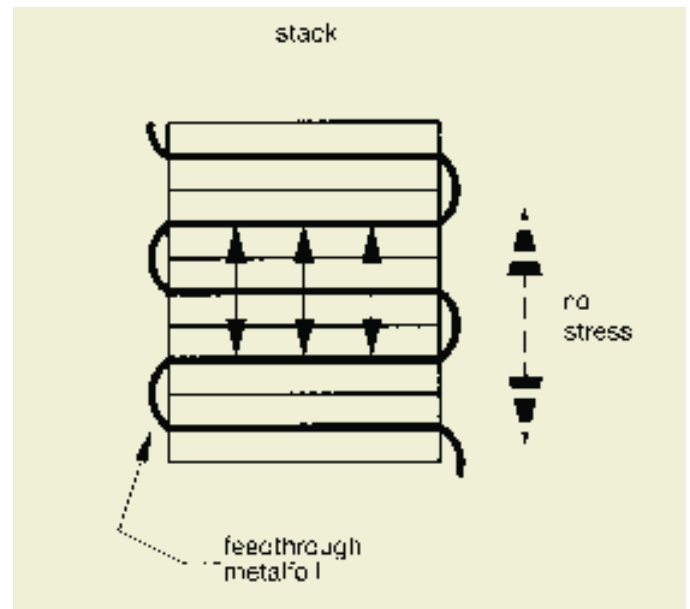
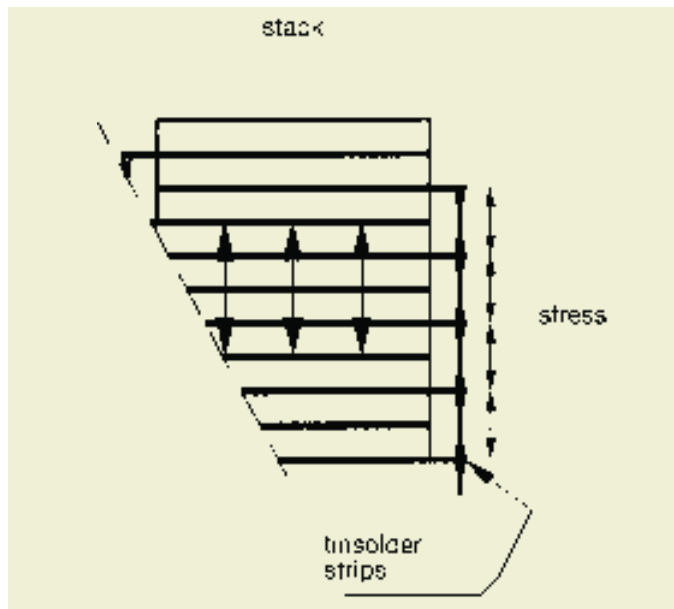
ピエゾメカニク社の高電圧アクチュエーターは、ほとんど完璧な電極デザインを示し、スタック表面の供給電極に掛かる張力歪みを、スタック間の配線をハンダ錫板で行うことで原理的に取り除いています。このデザインは他社製品では見ることは出来ません。

c. セラミックスタック表面の不適当な表面準備:

セクション2.9で述べたように、むき出しのスタックの表面は、アクチュエーターの動作中、高い温度と高い電界強度下で、環境における何らかの物質によって侵される場合があります。従来の絶縁技術は、周囲の空気の高い湿度などの悪い動作条件のもとで、かなりすぐに動作不良を引き起こします。

ピエゾメカニク社は、表面絶縁の過程に、PZTセラミックの特別な化学処理を採用しています。したがって、不利な動作条件の元でさえ、高信頼性と厳しい定格なスタックアクチュエーターに提供することができます。

例：高電圧スタックの表面供給電極
 他社標準ハンダ供給電極構造と、ピエゾメカニック社のストレスフリー供給電極構造の比較



A. 標準アクチュエーター給電ラインデザイン
 スタックのサイドに設置された鉛ハンダ
 給電電極板

ダイナミック動作の時はマスが大きく、電極版に自由度が無いいため破損する恐れがあります。



B. ピエゾメカニック社の給電ラインデザイン
 貫通メタルフォイル給電電極
 柔軟性に富みスタックにスト
 レスのかからない構造です。

特徴：
 材料の破損が無い
 ダイナミック動作の時高信頼性

4.4. Comparison of low and high voltage actuators

"低電圧アクチュエーター"としての表現は通常、製造技術における"co-firing.焼結技術"と同じ意味あいです。:

スタックはもともと、柔らかい非焼結セラミックの金属シートから出来ています。

この階層構造は、次に高い圧力によって凝縮され、最終的には高温で焼結します。結果は、大量の純粋なセラミックの理論上の弾性特性に近い、特性を持った積層セラミックチップになります。この技術を薄層セラミック素子の制作に応用することで、低電圧作動でセラミックの中に必要な強度の電界を発生させることができるスタックが得られます。また原理的には、より厚い層を使用することによって高電圧のcofiredスタックを作ることができますが現在は制作していません。cofiringのプロセスは、物理-化学プロセス(例えば、金属電極とセラミックの間など)が係ったかなり複雑な手順であり、時として、アクチュエーターの特性に関して、妥協を余儀なくされる場合があります。

通常、"高電圧アクチュエーター"とは、素子のスタッキング(積み重ねの)技術と同意語的に使われています。表面をメタライズ仕上げ(金属のうす幕で覆われた)した、個別に固く焼結しているPZTセラミックディスクやプレートは、外部接続用金属配線電極を介して重ねられます。通常、堅いブロックは、個々の素子を高品質な接着剤を使用することによって形成されます。これから記述説明から容易にわかる事は、高電圧スタックはある種の化合物の材料です。粘着剤での接続部の弾性のために、素子を積み重ねたアクチュエーターの弾性の係数はcofired低電圧スタック、もしくは純粋なピエゾセラミックよりも、しばしば低い値になります。

External dimensions

通常製造されているco-fired低電圧アクチュエーターは、断面寸法のが小さな、また中程度のサイズの物です。大きい断面の物も製造できますが、非常に高価になり、また信頼性が悪くなります。素子を積み重ねられた高電圧アクチュエーターの利点は、信頼性の高い大きい断面、高い負荷アクチュエーターの実現です。

Maximum stroke, strain, hysteresis, linearity

これらのパラメーターは、ピエゾセラミックを使用するさい、主に使われます。

同じ材料が使用されるとき、マージンの違いだけが低電圧と高電圧要素の間で期待されることになります。達成可能なストレインは、2kV/mmの電界強度で 1-2 % の範囲にあります。

Stiffness, resonant frequencies

スタックの内部構造の違いにより、低電圧アクチュエーターは、標準の合成物構造の高電圧タイプより高い弾性係数を示します。したがって通常、高電圧アクチュエーターの堅さは、低電圧タイプの等しいサイズのものよりも柔らかくなります。

アクチュエーターの弾性特性と共振とが直接関係づけられるので、スタックの共振周波数は、材料弾性の係数(ヤングの係数)が高ければ高いほど、より高くなります。したがって、cofired低電圧アクチュエーターは、標準の高電圧要素より高い共振周波数を示します。

しかし、個別素子からなるスタックアクチュエーターの硬度と共振周波数に関する改良は、専門のテクニックが進められています、ほとんど理論上の限界に達している事を指摘しなければなりません。

Electrical capacitances

低電圧アクチュエーターと高電圧アクチュエーターとの静電容量の顕著な違いは、単なる幾何学的な効果、厚さの違い、そのアクチュエーターを構成している積層数の違いによるものです。

その結果、低電圧素子と高電圧素子が同一ボリウムの場合、両者の間には、ダイナミック動作の際、エネルギー内容とパワー消費に違いは出ません。(同一PZT材料で作られている場合)
与えられたボリウムのスタックの静電容量は、セラミックの層の厚みの減少に従って、4倍増加します。

幾何学的な効果は、同じサイズの1000Vの素子と150Vアクチュエーターを比べると、静電容量はおよそ45倍の違いがあります。

あるダイナミックな応答を得る必要な電流が、150Vスタックよりおよそ7倍である時、 $\text{パワー消費} = \text{電圧} \times \text{電流}$ となり両方のケースは等しくなります。

Temperature ranges

現在では、高電圧アクチュエーターの方が低電圧スタックよりも、より温度の高い動作温度で使用出来ます。(約 220 対 160)どちらの場合も、低温仕様はありません。

Maximum load

高電圧アクチュエーターは、低電圧タイプより、広い断面の素子が制作出来るため、通常非常に重い負荷には高電圧タイプが使用されます。

Operation in vacuum or noble gas atmosphere

真空での作動は、両方のタイプのアクチュエーターとも問題ありません。

UHV(高真空)での適用は、セラミックの構造に依存しませんが、コーティング材(または、素子を積み重ねるための接着剤)等のアウトガスの出ない材料に依存します。これらは、両方の種類のアクチュエーターに利用可能です。問題は、腐食ガス雰囲気中での使用、またはグロー放電の領域(ミリバール)で起こり得ます。高電圧アクチュエーターでは、グロー放電とかアーク放電が起きる可能性があり、印加電圧の変範囲に制約出来ます。低電圧スタックはグロー放電し難く、より広範囲の操作をする事が出来ます。

Lifetime

高電圧アクチュエーターは低電圧素子よりも、絶縁の安定性に関して優れています。

1つの理由は明らかに、幾何学的なものです。:高電圧素子のより厚い層は、電荷(キャリア)の移動を妨げます:それは、より長い電極の間の絶縁/セラミックの関わりにおける電気化学退化に、より長い時間がかかります。

Other aspects

実際には、あるアプリケーションに使うアクチュエーターの選択は、価格、一緒に使う電源等のオプションの入手のし易さ等、他の要素に依存することがあります。

5. Mounting procedures (取り付け方法)

Bare stacks

ピエゾアクチュエーターを機械装置に組み込み・取り付ける場合、アクチュエーターのエンドフェイスを使う事になります。付属機構は、ある種のスプリングとか、自在マウントを使ってスタックに対し、予備荷重を与える事が出来ます。接着には、いかなる種類の接着剤、エポキシ、アクリル酸シアン等を使う事が出来、薄く塗り、確実に固定して下さい。温度回復は、アクチュエーターの規定された温度範囲の中で可能です。

特にスタック長/直径比の大きなアクチュエーターは、軸の方向以外力が掛からないよう配慮して下さい。張力(引っ張り)は、最大圧縮荷重の数パーセントを超えないようにして下さい。

小さい断面のアクチュエーターは、張力を掛けることは避けて下さい。機械的な予備荷重メカニズムによって張力を補償する方法が最も良い方法です。

剪断応力や湾曲力も同様に、最大の負荷力のパーセント以内に、小さい断面のスタックは、避けた方が好ましい方法です。

アクチュエーターがピエゾセラミックエンドフェイスの場合、力がアクチュエーターの断面全体に均等に掛かるよう、力の偏りが生じないように注意して設計して下さい。大きな力の偏りが生じるような場合は、鉄鋼か鋼玉プレートで補強することにより、ピエゾセラミックのエンドフェイスを保護して下さい。(オプション参照)一般的に、アクチュエーターの胴体表面のコーティング膜を傷つける、すべて要素は取り去って下さい。アクチュエーター胴体(円周)を挟み込む固定方法(クランプ)はお避け下さい。液体との接触は絶対に避けて下さい。

Actuators with casing

ケーシングされているアクチュエーター(特に予備荷重されたもの)は、スタックが剥き出しのタイプよりも、機械的衝撃や環境影響に対してはるかに強健です。しかし、力がスタックに対し軸方向に掛るとき最も良い性能は発揮されません。張力は、内部の予備負荷圧まで掛けられます。静的な張力によるオーバーストレスは、可動先端が単にスタックから離れる、内部構造によって主に避けられます。

剪断応力や湾曲力は、ケーシングによって部分的に補償されるが、オーバードロードによるアクチュエーターの性能は落ちることとなります。(ストロークの減少や不定な動きが現れます。)

このミスマッチを排除した後に、アクチュエーターは再び適切に動作します。

Ring actuators

原理的に、スタックアクチュエーター(ケース入り、無し)同様、リングアクチュエーターにも同様な配慮が必要です。同じ断面積を持つスタックと比べ、一般にリングアクチュエーターは、曲げと剪断応力に強い構造になっています。唯一の追加条件は、リングの内側のコーティングに不要な物質が付着したり、機械的なダメージを受けないよう配慮して下さい。これはケーシングリング、リング共に重要なことです。

Tilting

ピエゾスタックとリングアクチュエーターは、コヒーレント光学装置において、波長精度以下の位置合わせ、干涉計、エタロンのチューニング、共鳴器等に広く使用されています。これらのアプリケーションの大部分は、純粹に過渡的な動きを意味します。ユーザは、ピエゾアクチュエーターが伸びる時、エンドフェイスの傾きが無いものと仮定するかもしれない。しかしこれは本当ではありません。アクチュエーターの残留傾きは、セラミック内のピエゾ効率の不均一性や、内部のストレス(例えば温度変化)によって引き起こされる場合があります。ストレスは、外的要因、例えばエンドフェイスに鏡を接着することによって、または負荷を水平に取り付けることによって起こります。どんな傾斜が許容出来るか、システムがどのような動きをするかは設計者が決める事です。以下に一般的な良質なルールを提起すると：

- 傾斜はほとんどの場合、加えた力で増えます。
- 傾斜はアクチュエーターの直径が大きくなると少なくなります。細い径の素子はクリティカルです。
- 予備負荷は傾斜に対する安定性を改善します。
- 長いスタックを一点保持で使う場合、アクチュエーターを支えるガイドメカニズムを付けて下さい。これによってピエゾは、押し機としてのみ機能し平行関係は保たれます。

予備荷重の付いたリングアクチュエーターの典型的な傾斜率は、HPSt.../15-8/...VS22は $2-3 \mu \text{ rad} / \mu \text{ m. stroke}$ です。



株式会社キーストンインターナショナル

277-0042 千葉県柏市逆井 13-27 黒沢ビル3F
TEL: 04-7175-8810 key@keystone-intl.co.jp

