

工業用アプリケーションで使用される、圧電（ピエゾ）式および箔タイプのひずみゲージをベースにした力、ひずみ、圧力変換器

André Schäfer

Dr.-Ing.; Hottinger Baldwin Messtechnik, Im Tiefen See 45, 64293 Darmstadt, Germany

概要

産業プロセスにおけるセンサ計測では、高速のデータ処理や非常に精度の高い計測に対する要求がますます高まっている。これは製造業者が、生産過程において一貫した信頼性の高い品質管理を求めているからである。HBM の力、ひずみ、圧力変換器は、最新技術を駆使して、個々の計測作業のニーズに合わせた静的および動的な負荷の計測を行う。

キーワード: force, strain and pressure transducers, strain gauges, piezoelectric principle、力、応力変換器、圧力変換器、ストレインゲージ、圧電（ピエゾ）

序論

工業プロセスには一見対立するように思われる二つのトレンドがある。一方は、より高速なプロセスに対する従来からの要求である。これに対して、品質、つまり製造中における計測の精度への要求が、これまでになく重要視されるようになっている。

こうしたトレンドの変化には明らかな理由が存在する。それは労働コストの上昇と原材料の高騰から来る製品価格の上昇である。このトレンドは今後数年間続くと思われるが、最終的な製品の価格の上昇には限界がある。市場感応度は、製造者が完全な費用負担を行っても製品の価格を上げられないことを示している。この場合、製造者に残された選択肢はたった一つ、生産プロセスの中で利益を増大させることである。そこで材料費と労働コストをできる限り低く抑えるためには、製品試験の実施を完成時に限定する一方で、材料の選択を生産段階の初期のうちに行う必要がある。その結果、高速のデータ処理と同時に精度の高い計測が必要となる。

信号ピックアップの基本

相互の比較を目的として、複数の基本的な計測手法を考慮することは有益である。

HBM には 55 年以上にわたる計測の経験があり、その成功のほとんどはひずみゲージの原理によるものである。力、ひずみ、または圧力のいずれでも、なんらかの測定量を適用することによって鋼鉄製の計測体には変形が起り、こうした変形をひずみゲージによって判定することが可能である。

材料の弾性変形範囲において、計測されたひずみによって材料の応力を計算する方法は、フックの法則に基づいている。[1] にフックの法則の最も単純な形を示す：

$$s = e \cdot \epsilon \quad (1)$$

s = 材料の応力、e = 応力、および ϵ = 材料の弾性係数（バネ定数）を意味する。

この形のフックの法則は、一軸応力の状態にのみ適用される。その他の応力状態では、より拡張された形の法則が必要となる。

このひずみは、図 [2]、[3] に示す、一般によく知られたひずみゲージによって検知することができる。

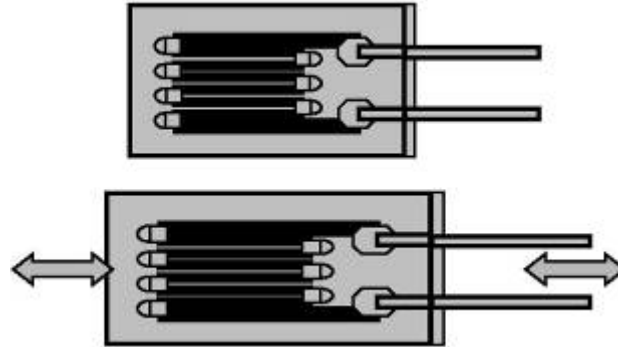


図2：ひずみゲージの概略図。a) 元の状態、b) 力がかかって抵抗が変化した状態

抵抗の変化は、

$$\Delta R/R_0 = k \cdot \varepsilon \quad (2)$$

計算式は e = 応力、 k = ゲージ率、 ΔR = 抵抗の変化、および R_0 = 基本抵抗 を示す。その他の可能性として、圧電原理を使用することが考えられる。下の図に、圧縮力がかかった場合に結晶に何が起こるかを示す。

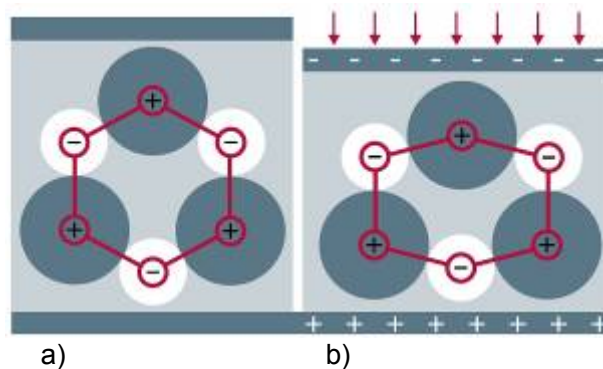


図3. 圧電原理の概略図 a) 元の状態、b) 力がかかった状態での電荷の変位

生成される電荷は

$$Q = q_{11} \cdot F \quad (3)$$

Q = 電荷、 q_{11} = 圧電定数、 F = 力

基本的に、どちらの計測原理でも力が電気信号に変換される。感度および線形性は実際には選択基準ではないことが多いが、依存関係はどちらの場合も同様である（図 4）。

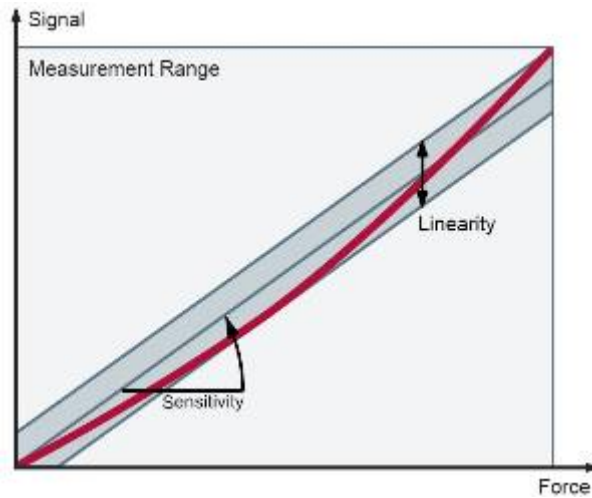


図 4： 力と信号の関係

超高圧計測

ひずみゲージ原理が持つ能力は圧力変換器によって実証できる。超高圧域でのアプリケーションは、ノズルやレールといったディーゼル噴射に関連した部品の製造に伴って広がっており、単なるパイプさえ関心の対象になっている。機能試験は、使用圧力、またはさらに高い試験圧力で実施することが可能である。

超高圧計測の用途には、アブレイシブウォータージェット切断および高圧洗浄によるディーゼルエンジンの寿命延長が含まれる。また食品産業においても、保存手段としての高圧殺菌はその重要性が増しており、これに使用する機器設備の改良には、より高い公称圧力範囲をカバーする変換器が常に必要となる。

図 5 に、ひずみゲージ原理に基づくホイートストンブリッジ（WB）を使用したセンサの電気回路図を示す。

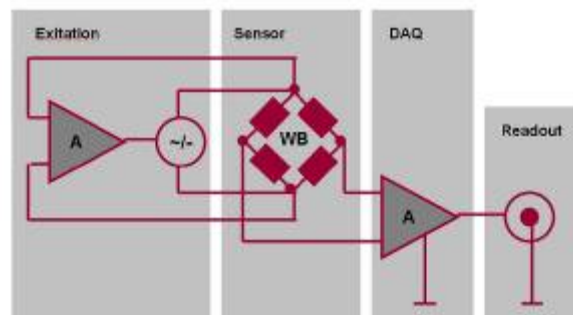


図 5： ひずみゲージアンプの原理

ひずみゲージは計測対象が最終的に決定された後に適用される。したがって設計の可能性を制限せず、また工作機械の技術ステップを妨害しないという利点がある。これは、計測する物体をモノリシックで設計できることを意味しており、従来品よりも遥かに長寿命のシステムを実現している [4]。

特許を取得している変換器の設計には溶接の継ぎ目が全くなく、最大圧力範囲においても非常に優れた特性を示す [5]。最も新しい進展は、HBM の“TOP Class Blue Line” 圧力変換器である。この Top Class シリーズは、数値の個別記録、精度等級の向上、より狭い感度許容範囲により、優れた温度応答を提供する [6]。

最近の高圧アプリケーションを見ると、実現可能な最高精度での追跡可能性も、超高压では標準的な要件になっている。世界中の多くの国家規格機関が、この変換器の卓越した精度に依存している [7]。

表 1 に重要な技術データを示し、図 6 にその図を示す。

計測範囲	5 000 bar	10 000 bar	15 000 bar
定格感度	1 mV/V	1 mV/V	1 mV/V
初期精度	0.25%	0.4%	0.6%
ゼロ信号および スパンの長期安定性 (年毎のデータ)	0.2%	0.2%	0.2%

表 1 : P3 “TOP Class Blue Line” 圧力変換器の重要な仕様



図 6 : P3 Top Class Blue Line, 最高15000barまでの超高压に対応する圧力変換器

圧電（ピエゾ）方式による高速の力計測

圧電ソリューションの重要な長所は、変換器の形状が非常にコンパクトであること、変位がほとんど皆無であること、さらにどのような信号の変化でも非常に動的にピックアップすることである。

図 7 に、圧電センサの電気回路図を示す。

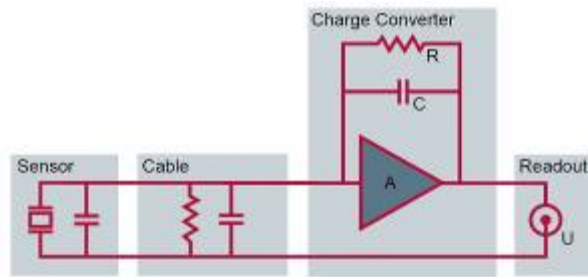


図7：チャージアンプの原理

PACeline CMC - ピエゾ式力計測チェーンは、圧電変換器コアと直流絶縁されたチャージアンプから構成されており、力の流れの中で直接的に損失のない破壊力判定を行うことが可能である。ここで使用されている圧電技術の堅牢性と高速性は、圧電センサの持つ高い耐久性と共に、条件の厳しい産業アプリケーション用として最適である。

力変換器およびアナログアンプは、すでに調整と較正が完了したユニットとして供給される。また、ユニークなズーム機能も実装され利用可能となるため、特に計測範囲を拡大したソリューション（公称計測範囲の 20%）において、過負荷が重大な結果をもたらすようなプロセスを監視する目的で使用することができる。そのため、従来は 2 基の変換器が必要とされる場所に、現在では 1 基の変換器のみで間に合わせることも場合により可能である。

PACeline では、従来の圧電センサでは期待できなかった機能も利用可能となる。プロセス制御をより信頼性と利便性の高いものにするための優れた機能を装備しており、計測における変位がほとんどゼロであったり、作業スペースに制約があったりする場合でも、最高の品質を確保できるような技術を提供している。

図 8 に、PACeline 力変換器の製品レンジを示す。



図8：PACeline CMC - ピエゾ式力変換器

産業用途における典型的なアプリケーション分野としては、材料の品質チェックを目的とした力計測などのベンチ試験や、例えば再形成や接着などで品質を監視するためのオートメーション技術などがある。

並行利用と 1 台二役

HBM の力計測製品ラインの大部分は、現在でもまだひずみゲージを使用している。これには、ゼロポイントの安定性と長期的な安定性は速度より重要な場合が多いという単純な理由がある。ひ

ひずみゲージを使用した力変換器は、その多くが張力や圧力の計測に適しており、最高の精度で静的な力と動的な力を計測することができる [8]。

こうした理由から HBM では、産業用途で非常に幅広く使用するために、箔タイプのひずみゲージに基づく変換器に加えて、圧電原理を使用する変換器も提供している [9]。変換器はすべてステンレス鋼製で、過酷な環境条件下や厳しい運転上の制約下での使用にも適している。またこれらの変換器はメンテナンスフリーになっており、手が届きにくい場所にも設置することが可能である。さらに圧電側での重要な特徴として、より高い精度が得られるため、1 基のセンサの中に、計測範囲の異なる 2 基またはそれ以上のセンサと同等の性能を提供することが可能である。

ひずみ計測

ひずみ計測は進歩しており、そのため製造プロセスにおける許容範囲はかなり厳しいものになっている。ひずみゲージは既存の構造物上に簡単に設置することが可能である。ひずみゲージを使用した SLB 700A ひずみ変換器は、摩擦接合と 4 本のボルトを使用して、平面上に直接取付ける。この設置方法では、検査対象のひずみをひずみメーターに直接転送することが可能であり、従来型の標準的な力変換器では使用が困難な狭いスペースや、取り付け条件の悪い場所での設置には理想的である。最新の用途には、重量計測だけでなく、例えば発電用の風車なども含まれる。

TEDS 変換器自動認識

非常に革新的な TEDS (Transducer Electronic Data sheet : 変換器電子データシート) という機能がある。HBM では、ひずみゲージを使用する圧力変換器と圧電力変換器の両方において、変換器識別機能を提供している。原理は両方ともほぼ同様である。変換器の特性は、変換器内部のチップ上に電子データシートの形で保存されている。アンプにこのデータをインポートし、自動的に正しい設定に変換することが可能である。つまり、変換器は正しい単位で直ちに計測作業に取りかかることが可能となり、ユーザー側ではそれ以上の作業を行う必要がない。プラグを差し込んで即座に計測が開始できるこの「プラグ&メジャー」技術は、ユーザーにとって大きなメリットである。

結 論

ひずみゲージは、標準的な箔タイプひずみゲージとしては、完全に圧力、力、負荷、またはトルクの計測専用である。計測体の選択が適切で、構造体の剛性と検査感度の間に良好な妥協点が見ついている場合、これに優るソリューションはない。今日では、センサが以前は避けられていた周囲条件に曝されるようになり、製品に対するユーザーの要求も高くなっている。その一方で、容器封入での新技術、あるいはひずみゲージのキャリアや計測グリッドなどの進歩により、こうした厳しい周囲条件にも、ひずみゲージが容易に対処できるようになっている。

アンプはオンボードにしなければならない場合が多い。圧力変換器として開発が始まったが、その設置の容易さとスタンドアロンという特徴によってまず圧力発信器の開発に拍車がかかったため、圧力変換器はアンプを内蔵した形で開発されることになった。現在では、ほとんど全タイプの数量において顧客がこうしたソリューションを要求している。このソリューションでは明確な出力信号が得られるため、ひずみゲージと圧電原理の両方がその恩恵を受けている。

この点を考慮すると、圧電結晶を作動させるのに欠かせないチャージアンプの開発は、実のところ補足的な作業ではない。最近のチャージアンプは性能が良く、長時間のかなり安定した信号送信が可能である。変位がほとんどなく、当然ながら動的挙動も非常に優れた超小型の変換器を使

用できるという点で、ユーザーにとって一定のメリットがある。

最後に、国家機関や公認の検定試験機関では、力、負荷、トルク、および圧力の計測には最高度の精密さが求められる。これらの用途では依然としてひずみゲージが主流である。較正用の HBM 製精密変換器は、長年にわたる様々な経験のおかげでこうした高い基準を満たしている。1977 年以来、HBM はドイツ計量検定所 (DKD) によって最初に認定を受けた試験機関となっている。今日、HBM 製の変換器は、これまでに言及した力、圧力、トルク、電圧比 mV/V といった数量をすべてカバーしており、DIN EN ISO/IEC 17025 による認定を受けているこの種の機関の中では、最も有名で有能な検定試験機関の一つである。

HBM の産業用変換器の製品ラインはこうした歴史を継承しており、おそらく今後は 1 基の汎用変換器において全く異なる 2 つの原理を組み合わせ、限りなく高精度で力学的に優れた製品を実現する方向に向かうことだろう。また違う見方をすれば、アプローチが全く異なるために並行して利用できる複数の原理があり、そのことが安全志向のソリューションを非常に興味深いものに行っているとと言える。

参考文献

- 1 Soloman, S. „Sensors Handbook“, McGraw-Hill Education, 1996, pp. 13
- 2 Window, A.L., Holister, G.S; „Strain Gauge Technology“, Applied Science Publishers , 1990, pp. 18
- 3 Hoffmann K.; „An introduction to measurements using strain gauges“, Publisher Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989
- 4 Schäfer A., „Opportunities for water jet cutting using modern pressure-measurement equipment“, White paper, published 2007 on hbm.com, id-number 793_en
- 5 Schäfer, A., Viel, W., Rapp-Hickler, C., Mikulecki, K.; Patent DE 10238163 “Ultra High Pressure Transducer”, Patent and Trade Mark Office, Munich, Germany, published 26.02.2004
- 6 Schäfer, A., Viel, W. Rapp-Hickler, C., Mikulecki, K.; „A new type of transducer for accurate and dynamic pressure measurement up to 15000 bar using foil type strain gauges“ Proceedings of XVII. IMEKO World Congress June 22–27 2003, Dubrovnik, Croatia
- 7 Schäfer, A.; “15000 Bar im Visier -Neuartiger Druckaufnehmer für weiten Anwendungsbereich” Journal „Fluid“, Moderne Industrie, Landsberg, Germany, Issue Nov./Dec. 2004, Seite 28 ff.
- 8 Gautschi, Gustav H, Piezoelectric Sensorics Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers, ISBN 978-3-54042259-4, Springer, Berlin, 2002
- 9 Hohmann, P.D., Schäfer, A.; “Combined Calibration of Torque and Force in a 3in 1 Calibration unit”, Proceedings of the “APMF 2000”, Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque, 2000, pp. 204

	スペクトリス株式会社HBM事業部	改良のため予告なしに変更が御座います。 全ての記述は、一般的な事柄であり、運用 によってもたらされる結果について、弊社 は特別な補償や責任は一切負いかねますの で予めご了承願います。
	本 部 〒330-0063 埼玉県さいたま市浦和区高砂2-2-3 さいたま浦和ビルディング 6F TEL 048-814-0251 (代) FAX 048-814-0252 関西営業所 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区高島3-5-24 新大阪第一生命ビル 11F TEL 06-6396-8507 FAX 06-6396-8509 URL www.hbm.com/jp E-mail hbm-sales@spectris.co.jp	