

精密な力計測で、ラインの品質と生産性を向上 —より低コストで設置容易なフォースシャントの活用—

スペクトリス株式会社 HBM事業部 営業部
WT / OEMマネージャー

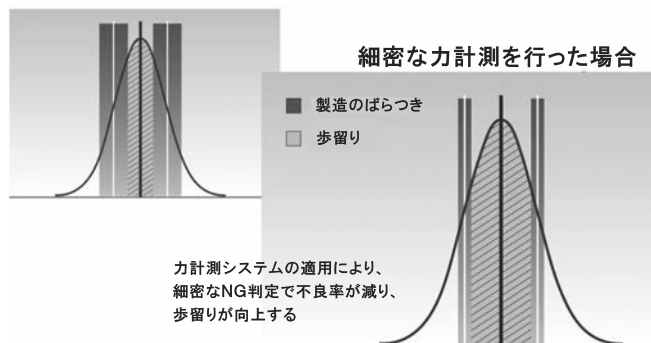
鈴木 秀行

生産ラインのコストダウンに向けて、高精度な力計測による監視／制御システムの導入が注目を集めている。導入のメリットは3つある。まず装置からワークピースに負荷される力を高精度に監視／制御することでラインの加工精度が上がり完成品の品質が向上する。またミクロン単位の細密さでラインの監視制御を行うことでNG判定の公差をしばりこめ、廃品率が下がる。

さらに歩留りの改善でラインの寿命が延び、メンテナンス費が安く済む。結果的に優秀な製造ラインを構築でき、トータルコストの抑制につながるというものだ。力の計測には一般に力センサが使われるが、精度をそれほど重視しないアプリケーションによっては、力の分岐を間接的に監視するフォースシャントが適していることがある。またフォースシャントは力センサに比べるとシステムへの負担が少なく、低コストで、何よりも設置がしやすい。この技術レポートではこのフォースシャントについて、その種類や特長、具体的な導入事例を紹介する。

フォースシャントには、被計測体の変形の仕方により次の3つの手法がある。

1. ひずみゲージを使う
2. ひずみセンサを使う
3. ワッシャ型センサを使う



1. ひずみゲージを使う

ひずみゲージは被計測体に生じたわずかな伸縮量を電気抵抗の変化により読み取る素子で、一般に箔金属タイプが多く流通している。被計測体に貼りつけても実質的な被計測体への影響はなく、剛性やダイナミックな動きはそのまま維持されるため、対象物の構造が複雑で微量な力の計測に適している。しかし取扱いには知識や経験を要する。

2. ひずみセンサを使う

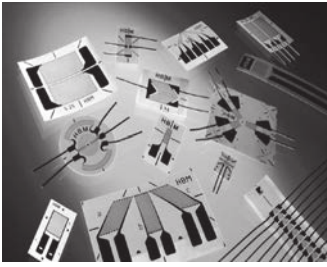
この取り付けを容易化できるのが、ひずみセンサを使う方法である。ひずみセンサは、きわい体（適度にひずむように加工された金属片）に4ゲージ式のひずみゲージが配置されたシンプルな構造で、被計測体にねじ留めなどで直接簡単に取り付けられる。動作原理によりアナログ式、アンプ内蔵式、圧電式の3種類があり、それぞれ次の特長がある。

2-1. アナログ式ひずみセンサ

アンプを内蔵しないひずみセンサで、接続部や検出部が保護されて、ねじ留めだけで使用できる。ドリフトがないため監視がしやすく、長期間の観測や静的モニタリング、装置の保守・メンテナンス用に適している。HBMの製品はスマート配線方式により並列接続することで、測定誤差の原因となる曲げモーメントが補正され、優れた計測結果を得られる。ひずみ計測における曲げモーメントの補正は非常に重要で、これについては後述する。

2-2. アンプ内蔵式ひずみセンサ

アンプを内蔵し、アナログ出力4～20mAまたは0～10Vに対応する。また高い周波数帯域（2kHz、-3dB）で出力でき、下流工程でのシステム制御や信号処理が行える。デジタル入力による校正が可能なので、設置後も校正は比較的容易に行える。機械的負荷がほ



ひずみゲージは被計測体の構造に実質的な影響を与えない



アナログひずみセンサは設置が簡単（画像は SLB700）



圧電式センサ CST300 は高感度で、剛性の大きな被計測体に最適



CLP などのワッシャ型はボルトやネジへの取り付けに適している

ひずみゲージを使う	ひずみセンサを使う	ワッシャ型センサを使う
メリット		
最小のスペースで設置可	既存の構造体に、ねじ留めで簡単に設置できるため、導入しやすい	ボルトやナットに取り付け可能で、高い保護レベルを確保できる
わずかな力の計測や複雑な構造の被計測体の計測が可能。力の分岐が極めて大きく、他に方法がない場合に推奨	複数のセンサを並列接続した時におこる曲げモーメントを補正できる	事前準備が不要
アンブ内蔵モデルでは操作がより簡単		
デメリット		
設置が煩雑（貼付、配線、保護コーティング）	フォースシャントに対する校正が必要（アンブ内蔵モデルは不要）	フォースシャントに対する校正が必要
フォースシャントに対する校正が必要		

の原因になるため、計測時にはできるだけ取り除くことが望ましい。

電気式ひずみセンサは、計測部分が対称構造である場合、曲げモーメントによる誤差を簡単に補正できる。具体的には図に示すように、被計測物を中心に対称となる位置に2つのセンサを、曲りが1つのセンサには正の負荷に、反対側のセンサには負の負荷になるように設置する。これらの出力を並列接続すると出力の合計が“ゼロ”になり、両センサにかかる同方向のひずみが、誤差なく計測できる。この補正により、引張と圧縮によるひずみのみを計測できるようになる。薄型で、一定の感度を持つセンサが複数必要になるが、HBMのひずみセンサの場合は特別な手順で、感度が一定になるように調整されている。さらに、並列接続するために、出力抵抗にバランスがとられている。ブリッジ抵抗の700Ωが使用されており、抵抗の総計が低い場合も増幅器に過負荷がかからない。4つのセンサが並列接続されても175Ωとなる。新型の増幅器により、力やひずみの信号を単独で使用した場合や、並列接続した場合でも共に、正しい計測と処理が行える。曲げモーメント補正のイメージとして対称部分に設置されたHBMのひずみセンサ SLB700 の例を示す。

ほとんどなく大きな力を計測でき最大負荷でも出力レンジは確保される。制御用パルスも出力できる。

2-3. 圧電式ひずみセンサ

極めて小型で高感度、幅広い計測レンジに対応する。設置場所が限られている場合や、負荷をかけてもほとんど変形しない高い硬度をもつ被計測体、高速で変化が激しいダイナミック計測に理想的である。一方、ドリフトによる計測誤差が発生しやすく、わずかな力を長期間計測するような静的モニタリングには適さない。

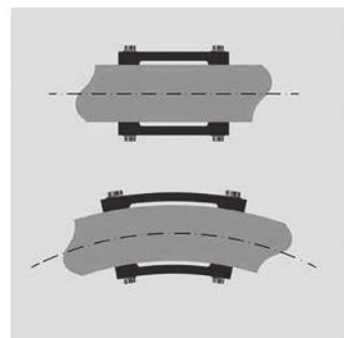
3. ワッシャ型センサを使う

ひずみセンサを装置組み込み用のワッシャ形状に加工したものがワッシャ型ひずみセンサである。内径がメートル法によるボルトやナットに適合し、装置に直接ねじ込んで使えるため保護レベルが高い。一方、一旦組み込んでしまうと後からの校正や調整はほぼ不可能なので、精度をそれほど必要としない場合や、変位量だけを見る場合に推奨される。

曲げモーメント補正ー HBM のスマート配線方式

曲げモーメントとは棒や板を曲げたとき、その垂直断面にはたらく応力の1つで、物体を回転させようとする力の働きである。計測誤差や装置振動による故障

の原因になるため、計測時にはできるだけ取り除くことが望ましい。



曲げモーメント補正のイメージ

シャント校正の手順は次のとおり：

- ・力がゼロのときのひずみ出力信号を計測。アンプは増幅なしにセットする
- ・出力信号の表示は mV/V となる
- ・校正に使用する負荷を加えたときのひずみ出力信号を計測。この時も計測は mV/V 単位で行う

これで計測チェーンの計測感度が簡単に計算できる。

$S = (\text{既知の負荷時のひずみ出力} - \text{カゼロでの出力}) / (\text{既知の負荷} - \text{カゼロ})$

圧電式センサでは単位に pC/N が使用され、SG タイプのひずみセンサには mV/V/N が使用される。

多くの場合、ひずみゲージ式計測技術では、特定のひずみでの感度が装置のスケール値として使用できる。つまり、既知の定格力でのセンサ出力信号だけが必要だ。この力の値と出力信号のセットを機器に直接入力できる。多くの装置において、上で述べた4つの値をテーブル上に配置するだけになっている。

力 = 0 N 信号 = xy mV/V

力 = 計測した力 信号 = AB mV/V

これでアンプ（増幅回路）が設定を実施。スケールリングは後の段階で行われる。

以下の重要ポイントを注意されたい：

- ・必ず検証すること。システムに再び負荷をかけ、表示される値を比較すること
- ・校正前に、最大負荷を3回かけて、センサの安定度を確認すること
- ・最適な精度を達成するためには、校正に使用する力は実際の計測に使用する大きさの力を使用するのが理想的である

この図の場合、曲りが生じると、各 SLB700 には同じ絶対値のひずみが感知される（符号は正反対）。この状態で、センサが電氣的に並列接続されると、出力がゼロになる。計測データ中の曲りによる影響が補正され、引張や圧縮方向のひずみだけが計測される。ひずみを力に変換するためには、シャント校正が必要になる。手順を上を示すが、少なくとも2か所の負荷ポイントでひずみと力を計測する必要がある（例えば、ゼロ点と最大値の2ヶ所）。最大値の測定は必ずしも必要なく、特に精度要求が低い場合は、最大値の半分のポイントで計測してもよい。

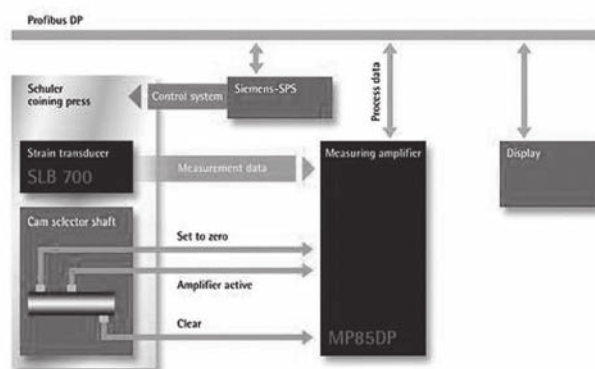
フォースシャントによる力計測 導入事例

【ひずみセンサを使ったプレス機の監視制御 Schuler 社】

最後に、ひずみセンサを使ったフォースシャントによる力計測システムの導入事例を紹介する。写真は世界の硬貨製造の約80%に關与するドイツ・ゲッピンゲンの Schuler 社製コイン用プレス機である。同社では HBM のひずみセンサとアンプを採用し、プレス機の常時モニタリングを行っている。この装置で硬貨は1分間に1回プレスされ、最大800個の硬貨が生み出される。完成品としての硬貨の品質と外観を左右するのは、使用材の品質や加工ツールのパフォーマンスに加え、プレス力がある。Schuler 社では最大150トンをプレス力に規定しており、このピーク値の監視を HBM の計測システムにより高精度に行っている（使用機器：



ドイツ・ゲッピンゲンの Schuler 社製コイン用プレス機。硬貨は1分間に1回プレスされ、最大800個の硬貨を製造



Schuler 社製の力計測システムの構成イメージ

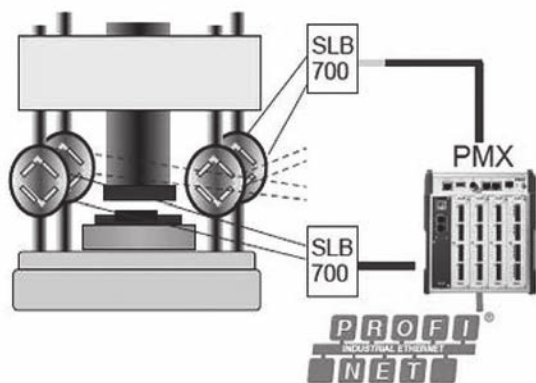
HBM のひずみセンサ SLB700A と工業アンプ MP85)。この計測システムは、ひずみセンサを装置に 4 か所ねじ留めするだけで使用でき、高応答で超高速にピーク値を記録できる。さらに計測値は Profibus 経由でメイン PLC に送り、ピーク力を許容値内に収まるように制御する。

同社ではまた電気モータ用の鋼板打ち抜き用の高速プレス機のピーク値の監視も予定している。鍛圧フレームの対角線上の 4 本柱のうち 2 本の応力を監視し、毎分 800 ~ 1,000 ストローク、100 ~ 400 トンのプレス力を制御する。最終目標は毎分最大 3,000 ストロークまでの高速化で、HBM の力計測システムはこうした高速計測にも追従できる。

既存装置に後付け、Industry4.0 対応も

Schuler 社が採用しているフォースシャントによる力計測システムは既存のシステムに後付けできるため、投資コストは少ない。設置後のチェーン校正に若干時間はかかるが、新システムの入替え時のような設計変更やオペレータの再教育も必要なく、その一方で完成品の品質向上、不良率の低減、装置寿命の延伸、管理費の削減など、優れた生産ラインの構築につながる数々の導入メリットがある。

近年、生産ライン改善によるコストダウンは、「モノのインターネット」の枠組みの中で頻繁に語られるよ



Industry4.0 対応機能を備えた HBM の次世代アンプ PMX

うになった。ここで紹介した導入事例の応用例として、汎用アンプ MP85 に替わる Industry4.0 対応の計測アンプの採用も検討できる。本格的な IoT 時代到来に向けた Keyword は、1) 産業イーサネット (EtherCAT、Profinet、Profibus など) への統合、2) 国際プログラミング言語への対応、3) iPhone やタブレットから操作できる WEB ベース、の 3 つといわれるが、HBM が提供する次世代工業アンプ PMX は、これらの機能をすべて備えたモジュール型のターンキーソリューションである。本国ドイツでも業界エキスパートに高く評価されている。

まとめ

計測機器を使い製造ラインの力を精密に監視制御することは加工品質の向上や生産性の改善につながる。力の計測には力センサやフォースシャントが利用される。フォースシャントは力センサに精度面では劣るものの、システムへの負担が少なく、低コストで、設置がしやすい。特にひずみセンサは、測定誤差要因の 1 つで装置故障の原因にもなる「曲げモーメント」を完全に補正でき、製造ラインの力計測には優位である。Industry4.0 対応のアンプと組み合わせれば、IoT 時代に向けた拡張性も確保できる。

【新製品】デジタルロードセル FIT7A



ひずみゲージ式計測技術で 60 年以上の実績をもつ HBM
世界最高速、毎秒 3 回以上の高速高精度計量
食品/医薬品ウェイトチェッカー用デジタルロードセル

HBM は、ひずみ計測技術において 60 年以上の歴史をもつドイツ最大級の高精度計測器メーカーです。ドイツ、米国、中国に生産拠点をもち、世界 80 の国と地域でひずみ・トルク・力・荷重センサとデータ収集システム、ソフトウェアを製造/販売しています。ロードセルは HBM の中核技術であり、特に 40 年以上の実績をもつビーム型ロードセルは今もなお愛され続ける世界のスタンダードです。創業者の時代から続く HBM の革新の精神は、最新無菌ロードセルやデジタルロードセルなど、常に時代のニーズに則したソリューションの提案につながっています。