3Dプリントによるひずみゲージセンサ製造の改善

マティアス・レーベルガー、クリスチャン・ヴェダー、
マーティン-クリストファー・ノル

デジタルプリントとレーザ処理で、手作業の処理工程からなる従来の接着方法を置き換える。

変形量を測定するための検出素子として80年以上にわたって使用されてきたひずみゲージは、今や当たり前の存在となっている。しかし、測定値とそのデジタル処理を、自動化可能なプロセスによってはるかに高いレベルで再現可能とすることを求める声が、業界でますます高まるにつれて、従来の接着剤とセンサで構成されるひずみゲージは、新しい課題に直面している。そうした要求に応えて、新しい用途を開拓するために、積層造形技術を適用して、より柔軟な設計、自動化、再現性を、ひずみゲージの接着にもたらすことができる。積層造形によるひずみゲージのメリットが理解できるように、まずは従来の問題について簡単に振り返りたいと思う。

従来のひずみゲージとその取り付け方法

ひずみゲージは、部品表面の形状の変化（ひずみ／圧縮）に伴う力やモーメントなどの部品負荷を記録するために使用することができる（**図1**）。この目的に対し、測定の不確かさを低減するために、ひずみゲージはこの数十年間、絶えず改良されてきた。しかし、ひずみゲージの基本的な動作原理は変わっていない。導電体は力を加えると変形する。導電体の長さと断面の両方が変化するため、測定可能なそのオーム抵抗が直接変化する。

ひずみゲージと聞いてまず思い浮かぶのが、それを取り付けるために必要な骨の折れる作業である。接着作業は、多くの処理工程からなり、ノウハウが必要というだけでなく、キャリア箔が付いた状態で供給されるひずみゲージを、部品に貼り付けて正確な測定値を提示する測定点として設定するまでの作業の手の感触と経験が求められる。原則として、異物を混入させることなく薄い接着層を貼り付けるために、作業環境を清潔に保つ必要がある。家庭用製品に使われるような小さな力トランスデューサの場合は、ホットメルト接着方法が適用される。接着剤がコーティングされたひずみゲージを、圧力をかけて測定点に押し付け、部品を加熱装置で硬化させるという方法である。

サイズ、重量、温度感度が原因で、部品を加熱装置に入れることができない場合は、低温接着方法が適用される。接着領域にサンドペーパーをかけて油分を除去した後、ひずみゲージを貼り付ける位置に印を入れる。ひずみゲージ位置のマーキングと、その後の接着剤を均等に塗布する処理は、一般的に手作業で行われるため、ひずみゲージの水平方向の位置決めには大きな不確かさが生じる。接着剤が硬化する間に、約1分間圧力をかけてひずみゲージを接着させる。硬化した接着膜の厚みにはかなりのばらつきが生じる可能性があり、それはセンサの応答性に大きな影響を与える。

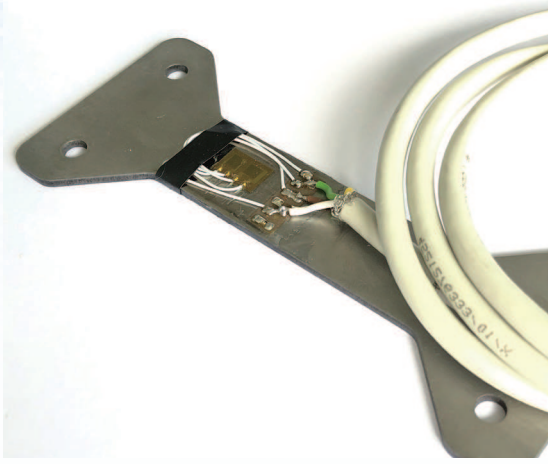

図1　従来の方法でステンレス鋼製の部品に貼り付けられた接続線付きのひずみゲージ（画像はすべてフラウンホーファーILT提供）。

つまり、ひずみゲージの接着には2つの問題がある。1つめは、手作業の工程によって人的ミスが生じるために、一貫した品質が得られないことである。この作業を補助するための手段が多数提供されており、それによって高い品質要件を満たすことができるが、労力と設定時間は増大する。測定点の品質が不十分である場合は、ひずみゲージを剥がし、剥がしたものはもう使用できないので、新しいものを貼り付けなければならない。2つめは、適格な人材を用意することが、ひずみゲージの取り付けにかかるコストの最も大きな割合を占めることである。数量が増えてもスケールメリットはほとんどなく、ほぼ数量に比例してコストは増大す

る。従って、自動プロセスによるひずみゲージの接着が必要である。

これに加えて、その後の測定とデータ送信に必要な作業があり、特に回転部品の場合は、ますます処理が複雑になる。ここでの一般的な方法は、測定データとエネルギーの両方を誘導結合によって送信する、誘導性のテレメトリシステムを使用することである。しかし、そのようなシステムは、非常に高額で特に堅牢ではないため、連続生産に適切に適用できるケースは限られる。表面弾性波（Surface Acoustic Wave：SAW）や磁気ひずみセンサ技術といったその他の手段は、一部の材料にしか適さず、現場で使用すると干渉の影響を受けやすいことが判明している。そのため、これらの手段はまだ確立された状態にはない。無線データ通信のための低消費電力の産業用ソリューションの開発が進んでおり、これは新しい可能性を切り拓いている。本稿後半では、これを利用した、外部のエネルギー源を必要としないセンサ技術の実用化について説明する。

ひずみゲージセンサのための付加的な材料プリント

上述の問題に対し、積層造形がどのように利用できるのだろうか。既に多くの3D部品が、さまざまな材料からプリント可能となっている。独フラウンホーファーレーザー技術研究所（Fraunhofer Institute for Laser Technology：Fraunhofer ILT）と独i4Mテクノロジーズ社（i4M Technologies）はこの疑問に応えて、プロトタイプを開発した。以下では、このプロトタイプについて説明する。

従来のひずみゲージは一般的に、抵抗性の測定グリッドがキャリアとカバーフィルムの間に挟まれた構造となっている。この箔ひずみゲージが、接着剤によって部品に貼り付けられる。部品のひずみは、2つの中間層を介して測定グリッドに伝送される（**図2**左）。原則として、力の伝送損失を防ぐために、測定グリッドは部品表面のできるだけ近くに配置する必要がある。接着層の厚みのばらつきは、力の伝送に影響を与え、ひずみゲージの測定点の応答性を変化させる可能性がある。プリント処理（インクジェット印刷など）によってひずみゲージを直接取り付ければ、部品と測定グリッドの間の層構造を簡素化することができる（図2右）。必要な中間層は、部品と測定グリッドの間の力伝送と電気絶縁の機能を統合した1つの層だけとなる。

3Dプリント技術を用いたひずみゲージの作成方法

本稿に示す積層造形方法では、絶縁層、金属製の測定グリッド、カバーまたは封止層の3つの機能層が、1つずつプリントされた後にそれぞれ機能化される。従来のひずみゲージのキャリアフィルムと接着層の機能は、1つの絶縁層が担う。これにより、測定グリッドを部品表面のより近くに配置できるようになるため、測定グリッドへのひずみの伝送が改善されると期待される。

層の形成には、どのようなプロセスが適しているだろうか。プロセスは、リソースを節約し、インラインで動作する、デジタル処理でなければならない。また、産業製造に適用できるだけの堅牢性が実証済みで、何よりもまず、センサあたりの製造コストを削減するものでなければならない。

積層造形によるひずみゲージを部品に適用する前に、錆、前の処理工程で残った潤滑剤、レーザ照射による酸化層などの干渉物質を、部品表面から取り除く処理が行われる。この処理に変更を加えて、表面を粗くすることも可能である。パルスレーザを照射して、非常に小さな領域を選択的に除去、再溶融、または改変することにより、後で層を貼り付ける際の接着性を高めることができる。

ディスペンサやインクジェットプリンターは、測定点に選択的に材料を堆積することができる。後処理は、効率的な光源（レーザまたはLED）によって行われ、部品を不必要に加熱することなく、必要なエネルギーをプリント層にすばやく結合する。

独フラウンホーファーケイ酸塩研究所（Fraunhofer Institute for Silicate Research：Fraunhofer ISC）で発明されたORMOCERなどのハイブリッドポリマーが、電気絶縁材料として使用できる。このポリマーは、非架橋型の

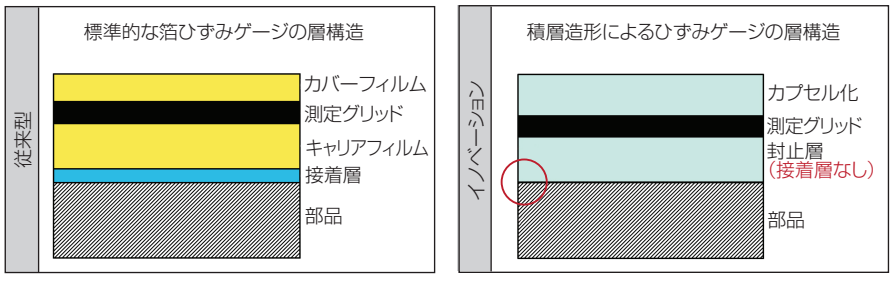

図2　従来のひずみゲージ（左）と積層造形によるひずみゲージ（右）の層構造の比較。

粘着性物質として提供されており、光開始可能である（すなわち、光照射で架橋が形成される）。材料は、ディスペンス処理によって選択的に適用可能であるため、必要な領域にだけハイブリッドポリマーを適用することができる（**図3**）。CNC制御システムによって、ディスペンサのガイドが行われ、正確な位置決めが確保される。続いて光源によって、数秒間で層の硬化が行われる。標準的な箔ひずみゲージと積層造形によるひずみゲージの層形成工程を、以下に比較して示す。

標準的な箔ひずみゲージの層構造:
・カバーフィルム
・測定グリッド
・キャリアフィルム
・接着層
・部品

積層造形によるひずみゲージの層構造:
・封止層
・測定グリッド
・絶縁層（接着層はなし）
・部品

金属部品上に電気絶縁層を生成した後、抵抗性センサの測定グリッドをプリントする。この処理は、金属ナノ粒子インクのインクジェット印刷によって行われる。薄い液体インクには、金属ナノ粒子、助剤、溶媒が含まれており、カラープリンターでイメージを印刷するように、絶縁層の上にプリントすることができる。エッチング処理のようなステンシルやマスクは不要で、測定グリッドは、特定の測定処理に合わせてデジタル処理によって改変することができる。金属インクを導電性にするために、溶媒や補助剤などの揮発性物質を気化させて、金属粒子を互いに焼結させる必要がある。レーザ焼結は、この加熱の後処理に特に適している。部品全体を加熱装置に入れる必要がないためである。焼入れ鋼など、温度に敏感な基材には特に、これは重要なメリットである。最後の封止層は、測定グリッドを環境的影響から保護するもので、絶縁層と同じ材料とプロセスで製造できる。以上の工程で製造されたセンサを、**図4**に示す。

レーザで後処理を施したデジタルプリントのひずみゲージによって基本的に、手作業の影響を受けない一貫した品質を、連続生産において魅力的なコストで達成することができる。この方法は、変更に柔軟に対応できる少量生産に対して特にメリットがある。設備を一新することなくカスタマイズされた設計に対応できるためである。しかし、プロセス開発のすべての課題が既に解決されているというわけではない。例えば、金属インクと絶縁材料で、材料に合った温度補償や力伝送の定義が可能であるものや、レーザ機能化プロセス用に開発されているものは、現時点では限られている。そのためフラウンホーファー ILT は、研究パートナーや産業ユーザーと協力して、さらなる開発を続けている。

単なる測定点ではない スマートセンサ

しかし、センサとしてのひずみゲージだけでは十分ではない。スマート部品の測定データをデジタル化し、送信し、解析することが必要だからである。測定データは今、「スマートデータ」（経済的に利用可能なデータ）となっている。それは、残余耐用年数、自動保守計画、最適化された制御戦略などを表している可能性がある。そのすべてが、予知保全などの概念の基礎をなすものである。部品負荷を正確に測定するには、ひずみゲージに基づく測定点を力の向きに合わせて設定する必要がある。しかし、特に最新型の機械には、あまりスペースがない。また、数量が多くなると特に、このようなソリューションに対する価格圧力は高く、連続生産に対応するソリューションが求められる。

高集積で低消費電力の無線テレメトリが開発されている。積層造形センサからのデータを送信するもので、ひずみゲージとともに部品に取り付けられ

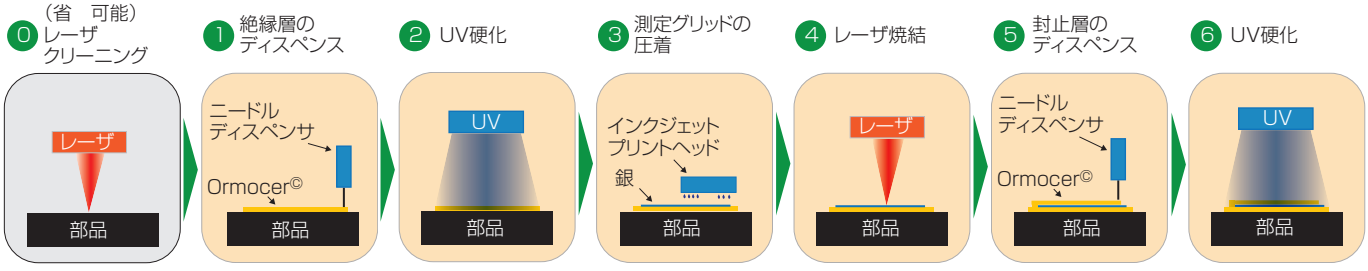

図3　レーザを用いた積層造形によってひずみゲージを部品に取り付ける処理工程の模式図。

る（図4）。商用提供されている最新のハードウェアが使用されており、最適化されたファームウエアの採用によって電力効率は最大限に高められている。

・Cortex M4 MCUと2.4GHzの無線モデムで構成された、超低消費電力のSoC（System on Chip）
・24ビットA/Dコンバータ、集積型信号増幅器、基準電圧源を備えた、アナログ測定フロントエンド
・その他6個のDOF MEMSセンサ（加速度センサ、ジャイロメーター）と温度センサ
・適切な充電電子部品と保護回路を備えた、リチウムイオン電池またはリチウム一次電池

特別に設計されたプロトコルが、2.4GHz帯でのデータ伝送に使用される。これによって、Bluetoothやその他の産業用プロトコルよりもデータレートは高く、遅延は低くすることができる。最大で19.2kHzのサンプリングレートが可能で、無線でのストリーミングも可能である。ただし、電力要件、すなわちバッテリー持続時間は、選択したサンプリングレートに直接的に依存する。ひずみゲージの測定ブリッジ回路は、電力要件が最も高いため、パルスモードで動作するが、パルスモードで動作できるのは一定のサンプリングレート以下の場合のみである。より高いサンプリングレートで非常に短い時間だけ、すべてのコンポーネントを低消費電力のスリープモードで動作させることもできる。19.2kHzにおける連続稼働時間は、バッテリーにもよるが数時間から数日であるのに対し、サンプリングレートを下げて不連続動作にすると、数年間の稼働が可能である。

このソリューションにより、高可用性部品を対象に厳しい設置スペース制約の下で、高性能でエネルギー自律型のセンサを製造することができる。このセンサ技術は、温かい油や鉄道システムの中の歯車や転がり軸受から、強い電気干渉場や激しい振動にさらされる風力タービンに至るまでの多様な技術システムにおいて、既に適切に実用化されている。MCUの演算能力により、エッジ解析（FFTなど）をセンサ上で実行することも可能である。このようなスマートセンサは、データ伝送量を大きく削減し、エッジコンピューティングによってさらなるエネルギー効率を達成することができる。また、センサ内のオンラインアルゴリズムによって、例えば、センサフュージョンや適切なフィルタを使用することにより、取得した測定値の品質を高めることが可能である。

ただし、本稿のテレメトリソリューションには、まだ1つの制約が残っている。それは、バッテリーで動作することである。バッテリーで数年間動作を持続させることが可能だが、無限には続かない。そこで検討されているのが、エネルギーハーベストである。i4Mテクノロジーズ社では、温度とRFハーベストに基づく方法を調査し、既に有望な結果を得ている。

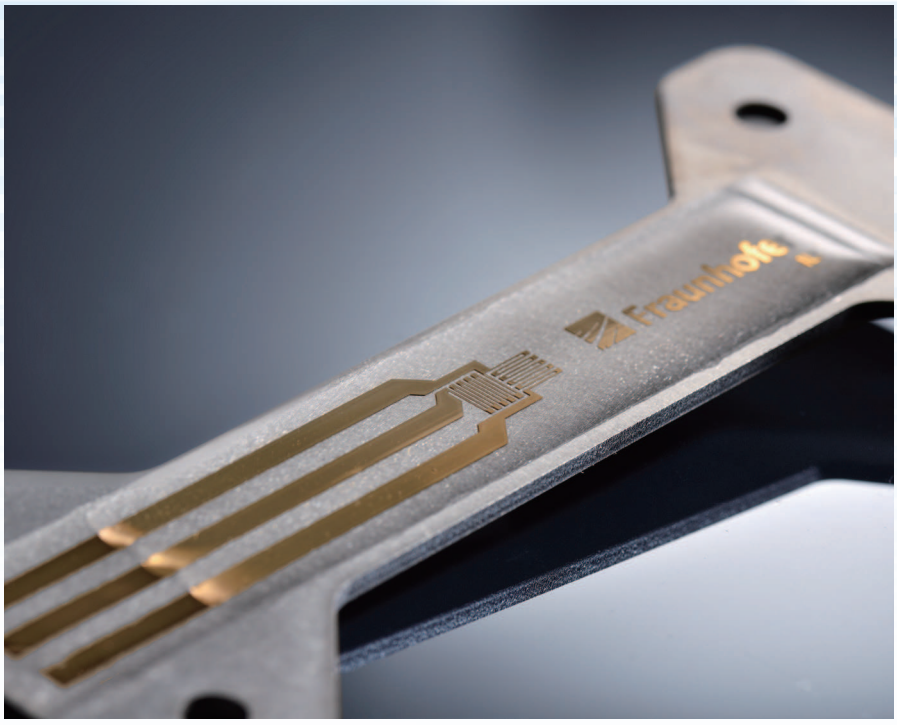

図4　積層造形によってスチール製部品に取り付けられたひずみゲージ。この写真のスチール部品にはテレメトリが組み込まれている。

著者紹介
マティアス・レーベルガー理学修士（M.SC. MATTHIAS REHBERGER）は、フラウンホーファーレーザー技術研究所（Fraunhofer Institute for Laser Technology：Fraunhofer ILT）の薄膜加工グループ（Thin Film Processing Group）に所属する研究助手、クリスチャン・ヴェダー博士（Dr. CHRISTIAN VEDDER）は同グループ責任者。マーティン-クリストファー・ノル工学学士（Dipl.-Ing. MARTIN-CHRISTOPHER NOLL）は、独i4Mテクノロジーズ社（i4M Technologies GmbH）社長。
e-mail：matthias.rehberger@ilt.fraunhofer.de URL：www.ilt.fraunhofer.de/thinfilmprocessing

ILSJ