

熱間鍛造用摩擦センサの開発

金沢大学 理工研究域 機械工学系

教授 米山 猛

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013006)

キーワード：熱間鍛造，摩擦，センサ，工具

1. 研究の目的と背景

塑性加工において、工具表面と材料との接触面における摩擦条件を解明することは、加工精度を向上し、良好な塑性加工品質を得るために重要である。塑性変形の有限要素解析が進み、変形をかなり正確に予測できるようになってきたが、工具表面における摩擦条件については、実測するセンサが確立していないために、せん断摩擦係数 m 値（せん断降伏応力に対する比）を仮定して、実物の全体の変形と解析における変形を照合する程度で、実際の摩擦応力の状況については解明されていない。

筆者は、塑性加工工具表面で圧力のみでなく、摩擦応力を検出するセンサの構造を提案し、アルミニウム熱間押し出しで実測し、等温押し出しに活用した。しかし、このセンサはサイズが 20 mm 程度と大きく、各種の塑性加工に適用するためには、サイズの小型化が求められていた。また摩擦センサの出力を検定する方法が確立しておらず、検定方法の確立も課題として残っていた。

そこで、本研究では、熱間鍛造に適用できる圧力・摩擦センサを開発することを目的とした。また摩擦センサの出力を検定する装置を開発することも目的とした。

2. 摩擦センサの設計と製作

2.1 摩擦センサの設計

摩擦センサの基本的な構造と検出原理を図 1 に示す。基本的な構造は、図 1(a) に示すように、工具表面に薄肉平板部分をつくり、その背面から 2 本のビームを突き出して、その 2 本のビームの下端を薄肉平板でつないだものである。2 本のビームが並んだ方向を摩擦応力検出方向とする。2 本のビーム下端の薄肉平板の表面上、ビームが接続されている位置にそれぞれひずみゲージを貼り付ける。工具表面に圧力が作用すると、工具表面の薄肉平板部がたわみ、この変形によって 2 本のビームが外側に傾くので、ビーム下端の平板は図 1 (b) のようにたわみ、平板との付け根のひずみゲージの貼り付け部には、ちぢみが両方に生じる。二つのひずみの和と負荷した圧力との関係をあらかじめ求め、圧力を検出する。工具表面に摩擦力が作用した場合には、工具表面の薄肉部分が図 1(c) のように変形し、工具の厚肉部から薄肉に突き出した部分は工具表面が下に倒れ、工具表面の薄肉部から厚肉部に接続する部分では、工具表面が上方向にめくられる変形が生じる。この変形によって 2 本のビームが傾く変形が生じ、これによって、ビ

ームの下端には段差が生じる。この段差に対応してビームの下端をつなぐ平板が変形するので、ひずみゲージの片方には伸びが、一方にはちぢみが生じる。したがって、両者のひずみの差と負荷した摩擦応力との関係を求めておき、摩擦応力を検出する。

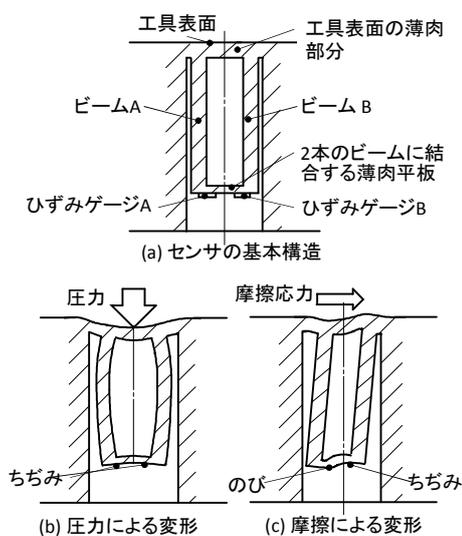
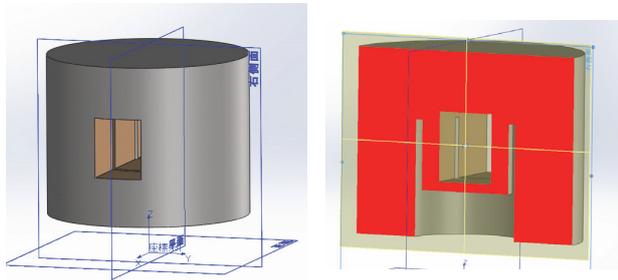


図 1 摩擦センサの基本構造と検出原理

この基本原理に基づいて、熱間鍛造用の圧力・摩擦センサを設計した。図 1 では、センサの構造部分と工具とが一体化しているが、様々な工具表面に埋め込みが可能なセンサとしては、ピンタイプのセンサが好ましいと考え、工具表面に取り付け穴を設けて、そこにセンサピンを埋め込むことを想定してセンサの設計を行った。図 1 のようなセンサ構造を製作する場合、最大の問題は、工具表面と 2 本のビームそしてビーム下端部の薄肉平板ではさまれる四角穴部分の加工である。この横穴を放電加工でくり抜くためには、そのための放電加工電極を挿入できる空間をビームの横に設けなくてはならず、加工費用も高価になる。そこで、新たに図 2 のような構造を提案した。この構造の特徴は、この横穴をセンサピンの外側からピンの側面を通して貫通加工することである。これによってピンの内部は、円筒の軸方法にそって、工具表面から円柱ブロックが突き出るような形にまで加工し、その後ピンの側方から四角穴を加工する（順序は逆でもよい）ことで容易に製作することができる。ただし、この構造にした場合の懸念も残る。それは、センサピンの側面から穴をあけたために、検出部の外側にも工具表面の薄肉部分が形成され、この部分の剛性

が落ちて、この部分に作用する力がセンサの出力に影響しやすくなることである。しかし、この部分は摩擦がはたらく方向にそって、センサの位置と同一な位置になるため、影響は小さいと判断した。



(a) 摩擦センサの3次元モデル (b) 検出部の断面
図2 摩擦センサの3次元モデル

摩擦センサの設計にあたっては、工具表面に負荷される圧力や摩擦応力に応じて、図3に示すような各部の寸法を決める必要がある。工具表面に負荷される圧力と摩擦応力の目安として、圧力500MPa、摩擦応力200MPaを想定した。

有限要素法を用いて負荷に対するひずみ出力を予測し、各部の寸法を決める。図2で示したような3次元ブロックの受圧面に圧力および摩擦応力を与えて、ひずみ出力を解析し、各部の寸法を決定する。

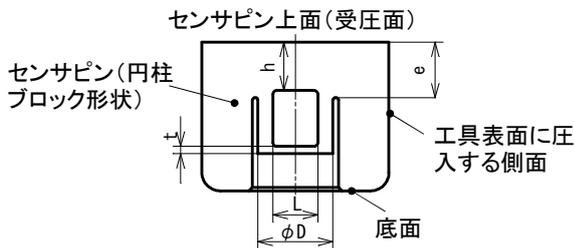


図3 センサの設計で検討する各部寸法

解析にあたっては、センサの拘束条件（工具表面に埋め込んだ場合の拘束条件）をどう与えるかが問題となる。センサの底面は固定とし、センサピンの側面をどう拘束すべきか考慮する必要がある。受圧面に圧力を受けるとセンサピンは全体として上下方向に圧縮されるので、ピンの円筒側面も上下方向には可動である必要がある。一方、受圧面に摩擦応力が作用してもセンサピンの側面は垂直を保ったままに拘束すればよいかというと、周囲の工具表面にも同様な摩擦応力がはたらいて工具表面と平行な方向に何らかの変形を生じるので、このセンサピンの側面も周囲の工具と同様に変形するはずである。これらのことを考えると、センサピンの円筒側面を上下にだけ可動で、横方向には動かないと仮定することは適切ではないと考えられる。そこで、適切ではないかもしれないが、センサピンの底面だけを固定した状態で受圧面に圧力と摩擦応力を与え、これによってビーム下端の薄肉平板部に発生するひずみを求め、センサ各部の寸法を決めていくこととした。

センサの受圧面に摩擦応力 200MPa のみを作用させた場合のセンサブロックの変形（中心断面図において変位を拡大して示した図）とビーム下端薄肉平板部（ひずみゲージ貼付面）に発生するひずみの解析例を図4に示す。摩擦応力の負荷に対して、ひずみゲージ貼付面においては、摩擦方向に沿って、のびからちぢみへとひずみが変わる分布をもつことが確認できる。図3に示した h や t 、 e 、 L の値を変えて、ひずみ出力の状況を調べ、各部の寸法を決定した。

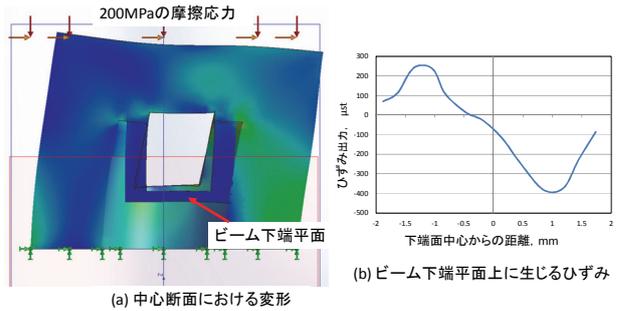


図4 摩擦センサへの摩擦応力負荷に対する変形とひずみ出力の解析例

各部寸法を決めた摩擦センサの構造を図5に示す。センサブロックの寸法は、直径 10 mm、高さ 8 mm とした。材質は SKD61 で製作する。圧力・摩擦応力を検出する受圧面は幅 4.6 mm の部分である。なお、この図で、センサの断面図は受圧面を上にして描いてあるが、製作したブロックの写真は、検出部の構造が見えやすいように、受圧面を下側にして示してある。

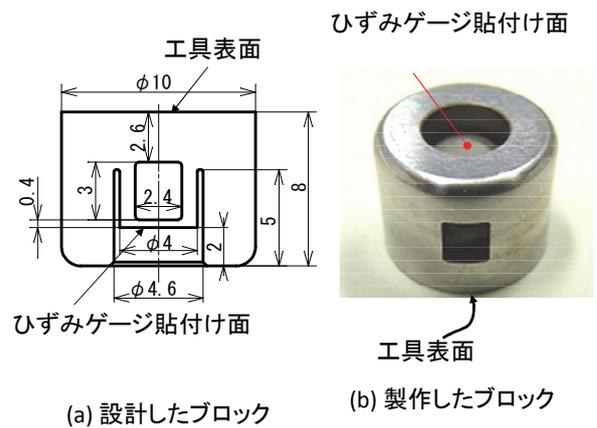


図5 圧力・摩擦応力検出ブロックの構造

2.2 摩擦センサの製作

センサブロックへのひずみゲージ貼付けの様子を図6に示す。熱間鍛造の際、加工される鉄材料の温度は、1000℃前後であるが、金型温度は 250℃程度に収めることが可能なため、250℃の耐熱性があるひずみゲージとして、共和電業 KFH-02-120-C11-11H4M3(耐熱温度 250℃)

を使用した。ひずみゲージには 350°Cの耐熱温度のものも市販されているが、ベースサイズが大きいため、本センサへの貼り付けには適さないため、ベースサイズの小さいこのひずみゲージを採用した。ひずみゲージからのリード線は 3 線式になっており、1 ゲージ法で検出した場合、リード線部分の抵抗変化を相殺することができる。ひずみゲージの接着剤には 2 種類あるが、接着剤の加熱硬化処理の前に、半硬化して固定が容易な接着剤として PC600 を使用した。センサのひずみゲージ貼り付け面が小さいため、ひずみゲージのベースの外周部分を、貼り付けができるサイズに切り取って貼り付けを行った。ひずみゲージの数は貼り付け面のスペースの都合から、2 枚とした。ひずみゲージのリード線部分（ひずみゲージから 20 mm の長さの部分）にはガラス繊維テープが貼られており、はがすことは困難であることから、このガラス繊維テープの幅を極力細くなるように切断して使用した。ひずみゲージの貼り付けは、接着剤 PC600 の加熱硬化法にそって、まず、貼り付け面にひずみゲージを貼り付けた後、シリコンゴムを用いて、ひずみゲージを加圧した状態で電気炉に入れて、所定の温度一時間プロセスで加熱硬化させた。ひずみゲージの貼り付け後は、ひずみゲージとリード線のつけ根部分をシリコンゴムで覆い、リード線をシリコンチューブに入れて、このシリコンチューブをセンサピンの空洞部に樹脂で固定した。

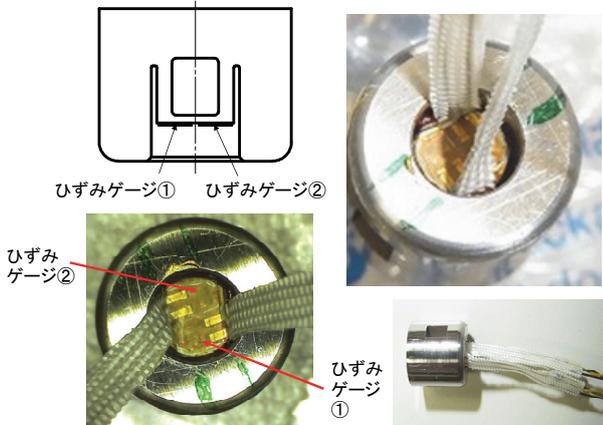


図5 圧力・摩擦センサブロックへのひずみゲージ貼り付け

3. 検定装置の設計・製作と検定

3.1 検定装置の設計と製作

センサの出力を検定するため、図6のような検定装置を設計・製作した。センサをホルダにセットし、アルミニウム円柱ブロックをセンサの受圧面に垂直に押し当てて、その荷重から負荷した圧力を求め、これをセンサの出力と比較する。圧力を付加した状態で摩擦方向にブロックを引っ張り、この引張荷重から負荷した摩擦応力を求めて、センサからの出力と比較する。このような装置による圧力と摩擦応力の負荷が検定装置として適切かどうかについては検討の余地がある。圧力の検定については、センサの受圧

面に負荷したブロックとの接触面において、作用する圧力分布が均等になるとは限らない。そこで、この負荷する円柱ブロックをゴム材料にした場合なども調べた結果、熱間鍛造における被加工材の変形抵抗に近い変形抵抗を持つと考えられるアルミニウムブロックを採用した。一方摩擦応力の負荷についても、センサの接触面において均一な摩擦応力が作用するとは限らない。あくまでこの検定装置で負荷した摩擦応力の値は、センサの受圧面に沿った方向にはたらいだ横方向の力を、接触させたブロックの接触面積で割った値である。なお、センサの受圧面に横方向の荷重を作用させる場合、その荷重の一部は、ブロックの上面側の加圧面側にも伝わる。そこで、ブロックを加圧する側のロードセルを 2 軸ロードセルとして、加圧荷重と横荷重の両方を検出できるようにして、センサにはたらく横荷重は、引張ロードセルで検出した荷重からロードセルにはたらいだ横荷重を差し引いて求めるようにした。

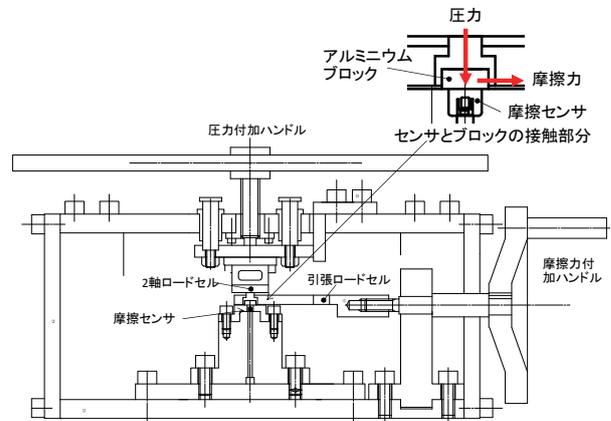


図6 摩擦センサ出力の検定装置

3.2 摩擦センサの検定結果

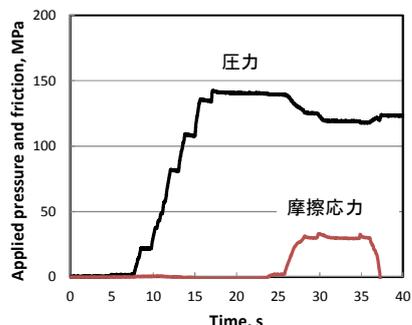
摩擦センサの検定出力例を図7に示す。図7(a)は負荷した圧力と摩擦応力である。はじめに円柱ブロックをセンサ受圧面に押し付け、その後摩擦応力を負荷している。摩擦応力を負荷した際、円柱ブロックとセンサ受圧面との間に多少のすべりが生じるとともに、負荷圧力が多少減少している。摩擦応力負荷時の負荷圧力の減少は、圧力負荷装置を電動装置等にして、圧力を保持するように制御すれば、防ぐことが可能であると考えられるが、今回製作した装置は、手動装置で、圧力を負荷するハンドルを止めた状態で、摩擦力の負荷を行ったので、このような減少が生じたものである。これに対して、図7(b)がセンサのひずみゲージ①、②の出力である。負荷圧力に対して、ひずみゲージ①、②ともほぼ同様な出力（圧縮ひずみ）を発生している。一方、摩擦応力の負荷に対し、片方のひずみゲージは、ひずみが+方向に移動しており、摩擦応力に対して伸びひずみを発生していることがわかる。またもう一つのひずみゲージは圧縮ひずみが増加する方向に変化している。これらのひずみ出力には、圧力が低下したことによるひずみの変化が重畳しており、圧力によるひずみ分を取り除けば、摩擦

応力によるひずみ出力分を取り出すことができると考えられる。そこで、ひずみゲージ出力 O_1, O_2 と圧力 p 、摩擦応力 f との関係を、

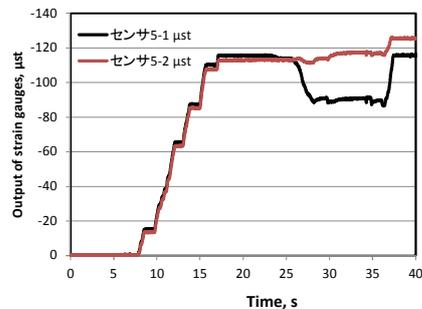
$$\begin{aligned} O_1 &= \alpha_1 p + \beta_1 f \\ O_2 &= \alpha_2 p + \beta_2 f \end{aligned} \quad (1)$$

とし、検定出力から、各係数を求める。 p に対する出力係数 α_1, α_2 は、圧力負荷時の各ひずみゲージの出力と圧力との関係から求めることができる。また摩擦応力に対する出力係数 β_1, β_2 は、検定において、摩擦を負荷した時点のひずみ出力から上記の p に対する出力係数を用いて、 p による出力ひずみを除去して求めることができる。このようにして、図7の出力例から、圧力に対するひずみ出力、摩擦応力に対するひずみ出力を求めたのが図8である。

測定に際しては、(1)式を、ひずみ出力から p および f を求める式に変換して、測定したひずみから圧力および摩擦応力を求める。



(a) 負荷した圧力と摩擦応力



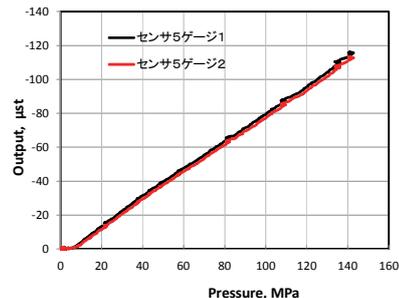
(b) センサのひずみゲージ出力

図7 圧力・摩擦センサの検定出力例

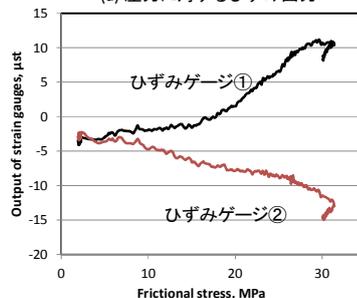
4. 鍛造における測定による確認

開発したセンサを用いて、熱間の据え込み鍛造における圧力・摩擦応力の測定を行った。実際の熱間鍛造における測定から確認できた事柄について報告する。

実際の測定にあたって懸念された事項の一つは、高温の材料との接触によるセンサ部の温度上昇による温度ドリフトである。しかし、熱間鍛造において材料と金型とが接触する時間は20ms以下であり、その時間において、材料と接触する前と接触した後の出力の差(ゼロドリフト)は非常に小さいことを確認した。つまり、材料との接触が



(a) 圧力に対するひずみ出力



(b) 摩擦応力に対するひずみ出力

図8 圧力および摩擦応力に対するひずみ出力の例

生じる直前のセンサの出力値をゼロ点として、波形を処理すれば、応力が求められることを確認した。

もう一つの問題は、鍛造過程で最初は材料と接触していなかったセンサ受圧面に、鍛造の変形途中で接触する場合、センサの受圧面全体に材料が接触した以降でないデータを取らないことである。材料が受圧面に半分だけ接触して圧力がかかった場合などは、受圧面がかたよった変形を生じるため、適切な出力が発生しない。このような過渡状態における出力を除外して、センサの受圧面全体に接触してからのデータを扱うことが必要である。

5. まとめ

熱間鍛造において工具面にはたらく圧力と摩擦応力を検出するセンサを開発した。センサの出力を検定する装置を製作し、検定性能について検討した。開発したセンサを用いて、鍛造における据え込みにおける圧力・摩擦応力の測定を行い、開発したセンサによる測定性能を確認した。

謝辞

本研究に対し、天田財団より貴重な助成を賜ったことを心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 米山猛・高橋昌也, 摩擦センサの開発とアルミニウム熱間押出しにおける測定, 塑性と加工, 45-521, 470-474.
- 2) 米山猛, センサ, 摩擦力計測方法, 圧力計測方法, 及び摩擦力・圧力同時計測方法, 特許番号 3632089