

超音波による工具接触圧力分布測定法に関する研究

神奈川工科大学 工学部 機械工学科

助教 水野敏広

(平成 19 年度奨励研究助成 AF-2007041)

キーワード：超音波，工具接触圧力分布，反射特性

1. 緒言

塑性加工では，工具を介して被加工材に加工力を作用させる．材料・工具間に生じる圧力の大きさは材料の降伏応力の数倍に達する場合がある．工具には大きな負荷となり，工具損傷や摩耗の主因である．そこで，工具に生じる接触圧力分布を定量的に測定できれば，工具の形状，強度，摩耗，潤滑条件などを検討するために非常に有効である．接触圧力を測定する方法として，従来測圧センサや感圧フィルムが用いられている．これらの方法は，測定のために何らかの形で接触面の状態および性質を変化させてしまい，本来目的とする接触圧力を測定しているとは言えない．

工具と材料の接触状況を変化させずに圧力分布を測定する方法として，筆者は，超音波を利用する方法を検討してきた．材料と工具の接触境界面に超音波が垂直入射すると，一部は反射し，残りは材料側へ透過していく．この反射と透過の割合は，接触圧力の大きさに依存して変化すると考えた．この反射特性と接触圧力との相関関係が見出せれば，接触圧力の測定が可能である．実験的に検討した結果，潤滑条件として，無潤滑および混合潤滑状態においては，材料と工具の接触界面の接触圧力と反射特性は相関し，この相関を定量的に較正值として求めれば，接触圧力分布の定量測定が可能であることを明らかにした¹⁾．

本研究では，接触圧力と反射特性の相関を較正值として求め，円柱据込み加工の接触圧力分布の定量測定を試みた結果を報告する．

2. 測定の方法

工具と材料の接触モデルとして，境界潤滑と流体潤滑が混在する混合潤滑状態を考える．

超音波が音響的性質の異なる媒質の境界平面に垂直入射すると一部は反射され，一部は透過する．工具内を伝播した超音波が工具・材料接触面に垂直に入射する場合を考える．部分的に固体接触が生じる境界潤滑面と流体潤滑面のそれぞれの接触部分の超音波の音圧反射率 r を考えると，工具と材料が同質の場合，境界潤滑部分の反射率 r_b は 0 もしくは小さな値であり，流体潤滑部分は $r_f = 1$ であると考えられる．一般に加工が進行し接触圧力が増加すると， $r_b \rightarrow 0$ である境界潤滑部分が増し，音波の透過量は増えて，反射量は減少すると考えられる．接触状態が変化す

ることにより超音波の反射特性が変化する．この関係を用いれば，接触圧力の測定ができる．

接触圧力と反射波音圧の関係について，音波の減衰は考えないと仮定し，入射波と反射波の量を考えることにより，反射波音圧は次のように表せる．

$$P_r = r_f P_i \frac{(S_0 - S)}{S_0} = r_f P_i \left(1 - \frac{S}{S_0}\right) \quad \dots \dots 1$$

ここで， S_0 は接触面上で超音波が入射する面積， S は S_0 領域内の境界潤滑部分の面積である． P_r ， P_i は超音波の音圧であり，添字 i, r は入射，反射を示す．

接触圧力を Q として S/S_0 との関係は比例とし²⁾，

$$\frac{S}{S_0} = a_0 Q, \quad a_0 = \text{定数とすると, 1式は,}$$

$$\frac{P_r}{P_i} = r_f (1 - a_0 Q) \quad \dots \dots 2$$

となる．定性的に接触圧力と反射波音圧の関係は 2 式の様になると考えられる．

接触圧力が 0 のときを基準として，接触圧力が Q_1 のときを考える． $Q = 0$ を 2 式に代入すると，

$$\frac{P_{r0}}{P_i} = r_f$$

ここで， P_{r0} は $Q = 0$ のときの反射波音圧である．

次に， $Q = Q_1$ を代入すると，

$$\frac{P_{r1}}{P_i} = r_f (1 - a_0 Q_1)$$

ここで， P_{r1} は Q_1 のときの反射波音圧である． P_i は一定であるので，

$$\frac{P_{r1}/P_i}{P_{r0}/P_i} = P_{r1}/P_{r0} = 1 - a_0 Q_1$$

となる．ここで，反射特性値 E を次のように定義する．

$$E = 1 - P_{r1}/P_{r0} = a_0 Q_1 \quad \dots \dots 3$$

a_0 は材料，潤滑条件など加工条件によって定まる正の係数で，較正試験によって定まる．反射特性値 E を測定することにより接触圧力を定量的に知ることが出来る．

3. 円柱据込み実験

円柱据込みは、円柱の直径に対する高さの割合が小さいほど、また材料工具間摩擦が大きいほど円柱中心で接触圧力が大きく、半径方向に小さくなっていくことが知られている。このような摩擦丘のある接触圧力分布の測定するために、反射特性値の分布を測定した。

3-1 測定装置および条件

図1に測定の概要を示す。超音波測定は市販のデジタル超音波探傷機を用いる。超音波の入射および反射波の受信は超音波探傷機に接続された探触子により行われる。探触子を圧縮工具の外側表面に設置し、工具に超音波を入射させ、工具と材料との接触面の反射波を受信する。探傷機により、反射波の音圧を測定する。超音波の周波数は10MHzとした。探触子は直径約10mmの円柱形状をしている。

接触圧力の分布測定においては、圧力の測定箇所ごとに探触子を設置しなければならない。本実験では、材料中心部および半径方向にわたって3カ所とし、3つの探触子を工具外表面に設置した。

実験材料は純アルミ A1070 焼なまし材を用いた。図2に圧縮試験により求めた A1070 焼なまし材の変形抵抗ひずみ曲線を示す。耐力は23MPaであった。試験片形状は、直径64mm 高さ直径比0.5で、旋盤加工した。試験片端面の表面粗さは、約 $2.0\mu\text{mRa}$ とした。

接触圧力分布の摩擦丘の勾配を大きくするために、材料接触端面の半径方向の流動を拘束するために、工具は直径64mm、深さ1mmのくぼみ形状とした。材質はSKD11、工具面はラップ仕上げとし、表面粗さは $0.2\mu\text{mRz}$ である。

圧縮負荷には500kNの万能試験機を用いた。加工速度は約 0.5mm/min と小さくした。圧縮負荷が20kN増加するごとに、圧縮し続けた状態で3カ所の反射特性値を測定した。

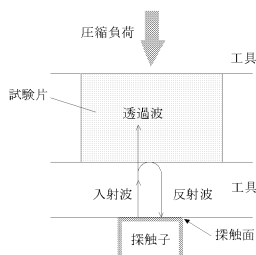


図1 測定方法の概要

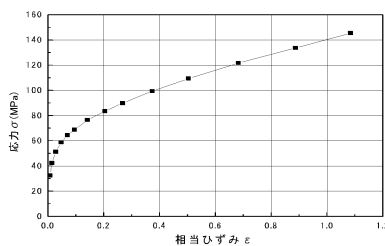


図2 変形抵抗-ひずみ曲線

3-2 結果

材料と工具面を脱脂した条件で円柱据込みを行い測定された反射特性値分布を図3に示す。縦軸に反射特性値E、横軸は圧縮荷重を試験片初期断面積で除した平均接触圧力である。図中、E1は材料中心接触部の反射特性値を示し、半径方向に沿ってE2、E3で示した。反射特性値は材料中心部で最も大きく、半径方向に沿って小さくなっている。これは、接触圧力分布の摩擦丘により反射特性値が分布したと考えられる。中心部で最も圧力が大きく、半径方向に小さくなっていると推測できる。

潤滑油が塗布された場合の影響を知るために、接触面に市販冷間鍛造用潤滑油(8815)を塗布して据込みを行った。測定された反射特性値を図4に示す。図3で示した脱脂した場合と同様に材料中心接触部で最も大きくなっている。また、試験片外周部では超音波が全反射し、反射特性値はほぼ0である。これは、油が半径方向に流出し、外周近傍接触面に相当厚の油膜が形成され、完全な流体潤滑状態になっているためと考えられる。

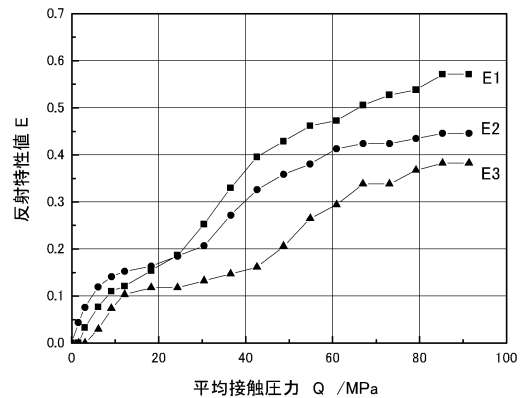


図3 反射特性値

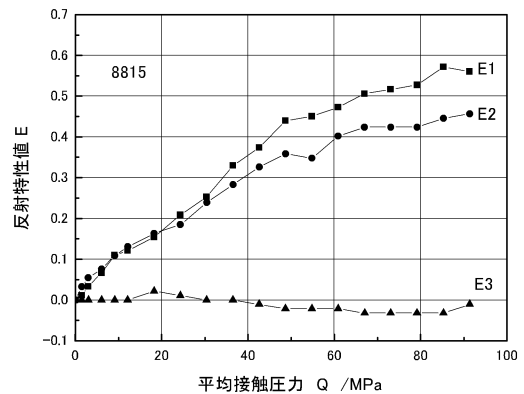


図4 反射特性値(油塗布)

4. 較正実験

4-1 実験方法

接触圧力と反射特性値の較正值を求めるために、円柱据

込みの供試材料である A1070 焼なまし材を直径 10mm、高さ 10mm に加工し、繰り返し圧縮を行った。約 0.25mm 圧縮するごとに反射特性値と圧縮応力を測定した。次に圧縮するときには試験片を旋盤加工し、直径を 10mm にした。この繰り返し圧縮を圧縮ひずみで約 0.3 まで行い、その繰り返し毎に測定した反射特性値と圧縮応力の関係を接触圧力の較正值として用いる。なお、弾性変形領域の反射特性値は、圧縮開始から塑性圧縮までの間で適宜測定した。

4-2 較正值測定結果

図 5 に試験片と工具面を脱脂した条件で測定した較正值曲線を示す。縦軸は反射特性値および圧縮応力である。反射特性値に相関する圧縮応力が接触圧力となる。図 6 に試験片と工具の接触面に油を塗布したときの較正值曲線を示す。比較すると、油塗布の曲線は応力が小さい範囲では、特性値が大きくなっている。

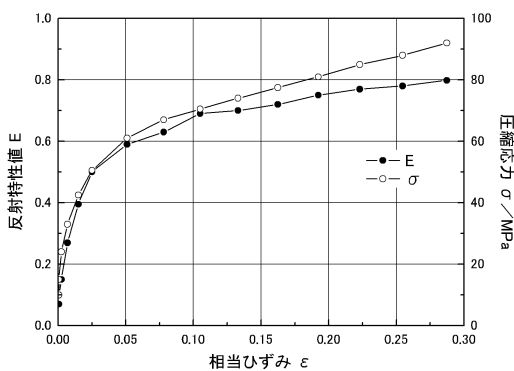


図 5 較正值曲線

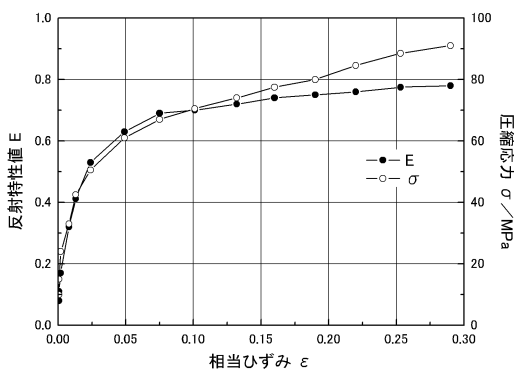


図 6 較正值曲線(油塗布)

5. 圧力分布

較正值曲線における圧縮応力を接触圧力として、反射特性値と接触圧力の相関を近似式で表し、この相関式から図 3 および図 4 の結果から円柱据込みの接触圧力分布を求めた。図 7 に図 3 の反射特性値から求めた接触圧力分布を示す。分布は、ほぼ反射特性値の分布と同様の傾向である。図 8 には、図 4 の反射特性値から求めた接触圧力分布を示す。

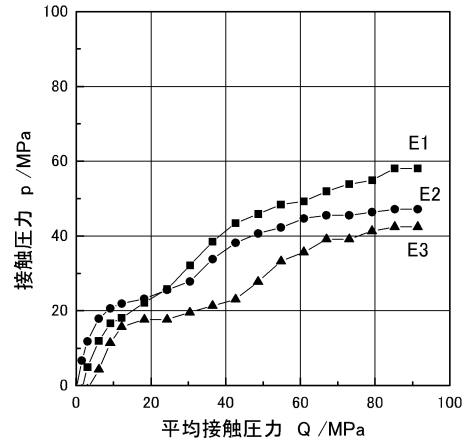


図 7 接触圧力分布

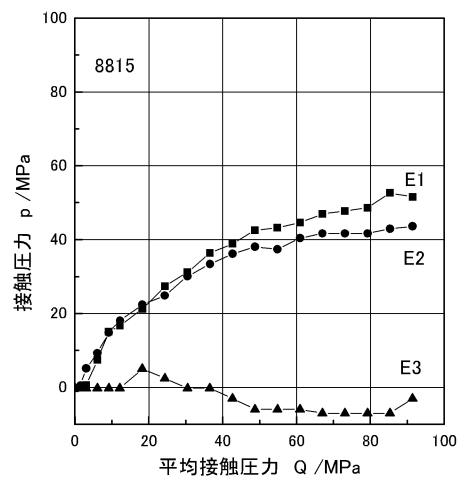


図 8 接触圧力分布(油塗布)

6. 結言

超音波による工具接触圧力分布測定法を適用し、円柱据込みにおける工具接触圧力分布を測定した。その結果、一般に知られている摩擦丘の圧力分布を測定できた。油を塗布した場合、外周部近傍で油膜が形成される場合は、圧力を測定することはできない。今後、本測定法の接触圧力の較正方法の改良を進め、測定精度の向上と圧力分布図を作成できるように研究を進めたい。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、(財)天田金属加工機械技術振興財団から研究助成をいただき、関係各位に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水野敏広：FORM TECH REVIEW 18-1(2008),20.
- 2) 高橋壮治：塑性と加工,6-52(1965),271.