



T. Mizuno

超音波による工具接触圧力分布測定法に関する研究

水野 敏広*

1. はじめに

塑性加工では、工具を介して被加工材に加工圧力を作用させる。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、筆者らは接触圧力によって生じる工具の弾性ひずみの分布から圧力分布を推定する方法を提案したり、この方法では、工具の弾性ひずみをひずみゲージを用いて測定する。プラスチックを用いた平面ひずみ圧縮と丸棒の押し出しのモデル実験を行い、接触圧力分布を定量測定できることを示した。しかし、ひずみゲージを直接工具外面に貼り付けるために工具設計が制約される。また、熱間加工や工具が温度上昇する場合には適用が困難である。一方、工作機械案内面や機械構造物の結合部の接触圧力の測定では、非破壊検査など工業的に広く利用されている超音波を応用し、実用上の成果が挙げられている^{2),3)}。プラスチック成形加工においても、金型内の圧力測定に超音波の利用が試みられている⁴⁾。

塑性加工において、材料と工具が本来の接触状態を保持したまま接触圧力分布を測定できる新たな方法として、筆者は、超音波を利用する方法を検討してきた⁵⁾。材料と工具の接触境界面に超音波が垂直入射すると、一部は反射され、一部は材料側へ透過する。この時、接触圧力の大きさに依存して反射特性が変化する。接触圧力と反射特性の相関関係が見出せれば、接触圧力の測定が可能である。

本稿では、本測定法の概要と反射特性に及ぼす超音波の周波数や潤滑条件の影響、さらに円柱据込みを例にその反射特性値の分布を測定し、接触圧力分布を定量的に評価した結果を述べる。

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 $r_f \approx 1$ 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、 $r_b \approx 0$ 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。

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

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⁶⁾、

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

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

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、

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

となる。ここで、反射特性値 E を次のように定義する。

$$E = 1 - \frac{P_{r1}}{P_{r0}} = a_0 Q_1 \cdots 3$$

*神奈川工科大学工学部 機械工学科 助教

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. 反射特性試験

工具と材料の接触界面での超音波の反射特性に及ぼす超音波の周波数と潤滑条件の影響を調べるために円柱圧縮を行った。

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。探傷機では、波の強さを表す音圧を測定している。超音波の周波数は 2、5 および 10MHz の三種類を選んだ。探触子を交換することにより、周波数を変換した。探触子は直径約 10mm の円柱形状をしている。

工具材質は SKD11、工具表面はラップ仕上げとし、表面粗さは $0.2 \mu \text{m Rz}$ である。

試験材料に炭素鋼 S20C およびアルミニウム合金 A2017 を用いた。それぞれの変形抵抗ひずみ曲線を図 2 に示す。初期降伏応力はともに約 450MPa であり、A2017 は加工硬化が少ないことがわかる。直径 12 mm、高さ直径比 1.0 に旋盤加工した試験片端面の表面粗さは、A2017 では約 $2.0 \mu \text{m Rz}$ 、S20C は約 $5.0 \mu \text{m Rz}$ であった。

試験片と工具との接触面の潤滑条件として、無潤滑、水潤滑、市販冷間鍛造加工用潤滑油（共同油脂製ノンフリック 8815）による潤滑とした。圧縮開始前の圧縮荷重 0 のときの第一反射音圧 P_{10} を基準として、加工中測定した第一反射音圧 P_{11} から反射特性値 E を測定した。

3.2 周波数の影響

無潤滑のもと、A2017 を圧縮したときの反射特性値 E

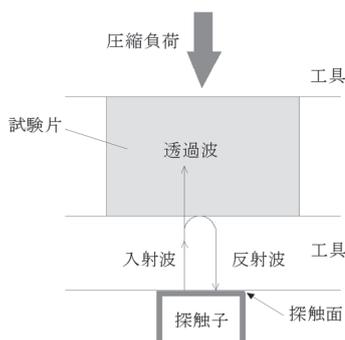


図 1 測定方法の概要

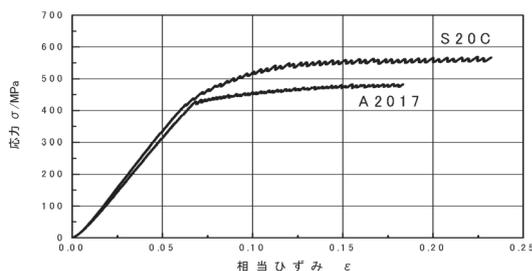


図 2 変形抵抗～ひずみ曲線

と平均接触圧力の関係を図 3 に示す。ここで、平均接触圧力は圧縮荷重を試験片初期断面積で除した値である。2MHz では、加工初期に特性値 E が急に増加し、圧力が約 150MPa 以上ではほぼ一定の値に収束した。5MHz では、加工の進行に伴い双曲線的に増加し、約 400MPa 以上で一定値になった。10MHz では、弾性圧縮域ではほぼ直線的に増加し、約 450MPa で変曲点が現れた。

S20C を圧縮した結果を図 4 に示す。弾性圧縮域では、周波数の違いによる反射特性の変化は A2017 と同様の傾向を示した。塑性圧縮後も反射特性値は増加している。これは、加工硬化により真接触圧力が大きくなっていることを示していると考えられる。

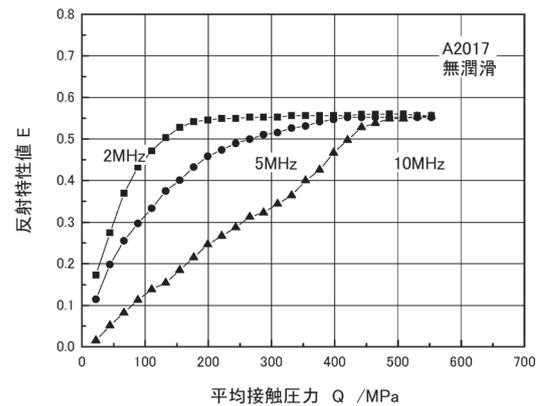


図 3 反射特性値 (A2017, 無潤滑)

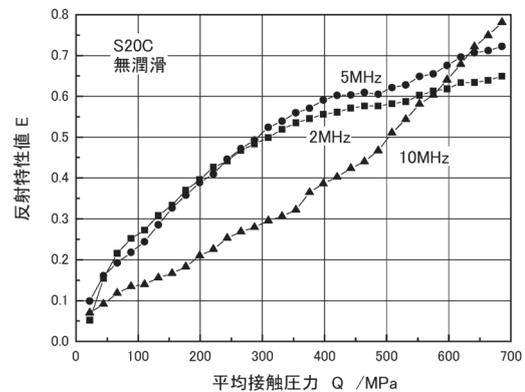


図 4 反射特性値 (S20C, 無潤滑)

2 および 5MHz の場合、反射特性値は圧力の増加に伴って直線的ではなく双曲線的に増加する。これは工具内で超音波が散乱減衰することによる影響もあると考えられる。また、A2017 では加工初期で一定値になったのは、加工が進行し材料の表面あらさの平坦化が進むことにより超音波で検知できる表面性状でなくなったためと考えられる。一般に、超音波の波長よりも小さな傷や凹凸は検知されなくなる。

3.3 潤滑条件の影響

水潤滑および油潤滑で圧縮したときの反射特性値 E と平均接触圧力の関係を図 5、6 に示す。超音波の周波数は 10 MHz を適用した。図から潤滑剤の違いによる反射特性値の傾向に差異は認められず、潤滑剤の粘度には影響されないことがわかる。また、無潤滑の場合と同様に反

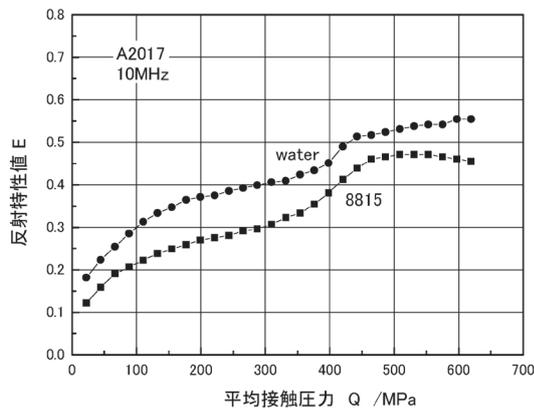


図5 反射特性値 (A2017, 10MHz)

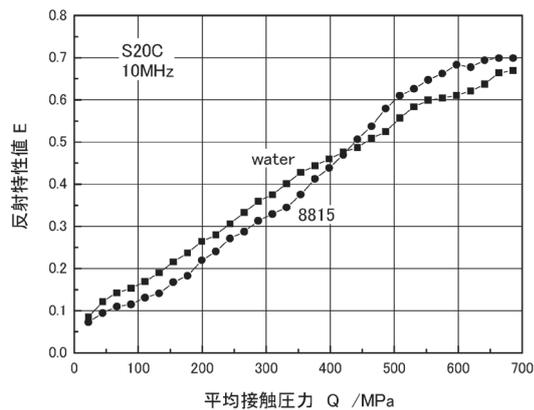


図6 反射特性値 (S20C, 10MHz)

射特性値と接触圧力との間に相関を見出すことができる。これにより、潤滑条件にかかわらず反射特性値と接触圧力は相関することが明らかになった。特性値の大きさは、油潤滑の方が小さくなっている。これは、潤滑剤の粘性の差から境界潤滑と流体潤滑の混合潤滑の性状の違いによるものと考えられる。

4. 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く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反射特性値の分布を測定した。

4.1 実験装置

図7に実験に使用した工具装置の概要を示す。分布した接触圧力に対応するためには、探触子を複数設置しなければならない。本実験では、材料中心から半径方向に3カ所測定できるように設置した。使用した探触子は周波数10MHzで、探触面が直径10mmの円柱形状をしている。探触子が一定の押付け力で安定して工具外側表面に設置できるように、バネにより支持されたピストンに探触子を3つ平行に取り付け、一定の押付け力で保持した。押付け力は探触子1つ当たり10Nとした。

接触圧力分布の摩擦丘の勾配が大きくなるように、材料接触端面の半径方向の流動を拘束するように、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。

4.2 実験条件

実験材料は純アルミ A1070 焼なまし材を用いた。耐力は23MPaであった。直径64mmのくぼみに設置するため、直径64mm高さ直径比が0.5になるように旋盤加工した。試験片端面の表面粗さは、約 $2.0 \mu \text{mRa}$ とした。

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、圧縮を続けている状態で3カ所の反射特性値を測定した。

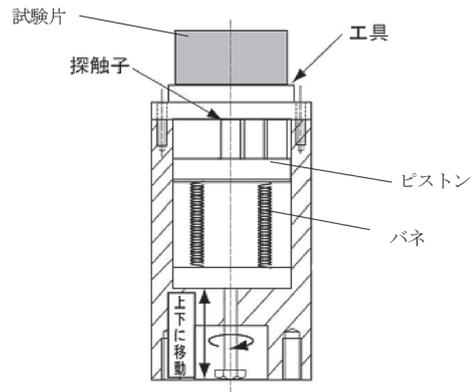


図7 実験工具

4-3 結果

測定した反射特性値分布を図8に示す。図中、E1は材料中心部の測定値を示し、半径方向にE2、E3で示した。反射特性値の分布は、接触圧力分布の摩擦丘を測定できていることがわかる。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ことが示されている。供試材が焼鈍材で初期降伏現象が不明瞭な性質のため、弾性圧縮と塑性圧縮の境を明確に判別できないが、加工初期に中心部から圧力が大きくなるのがわかる。

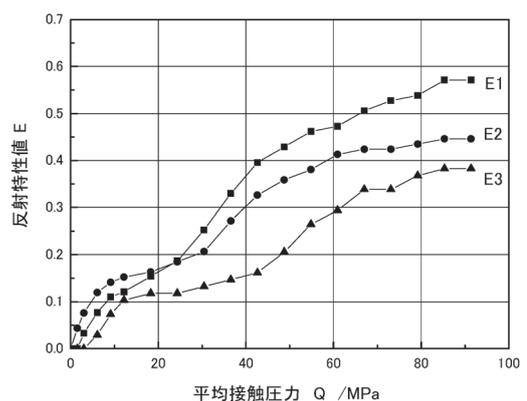


図8 反射特性値 (A1070)

さらに、材料の半径方向の流動を拘束していることから、潤滑として機能はしないが、潤滑油がある場合の影響を知るために、接触面に潤滑油(8815)を塗布して測定を試みた。結果を図9に示す。同様に摩擦丘を測定できている。しかし、油が半径方向に流出し、外周近傍に油だまりが形成され、完全な流体潤滑状態になるために、

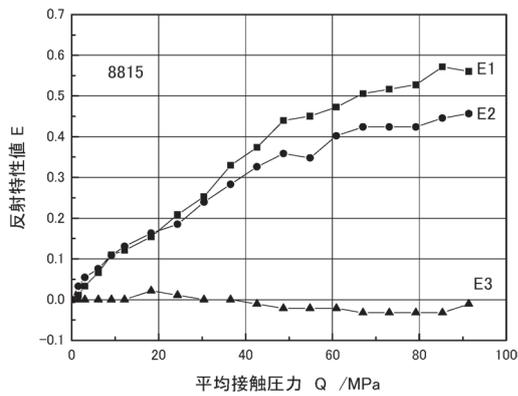


図9 反射特性値 (A1070, 8815)

E3 では超音波が全反射されている．流体潤滑下では適用できないことが確認された．

5. 結言

塑性加工において，超音波を用いた材料工具間の接触圧力分布を定量的に測定する方法について，実験的に検討した結果，材料と工具の接触界面の反射特性と接触圧

力に相関があり，これを利用することにより圧力の定量測定が可能であることが明らかになった．ただし，流体潤滑の場合は適用できない．また，円柱据込みの反射特性値分布を測定し，摩擦丘が測定できた．今後は較正方法を検討し，圧力分布の定量測定を試みる．

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) 小島之夫,水野敏広:塑性と加工,37-428(1996),951-956
- 2) 益子正巳,伊東 誼:機論,34-257(1968),191.
- 3) 伊東 誼,益子正巳:機論,36-284(1970),649.
- 4) 西脇信彦,今野政昭,崔 愛玲,堀 三計:成形加工,5-11(1993),779.
- 5) 水野敏広:研究概要報告書(17),165.
- 6) 高橋壮治:塑性と加工,6-52(1965),271.