

超音波による工具接触圧力分布測定法の検討

神奈川県立工科大学 工学部 機械工学科

助手 水野敏広

(平成 14 年度奨励研究助成 AF・2002023)

キーワード：超音波，工具接触圧力，反射特性

1. 緒言

塑性加工では，被加工材・工具間の接触圧力を測定する方法として，従来測圧ピンや感圧紙などが用いられている．これらの方法では，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るので，本来目的とする接触圧力を測定できない欠点がある．

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利用することが考えられ，実用上の成果が挙げられている^{1,2)}．プラスチック成形加工の分野でも，金型内の圧力測定に超音波の利用が試みられている³⁾．

そこで，本研究では，塑性加工における工具接触圧力の測定に超音波を用いる方法について検討する．超音波が接触境界面に垂直入射すると，一部は反射され，一部は透過する．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．超音波による接触圧力測定は接触圧力と反射特性の相関関係を利用することにより行われる．

以上のことより，塑性加工の工具接触圧力分布の測定に関する本研究の基礎実験として，円柱圧縮を取り上げ，平均接触圧力と反射特性の関係について測定し，超音波の周波数および潤滑条件による影響について検討した結果を報告する．

2. 測定の原理

工具と材料間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 $r_f \doteq 1$ 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， $r_b \doteq 0$ 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．

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

ここで， S_0 は接触面上で超音波が存在する面積， S は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 との関係を比例とし⁴⁾，

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

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

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，

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

となる．ここで，反射特性値 E を次のように定義する．

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

反射特性値 E を測定することにより接触圧力を知ることが出来る．

3. 実験

塑性加工中の工具と材料の接触界面での超音波の反射特性を検討するために円柱圧縮を行い，前章で述べた反射特性値 E と平均接触圧力との関係を測定した．工具と材料との接触面での入射と反射の概要を図 1 に示す．

3-1 実験装置

図 2 に圧縮加工装置の概要を示す．超音波の入射および反射波の受信は超音波探傷機を用いる．探触子を下側

圧縮工具の裏側に設置し、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ようになっている。探触子はピストンとバネ定数 0.68N/mm 、自由長さ 90mm のバネ 2 本を用いて保持する構造とし、安定した状態で一定の押付荷重で接触させるようにした。バネの長さを変化させることにより、押付荷重を調節できる。工具は外径= 100mm 、高さ= 20mm 、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。超音波の測定には、市販のデジタル超音波探傷機を使用した。超音波の周波数は 2.5 および 10MHz の 3 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。

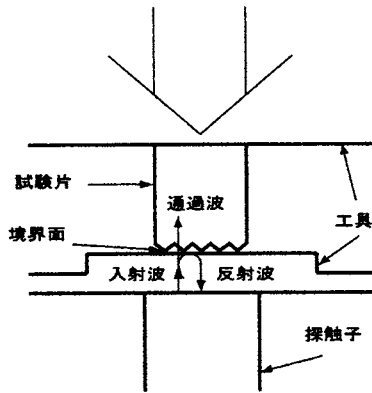


図1 接触面の入射と反射

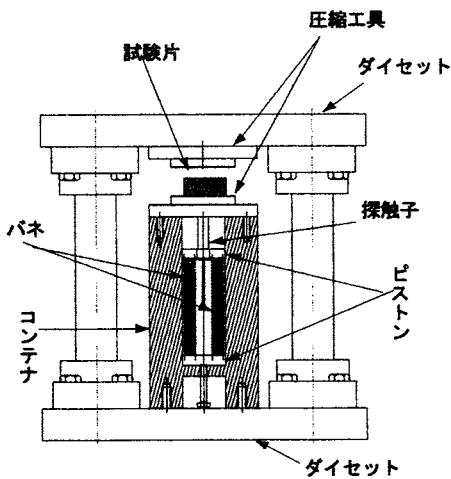


図2 実験装置

3-2 押付荷重の決定

探触子の押付荷重によって工具と探触子間の接触状態は変化する。低い押付荷重では、接触子から工具への伝達効率が低下するので、入射波音圧が小さくなる。これに比例して反射波音圧も低下する。したがって、押付け荷重によらず一定の反射波が得られることが望ましい。押付荷重を徐々に増加させ、反射波音圧の変化が見られない押付荷重を調べた。工具と探触子間の接触媒質

には、マシン油を使用した。測定結果を図 3 に示す。縦軸は第一反射高値と第二反射高値から得た音圧レベルである。10MHz の場合、探触子の形状から押付け荷重は 20N が限界であった。2 および 5MHz は、 30N 以上でほぼ収束している。この結果から 2 および 5MHz の探触子の押付荷重は 30N 、 10MHz では 20N とした。

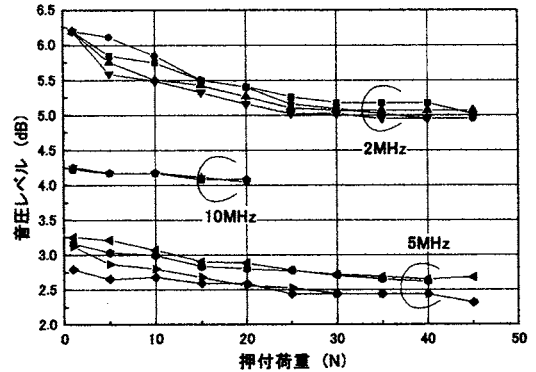


図3 音圧レベルと押付荷重との関係

3-3 実験方法

探触子の接触媒にマシン油を使用し、探触子の周波数は 2、5 および 10MHz の 3 種類を使用した。炭素鋼 S20C およびアルミニウム合金 A2017 の 2 種類を実験材料とした。それぞれの変形抵抗ひずみ曲線を図 4 に示す。A2017 は加工硬化が少ないことがわかる。試験片は、直径 12mm 、高さ直径比 1.0 で旋盤加工した。試験片端面の表面粗さは、A2017 では約 $2.0\mu\text{mRz}$ 、S20C は約 $5.0\mu\text{mRz}$ 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 0kN のときの第一反射高値を基準として、加工中、圧縮荷重増分 2.5kN 置きに測定した第一反射高値から反射特性値 E を測定した。

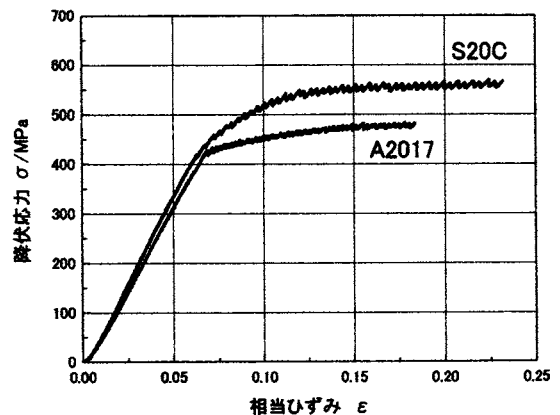


図4 変形抵抗ひずみ曲線

3-4 実験結果

A2017, 無潤滑の場合の反射特性値 E - 平均接触圧力曲線を図 5 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, 加工初期において特性値 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状に増加し, 約 400MPa で一定値になった. 10MHz では, 弾性変形域ではほぼ直線的に増加し, 約 450MPa でほぼ一定値に収束した. 収束した特性値 E は周波数に関係なく約 0.55 となった.

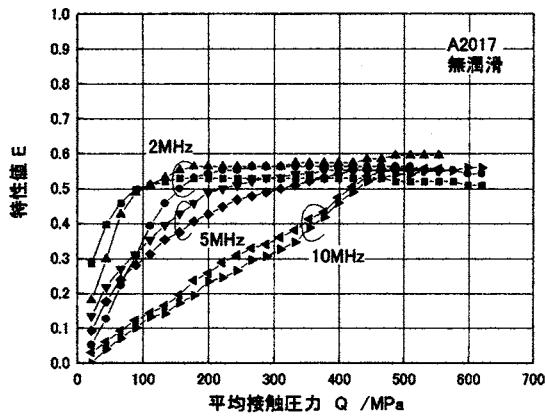


図 5 反射特性曲線(A2017, 無潤滑)

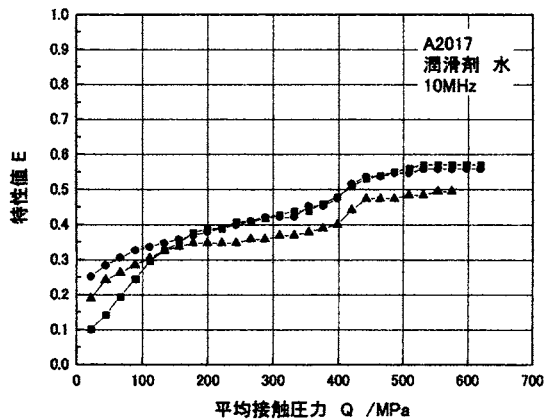


図 6 反射特性曲線(A2017, 水潤滑)

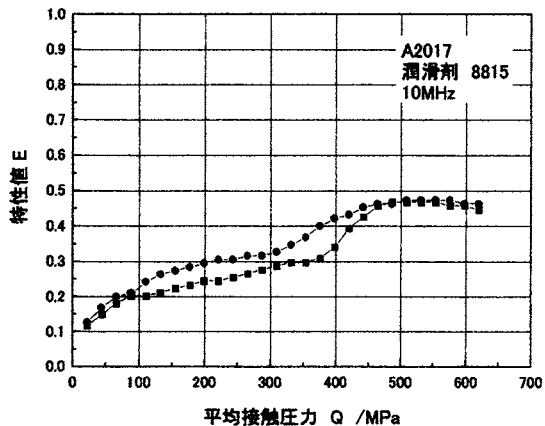


図 7 反射特性曲線(A2017, 油潤滑)

図 4 より A2017 の降伏応力は約 450MPa である. 10MHz では弾性変形中と塑性変形中の反射特性にはっきりとした違いが認められる. そこで, 水潤滑および油潤滑の実験には周波数は 10MHz を適用した. 図 6, 7 に水潤滑および油潤滑の特性値 E - 平均接触圧力曲線を示す. 潤滑剤の違いによる差はあまりみられず同様の傾向になった.

S20C, 無潤滑の場合の特性値 E - 平均接触圧力曲線を図 8 に示す. 周波数の違いによる反射特性の傾向は A2017 と同様の傾向である. 図 4 より S20C の降伏応

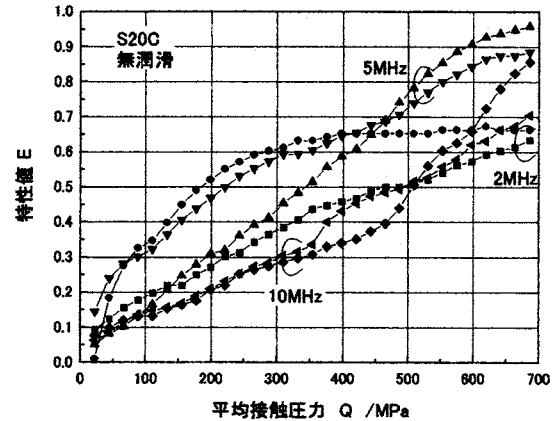


図 8 反射特性曲線(S20C, 無潤滑)

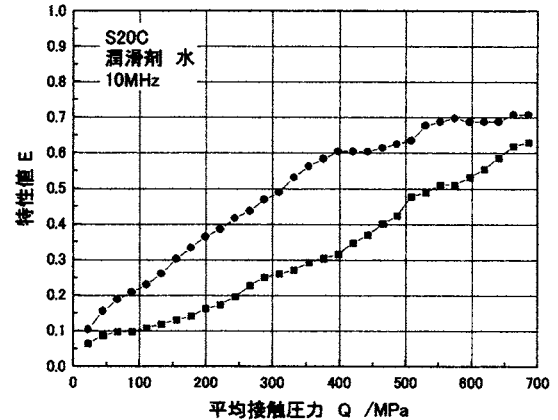


図 9 反射特性曲線(S20C, 水潤滑)

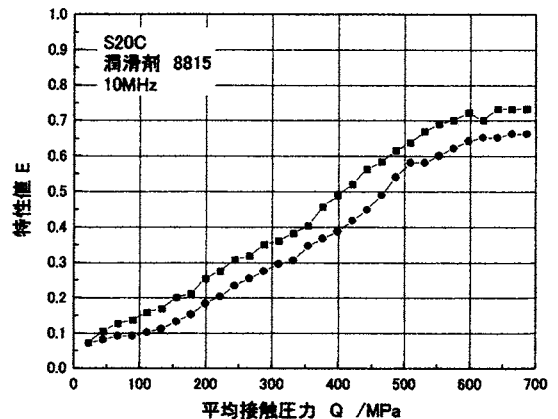


図 10 反射特性曲線(S20C, 油潤滑)

力は約 450MPa であり、塑性変形開始後においても特性値は増加している。10MHz を用いて行った水潤滑および油潤滑の特性値 E-平均接触圧力曲線を図 9, 10 に示す。傾向として無潤滑の場合と同様である。

4. 検討

圧縮加工における材料と工具の接触面での反射特性値 E と平均接触圧力との関係を測定した。その関係は 2 章に述べた原理における 3 式と定性的に良く一致する。このことより、超音波によって接触圧力を測定できることがわかる。ここでは、反射特性に及ぼす周波数、潤滑条件等の影響について検討を述べる。

4-1 周波数による影響

2 および 5MHz での特性値は、圧力の増加に伴って直線的ではなく双曲線状に増加する。これは周波数による材料が示す散乱減衰が異なることによるものと考えられる。また、A2017 では加工初期で一定値に収束したのは、加工が進行し材料の表面あらさが平坦化されることにより、超音波により検出できる表面性状でなくなるためと推定される。一般に、波長が長くなると小さな傷や凹凸が検出できなくなる。このことから、反射特性に対し材料の初期表面あらさは特に弾性変形中に大きく影響すると考えられる。詳細については今後の課題にしたいと考えている。

4-2 潤滑条件による影響

本実験で採用した潤滑条件においては、反射特性の傾向に大きな差異はみられなかった。混合潤滑が支配的な加工では、流体潤滑部分では潤滑剤によらず超音波は全反射されることによるものと考えられる。潤滑剤の粘度に起因した境界潤滑と流体潤滑の相互関係は 3 式の傾きに影響すると考えられる。

4-3 接触圧力と反射特性値の関係

弾性変形中では接触圧力が増加するに伴い特性値は増加する。塑性変形開始後の接触圧力は変形抵抗と摩擦応力の和である。A2017 はほぼ加工硬化しないため加工が進んでも接触圧力はあまり増加しない。それにより塑性変形開始後の特性値はほぼ一定値になった。一方、S20C の場合は加工硬化により接触圧力は相応に増加する。それにより特性値は増加した。このことから、本測定法により塑性加工中の接触圧力を測定できることがわかった。

5. 結言

本研究により、工具接触面における超音波の反射特性を利用して、接触圧力を測定できることがわかった。その特性については以下のことがわかった。

- (1) 材料の初期表面あらさおよび表面性状は弾性変形中において大きく影響を及ぼす。それにより、超音波の周波数を適切に選択する必要がある。
- (2) 潤滑条件の違いは影響を与えず、潤滑条件によらず本測定法が適用できると考えられる。

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) 益子正巳,伊東 誼:機論,34-257(1968),191.
- 2) 伊東 誼,益子正巳:機論,36-284(1970),649.
- 3) 西脇信彦,今野政昭,崔 愛玲,堀 三計:成形加工,5-11(1993),779.
- 4) 築添 正:潤滑,13-3,(1968),101.