

(3) 圧縮変形における超音波の影響

機械部 鶴岡 一 廣

要 旨

非定常変形の圧縮加工に超音波振動を適用するための基礎研究として、純アルミニウム材の単軸圧縮実験において、チタン酸ジルコン酸鉛磁器製のボルト締めランジュバン型振動子による超音波振動を付加した場合の挙動について研究を行っている。本報告書では振動モードでの効果の差違、潤滑剤の有無、振幅拡大率等について検討を行った。

その結果、圧縮速度 $V = 5 \text{ mm/Sec}$ 、超音波振動付加出力 $E = 200 \text{ W}$ の条件で、①加圧両端面が凹凸の場合、振動振幅モードの方が荷重低減に効果的である。②パンチ端面は凹凸、ホーン端面を平面とし、二硫化モリブデンをホーンに端面に塗布した場合、超音波を付加しない時に比べ、応力振幅モードで7.4～9.8%、振動振幅モードで5.6～9.4%の荷重低減が見られた。③ブラハ効果に比べて摩擦低減効果の方が大きく、応力モードの方が効果的である、等がわかった。

1 緒 言

超音波振動を金属の塑性加工に適用すると、加工荷重の低減が図れることが報告されている。しかし圧縮加工は非定常状態の変形であり、安定した超音波振動の適用を困難にしている。そこで圧縮を伴う加工に超音波振動を応用するための基礎研究として、純アルミニウム材の単軸圧縮試験において、超音波振動を付加した場合の挙動について研究を行っている。

単軸圧縮試験において、超音波振動付加に起因する影響要因としては、加圧速度、振動モード、潤滑の有無、治具の振幅拡大率、振動周波数等が挙げられる。さらに実用化に際して必要とされる振動子固定方法、型構造等も挙げられる。

これまで、チタン酸ジルコン酸鉛磁器製のボルト締めランジュバン型振動子を用いて、超音波振動付加による効果の有無、超音波振動付加時の加圧速度および一部振動モードの影響について検討した。その結果①ブラハ効果による材料の変形抵抗の減少、②振動振幅モード（ホーン長 $HL = 110 \text{ mm}$ ）の整合周波数 $f = 21.3 \text{ kHz}$ において、7～9%の圧縮荷重の減少、③加圧速度 $V = 0.05$ 、および 5 mm/Sec の場合の方が $V = 0.5 \text{ mm/Sec}$ に比べて、超音波振動の効果は大きい、などがわかった¹⁾。

また圧縮試験片の部分で振幅が最大となる振動振幅モード、および応力振幅が最大となる応力振幅モード（ $HL = 55 \text{ mm}$ ）について試験を行ったが、振動モードによる差違については明確にできなかった。

そこで本報告書では振動振幅モード、応力振幅モード

の周波数特性と整合周波数、および各モードでの効果の差違について、つぎに潤滑剤の有無、振幅拡大率について検討を行った。

2 実験方法

2.1 実験装置

超音波振動の付加機構は図1に示すように、高周波発振器からの進行波出力 (E_f) を周波数整合器を通して振動子に付加する。振動子は周波数役 20 kHz のチタン酸ジルコン酸鉛磁器製のボルト締めランジュバン型振動子（日本特殊陶業（株）製、D4520）で、この振動子より発振器への反射入力 (E_r) の差が負荷吸収電力となる。振動子のエネルギー交換効率を考慮すると、実際に試験片に付加される超音波振動はこの負荷吸収電力と異なるが、ここでは負荷吸収電力を試験片圧縮時の付加超音波出力 (E/W) とした。

振動子の共振周波数の設定、および発振器と振動子との調整は、まず高周波発振器（日本イー・エヌ・アイ（株）社製EGR-1600B）の周波数調整により、出力表示メーターに示される負荷吸収電力が最大となる共振周波数を設定し、次に進行波出力と負荷吸収電力とが一致するように、整合器で負荷整合インピーダンスを調整する。共振周波数は試験中に圧下ストロークによってわずかに変動するが、反射入力が極端に大きくならない限り周波数調整は行わなかった。また反射入力が 300 W を越えた場合は回路保護装置が働いて出力を停止するようになっている。

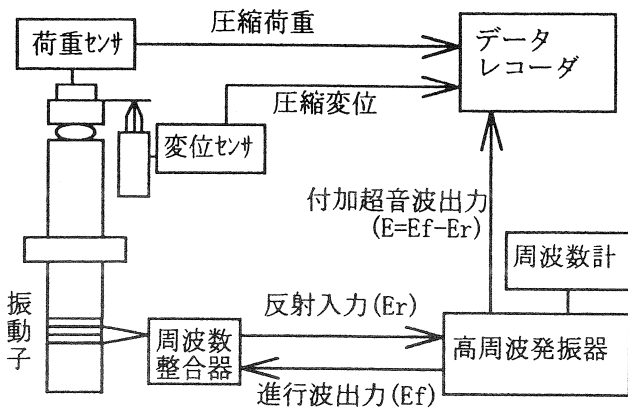


図1 超音波発振・計測概略

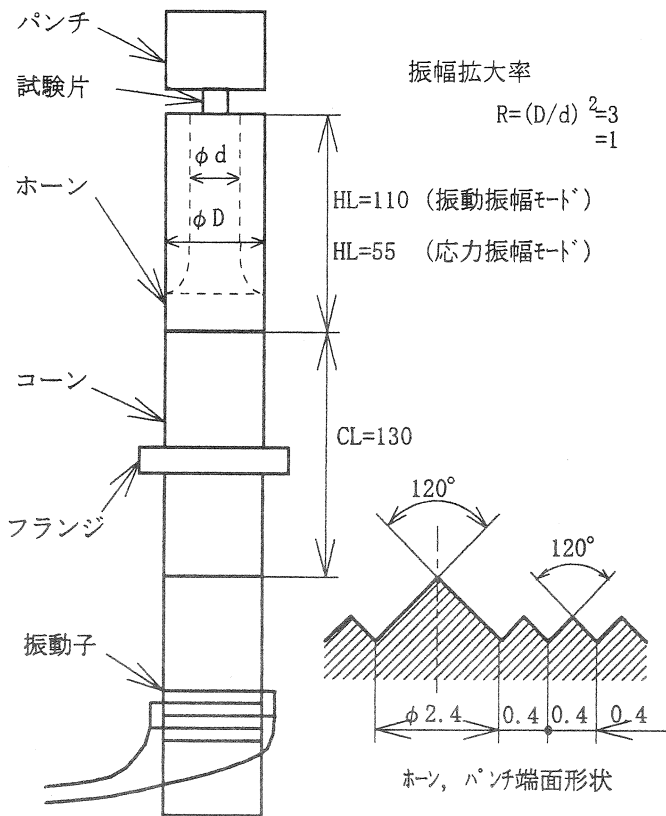


図2 超音波振動付加圧縮治具

超音波振動を付加するための振動系の概略を図2に示す。振動子、フランジ、コーン、ホーンからなる振動系は、コーンおよびホーンの方法中の音速度を5100m/Sec、振動周波数を20kHzとして構成しており、コーンとフランジは一体型の軟鋼材で、全長は約1/2波長の130mmとした。加圧部のホーンはダイス鋼を使用し、コーンとの結合はネジ固定で、必要に応じて交換が出来るようにした。

ホーンは試験片部分で応力振幅が最大となる応力振幅

モードに対応したホーンHL55(長さHL=55mm)と、振動振幅が最大となる振動振幅モードに対応したホーンHL110(長さHL=110mm)を作製した。振動子、コーンはフランジ部を除いてφ50mmの円柱状とし、ホーンは端面径φ50mmの振幅拡大率R=1のもの、φ29mmのR=3のものを作製した。超音波振動は振動子からコーン、ホーンを経て試験片へ付加される。ホーンおよびパンチの加圧端面は、摩擦低減効果の影響をみるために、図2に示すような凹凸形状と、平面形状の2通りを作製した。

振動系のホーンHL55、およびHL110を取り付けた状態のインピーダンスを計測し、振動子の周波数特性を調べた。その結果を図3に示す。ホーンHL55を取付けた場合の共振周波数は $f_r=19.3\text{kHz}$ 近辺に、ホーンHL110を取付けた場合は $f_r=19.5\text{kHz}$ 近辺となっている。また振動子に取り付けるホーン端面径の相違による周波数特性の変化は殆どなかった。

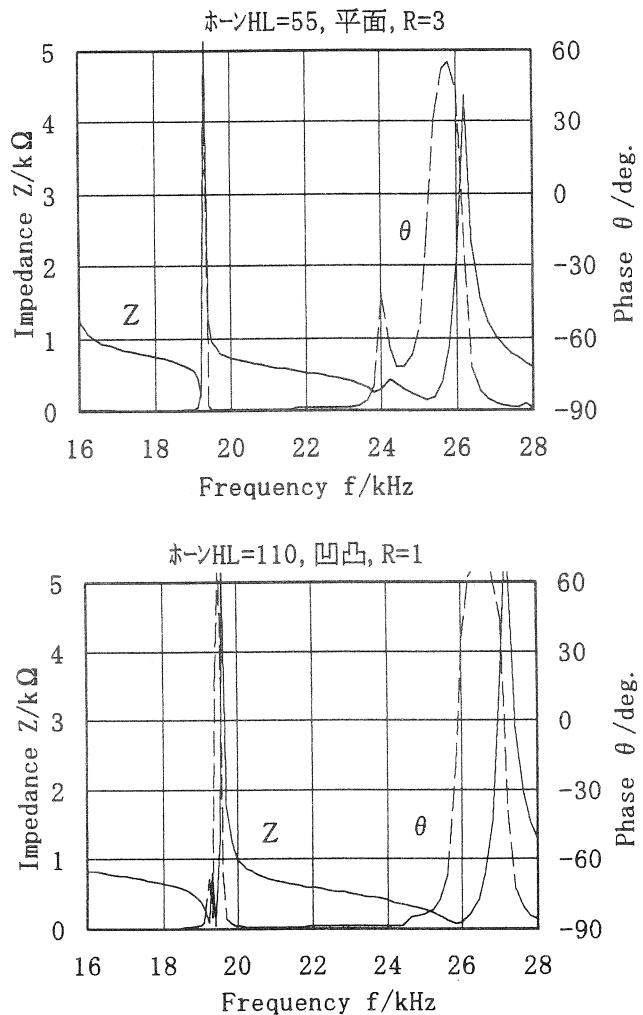


図3 振動系の周波数特性

ホーンを取り付け、フランジを固定し、試験片に予荷重をかけた状態で、高周波発振器による周波数調整およびインピーダンス整合を行った。ホーンHL55では、ホーンおよびパンチ端面を凹凸にした場合は周波数 $f=23.0\text{kHz}$ 付近に、ホーン端面のみを平面にした場合は $f=18.3\text{kHz}$ 付近に、またホーンHL110ではそれぞれ周波数 $f=21.4\text{kHz}$ 、 18.5kHz 付近に整合点が存在する。これらの値は図3に示すホーン取付時の共振周波数と異なっている。これは試験片の拘束条件によって、振動系全体の共振周波数が変化したためであるが、この共振周波数と系を構成する拘束条件との関係については今後検討する必要がある。

2.2 実験条件

試験片は純アルミニウム材 (A1050-B) から $\phi 12 \times 20\text{mm}$ に削り出し試験に供した。この試験片を据込率 $\epsilon = 60\%$ (圧下ストローク 12mm)で圧縮し、超音波振動を付加した場合の圧縮荷重と超音波出力変動を測定した。付加超音波出力設定は $E \approx 200\text{W}$ を基準とし、圧縮速度は既報¹⁾の結果より、実加工速度に近い $V = 5\text{mm/Sec}$ とした。試験片、およびホーン、パンチの表面はアルコールで油分を除去し、潤滑剤を使用する場合は二硫化モリブデンをホーンの端面部分にスプレー塗布した。

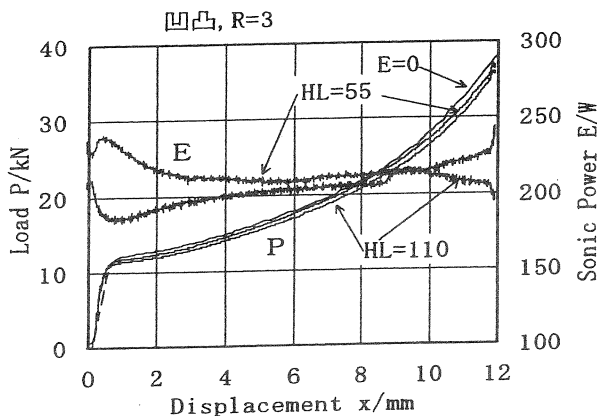


図4 振動モード比較荷重曲線

3 実験結果および考察

3.1 振幅モード

応力振幅モードHL=55と振動振幅モードHL=110の差違を調べるために、振幅拡大率 $R=3$ の荷重曲線を図4に示す。またホーンおよびパンチ端面形状は摩擦の影響を避けるために凹凸形状とした。図に示すように超音波振動付加による効果は全据込率の範囲で明らかに圧縮

荷重の減少として現れている。その減少量は、据込率 $\epsilon = 60\%$ (圧下ストローク最下点)での最大圧縮荷重と比較した場合に、応力振幅モードで $2.9 \sim 5.0\%$ 、振動振幅モードで $5.5 \sim 6.8\%$ となっている。また応力振幅モードの方が振動振幅モードより荷重低減効果が小さい結果となっているが、これは前報の結果を確認することとなった。

3.2 振幅拡大率

応力振幅モードと振動振幅モードについて、コーン側大径 $\phi 50$ 、ホーン端面径 $\phi 50$ の場合の振幅拡大率 $R=1$ と端面径 $\phi 29.5$ の $R=3$ の単純段付きホーンを用いて、振幅拡大率の影響を比較した荷重および超音波出力曲線を図5に示す。この図から、圧縮荷重については、両モードとも振幅拡大率 $R=1$ と 3 のあいだにはほとんど差はなく、拡大率 $R=3$ 程度の変化では影響が顕著には現れていない。

一方超音波出力の変化をみると、拡大率 $R=3$ の場合全ストロークを通してほぼ安定して $E \approx 220\text{W}$ 程度が付加されているが、拡大率 $R=1$ の場合は圧下開始直後では $E \approx 250\text{W}$ 、圧下ストローク最下端近傍で $E \approx 130\text{W}$ と大きく減少している。

3.3 潤滑剤の影響

摩擦低減効果に与える超音波振動の影響をみるために、振幅拡大率 $R=3$ の場合について、パンチ端面は凹凸、ホーン端面を平面とし、潤滑剤二硫化モリブデンをホーン端面にスプレー塗布した場合の荷重と超音波出力の変化を図6に示す。この図から超音波を付加しない場合 ($E=0$) に比べて圧下ストローク最下点の最大荷重で比較すると、応力振幅モードで $7.4 \sim 9.8\%$ 、振動振幅モードで $5.6 \sim 9.4\%$ の荷重低減が見られる。圧下途中では応力振幅モードの方が振動振幅モードに比べて低い荷重となっている。

また超音波出力は初期に設定した $E=200\text{W}$ でほぼ一定に推移しており、両端面を凹凸にした場合に比べて、圧下初期や最下点での急激な変化は見られない。

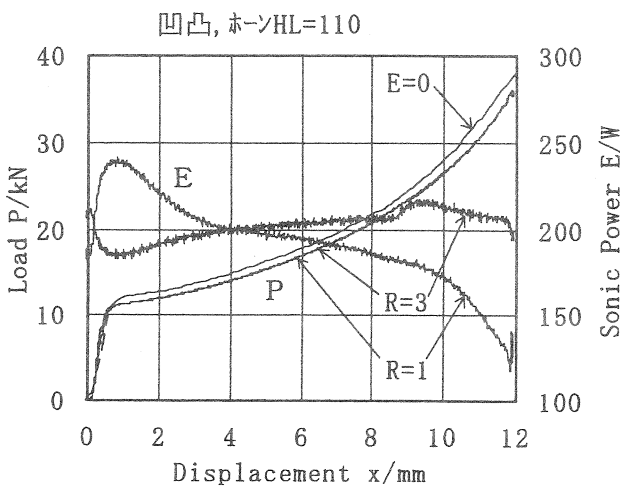
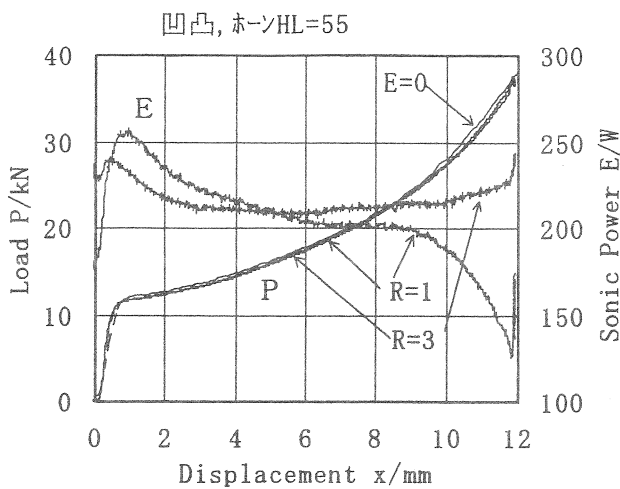


図5 振幅拡大率比較荷重曲線

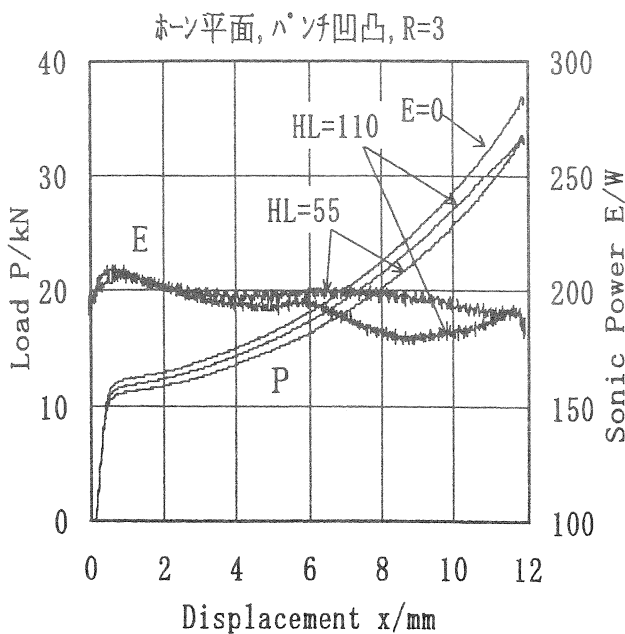


図6 潤滑剤使用荷重曲線

両端面	超音波出力	応力振幅モード	振動振幅モード
凹凸と 凹凸	E≒200W	36.89(3.9%)	36.01(6.2%)
	E=0	38.40	
平面と 凹凸	E≒200W	33.55(8.9%)	34.76(5.7%)
	E=0	36.81	

*括弧内はE=0に対する低減率

表1 最大荷重の平均値(kN)

3.4 考察

一般的に超音波振動を応用する場合、振動振幅が最大となる位置が最大効果を発揮するとされている²⁾。

今回の振動モードについての結果からは振動振幅モードの方が荷重低減率が大きくなっており、そのことを裏付けている。試験片加圧端面のホーンとパンチの端面が凹凸の場合と、ホーンが平面でパンチが凹凸の場合について、最大荷重の平均値で比較すると表1のようになる。

この振動モードの検討においては、ホーンおよびパンチの両端面を凹凸にしたことで、摩擦抵抗の低減効果は殆どないと考えると、この荷重低減はブラハ効果による変形抵抗の低下によるものであると考えられる。

しかし試験片を加圧する一方のホーン端面を平面にし、潤滑剤を使用した場合は、表1からもわかるように、逆に応力振幅モードの方が荷重低減においては、効果的である結果となっている。潤滑剤を使用した場合は摩擦抵抗の低減効果とブラハ効果による変形抵抗の低減などが総合された結果となって現れていると考えられる。従って超音波による総合的な効果を得ようとするとき、応力振幅モードの方が効果的であることになり、一般的に利用される振動振幅モードとは異なった結果となっている。

これは超音波出力が約200Wと小さいためか、加圧治具の片方のみを平面にしたためかは不明である。しかし今回の結果から、ブラハ効果に比べて摩擦低減効果の方が大きいと考えられることからホッピング加工のように治具との接触面積が大きい圧縮加工に適用し、振動モードや超音波出力の大小についての効果を確認する必要がある。

また拡大率については今回の条件では変化が見られなかった。ただ超音波出力変動が拡大率R=1の場合大きく、これが影響しているのか、拡大率の設定R=3が小さかったためなのかはわからないが、実加工においても若干の拡大率の変動があってもその影響は無視できる程度であると思われる。ただ今後の課題として、超音波振

動の安定付加や実際の振幅量についての検討を行う必要がある。

4 結 言

超音波振動の塑性加工特に圧縮加工への応用を図るために、チタン酸ジルコン酸鉛磁器製のボルト締めランジュバン型振動子を用いて、純アルミニウム材の超音波振動付加圧縮試験を、圧縮速度 $V = 5 \text{ mm/Sec}$ 、超音波振動付加出力 $E = 200\text{W}$ で行った結果以下の知見を得た。

- (1)加圧両端面が凹凸の場合、超音波振動を付加しない場合に比べて、振動振幅モードで5.5～6.8%、応力振幅モードで2.9～5.0%の荷重低減となった。
- (2)振幅拡大については、両モードとも拡大率 $R = 1$ と3のあいだにはほとんど差はなかった。
- (3)パンチ端面は凹凸、ホーン端面を平面とし、二硫化モリブデンをホーン端面に塗布した場合、超音波を付加しない時に比べ、応力振幅モードで7.4～9.8%、振動振幅モードで5.6～9.4%の荷重低減が見られた。
- (4)ブラハ効果に比べて摩擦低減効果の方が大きく、応力振幅モードの方が効果的である。

今後の課題として、ホビング加工のように治具との接触面積が大きい圧縮加工に適用し、振動モードや超音波出力の大小についての効果を確認する。

また超音波振動を安定して付加するための方法や、各振動モードや加工時の振動付加部分の振幅量の計測方法を検討し、振幅拡大率が計算通りに拡大されているのか確認する。

参考文献

- 1) 鶴岡一廣：平成4年度大分県工業試験場研究報告、(1993)、6。
- 2) 例えば(社)日本電子機械工業会編：超音波工学、コロナ社、(1993)。