

## (2) 圧縮変形における超音波の影響

機械部 鶴岡一廣

### 1 緒言

材料技術や半導体技術の進展にともない、超音波振動の応用分野も拡大し、強力超音波を金属の塑性加工分野に利用した例が多々見受けられるようになった。しかしその多くは線材、管材の引き抜き<sup>1)</sup>、板材の絞り<sup>2)</sup>や曲げ<sup>3)</sup>等への応用であり、超音波振動の摩擦力低減効果を主に活用し加工力の低減を図るものである。また、圧縮加工に関して、圧縮時に超音波振動を付加して試験を行った例<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>や超塑性加工時に超音波振動を付加した例<sup>6)</sup>があるが、圧縮荷重の低減は摩擦抵抗の減少による効果が主となっている。しかし一部には超音波振動の効果の一つとして、材料が持つ変形抵抗を低下させるブラハ効果により圧縮荷重の減少を示す例がみられる<sup>7)</sup>、<sup>8)</sup>、<sup>9)</sup>。

一方金属の塑性加工特に圧縮加工において、加工力の低減、加工率の増大、加工精度の向上等を図ることはNear Net Shape加工やNet Shape加工を可能にするものである。しかし圧縮加工への超音波振動の影響特にブラハ効果を主に取り上げて検討した例は少ない。これは実際の圧縮加工時には変形抵抗の低下と摩擦抵抗の減少とが相乘されて現れるため分離して考慮する必要がないこと、及び圧縮変形時の非定常状態が超音波振動の安定した付加の実現を困難にしているためと考えられる。しかし超音波振動付加による変形抵抗と摩擦抵抗の影響を把握することにより超音波振動をより効果的に利用することが可能となる。

そこで超音波振動を圧縮加工に適用するための基礎実験として、超音波振動を圧縮試験に付加し、その時の種々の要因がどのように影響しているかを調べる。超音波振動付加に起因する影響要因としては摩擦の有無、加工速度、治具の振幅拡大率、振動モード、振動周波数等が挙げられる。更に実用化に際して必要とされる振動子固定方法、型構造等を検討する。

本報告書ではまず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及び一部振動モードの影響について報告する。

### 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(Ef)を周波数整合器を通して振動子に付加する。振動子は周波数約20kHz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(Er)の差が負荷吸収電力となる。振動子のエネルギー変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。

振動子共振周波数及び発振器と振動子との整合は、まず高周波発振器(日本イー・エヌ・アイ(株)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いようにした。また、反射入力が300W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。

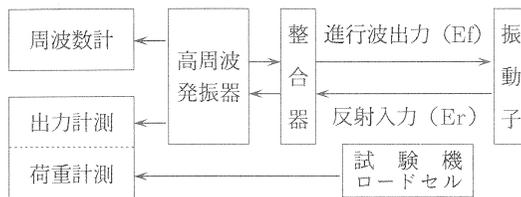


図1 超音波発振・計測概略図

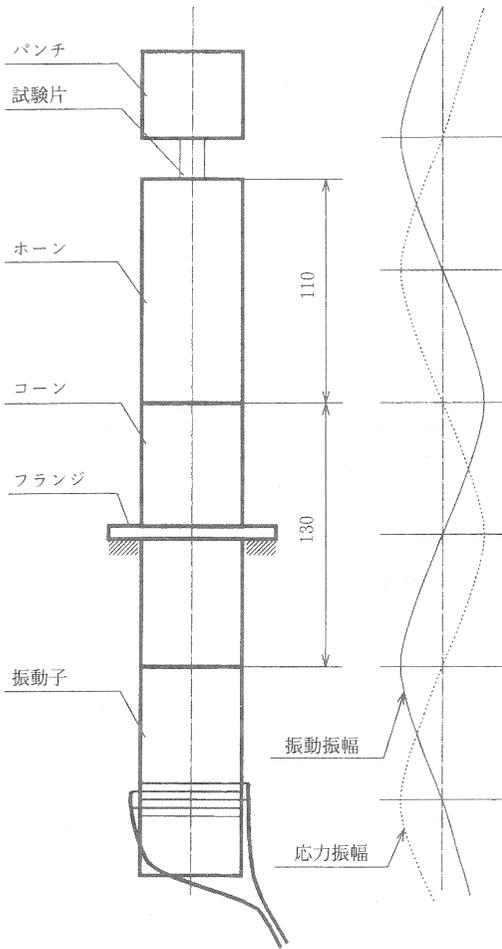


図2 超音波振動付加圧縮治具

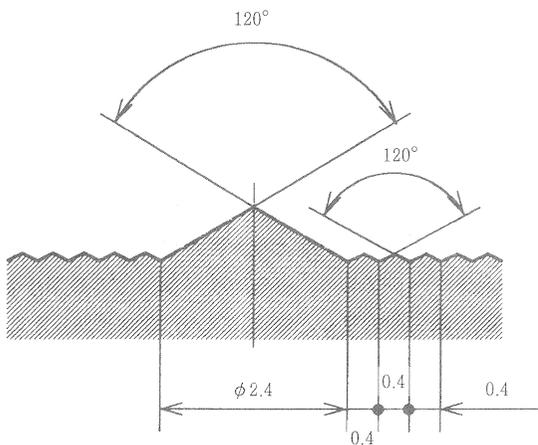


図3 端面形状

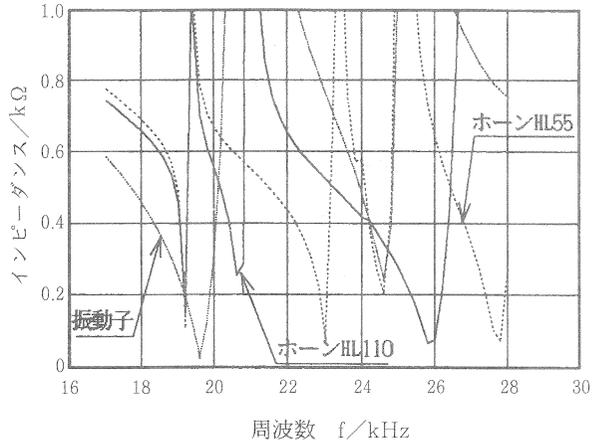


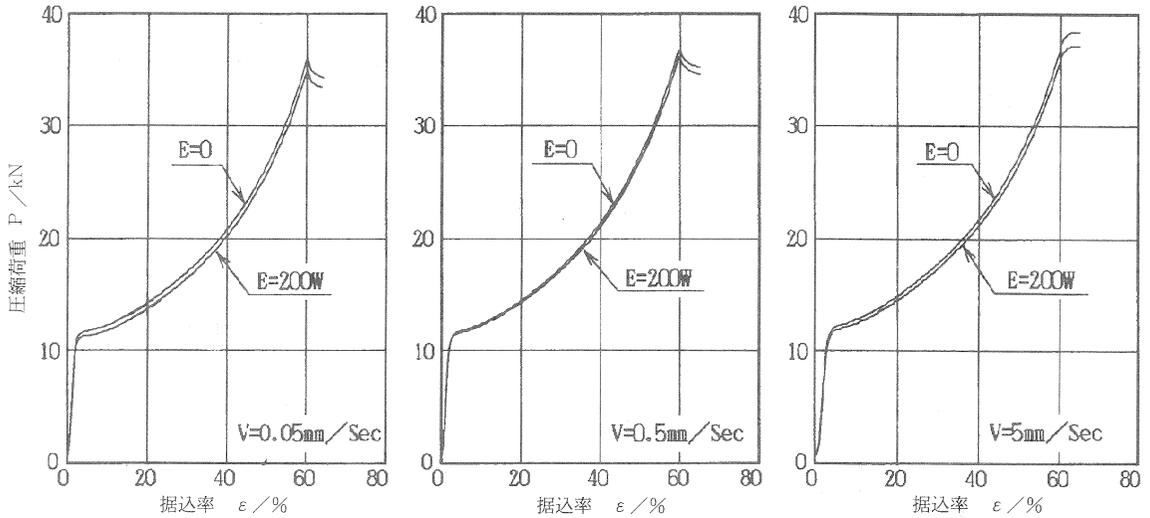
図4 振動系の周波数特性

圧縮試験における振動系の概略図を図2に示す。振動系は、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。ホーンは圧縮部近傍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、ホーン径はφ50mmのストレートで振幅拡大率は1である。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。ホーン及びパンチの加圧端面は摩擦係数の変化、摩擦低減効果の影響を極力避けるために図3に示すような形状とした。

振動系の振動子単体、及びホーンHL55、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4に示す。

振動子単体の場合の共振周波数は $f_r = 19.6\text{kHz}$ であるが、ホーンHL55(重量約2.8kg)を取り付けた場合は $f_r = 19.2\text{kHz}$ 近辺に、ホーンHL110(重量約3.7kg)を取り付けた場合は $f_r = 19.2$ 或いは $20.6\text{kHz}$ 近辺となっており振動子に取り付ける治具等により周波数特性が大きく変化している。

ホーンを取り付け、フランジを固定した状態で、高周波発振器による周波数調整及びインピーダンス整合を行った。ホーンHL55では周波数 $f = 19.0\text{kHz}$



ホーン長 HL = 55mm、超音波振動周波数  $f = 19.0\text{kHz}$

図5 応力振幅モード荷重曲線

近傍に、ホーンHL110では周波数  $f = 18.5$ 、及び  $21.3\text{kHz}$  に整合点が存在する。これは図4に示すホーン取付時の周波数特性と一致した共振周波数ではない。そこで本圧縮試験はホーンHL55の場合は周波数  $f = 19.0\text{kHz}$ 、ホーンHL110では周波数を  $f = 18.5$ 、及び  $21.3\text{kHz}$  の2点について行った。

### 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  $12\text{mm}$ ) で圧縮し、超音波振動を付加しない場合と付加した場合の圧縮荷重を測定した。付加超音波出力設定は  $E = 200\text{W}$  とした。

加圧圧縮速度は  $V = 0.05, 0.5, 5\text{mm/Sec}$  とした。圧縮速度  $V = 0.05\text{mm/Sec}$  の場合は超音波振動の付加の有無に関わらず温度上昇はほとんどみられなかった。しかし  $V = 5\text{mm/Sec}$  の場合は若干の温度上昇がみられたが、超音波振動の有無による差異はなく、圧縮変形による発熱が大部分であり、超音波振動による温度の上昇は無視できる程度であると考えられる。

## 3 実験結果及び考察

### 3.1 応力振幅モード

試験片圧縮部分が超音波振動の応力振幅が最大に

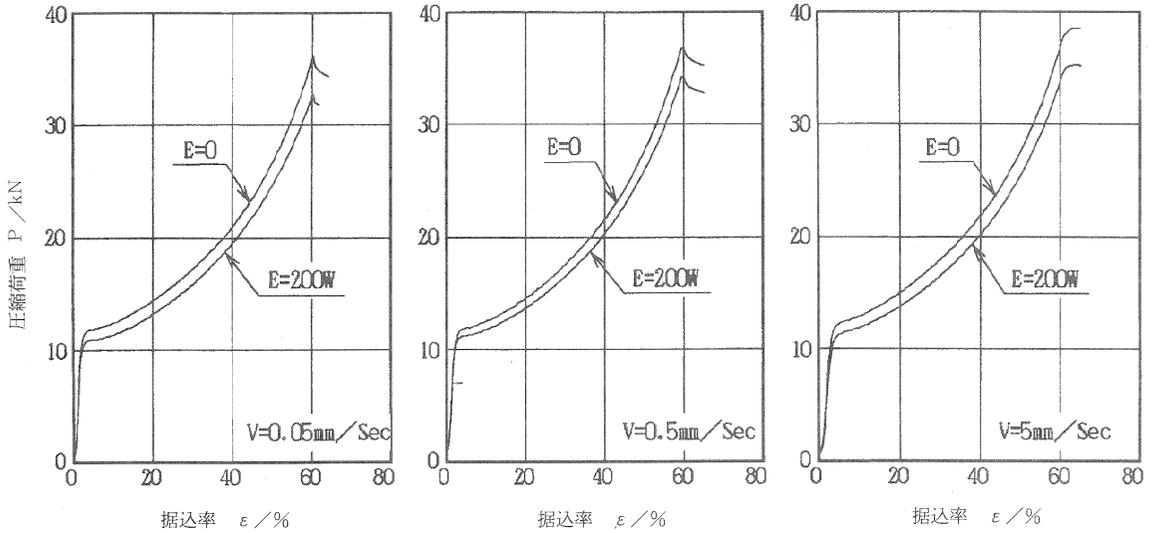
なるモードで圧縮試験を行った結果を図5に示す。図に示すように超音波振動付加による効果は全据込率の範囲で明らかに圧縮荷重の減少として現れているが、その減少量は小さく、据込率  $\epsilon = 60\%$  (圧下ストローク最下点) での最大圧縮荷重で比較した場合に、圧縮速度  $V = 0.05\text{mm/Sec}$  で  $2.2\%$ 、 $V = 0.5\text{mm/Sec}$  で  $1.4 \sim 2.2\%$ 、 $V = 5\text{mm/Sec}$  で  $2.3 \sim 4.2\%$  となっている。

### 3.2 振動振幅モード

試験片圧縮部分が超音波振動の振動振幅が最大になるモードで、振動周波数  $f = 18.5\text{kHz}$  の場合、超音波振動付加による効果は応力振幅モードの場合と同じで、据込率  $\epsilon = 60\%$  での最大圧縮荷重の減少割合は、圧縮速度  $V = 0.05\text{mm/Sec}$  で  $1.4 \sim 2.2\%$ 、 $V = 0.5\text{mm/Sec}$  で  $0.5 \sim 1.9\%$ 、 $V = 5\text{mm/Sec}$  で  $1.8 \sim 3.4\%$  となっている。

一方振動周波数  $f = 21.3\text{kHz}$  の場合の結果を図6に示すが、前記の場合に比べて圧縮荷重の減少割合は大きくなっており、据込率  $\epsilon = 60\%$  での最大圧縮荷重の減少割合は、圧縮速度  $V = 0.05\text{mm/Sec}$  で  $7.5 \sim 9.2\%$ 、 $V = 0.5\text{mm/Sec}$  で  $6.8 \sim 7.1\%$ 、 $V = 5\text{mm/Sec}$  で  $7.6 \sim 8.1\%$  である。

また、 $V = 0.05\text{mm/Sec}$  の場合に圧下途中で超音波振動を ON-OFF させた際の圧縮荷重の変化を図



ホーン長 HL=110cm、超音波振動周波数  $f=21.3\text{kHz}$

図6 振動振幅モード荷重曲線

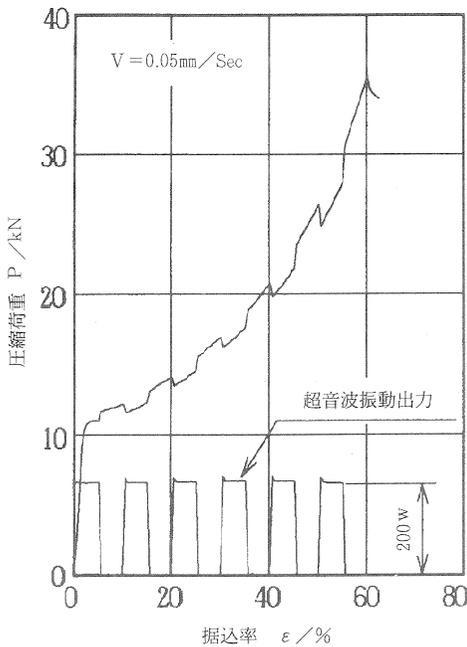


図7 超音波出力と荷重曲線

7に示す。超音波振動のON-OFFによって圧縮荷重が増減している状況が明確に現れている。

この条件での圧縮荷重減少量が、予備試験で得ら

れた結果<sup>10)</sup>に比べて小さくなっている。これが摩擦の影響を受けないように、圧縮治具の圧縮端面を図2に示すように凹凸形状にしたことによるものか、整合周波数の設定と関係があるのか今後の検討課題である。

### 3.3 考察

この圧縮工程を平行工具間の軸対称圧縮とすると、圧縮治具を図2に示すような凹凸表面としたことで、圧縮面が全面固着と同じ条件になると考えられる。このことから応力振幅モード及び振動振幅モードにおいて観察される圧縮荷重の減少は量の大小はあるにしても、ブラハ効果による材料の持つ変形抵抗の減少に起因するものと判断される。

このブラハ効果が応力振幅モード及び振動振幅モードの振動周波数  $f=18.5\text{kHz}$  の場合のように、圧縮荷重の減少が明確に現れてはいるが減少量がわずかである場合と振動振幅モードの振動周波数  $f=21.3\text{kHz}$  の場合のようにかなりの減少量を示す場合とが観察された。この原因として、高周波発振器と振動子との整合調整を行った際に整合のとれた整合周波数にあると考えられる。整合のとれなかった周波数域での超音波振動付加による圧縮荷重の減少効果はなかったことから、図4に示すように振動系の構成によって共振周波数や反共振周波数が変化すこ

とを考えると、圧縮時の整合周波数が共振周波数か、あるいは反共振周波数かであることが必要と考える。今回の圧縮試験ではどの整合周波数が共振周波数か反共振周波数なのか特定できなかったが、少なくとも振動振幅モードにおいて整合周波数  $f = 21.3\text{kHz}$  が共振あるいは反共振周波数であると考えられる。

このことから応力振幅モードでも周波数  $f = 19.0\text{kHz}$  の他に整合周波数があるのか、あるとすればその周波数では振動振幅モードの場合と同じような効果が発現するのか、この整合周波数をどのように設定すればより大きな効果が得られるのか検討する必要がある。

#### 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  $V = 0.05、0.5、5\text{mm/Sec}$ 、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) 本試験の範囲においての圧縮荷重の減少がブラハ効果による材料の変形抵抗の減少であると判断できる結果が得られた。
- (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、超音波振動付加により圧縮荷重が7～9%減少した。
- (3) 超音波振動の効果は、圧縮速度  $V = 0.05、$ 及び  $5\text{mm/Sec}$  の場合の方が  $V = 0.5\text{mm/Sec}$  に比べて大きい。
- (4) 応力振幅モード（整合周波数  $f = 19.0\text{kHz}$ 、 $HL = 55\text{mm}$ ）、及び振動振幅モードの整合周波数  $f = 18.5\text{kHz}$  においては、超音波振動付加出力の効果はわずかであった。

今後の課題として、本試験範囲で現れた整合周波数の影響について、応力振幅モードで他に整合周波数があるのか、あるとすればその周波数では振動振幅モードの場合と同じような効果が発現するのか、また、整合周波数をどのように設定すればより大きな効果が得られるのか検討する必要がある。

更に超音波振動付加に起因する影響要因として考えられる摩擦の有無、治具の振幅拡大率、治具の長さによる振動モード、振動周波数等や、実用化に際して必要とされる振動子固定方法、型構造等を順次検討する。

#### 参考文献

- 1) 例えば、井上昌夫：相模工業大学紀要，19-1（1985），1
- 2) 例えば岡崎康隆，川口憲治：第36回塑性加工連合講演会論文集（1985），289
- 3) 例えば辻野次郎丸，佐藤肇，滝口和宏：電子情報通信学会技術研究報告，91-348（1991），25
- 4) 和泉修，大山致知，鈴木善彦：塑性と加工，7-61（1966），59
- 5) 沖本邦郎，山川俊夫：九州工業技術試験所報告，6（1971），17
- 6) 松本賢司，高田修一，時沢貢：軽金属，35-8（1985），463
- 7) ㈱日本電子機械工業会編：超音波工学，コロナ社，（1993）
- 8) 高橋勲次郎，深町成一，渡辺哲哉，久保田喜郎：高周波の工業への応用，東京電機大学出版局，（1977）
- 9) 実吉純一，菊池善充，熊本乙彦：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，（1978）
- 10) 鶴岡一廣：平成3年度大分県工業試験場研究報告，（1992），42
- 11) 大矢根守哉監修：塑性加工学，養賢堂，（1992）