

超音波が金属の塑性変形におよぼす作用について

Effects of Ultrasonic Energy on the Deformation Characteristics of Metals

山 本 昌 孝・藤 森 聰 雄・鳥 飼 安 生・山 田 嘉 昭

Masataka YAMAMOTO, Fusao FUJIMORI, Yasuo TORIKAI and Yoshiaki YAMADA

1. はじめに

Blaha と Langenecker は、1956 年に亜鉛単結晶で超音波振動を重畳した引張試験を行ない変形抵抗が大きく減少する現象 (Blaha 効果)¹⁾ を発見した。この現象は金属物理学者の関心を集める一方、塑性加工への応用の可能性について²⁾、アメリカをはじめ各国で盛んに研究がなされている。本報では、超音波の塑性加工への応用と Blaha 効果の解明などを目的として³⁾⁴⁾、多結晶鋼に超音波を照射して行なった圧縮試験の結果を報告する。

実験は、加えた音響応力と減少した変形抵抗の関係、静荷重に重畳する振動応力の様子、超音波照射による温度上昇および摩擦状態の変化などを詳しく観察した。

2. 実験装置および試料

超音波圧縮試験装置の概要は図1に示した通りである。

(a) 振動系 試料に超音波を有効に照射するため、振動系の両端 (自由端) を変位の腹とし、系の中に定在波が生ずるように設計した。振動子①は 20 KC 用 π 型フ

ェライト振動子である。ホーンはコンカル②、段付きおよびエキスポネンシャル③の組合せで、振動系全体として 2.5 波長の共振をするようになっている。試験片④は応力振幅最大の位置におく。図2は振動系における粒子速度および応力振幅の分布を示す。振動系は、変位振幅の節の部分にフランジをつけて試験機に固定し、振動のエネルギーが系外にもれないようにした。試験片の変形にともない、振動系全体の共振周波数は、最初の 19.2 KC から 19.5 KC に、約 0.3 KC の変化をした。

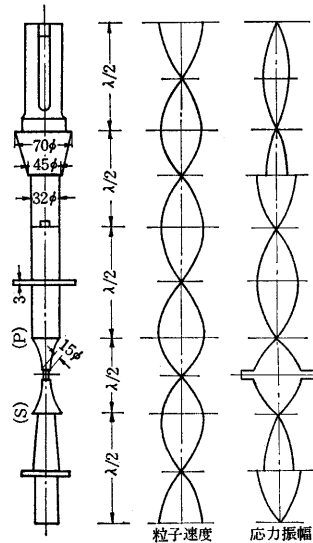


図 2 振動系と粒子速度、応力振幅の分布 (λ : 波長)

ェライト振動子である。ホーンはコンカル②、段付きおよびエキスポネンシャル③の組合せで、振動系全体として 2.5 波長の共振をするようになっている。試験片④は応力振幅最大の位置におく。図2は振動系における粒子速度および応力振幅の分布を示す。振動系は、変位振幅の節の部分にフランジをつけて試験機に固定し、振動のエネルギーが系外にもれないようにした。試験片の変形にともない、振動系全体の共振周波数は、最初の 19.2 KC から 19.5 KC に、約 0.3 KC の変化をした。

(b) 計測装置 静荷重は油圧駆動の複動ピストン⑩で加える。荷重計⑤の抵抗線ひずみゲージで静荷重を検出し、差動変圧器型変位計⑥でクロスヘッドの移動を測定して X-Y レコーダに記録した。超音波の出力は高周波電力計⑭で計測し、変位振幅は顕微鏡⑦で計測した。抵抗線ひずみゲージ⑪は静荷重に超音波振動が重畳する様子、抵抗線ひずみゲージ⑫は試験片に生じる直接のひずみ振幅の状態をシンクロスコープで観測するために用いた。⑬で観測した振動波形はほぼ正弦波であった。

(c) 試料 材料はリン脱酸銅 (>99.9%) で、鋳塊を鍛造ののち切削加工によって製作し、400°C で 10 分間真空焼鈍を行なった。試験片は直径 10 mm、高さ 10 mm の円柱である。

3. 実験結果

(a) 振動応力の式 試験片内では静荷重による応力に、振動系の中に生じる定在波的な振動応力が重畳している。振動応力を解析するため⁵⁾、図2の(P)(S)間を共振系の一部として図3に示す。

縦振動をする不均断面棒の運動方程式は

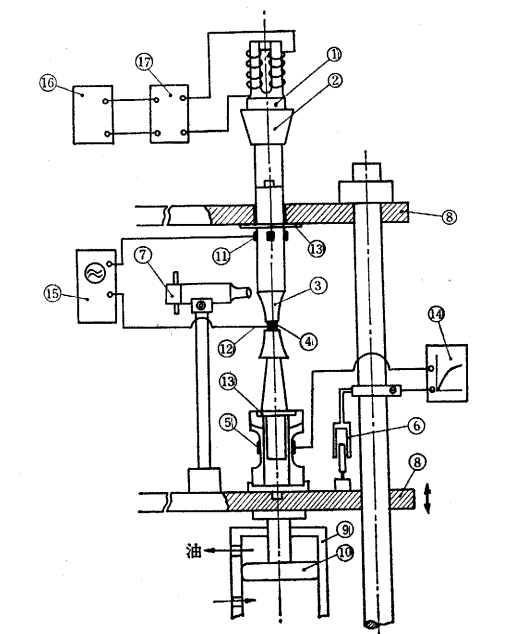


図 1 実験装置略図

- ①フェライト振動子 ②コンカルホーン ③エキスポネンシャルホーン
- ④試験片 ⑤荷重計 ⑥差動型変位計 ⑦変位振幅測定用顕微鏡
- ⑧クロスヘッド ⑨シリンダ ⑩ピストン ⑪抵抗線ひずみゲージ
- ⑫抵抗線ひずみゲージ ⑬フランジ ⑭X-Y レコーダ ⑮シンクロスコープ ⑯発振器
- ⑰電力計

研究速報

$$\rho S \partial^2 u / \partial t^2 = E \partial / \partial x (S \partial u / \partial t) \quad (1)$$

ただし ρ : 密度, S : 棒の断面積, E : ヤング率, u :

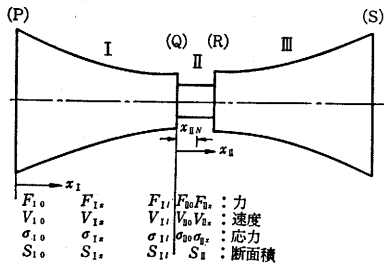


図3 共振系

変位をあらわす。変位 u に関する(1)式の解を角周波数 ω の単弦振動とし、その定常状態のみを考えると、 u の複素実効値 U に

ついて考えればよい。波長定数を $k(=\omega/c)$ とおけば、

(1)式から実効値 U に関する微分方程式は

$$(d^2/dx^2 + 1/S dS/dx d/dx + k^2)U = 0 \quad (2)$$

エキスポネンシャルホーンの、基準面 ($x=0$) の断面積を S_0 , x だけ離れたところの断面積を S とすれば、

$$S = S_0 e^{\gamma x}, \quad \gamma \text{ はテーパ定数} \quad (3)$$

(2), (3)式を解いて U が求まると、速度 V と応力 σ (引張りを正值とする)は、 $V = j\omega U$, $\sigma = EdU/dx$ によって計算することができる。

力と速度の基準面における値を (F_0, V_0), x 断面における値を (F_x, V_x) としマトリックスの形で表わすと

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & B_x \\ C_x & D_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ V_x \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} A_x &= \frac{1}{\tau} e^{-\gamma x/2} \cos(\tau k x \mp \text{Cos}^{-1}\tau) \\ B_x &= -j \frac{\rho c S_x}{\tau} e^{-\gamma x/2} \sin(\tau k x) \\ C_x &= -j \frac{1}{\tau \rho c S_x} e^{\gamma x/2} \sin(\tau k x) \\ D_x &= \frac{1}{\tau} e^{\gamma x/2} \cos(\tau k x \pm \text{Cos}^{-1}\tau) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし $\tau = \sqrt{1 - (\gamma/2k)^2}$, 複号は $\gamma > 0$ のとき上を, $\gamma \leq 0$ のとき下をとり, $\text{Cos}^{-1}\tau$ はその主値をあらわす。

速度, 力, 応力, 断面積を図3のようにとり, I と II の境界で速度および力を連続とすると試験片 II における速度 V_{IIx} と応力 σ_{IIx} は, 共振条件から, (4)式において $F_0 = 0$ の条件を考慮して

$$\begin{aligned} V_{IIx} &= -C_{IIx} F_{II0} + A_{IIx} V_{II0} \\ &= -C_{IIx} \sigma_{II} S_{II} + A_{IIx} A_{II} V_{I0} \\ &= -\frac{e^{-\gamma/2}}{\tau} \left[\frac{\rho_{II} c_{II} S_{II}}{\rho_{II} c_{II} S_{II}} \sin(\tau k_{II} l) \sin(k_{II} x_{II}) \right. \\ &\quad \left. - \cos(\tau k_{II} l + \text{Cos}^{-1}\tau) \cos(k_{II} x_{II}) \right] V_{I0} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\sigma_{IIx} = D_{IIx} \frac{S_{II}}{S_{II}} \sigma_{II} - \frac{B_{IIx}}{S_{II}} A_{II} V_{I0}$$

$$\begin{aligned} &= j \frac{e^{-\gamma/2}}{\tau} \left[\frac{S_{II}}{S_{II}} \rho_{II} c_{II} \cos(k_{II} x_{II}) \sin(\tau k_{II} l) \right. \\ &\quad \left. + \rho_{II} c_{II} \cos(\tau k_{II} l + \text{Cos}^{-1}\tau) \sin(k_{II} x_{II}) \right] V_{I0} \quad (7) \end{aligned}$$

(6)式で $V_{IIx} = 0$ とおくと、考えている系における共振周波数をもとめる特性方程式となる。断面積 S_{II} が $\pi/4 \times (1.1)^2$ から $\pi/4 \times (1.2)^2$ まで変化する場合について計算を行なうと、共振周波数の増加は約 1.3 KC となる。この結果を実験で観測された 0.3 KC の変化と比較すると、1 KC の差があるが、Blaha 効果によって低下した応力レベルの上に重畳している共振波は、銅の場合、弾性範囲の繰返し応力と考えられる。

σ_{IIx} は(7)式で与えられるが、これを書きなおすと

$$|\sigma_{IIx}| = \sqrt{|\sigma_{II0}|^2 + (\rho_{II} c_{II} V_{II0})^2} \cos\{k_{II}(x_{II} - x_{II})\} \quad (7)'$$

試験片内の最大応力 σ_{IIxN} は

$$|\sigma_{IIxN}| = \sqrt{|\sigma_{II0}|^2 + (\rho_{II} c_{II} V_{II0})^2} \quad (8)$$

(b) 圧縮試験 圧縮試験中に超音波を連続および断続的に照射した結果を図4(a)~(c)に示す。入力はそれぞれ 100 W, 200 W, 300 W である。照射した振動応力を(8)式によって評価し、これを観測した応力の減少 σ_D と比較すると、図3(a)の AB 間では $\sigma_{IIxN} = 7.94 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_D = 8.85 \text{ kg/mm}^2$, (b)の CD 間では $\sigma_{IIxN} = 10.02 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_D = 11.06 \text{ kg/mm}^2$, (c)の EF 間では $\sigma_{IIxN} = 13.02 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_D = 14.50 \text{ kg/mm}^2$ である。入力の増加とともに σ_{IIxN} と σ_D の差が大きくなる。

普通の圧縮試験と比較して、超音波照射中は圧縮ひずみの増加による平均の変形荷重の増加(すなわち見掛けの加工硬化率)が小さく、入力が大きくなるほど、この傾向が著しい。これは変形とともに振動の振幅が増加するためとも考えられるが、図5のように、変形によるひずみ振幅の増加はほとんど認められない。(a)図は抵抗線ひずみゲージ(11)によってもとめた結果、(b)図は同時に X-Y レコーダで記録した静荷重-圧縮ひずみ曲線である。静荷重計に記録される平均の変形荷重は振動応力の振幅の中心を結ぶ曲線に相当している。定常状態において、平均の変形荷重に重畳する片振幅の波は、見掛けの応力の低下に比して小さな値である。

吸収のメカニズムを解明する手がかりとして、超音波照射後のひずみ振幅の上上がりりと平均の変形抵抗が減少するまでの時間を観測した。振幅の上上がりりとほとんど同時に変形抵抗の減少が起きているので、試験片が軟化する時間はミリ秒内の非常に短い時間と思われる。

Blaha 効果の原因の一つとして吸収された音響エネルギーの熱変換による試験片全体の温度上昇が考えられる。熱電対によって表面温度の測定を行なった結果、300 W

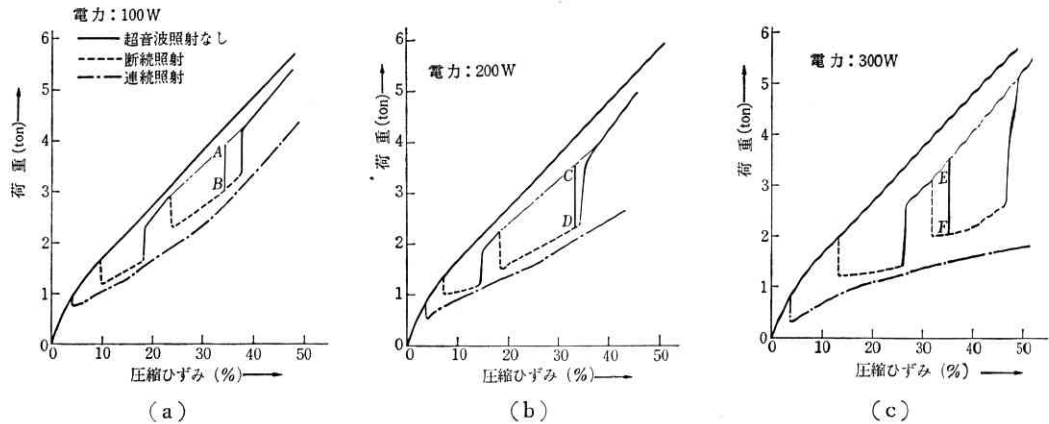
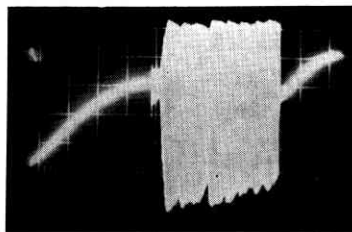
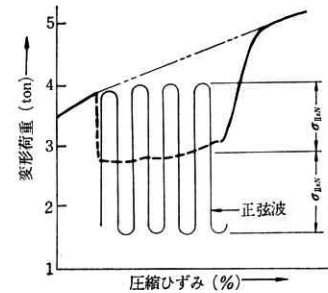


図 4 銅の圧縮試験における超音波照射の効果

の超音波を照射した場合、約 60 秒で 124°C に達しその後はほとんど変化が認められなかった。この結果と試験片の軟化時間を比較すると、変形抵抗の減少は試験片全体の温度上昇と直接関係しない。



横軸: 0.5 mV/div, 縦軸: 5 sec/div, 入力 300 W
(a) 静荷重に振動応力が重畳する状態



(b) 静荷重-圧縮ひずみ曲線に
応力振幅が重畳する様子
図 5

潤滑材を用いてこの問題を検討した結果である。超音波振動を付加すると大部分の潤滑材ではむしろ潤滑性が悪くなる。超音波照射による摩擦面の温度上昇、超音波の物理的・化学的作用による潤滑材の性能の低下などを考慮すると、応力振幅は潤滑性の向上に寄与しないと思われる。

4. ま と め

(1) 銅の圧縮試験中に超音波照射を行なうと、材料の変形抵抗は加えた振動応力の値以上に減少する。(2) 見かけの変形荷重は重畳する応力振幅の中心を結んだ線で示される。(3) 超音波照射による材料の軟化時間は非常に短くミリ秒以内の程度である。(4) 見かけの加

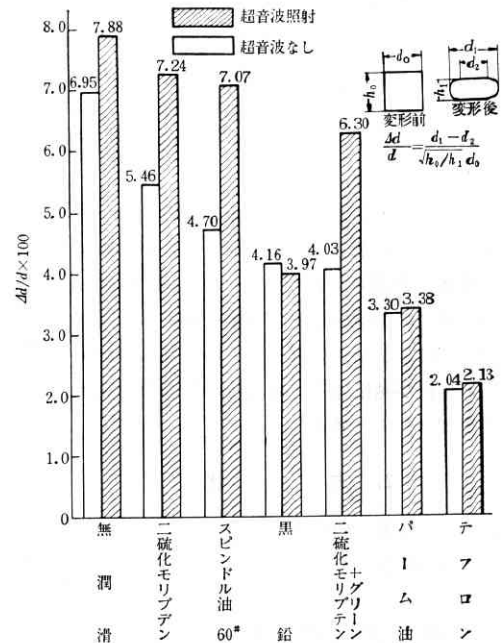


図 6 超音波振動による潤滑性の変化、電力: 200W

工硬化が少ないのは、試料全体の温度上昇による 2 次的な効果であり、超音波照射後瞬間におこる 1 次的な軟化の原因である吸収のメカニズムを追求しなければならない。(5) 超音波の塑性加工への応用の可能性を検討するつもりである。(1968 年 1 月 11 日受理)

文 献

- 1) B. Langenecker, et al., AD 439384
- 2) 山田, 藤森, 山本, 近代機械, Feb. p. 12 (1968)
- 3) 山本, 藤森, 鳥飼, 山田, 第 18 回塑性加工連合講演会前刷集, p. 227 (1967.11)
- 4) 鳥飼, 藤森, 山田, 山本, 日本音響学会講演論文集, (1967.11) p. 173
- 5) 杉, 電気通信学会超音波研究会資料, (1959.11)