

# 板金加工のための大出力超磁歪振動子の試作

脇若弘之\*

## 1. まえがき

金属の塑性加工に超音波振動エネルギーを利用する試みは古くから行われ、塑性加工や超音波接合の技術としてそれぞれ実用化されている<sup>(1)</sup>。同様に、打ち抜きや曲げなどの板金加工の際に、振動を重畳することにより加工の生産性が向上し、精度も向上することが期待される。振動子として当初はニッケルなどの磁歪材料を用いていたが大出力にするには磁歪特性が小さく、出力の割には大型の振動子にせざるを得なかった。そこで、PZT (圧電セラミックス) による振動子を適用する試みがあったが、PZT の機械的性質のため耐久性等の問題があり、実用化できなかった。近年、超磁歪材料が発明され、様々の分野で実用化への試みが始まっている。

超磁歪材料は磁気ひずみ量が 2000 ppm と大きく、ヤング率が 30 GPa と小さい強磁性材料であり、新機能材料である。この材料は、大変位、及び低周波駆動が必要とされる製品への適用が有力視されており、近年では、海洋探査を目的とした海洋音響トモグラフィ用の低周波、大出力音源への適用として、超磁歪を用いた振動子 (以後、超磁歪振動子と呼ぶ) の実用化が報告されている<sup>(2,3)</sup>。

超磁歪材料は、他の機能材料<sup>(4)</sup>と比べコストが高いという欠点があるにも係らず直動アクチュエータとして注目が集まっている。その理由は、この材料の巨大な磁歪および発生応力にある。すなわち、超磁歪材料は、アクチュエータの指標となる力密度、すなわち質量あたりの出力が他のアクチュエータに比べ非常に大きい。

本研究では、板金加工に援用できる超磁歪材料を用いた大出力の振動子を試作し、打ち抜きや曲げなどの板金加工への適用の可能性を検討することとした。

本論文の内容を以下にまとめた。

- 1) 最大振動出力のプリストレス依存性の検討
- 2) 駆動周波数および材料体積による振動出力の算出
- 3) 試作した超磁歪振動子の出力の測定
- 4) 超磁歪振動子出力の弾性エネルギー算出

## 2. 最大振動出力の計算式と材料特性

### 2.1 超磁歪材料を用いた大出力振動子

超磁歪材料ロッドの駆動力は、ロッドをクランプした際に生じる力で定義されるが、その値は磁歪性駆動力と呼ばれており、式 (1) で表される。

$$F = E \cdot A \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここに、 $F$  : 駆動力 (N),

$E$  : ヤング率 (Pa),

$A$  : 超磁歪材料のロッドの断面積 ( $\text{m}^2$ ),

$\varepsilon$  : ロッドの長さ方向のひずみ

超磁歪材料の材料特性を PZT と比較すると、超磁歪材料の飽和歪み量は、PZT に対して約 3 倍あり、電気機械結合係数は 10~15% 増しである。このため、超磁歪材料を使用して、PZT を用いた振動素子と同じ振動出力の振動子を設計すると、PZT による振動子の約 1/4 の体積にできる。すなわち、外形寸法が同等なら超磁歪材料を使用した振動子は大きな振動出力が可能になる。

図 1 に、試作した超磁歪振動子の基本構造を示した。超磁歪材料はプリストレスを与えることで最大ひずみが大きくなり、磁気バイアスを与えることで電気機械結合係数が大きくなる。そのため、この超磁歪振動子においては、超磁歪材料にコイルバネによってプリストレスを磁歪方向に加え、永久磁石をロッド両側に配置することにより磁気バイアスを加えている。

### 2.2 最大振動出力の計算式

磁歪材料や圧電材料などの機能材料を振動素子として使用する場合、最大振動出力は材料の物性値と振動素子の体積、デバイスとして組み上げた時の駆動周波数、変換効率、機械的 Q 値等を用いて表される。最大振動出力を算出する場合、電磁的出力と機械的出力の二つを考慮する必要がある。

磁性材料の場合、磁的出力は、飽和ひずみの範囲で決定される領域であり、機械的出力は素子自体が慣性等の外力によって材料が自己破壊しない最大の範囲を意味する。最大振動出力  $W_{\max}$  は、磁的および機械的エネルギー密度  $w_t$ ,  $w_s$ 、材料体積  $V_R$  および駆動周波数  $\omega$  を用いて次式より求められる<sup>(5)</sup>。

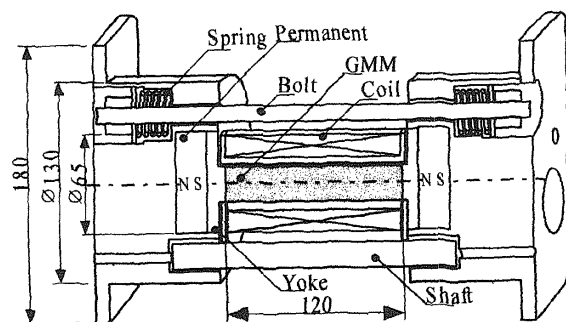


図 1 超磁歪振動子の基本構造 (単位: mm)

$$w_f = \frac{1}{2} \mu_{33}^T H_{\max}^2 \quad (\text{J/m}^3) \quad (2)$$

$$w_s = \frac{1}{2} s_{33}^H \sigma_{\max}^2 \quad (\text{J/m}^3) \quad (3)$$

$$W_{\max} = \eta_{ma} \omega_0 V_R \sqrt{w_f(w_s - w_f)} k_{33}^2 \quad (\text{W}) \quad (4)$$

$$Q_0 = \sqrt{(w_s/w_f - 1)} \quad (5)$$

ここに、  
 $w_f$  : 磁気的エネルギー密度 ( $\text{J/m}^3$ ),  
 $w_s$  : 機械的エネルギー密度 ( $\text{J/m}^3$ ),  
 $\mu_{33}^T$  : 材料の透磁率 ( $\text{H/m}$ ),  
 $s_{33}^H$  : 材料の弾性率 ( $\text{Pa}^{-1}$ ),  
 $H_{\max}$  : 最大許容印加磁界 ( $\text{A/m}$ ),  
 $\sigma_{\max}$  : 最大許容応力 ( $\text{MPa}$ ),  
 $W_{\max}$  : 最大振動出力 ( $\text{W}$ ),  
 $\eta_{ma}$  : 機械音響変換効率,  
 $V_R$  : 超磁歪材料の体積 ( $\text{m}^3$ ),  
 $\omega_0$  : 駆動周波数 ( $\text{rad/s}$ ),  
 $Q_0$  : 機械的  $Q$  値,  
 $k_{33}$  : 電気機械結合係数

材料定数の添字の上付きは材料の磁气的、機械的状态を示しており、そこに示した物理量を一定とした条件であることを意味する。また、下付きは各物理量がテンソル量であることを意味する。

### 2.3 材料特性

今回の計算に用いた超磁歪材料は、Terfenol-D (エトリマ社製)と同等の材料 (以後、GMMと略記)であり、その静磁歪特性および磁化特性から読み取った物性定数を用いた。表 1 に計算に用いた材料特性をまとめた。 $d$  定数  $d_{33}$  は、コイル電流による単位磁界に対する磁気ひずみ量を表し、次式で定義する。

$$d_{33} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta H} \quad (\text{m/A}) \quad (6)$$

ここに、  
 $d_{33}$  :  $d$  定数 ( $\text{m/A}$ ),  
 $\Delta \epsilon$  : 磁気ひずみの増加分,  
 $\Delta H$  : 磁界の強さの増加分 ( $\text{A/m}$ )

すなわち、 $d_{33}$  は、磁気ひずみ量-磁界の強さ特性の傾きに相当する。ここで、材料の能力の評価としては、電気機械結合係数  $k_{33}$  が用いられる。電気機械結合係数  $k_{33}$  は 3 変数法を用いて  $d$  定数、透磁率および弾性率から計算される。これは、入力される電気エネルギー  $U_{in}$  によって入力される機械エネルギー  $U_o$  の割合である。

表 1 超磁歪材料の材料特性

$\sigma_p$ (MPa)	$H_b$ (kA/m)	$s_{33}^H$ $\times 10^{-11}$ (Pa <sup>-1</sup> )	$d_{33}$ (nm/A)	$\mu_{33}^T$ $\times 4\pi \times 10^{-11}$ (H/m)	$H_{\max}$ (kA/m)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$k_{33}$
14	29	2.7	16.0	10.82	29	34	0.84
28	52	3.3	14.0	7.70	52	48	0.79
42	98	4.0	10.0	5.17	70	62	0.62
56	135	3.3	8.3	3.98	85	76	0.64
70	180	2.7	7.7	3.50	100	90	0.70

表 2 圧電材料 PZT-4 の特性

$S_{33}^H$ $\times 10^{-11}$ (Pa <sup>-1</sup> )	$\epsilon_{33}^T$ $\times 8.85 \times 10^{-12}$ (F/m)	$E_{\max}$ (KV/m)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$k_{33}$
1.55	1300	557	$\sigma_p$	0.7

$$k_{33}^2 = \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{d_{33}^2}{\mu_{33} s_{33}} \quad (7)$$

ここに、  
 $k_{33}$  : 結合係数,  
 $d_{33}$  :  $d$  定数 ( $\text{m/A}$ ),  
 $\mu_{33}$  : 透磁率 ( $\text{H/m}$ ),  
 $s_{33}$  : 弾性率 ( $\text{Pa}^{-1}$ )

図 2 に超磁歪材料の電気機械結合係数特性を示した。電気機械結合係数は、最適磁気バイアス (結合係数が最も高くなる磁界値) 値付近では、70% 以上の値になる。

以上の超磁歪材料の材料定数はプリストレス  $\sigma_p$  に対して非線形形であるため、プリストレス 14 ~ 70 MPa の範囲として最大振動出力を計算した。

また、比較のために、圧電材料 PZT-4 の最大振動出力を計算した。この際の材料特性は、表 2<sup>(6)</sup> の値を用いた。

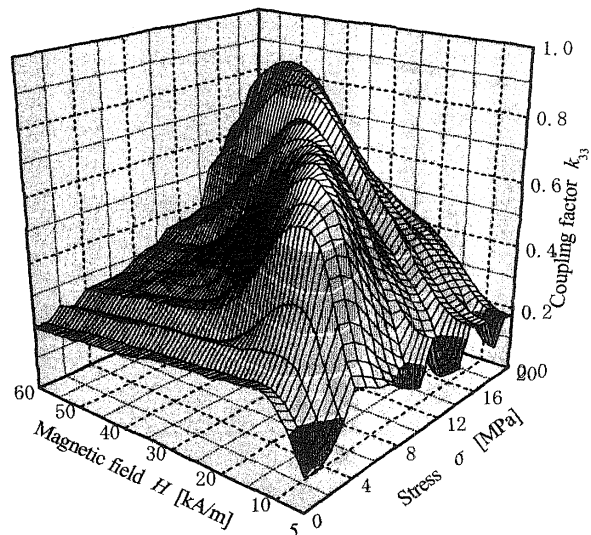


図 2 超磁歪材料の電気機械結合係数特性

超磁歪材料および圧電材料ともに、機械音響変換効率は20%、素子体積は $3.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  ( $\phi 20 \times 120 \text{ mm}$  のロッド一本相当)、駆動周波数は200 Hzとした。

### 3. 超磁歪材料の最大振動出力特性

#### 3.1 プリストレス依存性

図3にプリストレスによる最大振動出力特性を示した。超磁歪材料の最大振動出力は圧電材料PZT-4に比べ格段に大きく、PZT-4の約5倍となった。振動子などの体積に制限がある場合、駆動周波数200 Hzでは、超磁歪材料は圧電材料より有効な材料であることがわかる。

また、プリストレス $\sigma_p$ が大きくなる程最大振動出力は増加し、7 MPa時に比べ70 MPa時では約8倍の最大振動出力が得られる。すなわち、高プリストレス領域では大出力が望める。表1および式(2)、(3)より、磁気的および機械的エネルギー密度 $w_f$ 、 $w_s$ に強く依存する $H_{\max}$ 、 $\sigma_{\max}$ はプリストレスの増加に伴い大きくなる。よって、式(4)より最大振動出力が増加したと考えられる。しかし、超磁歪材料の磁気ひずみ量特性において、磁気ひずみ量の飽和磁界はプリストレスの増加に伴い大きくなるため、磁気ひずみ量の上昇傾向が磁界に対し緩やかになり傾きが小さくなる。すなわち、 $d$ 定数は低下してしまう(図4)。これらの相互関係から、設定プリストレス値は14~40 MPaが最適と考えられる。

#### 3.2 駆動周波数と材料の体積による最大振動出力

設定プリストレスを14 MPa一定とし、駆動周波数および材料の体積をパラメータとして最大振動出力を算出し

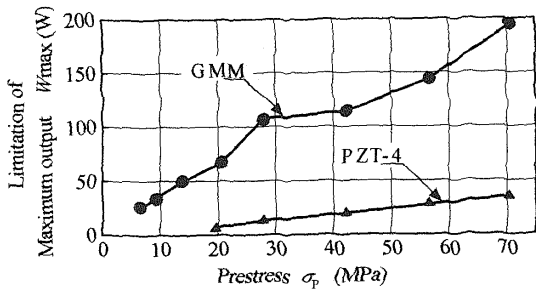


図3 プリストレスによる最大振動出力特性 ( $f_0 = 200 \text{ Hz}$ , 材料サイズ  $\phi 20 \times 120 \text{ mm}$ )

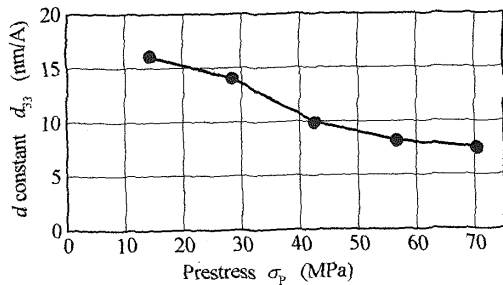


図4 GMMの $d_{33}-\sigma_p$ 特性

た。超磁歪材料は抵抗率が $60 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ と小さく、比較的低周波でも渦電流の影響を考慮する必要がある。そこでまず、渦電流の影響が無視できる周波数領域を定義する。ロッド形状の表面上の磁界 $H_s$ と中心での磁界 $H_0$ の比( $H_0/H_s$ )が98.5%となる周波数を臨界周波数 $f_c$ と定義されている。これより低い周波数では渦電流の影響は少ないとされている<sup>(7)</sup>。

超磁歪材料の抵抗率 $\rho = 60 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 、比透磁率を4.5とすれば、ロッド直径20 mmの場合、臨界周波数は253 Hzとなる。

$$f_c = \frac{2\rho}{\pi\mu D^2} \quad (\text{Hz}) \quad (7)$$

ここに、 $\rho$  : 抵抗率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ ),  
 $\mu$  : 透磁率 (H/m),  
 $D$  : 材料の直径 (m)

最大振動出力を算出するにあたって、駆動周波数は超磁歪材ロッドの直径に対応した臨界周波数とした。体積はロッドの直径をパラメータとした。また、このときの材料の寸法比は6一定とした。

図5に、超磁歪材料ロッド直径による臨界周波数および最大振動出力特性を示した。最大振動出力は材料体積に対して単調増加する傾向となった。表3に、各材料形状での最大出力および臨界周波数をまとめた。直径を小さくすれば、高周波で駆動できるが、大きな最大振動出力が望めなくなる。それに対し、直径を大きくすると最大振動出力は増加するが低周波駆動に限られてしまう。改善方法としては、前者では使用本数の増加、後者ではロッドの積層化が考えられる。

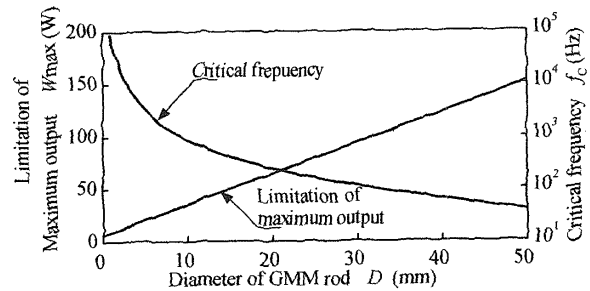


図5 GMMの $W_{\max}-D$ と $f_c$ の周波数特性 (プリストレス14 MPa, 寸法比6)

表3 ロッドサイズと最大振動出力の関係

Rod size (mm)	Critical frequency (Hz)	Limitation of maximum output (W)	Improvement method
$\phi 1 \times 6$	101424	2.6	Use many GMM rods ↕ Laminate GMM
$\phi 20 \times 1$	253	63.5	
$\phi 50 \times 3$	40	151.0	

表 4 超磁歪振動子の仕様

	Item (unit)	Value
GMM rod	Length (mm)	120
	Diameter (mm)	20
	Mass (kg)	0.35
	Material	Tb <sub>0.3</sub> Dy <sub>0.7</sub> Fe <sub>2</sub>
Coil	Number of turns	1500
	Length (mm)	120
Yoke	Material	SS400
Permanent Magnet	Material	SmCo <sub>5</sub>
	Drive condition	
	Prestress (MPa)	13.5
	Magnetic bias (kA/m)	27.5

4. 超磁歪振動子の出力の測定と弾性エネルギー

4.1 超磁歪振動子の仕様

表 4 に、超磁歪振動子の仕様を示した。この振動子を用いて材料定数の周波数特性を測定し、最大振動出力および弾性エネルギーを算出した。

4.2 超磁歪振動子の周波数特性

図 6 に、振動子として構成したときの  $d$  定数、透磁率の周波数特性を示した。この振動子の渦電流による臨界周波数は 253 Hz である。比透磁率は、臨界周波数付近以上から急激に低下する特性となった。しかし、 $d$  定数は周波数  $f = 1$  kHz 付近でピークとなる特性となった。このピーク値の周波数は、測定対象の振動子の機械的共振周波数とほぼ一致した。以上より、 $d$  定数は振動子の機械的共振周波数に依存し、比透磁率は機械的共振周波数に関係なく、渦電流のため周波数の増加に伴い低下することがわかった。

4.3 最大振動出力および弾性エネルギーの算出

以上の測定した透磁率、 $d$  定数を用いて最大振動出力および弾性エネルギーを算出し、材料定数から求めた最大振動出力との比較をおこなった。弾性エネルギー  $W_e$  は  $d$  定数を用いて式 (8) より求めた。

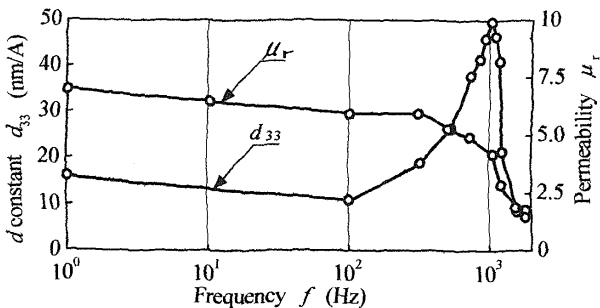


図 6  $d_{33}$  定数と  $\mu_r$  の周波数特性 (プリストレス 13.5 MPa, 励振電流 600mA)

$$W_e = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} k(ld_{33}H)^2 \quad (\text{J/m}^3) \quad (8)$$

ここに、 $W_e$  : 弾性エネルギー (J/m<sup>3</sup>),  
 $k$  : 等価スティフネス (N/m),  
 $x$  : 変位量 (m),  
 $d_{33}$  :  $d$  定数 (m/A),  
 $l$  : 超磁歪材料長さ (m),  
 $H$  : 磁界の強さ (A/m)

この際、等価スティフネスは 250 N/m 一定とした<sup>(8)</sup>。

表 5 に結果をまとめた。測定により求めた最大振動出力は材料定数から求めた値より小さくなり、200 Hz では 13%、1000 Hz では 25% 小さい値となった。材料定数に対し、測定により求めた値は周波数特性におけるマイナーループ、渦電流等が影響しているためと考えられる。

表 6 に、超磁歪振動子の弾性エネルギーを示した。200 Hz 時では、最大振動出力 31.5 W に対し 17.6 W となり、最大振動出力の 55.8% の割合となった。最大許容印加磁界が 29 kA/m であるのに対し、測定では印加磁界が約 14 kA/m であったため小さくなったと考えられる。結局、最大振動出力は大振幅で駆動すると仮定した場合の値であるため、この振動子(コイル巻数 1500 回、長さ 0.12 mm)の場合、最大振動出力を得るには約 1.2 A のコイル入力電流が必要となる。

1000 Hz 時では、弾性エネルギーは最大振動出力より大きくなり、最大振動出力の 1.54 倍となった。この振動子の機械的共振周波数は 1000 Hz 付近である。よって、共振状態においては弾性エネルギーは  $Q$  倍 (機械的  $Q$  値) となるため最大振動出力の値を上回ったと考えられる<sup>(9)</sup>。この時の機械的  $Q$  値を式 (5) を用いて計算すると、1.75 となり、1000 Hz での最大振動出力は 237.8 W となった。

表 5 最大振動出力の比較

Frequency (Hz)	Limitation of maximum output (W)	
	Calculated value using material properties	Calculated value using measured value of the vibrator
200	36.2	31.5
1000	181.2	135.9

表 6 超磁歪振動子の弾性エネルギー

Item (unit)	Value	
Exciting current (A)	0.6 ( $H = 14$ kA/m)	
Frequency (Hz)	200	1000
Limitation of maximum output (W)	31.5	135.9
Elastic energy (W)	17.6 (55.8%)	209.8 (154%)

## 5. あとがき

超磁歪材料の最大振動出力値を算出し、振動出力を最大にする条件を検討した。その結果明らかとなったことを以下にまとめた。

- 1) 超磁歪材料の最大振動出力は、圧電材料 PZT の場合より大きく、約 5 倍の大きさとなった。
- 2) 直径が大きい材料は大きな出力が得られるが、低周波駆動に限られる。それに対し、直径が小さい材料は最大振動出力は小さくなるが、高周波駆動が可能となる。
- 3) 超磁歪振動子の特性測定結果から求めた最大振動出力値は材料定数から算出した値に比べ小さくなり、200 Hz で 13 %、1000 Hz で 25 % 小さくなった。
- 4) 超磁歪振動子の弾性エネルギーは 200 Hz 時で 17.6 W となり、最大振動出力の 55.8 % の割合となった。
- 5) 最大振動出力値は大振幅で駆動すると仮定した場合の上限の値であるため、本研究に用いた振動子の場合、最大振動出力を発生させるためには約 1.2 A の入力電流が必要となる。

本研究により、大出力の超磁歪振動子を設計する指針が明らかとなった。本研究で試作検討した超磁歪振動子にホーンなどを付加して振動子で発生した弾性エネルギーを機械加工する対象に効率よく伝え、板金加工に効果的な条件を追求することが今後の課題である。

終わりに、本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成によってなされてものであることを記し、深く謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 日本電子機械工業会編：超音波工学,(1993),5,コロナ社.
- (2) 宮原俊介：日経メカニカル,506(1997),98-105.
- (3) H.Wakiwaka, M. Nagumo, M. Iio, M. Igarashi, K. Kobayashi, T. Yoshikawa, H. Yamada : Journal of the Magnetism Society of Japan, 16-2(1992), 389.
- (4) 電気学会：エレクトロ・メカニカル機能部品,(1972),7,電気学会.
- (5) R.S.Wodlett : IEEE Trans. on Sonic and Ultrasonics, 15-4(1968), 218.
- (6) Victor Giurgiutiu, Craig A. Rogers : Journal of intelligent material systems and structures, 7(1996), 656.
- (7) John L.Butler, Document of Edge Technologies Inc, (1988),7.
- (8) 脇若 弘之, 梅沢 孝志, 桑原 邦夫, 鎌田 弘志, 吉川 隆：日本 AEM 学会誌, 2-1(1994), 30.
- (9) 野村 昭一郎, 内藤 善之, 武者 利光, 森泉 豊栄：振動・波動入門, コロナ社(1972), 37-42.