

板金加工のための大出力超磁歪振動子の試作

信州大学工学部電気電子工学科

助教授 脇若 弘之

(平成7年度研究開発助成 AF-95017)

キーワード：超磁歪材料，振動子，板金加工

1. まえがき

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、精度の向上も期待できることが知られている。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、出力の割り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、機械的性質のため耐久性等の問題があり、実用化できなかつた。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¹⁾。

超磁歪材料は、他の「電気機械変換子」材料²⁾と比べ製造コストおよび素子価格が高いという課題、欠点が上げられる。しかし、超磁歪材料の高コストに係わらず直動アクチュエータとして注目が集まっているのは、この材料の巨大な磁歪および発生応力にあると考えられる。特に、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は、超磁歪材料は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) 最大出力限界のプリストレス依存性
- 2) 駆動周波数および材料体積による最大出力限界の変化
- 3) 超磁歪振動子の出力の実測
- 4) 超磁歪振動子の弾性エネルギーの算出

2. 最大出力限界の計算式と算出条件

2.1 超磁歪材料を用いた大出力振動子の試作

ニッケル（従来の磁歪材料として）、PZT および超磁歪材料の基礎特性を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約 15% 増しである。このため、振動素子としての設計では、

同等の振動出力のためのサイズで、PZT による振動子に対して超磁歪材料を利用した振動子の体積は約 1/4 にできる。そこで、超磁歪材料を使用した大出力の振動子を試作することとした。

2.2 最大出力限界の計算式

磁歪材料や圧電材料などの電気機械変換子材料を振動素子として使用する場合、最大出力限界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。最大出力限界を算出する場合、電磁氣的出力限界と機械的出力限界の二つを考慮する必要がある。

磁性材料の場合、磁氣的出力限界は、飽和ひずみの範囲で最大出力が決定される領域であり、機械的出力限界は素子自体が慣性等の外力によって迎える機械的応力による材料の破壊限界を意味する。最大出力限界 W_{max} は、磁氣のおよび機械的エネルギー密度 w_f , w_s , 材料体積 V_R および駆動周波数 ω_0 を用いて次式より求められる³⁾。

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

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

$$W_{max} = \eta_{ms} \omega_0 V_R \sqrt{w_f (w_s - w_f)} k_{33}^2 \quad (\text{W}) \quad (3)$$

$$Q_0 = \sqrt{(w_s / w_f - 1)} \quad (4)$$

ここに、
 w_f : 磁氣的エネルギー密度 (J/m³),
 w_s : 機械的エネルギー密度 (J/m³),
 μ_{33}^T : 材料の透磁率 (H/m),
 s_{33}^H : 材料の弾性率 (Pa⁻¹),
 H_{max} : 最大許容印加磁界 (A/m),
 σ_{max} : 最大許容応力 (MPa),
 W_{max} : 最大出力限界 (W),
 η_{ms} : 機械音響変換効率,
 V_R : 超磁歪材体積 (m³),
 ω_0 : 駆動周波数 (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氣的、機械的狀態を示しており、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 計算条件

今回の計算に用いた超磁歪材料は、Terfenol-D（エトリーマ社製）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、次式に定義する。

$$d_{33} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta H} \quad (\text{m/A}) \quad (5)$$

ここに、 d_{33} : d 定数 (m/A),

$\Delta \varepsilon$: 磁気ひずみの増加分,

ΔH : 磁界の強さの増加分 (A/m)

すなわち、磁気ひずみ量—磁界の強さ特性の傾きに相当する。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した値である。

以上の超磁歪材料の材料定数はプリストレス σ_p に対して非線形であるため、プリストレス14～70MPaの範囲で最大出力限界を計算した。

また、比較のために、圧電材料PZT-4の最大出力限界を計算した。この際の材料特性は、表2の値を用いた。

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200Hzとした。

3. 超磁歪材料の最大出力限界特性

3.1 プリストレス依存性

図1にプリストレスによる最大出力限界特性を示した。超磁歪材料の最大出力限界は圧電材料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200Hz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 σ_p が大きくなる程最大出力限界は増加し、7MPa時に比べ70MPa時では約8倍の最大出力限界が得られた。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(1)、(2)より、磁気的および機械的エネルギー密度 w_r 、 w_s に強く依存する H_{max} 、 σ_{max} はプリストレスの増加に伴い大きくなる。よって、式(3)より最大出力限界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2)。これらの相互関係から、設定プリストレス値は14～40MPa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出力限界

設定プリストレスを14MPa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出力限界を算出した。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low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⁵⁾。

表1 超磁歪材料の材料特性

σ_p (MPa)	H_b (kA/m)	s_{33}^H $\times 10^{11}$ (Pa)	d_{33} (m/A)	μ_{33}^T $\times 4\pi 10^{11}$ (H/m)	H_{max} (kA/m)	σ_{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 ⁻¹)	ϵ_{33}^T $\times 8.85 \times 10^{-12}$ (F/m)	E_{max} (KV/m)	σ_{max} (MPa)	k_{33}
1.55	1300	557	σ_p	0.7

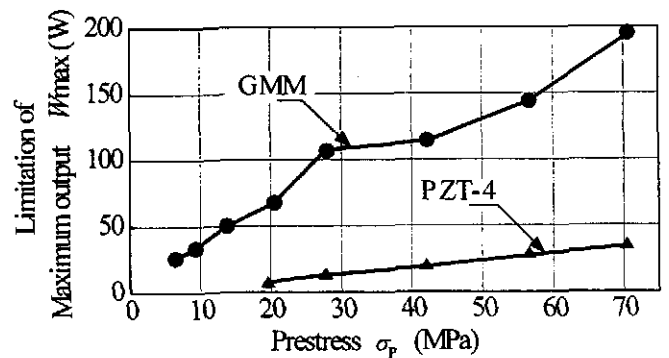


図1 プリストレスによる最大出力限界特性 ($f_0 = 200 \text{ Hz}$, 材料サイズ $\phi 20 \times 120 \text{ mm}$)

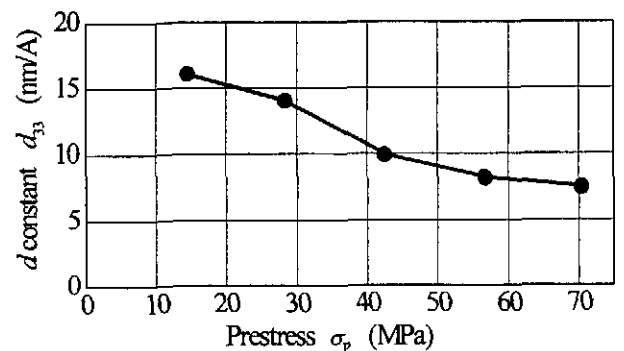


図2 GMMの $d_{33} - \sigma_p$ 特性。

$$f_c = \frac{2\rho}{\pi\mu D^2} \quad (\text{Hz}) \quad (6)$$

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

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。

最大出力限界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 3 に, 超磁歪材料ロッド直径による臨界周波数および最大出力限界特性を示した。最大出力限界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, 高周波駆動が可能となるが大きな最大出力限界が望めなくなる。それに対し, 直径を大きくすると最大出力限界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。

4. 超磁歪振動子の出力の測定と弾性エネルギー

4.1 超磁歪振動子の構造

図 4, 表 4 に, 実験に用いた超磁歪振動子の構造および仕様を示した。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。よって, この超磁歪振動子の場合, 材料には, コイルバネによるプリストレスを磁歪方向に, 永久磁石を対向させることにより磁気バイアスを加えている。

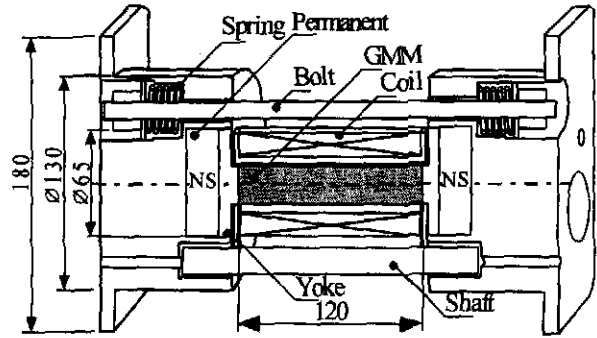


図 4 超磁歪振動子の構造 (単位: mm)

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 _{0.3} Dy _{0.7} Fe ₂
Coil	Number of turns	1500
	Length (mm)	120
Yoke	Material	SS400
Permanent Magnet	Material	SmCo ₅
Drive condition	Prestress (MPa)	13.5
	Magnetic bias (kA/m)	27.5

この振動子を用いて材料定数の周波数特性を実測し, 最大出力限界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 5 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。

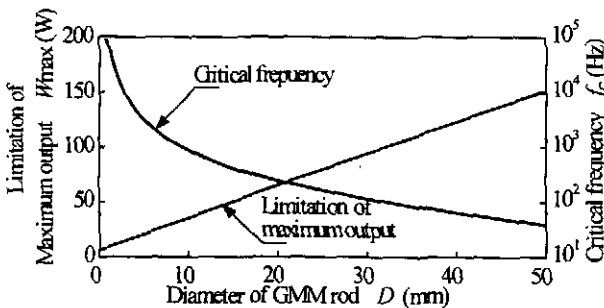


図 3 GMM の $W_{\text{max}} - D$ と f_c の周波数特性 (プリストレス 14 MPa, 寸法比 6)

表 3 ロッドサイズと最大出力限界の関係

Rod size (mm)	Critical frequency (Hz)	Limitation of maximum output (W)	Improvement method
$\varnothing 1 \times 6$	101424	2.6	Use many GMM rods
$\varnothing 20 \times 12$	253	63.5	
$\varnothing 50 \times 30$	40	151.0	Laminate GMM

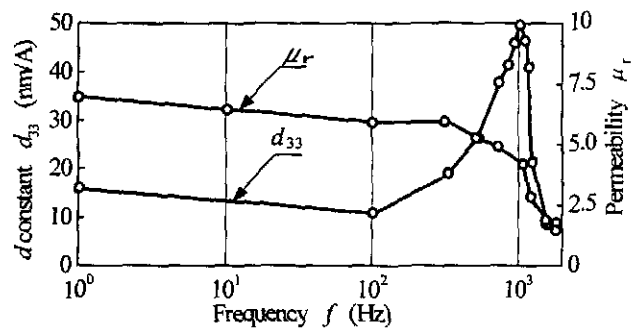


図 5 d_{33} 定数と μ_r の周波数特性 (プリストレス 13.5 MPa, 励振電流 600mA)

4.3 最大出力限界および弾性エネルギーの算出

以上の実測した透磁率, d 定数を用いて最大出力限界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出力限界との比較をおこなった。弾性エネルギー W_e は d 定数を用いて次式より求めた。

$$W_e = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} k (l d_{33} H)^2 \quad (J/m^3) \quad (7)$$

ここに, W_e : 弾性エネルギー (J/m^3),

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⁶⁾。

表 5 に結果をまとめた。実測により求めた最大出力限界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, 実測により求めた値で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, 最大出力限界 $31.5 W$ に対し $17.6 W$ となり, 最大出力限界の 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, 実測では印加磁界が約 $14 kA/m$ であったため小さくなったと考えられる。結局, 最大出力限界は大振幅で駆動すると仮定した場合の限界値であるため, 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出力限界より大きくなり, 最大出力限界の 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,

表 5 最大出力の比較

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 %)

共振状態においては弾性エネルギーは Q 倍(機械的 Q 値)となるため最大出力限界を上回ったと考えられる⁷⁾。この時の機械的 Q 値を式(4)を用いて計算すると, 1.75 となり, $1000 Hz$ での最大出力限界は $237.8 W$ となった。

5. あとがき

超磁歪材料の最大出力限界を算出し, 各条件での最大出力限界の可能性の検討を行なった。その結果明らかとなったことを以下に示す。

- 1) 超磁歪材料の最大出力限界は圧電材料 PZT 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出力限界は小さくなるが, 高周波駆動が可能となる。
- 3) 超磁歪振動子の特性測定から求めた最大出力限界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, 最大出力限界の 55.8% の割合となった。
- 5) 最大出力限界は大振幅で駆動すると仮定した場合の限界値であるため, 本実験に用いた振動子の場合, 最大出力を得るには約 $1.2 A$ の入力電流が必要となる。

本研究で試作した超磁歪振動子利用して SPCC などの鋼板(ワーク)を曲げ加工するときの曲げ加工精度を向上させる研究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) H.Wakiwaka, M. Nagumo, M. Iio, M. Igarashi, K. Kobayashi, T. Yoshikawa, H. Yamada: Journal of the Magnetics Society of Japan, 16-2(1992), 389.
- 2) 電気学会: エレクトロ・メカニカル機能部品, (1972), 7, 電気学会.
- 3) R.S.Wodlett: IEEE Trans. on Sonic and Ultrasonics, 15-4(1968), 218.
- 4) Victor Giurgiutiu, Craig A. Rogers: Journal of intelligent material systems and structures, 7(1996), 656.
- 5) John L.Butler, Document of Edge Technologies Inc, (1988), 7.
- 6) 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.
- 7) 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.