

学術論文

超磁歪材を用いた音響振動素子の電気機械結合係数と効率

Electromechanical Coupling Coefficient and Efficiency of the Acoustic Vibration Element Using Giant Magnetostrictive Material

正	脇若	弘之	(信州大学)	学	桑原	邦夫	(信州大学)
非	降幡	大作	(信州大学)	非	鎌田	弘志	(沖電気工業 (株))
非	吉川	隆	(沖電気工業 (株))				

Hiroiyuki WAKIWAKA, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano-shi 380
 Kunio KUWAHARA, Shinshu University
 Daisaku FURIHATA, Shinshu University
 Hiroshi KAMATA, Oki Electric Industry Co., Ltd.
 Takashi YOSHIKAWA, Oki Electric Industry Co., Ltd.

The Acoustic Vibration Element using Giant magnetostrictive material (AVEG) was developed as a unit of acoustic source for an ocean acoustic tomography system. This acoustic source is required a low frequency and high power output.

This paper deals with impedance characteristics, equivalent circuit, electromechanical coupling coefficient and electromechanical efficiency of the AVEG. We measured the impedance characteristics of the AVEG, calculated the displacements from the measured results and equivalent circuit of the AVEG. And we measured displacements by use of an accelerometer to compare with calculated that. Consequently, the calculated displacements matched the measured that to 2.3% of error around the mechanical resonance frequency. We calculated the electromechanical coupling coefficient by use of the impedance characteristics of the AVEG, and its value was 68.9%. Also, the electromechanical efficiency was 91.9%. And we clarified that the value has dependence of input current level.

Key Words : Acoustic Source, Equivalent Circuit, Coupling Coefficient, Electromechanical efficiency

1 まえがき

音波を用いて海洋観測を行なう海洋音響トモグラフィには、200[Hz]程度の低周波で1000[km]以上の音の伝播を行なえる大出力の音源が求められている。この音源を従来用いられてきたPZTで構成すると、直径4[m]程度となり実用的ではない。そこで、1000ppm以上の大きな磁気ひずみ特性を持つ、超磁歪材料を用いた音源の開発が行なわれている[1][2]。

超磁歪音響振動素子 (Acoustic Vibration Element using Giant magnetostrictive material, 以下 AVEG と略記) は、上記の音源を構成する1ユニットとして開発された。しかし、磁気回路設計や駆動条件の決定は、十分に明確化されているとは言えない。そこで、AVEG 単体における機械的共振周波数、また、振動素子の電気機械結合係数と電気機械変換効率を評価した。本論文では、以下のことについて考察を行なう。

1. 動インピーダンスから求めた等価回路定数の計算値と、変位-電流感度の実測値との比較
2. 機械的共振周波数と等価回路定数の入力電流依存性
3. 電気機械結合係数と電気機械変換効率の入力電流依存性

2 超磁歪音響振動素子の構造と等価回路

2.1 超磁歪音響振動素子の構造

Fig.1 に、超磁歪音響振動素子の構造を示した。超磁歪振動子を中心に円筒状に構成されており、コイル、ヨーク、外部ヨーク、アルミニウム外枠等が取り付けられている。また、超磁歪材料には、圧縮応力を加えるとより大きな磁気ひずみを生ずる特性が有るため、3本のプリストレス用ボルトにより7[MPa]の応力を加えている。

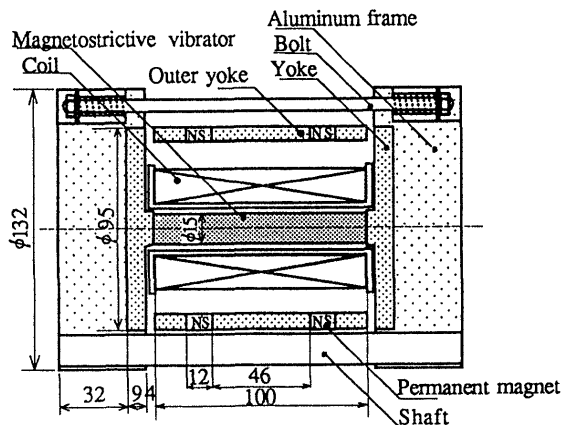


Fig.1 The structure of the acoustic vibration element using giant magnetostrictive material (AVEG)

Table 1 Specifications of the AVEG

Item		Value
Vibrator	Length	100 [mm]
	Diameter	15 [mm]
	Mass	0.16 [kg]
	Material	$Tb_x Dy_{1-x} Fe_2$
Mass (One side Aluminum frame + Yoke)	Length	41 [mm]
	Diameter	132 [mm]
	Mass	1.75 [kg]
	Material	1) Frame: Al 2) Yoke: SS41
Coil	Sectional area	1180 [mm ²]
	Number of turns	1250
	Input current	± 1 [A]

AVEG には外部ヨークが設けてあり、磁気回路を開回路に構成している。また、永久磁石を外部ヨークに設けることにより、振動子に加わる磁束密度を均一にすることができる [3]。入力電流 ± 1 [A] において、静磁歪特性は、 ± 40 [μm] (± 400 ppm) 程度の比較的線形な磁気ひずみ特性を得ており、AVEG はこの範囲で使用が可能である [4]。

Table 1 に、超磁歪音響振動素子の仕様を示した。超磁歪振動子の材質は、 $Tb_x Dy_{1-x} Fe_2$ ($x = 0.27 \sim 0.3$) であり、長さ 100 [mm]、直径 15 [mm] を使用している。また、振動子端部の質量は 1.75 [kg]、コイルの巻数は 1250 回である。

2.2 超磁歪音響振動素子の等価回路

超磁歪音響振動素子の振動を単一振動系とすれば、機械系の運動方程式は次式で示される。

$$F = AI = zv = (r + j\omega m + \frac{k}{j\omega})v \quad [\text{N}] \quad (1)$$

F : 駆動力 [N]

A : 力係数 [N/A]

z : 機械インピーダンス [$\text{N} \cdot \text{s/m}$]

v : 振動速度 [m/s]

r : 機械的抵抗 [$\text{N} \cdot \text{s/m}$]

m : 等価質量 [kg]

k : 等価スチフネス [N/m]

運動方程式は、電気回路で類推することができ、駆動力は電圧、振動速度は電流にあたる。

Fig.2 に、超磁歪音響振動素子の電気-機械等価回路を示した。電気的入力力は力係数 A により機械系に変換される [5]。

Fig.3 に、電気的インピーダンス等価回路を示した。ここで、インピーダンスは、式 (2) に示す成分に分類することができる。

$$Z_f = Z_d + Z_m \quad [\Omega] \quad (2)$$

Z_f : AVEG のインピーダンス [Ω]

Z_d : 制動インピーダンス [Ω]

Z_m : 動インピーダンス [Ω]

制動インピーダンス Z_d は、振動子を完全に抑圧した場合のインピーダンス成分であり、動インピーダンス Z_m は、振動子が振動するために、逆磁歪効果により生じる成分である。動インピーダンスは、 C_m 、 L_m 、 R_m からなり、Fig.2 より、直接的に求めることができる [6]。

$$C_m = \frac{m}{A^2}, L_m = \frac{A^2}{k}, R_m = \frac{A^2}{r} \quad (3)$$

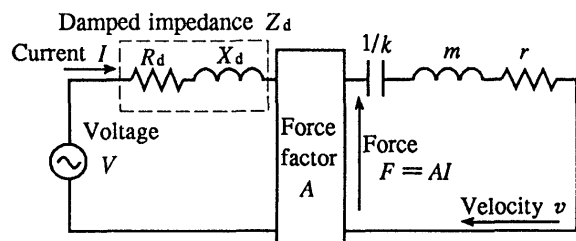


Fig.2 Electromechanical equivalent circuit of the AVEG.

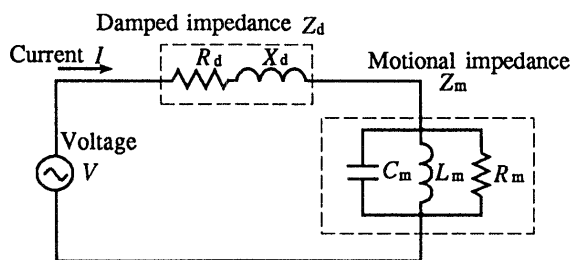


Fig.3 Electric impedance equivalent circuit of the AVEG.

Fig.3 に示した等価回路により，機械的共振周波数付近でインピーダンスを測定すれば，等価回路定数を計算により求めることができる。

3 動インピーダンス特性と等価回路定数の入力電流依存

3.1 動インピーダンス特性

AVEG のインピーダンスを測定するために，プリストレス用ボルトを糸でつるした両端自由条件で設定し，振動面に負荷がからないようにした。また，発振器と定電流増幅器により，入力電流一定の正弦波を入力し，周波数を 5～2000 [Hz] まで変化させた。入力電流は 15～120 [mA] とした。コイル内部の磁界の強さは，0.15～1.2 [kA/m] となる。

Fig.4 に，入力電流 60 [mA] における動インピーダンス特性を示した。動インピーダンス特性より，等価回路定数を計算することができる。動インピーダンス特性を正円と見なしたときの直径を，最大動インピーダンス Z_{m0} ，その時の周波数を，機械的共振周波数 f_0 とする。機械的共振周波数 f_0 より， $\pm 45^\circ$ ずれた周波数を，臨界周波数 f_1 ， f_2 とすると，等価回路定数は，式 (4)～(6) で示される [7]。ここで，AVEG は両端自由条件で設定しているため，振動子の半分で発生する力係数を， A とする。

$$r = m(\omega_2 - \omega_1) \quad [\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}] \quad (4)$$

$$k = m\omega_0^2 \quad [\text{N}/\text{m}] \quad (5)$$

$$|A| = \sqrt{Z_{m0}/2 \cdot r} \quad [\text{N}/\text{A}] \quad (6)$$

$m = 1.75[\text{kg}]$: 等価質量

Z_{m0} : 最大動インピーダンス $[\Omega]$

Table2 に，入力電流 60 [mA] における超磁歪音響振動子の等価回路定数を示した。機械的共振周波数 f_0

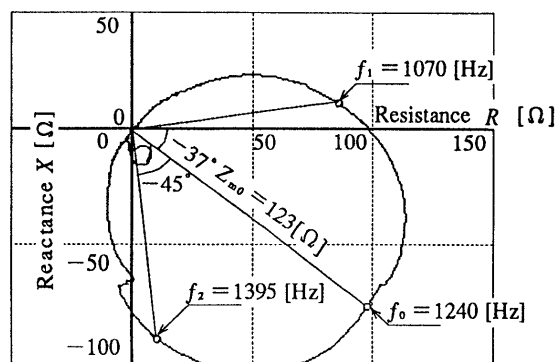


Fig.4 Characteristics of motional impedance (Input current 60 [mA]).

Table2 Equivalent circuit constants of the AVEG (Input current 60 [mA])

Item	Symbol	Value
Mechanical resonance frequency	f_0 [Hz]	1240
Quadrantal frequency	f_1 [Hz]	1070
	f_2 [Hz]	1395
Maximum motional impedance	Z_{m0} [Ω]	123
Angle of Z_{m0}	$\angle Z_{m0}$ [$^\circ$]	-37
Equivalent mass	m [kg]	1.75
Equivalent stiffness	k [MN/m]	106
Mechanical resistance	r [N · s/m]	3573
Force factor	A [N/A]	468
Angle of force factor	$\angle A$ [$^\circ$]	-19
Quality factor	Q	3.82

は，1240[Hz]，最大動インピーダンス Z_{m0} は，123 $[\Omega]$ となった。

3.2 変位－電流感度特性

単位電流当たりの変位の量を，変位－電流感度と定義する。AVEG の変位－電流感度の計算値は，式 (1) より，次式で示される。

$$G = \left| \frac{u}{I} \right| = \frac{|A|}{\omega \sqrt{r^2 + (m\omega - k/\omega)^2}} \quad [\text{m}/\text{A}] \quad (7)$$

$$\phi = \angle A - \tan^{-1} \left(\frac{m\omega - k/\omega}{r} \right) - 90 \quad [^\circ] \quad (8)$$

G : 変位－電流感度 $[\text{m}/\text{A}]$

u : 変位 [m]

ϕ : 変位-電流感度の位相角 [°]

Fig.5 に、入力電流 60 [mA] における AVEG の変位-電流感度特性を示した。実測値は入力電流 60 [mA] 一定の正弦波を入力し、AVEG 振動面中心に加速度ピックアップを貼り付けて振動加速度を測定した。その振動加速度を 2 回積分して変位に換算した。計算値は Table2 の等価回路定数を式 (7), (8) に代入することで計算した。

実測値の機械的共振周波数は 1255 [Hz], 変位-電流感度は 17.2 [$\mu\text{m}/\text{A}$] となった。また、計算値は 1240 [Hz], 16.8 [$\mu\text{m}/\text{A}$] となり、変位-電流感度は、2.3 % の誤差で一致した。また、変位-電流感度全体の特性も良く一致しており、Fig.3 の等価回路は、妥当である事が言える。

3.3 等価回路定数の入力電流依存性

Fig.6 に、入力電流に対する機械的共振周波数、臨界周波数特性を示した。機械的共振周波数 f_0 は、入力電流 15 [mA] で 1315 [Hz], 120 [mA] で 1200 [Hz] となり、115 [Hz] 減少した。臨界周波数も同様に、入力電流が増加すれば下がる特性となった。しかしながら、臨界周波数 f_1 の減少が 1165 [Hz] から 1025 [Hz] と 140 [Hz] の減少であるのに対し、 f_2 は、1460 [Hz] から 1395 [Hz] と、65 [Hz] の減少となっている。この特性により、機械的抵抗は増加する。

Fig.7 に、入力電流に対する最大動インピーダンス特性を示した。入力電流が 15 [mA] から 120 [mA] と増加することにより、最大動インピーダンスも、92

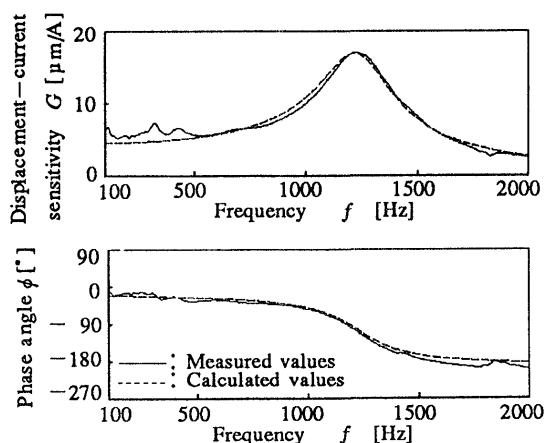


Fig. 5 Characteristics of displacement-current sensitivity (Input current 60 [mA]).

[Ω] から 132 [Ω] へと 40 [Ω] 増加する。

Fig.8 に、入力電流に対する等価回路定数の特性を示した。入力電流の増加により、力係数、機械的抵抗は、増加傾向を示し、等価スチフネスは、減少する特性となった。

以上より、等価回路定数は、入力電流、励振磁界に依存性がある [8]。

4 電気機械結合係数と電気機械変換効率

4.1 超磁歪音響振動素子の電気機械結合係数

電気機械結合係数は変換器の電気機械変換の能力を表すもので、次式で示される。

$$k_{33}^2 = \frac{1/2S \cdot T}{1/2B \cdot H} \quad (9)$$

k_{33} : 電気機械結合係数

S : 歪み

T : 応力 [Pa]

B : 磁束密度 [T]

H : 磁界の強さ [A/m]

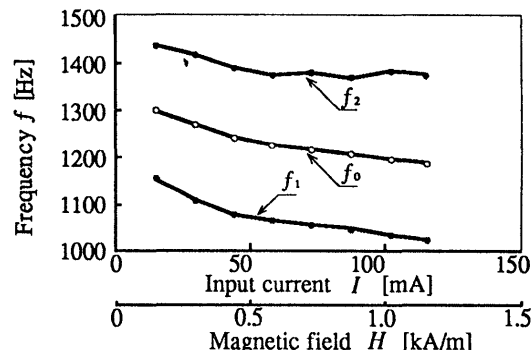


Fig.6 Characteristics of mechanical resonance, quadrantal frequency.

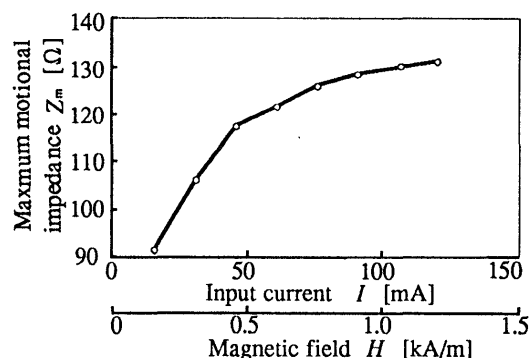


Fig. 7 Characteristics of maximum motional impedance.

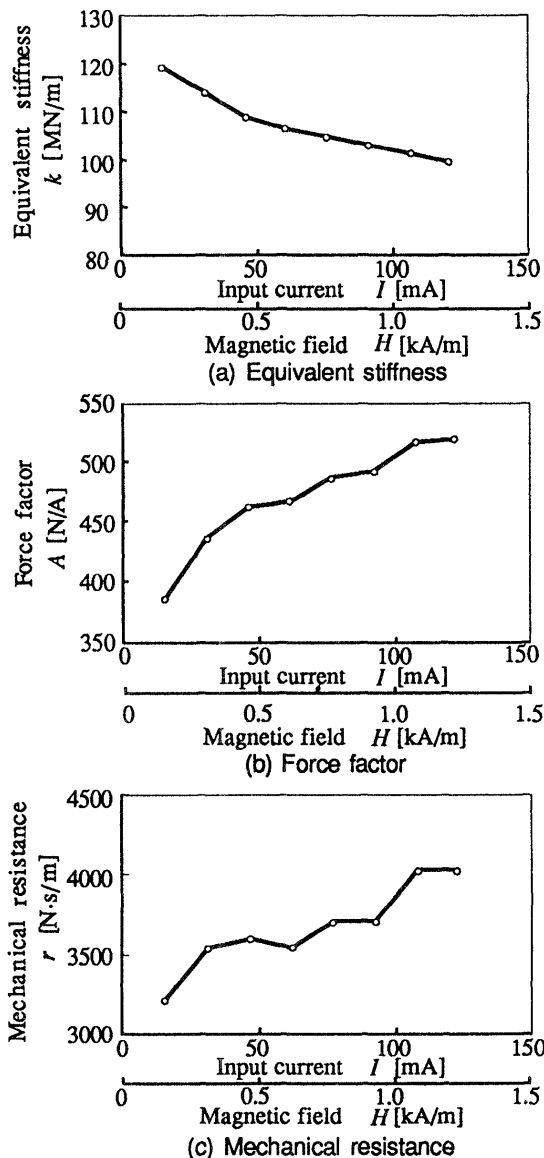


Fig.8 Characteristics of equivalent circuit constant - input current.

電気機械結合係数 k_{33} を共振法の次式により、簡易的に求めた [9].

$$k_{33}^2 = \frac{\pi^2 f_a^2 - f_r^2}{8 f_a^2} \quad (10)$$

f_r : インピーダンスの共振周波数 [Hz]

f_a : インピーダンスの反共振周波数 [Hz]

共振法は、渦電流の影響を受ける場合があるが、インピーダンスの測定をするだけで求めることができ、電気機械結合係数の目安として使われる。

Fig.9 に、入力電流 60[mA] における超磁歪音響振動素子のインピーダンス特性を示した。AVEG のインピーダンスが共振する周波数を f_r 、反共振を f_a とする。

Fig.10 に、入力電流に対するインピーダンスの共振、反共振周波数特性を示した。入力電流の増加により共振、反共振周波数は下がる傾向となった。このことは、Fig.6 の機械的共振周波数、臨界周波数特性と同様の結果となった。また、入力電流が増加すると、 f_a の減少より、 f_r の減少が大きくなり、共振、反共振周波数の差が増加する。その結果、式 (10) より、電気機械結合係数は増加する。

Fig.11 に、入力電流に対する電気機械結合係数特性を示した。15 [mA] において、61.7% となったが、入力電流が増加すると共に電気機械結合係数は増加し、120 [mA] において、68.9% となった。

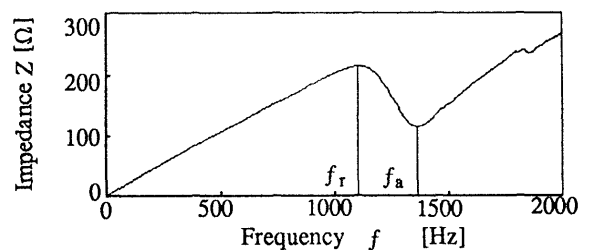


Fig.9 Characteristics of impedance (Input current 60[mA]).

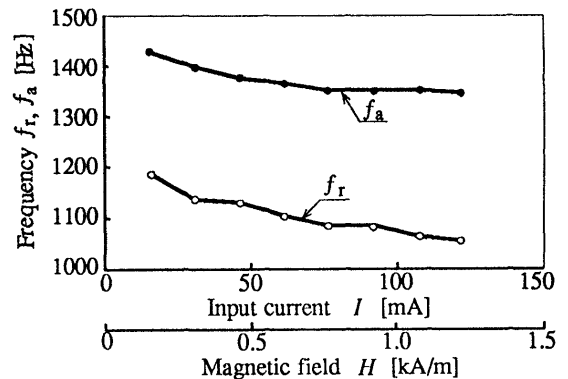


Fig.10 The resonance, antiresonance frequency of impedance.

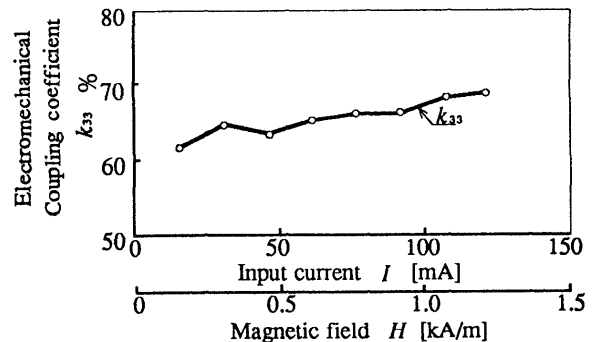


Fig.11 The electromechanical coupling coefficient of the AVEG.

4.2 超磁歪音響振動素子の電気機械変換効率

機械的共振周波数における AVEG のインピーダンスは式 (11) となるので、電気入力式 (12) となる [7][10].

$$Z_{f0} = R_{f0} + jX_{f0} \quad [\Omega] \quad (11)$$

$$P_{e0} = R_{f0} I^2 \quad [\text{W}] \quad (12)$$

R_{f0} : インピーダンスの抵抗成分 $[\Omega]$

P_{e0} : 電気入力 $[\text{W}]$

機械的共振周波数における片端の振動速度は式 (7) より、式 (13) となる。よって、振動面両端の機械的出力は式 (14) となる。

$$v = \frac{AI}{r} = \sqrt{\frac{Z_{m0}}{2r}} I \quad [\text{m/s}] \quad (13)$$

$$P_{m0} = 2rv^2 = Z_{m0} I^2 \quad [\text{W}] \quad (14)$$

P_{m0} : 機械的出力 $[\text{W}]$

式 (12), (14) より電気機械変換効率は次式で示される。

$$\eta_{em0} = \frac{P_{m0}}{P_{e0}} = \frac{Z_{m0}}{R_{f0}} \times 100 \% \quad (15)$$

η_{em0} : 電気機械変換効率 $\%$

Fig.12 に、機械的共振周波数における最大動インピーダンス、インピーダンスの抵抗成分を示した。入力電流 15[mA] において、機械的共振周波数は 1315[Hz] であるので、その時の最大動インピーダンスは 91.6 $[\Omega]$ 、インピーダンスの抵抗成分は 121.1 $[\Omega]$ となった。入力電流を増加すると、それぞれの機械的共振周波数における最大動インピーダンス、インピーダンスの抵抗成分は増加し、120[mA] において、それぞれ 132 $[\Omega]$ 、143.9 $[\Omega]$ となった。

Fig.13 に、入力電流に対する電気機械変換効率特性を示した。入力電流を増加することにより、電気機械変換効率も増加し、15[mA] において 75.6% から、120[mA]、91.9% と増加した。

5 まとめ

本論文で明らかとなった事を、以下に示す。

1. インピーダンス特性から等価回路定数を計算する方法を示した。この計算値から、入力電流 60 [mA] における機械的共振周波数は、1240 [Hz]、変位-電流感度は、16.8 $[\mu\text{m}/\text{A}]$ となり、実測

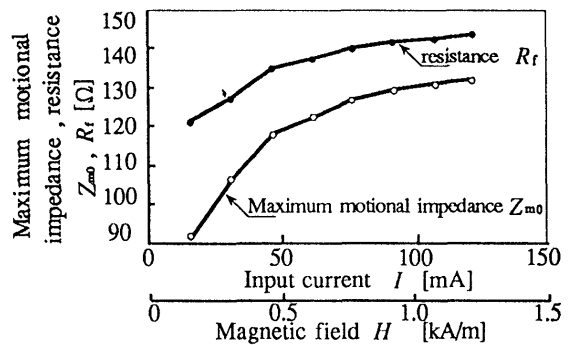


Fig. 12 Characteristics of maximum motional impedance and resistance of free impedance.

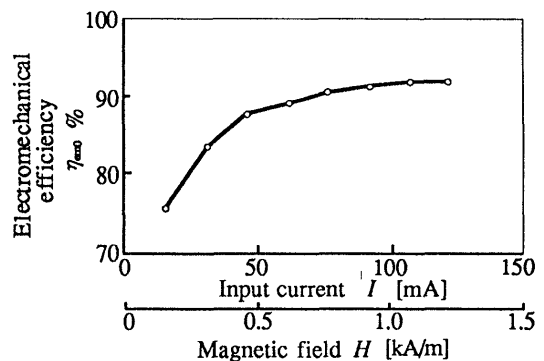


Fig.13 Characteristics of electromechanical efficiency - input current.

値の 1255[Hz]、17.2 $[\mu\text{m}/\text{A}]$ と 2.3 % の誤差で一致した。

2. 入力電流を 15~120 [mA] と変化させると、機械的共振周波数は、1315~1200 [Hz] と変化した。また、それぞれの等価回路定数にも、入力電流により変化が見られた。
3. 入力電流を増加させることにより、電気機械結合係数は、61.7 % (15 [mA]) から、68.9 % (120 [mA]) へ増加し、電気機械変換効率も、75.6 % から 91.9 % と増加した。

(1994 年 10 月 11 日受付)

参考文献

- [1] H.Wakiwaka・M.Iio・M.Nagumo・H.Yamada・K.Kobayashi・T.Yoshikawa,
Impedance analysis of acoustic vibration element using giant magnetostrictive mate-

- rial, IEEE Trans. on Mag., Vol.28, No.5, pp.2208-2210(1992)
- [2] 河守 章好・吉川 隆・宮田 哲治・鎌田 弘志・中埜 岩男・土屋 利雄・網谷 泰孝・中西 俊之, 超磁歪材料を用いた低周波音源, 信学技報, US93-40, pp.57-64(1993)
- [3] 脇若 弘之・梅沢 孝志・桑原 邦夫・小林 圭一・鎌田 弘志・吉川 隆・山田 一, 超磁歪音響振動素子の磁気回路改良モデルの設計, 第 5 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集, 260-263(1993)
- [4] 脇若 弘之・奈雲 正通・飯尾 稔・山田 一, 超磁歪音響振動素子における磁気バイアスの効果, 日本応用磁気学会誌, Vol.16, No.2, pp.389-392(1992)
- [5] 実吉 純一・菊池 喜充・熊本 乙彦, 超音波術技術便覧, 日刊工業新聞社, pp.1483-1489(1966)
- [6] 永井 健三・近野 正, 電気・機械振動子とその応用, コロナ社, pp.96-99(1974)
- [7] 菊池 喜充, 磁歪振動と超音波, コロナ社, pp.68-94(1959)
- [8] 脇若 弘之・梅沢 孝志・桑原 邦夫・鎌田 弘志・吉川 隆, 超磁歪音響振動素子の駆動条件と等価回路解析, 日本 AEM 学会誌, Vol.2, No.1, pp.30-35(1994)
- [9] K.C.Pitman・A.Branwood・A.R.Piercy, Device Oriented Measurements on Terfenol Material, The Second International Conference on Giant Magnetostrictive Alloy and Amorphous Alloys for Actuators and Sensors, pp.1-5(1988)
- [10] (社) 日本電子機械工業会, 超音波工学, コロナ社, pp.32-34(1993)