

## Micro Magnetostrictive Vibrator using Iron-Gallium Alloy (Galfenol)

T. Ueno, E. Summers\*, M. Wun-Fogle\*\*, and T. Higuchi

Department of Precision Machinery engineering, The Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

\*Etrema Products, Inc., 2500 North Loop Drive, Ames, IA 50010, USA

\*\* Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, 9500 MacArthur Boulevard, West Bethesda, MD 20817-5700, USA

Micro magnetostrictive vibrator using Iron-Gallium alloy (Galfenol) was investigated. Galfenol is an iron-based magnetostrictive material with the magnetostriction more than 200 ppm, high permeability  $\mu > 100$  and Young's modulus of 70 GPa. The material is machinable to free of the shape by conventional cutting process, and sustainable for tensile, bending, and impact. Micro actuator using Galfenol equipped with iron yoke and winding coil, therefore, has advantages over PZT type, in simple, low voltage driving, high robustness and wide temperature operation range. This paper describes the performance of a micro vibrator improved to our previous prototype, in configuration, material, and fabrication process. The vibrator using stress-annealed Galfenol machined to the rod of 1mm diameter was observed the displacement of 1.2 $\mu$ m, high bandwidth of 30 kHz and high tensile robustness withstanding suspended weight of 500g. The vibrator was also verified useful as speaker which can generate clear sound from the power of a portable music player.

**Key words:** micro magnetostrictive vibrator, Galfenol, stress-anneal

## Fe-Ga 合金 (Galfenol) を用いたマイクロ磁歪振動子

上野敏幸・Eric Summers\*・Marilyn Wun-Fogle\*\*・樋口俊郎

東京大学精密機械工学専攻, 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113-8656)

\*Etrema Products, Inc., 2500 North Loop Drive, Ames, IA 50010, USA

\*\* Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, 9500 MacArthur Boulevard, West Bethesda, MD 20817-5700, USA

### 1. はじめに

携帯電話やデジタルカメラといったモバイル機器の小型、軽量化に伴い、位置決めや振動子として使えるマイクロアクチュエータの需要が高まっている。これらは小型ながらも高い運動性、更には低電力消費で頑健、低コストなど、求められる要求は非常に高い。このような用途では現在、ボイスコイルや DC モータ等の電磁式が主流であるが、微小変位ながら大きな力を発生し、高い周波数で駆動できる圧電材料や超磁歪材料 (Terfenol-D) は、革新的なマイクロメカニズムを実現する機能性材料として従来から注目されている。実際に圧電素子をベースにしたスムーズインパクト駆動機構は、その高い周波数特性を利用し、小型ながらも低電圧、長ストローク、高速で動作するアクチュエータとして、カメラのレンズ駆動や手振れ補正機構で実用化されている<sup>1)</sup>。またこれら固体アクチュエータは、その高いエネルギー密度から、マイクロ超音波モータ<sup>2)</sup>、ポンプ、インジェクタ、スピーカといった多種多様な用途への利用が期待されている。

しかし、これら機能性材料のマイクロアクチュエータに関して、研究開発から実用化の間には大きな障壁があるのが実情である。それは脆性材料であるが故の低い加工性、頑健性に由来する。積層型圧電アクチュエータについては、小型化と共に、素子自体の作製が困難になると共に、これを共振や外力下で使用するならば、予圧機構を含めたアクチュエータの構成を考慮しなければならない。また超磁歪材料に関しては、実用上の形状限界は 2mm 程度で、予圧加える点で圧電材料と同様な問題がある。例えば、これらが研究室レベルでできたとしても、脆く壊れやすい材料の取り扱いには慎重を有し、その製作にかかるコストや手間が、多大な負担になることは筆者らの経験から知るところでもある。

これに対し、アメリカの海軍研究所で、Galfenol と呼ばれる磁歪材料が開発されている<sup>3),4)</sup>。これは鉄をベースにガリウムを含む

合金で、その大きな特徴は延性材料であること、つまり鉄と同様に、切削や研削等、あらゆる機械加工に耐え、かつ外力に対して非常に頑健であることである。また材料特性についても磁歪 200~300ppm、ヤング率 70GPa、比透磁率 100、キュリー温度 600°C 以上と、アクチュエータの機能として十分である。Galfenol を用いると圧電材料、超磁歪材料では難しい小型のアクチュエータが作製でき、更に、その優れた機械・材料特性を反映し、以下の点で大きな優位性を発揮する。

- 引っ張りや曲げ、衝撃等の外力に強い。
- 高い引っ張り強度から、高周波、共振駆動でも予圧は不要。構成が単純化され、作製も容易になる。
- 高い透磁率 (比透磁率~100) により、小さい起磁力で動作する。駆動電圧は数 V 程度である。
- 小型化で渦電流損失が低減、広いバンド幅を有する。
- 極低温から高温の幅広い温度で使用可能である。

我々は、以上の Galfenol の特徴をマイクロアクチュエータにおいて具現化、その実用性を検証すると共に、この材料の特徴を生かした革新的なマイクロメカニズムの創成を目的として研究を進めている。Galfenol には、優れた機械的特性から、ほとんどの機械加工が施せる。我々は、中でも超精密切削、つまり高剛性・高精度な位置決め下、小径エンドミルによる高速切削で形状加工を行っている<sup>5)</sup>。これにより  $\mu$ m オーダで高アスペクト比の形状が短時間で作製でき、切削面も良好、磁歪特性もほとんど劣化しない。実際、これまで 1~0.5mm 角、長さ 5mm のロッドを切り出すことに成功し、これをベースにした振動子で変位 100ppm 以上、共振周波数 20kHz 以上と、アクチュエータとして十分な性能を確認している<sup>6)</sup>。今回、我々は材料と構成の点で更なる改善を行い、より小型で高出力、頑健な振動子を作製した。ここでは丸力焼き鈍し処理<sup>7),8)</sup>の有り無しの Galfenol でその性能を比較することで作

製プロセスの妥当性を検証すると共に、変位やインピーダンスの周波数特性、引張力の負荷等による評価から振動子として実用性を述べたい。

## 2. 振動子の構成

Fig. 1 は作製した振動子、Fig. 2 はその構成である。振動子は、直径 1mm 長さ 5mm の Galfenol ( $\text{Fe}_{81.6}\text{Ga}_{18.4}$ ) のロッドにコイル (270T, 線径 40 $\mu\text{m}$ , 17 $\Omega$ ) を巻き、それを外径 2mm 内径 1.6mm の円筒ハウジング (45Permalloy) に収めたものである。Galfenol の両端には直径 2mm のエンドキャップ (45Permalloy) と、固定部 (鉄) が接合されており、これらはハウジングとあわせ閉磁路を構成する。よってコイルに電流を流すと、材料の長手方向に磁界が発生し、磁歪が生じる。また Fig. 3 のようにロッドと固定部、エンドキャップはスポット溶接で接合し、その結果、長手方向のかなりの引っ張りにも耐えられる。またハウジングの長手方向には 0.5mm 幅の溝を切り渦電流損失の低減化を図っている。本研究は、Galfenol のロッドを、フリースタンドゾーンメルト法で作製された直径 6.35mm の多結晶 (Research grade) <sup>9</sup> から切り出した。これをまずワイヤカットで 1mm 角のロッドに分割し、これから円柱への外径加工は超精密切削 (X, Y, Z 軸直進精度 0.1  $\mu\text{m}$ , 分解能 1nm, C 回転軸) により行った。

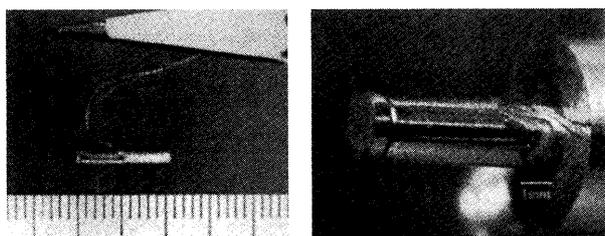


Fig. 1 Vibrator (left) and its fixed on brass fixture (right)

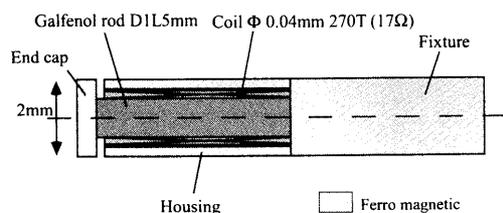


Fig. 2 Configuration of vibrator.

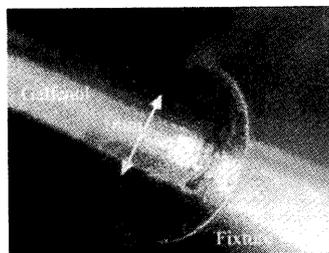


Fig. 3 Joint between Galfenol rod and fixture.

我々は、更なる性能の向上のため、応力焼き鈍し処理を施した Stress-annealed Galfenol<sup>7), 8)</sup> を利用した。これは引縮力下で焼き

鈍しを行うことで、材料自体に適度な予荷重を内蔵させたものである。よって処理なしに比べ、ゼロ予荷重下でも、応力異方性効果で、なしの場合の予荷重下と同等の磁歪が発生し、更に引っ張り下においてもその変位を維持する。この特性は、予荷重の負荷が難しく、共振駆動で、慣性力や衝撃が大きく作用するマイクロアクチュエータにおいて非常に有効である。我々は同一構成の振動子を処理ありとなしの Galfenol で作製し、その性能を比較することで、材料による改善、また組立過程における課題を検証した。

## 3. 性能評価

アクチュエータの性能は、主に変位の静・動特性、インピーダンスで評価される。Fig. 4 は変位測定の概略である。本研究では 2 度の測定を行った。1 度目は、ロッド単体の変位 (空芯コイル中)、2 度目は、振動子のコイルに電流を流した場合である。これは組立前後を比較することで、溶接やアライメントの影響を特定するためである。双方で、変位をレーザドップラー振動計 (小野測器 LV-1300, 応答周波数 100kHz 以上) で測定し、駆動は正弦波 100Hz とした。この時の電流は、発振器からの信号波形をバイポーラ電源 (高砂製作所, BPS120-5, 定電流モード ~20kHz) で増幅、それぞれコイル (空芯コイル, 振動子コイル) に負荷した。測定は端面の 5 点 (中心とその回り 4 点) に行った。これはその変位分布により変形の様子を確認するためである。この材料の結晶粒径はおおよそ 1.35mm で、ロッドは数個の結晶粒とその境界で出来ている。よってバルクの場合のような均一な変位が発生するとは限らず、サンプル毎にその変形の様子が異なる。

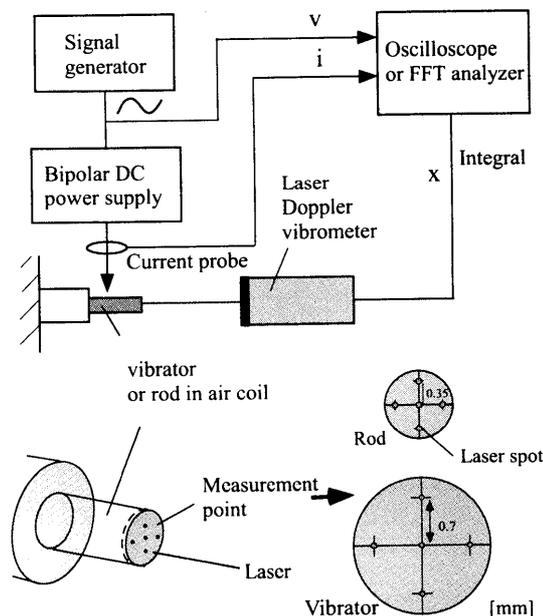


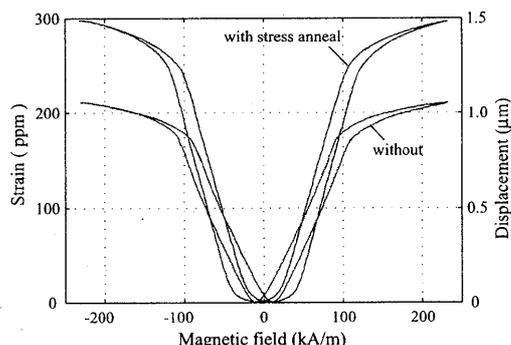
Fig. 4 Measurement apparatus.

Table 1 は 5 点の測定点の磁歪の最大値を、ロッドと振動子で比較した結果である。表中の (c) は中心で、その他、外周 4 点の測定位置については、ロッドと振動子で対応していない。今回、双方のサンプルとも比較的均一の変位を発生し、ほぼバルクと同等の磁歪を示した。

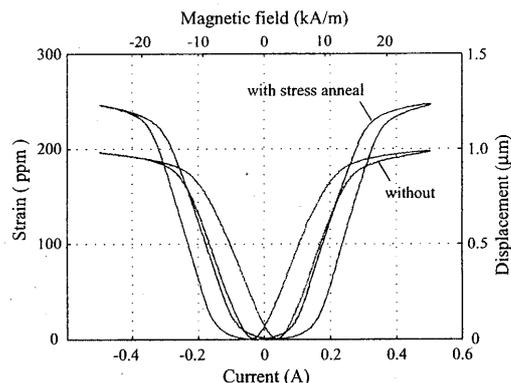
**Table 1** Comparison of strain distribution of rod and vibrator (ppm).

| Galfenol                    |         |     |     |     |     |
|-----------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|
| Rod                         | 210 (c) | 210 | 206 | 208 | 210 |
| Vibrator                    | 191(c)  | 180 | 217 | 208 | 173 |
| Galfenol with stress anneal |         |     |     |     |     |
| Rod                         | 299 (c) | 297 | 291 | 290 | 301 |
| Vibrator                    | 245 (c) | 234 | 261 | 256 | 230 |

そして Fig. 5, 6 はそれぞれ、ロッドと振動子で5点の磁歪曲線の平均を比較したものである。(Fig. 6の横軸(上)の磁界は、起磁力/コイル長で計算した。)熱処理なしの Galfenol の振動子においては、ロッドに比べ磁歪の減少は10ppm程度で、ほぼ組立前の特性が維持されていると言える。一方、処理有りの場合、応力異方性効果でロッドにおいておおよそ300ppmの磁歪があったが、振動子の段階でこれが50ppm程度減少した。熱処理効果は200°C以上の加熱で消失するもので、この減少は、Fig. 3にあるよう接合部付近が高温に加熱されたことで、異方性の効果が消失したことによると推測される。1 $\mu$ mの変位は実用に十分で、定格では0.3Aの電流が必要だが、実際の駆動は線形範囲の0.2A(0.34W)に限られ、これは更にバイアスの永久磁石を組み込むことで半分程度に減らすことが出来る。



**Fig. 5** Displacement of rod with magnetic field (frequency 100Hz, no pre-load).

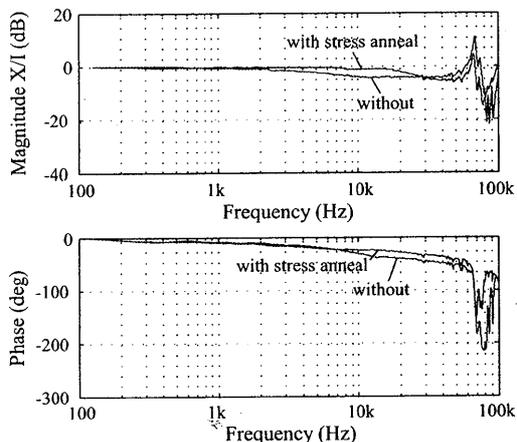


**Fig. 6** Displacement of vibrator with current (frequency 100Hz).

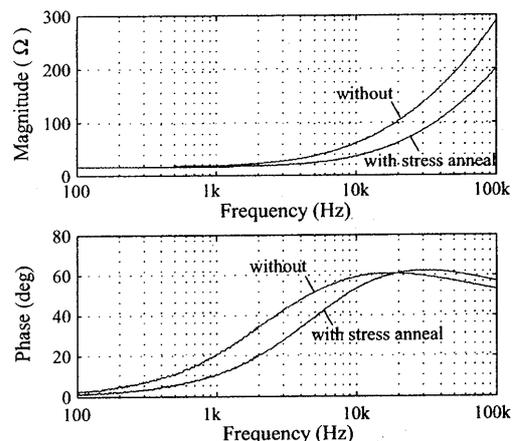
Fig. 5のロッドの透磁率が振動子に比べ低いのは、測定において反磁界の影響を受けるためである。Fig. 6とバルクの飽和磁束密度1.7Tから、ロッドの比透磁率は100程度と推測され、加工、組立

後も、その高い透磁率が維持されていることが確認できた。エンドキャップにはハウジングとの空隙で吸引力が発生するが、定格時の空隙中の磁束密度は0.3T程度で、それによる吸引力0.08Nは発生力10N(磁歪×ロッド断面積×ヤング率70GPa)に対して無視できる大きさである。

Fig. 7は電流(起磁力)に対する変位の周波数応答をFFTアナライザ(小野測器, CF5210)により測定した結果である。電流は電流プローブ(Tektronix, AM503A, 周波数帯域DC~15MHz)で測定した。70kHz付近に1次の縦共振、バンド幅としては30kHz以上が確認できた。この構成では、10kHz程度まで渦電流損がほとんど無視できる。Fig. 8はインピーダンスの測定結果で、遮断周波数は、透磁率の低い処理有りの場合が高くなった。(5kHzまでのフラットな特性はスピーカ等の用途に十分である。)電圧駆動(後述する小型電源)による応答性はFig. 7と8の掛け合わせになり、現在の構成ではインダクタンスが支配的で、それにはコイルの巻数と磁気抵抗が関係する。今回の試作では、限られた体積で起磁力をかせぐため、細径の導線を多層巻きにした結果インダクタンスが大きくなったが、これは使用条件に応じて適切なコイル径、巻数、磁気回路を選択することで程度改善できる。



**Fig. 7** Frequency response of displacement against current.



**Fig. 8** Frequency response of impedance. (Voltage against current).

Fig. 9は、振動子に糸で500gの錘をつり下げた時の様子である。この時、Galfenolには引っ張り力(平均で6MPa程度の応力)が加わっていたが壊れることはなく変位を発生した。また振動子をFig. 10のようにスピーカとして使ってみた。入力には携帯型デジタル音楽プレーヤ(アップル社, iPod nano®)のイヤホンジャックから取り、音は振動子を磁石を介し鉄板に吸着させ、その振動で発生させた。この時、コイルには数mAの電流しか流れなかったが、十分に音楽を聞くことが出来た。実際にこのようなスピーカは圧電材料や超磁歪材料で構成することも可能で、既にいくつか市販されているものもある<sup>10)</sup>。ただGalfenolを用いると従来よりも、より小型なものが構成でき、別途電源を用意することなく駆動できる。また著者の所見では、圧電材料に比べ、コイル駆動でインピーダンス特性がイヤフォンのそれに近い磁歪アクチュエータの方が、携帯プレーヤの特性を十分活用できると考えている。(圧電アクチュエータのインピーダンスは容量性で、一般に低周波の音の出力には不向きである。)このスピーカとしての性能評価は今後、圧電材料や超磁歪材料との比較と共に詳細に行いたいと考えている。このデモにあるよう小型電源で駆動できるGalfenol振動子は、携帯機器で駆動可能な点でその汎用性は非常に高く、様々な用途において高い実用性が期待できると思われる。

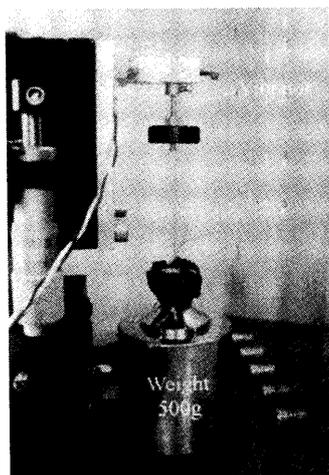


Fig.9 Actuator was hanged weight of 500g.

#### 4 まとめ

我々は、鉄ガリウム合金(Galfenol)を用いたマイクロ振動子において変位1.2 $\mu\text{m}$ 、バンド幅30kHzと実用上十分利用できる性能を確認した。ここで述べた結果は、小型化でバルクと同様の優れた変位特性が維持される、渦電流の減少でバンド幅が向上するマイクロ化の特徴、更にはGalfenolの優れた機械的(高い引っ張り強度)、磁氣的(低起磁力駆動)特徴を実用可能なアクチュエータで実証したものである。熱処理により応力異方性効果を有した材料は小型化において、更にはその機能性を発揮する可能性がある。本アクチュエータは、変位においては超磁歪材料や積層圧電アクチュエータに及ばないが、外力に対する高い耐久性、低電圧で駆動が可能な点で、大きな将来性が期待できる。我々は、今後、機

構や磁気回路、組立過程を再検討し、より小型で単純、低消費電力で駆動可能なアクチュエータを作製するとともに、その実用性をスピーカ、インジェクタ、ポンプ等で実証したい。またこの材料の特徴を有効に生かした駆動メカニズムを考案し、Galfenolのマイクロアクチュエータの可能性を追求したいと考えている。

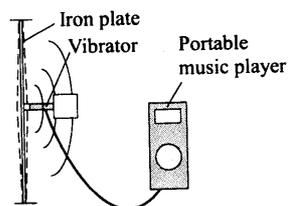
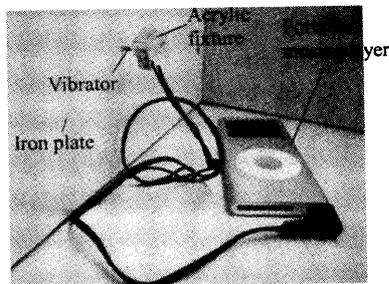


Fig.10 Actuator was used as speaker. Iron plate vibrated by the actuator attached can generate sound.

**謝辞** 本研究は、NICOP (ONR スポンサー Jan Lindberg氏)、文部科学省特定領域研究438「アクチュエータ」の研究助成を受けて行われた。またGalfenolのサンプルはエトリーマ社より提供頂いた。ここに感謝の意を表します。

#### References

- 1) R. Yoshida, Y. Okamoto, and H. Okada, *J. Jpn. Soc. Precision Eng.*, **68**, 536-542 (2002).
- 2) T. Kanda, A. Makino, T. Ono, K. Suzumori, T. Morita and M. Kurosawa, *Sen. and Act. A*, **127**, 131-138 (2006).
- 3) A. E. Clark, M. Wun-Fogle, and J. B. Restorff, *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 3238-3240 (2000).
- 4) A. E. Clark, M. Wun-Fogle, and J. B. Restorff, *Mat. Trans.*, **43**, 881-886 (2002).
- 5) T. Ueno, E. Summers, and T. Higuchi, *Sen. and Act. A*. To be published.
- 6) T. Ueno, E. Summers, and T. Higuchi, *Conf. Proc. of the 10th international conference on new actuator*, 410-413 (2006).
- 7) J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, A. E. Clark, and K. B. Hathaway, *IEEE, Trans. Magn.*, **42**, 3087-3089 (2006).
- 8) M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, and A. E. Clark, *IEEE, Trans. Magn.*, **42**, 3120-3122 (2006).
- 9) E. Summers, T. A. Lograsso, J. D. Snodgrass, and J. Slaughter, *Proc SPIE Smt. Str. and Mat.*, **5387**, 448-459 (2004).
- 10) <http://www.tmac.tdk.co.jp/speaker/index.htm>

2007年3月9日受理, 2007年4月4日再受理, 2007年5月16日採録