

## 磁歪材料を用いた機能性イヤフォンの開発

## Development of Functional Earphone using Magnetostrictive Material

上野 敏幸<sup>\*1</sup> (正員), 三浦 英充<sup>\*2</sup>, 山田 外史<sup>\*1</sup> (正員)

Toshiyuki UENO (Mem.), Hidemitsu MIURA, Sotoshi YAMADA (Mem.)

In daily life, we often use earphone to listen sound and music. However kanal type earphone like earplug shape shuts off the sound of surroundings, thus, is not preferable to use in jogging or driving. Bone conductive speaker is alternative to hear sound from surroundings and player simultaneously. However conventional ones based on piezoelectric material or voice coil are large size, difficult to equip, and amplifier necessary due to the low output force. Here, we propose functional earphone using magnetostrictive vibrator. The device consists of magnetostrictive rod (Galfenol) and magnetic yoke constructing unimorph structure, winding coil, bias magnet and vibration plate. The ring shape vibrator with hole to pass air-conductive sound is easy to equip on ear hole and can generate sufficient sound without additional amplifier. In this study, we fabricate several prototypes to evaluate static and dynamic characteristics to verify the principle and advantages.

**Keywords:** magnetostrictive material, Galfenol, cylindrical, earphone, bending vibrator.

## 1 緒言

最近のイヤフォンは耳栓の形をしたカナル型が主流で、装着感がよく音質にも優れる。しかし耳穴を塞ぐイヤフォンは、周囲の音声情報を遮断することから、その利用には注意が必要である。例えばジョギングや運転中の利用は危険である。また工事や災害救助の現場では、周囲の状況に気を配り、同時に無線機からの音声指示を受ける。この用途に耳穴を塞ぐイヤフォンは不適である。気導を介さず音声が開けるデバイスに骨伝導スピーカがある。しかし現状、圧電素子[1, 2]やボイスコイルを利用するタイプは、出力が低く、ヘッドセットやアンプが必要で、取り回しが不便にて、それほど普及は進んでいない。

我々は、耳穴に装着し、周囲音と再生音を同時に聞くことができる機能性イヤフォンを提案する。これは磁歪材料を用いた小型振動子で音声を出力するものである。デバイスに使用する鉄ガリウム合金[3, 4]は、堅牢で加工性が良く、大きな発生力と高い応答性を有する材料で、この用途に適する。本論文では、デバイスの動作と特徴が、試作機の振動特性や実装評価にて確認されたので報告する。

## 2 構造と原理

イヤフォンの構造を Fig. 1 に示す。これは角柱の磁歪素子 (Fe-Ga 合金, 以下, 素子と略), ヨーク, コイル, バイアス磁石, 振動板で構成される。ヨークは中央の角柱に半円弧状のリングがついた H 型構造で, これらは一体の部品で成形されている。変位の発生する原理を説明する。コイルが巻かれた素子は, 空隙を隔て中央の角柱ヨークと平行に並び, その両端がヨークに接合された平行梁を構成する。Fig. 2 右のようにコイルに電流を流し素子を励磁すると, 素子は磁歪効果で長手方向に伸びようとし, これが平行するヨークで拘束されることで, 屈曲変形を生じる。つまり平行梁で素子の伸縮は曲げ変形に変換される。ヨークのリング外側には弾性体でできた半円筒の薄い振動板が接合し, この板の振動が音を発生する。

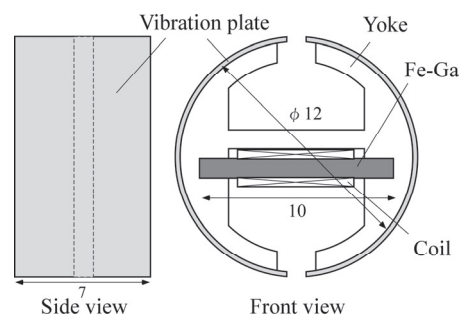


Fig. 1 Configuration of earphone.

連絡先: 上野 敏幸, 〒920-1192 石川県金沢市角間町,  
金沢大学理工研究域電子情報学系,  
e-mail: ueno@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

<sup>\*1</sup> 金沢大学, <sup>\*2</sup> (株) エイチアンドエフ

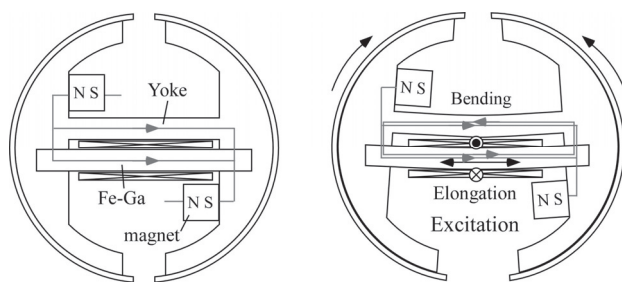


Fig. 2 Principle, bias (left) and excited (right).

このイヤフォンは、耳穴に装着できるほど小型で、再生音と同時に、ヨーク隙間から周囲音も聞くことができる。また素子とヨークが鉄系の材料で、一体の構造体として強固に形成されるため堅牢である。これより装着時、耳に押し込んでも破損することなく、しっかりと固定され、素子の伸縮が低損失で振動板に伝導する。コイルの励磁に高電圧を必要としないのもメリットである。市販の携帯音楽プレーヤを音源とし、アンプなしでデバイスを駆動できる。

設計方針と試作したデバイスを説明する。音の出力は変位に比例し、周波数特性は共振特性に依存する。スピーカとして利用できるには、十分な変位と適度な共振周波数（数百～数 kHz）が必要である。一般に磁歪振動子には、伸縮型と屈曲型がある。前者は高い共振周波数を有し、発生力が大きく変位が小さい。一方、後者は低い共振周波数で、発生力が小さく変位が大きい。本研究では、まず耳穴のサイズから許容できる磁歪素子の長さ（10 mm 以下）を設定し、屈曲型が条件を満たす変位と共振周波数を与え、これを基本に振動子の設計を行った。

またクリアな音声出力のために、電圧と変位の関係が線形であることが望ましい。一般に磁歪素子の励磁電流（磁界）と変位の関係はバタフライ曲線である。非線形の動作は出力波形を歪ませ、これはノイズの要因にもなる。そこで磁石を取り付け、動作点がバタフライ曲線の線形領域になるよう素子に磁気バイアスを付与した(Fig. 2)。このバイアスで、電流ゼロで素子は適度（飽和磁歪の半分程度）に伸びており、正負の電圧（電流）に比例し、正負の変位が発生する。またヨークと素子は閉磁気回路を構成し、小さい電流で素子を励磁できる。以上、平行梁を構成し屈曲変形に寄与する、また適度なバイアス磁束を通し磁気回路の役割を果たすヨークは、適度なヤング率と透磁率を有した材料を用い、その形状を設計する必要がある。

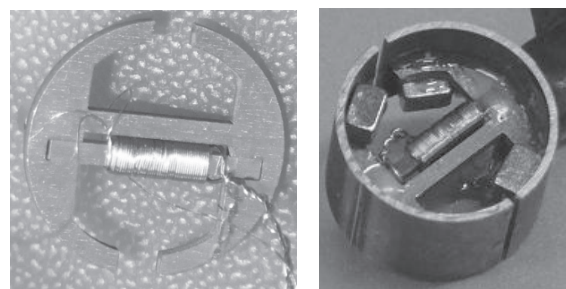


Fig. 3 Vibration element (left) and device (right).

本研究では、直径を耳穴に入る 13 mm を上限とし、構成要素の材質と寸法を決定した。鉄ガリウム合金 ( $\text{Fe}_{81.6}\text{Ga}_{18.4}$ 、応力焼き鈍し処理[5]) の磁歪素子の形状は 1 mm 角 10 mm 長（両端の 1 mm は接合部）とした。H 型ヨークの外径は 12 mm、厚さは 1 mm で、材質は SUS430（ヤング率：200 GPa、比透磁率：200）、中央のヨークの平行梁部は長さ 8 mm 幅 1 mm、素子との間隔を 0.5 mm とした。またヨークに付く半円筒の振動板(SUS304)は直径 13 mm 厚さ 0.5 mm 長さ 7 mm とした。励磁コイルは、線径 0.07 mm、層厚 0.5 mm、167 ターン、10  $\Omega$  とした。バイアス磁石には、 $2 \times 3 \times 2$  mm（着磁方向）の Nd-Fe-B 磁石 4 個（片側 2 個ずつ）を用いた。部品の接合はエポキシ系接着剤で行った。以上の構成で Fig. 3 の写真のようにデバイスを組み上げた。左は素子とヨーク、コイルからなる振動子、右はこれにバイアス磁石と、振動板を取り付けたデバイスである。

### 3 試作評価

#### 3.1 振動特性の測定

デバイスの振動変位と周波数応答を測定した。測定系を Fig. 4 に示す。ファンクションジェネレータ (WF4915, NF 回路) の信号電圧を、バイポーラ電源 (BPS120-5, 周波数帯域 DC～20 kHz、高砂製作所) の定電流モード(1A / 1V)で増幅した電流にてコイルを励磁した。またデバイスは片端のみを治具に固定した片持ち条件にて振動させた。可動端の変位は、貼付けた反射ターゲットにて、レーザードップラー振動計 (LV-1710, 周波数帯域 20 kHz 以上、小野測器) にて計測した。また励磁電流は電流プローブ(AM503B, Tektronix)で計測した。計測信号はオシロスコープ (DL1740, 横河電機) と FFT アナライザ (CF5220, 小野測器) に取り込み、データ処理を行った。

本研究では、平行梁をパラメータした 3 タイプのデ

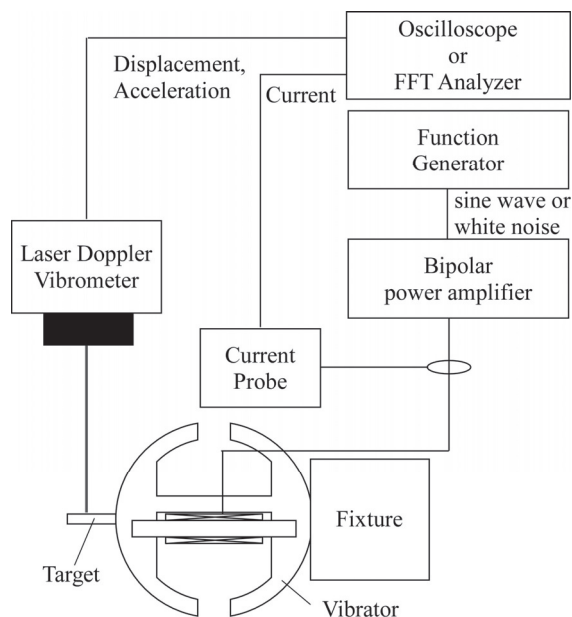


Fig. 4 Measurement setup.

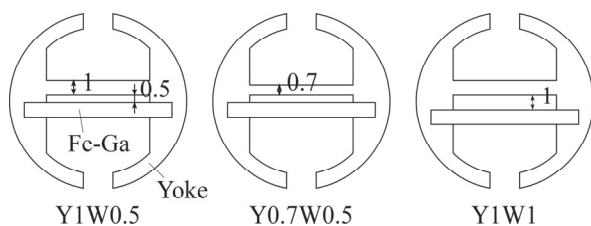


Fig. 5 Structure of vibration elements.

バイスを比較することで、振動特性がどの程度変化するか検証した。形状を Fig. 5 に示す。これらは、前述のヨーク幅 1 mm、空隙幅 0.5 mm (Y1W0.5 とする) を基準に、ヨーク幅を 0.7 mm に減少した Y0.7W0.5、空隙幅を 1 mm に増加した Y1W1 である。ヨーク幅と空隙は、平行梁の断面 2 次モーメントひいては振動子のバネ定数  $k$  に影響する。Y0.7W0.5 は Y1W0.5 に比べ  $k$  が小さくなることで、変位は大きく、共振周波数は低くなる。一方、Y1W1 は逆に  $k$  が大きくなることで、変位は小さく、共振周波数は高くなると予想される。

電流と変位の関係を測定した結果を Fig. 6 に示す。この測定では 10 Hz (準静的) の正弦波電流でコイルを励磁した。まず基準の Y1W0.5 にて、正負の電流で正負の変位が発生する線形動作、および  $8.3 \mu\text{m}$  の振幅を確認した。また線形動作の定格電流はおおよそ  $\pm 0.2 \text{ A}$  ( $2 \text{ V}$ ) であった。そして Y0.7W0.5 で振幅が  $11 \mu\text{m}$  と 1.38 倍に、Y1W1 で振幅が  $6.5 \mu\text{m}$  と 0.78 倍になった。以上、平行梁の寸法にて変位の調整が可能なが確認

認できた。

次に動特性として、デバイスを可聴域の周波数帯 (20 Hz ~ 20 kHz) で駆動した時の変位および電気インピーダンスの周波数応答を測定した。この時、ホワイトノイズの電流でコイルを励磁した。測定結果を Fig. 7 に示す。図中の振幅、位相の値は、それぞれ 20 Hz の値を 0 dB, 0 deg とし、正規化している。Y1W0.5 の 1 次共振周波数  $f_r$  は約 2.2 kHz で、Y0.7W0.5 もほぼ同程度であった。一方、Y1W1 は  $f_r$  が 3.0 kHz と高くなった。Y0.7W0.5 の  $f_r$  がさほど変化しないのは、 $k$  の減少による効果と逆に、平行梁の軽量化が  $f_r$  を増加させたと思われる。振幅の応答は共振周波数まではほぼ平坦で、渦電流損失による変位の低減や遅れは、可聴域ではほぼ無視できると考えられる。

インピーダンスの応答は、カットオフ周波数 1 kHz 以上にて、インダクタンス成分が支配的になり 20 dB / dec で振幅が増加、位相が進む。電圧駆動の変位応答は、これら変位/電流と電流/電圧 (アドミタンス) 応

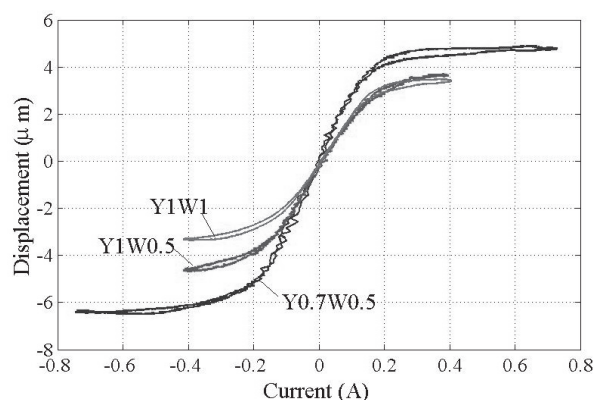


Fig. 6 Comparison of displacement vs. current.

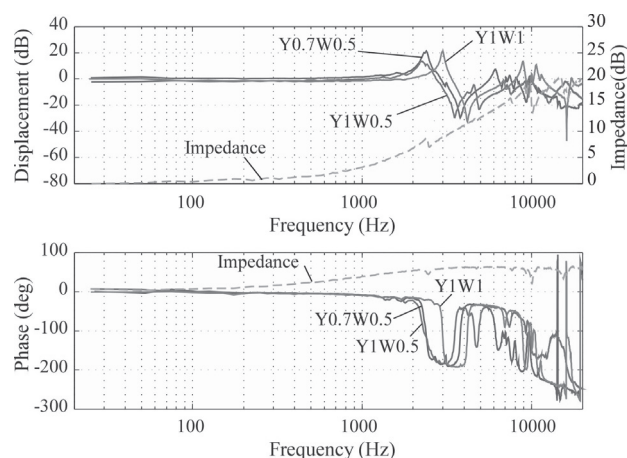


Fig. 7 Comparison of frequency response of displacement, and impedance.



答の積で与えられる。低周波数域の変位は、準静的と同じ値で低減と遅れなしに追従すると考えられる。

### 3.2 実装評価

デバイスを装着し、音がどのように知覚できるか検証した[6]。評価の概要を Fig. 8 に示す。22 歳から 24 歳の男性 3 名の被験者において、一定周波数の正弦波電圧で励振し、音が認識できる最小の電圧振幅を計測した。評価は、デバイス(Y1W0.5)を耳穴の入り口に置く(Putting)、深く押し込む(Fitting)、リングにシリコンゴムを取り付け押し込む(Fitting with silicon)場合の 3 通りの装着条件で行った。Fig. 9 は結果で、各測定値は実線の間でばらつき、マーカはその平均値である。値が小さいほど感度よく聞こえることを意味する。デバイスが発生する音は、入り口付近に置いた場合でも知覚でき、また 400 Hz 以上においては、押し込んだ場合の方が、全体的に電圧値が小さく、そのばらつき幅も小さくなった。

更にシリコンを取り付けると、電圧はより小さくなり、0.3 V 程度あれば全ての周波数で音を知覚できることがわかった。この場合、一部は外耳軟骨を伝導する

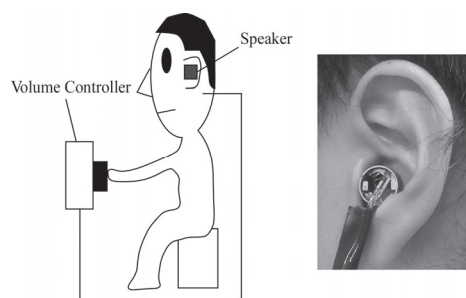


Fig. 8 Evaluation method.

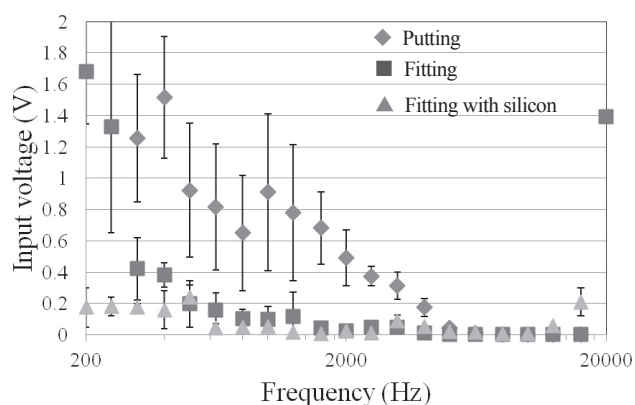


Fig. 9 Comparison of minimum voltage to percept sound by mounting methods.

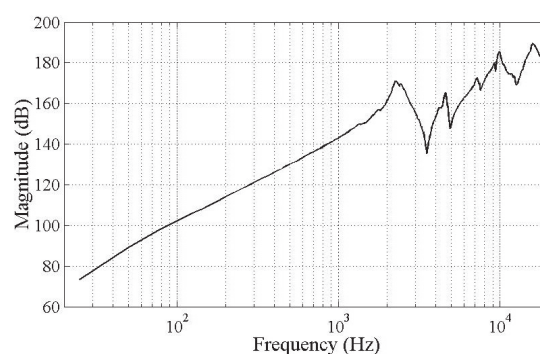


Fig. 10 Vibration acceleration vs. frequency.

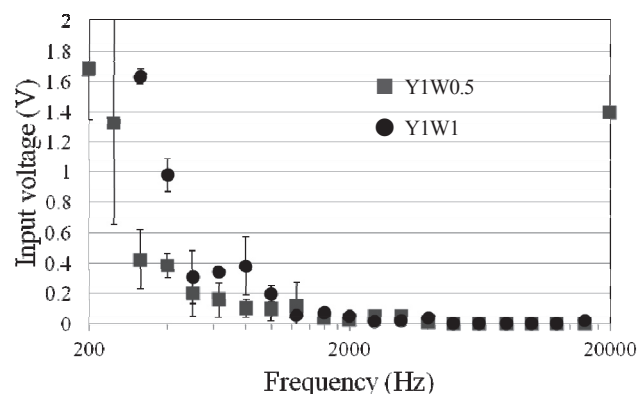


Fig. 11 Comparison of minimum voltage to percept sound by structure.

骨導音でも知覚されていると思われる。なお Fig. 10 に示す振動加速度レベルは、可聴域全域において人が振動を感知する閾値 60 dB 以上[6]で、つまりこのデバイスは、骨伝導スピーカとして利用できる振動特性も有している。

Fig. 11 は、同様な評価を振動子の形状 Y1W0.5 と Y1W1 で行い、比較した結果（押しつけた場合）である。1 kHz 以下では Y1W0.5 の電圧が小さく、これは Fig. 6 に示す振動変位の大小が反映された結果と思われる。概して発生する振動音は高周波で感度よく知覚され、共振周波数の差は、さほど感じ方に影響しないようであった。

### 3.3 カナル型イヤフォンの製作

以上のデバイスは、リングを含めた外径が 13 mm で、これを耳穴に押し込んで装着するには、若干サイズが大きい。本研究では、振動板を 2 段構成にし、カナル型イヤフォンのように外径が小さい 1 段目に柔軟なシリコンキャップを被せ、装着感と聞こえ方の向上を試みた。Fig. 12 は製作したイヤフォンの写真である。半円筒の振動板は、キャップが被さる 1 段目が外径 6



Fig. 12 Canal type bone conductive earphone.

mm (内径 5 mm), 長さ 5 mm, 内側に振動子が付く 2 段目を外径 13mm (内径 12 mm) 長さ 8 mm とし, アルミ製の一体部品で形成した。このデバイスを 2 個製作し, コイルにはイヤフンプラグを端子としたリード線を接続した。これを携帯音楽再生装置 (ipod nano, Apple 社製) のイヤフォン端子に直接接続し, ステレオ出力にて音楽を再生したところ, 明瞭な音声を聞くことができた。低音域はやや小さいものの, 高音域の音量は十分で, 際立ったノイズや歪みもなかった。Fig. 7 のように, 高音域はインピーダンスの増加にて電流は小さくなるが, 共振で変位が増加し, また耳元に配置することによる高い感度が良好な聞こえに寄与していると考えられる。そして, このイヤフンプの特徴である周囲音も明瞭に聞くことができた。以上, 2 段構成でも振動板が適度な弾性を有し, また振動子に隙間があれば, 周囲音と再生音を同時に聞ける機能性が達成できる。更に, このイヤフンプは個人の耳穴に合わせ振動板の形状を変えるなど, 自由度の高いデバイス構成も可能である。

#### 4 結言

磁歪材料を用いた機能性イヤフンプを提案し, その試作と評価を行った。Fe-Ga合金の磁歪素子とヨークの平行梁を基本にした耳穴に装着できるデバイスにて音声出力に十分な振動特性を確認した。結果, このデバイスの特徴である, 簡単な装着かつアンプ不要で, 周囲音と再生音を同時に聞ける機能性が実現できた。デバイスは更なる小型化も可能で, 振動板の形状を耳穴に合わせ, またシリコンなどの柔軟体で被うことで, 装着感や聞こえ方も向上する。このイヤフンプは, 通勤や運動, 飲食店や工事現場など様々な場面で利便性を発揮する。周囲音と振動音を融合させた音場空間の

構築や情報提示も可能である。またこのデバイスは構造が単純で組み立てが容易, 価格も安くできることから, 汎用性もある。本研究では, デバイスの更なる小型化と性能向上にて早期の実用化を目指す予定である。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり, 金沢大学 三好正人氏から貴重な助言を頂きました。心より感謝いたします。

(2012年10月5日受付, 2013年2月9日再受付)

#### 参考文献

- [1] 佐々木, 鈴木, 井坂, 圧電振動子による骨伝導スピーカの開発, 日本機械学会東北支部第 41 期秋季講演会講演論文集, 2005.
- [2] 鷹島, 阿部, 田村, 圧電式骨伝導スピーカの振動漏れ制御について, NEC TOKIN Technical Review, Vol. 32, 2005.
- [3] A. E. Clark, M. Wun-Fogle, and J. B. Restorff, Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, pp. 3238-3240, 2000.
- [4] T. Ueno, T. Higuchi, E. Summers, M. Wun-Fogle, Micro-magnetostrictive vibrator using iron-gallium alloy, *Sensors and Actuators A*, Vol. 148, pp. 280-284, 2008.
- [5] A. E. Clark, M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, Magnetostrictive property of Galfenol alloys under compressive stress, *Mater. Trans.*, Vol. 43, pp. 881-886, 2002.
- [6] 渡辺, 鈴木, 骨伝導による音響信号生成に関する基礎検討, 電子情報通信学会技術研究報告, EA, 応用音響, Vol. 105, pp. 19-24, 2005.