

# 超磁歪材料の材料開発と応用の動向

## Trends in the Development of Giant Magnetostrictive Materials and Their Applications

脇若弘之・山田洋次 信州大学

H. Wakiwaka and Y. Yamada, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553

A giant magnetostrictive material (GMM) whose saturated magnetostriction is 1000 ppm or more at room temperature was reported in the 1970s. This material, Terfenol-D, was commercialized late in the 1980s, and many applications have been since been reported.

The first part of this paper describes the fundamental characteristic of GMMs and surveys recent trends in the development of the materials and examples of their applications.

Next, the types and characteristics of thin-film materials such as SmFe thin films and both multilayer and single-layer films of TbFe are described as concrete examples of material development. The application examples are mainly bulk materials. Finally, as examples of successful applications, the paper introduces actuators such as a vibrator and a brake using GMM, and sensors such as a force sensor and a torque sensor.

**Key words:** giant magnetostrictive material, actuator, sensor, application

### 1. はじめに

磁歪現象が発見されたのは、19世紀中頃であり、決して新しいものではない。強磁性体の磁歪効果は、音響変換器への応用を目的として、Ni, パーマロイ系合金、フェライトなどの磁歪材料が振動子材料として当初用いられたが、現在では、PZTなどの圧電材料がそれらの主役の座を占めるに至っている。これらの磁歪材料が主役の座を追われた主要因としては、磁気ひずみが0.001% (10 ppm)と小さく、応用の範囲に限度があることで、以後、巨大磁歪をもつ強磁性体を見いだすことが課題となっていた。そして、近年、極低温において、重希土類金属であるTb, Dy単結晶の巨大磁歪が見いだされ、その後、室温においてTbFeのような金属間化合物において、0.1~0.2% (1000~2000 ppm)の巨大磁歪を示す超磁歪現象を示す材料が見いだされた。しかし、このTbFeは結晶磁気異方性が大きく、低磁界で動作させるための軟磁性化が求められた。このためTbFe<sub>2</sub>-DyFe<sub>2</sub>擬二元系の磁気異方性競合を利用

して室温領域で異方性エネルギーが最小になるような割合のTbFe<sub>2</sub>とDyFe<sub>2</sub>を混晶にする考えが生まれた。その結果、1973年に、磁気異方性を最小にして巨大磁歪をもたせた材料Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub>系超磁歪材料が開発された。

超磁歪材料 (Giant Magnetostrictive Material, 以下GMMと略記) は、室温で1000 ppm以上の飽和磁歪をもつ材料が商品化され (例えば、Terfenol-D)、それ以来、いろいろな用途への応用が試みられてきた<sup>1), 2)</sup>。

ここでは、最初に超磁歪材料の基本的特性を説明し、材料開発と応用例について国内外の最近の動向を概観する。具体例として、材料開発では、TbFeの単層膜のほかに、SmFe薄膜、多層膜などの薄膜材料の種類と特性について解説する。応用例では、おもにバルク材について述べ、アクチュエータとして、振動子、超磁歪ブレーキへの応用例、センサとして力センサへの応用例などを取り上げ解説する。

### 2. 超磁歪材料の特性

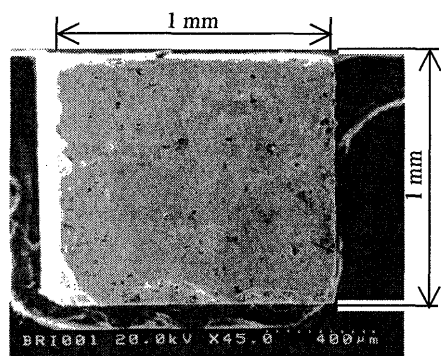
超磁歪材料として現在の主流は、TbFe<sub>2</sub>のラーベス化合物をベースにした材料であるが、これら以外の新規磁歪材料の探索も行われている<sup>3)</sup>。ここではTbFe<sub>2</sub>ラーベス化合物系超磁歪材料のバルク材、薄膜材の特性について述べる。

#### 2.1 超磁歪材料の基本特性

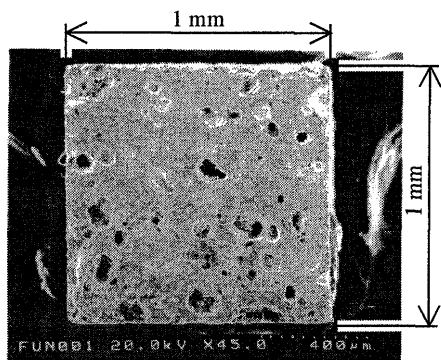
**2.1.1 超磁歪材料の製法** 超磁歪材料は、希土類金属であるTbやDyを含む合金であり、Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub>の合金が一般的である。また、代表的な製法には、ブリッジマン法と粉末冶金法がある。ブリッジマン法は原材料を溶解成形後、熱処理を施して結晶を成長させる方法であり、加工コストが高い。それに比べ粉末冶金法は、原材料を粉碎し、磁場中形成後焼結するため、加工コストが安く、圧縮成形のため多様な形状の製造が可能である。Table 1に超磁歪材料の製法の手順を示した。Fig. 1に走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて撮影した超磁歪材料の断面を示した。粉末冶金材は、圧縮成形のためFig. 1のように果が点在する断面となっているが、最近では、プロセスの改良により、密度が約97%以上に向上し、果も小さくなっている。

**Table 1** Comparison of GMM manufacturing processes

| Item                    | Bridgeman method                                                                                                                                         | Powder metallurgy method                                                                                           |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Refer to the manuscript | First, the raw material is melted, and next it is formed. Then, the crystalline material is grown in the Bridgeman furnace with temperature inclination. | First, the raw crystal grains are powdered to single-crystal size. Then, they are sintered in an argon atmosphere. |



(a) Bridgeman crystal growth method

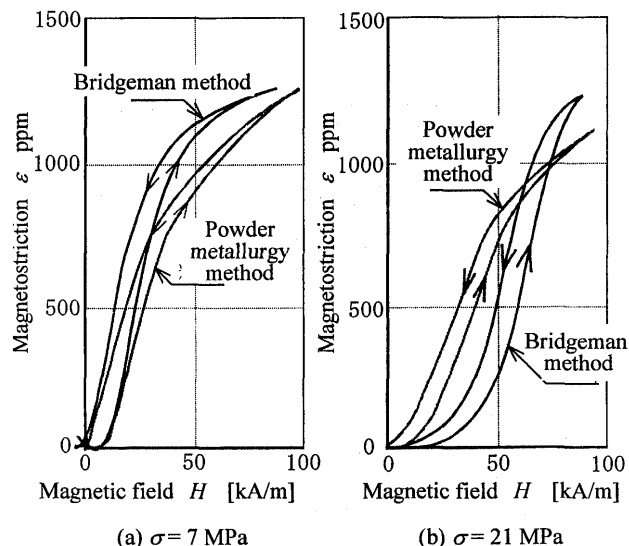


(b) Powder metallurgy method

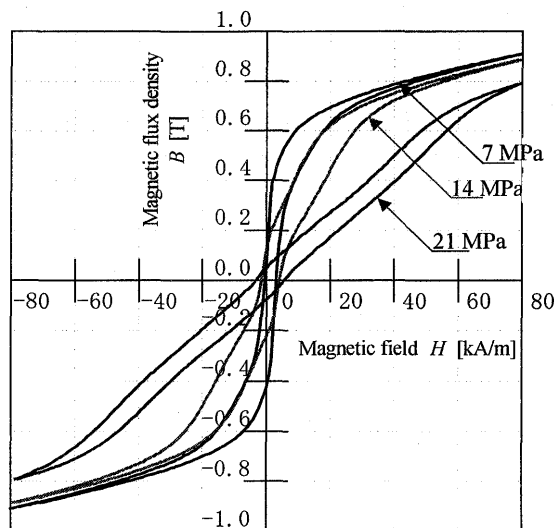
**Fig. 1** Cross-sections of bulk alloys.

**2.1.2 磁気・磁歪特性** Fig. 2 にブリッジマン材と粉末冶金材の磁歪特性を示した。一般的にプリストレスが大きくなるに従い、ひずみ線形領域は高磁界にシフトする。ブリッジマン材はこの傾向が強く見られるが、粉末冶金材は、プリストレスの増大に伴うひずみ線形領域のシフトが少ないことがわかる。しかし、ひずみの直線性が確保される領域および飽和磁気ひずみはブリッジマン材の方が大きくなる。また、Fig. 3 にプリストレスによる磁化特性を比較した。プリストレスを大きくすることで低磁界における透磁率が低下することがわかる。

材料の能力の評価として、電気機械結合係数  $k_{33}$  が用いられる。これは、入力される電気エネルギー  $U_{in}$  によって出力される機械エネルギー  $U_0$  の割合である。超磁歪材料における電気機械結合係数  $k_{33}$  は、三つの材料定数 ( $d$  定数、透



**Fig. 2** Magnetostriction characteristics according to the manufacturing method.



**Fig. 3** Magnetization characteristics according to the prestress.

磁率、弾性率) によって式 (1) で与えられる。

$$k_{33}^2 = \frac{U_0}{U_m} = \frac{d_{33}^2}{\mu_{33}s_{33}} \quad (1)$$

$k_{33}$ : 結合係数  
 $d_{33}$ :  $d$  定数 [m/A]  
 $\mu_{33}$ : 透磁率 [H/m]  
 $s_{33}$ : 弾性率 [ $\text{Pa}^{-1}$ ]

Fig. 4 にブリッジマン材の電気機械結合係数を示した。超磁歪材をアクチュエータ、センサとして用いるとき、電気機械結合係数の大きいことが必要である。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% 以上の値になるが、最適条件下以外では大幅に低下し、30~40% となる。アクチュエータお

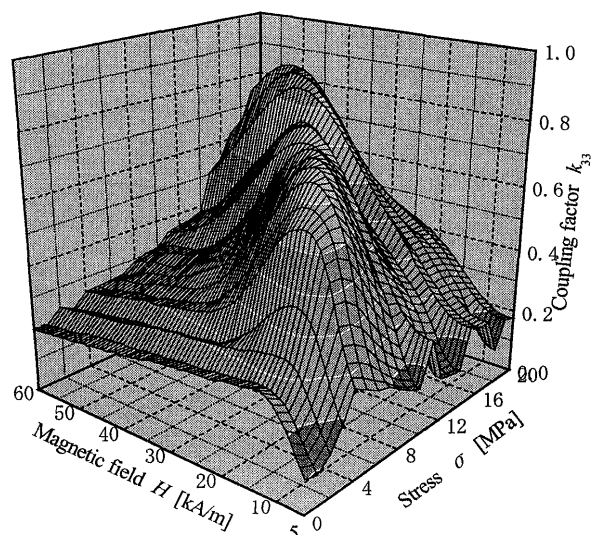


Fig. 4 Electro-mechanical coupling factor in the bridgeman method.

よびセンサとして利用する場合、この電気機械結合係数の最も高い部分を駆動点とすることが望ましい。そのため、超磁歪材料を効率良く駆動させるためには、磁気回路設計において最適な磁気バイアス設定が必要不可欠となってくる。

**2.1.3 機械的特性** 超磁歪材料に関する基礎材料研究やデバイス開発において機械的特性は重要な要素である。Fig. 5 にヤング率の応力依存性を示す<sup>4)</sup>。応力 0 付近において弾性率が両材料で 20~30 GPa の値を示す。また、 $\Delta E$  効果により、200~300 MPa 以下の低応力域でのヤング率は増加する。ヤング率の応力に対する増加は、両材料で異なりブリッジマン材では約 300 MPa、粉末冶金材では約 200 MPa 以上でほぼ一定となる。ブリッジマン材と粉末冶金材とでは組織の異方性などに違いがあるが、高応力域でのヤング率の違いは、Fig. 1 の表面観察からわかるように、主として気孔率の違いによるものである。一般的に用いるブリストレス値 (7 MPa) 付近の応力下において、ブリッジマン材と粉末冶金材のヤング率は異なるため、デバイスを構成するとき、ブリストレス値の最高値は両材料で異なった値になる。また、両材料では共に破壊直前の応力ではヤング率の低下が見られるが、一般材料と同様に破壊直前に起こるクラックの発生によるものと考えられる。

次に Fig. 6 に粉末冶金材における圧縮疲労強度の S-N 曲線を示した。疲労強度試験機により、応力比  $R=0.1$ 、繰り返し周波数  $f=110$  Hz で実験した結果であり、黒丸は試料が破壊し、白丸は破壊せず継続中を表している。データは応力 340 MPa、 $10^3$  回付近に折れ点が存在することを示し、疲労限度を確認することができる。また、破壊の大部分が  $10^4$  回以下の少ない回数で生じている。この点は一般のセラミックス材料とは異なる。疲労限度は 340 MPa で

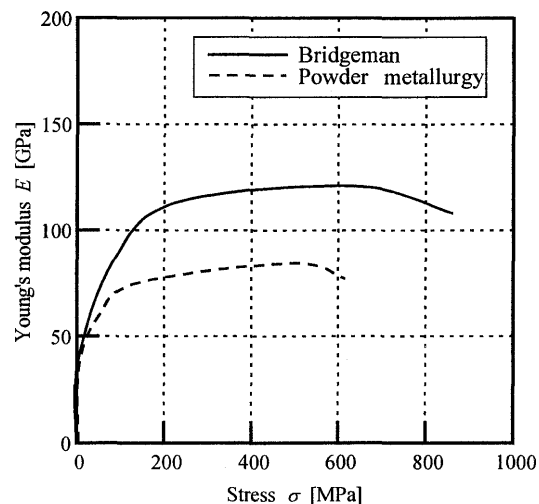


Fig. 5 Relation between Young's modulus and applied compression stress.

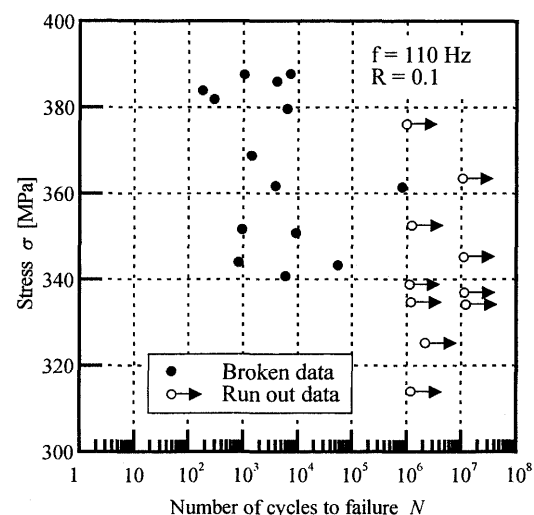


Fig. 6 S-N diagram of compression fatigue tests.

あり、静的圧縮強度に対する比は 61% である。ブリッジマン材の場合では約 60% であり、両材料における疲労強度の割合は同程度である。

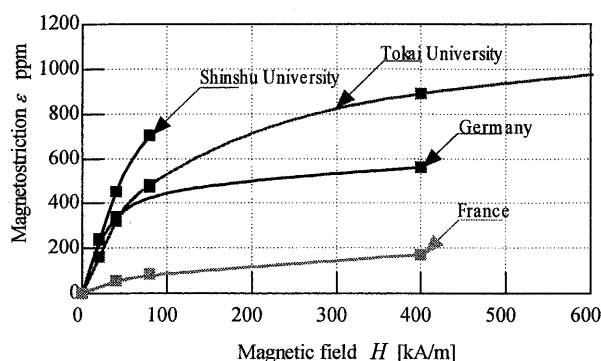
## 2.2 最近発表された超磁歪薄膜の特性

**2.2.1 単層膜の特性** アクチュエータやセンサの小形化を行う際、従来のバルク材料を用いると一般的なアクチュエータは形状の選択に限界がある。一方、薄膜化することで、さまざまな形状のデバイスへの応用が可能となる。

超磁歪薄膜材においては、各研究機関においてさまざまな組成の組み合わせや配合比、および成膜方法について試験研究の段階であり、組成配合や成膜条件の確立が大きな課題となっている。単層超磁歪薄膜材料では、バルク材が  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  の 3 元系であるのに対し、 $TbFe$  の 2 元系の例が多い。

**Table 2** Fabrication process and composition of thin film

| Organization                | Process      | Composition                         |
|-----------------------------|--------------|-------------------------------------|
| Shinshu Univ. <sup>5)</sup> | DC magnetron | Tb <sub>0.4</sub> Fe <sub>0.6</sub> |
| Tokai Univ. <sup>6)</sup>   | Ion plating  | TbFe <sub>2</sub>                   |
| Germany <sup>7)</sup>       | DC magnetron | Tb <sub>0.4</sub> Fe <sub>0.6</sub> |
| France <sup>8)</sup>        | RF magnetron | TbFe <sub>2</sub>                   |


**Fig. 7** Comparison of the magnetostriction of different thin films.

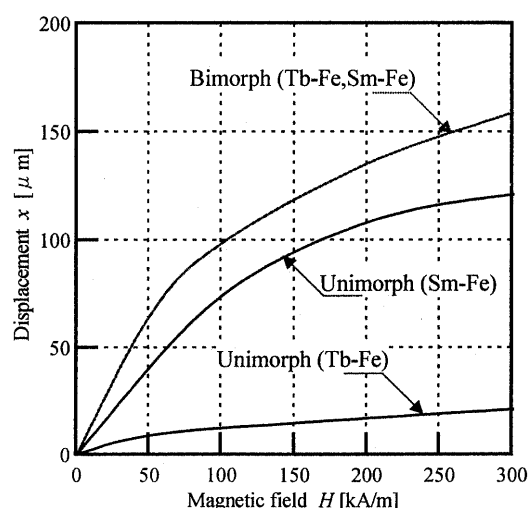
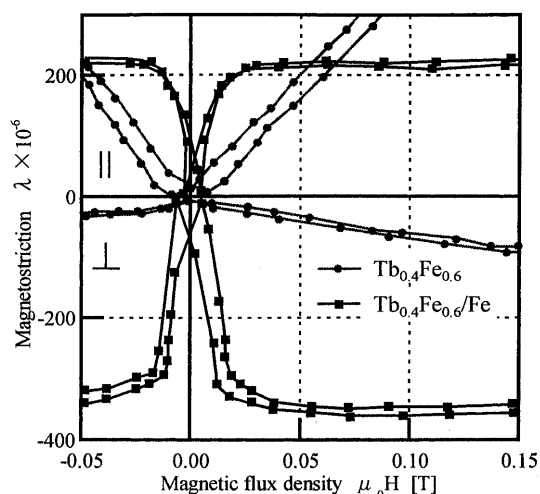
超磁歪薄膜材料をアクチュエータやセンサに使用する場合、その用途に応じて磁気特性の異なる薄膜材が要求される。また、合金元素の添加により超磁歪薄膜材料の特性が制御できる。これらの特性制御によって、磁気ひずみが大きく、電気機械結合係数の高い薄膜材料の開発が可能となり、より高性能なデバイスを構成することができる。

Table 2 に各研究機関による単層膜の成膜方法、Fig. 7 に成膜方法の違いによる磁気ひずみの比較を示した。製法および組成により磁気ひずみの大きさが異なることがわかる。実際のところ、内部応力や成膜条件による薄膜の微視的な構造と磁気ひずみとの関係の解明は十分ではなく、デバイスへの応用を考えると、薄膜の製作プロセスは確立しているとはいえない。そのため、目的とするデバイスに適した作製方法の選択が重要となってくる。

## 2.2.2 多層膜の特性

### (1) バイモルフ構造

これまで、アクチュエータの駆動に適した低磁界で大きな磁気ひずみを生じる薄膜作製法が検討され、Tb-Fe と Sm-Fe 薄膜がそれぞれ正と負の磁気ひずみをもち、良好な磁気特性を有していることが知られている。そこで、正と負の磁歪薄膜をバイモルフ構造とすることで大きなひずみを発生させることができる。Fig. 8 に比較的低磁界におけるユニモルフ型 (Tb-Fe, Sm-Fe) とバイモルフ型の印加磁界に対する変位特性を比較した<sup>9)</sup>。基板材として、長さ 10 mm、厚さ 50 μm のポリイミド基板を用いて、片持ち梁方式により測定した特性である。Fig. 8 からわかるようにバイモルフ型の変位特性は、正および負磁歪の単層薄膜の磁歪特性の組み合わせにより、ユニモルフ型よりも大き


**Fig. 8** Applied field dependence of the deflection for unimorph-type and bimorph actuators.

**Fig. 9** Magnetostriction of a TbFe single layer and a TbFe (4.5 nm)/Fe (6.5 nm) multilayer showing the increased magnetostriction in a low field.

な変位が得られる。このことにより、各々の薄膜の特性を改善することでさらに大きな変位を得ることが可能である。

### (2) 結晶磁気異方性低減

超磁歪薄膜成膜の研究の最大の課題は、飽和磁気ひずみの大きな薄膜を開発すること、とりわけ、低磁界で大きな磁気ひずみを生じる材料を開発することである。そのため、結晶磁気異方性をよりいっそう小さくすることが必要であり、低磁界で磁気飽和させる手法がとられている。具体的には、結晶構造をアモルファス化する方法、ナノクリスタル化する方法および多層膜化する方法が提案されている<sup>1)</sup>。

結晶磁気異方性を低減させるため、飽和磁化の値を増加させる方法がある。希土類遷移金属 (RE-TM) 組成におい

**Table 3** Examples of applications of giant magnetostriuctive materials

|                    |          |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bulk material      | Actuator | Acoustic vibration <sup>1),11),12)</sup><br>Vibration control <sup>13),14),15)</sup><br>Pressure pump <sup>16)</sup><br>Power generation device <sup>17)</sup><br>Brake actuator <sup>18)</sup><br>Fuel injector <sup>19)</sup><br>Motor (linear, rotation) |
|                    | Sensor   | Torque sensor <sup>20)</sup><br>Pressure sensor <sup>21)</sup><br>Vibration sensor <sup>22)</sup><br>Force sensor <sup>23)</sup>                                                                                                                            |
| Thin-film material | Actuator | Micro pump <sup>16)</sup><br>Optical switch <sup>24)</sup><br>Actuator for optical head                                                                                                                                                                     |
|                    | Sensor   | Strain sensor <sup>25)</sup><br>Magnetic field sensor <sup>26)</sup><br>SAW device                                                                                                                                                                          |

ては、RE 含有量を増加させるにつれ、飽和磁化が減少してしまう。そのため、アモルファス RE-TM 合金において、飽和磁化を著しく増加させることができない。しかし、多層とすることで、これらの物性値を超える新しい合成材料を作ることができる。それには、多層膜を構成する各々の層厚さを、磁壁の形成を避けるように強磁性交換長さ (the ferromagnetic exchange length) よりも薄くする必要がある。多層膜構造を、超磁歪アモルファス RE-TM 合金と、高い飽和磁化をもつ軟磁性材料 (Fe) の二つの材料を多層配列させることにより、お互いに磁気結合される。その結果、そのような多層系の飽和磁化は、各々の層の磁気特性の平均によって定義され、低磁界で高い飽和磁化をもち、大きな磁気ひずみを生じる。Fig. 9 は、TbFe の単層膜の特性と TbFe(4.5 nm)/Fe(6.5 nm) の多層膜の特性であり、多層膜とすることで、低磁界において大きな磁歪特性が得られている。

### 3. 超磁歪材料の応用

超磁歪材料は、ソナー用振動子のための材料として開発された。開発当初は軍事目的であったが、その優れた特性のため、一般への応用が試みられ、実用化されてきた。ここでは、おもに国内で最近研究され、実用化された応用例を述べる。

#### 3.1 最近発表された応用分野

近年、超磁歪材料のセンサ、アクチュエータへの応用分野は大きく広がってきた。地中探索、建築、精密機器、産業機械、電気電子、エネルギー、航空、医療などさまざまな。Table 3 にセンサ、アクチュエータへの応用例をまとめた。Table 3 以外にも、超磁歪材料と圧電材料を組み合わせてことによってコイルによる磁界印加をなくし、電磁力を電圧で制御する試み<sup>10)</sup> など興味ある提案もなされている。

### 3.2 アクチュエータへの応用例

**3.2.1 海洋音響トモグラフィ用振動子** 海洋音響トモグラフィとは、約 1000 km 四方の海洋の水温、流速、塩分濃度分布などの立体構造を低周波の音波を用いてリアルタイムで観測する技術である。この技術を用いて海洋現象を明らかにすることにより、エルニーニョ現象などの異常気象現象の予測が可能になる。

海洋現象は、気象の低気圧や高気圧に相当する冷水塊・暖水塊や海流など数百 km の大きさをもつ。これらの海洋現象の変化や相互作用を観測するためには、1000 km × 1000 km の広さの海洋音響トモグラフィが必要となる。距離 1000 km 伝播を考えると周波数 200 Hz で音圧 190 dB を出力できる低周波音源が必要となる。この音源を従来の水中音響材料の圧電材料を用いて設計すると、直径を 4 m 程度にするか、大形共鳴管を付加しなければならず、実用に適さない大きさになってしまう。しかし、超磁歪材料を使用することで小形かつ大出力音源が可能となる<sup>27)</sup>。

Fig. 10 に超磁歪振動子の構造を示す。超磁歪ロッドは  $\phi 20 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  を使用している。機械系と電気系のアナログにより、機械系の運動方程式を電気回路の回路方程式に対応させて議論することができ、この場合の駆動力  $F$  と速度  $v$  の関係は、駆動力を電圧、振動速度を電流に対応させれば式 (2) のように表すことができる。

$$F = AI = \left( r_M + j\omega m + \frac{k}{j\omega} \right) v = Z_M v \quad (2)$$

$F$ : 駆動力 [N]

$r_M$ : 機械抵抗 [ $\text{N} \cdot \text{s/m}$ ]

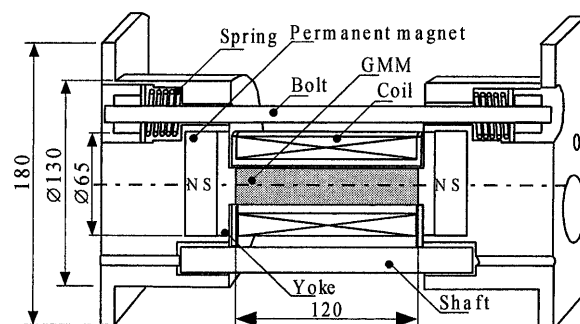
$m$ : 等価質量 [kg]

$k$ : 等価スチフネス [ $\text{N/m}$ ]

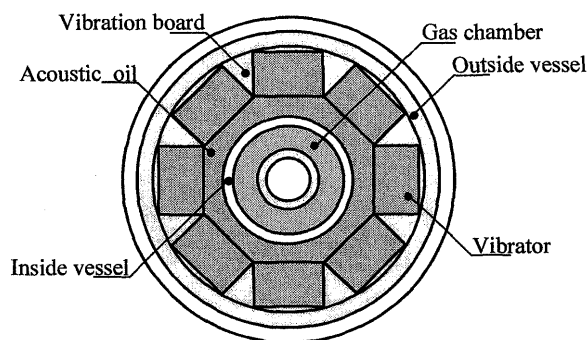
$v$ : 振動速度 [ $\text{m/s}$ ]

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

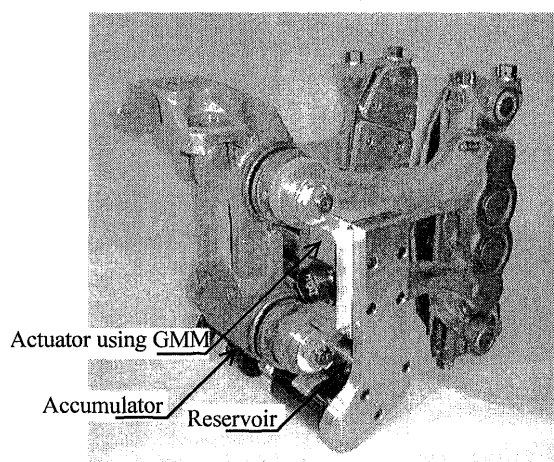
ここで、機械抵抗は振動速度と同相であり電気回路の抵抗に、等価質量はインダクタンス、等価スチフネスの逆数は静電容量に相当する。また、駆動力  $F$  は、コイル入力電流  $I$  により発生するから、入力電流により発生する駆動力の比である力係数  $A$  を用いて表すことができる。等価回



**Fig. 10** Structure of a vibrator using giant magnetostrictive material.



**Fig. 11** Polygonal structure of an acoustic source.

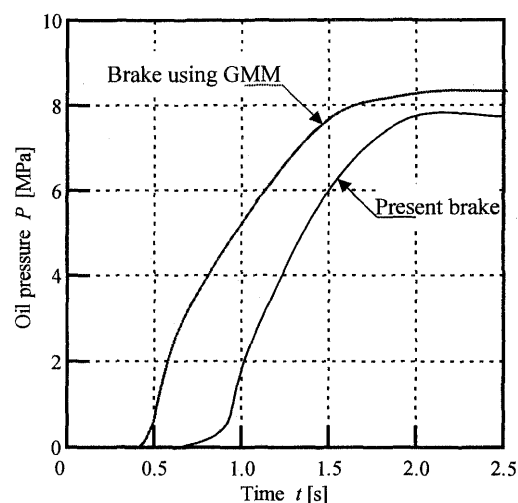


**Fig. 12** Brake system using a giant magnetostrictive actuator.

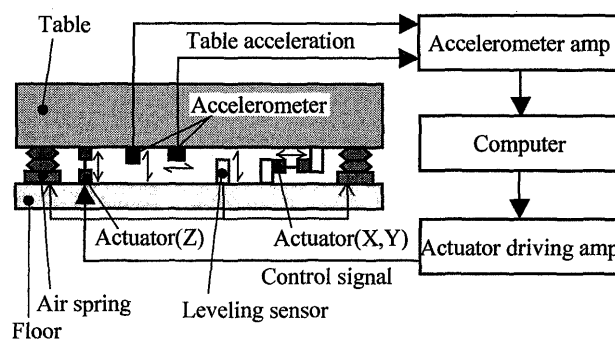
路解析を用いて素子の平均量としての等価回路定数を定義することで、振動面の変位量、振動速度、加速度あるいはインピーダンスといった超磁歪振動子のマクロな諸性能が解析できる。

実際には、Fig. 11 のように超磁歪振動子を 8 個円筒状に設置し、多角形音源方式をとることによって、直径 1 m、重量 410 kg と 200 Hz の音源としては小形で大出力の音源となる。これにより、約 1000 km 四方の範囲の海洋構造を解明するのに優れた海洋音響トモグラフィシステムを実現可能となった<sup>11)</sup>。

**3.2.2 超磁歪ブレーキ** 近年、鉄道用ブレーキとして油圧ディスクブレーキが広く用いられている。しかし現状のブレーキシステムは空気圧と油圧が混在する複雑なシステムとなっており、性能の向上および機能の拡張といった要求に対して今後の発展が必ずしも望めない状況にある。そこで、簡素で多機能な次世代ブレーキシステムを実現する手段として、ブレーキに内蔵可能でかつ電気的に直接駆動および制御できるブレーキアクチュエータの開発が望まれた。ブレーキアクチュエータの駆動要素としては、大きな磁気ひずみと推力を発生し、応答性に優れている超磁歪材



**Fig. 13** Comparison of the characteristics of a brake using GMM and a conventional brake.



**Fig. 14** System diagram of an active microvibration control system.

料が用いられている。

Fig. 12 に示すように、ブレーキアクチュエータがブレーキキャリパに一体的に内蔵され空気圧にかかる要素部品もすべて不要となるため、全体として極めて簡素なブレーキシステムとなる。また、ブレーキを直接電気的に駆動および制御することが可能となり、Fig. 13 のように、応答性が向上し、新たなハードウェアを追加することなく制御装置にソフトウェアを追加するのみで機能の拡張性も実現できる<sup>18)</sup>。

**3.2.3 アクティブ制振** マイクロエレクトロニクスの根幹を担う LSI の設計ルールはますます微細化し、そのために、これらの製造装置には今まで以上に高い性能が要求されるようになってきている。特に、ステッパなどの精密装置は外来の微振動を極度に嫌うため、高精度制振技術の導入が不可欠である。従来のパッシブ型の除振装置は設置床面から伝わる地動外乱以外は除振できず、低減される周波数領域も狭く、低減効果に限界がある。また、低周波数での除振が困難であり、除振系の共振周波数の存在は避けられない。そこで、超磁歪アクチュエータを用いたアクティブ型の除振装置を用いることでこれらの問題を解決で

きる。

Fig. 14 にアクティブ微振動制御装置（フジタ(株)製）を示す。テーブルと床の間には空気ばねを介している。テーブルに設置された加速度計により、テーブルの X, Y, Z 方向の加速度信号を取り込み、それに応じて超磁歪アクチュエータで制御する。これにより、地動外乱のみでなく精密機器に直接作用する外乱による振動に対しても制御でき、10～20 dB の低減が可能である。また、広い周波数領域 (0.3～50 Hz) で制御でき、その周波数帯域内から共振現象をなくすることができるという特徴を有している。Fig. 15 にパッシブ型とアクティブ型の除振性能比較をした。図から明らかなようにアクティブ型にすることで除振効果

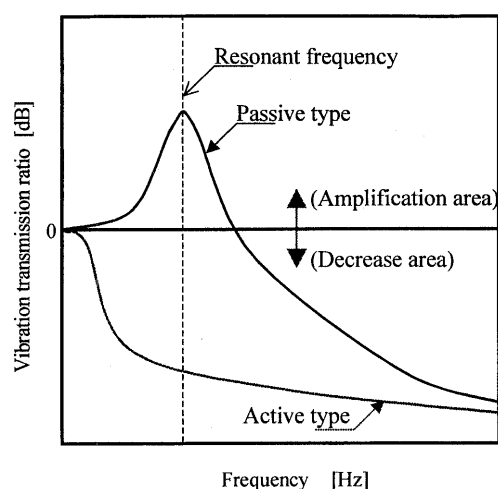


Fig. 15 Difference between passive and active vibration transmission ratios.

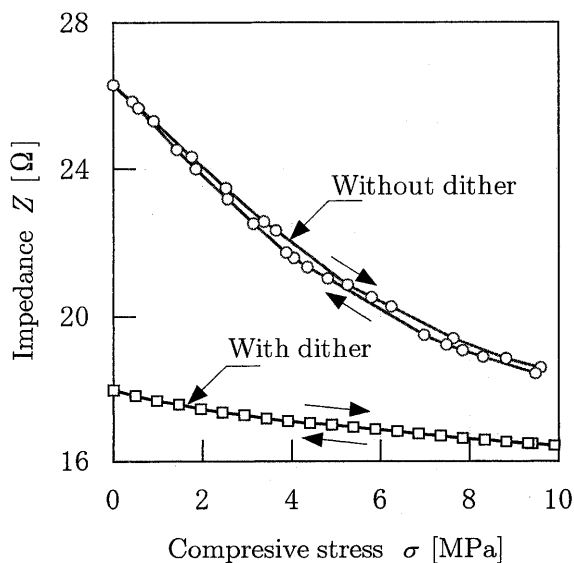


Fig. 16 Coil impedance characteristic-compressive stress (without dither:  $H=10 \text{ kA/m}$ ,  $f=10 \text{ kHz}$ ; with dither:  $H_d=20 \text{ kA/m}$ ,  $f_d=0.5 \text{ kHz}$ ,  $H=4 \text{ kA/m}$ ,  $f=10 \text{ kHz}$ ).

Table 4 Comparison of the characteristics of a force sensor GMM and those of a load cell

| Item                    | Force sensor | Load cell |
|-------------------------|--------------|-----------|
| Rated force [N]         | 10           | 9.81      |
| Magnetostriction ppm    | 400          | 2000      |
| Impedance coefficient % | 8.46         | 0.4       |
| Gauge factor            | 212          | 2         |
| Non-linearity %         | 17.05        | 0.5       |
| Hysteresis %            | 0.02         | 0.5       |

は大きいことがわかる<sup>28)</sup>。

### 3.3 センサへの応用例

3.3.1 カセンサの特性 カセンサは、応力が増加すると透磁率が変化（正の磁歪定数をもった材料の場合、圧縮するとその方向の透磁率が低下）する逆磁歪効果を利用している。透磁率の変化は、励振コイルのインダクタンスに影響を及ぼすので、コイルインピーダンスが変化する。したがって、コイルのインピーダンスを測定することで簡易な力センサを構成することができる。

Fig. 16 に圧縮応力に対するコイルインピーダンス変化を示す。センサにとってヒステリシスの低減は重要である。ヒステリシスの主要因は、磁壁のピンニングによるものと考えられ、このピンニング効果を低減すれば、ヒステリシスの低減が期待できる。力センサでは磁壁のピンニングを実効的に低減する方法として、交流磁界を重畳（ディザ）する方法を用いている。ディザ法を用いることでインピーダンス変化率は約 1/4 に減少したが、それでも 8.46% 変化し、十分に大きな感度となっている。

Table 4 に超磁歪材料を用いた力センサとロードセルの特性比較を示した。インピーダンス変化率はロードセルと比較すると 20 倍大きいことがわかる。材料のひずみ感度を表すゲージ率  $K$  においても超磁歪材料を用いた力センサの方が 106 倍大きい。ヒステリシスは、ディザ法を用いることで、ロードセルの 1/250 に小さくできる。一般的なロードセルと比較して、超磁歪材料を用いた力センサは、小形で低ヒステリシス、高感度な力センサを構成することが可能である<sup>23)</sup>。

3.3.1 電動自転車のトルクセンサ 電動アシスト自転車用超磁歪トルク（圧力）センサは、人間がペダルを踏む力を検出し、その情報をもとに駆動モータをトルク制御している。この電動アシスト自転車の重要な点として、人間のペダル踏力という非常に大きな力（最大クランク軸トルク：約 160 Nm）の検出を自転車機構というシンプルで限られたスペースに小形かつ低コストで実現可能なセンサが必要となる。そのため、超磁歪素子を用いることで、チェーンホイールに内蔵可能な小形大容量踏力トルクセンサを構成している。

このセンサには  $\phi 8 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$  の超磁歪材料を用いており、応力（圧力）による機械的ひずみによって磁化が

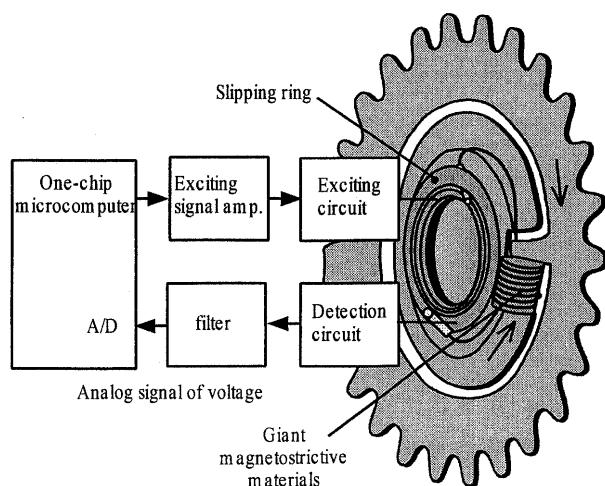


Fig. 17 Torque sensor using giant magnetostrictive material for a power-assisted bicycle.

変化する逆磁歪効果を検出原理としている。素子端部が機械的応力を受けることにより、材料内の透磁率が変化し、ピックアップコイルのインダクタンスが変化することになる。Fig. 17 にトルクセンサの概略図を示す。構成は、回転体内の中心から一定の腕の長さをもった位置で超磁歪素子が圧縮力を受けるようになっており、検出されたコイルインダクタンスの変化をトルク値に換算している。固定部からは、スリップリングを介してコイルに一定周期の電圧を印加し、コイルインダクタンスの変化を電流値の変化として検出している<sup>20)</sup>。

#### 4. あとがき

本解説において超磁歪材料の特性と応用への可能性を説明し、超磁歪材料だからこそ実用化できたとえる応用例を紹介した。しかし、超磁歪材料の応用例は、センサ、アクチュエータ共にまだ多くはない。超磁歪材料が発明されてから約 40 年、ブリッジマン法や粉末冶金法によってバルク材料の製造技術は確立されつつある。超磁歪材料の知名度が、圧電材料ほど高くないのは、一般に入手できるようになってからまだ歴史が浅く、適切な磁気回路を設計することの難しさや価格が一般用途に十分なほど安くないことなど不利な点があり、従来からのひずみ材料を超越できるような用途への開発事例が不足しているためである。一方で、マイクロデバイスへの応用を目指して、バルク材に迫る特性をもった薄膜材の開発と応用の研究が活発化してきている。今後、超磁歪材料のもつ優れた特性を活かす応用用途への開発を進めることによって、超磁歪材料が次世代を担う主要材料に発展することを期待したい。

謝 辞 本稿をまとめるにあたり、多くの方から文献、資料を提供していただいた。特に未踏科学技術協会の金子副理事長、明治大学理工学部の大亦教授からは多くの資料

を提供していただいた。ここに記して感謝する次第である。

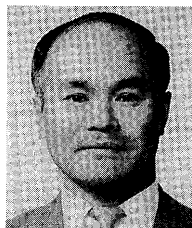
#### 参考文献

- 1) G. Engdahl: Handbook of Giant Magnetostrictive Materials, pp. 323-343 (Academic Press, 2000).
- 2) 江田 弘, 周 立波: 機械の研究, **52**, 1124 (2000).
- 3) 藤田麻哉, 深道和朗: 日本応用磁気学会誌, **25**, 66 (2001).
- 4) 中村 孝, 野口 徹, 山口 篤, 中村正史, 神保勝久: 第 9 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, pp. 19-22 (1997).
- 5) H. Wakiwaka, Y. Yamada, T. Watanabe, Y. Umemoto, T. Kiyomiya and M. Makimura: ISEM, TP-9-11 (2001).
- 6) 清水貴良, 小野仁幹, 松村義人, 内田裕久: 第 12 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, pp. 703-706 (2000).
- 7) E. Quandt: *J. Alloy and Compounds*, **258**, 126 (1997).
- 8) N. Tiercelin, P. Pernod, V. Preobrazhensky, H. Le Gall, J. Ben Youssef, P. Mounaix, and D. Lippens: *Sensor and Actuators*, **81**, 162 (2000).
- 9) 本田 一, 林 嘉隆, 山口 正洋, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, **18**, 477 (1994).
- 10) 上野敏幸, 裘 進浩, 谷 順二: 日本 AEM 学会誌, **8**, 246 (2000).
- 11) 中埜岩男, 中西俊之, 吉川 隆, 鎌田弘志, 山上伸夫, 村上勝彦: 第 7 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, pp. 571-576 (1994).
- 12) 島田隆史, 谷口良輔, 堺 孝文: 第 7 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, pp. 135-138 (1995).
- 13) K. Ohmata, M. Zaike, and T. Koh: *J. Alloys and Compounds*, **258**, 126 and (1997).
- 14) 藤田隆史, 中野 肇, 楊 春信, 近藤博文, 森 寧, 天坂康種: 日本機学会論文誌 (C 編), **64** (626), 82 (1998).
- 15) 伊沢直紀, 大亦絢一郎: 第 11 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, pp. 365-368 (1999).
- 16) E. Quant: *J. Alloys and Compounds*, **258**, 126 (1997).
- 17) 江田 弘, 中村 浩, 山本佳男: 精密工学会誌, **63**, 706 (1997).
- 18) 村田幸雄, 増子 実, 小川 豊, 脇若弘之, 水野 勉, 山田一: 第 11 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, pp. 361-364 (1999).
- 19) 佐藤恭一, 田中裕久, 浦井隆宏: 第 12 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, pp. 723-726 (2000).
- 20) 森川雅司, 鳥田正剛, 角谷和重, 河上日出生, 青木英明: 1998 年度 SICE 関西支部シンポジウム, pp. 180-182 (1998).
- 21) 江田 弘, 清水 淳, 周 立波, 榮木 泰, 宮本良司: 第 11 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, pp. 355-356 (1999).
- 22) 江田 弘, 山本佳男, 森 輝夫, Amer Rathore, 志賀慎一: 日本 AEM 学会誌, **5**(4), 79 (1997).
- 23) 脇若弘之, 山科宜秋, 中山 圭, 森 輝夫: 日本 AEM 学会誌, **8**(3), 00 (1999).
- 24) S. Moon: *SPIE*, **3680**, 854 (1999).
- 25) 申 光鎬, 井上光輝, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, **23**, 1425 (1999).
- 26) T. J. Kistenmacher, R. Osiander, S. A. Ecelberger, R. B. Givens, D. K. Wickenden, and J. C. Murphy: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **444**, 75 (1997).
- 27) H. Wakiwaka, K. Aoki, T. Yoshikawa, M. Igarashi, and

- H. Yamada: *J. Alloys and Compounds*, **258**, 87 (1997).  
28) フジタアクティブ微振動制御装置カタログ, 98.08 3000  
63-561 16431 UR.

(2001年5月7日受理)

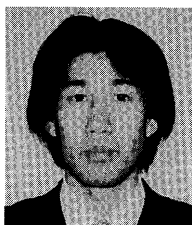
---



脇若弘之 わきわか ひろゆき

昭49 信州大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年 (株)小野測器, 平3 信州大学工学部助教授, 現在に至る. 平11 太原理工大学客員教授.

専門 磁気応用, 磁気利用センシング, アクチュエータ, 非破壊検査 (工博)



山田洋次 やまだ ようじ

平12 信州大学工学部電気電子工学科卒, 同大学大学院工学系研究科博士前期課程に進学, 現在に至る.