解説

超磁歪アクチュエータ

Giant Magnetostrictive Actuator

森 輝 夫* *TDK 株式会社 基礎材料研究所

Teruo Mori* *TDK Corporation

1. はじめに

アクチュエータ，センサを駆使し，それらをインテリジェントにコントロールする制御システムが各分野で使われるロボットにとって急務になっている。制御の精度は用途にもよるが最新の工作機器や表面実装を行う電子デバイスの組み立てロボットにはミクロン単位の精度が要件となっている。

ロボットの安全性，高信頼性を前提に複数の複雑な動作を単にスルー・フォワード的な指示によるのではなく，ロボット自体が規範^{*1}に従って「速く」，「正確に」，「滑らかに」行動できれば生産性に於いて人力以上に高度で精密な作業を迅速に行えるであろうし，高度な介護を行えるロボットも可能となるように思われる。

このたび，超磁歪材料についての紹介を委託された。この材料は外部からの磁界の変化により磁化，すなわち磁歪値が変化し，外部からの応力による素子の寸法変化に起因した内部磁化の変化によって，アクチュエータとして，また，センサとしての機能となる。これらは低電圧，かつ非接触に行うことが可能であることからインテリジェント・ロボット設計の一助になると思われるので紹介させて頂くことにした。

2. 超磁歪材料の機能，特徴

超磁歪材料は化学式が RT_2 (R；ランタノイド元素，T；鉄属元素) で示される金属間化合物^{*2}であり，その結晶構造は図1に示すラーベス相の立方晶である。この結晶の磁化容易軸は「111」^{*3}であり，その方位で磁気異方性エネルギーと弾性エネルギーの均衡による寸法変化（磁歪現象）が自発的に最大（飽和磁歪 λ_s ）となっている。単位結晶の集合体であるバルクの素子を作製した場合，内在する結晶の方位が揃っている材料を異方性材料，偏りなくラン

ダムな材料を等方性材料と言う。等方性材料の最大磁歪は $1/2\lambda_s$ であるが全方位の寸法変化を利用する場合や直交磁界を印加してのねじれを利用する場合には都合がよい。磁歪材料をアクチュエータとして利用する場合には寸法変化をコイル，磁石等の外部磁界によって行う。センサとして利用する場合には材料に一定の磁界（バイアス磁界）を加えたうえで外部応力による素子の寸法変化，すなわち磁化の変化をピックアップ・コイル等によって検出する。

材料には印加する外部磁界の方向が伸びる正磁歪材料と

図1 ラーベス構造の結晶構造

(a) 磁歪，逆磁歪（応力検出）

(b) ねじり，ねじれ（検出）

図2 磁歪材料の機能

原稿受付 1997年1月7日

キーワード: Giantmagnetostrictive Materials, Actuator, Powder Metallurgy, Sensor, Application

*〒286 千葉県成田市南羽鳥字松ヶ下570-2

*Aza-mathugasita Minami-hatori Narita-shi Chiba

表1 電圧材料との特性比較

特性	材料	超磁歪材料		圧電材料
		Tb _{0.3} Dy _{0.7} Fe _{1.9}	SmFe ₂	
$\Delta l/l$ [ppm]		1,500*	-750*	800
音速 [m/sec]		2,200	2,500	—
発生応力 [kg/cm ²]		300	240	150
キュリー温度 [°C]		380±40	405	180±100
結合係数 K		0.8	—	0.7
応答速度		$n \sim m$ sec	—	m sec
原料費 [円/g]		150	40	5
形状		自由	自由	積層バイモルフ

* $\Delta l/l$ は磁界 = 1 (kOe) 図3 粉末冶金材料、ブリッジマン材料の λ -H曲線

縮む負磁歪材料があり、ランタノイド元素の選択で可能である。前者は Tb. 3 Dy. 7 Fe 2 であり、後者は SmFe 2 が汎用的に応用されている。これらの機能の要約を図2*4に、類似の機能を持つ圧電材料材料との比較を表1に、そして正磁歪材料の外部磁界に対する寸法変化の様子を図3に示す。各機能、性質の動作を組み合わせることによってインチウォーム歩行、進行波利用の移動、図7をアクチュエータにしての3次元の寸法変位、振動子やこれを逆位相にしてのアクティブダンパ、正負磁歪板の張り合わせによるペンディング機構、広いレンジで圧力を検知できるセンサ等、各種のデバイスが検討されている。

3. 超磁歪材料の性能、特徴

素材の形態としては薄膜、薄体(リボン)、バルクが検討されているが大きい変位と発生エネルギー、磁気機械変換効率の良い異方性材料がアクチュエータとして理想であり、これはバルクのみで実現され商品化*5されている。その方法は概略2種の方法、すなわちブリッジマン法(米国ETREMA社、日本代理店 モリテックス社)、および粉末冶金法(TDK等)である。粉末冶金法は必要な形状に成形

できるので研削等による材料の損失がなく、最適な焼結手段によって均質なマイクロ・ストラクチャが具体化できる。このことによって磁歪性ヒステリシスの原因となる内部応力を低減でき、かつ非磁場での成形では結晶方位に偏りのない等方性素子も可能となる。この方法で得られ、規格化した材質性能を表2に示す。

超磁歪材料の特徴は歴史のある圧電材料と比較すると分かりやすい。物性的には表1記載であるが応用の面からは

- 1; 数[V]の低電圧で駆動できる。
- 2; 磁界駆動であり、素子とコイルは非接触である。例えば回転軸中の素子を伸縮できる。
- 3; キュリー温度が高く、高温での動作が可能である。
- 4; 素子はモノリシックであり、機械疲労が小さい。
- 5; n -secレベルの高速駆動が可能である。

等である。他方、欠点としては

- 1; 金属材料であり、各種の防錆処理が必要となる。
- 2; 磁石、またはコイルに通電のバイアス磁界となる。
- 3; アクチュエータ、センサの体積にはコイルや磁石が加算される。
- 4; 高速駆動にはコイルの時定数 τ を考慮した設計が必要となる。

等である。

4. アクチュエータ、センサとしての基本的な構造

正磁歪材料を使用しての単一なユニットであるアクチュエータ、センサの基本構造を図4に示す。Tb. 3 Dy. 7 Fe 2素子の場合、素子に50[kg/cm²]前後の予備荷重をかけておいた方が磁歪値は大きい。すなわち変換効率がよくセンサとしても最適条件となる。図4(a)の場合にはハウジングは磁気回路の一部として軟磁性材料を使用し、磁石によるバイアス磁界を装備した図4(b)では非磁性材料とする。高周波で使用する場合にはヨーク、ハウジングはソフトフェライトにする。

5. 具体的な応用例

5.1 超磁歪ポンプ

図4(a)の構造に準じて駆動ノブにプランジャヘッドを取り付け、1サイクルの交流入力に対し2回のp-pが30ミクロンメートルの変位となるプランジャ・ポンプを制作した。1回の振幅による送液量は17マイクロ・リットル、最大圧力は8[kgf/cm²]である。構造を図5に示す。

5.2 超磁歪クラッチ

モータに連結した回転軸の一部に楔型に合わせたハウジングを設け、素子をハウジング中に装着した。駆動コイルをハウジングと非接触に配置し回転中の素子が駆動コイルによって伸縮することでクラッチおよび押し付け圧の制御が電流値で任意に選べる。概略を図6に示す。

表 2 TDK 粉末冶金・超磁歪材料の諸物性

材質名		PMS-1	PMH-1	PMT-1	PIS-1
素子形状		板, 角柱, 円柱, 円筒, 等			
変位量 [ppm] (プリロード: 60[kg/cm ²])	磁界 $H = 0.4$ [kOe]	600[ppm]	600[ppm]	600[ppm]	350[ppm]
	$= 1.0$ [kOe]	1,100[ppm]	1,100[ppm]	1,100[ppm]	650[ppm]
	$= 2.0$ [kOe]	1,300[ppm]	1,250[ppm]	1,300[ppm]	—
	$= 3.0$ [kOe]	1,450[ppm]	1,400[ppm]	1,450[ppm]	—
	発生応力 [kgf/cm ²]	80(—)	80(—)	80(—)	—
機械的性質	密度[g/ml]	7.95(—)	7.95(—)	7.95(—)	7.95(—)
	ヤング率[N/m ²]	$2.0 \cdot 10 + E 10$	$2.0 \cdot 10 + E 10$	$2.0 \cdot 10 + E 10$	—
	圧縮強度[kgf/cm ²]	$600 \cdot 10 + E 6$	$600 \cdot 10 + E 6$	$600 \cdot 10 + E 6$	←
	引張強度[kgf/cm ²]	$20 \cdot 10 + E 6$	$20 \cdot 10 + E 6$	$20 \cdot 10 + E 6$	←
熱的性質	熱膨張係数[ppm/°C]	12(—)	←	←	←
	比熱[kJ/kg・°C]	0.35(—)	←	←	←
	熱伝導率[W/m・°C]	10~11	←	←	←
電磁氣的性質	キュリー温度[°C]	380(—)	←	←	←
	電気抵抗[Ω・m]	$60 \cdot 10 - E^8$	←	←	←
	エネルギー密度[(kJ/m ³)]	10(—)	10(—)	10(—)	—
	比透磁率	≈ 8 (—)	←	≈ 6 (—)	≈ 6 (—)
	保磁力(Hc; Oe)	50	20	70	50
補足説明		異方性・正磁歪 標準材料	同, 左 低ヒステリシス材料	同, 左 広帯域温度対応	等方性・正磁歪 粉末冶金材料

(a) コイルのみによる駆動

(b) 磁気バイアスを付帯する駆動

図 4 コイルによる駆動・2 例

5.3 3次元振動センサ/アクチュエータ

個々にピックアップ・コイルを有した3本の素子を正3角形の点に柱状に配し、リング状の1ヶの磁石で3本の磁歪素子のバイアス磁界となるように設計、上部ヘッドの荷重が任意の方位からの振動を受け、個々の素子に振動方向に応じた荷重となることでピックアップ・コイルの個々の電圧となる。これを解析して方位、強度を測定する。ジャイロともなる。また、コイルに電流を印加すれば上部ヨー

(a) 超磁歪ポンプの構造

(b) パルス/吐出量特性

図 5 超磁歪ポンプ

クの角度を任意に変更できるアクチュエータとなる。これを図 7 に示す。

5.4 超磁歪ねじりアクチュエータ/センサ

円筒形の等方性素子を作製し、円筒の中心軸方向と円周方向に磁界を印加した場合にはそれぞれの磁界の強さに応

図6 超磁歪クラッチ

(a) 3次元センサの構造

(b) 加速度特性(出力電圧はコイルの巻数で変わる)

図7 超磁歪3次元振動センサ

じて合成された方向に材料は磁化される。例えば円周方向の磁界を固定し、中心軸方向の磁界を交流磁界にすれば円筒はねじれる。また、円筒にねじれ応力を加えればコイルにトルクに応じた電圧が発生しセンサとなる。概略の構造を図8に示す。

磁歪材料の駆動はドライバであるコイル、磁石と共に構成されるヨークやハウジング等の閉じた磁気回路に依存するのでこれらの材質の選択によって温度や位置が機能量となる設計も可能である。

6. 今後の課題

超磁歪材料が実用化されているのは軍事関連、海洋関連の一部であり、大量に使用された実績はまだない。粉末冶金法による個々素子の特性バラツキは±10%程度であるが

(a) ねじりアクチュエータ(φ26×17[mm])の構造

(b) ねじりアクチュエータの特性

図8 超磁歪ねじりアクチュエータ

今後、多量に使用された場合での工程能力、信頼性が大切と考えている。

7. 終わりに

超磁歪材料について駆け足で述べさせて頂いたが、温度や周波数、高速駆動に関しては不満が残った。より詳細な知見が必要な場合、茨城大学・江田教授らによる参考書が昨年発刊されており参考にして頂きたい。

参考文献

- [1] 榊原伸介: 日本ロボット学会誌, vol. 14, no. 6, p. 796, 1996.
- [2] A. E. Clark, Ferromag Mat, vol. 1, p. 531, 1980.
- [3] G. F. Clark et al: Philosophical Mag B, vol. 146, no. 4, 331-343, 1982.
- [4] 森輝夫: 工業材料, vol. 44, no. 11, 1996.
- [5] J. L. Bulfer: Application Manual for the design of ETREMA TERFENOL-D_{TM} Edge tech., p. 25, 1988.
- [6] A. E. クラーク, 江田弘: 超磁歪材料. 日刊工業新聞社, 1995.

■用語の補足説明

- *1: この場合、ロボットへのプログラムを意味する。
- *2: 2種以上の金属元素が簡単な整数比で結合した化合物。
- *3: 立方晶の対角線、すなわち、3次元座標での「0, 0, 0」と「1, 1, 1」を結んだ方位。
- *4: 一方向の外部磁界に対するジュール効果、ピラリ効果であり、直交磁界でのペルトハイム効果、ウィーデマン効果である。
- *5: 素子としてTDK(株)、ETREMA INCがある。

森 輝夫 (Teruo Mori)

1947年1月20日生。1969年東京電機大学工学部物質工学科修了。1970年(株)TDK入社。開発研究所を経て基礎材料研究所にて金属材料開発部を担当、現在に至る。茨城大学システム工学科博士課程在学中。精密機械学会員。