超磁わい超精密位置決め装置とそれを搭載した 超精密工作機械の開発*

江田 弘^{*1}, 佐々木 康彦^{*2}, 濱田 隆治^{*3}

Development of a Giant Magnetostriction-Type Ultraprecision Positioning Device and Ultraprecision Machine Tool Equipped with It

Hiroshi EDA, Yasuhiko SASAKI and Ryuji HAMADA

A giant magnetostriction-type ultraprecision positioning device (GMUPD) was manufactured from newly developed giant magnetostriction materials with compositions of $Tb_{1-x}Dy_x(Fe_yMn_{1-y})_n$. The output power of them is several times and the displacement is several ten times that of PZT without a magnifier. An ultraprecision machine tool was developed with the present GMUPD. The workpiece can be fed at a rate of 0.1 mm/min or 600 mm/min and is cut by a turning diamond tool. The hard and brittle materials such as glass and ceramics were finished in the ductile mode, and surface roughness was obtained within several nanometers.

Key Words: Giant Magnetostriction Materials, Ultraprecision Positioning Device, Ultraprecision Machine Tool, Ductile Mode Type, Diamond Turning

1. 緒 言

超磁わい材料は、これまで $Tb_{0.3} Dy_{0.7} Fe_2$ を標準材料としていろいろな研究がなされてきた⁽¹⁾。しかし本主題のように工作機械に適用する場合には Jump 現象による変位の荷重依存性の減少とともに作動条件範囲で安定した変位を出力することが望まれる。

一方、この材料は Joule 効果による渦電流を発生し発熱するために、主題のような超精密位置決めを利用するときには熱変位の補償を、特に考える必要がある。ただし、この適用例は圧電材料 PZT の如く高電圧で、また発熱するような高周波域にしない限り、この障害に合致して適用することは可能である。しかしながら PZT の場合、圧縮応力 30 MPa に対し、本材料は 600~700 MPa の条件でも出力できる。また PZT の場合大変位を得るには拡大器が必要であるが、この場合には、拡大器なしで、数 100 μm の出力が可能である⁽²⁾⁽³⁾。すなわち超磁わいは PZT との競争材ということではなく、自らの素性に由来した低周波数領域

(超音波以下の領域)で大出力と大変位が得られることに特徴をもつ材料である。ただし、積層化することによって高周波数領域(超音波域)の適用も可能である。

以上の問題を研究した結果、材料の変位荷重依存性を軽減した新超磁わい合金、および渦電流による熱変位を制御できる超精密位置決め装置を開発したのでここに報告する。

さらに、この位置決め装置を搭載した超精密工作機械を開発し、セラミックス等の硬脆材料を延性モード条件で無き裂表面を数 nm オーダで創成できたので、以下に詳細に述べる。また、この位置決め装置は 600~700 MPa の範囲まで超磁わい材料に直接負荷が作用しても加工できることが可能となった。

2. 新超磁わい材料の開発

超磁わい材料は、以前報告⁽⁴⁾したように Folat Zone Method および Arc Casting Method によった。

FZM はおもに 35 $\mu m/s$ の成長速度によっている。予備実験として、 $Tb_xDy_{1-x}Fe_n$ および金属系(キュリー温度を上昇させるため)として、Fe と Mn, Co 等を $Tb_xDy_{1-x}(Fe_yMn_{1-y})_n$ のように、 x, y, n を実験計画法により導出した。その結果、最終的に表 1 に示す組成と製法による供試材料を準備し、実験を行うことにな

* 平成 4 年 9 月 25 日 日立地方講演会において講演、原稿受付 平成 5 年 5 月 27 日。

*¹ 正員、茨城大学工学部 (〒316 日立市成沢町 4-12-1)。

*² 茨城大学大学院 [現: (株)日立製作所]。

*³ 茨城大学大学院 [現: (株)ニコン]。

った。

表1中Aは結晶制御により作られ、双晶構造の単結晶材料である。B材は多結晶構造である。C, D, E材料はラーベス相、および微細第2相粒子ウイドマンステッセン配列の RFe_3 をもつ凝固組織より成る。C, D, Eの元素比は表1に示すとおりである。この材料の圧縮強度は400~650 MPaの範囲にあるが、以下の実験用デバイスは300 MPa以下の工作機械の設計許容応力内で比較検討した。つまりJump現象が現れるのはせいぜい100 MPa以下である。図1はそのとき用いた試作磁歪特性測定システムの概要を示す。

図1の装置を用いて、予荷重および磁界一定の条件下で描いた磁界 H -磁歪 λ 曲線を整理した結果を図2に示す。例えば、磁歪 λ -予荷重 L の関係をみると、A材は既存開発材と同じような H - λ 曲線を示す。つまりある予荷重 L の範囲で λ 値変動が極めて大きくなる。これに対して、C材の λ 値変動はほかのA, B, D, E材に比べて、はるかに安定になることがわかる。この安定化は、MnをCoで置換した場合には現れなかった。本研究ではMn置換による変動荷重に対する安定性向上の理論的根拠はいまだ解明していないが、A材は(111)の $\langle 111 \rangle$ 方向が最大の磁歪を示すのに対して、多結晶材はより等方的変位配分になることが考えられる。また、Feの一部をMnで置換したC,

D, E材は、A, B材に比べ、スピン配列遷移温度を 0°C (Tb-Dy-Fe系)付近から -100°C 付近に移行し、それによって磁化容易軸[111]も[100]に変化する。また高温側についてもMn置換によって 100°C 位まで安定化できることなどがわかっている。さらに、 H - λ 曲線においてA材は磁気異方性が大きく現れるが、Mn置換により磁気異方性とヒステリシスは小さく、かつ線形性がよくなることが確認された。特にC材のそれは、図2からA, B, D, Eに比べ優れていることが推定される。C材のこの優位性は、本研究主題のデ

(a) 単結晶

(b) 多結晶

(c) 多結晶

表1 供試材料の組成と製造方法

No.	Material rate, Crystallize	Manufacture method
A	Tb _{0.17} Dy _{0.83} Fe _{1.00}	Perfect FZ method
B		Imperfect FZ method
C	(TbDy)(FeMn) _{1.00}	Arc casting method
D	(TbDy)(FeMn) _{1.00}	
E	(TbDy)(FeMn) _{1.00}

図1 磁歪特性測定システムの概要

図2 材料組成に対する磁歪の予荷重依存性

図3 超磁わい超精密位置決め装置の概略

図4 超磁わい超精密位置決め装置内の磁束分布

バイスを作る上で重要な特性となる。

3. 超磁わい超精密位置決め装置の開発

図3は磁気回路の最適化設計により設計製作された強制冷却形超磁わい超精密位置決め装置の横断面図を示す。

図3に示すような電流と磁性体が存在する系の磁界 H は、電流によって磁化された磁性体の作る磁界 H_m と電流による磁界 H_o との重ね合せから求まる⁽³⁾。図4はその結果を示す。ただし、ろうえい磁界による減少を補償するため、図3に示すように左右端に約 400 Oe のバイアス磁石を配置し、図4に示すように超磁わい材全長にわたって磁束分布の計算値がほぼ一定化するように設計してある⁽³⁾⁽⁴⁾。また、設計条件範囲での残留磁界の影響はほとんど認められなかった。

超精密位置決め装置は、ヨーク材；SS 41 鋼，超磁わい材料；C 材(φ6 mm×長さ 50 mm)，ソレノイドコイル；1500 巻，強制水冷用パイプ；φ2 mm 銅管，バイアス用磁石；Sm-Co(保磁力 26 G)，図4の結果はコイル電流 1 A 一定電流，のような条件で設計制作されている。磁束分布は，ガウスメータ(F. W. BELL

(a) 6 nm ステップ

(b) 3 nm ステップ

図5 Tb_xDy_{1-x}(Fe_yMn_{1-y})_n 合金のステップ送り

社製，4048)によって測定した。

以上により完成した超磁わい式の超精密位置決め装置の nm オーダでのステップ送りを図5に示す。図5(a)は 6 nm，図5(b)は 3 nm のステップ送りが，140 s，ならびに 100 s にわたって，ドリフトが零に近い状態で達成されている。周波数応答は既報⁽²⁾⁻⁽⁴⁾とほぼ同一で，一般にいわれているとおり，PZT より優れている⁽¹⁾。またこのときのノイズは，0.5 nm 以下である。測定がクラス 5 万位のクリーンルームで行われた例であることを考えると，極めて良好な超精密位置決め装置が開発されたといえる。

4. 超磁わい超精密位置決め装置搭載の超精密工作機械の開発

超精密工作機械は，従来報告⁽⁵⁾した主軸：静圧空気式 (PI 社製，4 B)，テーブル：静圧空気式 (Dover 社製 S/N)，騒動源：DC サーボモータ(富士電機製 GHU 0205)，DC サーボアンプ(同 FSS 006)，サーボユニット(東芝機械製)を工作機械に組込んだ。その他測定系は，静電容量形の変位計(岩崎電子：ST 形)，デジタルマルチメータ，マイクロメータ付きスライドテーブル(三豊製，MT 形)を測定系に用いて 5 nm まで切込み系をフィードバック制御している。なおこ

図 6 超磁わい超精密位置決め装置搭載の超精密工作機械全景

図 7 超精密工作機械の駆動系システムと機械要素の関連概略

の超精密工作機械は、旋削用として一応設計製作したが、主軸頭に砥石を装着し、X-Y テーブル側に工作物をセットすれば研削加工もできる。

図 7 は、以上の機械的要素と計測制御器を電気・機械的にシステム化したもので、その構成を示す。図 6 の左端、図 7 では右側上部に相当する位置にある強制冷却形の恒温槽ユニットは、これによって超磁わい材料を 30°C に設定に対して、 0.00106°C の変動内に制御できる。この制御と装置の詳細はすでに報告⁽⁴⁾したので省略する。ただし、ここで注意していることは、 $\pm 5.3\text{m}^{\circ}\text{C}$ で制御するような条件では、熱電対の冷接点の溶媒選定が重要である。このときの冷接点は、液体

窒素を用いている。つまり沸点が周囲温度の影響を受け揺動が激しくなるため、なるべく低温溶媒が求められる。

超精密位置決め制御は、まず超磁わいアクチュエータに一定電流を印加し、そのとき発生した変位を測定し、変位-印加電流の較正曲線をまず求め、その関係式をプログラム化し、所定の制御を行う(図 8 の①のステップ)。以下図 8 に示す手順に従って進める。

以下の手順は、位置決めデータを設定し②、現在位置を測定し③、指令データ値と現在位置の差を求め④、差がある場合、初期操作で得た較正曲線の係数を用いて変位差を電流値に換算して⑤、その差が零にな

図8 超精密位置決め装置の閉ループ制御

るまで同様に繰返す。つまり電流印加⑥、変位発生⑦、以下加工終了するまで③から⑧のプログラム制御を続行する。

5. 硬脆材料の超精密加工

セラミックスがガラス等の硬脆材料は、加工点領域の大きさを微小塑性領域にとどめて実行すれば、き裂のない表面が得られることはすでにいろいろな報告⁽⁶⁾で示されている。また著者らは、微小塑性領域が発生する範囲を理論的に求め実験によって検証している⁽⁷⁾。仮にこの超精密工作機械を切削加工に用いるとすれば、Blake, Scattergood⁽⁶⁾らが示した、つまり図9に示す切りくず生成において少なくとも切込み d より深く脆性破壊き裂が進展しないように切削パラメータを選べば切削表面に残生き裂を発生させないで、新生面を得ることができる。

一方著者らの考えは、 d を塑性領域にとどめるために弾塑性解析し、 Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , ZrO_2 に対して、 $50\sim 100\text{ nm}$ が d の限界であることを示した⁽⁷⁾。この値は、Scattergoodらの場合、例えば $\text{Si}(100)$ 単結晶に

図9 延性モードを得る Scattergood らの切りくず生成モデル

図10 開発機械による図9の切削モデルの実現図

図11 $\text{Si}(100)$ の脆性モード切削表面

ついて算出すると 57 nm となる。そこで著者らは図9の $t_{\max}$ を図10に示す Cutting depth d に等しくなる、つまりき裂を発生させない微小領域条件をとるように、ダイヤモンド工具の寸法形状、切削パラメータを選べるように、超精密工作機械条件を整備した。図11は、単結晶 $\text{Si}(100)$ 面を脆性モード領域、($t_{\max}=247\text{ nm}$) で切削した場合の表面を示す。残生き裂が多数発生しているのが認められる。

図12は、無き裂表面のようにみられる脆性-延性モ

図 12 シリコンウエハの切削加工面

図 13 Si(100)面の延性モード切削表面

ードの遷移領域の切削表面 ($t_{\max}=70$ nm) を示す。図 11 に比べき裂が著しく減少しているのがわかる。

そこで脆性-延性モードを遷移領域の脆性モードを

図 14 Si(100)の典型的な延性モード切削表面

図 15 Si(100)切削表面の仕上げ面粗さ

超え、ほぼ延性モード表面が観察されるところを示すと、図 13 にみられるようになる。さらに、この条件で微小塑性がより発生しやすいように、例えば、すくい角を -10° にして塑性感受性を上げてやると、図 14 にみられるように、典型的な延性モード切削表面が得られる。このときの仕上げ面粗さは図 15 に示すように $R_a=1.3$ nm, $R_{\max}=7$ nm である。

なお、微振動が、仕上げ面粗さに影響を及ぼさないように、ボルト、ナット等金属固体締結をやめ、坂田 [文献(5), p. 157] の接着剤方式をとり、さらに、床とベッド間、ベッドと機械間とともに空気浮上、工具も主軸と特定の振動絶縁を施した⁽⁸⁾。以上により空転時の微振動を遮断し、上記の切削仕上げ面粗さを得た。

6. 結 論

本研究の結果、次のことが結論として得られた。

(1) Th-Dy-Fe 系に比べ、荷重安定性がよく、ヒステリシスが小さく、線形性がよい Tb-Dy-Fe-Mn 系超磁わい材料を開発した。

(2) 電わいタイプでなく、数 nm オーダの分解能をもつ超磁わいタイプの超磁わい位置決め装置を開発

した。

(3) 超磁わい超精密位置決め装置を搭載した超精密工作機械を開発した。

(4) 開発した上記(3)の超精密工作機械を用いて硬脆材料の延性モード切削加工を実現した。

(5) 上記機械を用い、Si(100)面を切削加工したところ、仕上げ面粗さ 1.3 nm *Ra* の延性モード加工面を得た。

本研究に当たり、材料は東芝総合研究所、機械は東芝機械、ダイヤモンド最適設計は東京ダイヤモンド工具製作所の協力に対し深く謝意を表す。また研究の検討は精密工学会産学共同研究協議会の超磁わい研究分科会の方々の指導を得た。関係各位にお礼申し上げ

る。なお本研究の一部は文部省科学研究費一般研究(C)0280516の支援を得た。

文 献

- (1) Clark, A. E., Magnetostrictive Rare Earth-Fe₂ Compounds, a *Ferromagnetic Materials*, 1 (1980), 531.
- (2) 江田, 精密工学会誌, 57-3(1991), 445.
- (3) 江田・佐橋・小林, 精密工学会誌, 56-2(1990), 388.
- (4) 江田・小野間・佐橋・小林, 精密工学会誌, 57-3(1991), 532.
- (5) 江田, 超精密工作機械の製作, (1993), 75, 工業調査会.
- (6) Blake, P. M. and Scattergood, R. O., *J. Am. Ceram.*, 73-4(1990), 949.
- (7) 佐川・江田, 機論, 57-538, C(1991), 2160.
- (8) 江田, 特許 1774200 号, 回転工具, (1992).