

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-103251

(P2014-103251A)

(43) 公開日 平成26年6月5日(2014. 6. 5)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
H 0 1 F 41/02 (2006.01)	H 0 1 F 41/02	G 4 K 0 1 8
H 0 1 F 1/08 (2006.01)	H 0 1 F 1/08	A 5 E 0 4 0
B 2 2 F 3/24 (2006.01)	B 2 2 F 3/24	E 5 E 0 6 2

審査請求 有 請求項の数 3 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2012-254302 (P2012-254302)	(71) 出願人	000003207
(22) 出願日	平成24年11月20日 (2012. 11. 20)		トヨタ自動車株式会社
			愛知県豊田市トヨタ町1番地
		(74) 代理人	100091096
			弁理士 平木 祐輔
		(74) 代理人	100105463
			弁理士 関谷 三男
		(74) 代理人	100129861
			弁理士 石川 滝治
		(72) 発明者	小淵 大
			愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内
		(72) 発明者	西ヶ谷 伸也
			愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内

最終頁に続く

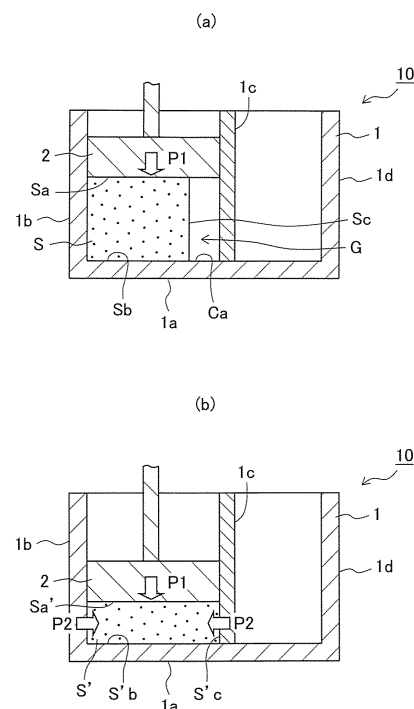
(54) 【発明の名称】 希土類磁石の製造方法

(57) 【要約】

【課題】成形体に熱間塑性加工を施して配向磁石である希土類磁石を製造するに当たり、成形体に割れが生じることなく、成形体の側方変形の際にパンチ等から作用するせん断摩擦力による配向乱れが生じない希土類磁石の製造方法を提供する。

【解決手段】成形体Sを製造する第1のステップ、ダイス1とパンチ2からなる塑性加工型10を用意し、そのキャビティCaに成形体Sを収容して熱間塑性加工を施して配向磁石である希土類磁石Cを製造する第2のステップからなり、第2のステップはステップA、Bからなり、ステップAではパンチ2による押圧にて自由端面である成形体Sの側面が側方に張り出して側面型1cから加圧され、異方性の付与に必要な加工率に達する前段階まで押圧して配向磁石前駆体S'を製造し、ステップBでは配向磁石前駆体S'の側面を自由端面に戻し、異方性の付与に必要な加工率に達するまで押圧して配向磁石Cを製造する。

【選択図】図4



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

希土類磁石材料となる粉末を加圧成形して、柱状の成形体を製造する第 1 のステップ、前記成形体が収容されるキャビティを備えたダイスと該キャビティ内で摺動自在なパンチとからなる塑性加工型を用意し、前記キャビティは、前記成形体のパンチによる加圧方向と直交する断面よりも断面寸法の大きな断面を有しており、

前記キャビティに成形体を収容してダイスの下型とパンチで挟み、該パンチと下型で成形体の上面と下面を直接押圧しながら異方性を与える熱間塑性加工を施して配向磁石である希土類磁石を製造する第 2 のステップからなり、

前記第 2 のステップはさらに 2 つのステップから構成されており、

最初のステップ A では、下型とパンチによる押圧によって、下型とパンチで押圧されていない自由端面である成形体の側面が側方に張り出して成形体の側方にあるダイスの側面型から加圧され、異方性の付与に必要な加工率に達する前の段階までパンチと下型による押圧を実行して配向磁石前駆体を製造するものであり、

次のステップ B では、配向磁石前駆体の側面をダイスの側面型からの加圧のない自由端面に戻し、異方性の付与に必要な加工率に達するまで下型とパンチによる押圧を実行して配向磁石を製造するものである希土類磁石の製造方法。

【請求項 2】

前記ステップ A を 2 回以上繰り返した後にステップ B に移行して配向磁石を製造する希土類磁石の製造方法。

【請求項 3】

前記ダイスの側面型は分離自在もしくは可動自在に構成されており、第 2 のステップのステップ A が終了した段階で該側面型が分離もしくは可動して配向磁石前駆体の側面から離れ、該側面の側方に空間を形成する請求項 1 または 2 に記載の希土類磁石の製造方法。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、熱間塑性加工によって配向磁石となっている希土類磁石の製造方法に関するものである。

【背景技術】**【0002】**

ランタノイド等の希土類元素を用いた希土類磁石は永久磁石とも称され、その用途は、ハードディスクやMRIを構成するモータのほか、ハイブリッド車や電気自動車等の駆動用モータなどに用いられている。

【0003】

この希土類磁石の磁石性能の指標として残留磁化（残留磁束密度）と保磁力を挙げることができ、モータの小型化や高電流密度化による発熱量の増大に対し、使用される希土類磁石にも耐熱性に対する要求は一層高まっており、高温使用下で磁石の磁気特性を如何に保持できるかが当該技術分野での重要な研究課題の一つとなっている。

【0004】

希土類磁石の製造方法の一例を概説すると、たとえばNd-Fe-B系の金属溶湯を急冷凝固して得られた微粉末を加圧成形しながら成形体とし、この成形体に磁氣的異方性を付与するべく熱間塑性加工を施して希土類磁石（配向磁石）を製造する方法が一般に適用されている。

【0005】

上記熱間塑性加工は、塑性加工型を構成する下型とパンチ（ボンチとも言う）間に成形体を配し、加熱しながら下型とパンチでたとえば 1 秒程度かそれ以下の短時間押圧し、所定の加工率となるまで押圧する据え込み加工が一般に適用されている。この熱間塑性加工によって成形体に磁氣的異方性を付与できる一方で、熱間塑性加工の際の下型とパンチによる押圧によって成形体が塑性変形しながら潰される過程で、塑性変形した成形体の側面

10

20

30

40

50

に割れ（微細割れを含む）が生じやすいという問題があった。

【0006】

これは、下型およびパンチと接触している部分が変形し過ぎ、その分だけ側面中央部が過度に膨らむ、いわゆる太鼓状に変形することが一因である。この割れが生じてしまうと、配向度を高めるために形成された加工歪が割れた箇所で開放されてしまい、歪エネルギーを結晶配向に十分に向けることができなくなり、結果として高い配向度（これによって高い磁化が齎される）の配向磁石が得られ難くなってしまう。

【0007】

また、このように外周部に割れが生じてしまうことから、熱間塑性加工によって成形された配向磁石においては、割れのない中央部分から所定寸法の配向磁石を切り出して製品化を図っており、材料歩留まりが低いという問題もあった。

10

【0008】

そこで、このような熱間塑性加工時の割れの問題を解消できる従来技術として特許文献1に開示の製造方法を挙げることができる。この製造方法は、上記成形体の全体を金属カプセル内に封入した後に、この金属カプセルを下型とパンチで押圧しながら熱間塑性加工をおこなうものであり、この製造方法によれば、希土類磁石の磁氣的異方性が一層向上するとしている。なお、このように金属カプセル内に成形体を封入した状態で熱間塑性加工をおこなう技術はそのほかにも、特許文献2～5に開示されている。

【0009】

しかしながら、成形体の全体が金属カプセルで完全に包囲されていると、上下からの押圧による成形体の側方への塑性変形が極端に拘束されてしまい、塑性変形後の成形体の側面に割れが生じない代わりに十分な塑性変形がおこなわれ難く、結果として高い配向度が得られ難いという別の問題が生じ得る。これは、たとえば上面、下面と円周側面を有する円柱状の成形体を例に取り上げるに、金属カプセルのうち、成形体の側面に対応する側面領域が側方に塑性変形しようとした際に、この側面領域と一体となっている成形体の上面および下面に対応する上面領域および下面領域が側面領域の広がり拘束することによって齎されるものである。

20

【0010】

実際に上記各特許文献には歪速度についての言及は無く、仮に0.1/sec以上の歪速度、加工率50%以上（たとえば70%かそれ以上）で熱間塑性加工をおこなった場合を想定すると、割れを完全に防止することはできない。その理由は、一定以上の厚みの鋼系材料で溶接して全面を覆った状態で0.1/sec以上の歪速度で加工した場合、磁石組織の受ける衝撃が強すぎ、あるいは冷却される場合に熱膨張差の違いによって熱間塑性加工された成形体が既述するように金属カプセルによって強い拘束を受けるからである。

30

【0011】

この問題を解消するべく、特許文献6では多段階で鍛造することによって金属カプセルを薄くしていく技術が開示されているが、ここで開示の実施例は肉厚が7mm以上の鉄板を用いており、これでは割れを完全に防ぐことができないことに加えて、鍛造後の磁石形状がニアネットシェイプと言えず、仕上げ加工が全面必須となって、材料歩留まりの低下や加工費の増加といった問題が顕著となる。

40

【0012】

なお、特許文献1等で開示されるように、成形体の全面を完全に覆う金属カプセルの肉厚を薄くしていくと、1/sec以上の歪速度では金属カプセルが破壊され、成形体に不連続な凹凸が生じてしまい、配向乱れの原因となることから好ましい方法とは言えない。

【0013】

以上のことから、熱間塑性加工の際の課題である成形体に割れが生じることを解消する方策として金属カプセル等で成形体を包囲して加圧する方法を適用しても十分な効果が得られ難いことより、熱間塑性加工に際して成形体に割れを生じさせることなく、しかも高い配向度の配向磁石を製造する方法が当該技術分野で切望されている。

【0014】

50

ここで、成形体の側方を金属リング等で拘束する方法ではなく、塑性加工型を構成するダイスの下型とパンチの双方で成形体の上下面を押圧する従来一般の据え込み加工による熱間塑性加工に話を戻すと、この方法では、既述する成形体の側面に割れが生じ易いといった問題の他に、据え込み加工の際にパンチによる押圧によって成形体が側方に変形しようとした際に、成形体がパンチと下型から該変形の方と逆方向のせん断摩擦力を受けるといった問題もある。このことを図 1 1 を参照して説明する。

【 0 0 1 5 】

図 1 1 a は据え込み加工前のパンチと下型で挟まれた成形体の解析モデルを示しており（モデルは、コンピュータにて有限要素解析を実行するに当たり、成形体を多数の要素セルの集合体としたもの）、図 1 1 b は加工率50%の据え込み加工後の解析モデルの変形の状態を示している。なお、図示する解析モデルは、成形体の左右で解析結果が同じになることから右側断面のみをモデル化したものである。

10

【 0 0 1 6 】

図 1 1 a で示すようにパンチにて成形体を押圧すると、図 1 1 b で示すように何等の拘束も受けていない成形体の自由端面が側方へ変形する。この側方への変形の際に、成形体の上面と下面はそれぞれ、パンチと下型から側方への変形方向とは逆方向のせん断摩擦力を受ける。その結果、成形体の中心領域がその周囲の領域に比して塑性変形が進行して高歪み領域となり、これに起因して結晶組織の配向乱れが生じ、残留磁化の低下を齎すとともに、材料歩留まりの悪化による製造コスト増といった問題に繋がる。

20

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 1 7 】

【 特許文献 1 】 特開平 2 - 2 5 0 9 2 0 号 公 報

【 特許文献 2 】 特開平 2 - 2 5 0 9 2 2 号 公 報

【 特許文献 3 】 特開平 2 - 2 5 0 9 1 9 号 公 報

【 特許文献 4 】 特開平 2 - 2 5 0 9 1 8 号 公 報

【 特許文献 5 】 特開平 4 - 0 4 4 3 0 1 号 公 報

【 特許文献 6 】 特開平 4 - 1 3 4 8 0 4 号 公 報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

30

【 0 0 1 8 】

本発明は上記する問題に鑑みてなされたものであり、成形体に据え込み加工である熱間塑性加工を施して配向磁石である希土類磁石を製造するに当たり、成形体に割れが生じることなく、しかも成形体の側方変形の際にパンチや下型から作用するせん断摩擦力による結晶組織の配向乱れが生じない希土類磁石の製造方法を提供することを目的とする。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 9 】

前記目的を達成すべく、本発明による希土類磁石の製造方法は、希土類磁石材料となる粉末を加圧成形して、柱状の成形体を製造する第 1 のステップ、前記成形体が収容されるキャビティを備えたダイスと該キャビティ内で摺動自在なパンチとからなる塑性加工型を用意し、前記キャビティは、前記成形体のパンチによる加圧方向と直交する断面よりも断面寸法の大きな断面を有しており、前記キャビティに成形体を収容してダイスの下型とパンチで挟み、該パンチと下型で成形体の上面と下面を直接押圧しながら異方性を与える熱間塑性加工を施して配向磁石である希土類磁石を製造する第 2 のステップからなり、前記第 2 のステップはさらに 2 つのステップから構成されており、最初のステップ A では、下型とパンチによる押圧によって、下型とパンチで押圧されていない自由端面である成形体の側面が側方に張り出して成形体の側方にあるダイスの側面型から加圧され、異方性の付与に必要な加工率に達する前の段階までパンチと下型による押圧を実行して配向磁石前駆体を製造するものであり、次のステップ B では、配向磁石前駆体の側面をダイスの側面型からの加圧のない自由端面に戻し、異方性の付与に必要な加工率に達するまで下型とパン

40

50

チによる押圧を実行して配向磁石を製造するものである。

【0020】

本発明の希土類磁石の製造方法は、据え込み加工に際してパンチによる一度の押圧によって所望の加工率まで熱間塑性加工を実行することに代わり、所望の加工率に達する前に2以上の段階に分けて熱間塑性加工を実行する方法である。そして、最初のステップ（ステップA）では、熱間塑性加工前の段階で成形体の側面がフリーな状態（自由端面）であったものが、所望の加工率に達する前の段階まで成形体を押圧した際に側面をダイスの側面型で加圧するようにしたものである。

【0021】

すなわち、成形体が組成変形してその側面が側方に変形し、この変形の過程でダイスの側面型に当接し、さらなるパンチによる押圧によって、成形体の側面はダイスの側面型から加圧されることになる。この成形体の側面の加圧により、成形体がパンチと下型から受ける、側方への変形方向とは逆方向のせん断摩擦力を相殺するような矯正力が付与され、このせん断摩擦力に起因する結晶組織の配向乱れを解消することができる。

【0022】

一方で、パンチにて押圧される成形体は、所望の加工率となる前段階まで熱間塑性加工されるステップAにおいて、自由に側方へ変形した後にダイスの側面型から拘束されることから、一度の熱間塑性加工にて所望の加工率が得られるとともに成形体の側面が常にフリーな状態である従来の製造方法の場合の割れの発生という問題も効果的に解消される。

【0023】

なお、熱間塑性加工を実行して配向磁石を製造する第2のステップに関しては、このステップを構成するステップAを一度実行した後にステップBに移行して配向磁石（希土類磁石）が製造される形態のほか、ステップAを2回以上実行した後にステップBに移行して配向磁石が製造される形態もある。

【0024】

また、第2のステップで用いられる塑性加工型の一つの実施の形態として、その構成要素であるダイスの側面型は分離自在もしくは可動自在に構成されており、第2のステップのステップAが終了した段階で該側面型が分離もしくは可動して配向磁石前駆体の側面から離れ、該側面の側方に空間を形成するように構成されている形態を挙げることができる。

【0025】

たとえばステップAを5回繰り返した後にステップBに移行して配向磁石を製造する場合には、各回のステップAが終了した段階でダイスの側面型を徐々に側方にスライドさせて固定し、次のステップAを実行すればよい。

【0026】

ここで、本発明の製造方法が製造対象とする希土類磁石には、組織を構成する主相（結晶）の粒径が200nm以下程度のナノ結晶磁石は勿論のこと、粒径が300nm以上のもの、さらには粒径が1 μ m以上の焼結磁石や樹脂バインダーで結晶粒が結合されたボンド磁石などが包含される。

【0027】

第1のステップでは、液体急冷にて微細な結晶粒である急冷薄帯（急冷リボン）を製作し、これを粗粉碎等して希土類磁石用の磁粉を製作し、この磁粉をたとえばダイス内に充填してパンチで加圧しながら焼結してバルク化を図ることで等方性の成形体を得られる。

【0028】

この成形体は、たとえばナノ結晶組織のRE-Fe-B系の主相（RE: Nd、Prの少なくとも一種で、より具体的にはNd、Pr、Nd-Prのいずれか一種もしくは二種以上）と、該主相の周りにあるRE-X合金（X: 金属元素）の粒界相からなる金属組織を有している。

【0029】

なお、第2のステップにて製造された配向磁石に対し、Nd-Cu合金、Nd-Al合金、Pr-Cu合金、Pr-Al合金等の改質合金を粒界拡散し、保磁力が一層高められた希土類磁石として

10

20

30

40

50

もよい。Nd-Cu合金の共晶点は520 程度、Pr-Cu合金の共晶点は480 程度、Nd-Al合金の共晶点は640 程度、Pr-Al合金の共晶点は650 程度であり、いずれもナノ結晶磁石を構成する結晶粒の粗大化を齎す700 ~1000 を大きく下回っていることから、希土類磁石がナノ結晶磁石の場合に特に好適である。

【発明の効果】

【0030】

以上の説明から理解できるように、本発明の希土類磁石の製造方法によれば、成形体を塑性加工型に収容して熱間塑性加工をおこなうに当たり、この熱間塑性加工を少なくとも2つのステップから実行し、最初のステップAにおいて下型とパンチによる押圧によって下型とパンチで押圧されていない自由端面である成形体の側面をダイスの側面型から加圧し、異方性の付与に必要な加工率に達する前の段階までパンチと下型による押圧を実行して配向磁石前駆体を製造し、次のステップBにおいて配向磁石前駆体の側面をダイスの側面型からの加圧のない自由端面に戻し、異方性の付与に必要な加工率に達するまで下型とパンチによる押圧を実行して配向磁石を製造するものである。この製造方法により、成形体がパンチと下型から受ける、側方への変形方向とは逆方向のせん断摩擦力を相殺するような矯正力を成形体に付与することができ、このせん断摩擦力に起因する結晶組織の配向乱れを解消するとともに熱間塑性加工の際の割れの発生も抑止することができ、高い配向度に起因した残留磁化の高い希土類磁石を高い材料歩留まりの下で製造することができる。

10

【図面の簡単な説明】

20

【0031】

【図1】(a)、(b)の順で本発明の希土類磁石の製造方法の第1のステップを説明した模式図である。

【図2】第1のステップで製造された成形体のミクロ構造を説明した図である。

【図3】製造方法の第2のステップで使用する塑性加工型を説明した模式図である。

【図4】(a)、(b)の順で第2のステップのステップAを説明したフロー図である。

【図5】(a)、(b)の順で第2のステップのステップBを説明したフロー図である。

【図6】製造された本発明の配向磁石(希土類磁石)のミクロ構造を説明した図である。

【図7】配向磁石の歪み分布を特定した解析結果を示した図である。

【図8】図7の実施例1におけるVIII部において、熱間塑性加工前から熱間塑性加工終了までの金属組織の変化状況を模擬したフロー図である。

30

【図9】摩擦係数と材料歩留まりの関係に関する解析結果を示した図である。

【図10】第2のステップのステップAにおける加工率と材料歩留まりの関係に関する解析結果を示した図である。

【図11】(a)は従来の据え込み加工による熱間塑性加工法において、加工前のパンチと下型で挟まれた成形体の解析モデルを示した図であり、(b)は加工率50%の据え込み加工後の解析モデルの変形の状態と歪み分布(解析結果)を示した図である。

【発明を実施するための形態】

【0032】

以下、図面を参照して本発明の希土類磁石の製造方法の実施の形態を説明する。なお、図示する製造方法は、その第2のステップにおいて、一度のステップAの後にステップBに移行して配向磁石を製造するものであるが、ステップAを2回以上実行した後にステップBに移行して配向磁石を製造する方法であってもよい。また、図示する配向磁石はナノ結晶磁石(粒径が300nm程度かそれ以下)からなる場合を説明したものであるが、本発明の製造方法が対象とする配向磁石はナノ結晶磁石に限定されるものではなく、粒径が300nm以上のものや、1 μ m以上の焼結磁石、さらには樹脂バインダーで結晶粒がバインドされたボンド磁石などを包含するものである。

40

【0033】

(希土類磁石の製造方法の実施の形態)

図1a、bはその順で本発明の希土類磁石の製造方法の第1のステップを説明した模式

50

図であり、図 2 は第 1 のステップで製造された成形体のミクロ構造を説明した図である。また、図 3 は本発明の製造方法の第 2 のステップで使用する塑性加工型を説明した模式図であり、図 4 は図 4 a、図 4 b の順で第 2 のステップのステップ A を説明したフロー図であり、図 5 は図 5 a、図 5 b の順で第 2 のステップのステップ B を説明したフロー図である。さらに、図 6 は製造された本発明の配向磁石（希土類磁石）のミクロ構造を説明した図である。

【 0 0 3 4 】

図 1 a で示すように、たとえば 50kPa 以下に減圧した Ar ガス雰囲気の不図示の炉中で、単ロールによるメルトスピニング法により、合金インゴットを高周波溶解し、希土類磁石を与える組成の溶湯を銅ロール R に噴射して急冷薄帯 B（急冷リボン）を製作し、これを粗粉碎する。

10

【 0 0 3 5 】

粗粉碎された急冷薄帯のうち、最大寸法が 200nm 程度かそれ以下の寸法の急冷薄帯 B を選別し、これを図 1 b で示すように超硬ダイス D とこの中空内を摺動する超硬パンチ P で画成されたキャビティ内に充填する。そして、超硬パンチ P で加圧しながら（X 方向）加圧方向に電流を流して通電加熱することにより、ナノ結晶組織の Nd-Fe-B 系の主相（50nm ~ 200nm 程度の結晶粒径）と、主相の周りにある Nd-X 合金（X: 金属元素）の粒界相からなる柱状の成形体 S を製作する（第 1 のステップ）。

【 0 0 3 6 】

ここで、粒界相を構成する Nd-X 合金は、Nd と、Co、Fe、Ga 等のうちの少なくとも 1 種以上の合金からなり、たとえば、Nd-Co、Nd-Fe、Nd-Ga、Nd-Co-Fe、Nd-Co-Fe-Ga のうちのいずれか一種、もしくはこれらの二種以上が混在したものであって、Nd リッチな状態となっている。

20

【 0 0 3 7 】

図 2 で示すように、成形体 S はナノ結晶粒 M P（主相）間を粒界相 B P が充満する等方性の結晶組織を呈している。

【 0 0 3 8 】

第 1 のステップで柱状の成形体 S が製造されたら、図 3 で示す塑性加工型 10 のキャビティ C a に成形体 S を移載し、ここで据え込み加工である熱間塑性加工をおこなう。

【 0 0 3 9 】

30

塑性加工型 10 は、ダイス 1 と成形体 S を直接押圧するパンチ 2 から構成され、ダイス 1 は、箱状を呈し、下型 1 a と側面型 1 b、1 d から構成され、この下型 1 a と側面型 1 b、1 d で画成されたキャビティ C a を 2 分する側面型 1 c（仕切り型）が収容された構成となっている。

【 0 0 4 0 】

キャビティ C a 内において、側面型 1 c は側方にスライド自在となっており、所望位置までスライドして位置決めされ、仮固定されるようになっている。

【 0 0 4 1 】

図示する塑性加工型 10 を適用した製造方法の第 2 のステップを図 4、5 を参照して説明する。より具体的には、図 4 は第 2 のステップのステップ A を説明した図であり、図 5 は図 4 に次いで第 2 のステップのステップ B を説明した図である。

40

【 0 0 4 2 】

図 4 で示す第 2 のステップのステップ A では、異方性の付与に必要な所望の加工率（たとえば 80%）のうち、その前段階の加工率（たとえば 40%）まで据え込み加工（熱間塑性加工）が実行され、次のステップ B において所望の加工率となるまで熱間塑性加工が実行される。まず、図 4 a で示すように、ダイス 1 を構成する側面型 1 b、1 c と下型 1 a で画成されたキャビティ C a 内に第 1 のステップで成形された成形体 S を収容し（成形体 S の下面 S b が下型 1 a に当接）、その上面 S a の上にパンチ P を載置する。

【 0 0 4 3 】

このキャビティ C a 内における成形体 S の収容姿勢において、成形体 S の一方の側面 S

50

cと側面型1cの間には空間Gが形成されており、したがって成形体Sの側面Scは自由端面となっている。なお、空間Gに存在している空気は不図示の空気抜き孔を介して脱気できるようになっている。

【0044】

次に、パンチ2にて成形体Sを押圧力P1で鉛直方向に押圧する。

【0045】

パンチ2で成形体Sを鉛直方向に押圧すると、図4bで示すように成形体Sは側方に變形して配向磁石前駆体S'となり、側面Scの側方にあった空間Gが配向磁石前駆体S'で満たされた状態となる。

【0046】

この状態でさらに成形体Sを押圧すると、塑性変形している配向磁石前駆体S'は、その上面S'a、下面S'bがパンチ2および下型1aで押圧され、さらに側面S'cが側面型1cから加圧力P2を受けて押し込まれ、したがって側面S'cはもはや自由端面ではなくなっている。

【0047】

このように所望の加工率の前段階の加工率まで押圧を終了するとともに、この段階で塑性変形する成形体Sの自由端面であった側面Scを拘束し、さらに加圧力を付与することにより、図11で説明したパンチや下型から成形体に作用するせん断摩擦力を相殺する方向に強制力が成形体に付与されることになり、据え込み加工の際に成形体の結晶組織に配向乱れが生じるといった問題が解消される。また、成形体の塑性変形の際に適度に側面が拘束されることから、熱間塑性加工の際に成形体に割れが生じるといった問題も効果的に解消される。なお、このせん断摩擦力の解消に関しては、その詳細を後述する。

【0048】

成形体Sに対して所望の加工率の前段階の加工率まで押圧がおこなわれて配向磁石前駆体S'が製造されたら、次に、第2のステップのステップBに移行する。まず、図5aで示すようにキャビティCa内に存在していた側面型1cを取り除き、使用するパンチをその平面積がダイス1の下型1aと同寸法および同形状のパンチ2Aに代え、このパンチ2Aで配向磁石前駆体S'を押圧力P3で鉛直方向に押圧する。

【0049】

パンチ2Aで配向磁石前駆体S'を鉛直方向に押圧すると、図5bで示すように配向磁石前駆体S'は側方に變形し、所望の加工率となるまでパンチ2Aで押圧することで配向磁石前駆体S'の側方にあった空間Gが配向磁石Cで満たされて配向磁石Cが製造される。

【0050】

ステップA、Bの2段階の熱間塑性加工によって製造された配向磁石Cは、図6で示すようにナノ結晶粒MPが扁平形状をなし、異方軸とほぼ平行な界面は湾曲したり屈曲していて、磁氣的異方性に優れた配向磁石Cとなっている。

【0051】

そして、このように所望の加工率になる前段階で熱間塑性加工を一端終了して配向磁石前駆体を製造し、この配向磁石前駆体の製造に当たって塑性変形の途中からその側面を拘束して加圧することにより、割れを生じさせることなく、高い配向度で残留磁化の高い希土類磁石を製造することができる。

【0052】

[配向磁石の歪み分布を特定した解析とその結果]

本発明者等は、成形体の側面を拘束することなく一度の熱間塑性加工にて所定の加工率まで熱間塑性加工をおこなった際の配向磁石(比較例1)における歪み分布、本発明の製造方法による配向磁石(実施例1)における歪み分布をそれぞれ解析にて特定した。この解析では、比較例1のモデルを加工率80%で熱間塑性加工し、実施例1のモデルは加工率40%、次いで80%と2段階で熱間塑性加工している。解析の結果を図7に示す。

【0053】

10

20

30

40

50

同図より、比較例1では、塑性変形したモデルの側方が自由端面のままであることから、塑性変形している成形体の上下面がパンチと下型からせん断摩擦力を受けている。

【0054】

一方、実施例1では、比較例1と同様に塑性変形している成形体の上下面がパンチと下型からせん断摩擦力を受けるものの、成形体の側面が側面型から加圧され、この加圧力によってせん断摩擦力を相殺する矯正力が付与される。

【0055】

実施例1において、せん断摩擦力による影響が大きな領域としてVIII部を取り上げ、このVIII部における熱間塑性加工途中の主相の変形や動き、配向の変化を図8にフロー図として示している。

10

【0056】

熱間塑性加工の途中で主相が側方に変形して扁平状を呈し、パンチから作用するせん断摩擦力によって主相が回転し、このせん断摩擦力の方向に主相の配向もひきずられるものの、側面型からの加圧によって矯正力が付与されてせん断摩擦力が相殺され、主相が回転しながらその配向が鉛直方向に戻される。最終的に所望の加工率まで熱間塑性加工が実行された段階で、磁化容易方向に歪みが矯正され、配向度が鉛直方向にほぼ揃った配向磁石となる。

【0057】

[摩擦係数と材料歩留まりの関係に関する解析とその結果]

本発明者等はさらに、成形体の側面を拘束することなく一度の熱間塑性加工にて所定の加工率まで熱間塑性加工をおこなった際の配向磁石(比較例2)、第2のステップがステップA、Bの2段成形からなる本発明の製造方法による配向磁石(実施例2)、第2のステップが6回のステップAと次のステップBの7段成形からなる本発明の製造方法による配向磁石(実施例3)の各配向磁石に関し、成形体とパンチおよび下型の間の摩擦係数を変化させた際の材料歩留まりを特定するCAE解析を実施した。

20

【0058】

本解析では、摩擦係数を0.1、0.2、0.3の3ケースで実施した。なお、摩擦係数0.2のケースはBN潤滑剤を使用している。解析結果を図9に示す。

【0059】

同図より、摩擦係数の増加に伴って材料歩留まりが低くなる傾向を示すことは比較例2、実施例2、3ともに同じであるものの、比較例2に比して2段成形の実施例2の材料歩留まりは5%も向上し、比較例2に比して7段成形の実施例3の材料歩留まりは10%も向上することが特定されている。

30

【0060】

[本発明の製造方法において第2のステップのステップAにおける加工率と材料歩留まりの関係に関する解析とその結果]

本発明者等はさらに、第2のステップがステップA、Bの2段成形からなり、成形体とパンチおよび下型の間の摩擦係数を変化させた際の材料歩留まりを特定するCAE解析を実施した。

40

【0061】

本解析においても、摩擦係数を0.1、0.2、0.3の3ケースで実施した。なお、摩擦係数0.2のケースはBN潤滑剤を使用している。解析結果を図10に示す。

【0062】

同図より、摩擦係数が0.2、0.3のケースでは加工率30%で材料歩留まりの最適値が得られ、摩擦係数が0.4のケースでは加工率40%で材料歩留まりの最適値が得られることが特定されている。この結果より、摩擦係数に応じてステップAにおける加工率を適宜変化させることにより、材料歩留まりの高い製造を実現できることが分った。

【0063】

以上、本発明の実施の形態を図面を用いて詳述してきたが、具体的な構成はこの実施形

50

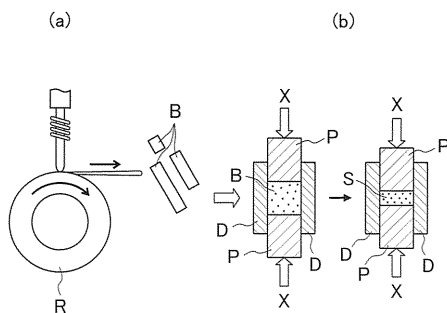
態に限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲における設計変更等があっても、それらは本発明に含まれるものである。

【符号の説明】

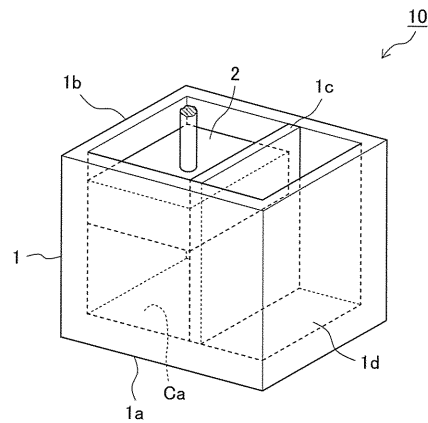
【 0 0 6 4 】

1 ... ダイス、1 a ... 下型、1 b、1 d ... 側面型、1 c ... 側面型（仕切り型）、2, 2 A ... パンチ、1 0 ... 塑性加工型、R ... 銅ロール、B ... 急冷薄帯（急冷リボン）、D ... 超硬ダイス、P ... 超硬パンチ、C a ... キャビティ、G ... 空間、S ... 成形体、S' ... 配向磁石前駆体、C ... 配向磁石（希土類磁石）、M P ... 主相（ナノ結晶粒、結晶粒、結晶）、B P ... 粒界相

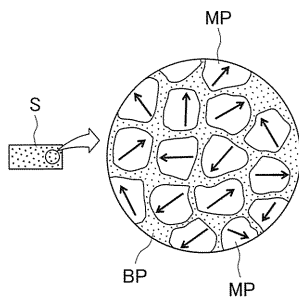
【 図 1 】



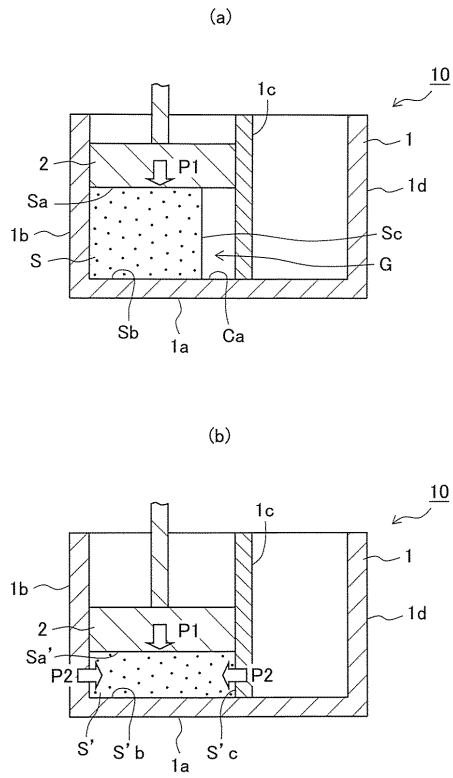
【 図 3 】



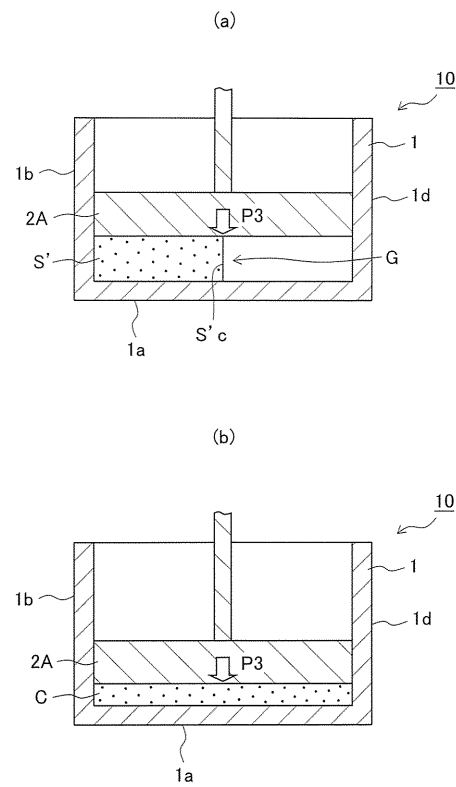
【 図 2 】



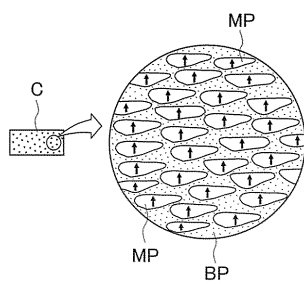
【図 4】



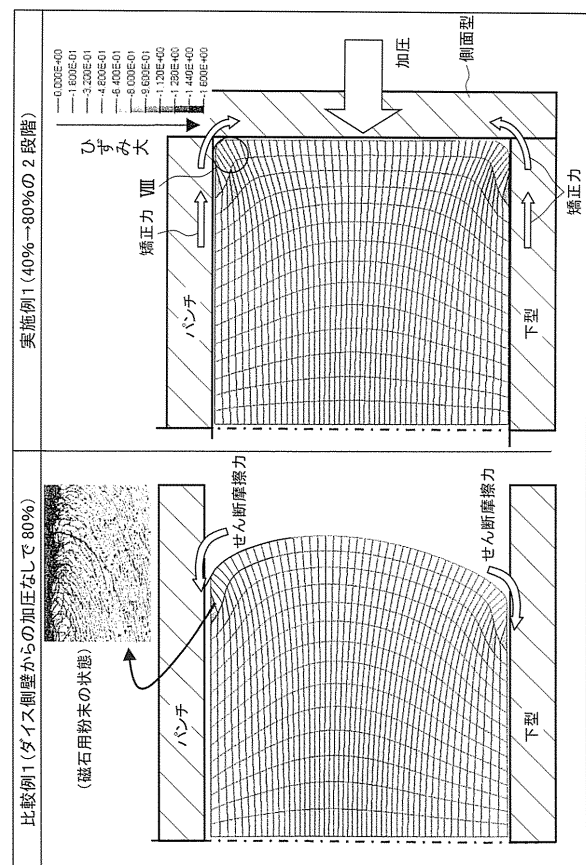
【図 5】



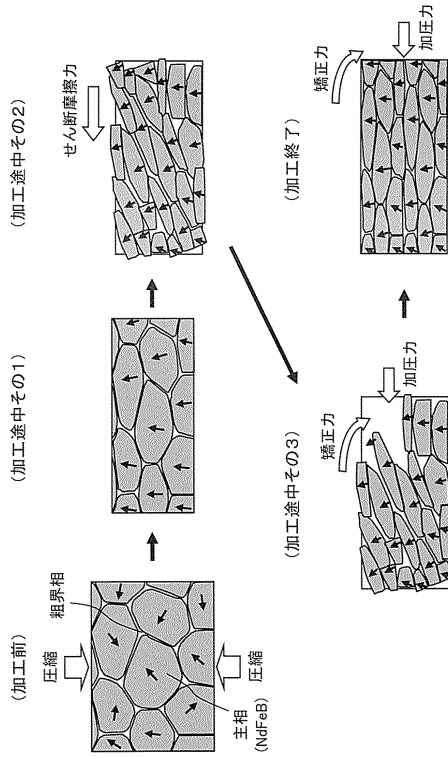
【図 6】



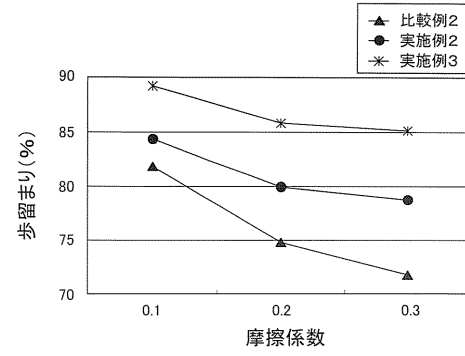
【図 7】



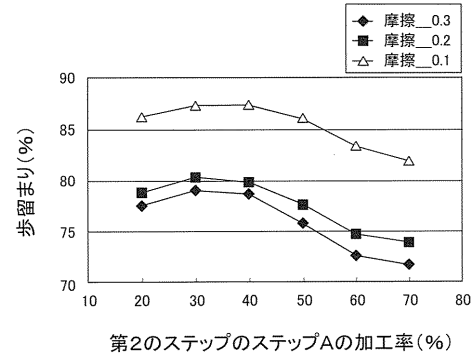
【図 8】



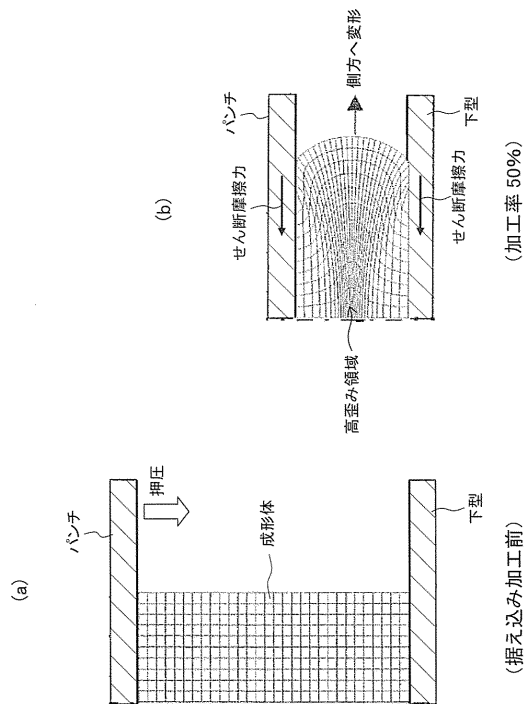
【図 9】



【図 10】



【図 11】



フロントページの続き

(72)発明者 横田 祐介
愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 トヨタ自動車株式会社内

(72)発明者 加納 彰
愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 トヨタ自動車株式会社内

F ターム(参考) 4K018 AA27 EA01 EA44 FA08 KA45
5E040 AA04 CA01 HB05
5E062 CD04 CE04 CE07 CF07 CG01