

(19) 日本国特許庁 ( J P )

(12) 特 許 公 報 ( B 2 )

(11) 特許番号

特許第3300810号  
(P3300810)

(45) 発行日 平成14年7月8日(2002.7.8)

(24) 登録日 平成14年4月26日(2002.4.26)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

G 0 1 N 27/72

G 0 1 N 27/72

請求項の数3(全 8 頁)

(21) 出願番号 特願平11-316851  
(22) 出願日 平成11年11月8日(1999.11.8)  
(65) 公開番号 特開2001-133440(P2001-133440A)  
(43) 公開日 平成13年5月18日(2001.5.18)  
審査請求日 平成11年11月8日(1999.11.8)

(73) 特許権者 597122725  
岩手大学長  
岩手県盛岡市上田三丁目18-8  
(72) 発明者 高橋 正氣  
岩手県盛岡市向中野字八日市場37番1  
(74) 代理人 100059258  
弁理士 杉村 暁秀 (外2名)

審査官 鈴木 俊光

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】 強磁性構造材の経年による実質的な応力の変化を定量的に求めることにより、強磁性構造材の強度の経年劣化を非破壊で測定する方法において、保磁力 $H_C$  および前記保磁力 $H_C$  における被測定強磁性構造材の磁化率  $H$  を測定により求め、材料の内部構造によって定まる既知の二つの定数  $a$  と  $n$  とを含む、実質的な引張応力  $\sigma$  を求める次式

$$\sigma = a (H_C / H)^n$$

に前記保磁力 $H_C$  と前記磁化率  $H$  との値を代入して、前記被測定強磁性構造材における実質的な引張応力  $\sigma$  を求め、

前記被測定強磁性構造材の前記実質的な引張応力  $\sigma$  と前記強磁性構造材の初期状態での引張応力  $\sigma_0$  とを比較して、経年による強磁性構造材の実質的な応力の変化を求

めることを特徴とする、強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法。

【請求項2】 前記初期状態での引張応力  $\sigma_0$  は、前記強磁性構造材に加わる力  $F$  と、その力の方向に直角な、前記強磁性構造材の断面の面積  $S$  とから次式

$$\sigma_0 = F / S$$

により求めることを特徴とする、請求項1記載の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法。

【請求項3】 前記初期状態での引張応力  $\sigma_0$  は、前記の式

$$\sigma_0 = a (H_C / H_0)^n$$

を用いて、前記実質的な引張応力  $\sigma$  と同様にして求めることを特徴とする、請求項1記載の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法。

【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、強磁性構造材またはそれを用いた強磁性構造体の経年による材料強度劣化を非破壊的に測定して定量的に求める方法に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】従来の一般的な非破壊検査方法は全て、亀裂の発生とその進展を調べることを目的としていた。その結果、現在の非破壊検査方法の発展の方向は、できる限り小さい亀裂の発生を発見することであり、かかる従来の非破壊検査方法では、亀裂が発生する前の段階での非破壊検査は行うことができなかった。

【0003】ところで、強磁性構造材またはそれを用いた強磁性構造体の経年による材料強度劣化を非破壊的に測定する方法として従来、被測定対象の強磁性構造材料または強磁性構造体についての保磁力を測定する方法および飽和磁化領域における磁化率を測定する方法も知られている。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、かかる被測定対象の強磁性構造材料等の保磁力を測定する従来の方法では、従来の飽和磁化領域における磁化率を測定する方法よりも感度が悪く、しかも劣化の進んだ強磁性構造材料等を測定するとさらに感度が悪くなってしまうことが知られている。

## 【0005】

【課題を解決するための手段およびその作用・効果】この発明は、上記課題を有利に解決した強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法を提供するものであり、

この発明の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法は、強磁性構造材の経年による実質的な応力の変化を定量的に求めることにより、強磁性構造材の強度の経年劣化を非破壊で測定する方法において、保磁力 $H_C$ および前記保磁力 $H_C$ における被測定強磁性構造材の磁化率 $H$ を測定により求め、材料の内部構造によって定まる既知の二つの定数 $a$ と $n$ とを含む、実質的な引張応力を求める次式

$$= a(H_C / H)^n \quad \dots (1)$$

に前記保磁力 $H_C$ と前記磁化率 $H$ との値を代入して、前記被測定強磁性構造材における実質的な引張応力を求め、前記被測定強磁性構造材の前記実質的な引張応力と前記強磁性構造材の初期状態での引張応力 $\sigma_0$ とを比較して、経年による強磁性構造材の実質的な応力の変化を求めることを特徴とするものである。

【0006】この発明の原理を、実際に行った試験データをもとにして説明する。鉄鋼材料の機械的性質と磁気的性質の相関関係を明らかにするため、単結晶純鉄、多結晶純鉄そして低合金鋼A533Bの試験材料をそれぞれ用いて、引張試験とヒステリシス磁化特性試験とを、図1に示す形状の試料でそれぞれ行った。なお、図1(a)は引張試験用試料の形状、(b)、(c)はヒステリシス磁化特性試験用試料の形状であり、(b)は、多結晶純鉄および低合金鋼A533Bに、(c)は単結晶純鉄にそれぞれ用いている。また表1は、試験に用いた低合金鋼A533Bの化学組成を示すものである。

## 【0007】

【表1】

A533B鋼	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Al
重量%	0.18	0.15	1.5	0.004	0.001	0.03	0.66	0.56	0.01

【0008】図2～図4は、引張試験の試験データより得られた応力-ひずみ特性を例示した図であり、図2は単結晶純鉄の試験結果を示しており、このときの変形速度(伸び率)は1.5%/分である。図3は多結晶純鉄の試験結果を示しており、このときの変形速度(伸び率)は1.2%/分である。図4は低合金鋼A533Bの試験結果を示しており、このときの変形速度(伸び率)は1.2%/分である。

【0009】図5および図6は、応力負荷を与えた状態でのヒステリシス磁化特性試験により得られた磁化曲線を示した説明図である。ここで、図5は単結晶純鉄の応力負荷(0MPa, 55MPa, 115MPa)による変形に伴うヒステリシス磁化特性の変化を示しており、図6は低合金鋼A533Bの応力負荷(0MPa, 550MPa, 663MPa)による変形に伴うヒステリシス磁化特性の変化を示している。なお、上記応力負荷の値は、先に引張試験を行った結果をもとにして、0MPa、破断直前の応力、およびそれらの間の応力

を選んでいる。

【0010】図5および図6に示すような磁化曲線から、個々の試料について、応力負荷に対する保磁力 $H_C$ (磁束密度 $B=0$ の時の磁界強度 $H$ )を求めることができる。そして、応力負荷に対して、保磁力 $H_C$ をプロットすると、図7のようになる。なお、単結晶純鉄については(黒三角)、多結晶純鉄については(黒丸)、低合金鋼については(黒菱形)でそれぞれプロットしている。

【0011】また、図5および図6に示す磁束密度 $B=0$ 付近での磁化曲線の傾きから、保磁力 $H_C$ における磁化率 $H$ を求めることができ、これにより個々の試料について、保磁力 $H_C$ と磁化率 $H$ との比 $A = H_C / H$ を求めて、応力負荷の対数 $\log(\sigma)$ に対して、保磁力 $H_C$ と磁化率 $H$ との比 $A$ の対数 $\log(A)$ をプロットすると、図8のようになる。なお、単結晶純鉄については(黒三角)、多結晶純鉄については(黒丸)、低合金

鋼については（黒菱形）でそれぞれプロットしている。

【0012】かかる図8より、応力負荷  $\sigma$  と、保磁力  $H_c$  と磁化率  $\chi_H$  との比  $A$  との関係は次式

$$\log(\sigma) = \log(a) + n \log(A) \quad \dots (3)$$

すなわち上記(1)と同じ内容を示す次式（ここでは、 $A = H_c / \chi_H$  としている。）

$$\sigma = a(A)^n \quad \dots (4)$$

なる一つの関係式であらわすことができることが、本願発明者の研究により判明した。ここで、 $a$ 、 $n$ は材料の結晶構造によって定まる定数であり、このように一つの関係式（(4)式）に載ったのは、試験に用いた単結晶純鉄、多結晶純鉄および低合金鋼A533Bは共に体心立方(BCC)構造を有しており鉄原子が主な成分であるためと推定される。

【0013】従って、応力負荷が不明の状態でも、ヒステリシス磁化特性試験によって、保磁力  $H_c$  と磁化率  $\chi_H$  との比  $A$  を求めて、上記(4)式にその比  $A$  の値を代入することで、その応力負荷  $\sigma$  を求めることができ、この応力負荷  $\sigma$  は機械強度パラメータとなる。

【0014】なお、保磁力  $H_c$  と磁化率  $\chi_H$  との比  $A$  は、巻線を設けた磁気ヨークまたは対象物自体に設けた巻線を用いて非破壊的にヒステリシス磁化特性を測定することで求めることができる。

【0015】それゆえ、この発明の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法によれば、測定により保磁力  $H_c$  およびその保磁力  $H_c$  における磁化率  $\chi_H$  を求めて、保磁力  $H_c$  と磁化率  $\chi_H$  との比  $A$  ( $H_c / \chi_H$ ) の値を、材料の内部構造によって定まる既知の二つの定数  $a$  と  $n$  とを含む、実質的な引張応力  $\sigma$  を求める次式

$$\sigma = a(A)^n$$

に代入して、被測定強磁性構造材における実質的な引張応力  $\sigma$  を求め、被測定強磁性構造材の実質的な引張応力  $\sigma_0$  と強磁性構造材の初期状態での引張応力  $\sigma_0$  とを比較することで、経年による強磁性構造材の応力の変化を定量的に求めることができる。

【0016】すなわち、構造材が長期間に亘って応力負荷状態にあると、内部欠陥や転位の増加等によりその構造材中で内力を負担し得る微少部分が減少し、実質的な応力負荷が増加する。この発明の方法は、その実質的な応力負荷の増加を従来よりも極めて低い磁界強度で正確に測定し得て、材料の経年劣化を非破壊で測定することができるものである。

【0017】しかも、従来行われている方法では、被測定対象の強磁性構造材料等の保磁力を測定により求めて、その保磁力と実質的な引張応力との関係から経年劣化を評価するので、上記図7に示すように、引張応力の最小値と最大値との間で、保磁力  $H_c$  が数十倍程度の変化するのに止まり、その評価のための数値範囲が狭かったのに対し、この発明の方法では、実質的な引張応力  $\sigma$  と、保磁力  $H_c$  と磁化率  $\chi_H$  の比  $A$  との関係から経年劣化を評価することから、図7に対応する、引張応力  $\sigma$  の最小値と最大値との間で、表2に示すように、 $A$  の値が  $2.3 \times 10^{-6}$  から  $1.8 \times 10^{-2}$  までのおよそ8000倍程度変化するので、上記図8に示されているように、評価するための数値範囲が広がる。このことから、被測定対象の強磁性構造材料等の経年劣化を評価するための実質的な引張応力の感度が極めて良くなることが分かった。

【0018】

【表2】

試料	引張応力 $\sigma$ (Mpa)	保磁力 $H_c$ (Oe)	磁化率 $\chi_H$ (Gauss/Oe)	$A (H_c / \chi_H)$
単結晶純鉄	0	0.24	102450	$2.3 \times 10^{-6}$
A533B鋼	663	13.74	765.78	$1.8 \times 10^{-2}$

【0019】また、図9は応力負荷  $\sigma$  と転位密度  $\rho$  との関係を実験結果に基づいて示す説明図であり、ここでは、上述した図5および図6に結果を示す如き応力負荷を与えた状態でのヒステリシス磁化特性試験を行なった試験片につき、その試験で与えた応力負荷  $\sigma$  毎に、電子顕微鏡で観察して、転位密度  $\rho$  を測定している。なおここでも、単結晶純鉄については（黒三角）、多結晶純鉄については（黒丸）、低合金鋼については（黒菱形）でそれぞれプロットしている。この結果から、応力負荷  $\sigma$  と転位密度  $\rho$  との間には簡単な関係があることが確認され、しかも変位密度と劣化とは一定の関係があることは従来から知られている。それゆえ上記測定結果から、実質的な引張応力が判明すればその引張応力から劣化の程度を非破壊的に求め得ることが証明された。

【0020】従って、この発明の方法によれば、単結晶の強磁性構造材だけでなく、多結晶の強磁性構造材や低合金鋼にも適用し得て、亀裂が発生する前段階での転位密度及びその分布の変化を非破壊的に検査できるとともに、劣化の進んだ強磁性構造材料等を測定する場合であっても、劣化の状態を、高感度に測定することができる。

【0021】なお、この発明の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法では、上述した初期状態での引張応力  $\sigma_0$  は、強磁性構造材に加わる力  $F$  と、その力の方向に直角な、前記強磁性構造材の断面の面積  $S$  とから次式

$$\sigma_0 = F / S \quad \dots (5)$$

により求めても良く、このようにすれば、強磁性構造材

に加わっている外力や内力の値が分かる場合に、上記(5)式から  $\sigma_0$  を容易に計算できる。

【0022】また、この発明の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法では、上述した初期状態での引張応力  $\sigma_0$  は、上記(4)式を用いて、上述の如く実質的な引張応力  $\sigma$  と同様にして求めても良く、このようにすれば、強磁性構造材に加わっている外力や内力の値が分からない場合であっても、初期状態での実質的な引張応力  $\sigma_0$  を容易に求めることができる。

【0023】

【発明の実施の形態】以下に、この発明の実施例の形態を実施例によって、図面に基づき詳細に説明する。図10は、この発明の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法の第1実施例を示す説明図である。図中符号1は、何らかの外力や内力が加わっている、強磁性構造材によって構成された被測定強磁性構造体、2は励磁巻線、3は磁束検出巻線、4はそれらの巻線が巻かれた磁気ヨークであり、ここでは、図10に示すように、励磁巻線2と磁束検出巻線3とを直接巻けない形状の被測定強磁性構造体1に対し、励磁巻線2と磁束検出巻線3とを有する磁気ヨーク4を密着させ、磁気閉回路5を形成する。6は、上記励磁巻線2と磁束検出巻線3とが接続されたヒステリシス磁化特性測定装置であり、このヒステリシス磁化特性測定装置6には、一般の市販品を用いることができる。また7は、この実施例を実施した結果として、ヒステリシス磁化特性測定装置6に表示される、被測定強磁性構造体1のヒステリシス磁化特性である。

【0024】この実施例の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法によれば、ヒステリシス磁化特性測定装置6より励磁巻線2に励磁電流が供給され、このとき磁束検出巻線3に誘起した電圧が、ヒステリシス磁化特性測定装置6に導かれて増幅積分され、その結果ヒステリシス磁化特性7が得られる。

【0025】上述した測定により得られたヒステリシス磁化特性7は、被測定強磁性構造体1の内部での3次元磁路の広がりや反磁界係数の影響による誤差を含んだものである。ゆえに、この誤差を除去したヒステリシス磁化特性を得るための補正係数を求める必要があるが、この補正係数は、既知の静磁界解析手法を用いた計算機実験あるいは実測定体系を模擬したモックアップ実験により前もって求めておくことができる。

【0026】上述の擬似的ヒステリシス磁化特性により、先に図5、図6から求めたのと同様にして、保磁力  $H_C$  およびその保磁力  $H_C$  における曲線の傾きである磁化率  $\mu$  とを求め、それらの比  $H_C / \mu$  を  $A$  として計算により求めてその  $A$  を上記(4)式に示す次式、

$$\sigma = a(A)^n \cdots (4)$$

に代入することで何らかの外力や内力が加わっている被測定強磁性構造体1の内部の実質的な引張応力  $\sigma$  を求め

ることができる。

【0027】ここで、上記(4)式に含まれている  $a$ 、 $n$  は、材料の内部構造によって定まる定数であるが、被測定強磁性構造体1について、それらの定数  $a$ 、 $n$  を被測定強磁性構造体1と同種の材料のテストピースで前もって求めておき、それらの定数を用いて上記(4)式を図示すると、保磁力  $H_C$  とその保持力  $H_C$  における磁化率  $\mu$  との比  $A$  と引張応力  $\sigma$  との関係が、図11に示す校正直線8のようになる。この校正直線8から、上述の測定で求めた保磁力  $H_C$  と磁化率  $\mu$  との比  $A$  に対応する、実質的な引張応力  $\sigma$  が容易に求められる。

【0028】ところで、被測定強磁性構造体1について経年劣化の程度の基準となる、その強磁性構造体1の初期状態での引張応力  $\sigma_0$  を求めておく必要があるが、初期状態での引張応力  $\sigma_0$  は、被強磁性構造体1に加わっている力の方向および大きさが分かる場合、その力  $F$  と、その力の方向に直角な、前記強磁性構造体の断面の面積  $S$  とから上記(5)に示す次式

$$\sigma_0 = F / S \cdots (5)$$

により求められる。

【0029】この一方、その被強磁性構造体1に加わっている力の方向および大きさが分からない場合には、上記(4)式を用いて、実質的な引張応力  $\sigma$  と同様にして、初期状態での引張応力  $\sigma_0$  を求めておく。

【0030】上記で求めた実質的な引張応力  $\sigma$  と、被測定構造体1の初期状態での引張応力  $\sigma_0$  とを比較するために、実質的な引張応力  $\sigma$  と被測定構造体1の初期状態での引張応力  $\sigma_0$  との差  $\Delta\sigma$  を求めると、この  $\Delta\sigma$  は被測定構造体の経年による機械強度の劣化の程度を示すパラメータとなることから、強磁性構造体の経年による劣化の程度を非破壊的に測定できる。

【0031】従って、この実施例の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法によれば、磁気ヨークと励磁電源からなる測定装置による測定で、保磁力  $H_C$  が求められる程度の磁界強度  $H$  によって得られた擬似的なヒステリシス磁化曲線から保磁力  $H_C$  と磁化率  $\mu$  との比  $A$  の値を計算し、図11に例示する如き引張応力  $\sigma$  と比  $A$  との関係を示す校正直線8から、比  $A$  の値に対応する実質的な引張応力  $\sigma$  の大きさを非破壊で正確に求めることができ、経年劣化した材料とその材料の初期状態とを比較することで、強磁性構造材の経年劣化の程度を非破壊的に測定できる。それゆえこの実施例の方法によれば、単結晶の強磁性構造材だけでなく多結晶の強磁性構造材や低合金鋼にも適用できることから、原子炉圧力容器等、強磁性構造材で製造される全ての構造物の経年劣化を、亀裂が発生する前段階での転位密度及びその分布の変化から非破壊的に正確に検査できて、その程度を高感度に測定することができる。

【0032】図12は、この発明の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法の第2実施例を示す説明図

である。この実施例では、第1実施例と異なり、何らかの外力や内力が加わっている被測定構造体1が、励磁巻線2と磁束検出巻線3とを直接巻ける形状を有していることから、その被測定構造体1に、励磁巻線2と磁束検出巻線3とが直接巻かれている。ここでも、ヒステリシス磁化特性測定装置6には、先の第1実施例と同様に、一般の市販品を用いることができる。また、9は、この実施例を実施した結果として、ヒステリシス磁化特性測定装置6に表示されるヒステリシス磁化特性である。

【0033】この実施例では、先の第1実施例と同様にして、測定により得られたヒステリシス磁化特性9から、 $H_C$ と磁化率  $\mu$ との比Aの値を求め、その比Aの値から実質的な引張応力  $\sigma$  を求める。そしてその被測定構造体1の初期状態での引張応力  $\sigma_0$  と実質的な引張応力  $\sigma$  との差  $\Delta\sigma$  を求めることで、実質的な引張応力  $\sigma$  と、被測定構造体1の初期状態での引張応力  $\sigma_0$  とを比較することができる。

【0034】この実施例の方法によれば、上記第1実施例と同様の効果が得られることに加えて、磁気ヨークを使用しなくてすむことから、装置の単純化及び軽量化を図ることができる。

【0035】以上、図示例に基づき説明したが、この発明は上述の例に限定されるものではなく、例えば、上記実施例では構造体について測定したが、構造体用の構造材についても測定し得ることはいうまでもない。また、この発明の方法の各工程を実施する手段を組合わせて、経年劣化測定装置を構成することもできる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 引張試験とヒステリシス磁化特性試験との試料の形状を示す斜視図及び正面図である。

【図2】 単結晶純鉄の引張試験の結果を例示する応力-ひずみ特性を示す説明図である。

【図3】 多結晶純鉄の引張試験の結果を例示する応力-ひずみ特性を示す説明図である。

【図4】 低合金鋼A533Bの引張試験の結果を例示する応力-ひずみ特性を示す説明図である。

【図5】 単結晶純鉄の応力負荷(0MPa, 55MPa, 115MPa)による変形に伴うヒステリシス磁化特性の変化を示す試験結果を例示する説明図である。

【図6】 低合金鋼A533Bの応力負荷(0MPa, 550MPa, 633MPa)による変形に伴うヒステリシス磁化特性の変化を示す試験結果を例示する説明図である。

【図7】 供試体試料の引張応力と保磁力 $H_C$ と磁化率 $\mu$ との比Aとの関係を試験結果により例示する説明図である。

【図8】 供試体試料の引張応力の対数 $\log(\sigma)$ と、保磁力 $H_C$ と磁化率 $\mu$ との比Aの対数 $\log(A)$ との関係を実験結果により示す説明図である。

【図9】 応力負荷 $\sigma$ と転位密度 $\rho$ との関係を実験結果に基づいて示す説明図である。

【図10】 この発明の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法の第1実施例を示す説明図である。

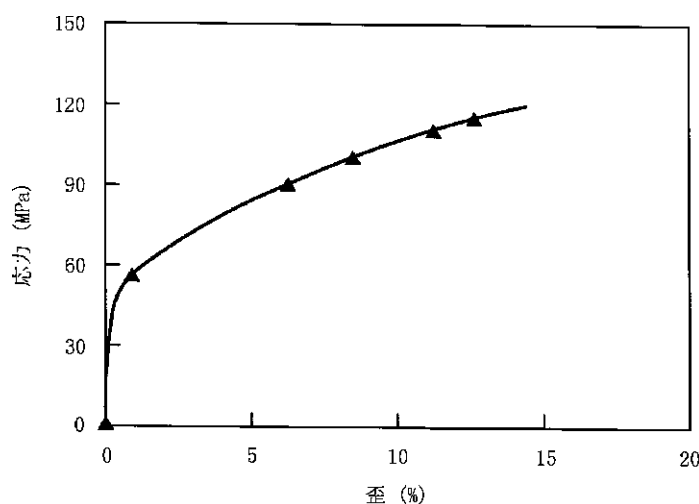
【図11】 保磁力 $H_C$ と磁化率 $\mu$ との比Aに対応する実質的な引張応力 $\sigma$ から経年による強磁性構造材の変化を求める方法を例示する説明図である。

【図12】 この発明の強磁性構造材の強度の経年劣化の非破壊測定方法の第2実施例を示す説明図である。

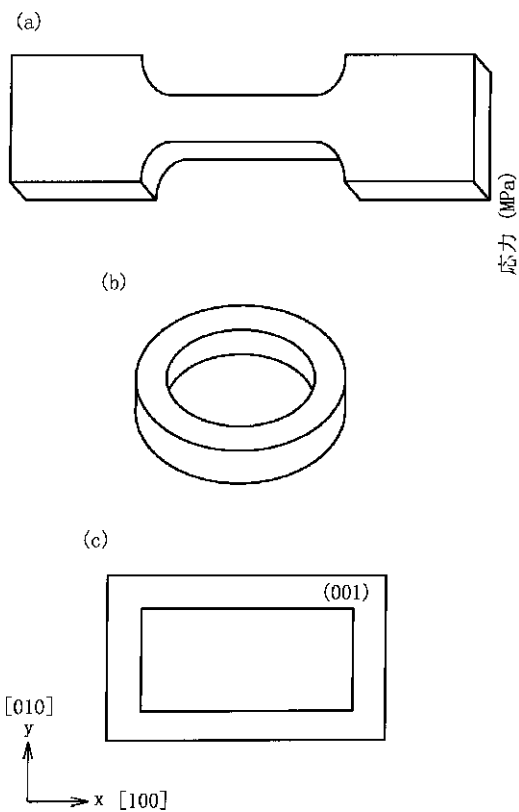
#### 【符号の説明】

- 1 被測定強磁性構造体
- 2 励磁巻線
- 3 磁束検出巻線
- 4 磁気ヨーク
- 5 磁気閉回路
- 6 ヒステリシス磁化特性測定装置
- 7 第1実施例のヒステリシス磁化特性
- 8 校正直線
- 9 第2実施例のヒステリシス磁化特性

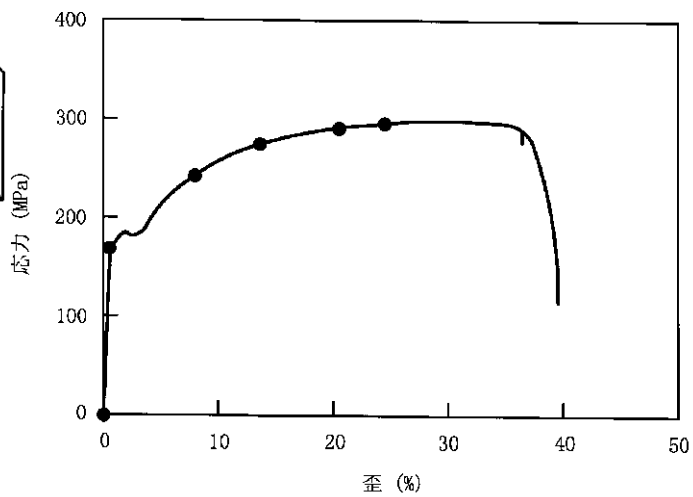
【図2】



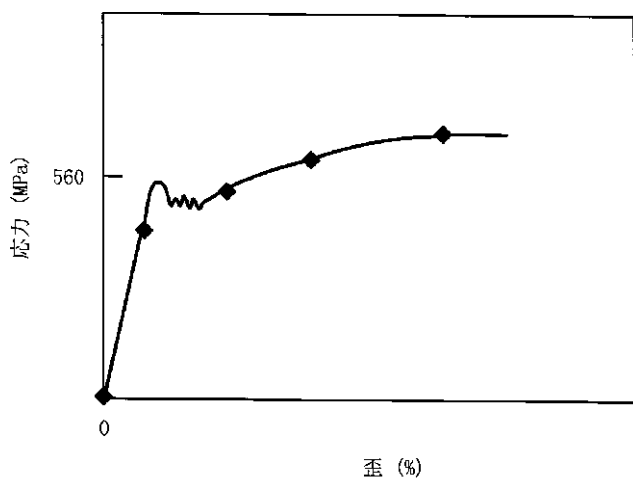
【図1】



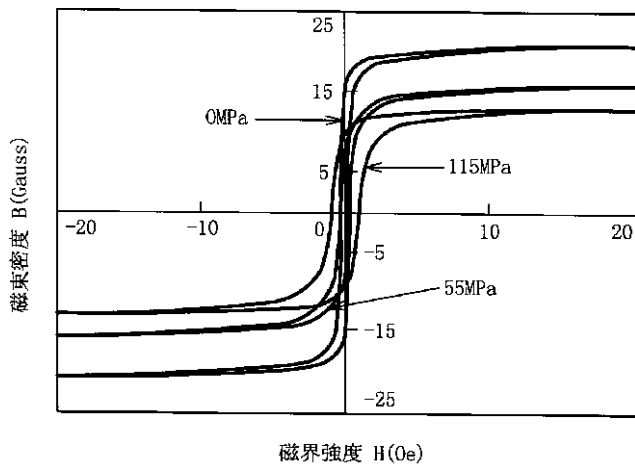
【図3】



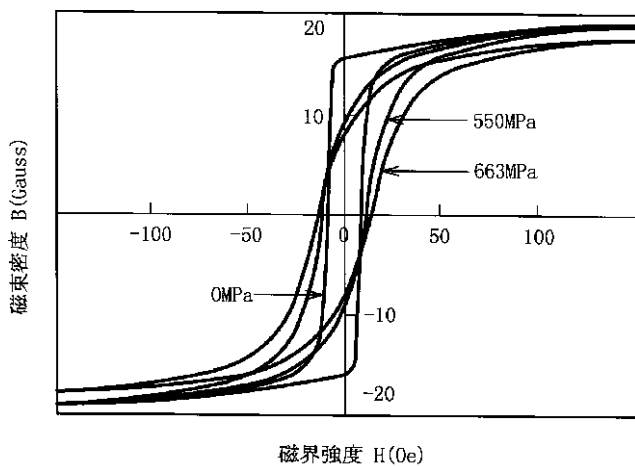
【図4】



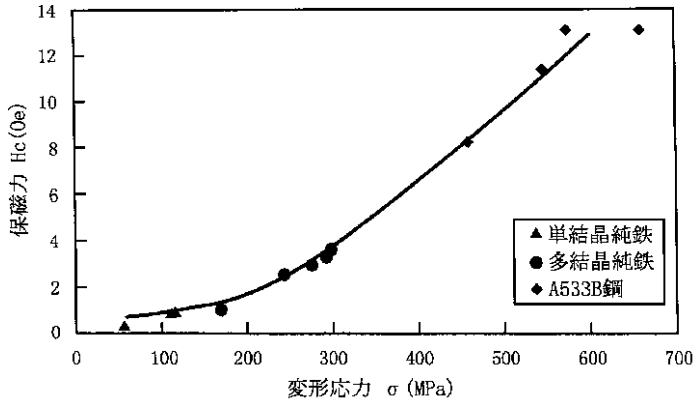
【図5】



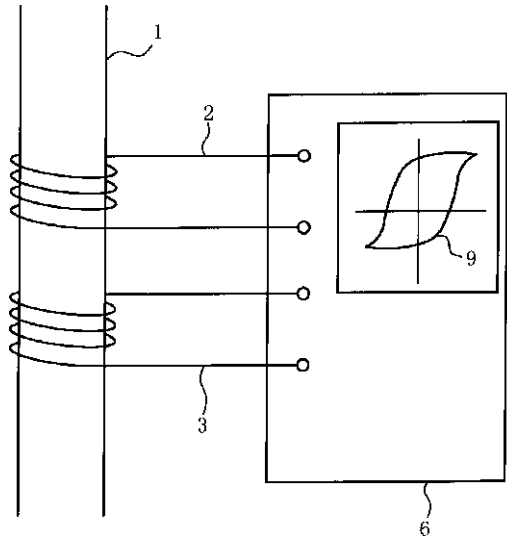
【図6】



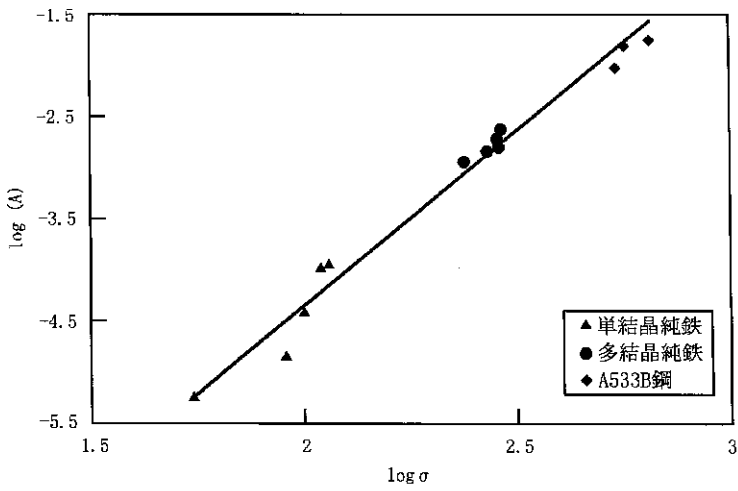
【図7】



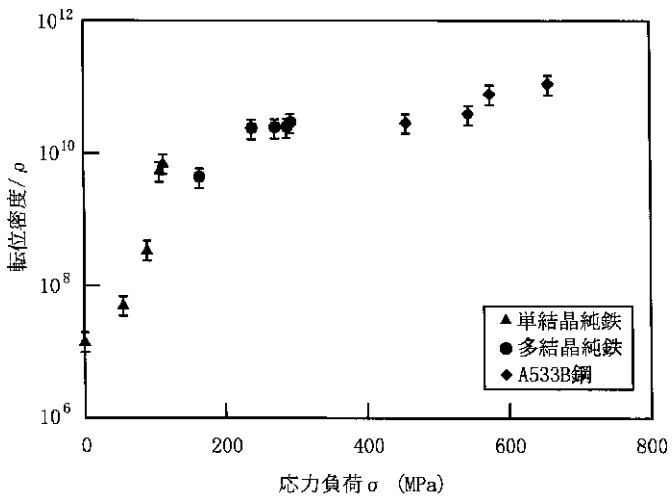
【図12】



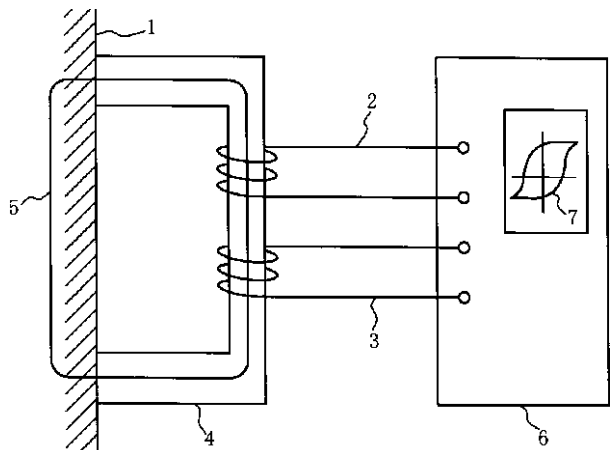
【図8】



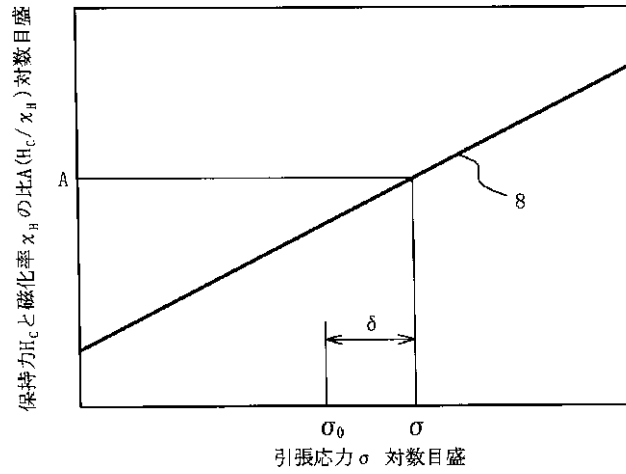
【図9】



【図10】



【図11】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開 平8 - 248004 (JP, A)  
 特開 平1 - 269049 (JP, A)  
 特公 昭54 - 3755 (JP, B1)  
 山崎慶太 他7名, 引張加重負荷時の  
 磁化特性に着目した構造材の劣化評価,  
 日本応用磁気学会誌, 日本, (社)日本  
 応用磁気学会, 1999年 4月15日, Vo  
 l. 23 No. 4 - 2, p. 1541 - 1544

(58)調査した分野(Int.Cl.7, DB名)  
 G01N 27/72 - 27/90  
 JICSTファイル(JOIS)