

Nd 系希土類焼結磁石の強度評価手法

Strength Evaluation Method for Nd-Fe-B Rare Earth Sintered Magnet

柳 木 孝 昭*
Takaaki NAGI

喜 多 晃 義*
Teruyoshi KITA

要 旨

Nd 系希土類焼結磁石の組織に起因する特有の強度特性を評価するためにワイブル理論の適用を検討した。ワイブル理論の適合性の判断は、ワイブル分布との相関とサイズが大きくなるほど強度が低下するというサイズ効果により検証した。ワイブル分布との相関については抗折強度のワイブルプロットの近似曲線が高い相関を示すことが検証できた。また、サイズ効果については応力分布により決まる有効体積と破壊応力が一定の関係になることが検証できた。この結果、この磁石の強度にはワイブル理論が適合すると判断した。さらに、実際のモータのロータに組み込んだ磁石の強度についても検証を行い、この理論の適用が可能であることを実証した。

ABSTRACT

Application of the Weibull theory to a Nd-Fe-B rare earth sintered magnet was studied for use in evaluating the specific strength characteristics arising from the structure of this magnet. Conformity of the Weibull theory was verified by the correlation with the Weibull distribution and by the existence of the size effect, whereby the strength loses as the size is bigger. The correlation with the Weibull distribution was verified by the close correlation shown with a curve closely approximating a Weibull plot. And the existence of the size effect was verified that there is a fixed relationship between effective volume, that determined by the stress distribution and fracture stress. Consequently, it was judged that the Weibull theory is in conformity with evaluation of the strength of this magnet. The strength of this magnet actually built into the rotor of a motor was also verified, and the applicability of this theory to this magnet was demonstrated.

まえがき

近年の磁石材料の進歩により磁気特性の優れた Nd 系希土類焼結磁石(以下 Nd 系磁石)が低コストで入手可能となり、現在ではこれらの磁石を採用した永久磁石モータがEV(Electric Vehicle)やHEV(Hybrid Electric Vehicle)用の駆動モータの大部分を占めている。

また、これらのモータでは低コスト化とともに高効率化、高回転化そして軽量化などが非常に重要な課題であり、これらの課題を解決するにはFig. 1に示すような、磁石をヨーク内部に埋め込む IPM(Interior Permanent Magnet)方式などのロータ構造を採用することが有効である。

このような IPM 方式などのロータ構造ではモータ回転中に磁石や電磁鋼板に遠心力により応力が発生するため、

それらの強度の把握が非常に重要となっている(Fig. 2)。しかし、Nd 系磁石の強度についてはほとんど解析された例がない。

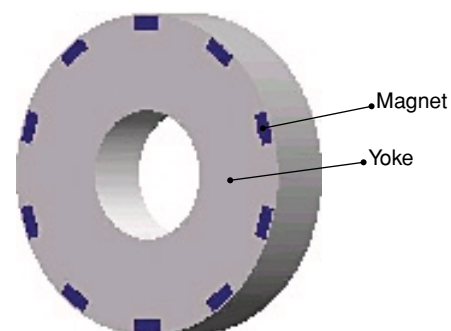


Fig. 1 IPM rotor

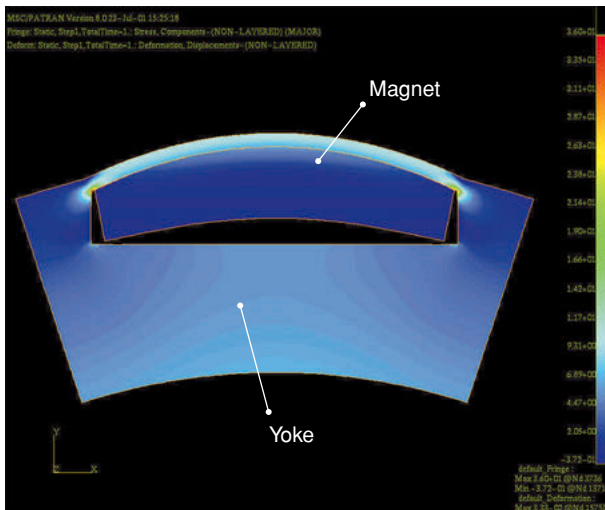


Fig. 2 Stress distribution of IPM rotor

そこで、今回 Nd 系磁石の強度評価にワイブル理論を適用しその妥当性を検証した。

1. Nd 系磁石の特徴

Nd 系磁石の組織モデルを Fig. 3 に示す。Nd 系磁石は $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ からなる主相と Nd-rich の粒界相が大部分を占め、これらは磁気特性発現に重要な役割を果たす。それ以外に微量の不純物(酸化物及び炭化物など)及び焼結製法ゆえ根絶困難な空隙が混在した組織を呈している。Fig. 4 に Nd 系磁石の荷重-ひずみ線図を示す。塑性変形すること無しに破断している(脆性破壊)が、これは主相が硬くてもろい金属間化合物であるためと考えられる。さらに、Fig. 5 に破壊応力値のヒストグラムを示す。グラフから破壊応力は低応力側に広がった大きなバラツキを有している。これは、不純

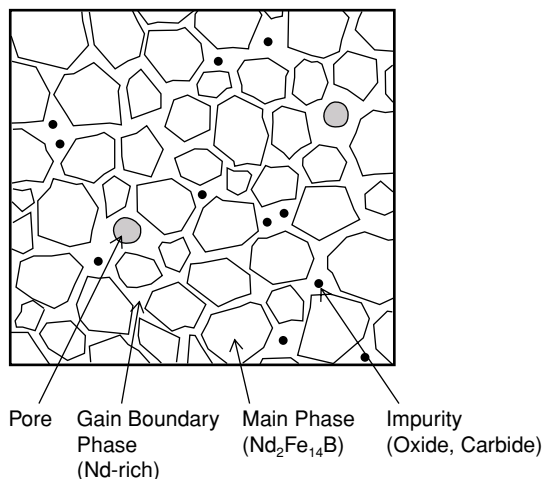


Fig. 3 Nd-Fe-B model

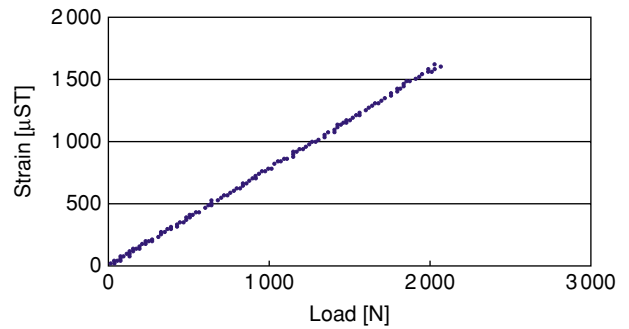


Fig. 4 Relationship between load and strain

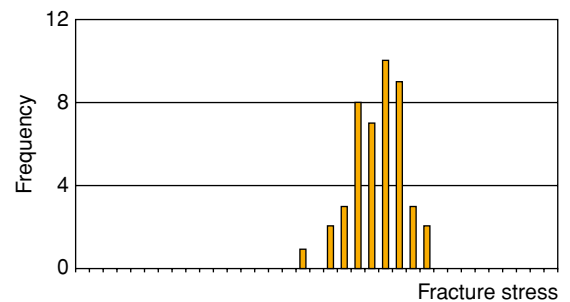


Fig. 5 Fracture test result

物や空隙の影響を受けているためと考えられる。以上のように Nd 系磁石は、特有な組織のために一般鋼とは異なる強度特性をもつ。したがって、その特性に見合った評価手法や設計手法が必要である。

2. ワイブル理論

このような Nd 系磁石の強度を定量化するためには統計確率論が有効である。以下にその考え方の基本となる部分について記述する。

2.1. 最弱リンク説

Nd 系磁石は強度バラツキが大きい。これは、材料内に多くの微小な欠陥が存在し、その欠陥から亀裂が伝ばし破壊に至るためと考えられる。このため、この破壊強度は材料に発生している応力だけに依存するのではなく、内部の欠陥の大きさや数などによっても支配される。

また、欠陥の大きさは数 μm 程度であることから非破壊で検出することは現在の計測技術では不可能である。この結果、破壊特性を個々に予測することは不可能となっている。

このような特徴をもつ材料をモデル化するためには最弱リンク説が有効である。最弱リンク説が成立するためには次の3項目が必要条件となる。

- ①脆性破壊である。
- ②亀裂が互いに干渉しない。
- ③単位体積中の欠陥が一定である。

以上の条件を満足すればN個の欠陥を含む材料の強度はFig. 6のようにN個のリンク(環)の連なりでできた鎖の破断強度にモデル化できる。Fig. 6の鎖を徐々に強く引くとついにはN個のリンクのうち最も弱いものが破断に至り、結果として他のリンクは破断しなくても鎖としては破断したことになる。すなわち、鎖の強度は最も弱いリンクの強度で決定される。これが最弱リンク説である。

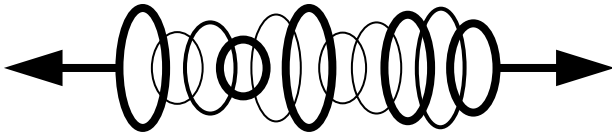


Fig. 6 Weakest link model

2.2. ワイブル理論⁽¹⁾⁽²⁾

N個の連なるリンクの生存確率 S_N は破壊確率を F_N としたとき次式で表される。

$$S_N = 1 - F_N = (1 - F(\sigma))^N \quad (1)$$

$$\doteq \exp(-N \cdot F(\sigma))$$

$F(\sigma)$: 応力 σ を受けたリンクの破壊確率

このとき“破壊の危険率”といわれる R_a を用いると、これもまた応力の関数であるので(1)式は次のようになる。

$$F(\sigma, v) = 1 - \exp\left(-\int_v R_a \cdot dV\right) \quad (2)$$

$$= 1 - \exp\left(-\int_v f(\sigma) \cdot dV\right)$$

ここで、 v 及び V は任意の体積を表す。

このときワイブルは実験結果から次式で表される累乗則を仮定した。

$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_\omega}{\sigma_0}\right)^m \quad (3)$$

ここで、 m , σ_ω , σ_0 は材料固有の定数である。従って、(2)式は以下のようになる。

$$F(\sigma, v) = 1 - \exp\left\{-\int_v \left(\frac{\sigma - \sigma_\omega}{\sigma_0}\right)^m dV\right\} \quad (4)$$

この(4)式がワイブル分布関数と呼ばれ σ_ω は一般には過大評価となることを防ぐため $\sigma_\omega = 0$ とされる。

$$\therefore F(\sigma, v) = 1 - \exp\left\{-\int_v \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m dV\right\} \quad (5)$$

ここで、(6)式で定義される有効体積 VE を用いると

$$VE = \int_v \left(\frac{\sigma}{\sigma_R}\right)^m dV \quad (6)$$

$$F(\sigma, v) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma_R}{\sigma_0}\right)^m VE\right\} \quad (7)$$

(5)式は(7)式のように簡略化できる。

さらに、この式を使って破壊確率が一定のもとでは体積 VE_1 の試験片の強度 σ_{R1} から体積 VE_2 の対象物の強度 σ_{R2} を得ることができる。

$$\therefore \frac{\sigma_{R2}}{\sigma_{R1}} = \left(\frac{VE_1}{VE_2}\right)^{1/m} \quad (8)$$

3. ワイブル理論の磁石への適用

3.1. 試験方法

Nd系磁石の強度測定方法はファインセラミックスの試験方法(JIS R1601)を参考に以下のように定めた(Fig. 7)。

- ・試験片形状 : L40 × W10 × T5mm(磁化方向)
- ・支点間距離 : 30mm (L_1)
- ・荷重点間距離 : 10mm (L_2)
- ・クロスヘッド速度 : 0.5mm/min

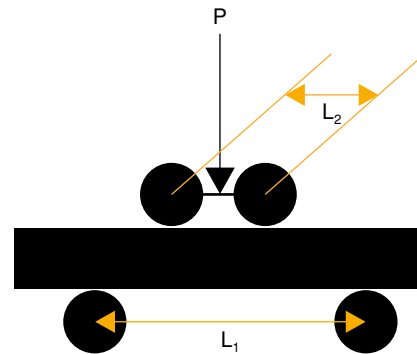


Fig. 7 Fracture test

尚、抗折荷重 P は以下の式で応力 σ に換算した。

$$\sigma = \frac{3P(L_1 - L_2)}{2WT^2} \quad (9)$$

3.2. ワイブル理論の適合性

ワイブル理論の適合性を以下の2項目により判断した。その結果、ワイブル理論はNd系磁石の強度に適合することが明らかになった。以下その検証した2項目について説明する。

3.2.1. ワイブル分布との相関

Fig. 8 に Nd 系磁石に対する抗折強度のワイブルプロットの一例を示す。そのプロットが直線で近似され、かつ相関係数が 0.9 以上であることがわかった。したがって、この強度特性は式(5)の関係を満足することが検証され、Nd 系磁石の強度特性はワイブル分布に従うと判断した。

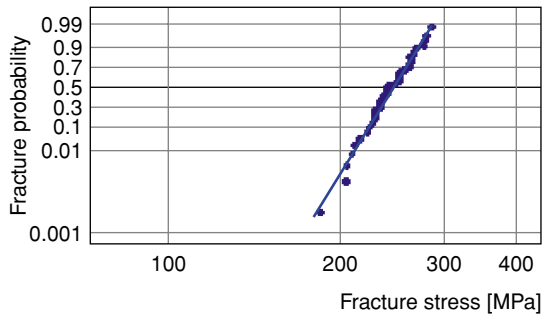


Fig. 8 Weibull plot for magnet strength

これらのグラフから試験片の幅寸法によって平均強度(破壊応力)は異なるが、バラツキ具合を示すワイブル数はほぼ同一である。ここで、試験片のサイズと平均強度の関係を明らかにするために有効体積と平均破壊応力の関係をプロットした。その結果、近似直線の傾きがワイブル数 m の負の逆数となり、式(8)の関係を満足することが検証できた(Fig. 11)。

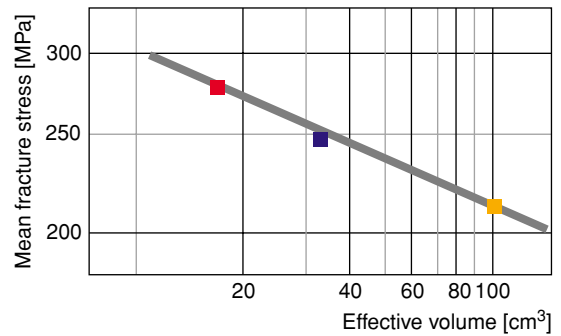


Fig. 11 Size effect

3.2.2. サイズ効果

次に、磁石試験片の幅寸法(W寸法)を変化させた時の強度の一例として、破壊応力を各サイズ毎にプロットしたグラフを Fig. 9 に示す。また、これらをワイブルプロットすると Fig. 10 となる。

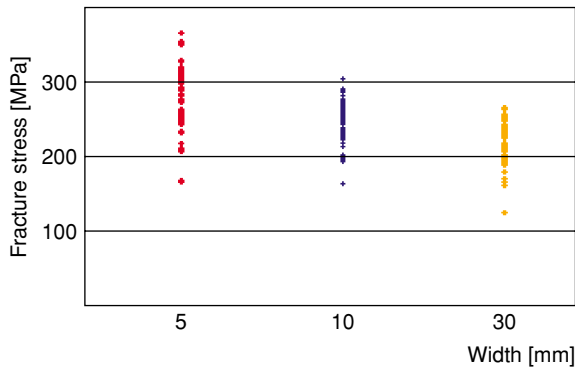


Fig. 9 Fracture stress of each width

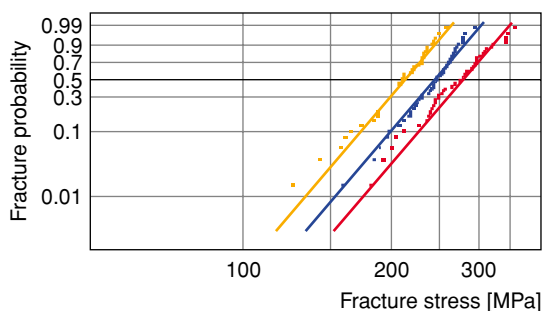


Fig. 10 Weibull plot of each width

4. 実際の形状での検証

Nd 系磁石の強度評価にワイブル理論を適用することの妥当性について記述してきたが、それが実際の形状においても当てはまるかについて検証した。具体的には、まずロータのスピニングテストを行い磁石を破壊させ、その時の回転数を測定した。次に、この結果をCAE解析結果によって応力値に換算しワイブルプロットした(Fig. 12)。グラフからわかるようにロータ内の実際の形状においてもワイブル分布に適合していることが検証できた。

一方、4点曲げ試験結果を材料定数としてワイブル理論にもとづき強度を予測した。この予測結果と Fig. 12 の実測結果をグラフにしたのが Fig. 13 である。

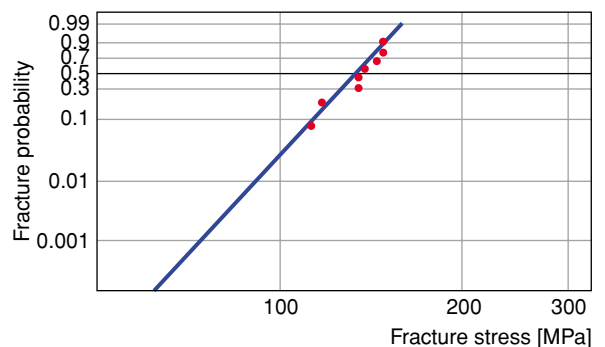


Fig. 12 Weibull plot for magnet strength of rotor (spin test result)

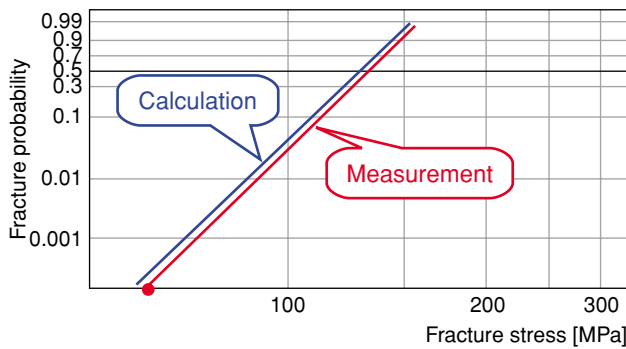


Fig. 13 Comparison measurement and calculation

このグラフより予測結果と実測がよく一致しており、この手法の妥当性が検証できた。このことによりモータの設計段階において磁石の材料定数から磁石の強度予測が可能になると考えられる。

5. まとめ

Nd 系希土類焼結磁石の強度評価に対しワイブル理論の適用を試み、以下の成果を得た。

- (1) 基本試験片形状の4点曲げ試験結果についてワイブル分布への適合とサイズ効果を検証した結果、Nd 系磁石の強度評価にワイブル理論が適合できることがわかった。
- (2) 実際の形状についてもワイブル分布への適合が検証できた。さらに、基本試験片形状での4点曲げ試験結果と実際の形状についてのスピンテスト結果から形状効果(サイズ効果)についても検証ができた。この結果、ワイブル理論の諸定数を材料定数として実際の形状での強度特性を予測することは可能であることがわかった。

以上により、この評価手法はモータとして使用する条件下での磁石の強度設計を行うために有効であることがわかった。

参考文献

- (1) 松尾陽太郎：セラミックスの寿命と破壊，東京，内田老鶴圃，1992, 120p.
- (2) 阿部弘 他：エンジニアリングセラミックス，東京，技報堂，1998, 164p.

■ 著 者 ■



棚木 孝昭



喜多 晃義