論 説

EV駆動モータ用大型 Nd-Fe-B リング磁石
について

吉川紀夫*, 山田日吉*, 葛西靖正*

A Huge Nd-Fe-B Ring Magnet for EV Driving Motor

Norio Yoshikawa, Hiyoshi Yamada and Yasuaki Kasai

Synopsis

A radially oriented Nd-Fe-B ring magnet to be installed in a EV driving motor was made by backward extrusion of a preform which was made from melt-spun ribbons. The magnet has an outer diameter of 139mm, an inner diameter of 127mm, and a height of 100mm. The magnetic properties and the multi-pole magnetizability of the huge ring magnet were investigated. And, a suitable material as an inner yoke for the magnet is also reported.

The ring magnet shows the maximum energy product of about 33MGOe and the intrinsic coercivity of about 16kOe except in the initially extruded portion which was not subjected to sufficient deformation.

The ring magnet was magnetized from the outer diameter side to 10 poles with various conditions. The magnetization at higher electric capacitance was more effective in obtaining a high flux density than magnetization at higher voltage.

Thermal stress which is caused by the thermal expansion difference between a Nd-Fe-B ring magnet and an inner yoke (S45C or Invar alloy) was estimated. Invar alloy as an inner yoke shows much smaller thermal stress in comparison with the critical stress of a magnet.

1. 緒 言

地球環境の保護、資源問題の世論を背景に、自動車メーカ、電力会社などを中心として電気自動車（以下EV）の開発が行われている。特に、米カリフォルニア州のZEV（ゼロ・エミッション・ヴィークル）規制までわずか2年あまりとな

った現在、自動車メーカでは量産を意識したプロトタイプ車の開発が相当進んでいると思われる。

その中で、最大の技術課題はバッテリーの高性能化及び低コスト化であると言われている。この問題を解決するにはかなりの時間がかかると推定されている。そのため、現段階ではいかにして高効率で、しかも低コストのモータを作るかに焦点は絞られている。EVの心臓部とも言えるモータとして、DC分巻、DC直巻、AC誘導、DCブラシレスなどの型式が検討されている。効率の面

1995年7月12日受付

*大同特殊鋼㈱技術開発研究所

では永久磁石から発生する磁束を利用するDCブラシレスモータが最も優位にある。一方、コスト面では1995年現在、AC誘導モータが優位にある。しかしながら、大量生産となれば制御回路を含めてDCブラシレスモータが優位になると言われている¹⁾。従って、今後DCブラシレスモータを中心に実用化が進んでいくと思われる。

当社では、FA・OAモータ用の比較的小型のラジアル異方性Nd-Fe-B磁石の製造を行っている。この磁石には、(1)最大エネルギー積30MGOe以上と非常に強力であること(2)比較的長尺のリング形状が可能なこと(3)そのため、接着組付けなどの作業が容易であることなどの特長がある²⁾。これらの特長はEV用DCブラシレスモータにおいても十分生かせるものであると考え、大型リング形状の磁石の開発を進めている。今回、その中で明らかになった磁気特性と多極着磁特性³⁾を中心に報告する。

Nd-Fe-B磁石の熱膨張係数は通常ロータと使用される材料に比べて非常に小さい。そのため、大型リング形状の磁石を使用する際には、磁石が内周部のロータリムから受ける応力を考慮した設計が必要である。われわれは、ロータ材として熱膨張係数の小さなインバー合金を使用することを提案している⁴⁾。インバー合金とS45Cをロータ材として使用した場合、どの程度の応力が磁石に加わるのかを簡単な式で計算をしてみたので、その結果についても報告する。

2. 実験方法及び熱応力計算方法

2.1 磁石の作製方法

Fig. 1に磁石の作製方法を示す。出発原料として米国GM社で超急冷法によって製造されている

Fig. 1 Flow chart showing the preparation procedure for a huge radially oriented ring magnet.

MQ 3用組成の粉末を用いている。まず、その粉末から冷間プレスで成形体を作製した。その後、潤滑剤を塗布し、Ar雰囲気中で800℃まで加熱し、ホットプレスを行った。さらに、ホットプレスした成形体に再度潤滑剤を塗布し、Ar雰囲気中で800℃まで加熱し、後方押出しによって磁石を作製した。なお、ホットプレス及び後方押出し時には、それぞれの金型をワークと同じ800℃に加熱している。

金属間化合物Nd₂Fe₁₄Bには、熱間で塑性加工すると圧縮歪を受けた方向に磁化容易軸であるC軸が配向する性質がある⁵⁾。後方押出しにおいては、磁石のラジアル方向に圧縮歪が生じるため、ラジアル異方性磁石を作製することが可能である⁶⁾。

2.2 磁気特性

リング形状の磁石のラジアル方向から5mm、軸と円周それぞれの方向から10mmの長さの直方体試験片を採取した。その試験片に40kOeのバース着磁を施し、B-Hトレーサを用いて磁石のラジアル方向の磁気特性を評価した。なお、磁石の軸方向と円周方向の磁気特性分布を調べるために、試験片は磁石のさまざまな部位から採取した。

2.3 多極着磁特性

磁石の底部及び押出し初期の部位を切り捨て、φ138×φ128×H90の形状に機械加工した。その後、磁石の内周面にS45C製のバックヨークを接着し、種々の電圧(500～2500V)と静電容量(2000～20000μF)との組合せで外周面に10極の着磁を施した。

着磁ヨークは、ヨーク自身に発生する渦電流を抑えるために3% Si-Feの薄板を積層して作った。

着磁特性の評価は、磁石の外周表面にφ0.1のホール素子を接触させた状態で磁石を回転させ、磁束密度波形を測定することで行った。

2.4 熱応力

磁石の内周側にヨーク材が室温で応力0で接着剤によって接着されているとする。この状態から温度が上昇すると、磁石とヨーク材との熱膨脹量の違いのために、接着剤は(1)式の応力を受けると考えられる。そのため、磁石は(1)式の内圧を受け、その際に磁石には(2)式に示す最大応力が生じる⁷⁾。実際には、接着剤の挙動が複雑で(1)、(2)式だ

けでは十分に表現しきれないと思われるが、およその目安にはなると思われるのでこの式を用いて磁石に発生する熱応力を見積ってみた。

$$Pa = Ea \cdot (\Delta Ly - \Delta Lm) / L \quad \cdots \cdots (1)$$

Ea : 接着剤の弾性率

ΔLy : ヨーク材の膨脹量

ΔLm : 磁石の膨脹量

L : 磁石とヨーク材とのギャップ(接着剤厚)

$$\sigma m = Pa(k^2 + 1) / (k^2 - 1) \quad \cdots \cdots (2)$$

k : 磁石の外径/磁石の内径

3. 実験, 計算結果及び考察

3.1 磁石の外観及び形状

Nd-Fe-B 磁石合金の変形能は通常の鋼と比べれば非常に乏しい⁹⁾。また、押出し加工後の磁石には結晶軸の配向によって、磁気的な異方性の他に線熱膨張係数の異方性も発生している⁹⁾。そのため、押出し加工中あるいは押出し加工後の冷却過程において、磁石が割れる可能性がある。しかしながら、外径 $\phi 139$ の大型リング形状の磁石においても、割れない健全なものを製造できることがわかっている。

Fig. 2 に押出し加工前のホットプレス成形体と押出し加工後の底部付き磁石とを示す。押出し加工後の磁石の寸法は、外径139mm、内径127mm、高さ100mm、底厚3mmである。重量は底部を含んで2.1kgで、著者らが知る限り世界最大の希土類ラジアル異方性磁石である。また、押出し後の磁石の形状精度は、内外径寸法ともに ± 0.1 mmで、同軸度は $200\mu\text{m}$ 、真円度は $50\mu\text{m}$ 程度であった。

Fig. 2 Examples of (left) a hot-pressed magnet and (right) an as-backward-extruded magnet.

3.2 磁気特性

Fig. 3 に磁石の軸方向の磁気特性分布を示す。押出し初期の部分の15mm程度除けば、磁気特性はほぼ均一で、最大エネルギー積は約33MGOe、保磁力は約16kOeであった。

底部からの距離が50mmと100mmの位置のミクロ組織を Fig. 4 に示す。底部からの距離が50mmの部位ではラジアル方向に強い圧縮歪を受けて、元々偏平な粉末が変形し一層偏平になっている。それに対して、底部からの距離が100mmの押出し初期の部分ではラジアル方向に圧縮歪を受けた痕跡は認められず、ホットプレス時の加圧方向に対して垂直に並んだ偏平な粉末がそのままの状態が残っている。これらの観察結果から、押出し初期の部分の特性が低いのはラジアル方向に十分な圧縮歪を受けていないためであることがわかる。

Fig. 5 に磁石の円周方向の磁気特性分布を示す。押出し加工後の磁石の偏肉は上述の通り $200\mu\text{m}$ 程度あったが、円周方向の磁気特性分布には影響を及ぼさず、均一な磁気特性が得られている。

Fig. 3 Distribution of magnetic properties along the height of magnet.

Fig. 4 Optical microstructures of a backward extruded magnet.

Fig. 5 Distribution of magnetic properties along the circumference of magnet at X=50mm.

これは、一定以上(ROF=60%)の加工度を与える
と磁気特性が飽和することに起因している。²⁾

3.3 多極着磁性

代表的な表面磁束密度波形を Fig. 6 に示す。上
述のように、円周方向の磁気特性が均一であるの

Fig. 6 Typical surface flux density distribution of 10-pole magnetized magnet.

で表面磁束密度波形も均一なものとなっている。

Fig. 7 に表面磁束密度波形の評価項目を示す。
評価項目は10極のそれぞれのピーク値の平均値
(PSFD)と10極の波形の積分値 (ISFD) との2
つである。なお、ISFDは磁石の総磁束量に相当す
る量であり、モータのトルク特性に大きな影響を
及ぼす。

Fig. 8 に静電容量をパラメータとした PSFD
と ISFD の着磁電圧による変化を示す。当然なが
ら、静電容量と着磁電圧が大きくなればコイルに
流れる電流値も大きくなり、PSFD と ISFD は大
きくなる。

コイルに流れる電流値が同じならば、同じ表面
磁束密度波形が得られるかどうかを調べるために
Fig. 8 のデータを着磁時の最大電流値で整理し
た。その結果を Fig. 9 に示す。また、種々の電圧
と静電容量の組み合わせを用いて、ほぼ同じ最大電

Fig. 7 Definitions of PSFD and ISFD to evaluate the effect of magnetizing conditions on multi-pole magnetizability.

Fig. 8 Variation of PSFD and ISFD as a function of magnetizing voltage.

電流値となるようにして着磁した4つの磁石の表面磁束密度波形を Fig. 10 に示す。これらの結果から同じ最大電流値で着磁しても、静電容量の高い条件で着磁した磁石の方がより高い PSFD と

Fig. 9 Variation of PSFD and ISFD as a function of magnetizing peak current.

Fig. 10 Comparison of surface flux density distributions of four magnets magnetized at (a) 2 500V-2 000 μ F, (b) 1 750V-5 000 μ F, (c) 1 270V-14 000 μ F, and (d) 1 145V-5 000 μ F, respectively.

ISFD とを示すことがわかった。

この現象を説明するために、コイルに流れる電流波形とその際に着磁ヨークとバックヨーク間に発生する磁界の波形を測定した。(Fig. 11) 高い静電容量で着磁すると、電流と磁界の立上がりが緩やかになり、しかも高い磁界が長時間キープされ

Fig. 11 Waveform variations of magnetizing current and field.

ることがわかる。このことから、高静電容量と低電圧の組合わせ着磁は、磁石内に発生する渦電流を減少させたり、磁石の磁化の遅れをカバーすることにより、大きな磁束量が得られるものと推定される。

3.4 熱 応 力

(1), (2)式を用いて計算した結果を Fig. 12 に示す。ただし、接着剤は20℃で硬化し、接着完了時には応力の発生はないものとした。また、接着剤の弾性率は20℃で40kgf/mm²とし、温度上昇とともに

Fig. 12 Variation of calculated thermal stress to a ring magnet as a function of temperature. The elastic modulus of adhesive is supposed to change from 40kgf/mm² at 20℃ to 20kgf/mm² at 200℃.

接着剤の弾性率は徐々に低下し200℃では20kgf/mm²になると仮定した。

ヨークがS45Cの場合、磁石には低温でもかなり大きな応力が発生していることがわかる。磁石の最小破壊強度は7kgf/mm²程度である。そのため、実際テストをしてみると接着剤の種類によっては50℃程度で割れるものもある。

一方、ヨークがインバー合金の場合、磁石に発生する応力は200℃でも3kgf/mm²程度である。磁石の最小破壊強度はその値の2.3倍であり、磁石の割れを十分に防ぐことが可能である。

4. 結 言

E V用を目指したφ139×φ127×H100の大型リング磁石の試作を行い、磁気特性を評価した。また、外周10極の多極着磁を行い、得られる磁束量に及ぼす着磁条件の影響を調べた。さらに、大型リング磁石を適用する際に問題となるであろう熱応力についても検討を行った。以下に得られた結論を示す。

(1) 超急冷されたNd-Fe-B粉末を出発原料とした熱間押出し加工法によって、外径φ100以上の大型リング磁石を製造可能である。

(2) 標準組成の粉末で得られた磁気特性は(BH) max=33MGOe, iHc=16kOeであった。

(3) 磁石の押出し初期の部分を除けば、軸方向、

円周方向ともに磁石の磁気特性は均一である。押し出し初期の部分の磁気特性は、押し出し加工時の付与歪が不十分であるために低い。

(4) 比較的極間ピッチの広い多極着磁の場合、高静電容量による着磁がより大きな磁束量を得るのに有効である。

(5) 磁石の内周側に設けるヨークの材質としてインバー合金を選択することによって、熱応力による磁石の割れを防ぐことが可能である。

最後に本研究を行うに当たり、磁石の試作に精力的に取り組んでいただいた当社技術開発研究所磁石材料研究室 荒井氏に深く感謝致します。

(文 献)

- 1) J. G. W. West: Permanent Magnets -1993 Update, (1993), [Wheeler Associates Publication]
- 2) 吉川, 山田, 葛西: 電気製鋼, **63**(1992), 226
- 3) N. Yoshikawa, H. Yamada, Y. Iwasaki, K. Nagata and Y. Kasai: Proc. 13th Int. Workshop on RE Magnets and Their Applications, Birmingham, UK, (1994), 635
- 4) 公開特許 特開平 6 -38414 など
- 5) R. W. Lee: Appl. Phys. Lett., **46** (1985), 790
- 6) Y. Yoshida, T. Kinami, N. Yoshikawa, S. Yahagi and T. Watanabe: Proc. 10th Int. Workshop on RE Magnets and Their Applications, Kyoto, Japan, (1989), 417
- 7) 木内: 機械設計便覧, (1974), 852[日刊工業新聞社]
- 8) Y. Yoshida, Y. Kasai, T. Watanabe S. Shibata, V. Panchanathan and J. J. Croat: J. Appl. Phys., **69**(1991), 5841
- 9) 清水, 平井: 日立金属技報, **6** (1990), 33