

技術資料

 Technical Data

自動車駆動用埋込磁石同期モータにおける高温下のロータ磁石の不可逆減磁現象の解析と評価法

日南田純平*, 南山拓真*, 藪見崇生*

Evaluation and Analysis of Irreversible Demagnetization of Rotor Magnets under High Temperature in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Automotive Drives

Jumpei HINATA, Takuma MINAMIYAMA and Takao YABUMI

Synopsis

This paper describes a study on an IPM-SM for hybrid vehicles using hot-deformed magnets with an arc shape and radial orientation. Using this IPM-SM, demagnetization evaluation experiments and demagnetization analysis were carried out for the magnet at high temperatures. As a result, demagnetization of the magnet mounted on the rotor was confirmed when the magnet was exposed to an inverse magnetic field applied from the stator in a high-temperature environment. Furthermore, in the demagnetization analysis, the demagnetization phenomenon was obtained using the experimental current waveforms and the magnet temperature, and the difference between the analytical and the experiment results was examined. As a result, it was found that the demagnetization level of the analysis was underestimated compared to the experimental results, and that the difference was not negligible in the design of demagnetization resistance.

1. 緒言

Nd-Fe-B系金属磁石は高い磁力や比較的良好な価格などの理由で、電化製品からハイブリッド車（以下、HEVという）、電気自動車（以下、EVという）の駆動用モータなどに幅広く用いられ¹⁾、なかでもHEVやEVなどの電動車は、CO₂排出低減、環境負荷低減への優位性から、今後、さらに普及が進むと想定される。

電動車駆動用モータに搭載される磁石の磁気特性およ

び使用環境に着目すると、磁石の不可逆減磁（以下、減磁という）を発生しやすい高温かつ逆磁界環境下での動作が要求され、そのため、磁石に高い保磁力が望まれる。磁石の保磁力を高める成分元素として用いられる、ディプロシウム（Dy）、テルビウム（Tb）といった重希土類元素は、結晶磁気異方性を良化し、保磁力を高めることができる。ただし、産出国や産出量が限られているため、高い調達リスクやコストが懸念され、使用量の削減は喫緊の課題である。

2022年6月2日 受付

* 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

大同特殊鋼(株) (以下、当社という) では高保磁力化の手法として、結晶粒微細化が容易な熱間加工磁石に注力し、組織制御技術の向上などにより、重希土類元素を使用せずに高い保磁力を実現してきた²⁾。その結果、2016年に重希土類フリー熱間加工磁石がHEV駆動用モータに採用されている³⁾。この熱間加工磁石をより高出力のHEVやEV用駆動モータに搭載するには、さらなる高残留磁束密度化、高保磁力化が必要で、材料開発だけでなく、磁石形状、配向、配置と、材料特性に適正なモータ電磁設計が必要となる。

当社では、モータ設計上重要視される磁石の減磁に着目し、熱間加工磁石の減磁現象の解明のため、モータに搭載した減磁評価実験、および減磁解析を通し、モータ電磁設計精度の向上ならびに材料開発へのフィードバックに取り組んでいる。しかし、当社ではこれまで減磁評価実験、および減磁解析を検討した事例がほとんどない。

そこで、本稿では過去に設計検討したHEV駆動用モータを供試モータとし、高温環境下における減磁評価実験により減磁を検証する。さらに、減磁評価実験結果を反映させて減磁解析精度の向上を図ることにより、減磁評価実験方法および減磁解析技術の確立を実現する。

2. 高温環境下における減磁評価実験

2. 1 供試モータ

Table 1に供試モータの仕様、Fig. 1にロータ外観写真をそれぞれ示す。供試モータは市販のHEV駆動用モータをリファレンスとし、加納らによって設計検討⁴⁾された、円弧ラジアル配向熱間加工磁石を用いた埋込磁石形同期モータ(IPMSM)で、重希土類フリーの円弧ラジアル配向熱間加工磁石をロータに搭載している。



Fig. 1. Cut view of test motor.

Table 1. Specification of test motor.

Item	Values	Unit
Maximum power	80	kW
Maximum torque	172	Nm
Max. phase current	180	Arms
Stator outer diameter	215	mm
Number of stator slots	48	-
Rotor outer diameter	140	mm
Number of rotor poles	8	-
Stack length	60	mm
Magnet type	Hot-deformed Nd-Fe-B	-
Orientation direction	Radial	-
Br @ R.T.	1.33	T
H _{CJ} @ R.T.	1670	kA/m

2. 2 磁石温度予測

減磁評価実験および減磁解析精度の検証にあたり、減磁試験時の磁石温度を把握することは重要である。ただし、ロータに埋設された磁石の温度をリアルタイムで把握するためには、磁石表面に熱電対を貼り付け、温度信号伝達用のスリップリングやテレメータなどの追加部品が必要となり、費用面より容易ではない。そこで、本稿では費用面および実験の容易性を考慮し、次の実験によって磁石温度の予測を試みた。

まず初めに、ロータに埋設された磁石の側表面に、熱電対を貼り付ける。Fig. 2に実際に磁石の側表面に熱電対を貼り付けた外観写真を示す。ロータ面内温度分布の有無を確認するため、対角線上に熱電対を2箇所(図中、Point 1および2)取り付けた。熱電対の種類や貼り付け方によって温度の絶対値が変動するため、その取り付け方には注意を要する。本実験では、熱電対自体の放熱をできる限り小さくするため、線径がφ0.4 mmのK型を使用し、10 mm角の耐熱アルミテープで貼り付けた。

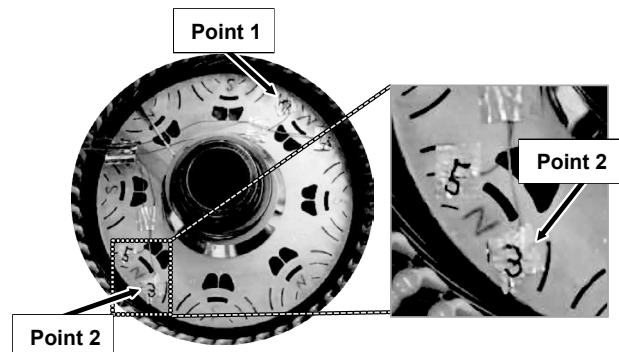


Fig. 2. Attachment position of thermocouples.

温度管理を行うため、Fig. 3 に示す減磁評価実験で使用する大容量モータ評価装置⁵⁾ (シンフォニアテクノロジー(株)製) に供試モータを取り付け、恒温槽 (エスペック(株)製) 内に設置した後、Table 2 に示す実験条件のもと、供試モータを静止させたまま、高温環境下で保持させた。この間、磁石側表面の温度推移はデータロガーで計測し、磁石温度が定常値に達することを確認した。なお、恒温槽は、空調室内で所望の温湿度に調整した空気を槽内に送り出す、温湿度供給方式である。

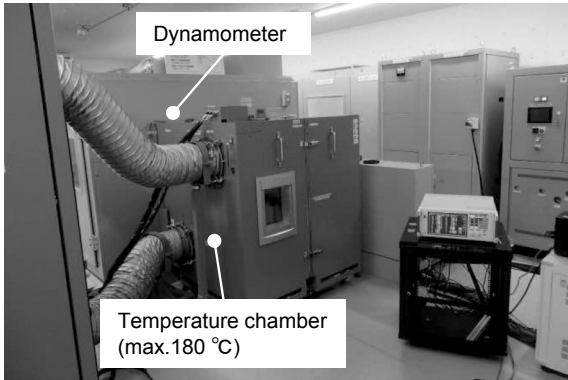


Fig. 3. Photograph of high capacity dynamometer.

Table 2. Thermal test conditions.

Item	Values
Setting temperature	151, 156, 161, 169 [°C]
Hold time	10 [h]

Fig. 4 に一例として、恒温槽を 169 °C に設定した時の各熱電対の温度推移を示す。磁石側表面の温度は恒温槽の設定温度とは離れているが、10 h 保持後にはおおむね定常値に達していることがわかる。

Fig. 5 に 10 h 保持後の磁石側表面の温度と恒温槽の設定温度との関係を示す。Fig. 4, Fig. 5 では 2 箇所温度推移がほぼ重なり、ロータ面内温度には位置依存性がほとんどないことを確認した。磁石側表面の温度は恒温槽の設定温度に対し、16 ~ 18 °C 低位な結果であったが両者の温度には強い相関がみられ、恒温槽の設定温度を用いて磁石側表面温度の予測は可能と判断した。

2. 3 減磁評価実験方法

モータに搭載された磁石の減磁評価実験方法は、筆者らが調べた限りでは、JIS, IEC などの規格では規定されておらず、モータメーカー各社が独自で評価基準を作り、減磁評価実験を実施しているものと想定される。そこで本稿では、過去の報告事例をもとに実験方法を検討した。文献 6) では、モータを高温環境に保持し、直流

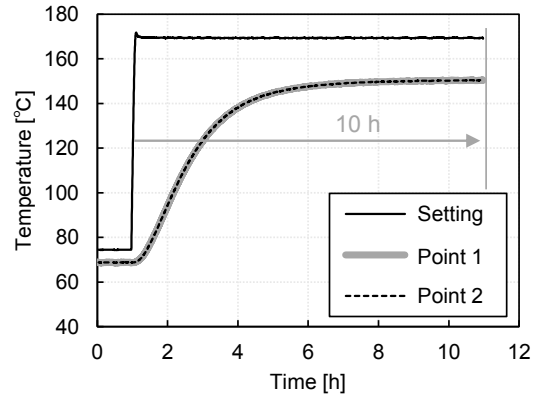


Fig. 4. Temperature profile.

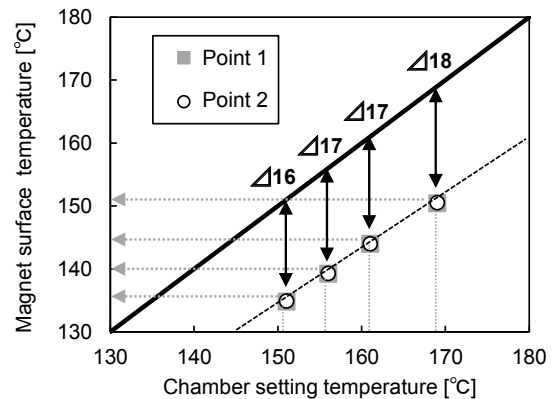


Fig. 5. Relationship between magnet surface temperature and chamber setting temperature.

電流を U 相に通電することで、磁石を減磁させている。このとき、磁極中心軸と、U 相巻線の中心軸を一致させた位置にロータ位置を合わせることで、d 軸成分に負の電流が通電された場合 (電流進み位相角 $\beta=90^\circ$) を模擬している。減磁率の評価は、まず減磁した磁石を細分化し、その磁石の磁気特性評価を行い、減磁前後の磁束密度の変化率で評価している。また、文献 7) では通電前後の誘起電圧の変化率を減磁率として評価している。

以上をもとに、本稿で検証した減磁評価実験方法を Fig. 6 に示す。初めに、恒温槽を 75 °C に設定し、磁石温度が定常値になった後、2000 r/min の誘起電圧 E_b (基本波実効値) を計測する。次に、Table 3 に示す条件で、供試モータを高温環境下に保持した後、100 r/min で回転させている間に、d 軸成分に負の電流を Table 4 に示す条件で 1 秒間通電させ、磁石を減磁させる。通電後は恒温槽を 75 °C へ戻し、磁石温度が定常値になった後に 2000 r/min の誘起電圧 E_a (基本波実効値) を計測し、(1) 式により求めた減磁率を評価する。

$$\text{減磁率} = (E_a / E_b - 1) \times 100 [\%] \quad (1)$$

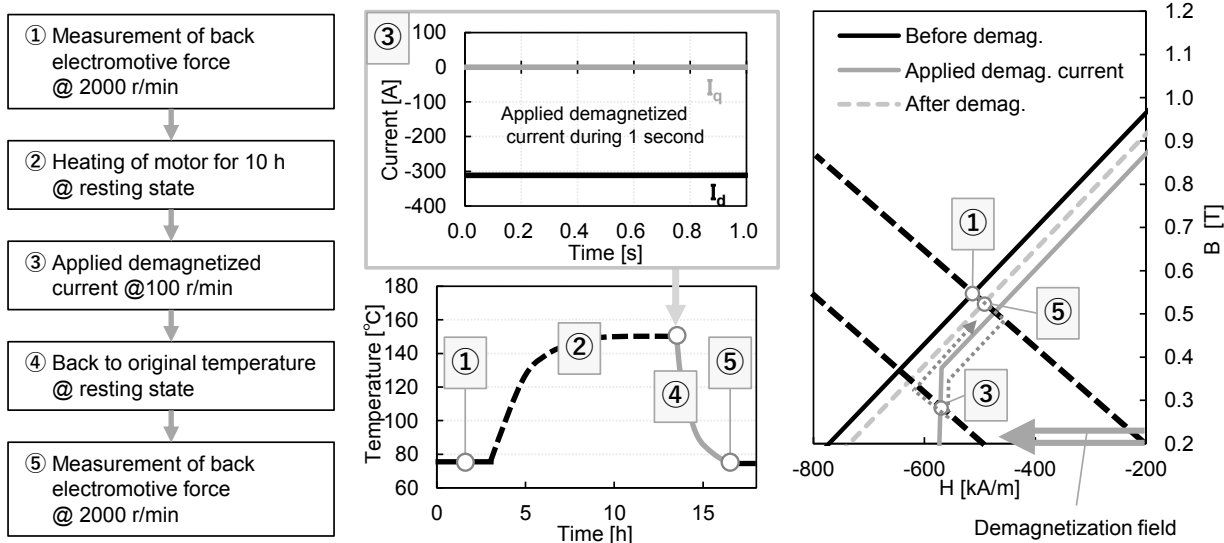


Fig. 6. Evaluation flow of thermal demagnetization.

Table 3. Temperature chamber conditions.

Item	Values
Setting temperature	150, 160, 170 [°C]
Hold time	10 [h]

Table 4. Demagnetized current conditions.

Item	Values
Current / Phase angle	180 [Arms] / 90 [°]

減磁試験時の磁石温度は、Fig. 5の恒温槽設定温度と磁石側表面の温度の関係より予測する。ただし、減磁試験時には、通電時のコイル発熱などにより磁石温度が上昇していることが想定され、予測温度との乖離が懸念されるが、事前の検証として、昇温前に通電前後の誘起電圧を計測し、通電後の磁石温度上昇は1°C未満であり、問題ないことを確認している。また、本実験において恒温槽の設定温度は3種類としたが、すべて同一の供試モータを用い、低い温度から順に減磁させた。

2. 4 減磁解析方法

減磁解析には、電磁界解析ソフトJMAG - Designer 20.2 (株JSOL製)を用いた。減磁解析の精度向上のためには、減磁を決める逆磁界強度、磁石温度、磁石磁気特性の実験結果を解析に反映することが重要である。逆磁界強度については、通電時の実電流波形を解析に用いるが、Fig. 7に示す実電流波形の振幅が指令値に対し17 A大きいことを確認し、減磁解析に用いた。磁石温度には、磁石側表面の予測温度を用いた。解析条件をTable 5に示す。なお、解析時の通電時間は電気角一

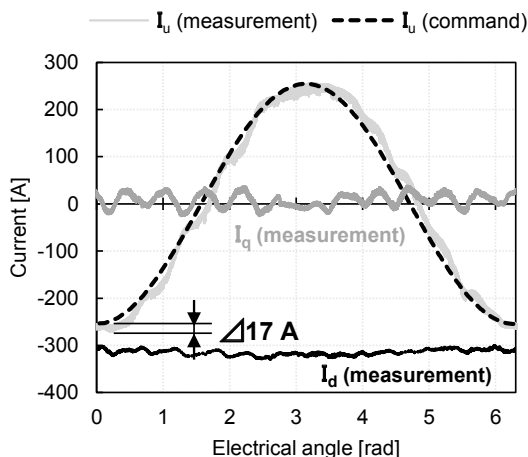


Fig. 7. Measured instantaneous current and reference current waveforms.

Table 5. Simulation conditions.

Item	Values
Current / Current lead angle	192 [Arms] / 90 [°]
Magnet temperature	135, 143, 152 [°C]

周期とした。磁石磁気特性は、供試モータに搭載した磁石と同一のタイミングで試作した磁石の磁気特性測定結果を用いた。さらに、実測減磁曲線形状を以下のように扱った。

今回使用した解析ソフトでは、磁石材料の減磁曲線を点列データとして入力することが可能である。そこで、JIS C 2502 : 2019 (永久磁石材料)を参考に、減磁量ごとの磁界を定義し、減磁量ごとの磁界、およびその時の磁束密度を減磁曲線の点列データとした。Fig. 8に一例

として、減磁量が0.5%、10%の点列を示す。動作点の可逆変化を示す磁界は、減磁量が0.5%の時の磁界と定義したため、本解析では0.5%以内の減磁については不問としている。なお、減磁曲線の可逆領域である直線部は、保磁力 H_{cJ} の20%~70%の磁界範囲において線形回帰直線を適用している。このようにして実際に入力した点列データ、および測定した減磁曲線例をFig. 9に示す。測定した減磁曲線(図中実線)上に点列データ(図中○)はプロットされており、解析ソフト上で測定した減磁曲線を再現できていると考える。減磁解析における減磁率の評価は、減磁評価実験と同様に通電前後の誘起電圧を求めて、(1)式を用いた。

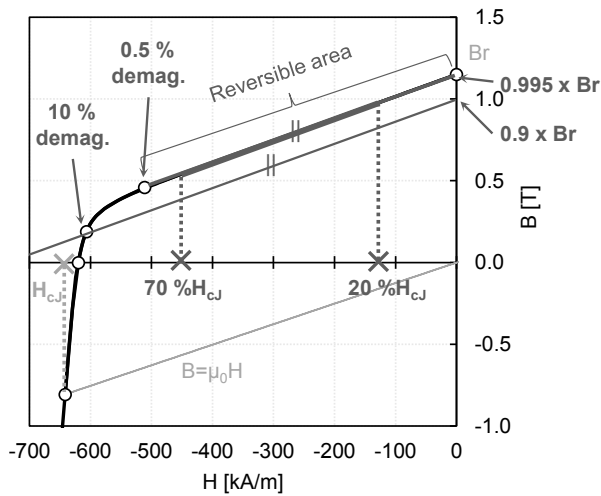


Fig. 8. Proposed demagnetization model and definition of reversible area.

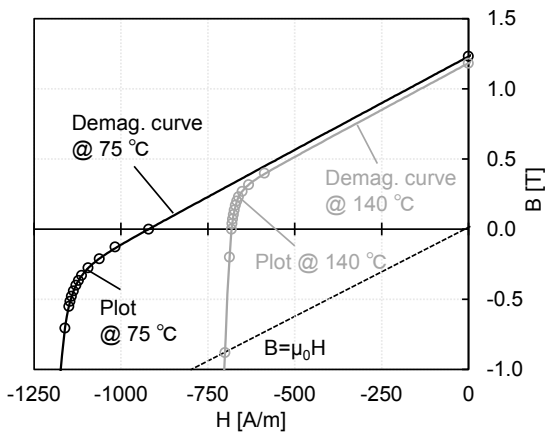


Fig. 9. Measurement results of demagnetization curves and plot data.

3. 減磁評価実験結果

Fig. 10に減磁評価実験、減磁解析で評価した磁石温度ごとの減磁率を示す。減磁評価実験では、磁石温度の

上昇とともに減磁率が増加し、高温環境下における減磁現象を確認できた。磁石温度が152℃の場合、実験と解析で約3%の差が生じている。JIS C 2502:2019では最大減磁許容量として5% (H_{D5})を目安としているが、Fig. 10に示すように今回の評価で152℃において実験値と解析値に約3%の差が生じていることは、モータ搭載時における磁石の耐減磁設計をする上で、無視できない誤差である。誤差要因としては、以下の二点を考えている。

- 1) 減磁解析では二次元解析を用いているため、モータ端部における減磁現象が考慮されていない。
- 2) 実験では通電時間1秒の間に正弦波電流を約7周期通電しており、高温環境下で逆磁界を繰り返し印加したことで減磁が進み、減磁率が高くなった可能性がある。

上記2)については、逆磁界を繰り返し印加した場合の減磁現象を確認していく必要がある。

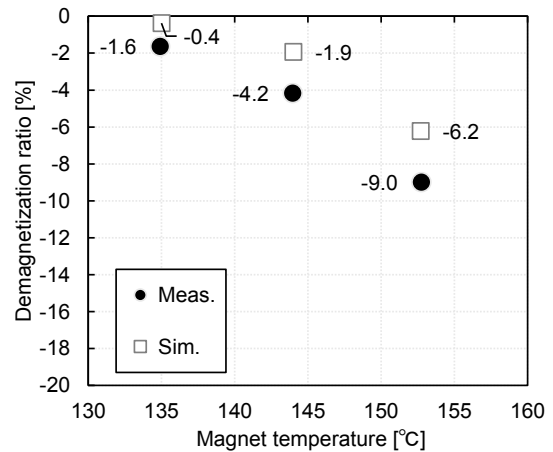


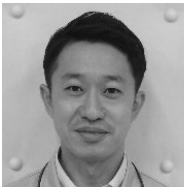
Fig. 10. Results of demagnetization ratio (test and simulation).

4. 結 言

本稿では円弧ラジアル配向熱間加工磁石を用いたIPMSMを対象に、減磁評価実験方法および減磁解析技術を説明した。当社設備を用いた減磁評価実験により、モータに磁石が搭載された状態における磁石の減磁を確認し、減磁の理解を深める足掛かりが得られた。ただし、減磁解析については、実験結果よりも過小に評価される結果となり、その差は耐減磁設計をする上で無視できない誤差であった。今後は、実験、解析両方に内包されている不確実性を精査し、より高精度の定量的評価の実現に注力したい。

(文 献)

- 1) 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫: 埋込磁石同期モータの設計と制御, オーム社, 2001, 138.
- 2) 日置敬子: 粉体および粉末冶金, **69**(2022), S3.
- 3) 相馬慎吾, 藤代智, 白土英治: 自動車技術会論文集, **48**(2017), 5, 1079.
- 4) 加納善明, 藪見崇生: 電気学会論文誌 D, **140**(2020), 4, 255.
- 5) 日南田純平, 南山拓真: 電気製鋼, **92**(2021), 2, 125.
- 6) 荒木辰太郎, 浅野能成, 山際昭雄: 電気学会研究会資料, **RM-16-89**(2016), 45.
- 7) 西山典禎, 本田幸夫: 電気学会論文誌 D, **138**(2018), 7, 591.



日南田純平



南山拓真



藪見崇生