

# 局所ベクトル磁気特性測定における漏洩磁界の影響

下地広泰\*

\*電磁力担当

## Effect of leak magnetic strength by vector magnetic property measurement

Hiroyasu SHIMOJI\*

\*Electromagnetic Division

### 要 旨

この論文では漏洩磁界がベクトルヒステリシスセンサ(以下, VH センサ)の測定精度に与える影響を検討した. VH センサには2方向の磁界強度を測定できる H コイルが内蔵されており, 試料表面の磁界強度を測定する. H コイル法は試料表面の磁界強度が均一であれば, 試料内部の磁界強度と等しい原理に基づいており, 試料表面に大きな漏洩磁界が存在する領域での正確な測定は困難である. そこで, 永久磁石モータのロータの漏洩磁界が測定に与える影響を明らかにするため, 3次元磁界解析を用いてシールドの有無による測定精度への影響を明らかにし, モータティース先端以外の場所ではシールドの効果により高精度に測定が可能であることを明らかにした.

### 1. はじめに

近年エネルギーの有効活用の観点から, モータの高効率化が望まれている. 平成 21 年の資源エネルギー庁の調査によるとモータは日本の消費電力量のほぼ半分を占めている. それらのモータが効率規制のプレミアム効率 (IE3) に置き換わった場合消費電力全体の 1.5%の削減につながる. そこで, 日本においても 2015 年より IE3 の効率規制が開始される. そのため, モータ各社は様々な方法で, 効率改善に取り組んでいる.

モータの高効率化には各種損失を低減していくことが重要である. モータの損失には銅損, 鉄損, 機械損があげられる. その中でも鉄損においては, 電磁材料の磁気特性の非線形性や, 応力に対して磁気特性が敏感であることから, 高効率材料の置き換えで低損失化を行ってきた. しかしながら, 所望の低損失化には至らない場合も多い. それらの原因は先に述べたような様々な要因が複合的に影響を与えているためであり, 損失の主要因を特定し, それに対応した対策を施すことが重要である [1]. そのためには, 実機での磁性材料内の磁束の状態を正確に捉える必要がある. 磁界解析を行うことで, 理想的な磁束の分布を得ることは可能であるが, 実機と一致することを確認している例は少ない. そこで, 我々は非常の小型の VH センサを開発し, 実機のベクトル磁気特性分布の測定を行っている [2]. VH センサは 2 方向の H コイルで磁性材料内部の磁界を測定する. H コイルでの測定

には外部磁場が均一で無いと正確に測定ができない. また, 漏洩磁界などが H コイルに影響することも考えられる. とくに, 永久磁石モータのようにロータ永久磁石が存在すると, その漏洩磁界の影響を受けて H コイルで磁界が正確に測定できない. しかしながら, それらの影響を定量的に評価されていない. そこで, 本論文では 3次元磁界解析を用いて, 永久磁石モータの漏洩磁界が VH センサに与える影響を明らかにする. また, VH センサに磁気シールドを施し, その有用性を明らかにする.

### 2. VH センサ

#### 2.1 VH センサの測定原理

VH センサは Fig.1 の測定モデルに示すように, 探針法と H コイル法を組み合わせたもので, 磁束密度  $B$  を測定するための  $B$  探針と磁界強度  $H$  を測定するための H コイルにより構成される. 2 方向成分を同時に測定できるように X 方向と Y 方向に  $B$  探針と H コイルが直交して配置されている. Fig.2 に探針法と H コイル法の測定原理を示す.

探針法は電磁鋼板の磁束変化により発生する渦電流の起電力を 2 本の探針で取り出したもので, その出力は  $B$  探針の間隔で巻線した探りコイル法の 1/2 ターンの出力と等価として導き出す方法である. 磁束密度は次式で与えられる.

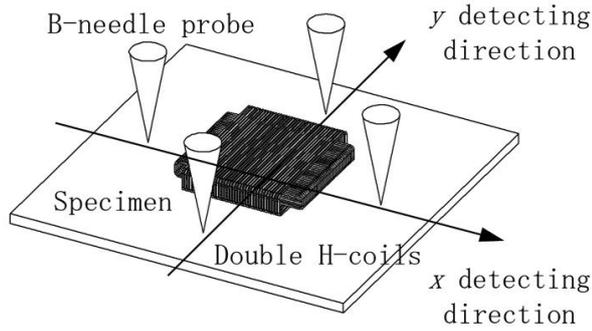


Fig.1 VH センサの磁束密度と磁界強度測定概要

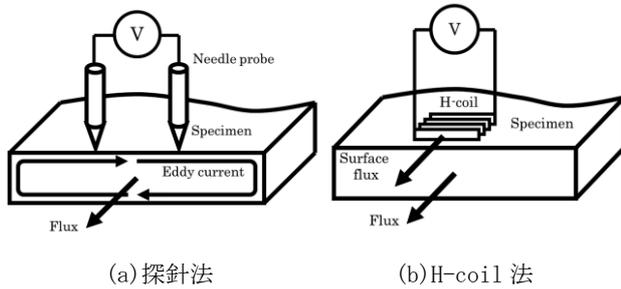


Fig.2 磁束密度と磁界強度の測定原理

$$B_i = \frac{2}{S_{B_i}} \int v_{B_i} dt \dots\dots\dots (1)$$

$v_{B_i}$  は探針による出力電圧,  $S_{B_i}$  は探針に対する有効面積, 添字  $i(x, y)$  は方向成分を表す.

H コイル法は, 電磁鋼板表面の磁界成分が電磁鋼板内部の面方向の均一磁界成分と等価であることを利用して, 電磁鋼板表面に置かれた H コイルの誘起電圧により磁界強度を導き出す方法である. 磁界強度は次式で与えられる.

$$H_i = \frac{1}{\mu_0 S_{H_i} N_{H_i}} \int v_{H_i} dt \dots\dots\dots (2)$$

$\mu_0$  は磁気定数,  $v_{H_i}$  は H コイルによる出力電圧,  $S_{H_i} N_{H_i}$  は H コイルのエリアターン, 添字  $i(x, y)$  は方向成分を表す.

全鉄損は各方向のヒステリシスループの面積の和から得られ次式で与えられる.

$$P_t = \frac{1}{\rho T} \int_0^T \left( H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \dots\dots\dots (3)$$

$T$  は励磁周期,  $\rho$  は材料密度である.  
実験に使用した VH センサの仕様を Table 1 に示す.

Table 1 VH センサの仕様

B-needle	Distance [mm]	2.5
	Spring force [gf]	30
H-coil	Size [mm]	2 × 2
	Number of turn [turns]	560
	Area turn of Hx coil [cm <sup>2</sup> ·turn]	852.4185
	Area turn of Hy coil [cm <sup>2</sup> ·turn]	564.5717

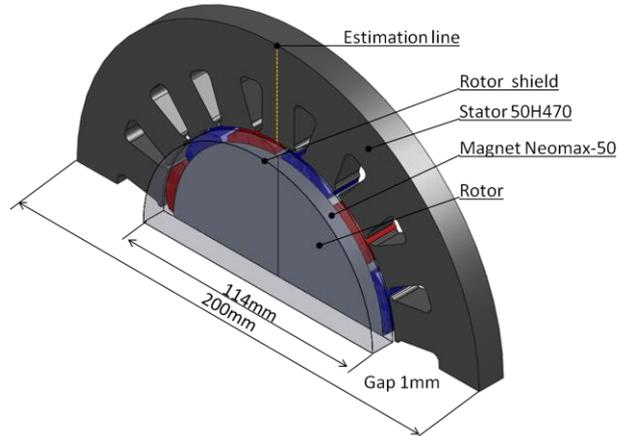


Fig.3 解析モデル

### 3. モデルモータにおける ロータ磁気シールドの影響

#### 3.1 解析モデル

Fig.3 にモデルモータステータの解析モデルを示す. ステータ直径 200mm, 18 スロットロータ直径 114mm, 12 極の表示磁石型ロータで, エアギャップ 1mm である. ステータには無方向性電磁鋼板 50A470 を使用し, 日立金属社製 Neomax-50 を使用した. ロータ表面には永久磁石の漏洩磁界を遮断するために 10mm の電磁鋼板を設置し, ティースの中心を評価ラインとした.

#### 3.2 解析条件

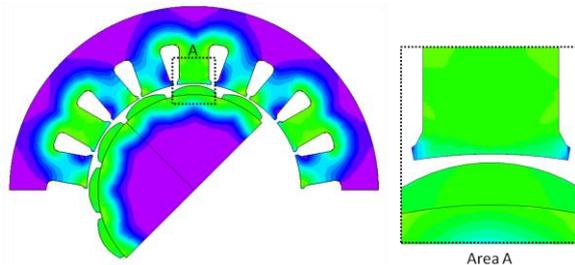
3次元磁界解析には JSOL 社製 JMAG の過渡解析を用いた. モータ回転数 600rpm, モータの周期性を考慮し, 2 分の 1 モデルとした. VH センサの磁気シールドの有効性を確認するため, ステータ表面から 5mm × 5mm × 0.1mm のソリッドを 3 体設置し, 評価領域とした. 実際の解析には評価領域であるステータ表面に厚み 0.1mm のソリッドを 3 枚作成し, メッシュサイズを 0.5mm と設定して解析を行った. 電磁鋼板領域は渦電流が流れないと仮定した.

#### 3.3 解析結果と考察

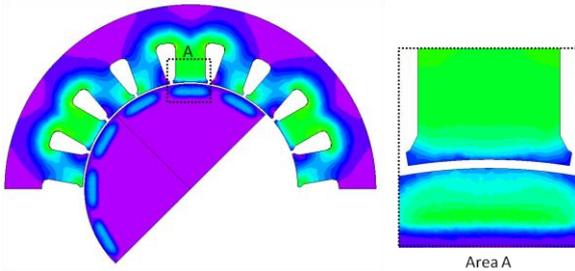
Fig.4 に磁気シールドを設置した場合と設置しない場合の磁束密度分布を示す. ティースの先端で磁気シールドの影響が大きいことがわかる. 磁気シールドを設置すると, 磁石表面の磁束が磁気シールドに吸収されるため,

ステータに磁束がいなくなる。そのため、試料表面で測定する VH センサでは、正確な測定ができないことがわかる。

Fig.5 に磁気シールドの有無による試料表面と試料内部の磁界強度の結果を示す。磁気シールドが無い場合ティース先端で磁界強度が大きく異なることがわかる。磁気シールドを取り付けた場合はティース先端部では影響は残るが、影響を小さくできることがわかる。モータモデルでは磁気シールドを設けた場合でもティース先端から 5mm 程度は永久磁石の漏れ磁束の影響が大きいことがわかる。測定する際は先端付近の測定結果に留意する必要がある。



(a) シールド無し



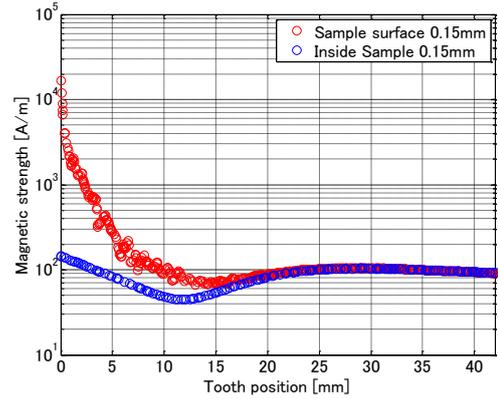
(b) シールド有り

Fig.4 シールドの有無による磁束密度分布

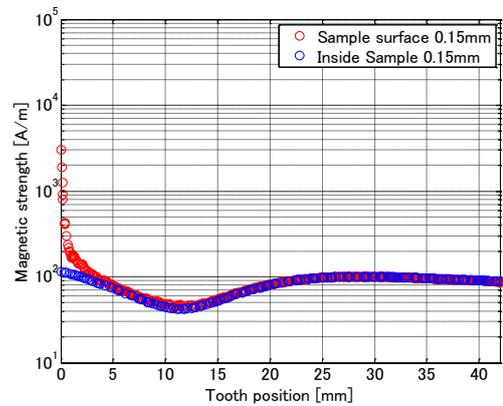
#### 4. モデルモータでの VH センサ 磁気シールドの影響

##### 4.1 解析モデル

Fig.6 に VH センサの解析モデルを示す。本解析では B 探針と H コイルは空気として取り扱う。また、B 探針は図に示すようにスプリングによってセンサ内に格納されるため、測定時には H コイルが試料表面に接触する。Fig.7 に示すように磁気シールドの効果を確認するため、VH センサをティースの先端から 0mm、13mm、22mm と三箇所を設置した場合を検討した。評価ラインを Fig.8 に示す。モータステータ中心の磁界強度を line1 とし、line2 をステータ表面の磁界強度、line3 を H コイル中心の磁界強度とした。それぞれ VH センサ領域で磁界強度が一致することが理想状態となる。Fig.9 にメッシュ分割図を示す。要素数は 811,144、節点数は 159,744 であった。



(a) シールド無し



(b) シールド有り

Fig.5 測定試料中と試料表面の磁界強度

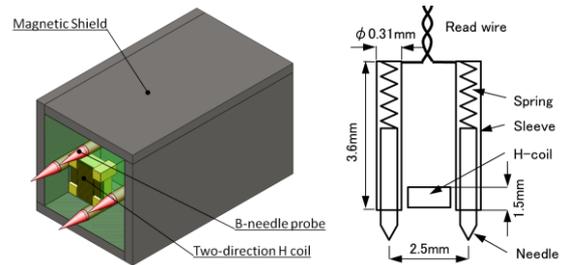


Fig.6 VH センサの解析モデル

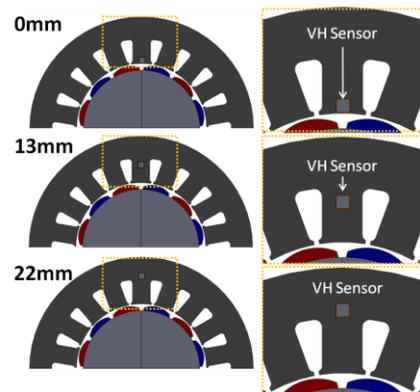


Fig.7 VH センサの設置位置

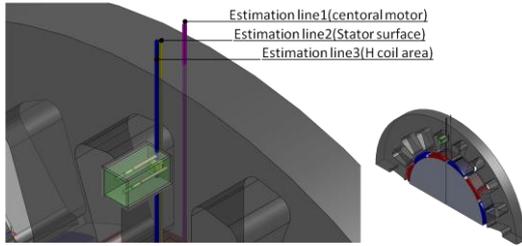


Fig.8 評価位置

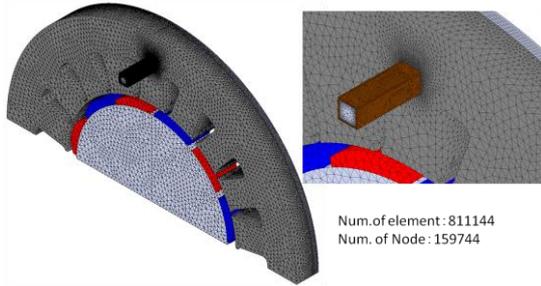
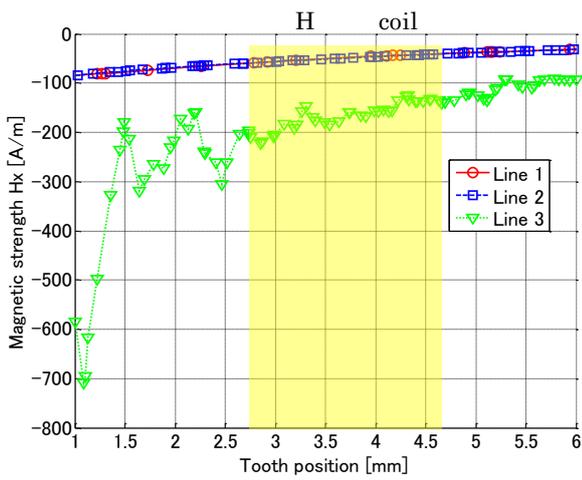
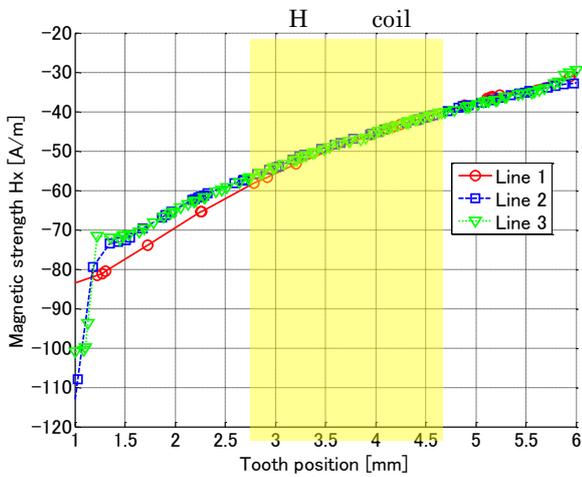


Fig.9 メッシュ図



(a) シールド無し



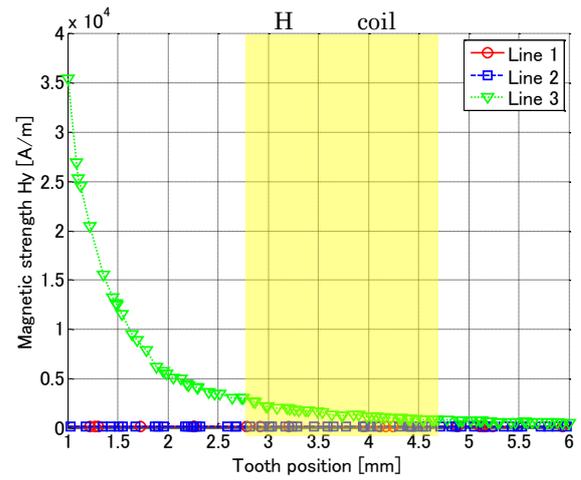
(b) シールド有り

Fig.10 X方向の磁界強度

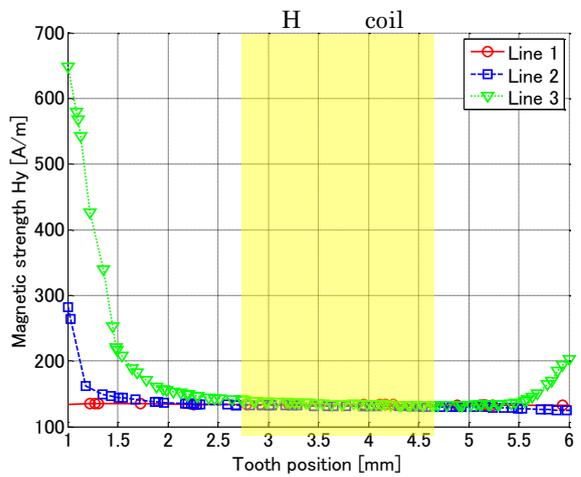
## 4.2 解析結果と考察

Fig.10にX方向の磁界強度解析結果を示す. 磁気シールドが無い場合にはLine3のHコイル領域で測定される磁界強度  $H_x$  と実機中の磁界強度  $H_x$  には大きな差があることがわかる. 一方, 磁気シールドを設置すると, 磁気シールドなしに比べステータ内とHコイル領域の磁界強度が一致していることがわかる. Fig.11にY方向の磁界強度解析結果を示す. X方向と同様に磁気シールドの有用性が確認できる. ただし, 磁気シールドが設置されている領域 (1mm~1.5mm, 5.5mm~6mm) の領域では磁気シールドの影響によりステータ内部の磁界強度と差が生じている. しかしながら, Hコイルの領域内では大きく影響していないことがわかる.

Fig.12に, VHセンサに磁気シールドを設置したものとしていないものの磁束密度分布を示す. 解析の便宜上, 磁気シールド無しの結果にも磁気シールドの外形が表示されているが, 空気領域として設定している. 磁気シールド材の直下では磁束の集中がみられる.



(a) シールド無し



(b) シールド有り

Fig.11 Y方向の磁界強度

Fig.13 に Fig.7 に示した VH センサの位置 0mm, 13mm, 22mm での H コイル領域とステータ領域との相対誤差を示す。磁気シールドを設置しない場合、ティースの先端位置 0mm がもっとも誤差が大きく、離れるに従って小さくなる。ロータに設置された永久磁石の漏洩磁界の影響が小さくなるためだと考えられる。磁気シールドを設置すると漏洩磁界の多いティース先端 0mm で最も磁気シールド効果が高いことがわかる。X 方向 Y 方向ともに 10% 以内に収まっている。また、ティース先端から少し離れた 13mm では漏洩磁界が少なくなるが、磁気シールド無しでは X 方向で 45%, Y 方向で 12.7% の誤差となる。磁気シールドを設置すると X 方向で 0.3%, Y 方向で 1.7% と大幅に改善する。ティース先端と同様に大きな効果が得られることがわかる。一方、ティース先端から最も遠い 22mm 位置でも磁気シールド効果は見込める。ただし、外部磁界が小さいため、相対誤差は大きくなる。

このように、一定以上の磁界が存在し、漏洩磁界が混在するような領域測定では、磁気シールドを設置することで精度良く測定が可能であることがわかる。

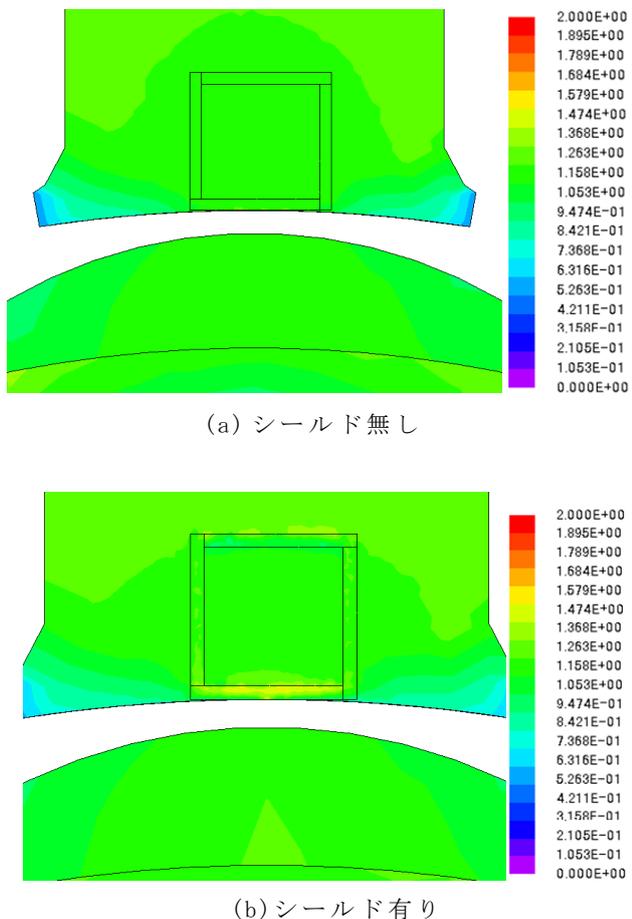


Fig.12 VH センサのシールド有無での磁束密度分布

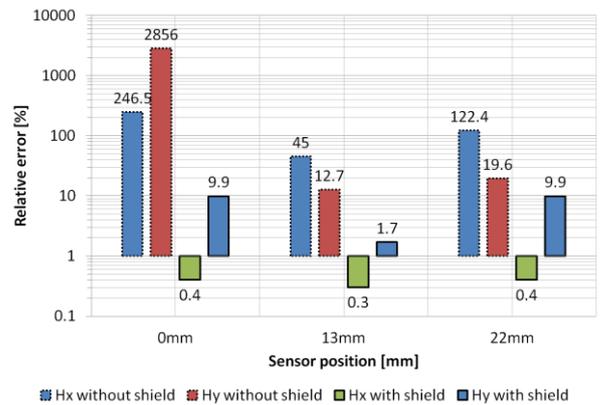


Fig.13 試料中の磁界強度と H コイル領域の磁界強度の相対誤差

### 4.3 実測結果と考察

解析条件と同条件でモデルモータを製作し、磁気特性測定をおこなった。Fig.14 にモデルモータの写真を示す。解析と同様にロータには厚さ 10mm の磁気シールドを施している。

Fig.15 にモデルモータの磁気特性を実測して得られた磁界強度分布を示す。ロータに磁気シールドをしていない場合、漏洩磁界によりティース先端では異常値が計測されており、正確に測定できていないことがわかる。磁気シールドを設置すると、先端部を除いて良好に測定ができていくことがわかる。ティースの先端部においては Fig.10, Fig.11 の解析結果からも、漏洩磁界の影響が排除できないことがわかっていることから、妥当な測定結果といえる。

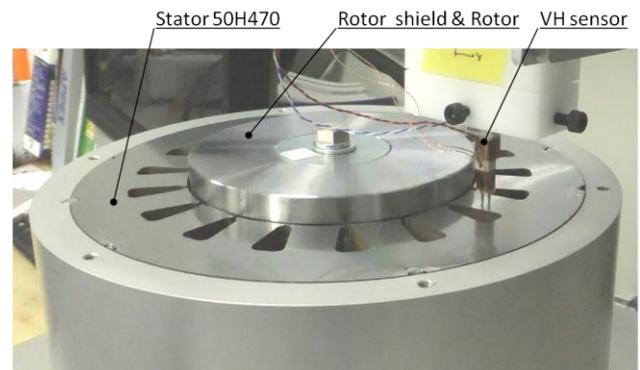
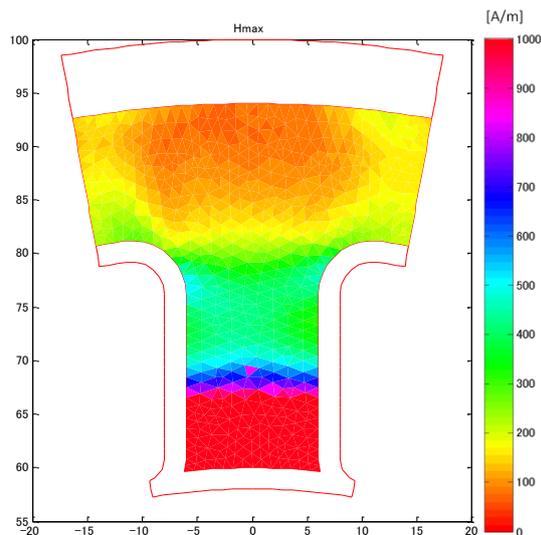
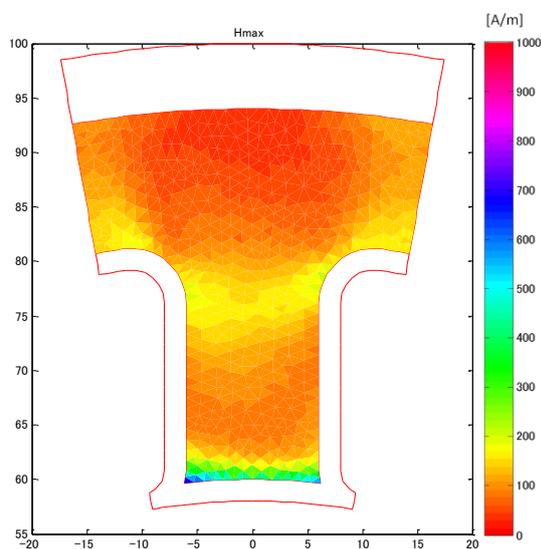


Fig.14 測定モータ



(a) ロータのシールド無し



(b) ロータのシールド有り

Fig.15 磁界強度分布の実測結果

## 5. まとめ

本論文では VH センサを用いた、モータの局所ベクトル磁気特性測定における磁気シールド効果を 3 次元磁界解析とモデルモータの磁気特性実測により検証した。得られた知見を以下にまとめる。

1. 永久磁石ロータからの漏洩磁界は H コイルに大きな影響を与えることを示した。
2. ロータに磁気シールドを設置すると、漏洩磁界の影響がティース先端 5mm 程度に抑制される。
3. VH センサに磁気シールドをすることにより、漏洩磁界の多いティース先端 0mm で最も磁気シールド効果が高いことを示した。
4. ティース先端から少し離れた 13mm では漏洩磁界

が少なくなるが、磁気シールド無しでは X 方向で 45%、Y 方向で 12.7%の誤差となる。磁気シールドを設置すると X 方向で 0.3%、Y 方向で 1.7%と大幅に改善する。

5. ティース先端から最も遠い 22mm 位置でも磁気シールド効果は見込める。ただし、外部磁界が小さいため、相対誤差は大きくなることを示した。
6. 解析条件と同条件のモデルモータを製作し、ロータの磁気シールド効果を検証し、解析結果と同様の結果を得られた。

## 参考文献

- (1) 甲斐祐一郎, 下地広泰, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人. “二軸引張応力下におけるベクトル磁気特性測定システムの応力印加機構の検討”, 電気学会論文誌 A, Vol. 130, pp. 403-408, 2010.
- (2) S. Aihara, H. Shimoji, T. Todaka, and M. Enokizono, Measurement of Local Vector Magnetic Properties in Laser Scratched Grain-oriented Silicon Steel Sheet with a Microscopic Vector-hysteresis Sensor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 11, pp. 4499-4502, 2012.

