

## 技術資料

## Technical Data

# 高性能磁気センサ GIGS®の感度における FEM シミュレーションと実素子の比較検討

蟹江三次\*<sup>1</sup>, 小山恵史\*<sup>2</sup>, 八木富一\*<sup>1</sup>, 金田安司\*<sup>3</sup>, 長田誠一\*<sup>1</sup>

## Comparison between Actual Device and FEM Simulation on Sensitivity of High Performance Magnetic Sensor GIGS®

Sanji Kanie, Shigenobu Koyama, Tomikazu Yagi, Yasushi Kaneta, and Seiichi Nagata

### Synopsis

GIGS which is constructed of a pair of soft magnetic yoke films and a nano-granular magnetoresistance film placed in the gap between the yoke films has high sensitivity, high output, small size and low power consumption as a magnetic sensor. It seems that the sensitivity of GIGS is enhanced by the shape and dimensions of the yoke, mainly.

In this paper, non-linear finite element magnetic simulations are applied to typical GIGS models with rectangular and tapered yoke films. Also, actual GIGS devices were manufactured and evaluated in comparison with the simulations. Finally, it was found that magnetic sensitivity, saturation magnetic field and output voltage were varied with the aspect ratio of length/width of the yoke films. The consistency between the simulations and the actual GIGS devices was really excellent. As a result, we could design the sensitivity of the GIGS without actual device manufacturing.

## 1. はじめに

磁気センサは電流、加速度、位置、方位、回転数、回転角などさまざまな物理量の検知に応用されている重要部品のひとつであり、今後も需要が増加すると予想されている。

磁界の検出方法にはさまざまな方法があるが、磁界の大きさによって電気抵抗が変化する磁気抵抗効果を利用した磁気抵抗素子が広く用いられている。磁気抵抗素子の中でも、絶縁体の中を流れるトンネル電流が磁界によって変化する現象（トンネル磁気抵抗効果、TMR 効果）を利用した TMR 素子は、磁気抵抗変化率が大きいこと、出力と感度が高く、小型化が可能で、なおかつ消費電力が小さいことから、次世代の磁気センサ素子とし

て注目されている。TMR 膜には極薄積層膜型とナノグラニューラー膜型<sup>1)</sup>が存在するが、ナノグラニューラー膜は積層膜に比べて成膜方法がシンプルであることから、低コストで安定した品質が得られるため、工業的に利用しやすいという特徴を有している。ナノグラニューラー膜を磁気センサとして使用する際の課題は、ナノサイズの磁性粒子が超常磁性挙動を取ることに起因して、大きな磁気抵抗変化を得るには大きな飽和磁界を必要とすることであり、結果として磁界感度が低いことであった。この課題を解決するために、(財)電気磁気材料研究所により GIGS (nano-Granular In Gap Magnetic Sensor) 構造が発案され開発された<sup>2), 3)</sup>。GIGS は、狭いギャップ中にあるナノグラニューラー TMR 膜の両側に一對の軟磁性ヨーク膜が配置されており、小さな外部磁界により軟磁性

2011 年 4 月 26 日受付

\* 1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\* 2 大同特殊鋼(株)研究開発本部, 工博 (Dr. Eng., Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\* 3 (財)電気磁気材料研究所研究開発事業部 (Research & Development Div., Research Institute for Electric and Magnetic Materials)

ヨーク膜が磁化され、この磁化により発生した大きな磁束を効率よくギャップ中にあるナノグラニューラー TMR 膜に集中させることで、最大で約 1000 倍程度磁界感度を向上している。すなわち、GIGS では軟磁性ヨーク膜の形状・寸法を変化させることで、磁気センサとしての飽和磁界（使用磁界範囲）を任意に設計できることとなる。しかしながら、従来の設計においては、所望の飽和磁界を得るために実デバイスの試作を繰り返して微調整を行う手法が主であり、開発に時間がかかるという問題があった。工業的に広範な応用を行うためには、定量的に GIGS の磁界感度を設計できる手法を確立し、顧客ニーズに合わせて迅速に正確に提供する体制を構築する必要がある。

そこで、本報では、有限要素法による磁界解析により GIGS の軟磁性ヨーク膜の寸法と飽和磁界の関係を系統的に調べ、実際に試作した GIGS 素子の測定結果と比較することにより計算方法の妥当性を検証した。また、同時に、GIGS の感度を向上させるための軟磁性ヨーク膜形状の最適化を行った。

## 2. 実験方法

### 2. 1 GIGSの構造

GIGS の基本的な構造を Fig.1 に示す。一对の軟磁性材料からなる長方形ヨーク膜の中央ギャップ部に大きな磁気抵抗効果を有するナノグラニューラー TMR 膜が配置され、電氣的に接続されたシンプルな構造となっている。外部磁界が印加されると、はじめに軟磁性特性を持つヨーク膜が磁化され磁束が発生する。次に、その磁束が、ギャップ部に効率よく導かれ、ナノグラニューラー TMR 膜に磁界が印加されて電気抵抗が変化し、GIGS 素子としての電圧出力が生じる。また、軟磁性ヨーク膜はナノグラニューラー TMR 膜に対する電極も兼ねている。

このギャップ部に導かれる磁界の大きさは軟磁性ヨーク膜の磁気特性と形状・寸法、および、ギャップ部の形

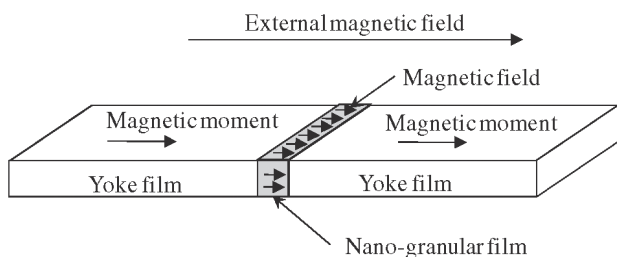


Fig.1. Schematic diagram of GIGS device.

状・寸法、さらにはナノグラニューラー TMR 膜の磁気特性で決定される。今回の検討においては、ギャップ部の形状・寸法とナノグラニューラー TMR 膜の磁気特性は一定とし、軟磁性ヨーク膜の形状・寸法のみを系統的に変化させることで、GIGS としての飽和磁界、従って、磁界感度の変化を確認した。

### 2. 2 磁界解析シミュレーション

軟磁性ヨーク膜の形状・寸法を変化させると、反磁界係数が変化し、同じ外部磁界でもヨーク膜内に発生する磁化の大きさに変化が生じる。さらに、磁気的なりラクタンスも変化することにより、結果的にギャップ部へ導かれる磁界の大きさが変化する。このギャップ部磁界を有限要素法による磁界解析によって計算した<sup>4)</sup>。

Fig.2 にシミュレーションに用いたメッシュモデルの一例を示す。使用した磁界解析ソフトは JSOL 社製の

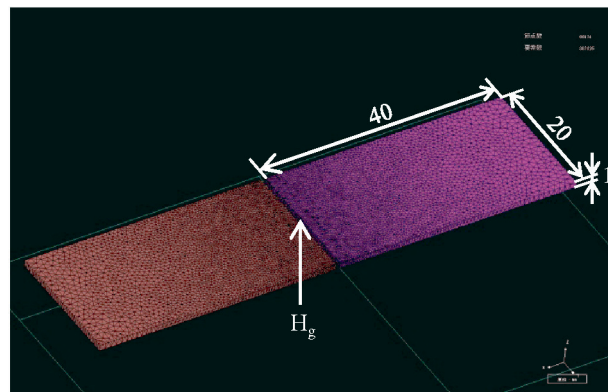


Fig.2. The magnetic field simulation mesh model for the GIGS with rectangular yoke films.

JMAG-Studio Ver.9.1 である。ギャップ部のメッシュサイズは 0.35 で、他の部分のメッシュサイズは計算効率を上げるために 0.5 ~ 10 の範囲で適宜設定した。軟磁性ヨーク膜の厚さ  $t$  と長さ  $L$  と幅  $W$  の寸法比は  $1 : L : W$  とした。Fig.3 に解析に用いた軟磁性ヨーク膜の BH 曲線を示す。これは  $\phi 10 \text{ mm} \times 1 \mu\text{m}$  の軟磁性薄膜サンプルの実測データであり、比透磁率は約 10000、飽和磁化は 1.23 T である。ヨーク膜以外の部分は、ナノグラニューラー TMR 膜のあるギャップ部を含めて真空として取り扱い、比透磁率 1 とした。本報では、ナノグラニューラー TMR 膜が配置されるギャップ部の中心 1 点で

の、ヨーク膜長手方向磁界強度を指標に用い、ギャップ部磁界  $H_g$  とした。

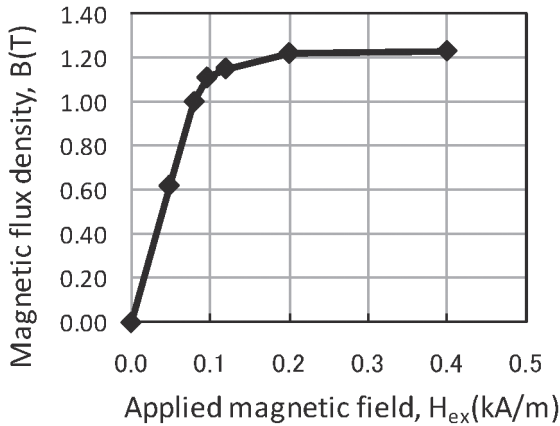


Fig.3. BH curve of a soft magnetic yoke film.

### 2. 3 GIGS作製方法

シミュレーションとの比較のために、同一形状の GIGS 素子を実際に作製した。GIGS 素子は小林らの文献<sup>3)</sup>に示されているように、ナノグラニューラー TMR 膜と軟磁性ヨークをフォトリソグラフィとイオンミリングを用いて微細加工することにより得られる。ナノグラニューラー TMR 膜は  $MgF_2$  ターゲットと  $FeCo$  ターゲットを用いて、RF/DC タンデムスパッタ法によって作製した。一方、軟磁性ヨーク膜は  $CoFeSiB$  ターゲットを用いて DC スパッタ法により非晶質膜として作製した。なお、GIGS 素子の磁気抵抗変化率は、外部磁界を軟磁性ヨーク膜長手方向に印加して、直流 2 端子法で電気抵抗を測定することにより求めた。測定はすべて室温で行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 矩形形状ヨーク膜のアスペクト比 $L/W$ と飽和磁界および感度の関係

まずは、矩形形状を持つ軟磁性ヨーク膜について検討した。磁界分布のシミュレーション結果の一例として、ヨーク膜長さ 40、ヨーク膜幅 20 で外部磁界を 1.6 kA/m としたときの GIGS 内の磁界強度計算結果を Fig.4 に示す。図は、ヨーク膜の半分の長さ (0.5) における断面を示している。ギャップ部磁界は、印加した外部磁界よ

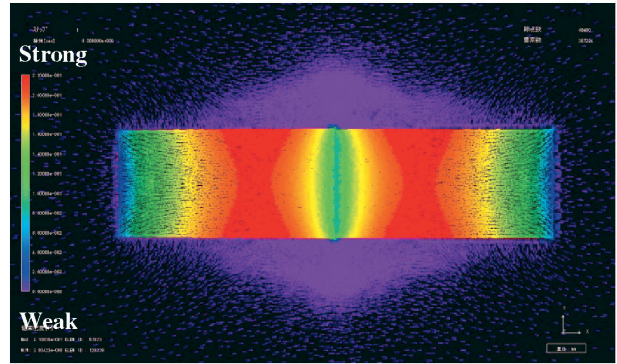


Fig.4. Simulated magnetic field distribution ( $t=1$ ,  $L=40$ ,  $W=20$ ,  $H_{ex}=1.6\text{kA/m}$ ).

りも桁違いに大きく、比透磁率が大きく磁化の大きな軟磁性ヨーク膜が存在することで、ギャップ部磁界が増幅されていることがわかる。

ヨーク膜の幅を 20 で固定させ長さのみを変化させることでアスペクト比を変化させた場合の外部磁界とギャップ部磁界のシミュレーション結果を Fig.5 に示す。外部磁界  $H_{ex}$  が大きくなるとギャップ部磁界  $H_g$  もそれに依存して大きくなるが、ある外部磁界からは飽和

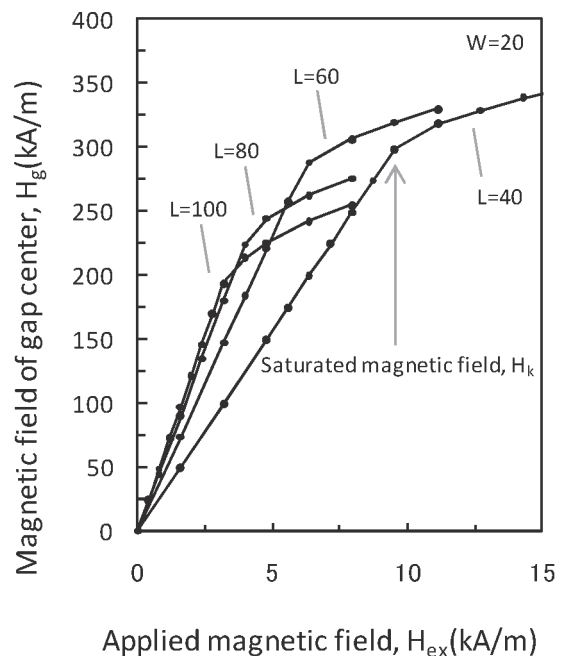


Fig.5. Relationship between applied magnetic field and magnetic field of gap center for Fig.2 model with  $L$  variation.

傾向を示す。これは軟磁性ヨーク膜が飽和することで、ギャップ部へ導かれる磁束も一定の値に落ち着くことによると考えられる。GIGS の設計基準の一つである飽和磁界  $H_k$  は Fig.5 に示すように  $H_{ex}$ - $H_g$  曲線の変曲点から求めた。ヨーク膜のアスペクト比  $L/W$  が大きいほど、飽和磁界  $H_k$  は小さくなる。これは前述した反磁界係数の大きさによると考えられる。一方、低外部磁界で線形性を示す領域での傾き  $H_g/H_{ex}$  は GIGS の外部磁界に対する感度に相当するが、この  $H_g/H_{ex}$  はアスペクト比  $L/W$  が大きいほど大きく、ほぼ  $H_k$  の変化により説明される。さらに、この結果からは、アスペクト比が大きいほど、 $H_k$  における  $H_g$  が低下することも見て取れる。これは軟磁性ヨーク膜の磁気的ならクタンスにより、ギャップ部へ導かれる磁界に対し他の空間へ漏れ出す磁界が大きくなることに起因すると考えている。

Fig.6 にヨーク膜の幅を 20 と 100 としてヨーク長さを変化させてシミュレーションした場合の飽和磁界  $H_k$  の変化を示す。図に示すように、いずれのヨーク膜幅を持つ GIGS でも  $L/W$  が大きいほど飽和磁界  $H_k$  が両対数軸プロット上で直線的に低下した。ただし、ヨーク膜幅  $W$  が異なる場合には同一直線上に乗っていないことから、回転楕円体とは異なり、今回のような厚さが薄い膜においては、反磁界係数はアスペクト比  $L/W$  だけで決まらないことがわかる。しかしながら、少なくともヨーク膜幅が一定の場合は、アスペクト比  $L/W$  と飽和磁界  $H_k$  の関係は両対数上で直線上にあり、設計が可能であることを示している。

次に、計算モデルと同じ構造を持つように試作した GIGS 素子の実測 MR 曲線を Fig.7 に示す。図にはヨーク膜の幅を 100 で固定させヨーク膜長さのみを変化させ

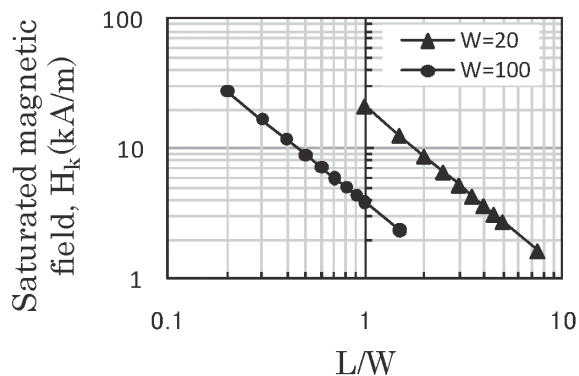


Fig.6. Relationship between  $L/W$  and saturated magnetic field.

ることでアスペクト比を変化させた GIGS 素子の測定結果を示している。シミュレーション結果と同様に、アスペクト比  $L/W$  が大きいほど飽和磁界  $H_k$  は小さくなった。Fig.7 から求まる低外部磁界範囲での出力感度  $MR\text{-ratio}/H_{ex}$  は、シミュレーションの  $H_g/H_{ex}$  を反映すると考えられるが、シミュレーションの結果とほぼ傾向が一致し、アスペクト比  $L/W$  が大きいほど出力感度  $MR\text{ ratio}/H_{ex}$  は大きくなった。

Fig.8 には、シミュレーションおよび試作 GIGS 素子

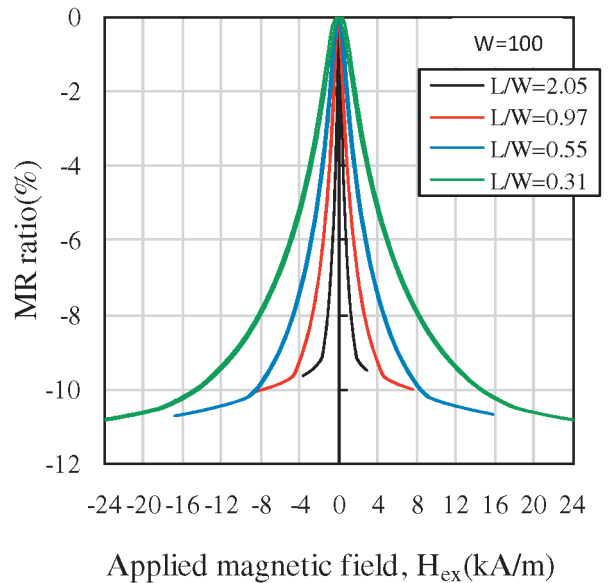


Fig.7. MR curves of actual GIGS device with rectangular yoke films.

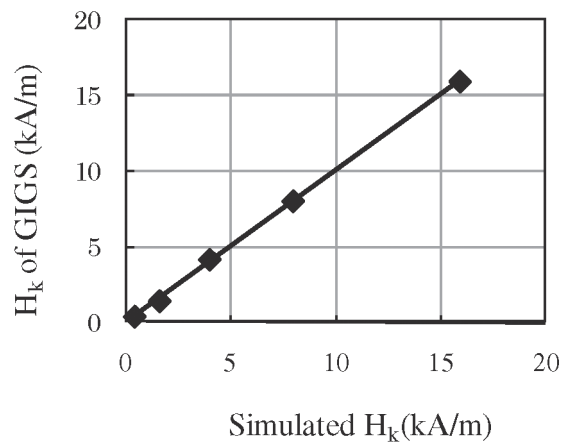


Fig.8. Relationship between simulated  $H_k$  and  $H_k$  of actual GIGS device.

の実測より求めたそれぞれの飽和磁界  $H_k$  の相関関係を示す。非常に良い正の相関関係を示すと共に、2つの飽和磁界は絶対値もよく一致しており、今回検討したシミュレーション方法は妥当と考えられる。

### 3. 2 ヨーク膜形状変化による感度の向上

前項では単純化のため矩形形状ヨーク膜で実験を行ったが、Fig.4の磁界分布を見ると長さ方向では磁界の大きい領域がそれぞれのヨーク膜の中央付近に存在し、ヨーク膜のギャップ部から離れており、それほど効率よくギャップ部へ磁束が導かれていないことがわかる。これは磁気リラクタンズにより、 $L/W$ の大きな場合、ヨーク膜内の磁界がギャップへ導かれる前に空間へ漏れ出しやすくなることを意味している。

これを改善し、ヨーク膜内に生じた磁束をギャップへ効率よく導くことができればナノグラニューラー TMR 膜により大きな磁界を印加することができるため、GIGSの感度が向上すると期待できる。そこで、単純な矩形形状ヨーク膜のギャップ側端部を面取りしたテーパ付きヨーク膜についてシミュレーションを行った。このテーパ付き形状は既に薄膜磁気ヘッドなどで応用されているが、薄膜磁気ヘッドでは軟磁性ヨーク膜が閉磁気回路であるのに対し、GIGSでは開磁気回路である点で異なる。

Fig.9にシミュレーションに用いた寸法比を示す。ヨーク膜長さ40、外側のヨーク膜幅  $W_r$  36、内側のヨーク膜幅  $W_i$  20で固定し、テーパ角度  $\theta$  を変数とした。また、他の条件は2.2で述べたものと同じである。

テーパ角度  $\theta$  を変化させた場合の外部磁界とギャップ部磁界の関係を Fig.10 に示す。外部磁界に対する感度  $H_g/H_{ex}$  は、矩形形状よりもテーパ付き形状の方が良くなり、 $\theta = 15^\circ$  で最大値を取る。一方、飽和磁界  $H_k$  も  $H_k$  におけるギャップ部磁界  $H_g(@H_k)$  も  $\theta$  の増加に依存して単調に大きくなる。図にはヨーク膜長さ40、ヨーク膜幅36の矩形形状の場合のシミュレーション結果も示している。この矩形形状ヨーク膜はテーパ付きの他のヨーク膜よりも磁束を生じる体積が大きいにもかかわらず、得られた  $H_g(@H_k)$  は小さい。これらのことから、テーパ付きヨーク膜の感度増加はヨーク膜体積の増加によるものではなく、テーパを付与したことによってギャップ部に効率的に磁束が導かれているためであると考えられる。

Fig.11には一例として、テーパ角度が  $15^\circ$  のヨーク膜の半分の厚さ (0.5) における断面の磁界分布のシ

ミュレーション結果を示すが、Fig.4の矩形形状ヨーク膜に比べて、長さ方向において磁界の大きい領域がよりギャップ部に近づき、ギャップ部磁界が増加することを示している。

次に、計算モデルと同じ構造を持つように試作した GIGS 素子の実測 MR 曲線を Fig.12 に示す。外部磁界に対する出力感度  $MR \text{ ratio}/H_{ex}$  は、矩形形状よりもテーパ付き形状の方が良くなり、シミュレーション結果と同じ傾向を示した。一方、飽和磁界  $H_k$  も  $H_k$  における MR 比  $MR\text{-ratio}(@H_k)$  も  $\theta$  の増加に依存して単調に大きくなる挙動を示し、シミュレーションと良く一致し

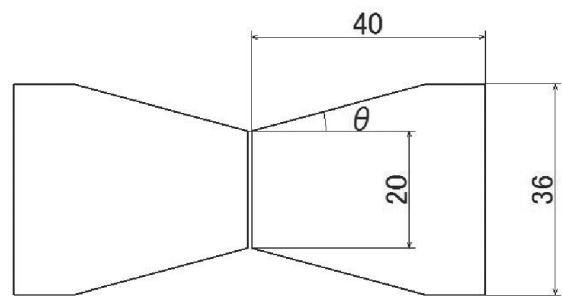


Fig.9. The magnetic field simulation model for the GIGS with tapered yoke films.

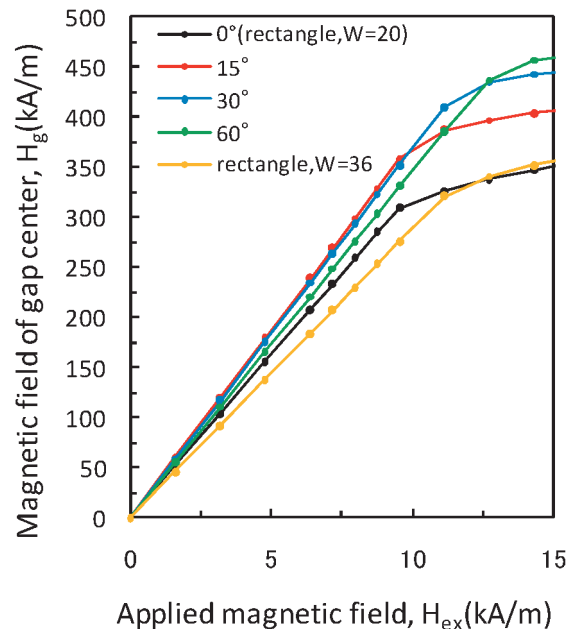


Fig.10. Relationship between applied magnetic field and magnetic field of gap center for Fig.9 model with taper angle variation.

た。特に、磁気センサとしての最大出力電圧に相当する  $H_k$  における MR 比は、テーパ角度  $\theta = 60^\circ$  で最大となり、矩形形状のそれよりも約 2 割向上し、MR 比が 10 % を超えることが実証できた。

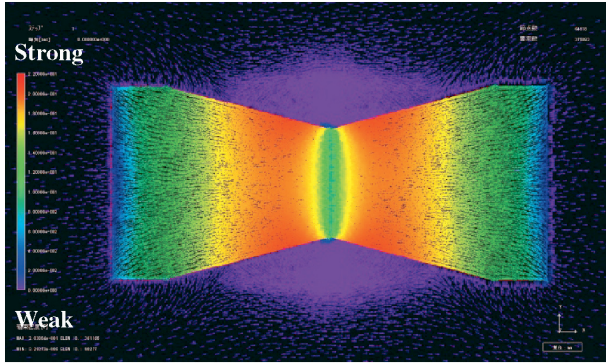


Fig.11. Simulated magnetic field distribution ( $\theta = 15^\circ$ ,  $t=1$ ,  $L=40$ ,  $W_f=20$ ,  $W_r=36$ ,  $H_{ex}=1.6\text{kA/m}$ ).

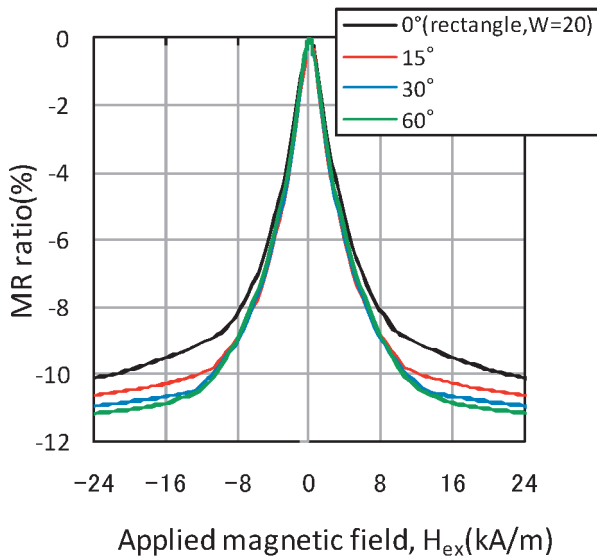


Fig.12. MR curves of actual GIGS device with tapered yoke films.

## 4. まとめ

今回、GIGS の軟磁性ヨーク膜形状と寸法だけを抽出し、ギャップ部形状を一定とし、他の部位を全て真空と近似した単純なモデルについて、有限要素法によりギャップ部磁界を非線形シミュレーションした。さらに、同一構造の GIGS 素子を試作し、実測した MR 特性とシミュレーションとの比較を行い、以下のことが明らかになった。

(1)最も単純な矩形形状ヨーク膜モデルでシミュレーションした結果、ヨーク膜アスペクト比  $L/W$  が大きくなるにつれて、感度は増加し、飽和磁界は低下し、飽和磁界におけるギャップ部磁界は低下することがわかった。これらの挙動は、シミュレーションと同一構造で試作した GIGS 素子の MR 特性を実測した結果とおおむね一致し、シミュレーションの妥当性を検証できた。

(2)矩形形状ヨーク膜にギャップ方向に対し絞り込むようにテーパを付与することで、大幅に磁気センサ感度を向上できることをシミュレーションで示した。さらに、シミュレーションと同一構造形状を有するテーパ付きヨーク膜を持つ GIGS 素子を実際に試作し、ほぼシミュレーションと同じ結果となることを実証した。最終的に、テーパ付きヨーク膜により、高感度化と共に、矩形形状ヨーク膜対比で飽和磁界での最大 MR 比も約 2 割向上し、MR 比 ( $@H_k$ )  $\geq 10\%$  を達成できた。

以上、今回示したシミュレーション方法を用いることによって、工期のかかる試作を行わなくても、GIGS 素子の感度・飽和磁界および出力特性を高い精度で設計することができるようになった。これにより新規モデルの開発時間を大幅に短縮することが可能となった。

(文 献)

- 1) H. Fujimori, S. Mitani and S. Ohnuma : Mater. Sci. Eng. B, 31(1995), 1-2, 219.
- 2) N. Kobayashi, S. Ohnuma, S. Murakami, T. Masumoto, S. Mitani and H. Fujimori : J. Magn. Magn. Mat., 188 (1998), 1-2, 30.
- 3) 小林伸聖, 白川究, 大沼繁弘, 増本健 : 電気学会 マグネティックス研究会, MAG-06-81(2006), 41.
- 4) 蟹江三次, 小山恵史, 八木富一, 長田誠一 : 電気学会 全国大会講演論文集(2008), 分冊 3, 200.

GIGS<sup>®</sup> は(財)電気磁気材料研究所の登録商標です。