

# 電磁界シミュレーションによるコプレーナ型薄膜磁界センサの解析 Analysis of coplanar line-type thin-film magnetic field sensor by electromagnetic field simulation

石原知弥<sup>a)†</sup>, 植竹宏明<sup>b)</sup>, 本多順一<sup>c)</sup>, 藪上 信<sup>a)c)</sup>, 山口正洋<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> 東北大学工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-5 (〒980-8579)

<sup>b)</sup> 電磁材料研究所, 富谷市成田 9-5-1 (〒981-3341)

<sup>c)</sup> 東北大学医工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-5 (〒980-8579)

T. Ishihara<sup>a)†</sup>, H. Uetake<sup>b)</sup>, J. Honda<sup>c)</sup>, S. Yabukami<sup>a)c)</sup>, and M. Yamaguchi<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6-5 Aramaki Azaaoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

<sup>b)</sup> Research Institute for Electromagnetic Materials, 9-5-1 Narita, Tomiya 981-3341, Japan

<sup>c)</sup> Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku Univ., 6-6-5 Aramaki Azaaoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

We have developed highly sensitive thin-film sensor using a straight coplanar line structure. High-frequency characteristics were analyzed to improve the sensor's impedance and S-parameter in consideration of transmission line theory, ferromagnetic resonance, and the complex permeability of magnetic thin film. A finite element method analysis was performed on the coplanar line-type thin-film sensor. The calculated S-parameters and impedance were in rough agreement with the measured value including the FMR frequency. The attenuation of  $S_{21}$  was caused by an impedance mismatch inside the sensor element.

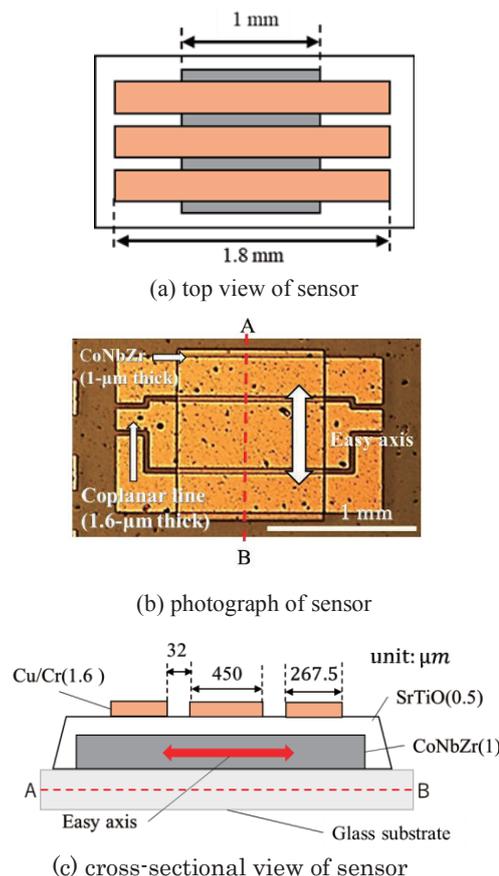
**Key words:** magnetic sensor, thin film, coplanar line, electromagnetic field analysis

## 1. 背景

近年磁界センサの高感度化が急速に進展している。代表的な高感度磁界センサとして超伝導量子干渉磁束計 (SQUID)<sup>1),2)</sup>や光ポンピング法<sup>3)</sup>があり, 生体磁気計測, 非破壊検査等へ応用されている。しかし SQUID 磁束計は超伝導現象を利用するためセンサヘッドを液体ヘリウム等で冷却する必要があり, 高コストかつ煩雑なメンテナンスが要求されることから, 一部の医療機関や研究機関に限定的に設置されている。一方, 室温で動作する高感度磁界センサの研究も活発に行われており, GMI センサ<sup>4)</sup>, フラックスゲートセンサ<sup>5)</sup>, TMR センサ<sup>6)</sup>の高感度化も報告されている。

筆者らはこれまで磁性薄膜を用いて伝送線路に構成し, GHz 帯の高周波キャリア通電による表皮効果, 強磁性共鳴を利用したセンサを開発し, 磁気シールドなしで健常者の心磁界多点計測に成功した<sup>7),8)</sup>。並行して高周波駆動に関するセンサ素子の感度等を検討しているが<sup>9)~12)</sup>, 強磁性共鳴周波数(数 GHz 帯)における透過係数( $S_{21}$ )の大きさは -40 dB 程度と大きく減衰しており, それがセンサシステムの SN 比を悪化させる要因になっている。透過係数( $S_{21}$ )の減衰の要因については, インピーダンス不整合, 電気的損失, 磁性薄膜の渦電流損失, 強磁性共鳴が考えられるが, これらについて明らかにするために, 高周波帯でのセンサの正確な動作解析が必要である。

そこで本稿では, まずセンサ素子の高周波特性と磁界に対する応答性を定量的に把握することを目的として, 構造および動作が比較的単純な直線コプレーナ構造の薄膜磁界センサを作製し, 磁界に対する S パラメータ等の変化を測定した。並行して, 試作センサを有限要素法によりモデル化し, 高周波域での磁界印加に対する S パラメータ等を解



**Fig. 1** Schematic view of sensor element.

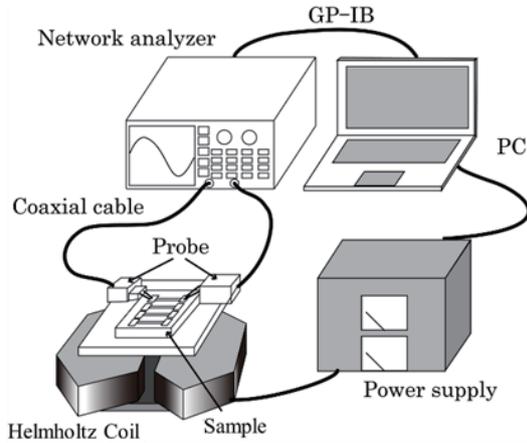
析し, 実測値と比較した。その結果, 実測値と解析値がおおむね対応し, 動作メカニズムを把握することができ, 透過係数( $S_{21}$ )の減衰に関する原因を明らかにするとともに, インピーダンス整合により透過係数( $S_{21}$ )の増大により SN 比の向上に関する知見が得られたため報告する。

Corresponding author: T Ishihara

(e-mail: [tomoya.ishihara.s4@dc.tohoku.ac.jp](mailto:tomoya.ishihara.s4@dc.tohoku.ac.jp)).

**Table 1** Fabrication conditions.

	CoNbZr	SrTiO	Cu / Cr
Power (W)	200	200	200
Ar pressure (mTorr)	5	20	20
Thickness ( $\mu\text{m}$ )	1	0.5	1.6 / 0.2



**Fig. 2** Schematic diagram of experimental setup.

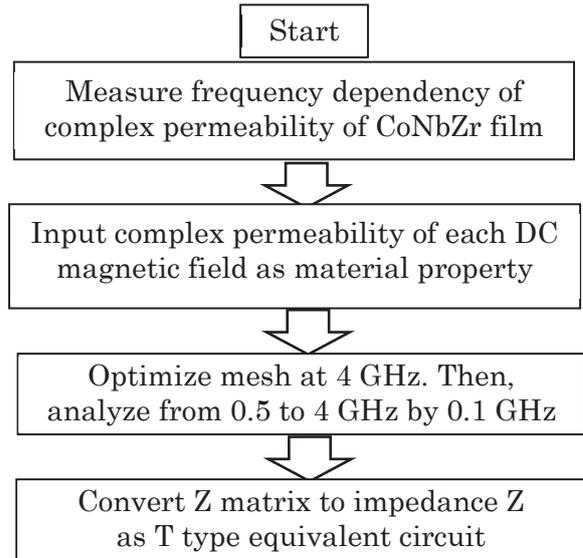
## 2. 実験方法および計算方法

### 2.1 センサ素子の作製および評価

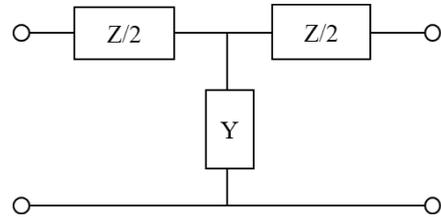
Fig. 1 は直線コプレーナ線路により構成される薄膜磁界センサ素子の構造を示したもので、Fig. 1(a)は上面図、(b)は上部からのセンサ素子端部付近の写真を示しており、(c)はAB間の断面図を模式的に示した。Table 1 は薄膜の膜厚および成膜条件を示した。

センサ素子は CoNbZr 薄膜とその上部に位置する直線コプレーナ構造(長さ 1.8 mm)から構成される。ガラス基板(25 mm×25 mm, 厚さ 1 mm)上にアモルファス CoNbZr 薄膜(1.15 mm×1 mm, 厚さ約 1  $\mu\text{m}$ )を RF マグネトロンスパッタ法により成膜し、SrTiO 薄膜(厚さ約 0.5  $\mu\text{m}$ )を介して Cu 薄膜による直線コプレーナ線路(450  $\mu\text{m}$  幅, ギャップ 32  $\mu\text{m}$ , 厚さ 1.6  $\mu\text{m}$ )をそれぞれリフトオフにより作製した。SrTiO 薄膜と Cu 薄膜の間には Cr 薄膜(厚さ 0.2  $\mu\text{m}$ )を積層した。コプレーナ導体パターンは磁性薄膜が無い場合には特性インピーダンスがほぼ 50  $\Omega$  になるように設計した。CoNbZr 薄膜はスパッタ後、回転磁界中熱処理(300  $^{\circ}\text{C}$ , 2 時間, 0.3 T)および静磁界中熱処理(300  $^{\circ}\text{C}$ , 1 時間, 0.3 T)を施して、コプレーナ導体の幅方向を磁化容易軸となるよう磁気異方性を誘導した。SrTiO 薄膜は基板加熱しながら成膜した。成膜時の基板加熱温度は 160  $^{\circ}\text{C}$  とした。キャリアの導電電流はコプレーナの中心導体および外部導体を流れ、CoNbZr 薄膜には導通しない。

Fig. 2 はセンサの磁界に対する応答性および高周波信号の測定系を示したものである。センサの評価はネットワークアナライザを用いて S パラメータを測定し、インピーダンスに変換した。センサ素子への電気的な接続にはウエハ

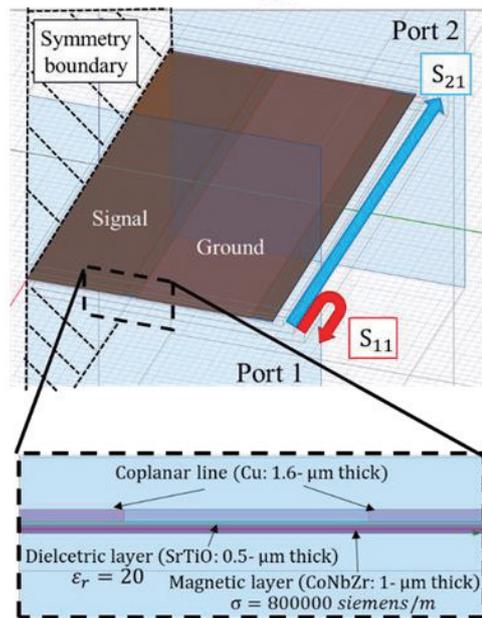


(a) procedure for calculating impedance



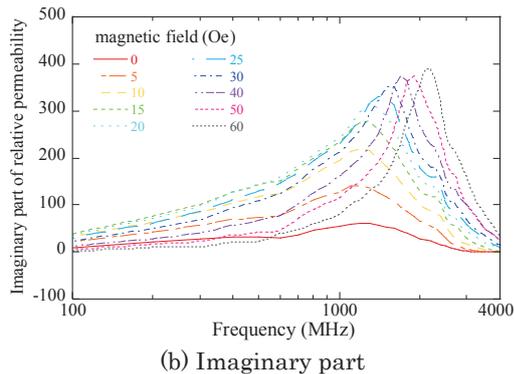
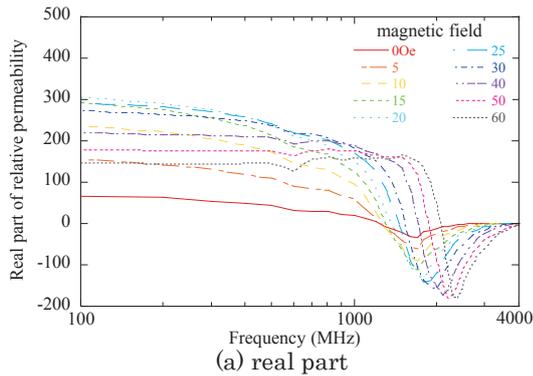
(b) equivalent circuit of sensor

**Fig. 3** Flow chart of analysis.



**Fig. 4** Simulation model of sensor.

プローブ(GSG-40A-150DP, GGB INDUSTRIES INC.)を用いた。印加磁界はコプレーナ線路の長手方向へ電磁石を用いて、ゆっくり変化させて、ネットワークアナライザ(AVR3767CG)により、周波数を掃引して反射係数( $S_{11}$ )と透過係数( $S_{21}$ )を測定した。測定周波数範囲は 0.5~4 GHz と



**Fig. 5** Frequency dependency of complex permeability measured by shielded loop coil method.

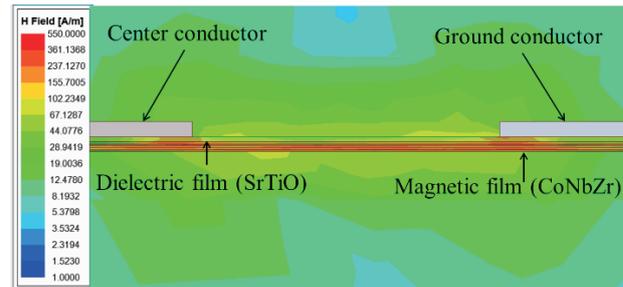
し、バンド幅は 1 kHz、平均化回数は 16 回、RF 投入電力は 0 dBm とした。キャリブレーションは、ネットワークアナライザのフル 2 ポート校正を行うことで同軸ケーブル、ウエハプローブの電気長、損失、接触抵抗を校正し、その後反射係数( $S_{11}$ )と透過係数( $S_{21}$ )の測定した。

## 2.2 センサ素子の動作解析

Fig. 3 はセンサ素子の有限要素法による解析手順を示した流れ図である。電磁界解析には CoNbZr 薄膜の磁化容易軸方向の複素比透磁率を使用した。複素透磁率は CoNbZr 薄膜 (5 mm × 5 mm、厚さ 1.5 μm) に直流磁界を磁化困難軸方向へ印加し磁化容易軸方向の透磁率を測定して使用した。解析では汎用の電磁界解析ソフトウェア HFSS (Ansys Electronics Desktop 2020R1, Ansys Inc.) を用いて、0.5~4 GHz の帯域で解析した。得られた S パラメータからインピーダンス行列  $Z$  を求めて Fig. 3 (b) の等価回路を求め、実測値と比較した。インピーダンス  $Z$  への換算方法は、Fig. 3(a) に示した等価回路を仮定し、(1)式を用いて反射係数( $S_{11}$ )、透過係数( $S_{21}$ )からインピーダンス行列  $Z$  へ変換し、磁性薄膜の透磁率が反映されるインピーダンスを求めた。

$$Z = Z_0(I + S)(I - S)^{-1} \quad (1)$$

ただし  $Z_0$  は特性インピーダンス、 $I$  は単位行列、 $S$  は散乱行列である。ただし、等価回路は、対称性を持った T 型回路を仮定し、 $S_{11} = S_{22}$ 、 $S_{21} = S_{12}$  とした。Fig. 4 は有限要素法における三次元電磁界解析モデルである。電磁界解析には汎用の解析ソフトウェア HFSS を用いた。



**Fig. 6** Magnetic field distribution calculated by HFSS.

Fig. 4 は斜め方向から見た解析モデルの全体図、および、電磁界進行方向の正面 (Port1 側) から見た拡大図である。高周波電磁界は Port1 のコプレーナ線路から Port2 のコプレーナ線路へ伝搬させる方法で計算した。CoNbZr 薄膜は内部導体、外部導体 (地導体) とは接続せず、導電電流は流れない。モデルの対称性からコプレーナ線路の中心導体の中心面を、対称境界面 (磁気壁) とした。SrTiO 薄膜の比誘電率  $\epsilon_r$  は 20 とした。CoNbZr 薄膜の複素比透磁率は、シールドループコイル法<sup>13)</sup>による測定値を入力した。

Fig. 5 は測定した CoNbZr 薄膜 (5 mm × 5 mm、厚さ 1.5 μm) の磁化容易軸の複素比透磁率であり、このとき直流磁界を磁化困難軸方向へ 0~60 Oe の範囲で変化させて測定した。比透磁率の実数部は磁界を印加しない時に最小であり、異方性磁界付近で最大となった後、減少した。強磁性共鳴周波数は磁界を増加するにしたがって、高周波化した。本解析では CoNbZr 薄膜の強磁性共鳴、渦電流損失等を含む周波数依存性を考慮することで、センサ素子の高周波電気的特性を高精度に解析することを意図した。CoNbZr 薄膜の導電率は、 $8 \times 10^5$  siemens/m とした。

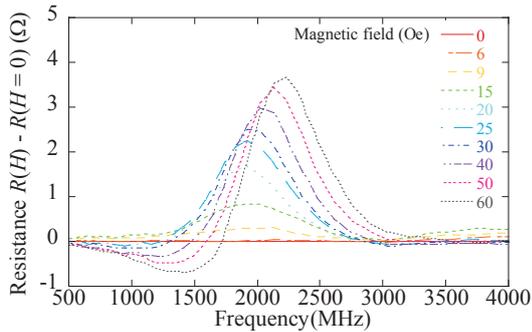
## 3. センサ実測値および計算値との比較

### 3.1 周波数依存性の比較

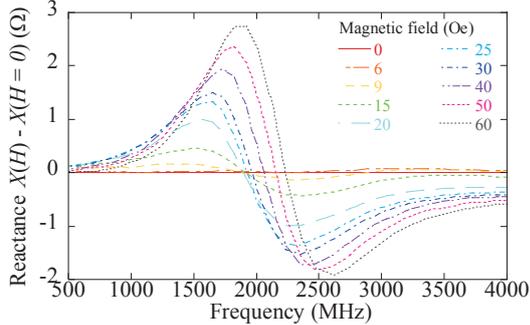
Fig. 6 は上記の電磁界解析により得られた磁界分布をコプレーナの中心導体と外部導体のギャップ付近の断面を拡大して示したものである。周波数は 4 GHz であり、収束条件は  $10^{-3}$ 、メッシュ数は約 38 万個であった。高周波電流は中心導体と外部導体 (地導体面) でギャップ側に集中して流れ、これによって磁界はギャップ付近で強くなっている合理的な結果が得られた。

Fig. 7 はセンサの測定結果を示したものであり、(a) は抵抗、(b) はリアクタンスを周波数に対して示した。抵抗およびリアクタンスは (1) 式を用いて S パラメータから変換した。直流磁界はセンサ素子の長手方向へ 0~60 Oe の間で変化させた。抵抗およびリアクタンスは 0 Oe を基準としてそれぞれの磁界強度の値との差分を示した。

Fig. 8 は 2.2 の手法で電磁界解析したセンサ素子の計算値を示している。(a) は抵抗、(b) はリアクタンスである。実測値と理論値はいずれも他磁界に比較して透磁率の周波数依存性が少ない 0 Oe における値を基準とした。大まかに抵

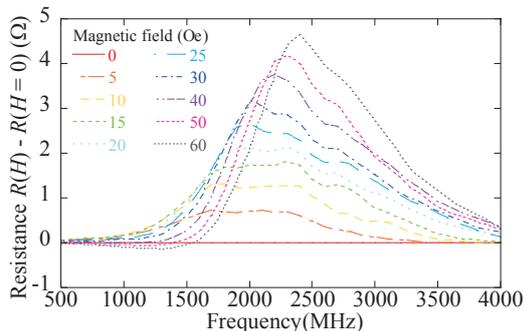


(a) resistance

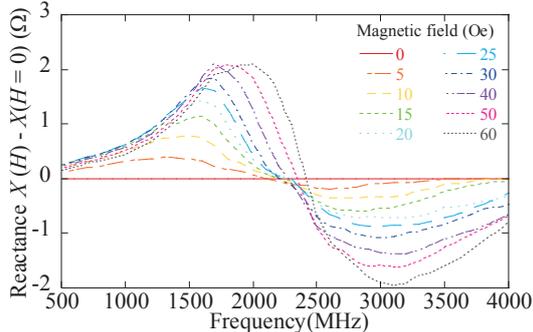


(b) reactance

**Fig. 7** Frequency dependency of measured impedance. (The impedance when 0 Oe is used as a reference)



(a) resistance



(b) reactance

**Fig. 8** Frequency dependency of calculated impedance. (The impedance when 0 Oe is used as a reference)

抗は、複素透磁率の虚数部が主として反映され、リアクタンスは比透磁率実数部が主に反映される。本薄膜磁界センサでは、磁性薄膜の一部が高周波磁界により局所的に励磁

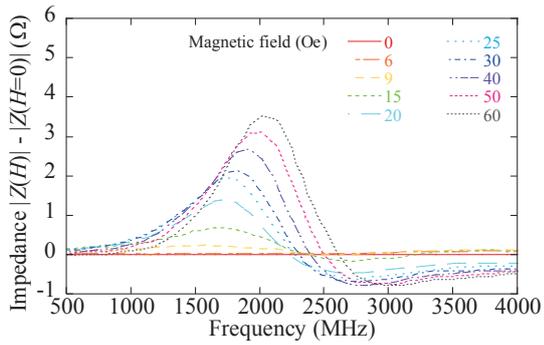
されることから、反磁界による強磁性共鳴の周波数変化<sup>14)</sup>、磁性薄膜の損失を有する伝送線路としての高周波挙動を考慮した解析になっている。Fig. 7 と Fig. 8 では、強磁性共鳴周波数で抵抗が極大となり、リアクタンスが正から負に変化した。また、強磁性共鳴周波数は直流磁界の増加により高周波側へ変化した。これらの傾向は抵抗とリアクタンスの実測値と解析値で定性的に対応し、本解析手法の妥当性が示されたとともに、本手法がセンサ素子の設計に有用であることを明らかとした。

実測値と理論値の誤差の要因はセンサ素子に成膜されている CoNbZr 薄膜が微細化 (1.15 mm × 1 mm) され、電磁界解析に使用した透磁率測定時とは外形寸法が異なっていること、微細加工プロセス、スパッタ等により歪み等が CoNbZr 薄膜へ導入されて磁気特性が劣化したこと、還流磁区の磁壁移動による影響等が考えられる。また、1.0 - 1.5 GHz において、Fig. 7 (a), Fig. 8 (a) から抵抗の差分が負になっていることがわかる。これは Fig. 5 の透磁率虚数部に着目すると、0 Oe よりも 60 Oe における値が小さくなっていることに起因している。この理由として、CoNbZr 薄膜の多磁区構造により 0 Oe における透磁率が 1 とならないこと、磁化の異方性分散が存在するため共鳴のピークの幅が広がることが挙げられる。抵抗には、主として透磁率虚数部が反映されるため、抵抗の差分が負になったと考えられる。また、実測値については、解析値よりも差分が大きくなっている。これは、実測値が解析値よりも無磁界と磁界印加時の反射係数の差が大きいためであると考えられる。

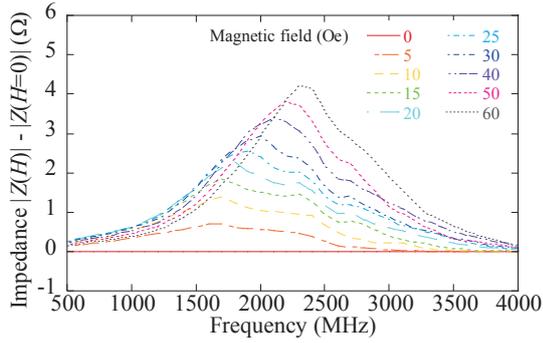
### 3.2 印加直流磁界依存性の比較

Fig. 9 はセンサのインピーダンスの周波数依存性を示したものである。縦軸は磁界 0 Oe の値を基準とした。印加直流磁界の増加により極大値をとる周波数が高周波側に変化する傾向は実測値と理論値で定性的に対応していると考えられる。一方、インピーダンスが極大値となる周波数は実測値と解析値で異なった。これは磁性薄膜内部の異方性磁界が透磁率評価試料とセンサ素子の CoNbZr 薄膜において 10 Oe 程度異なることに起因しているためと考えられる。そこで透磁率評価用の微細加工していない薄膜とセンサに用いている CoNbZr 薄膜においては磁性薄膜内部の異方性磁界が異なっていたと想定されることから、この異方性磁界(10 Oe)を加算して電磁界解析を行った。

Fig. 10 はセンサのキャリア周波数として使用する帯域である 1.5 GHz および 2 GHz に周波数を固定して、直流磁界を変化させた場合におけるインピーダンスを実測値と計算値について比較したものである。Fig. 7, 8 と同様に、印加磁界 0 Oe の場合を基準として、それに対する相対的な変化量を示した。Fig. 10 より、実測値に対する理論値の誤差は、1.5 GHz で、50%以内、2.0 GHz で 30%以内であった。また、インピーダンスは磁界の増加にしたがって増加し、異方性磁界に相当する磁界強度で極大値となり、その後減少した。低磁界側では実測値の変化が理論値よりも

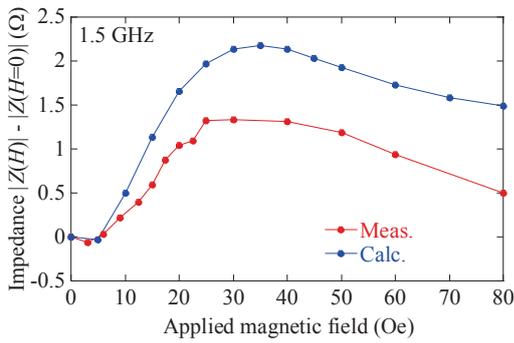


(a) measurement

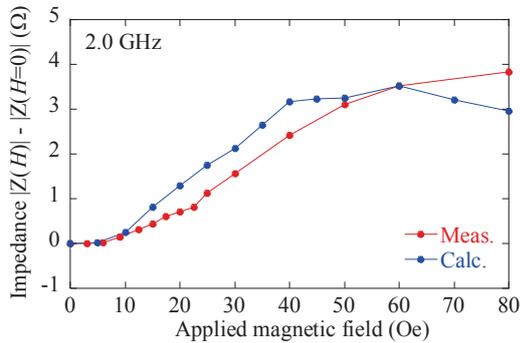


(b) calculation

**Fig.9** Frequency dependency of impedance. (The impedance when 0 Oe is used as a reference)



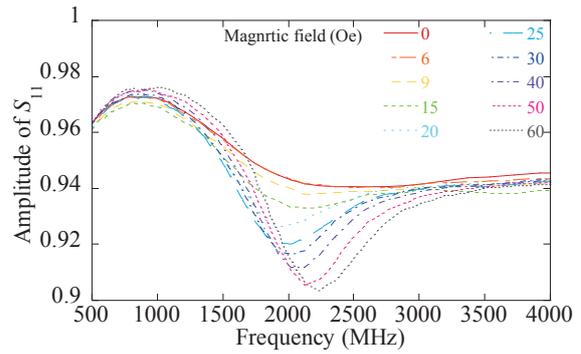
(a) impedance at 1.5 GHz



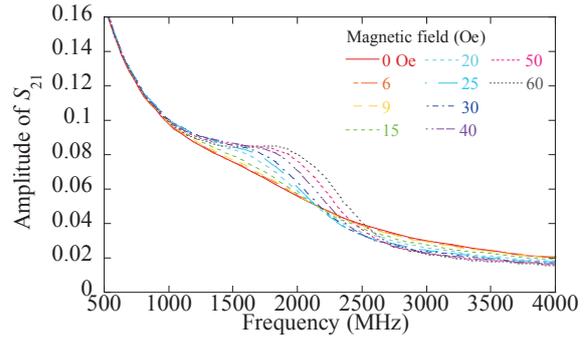
(b) impedance at 2.0 GHz

**Fig. 10** Comparison of measured and calculated impedance change of applied magnetic field.

小さく、これは磁壁移動等による誤差が影響しているため考えられる。

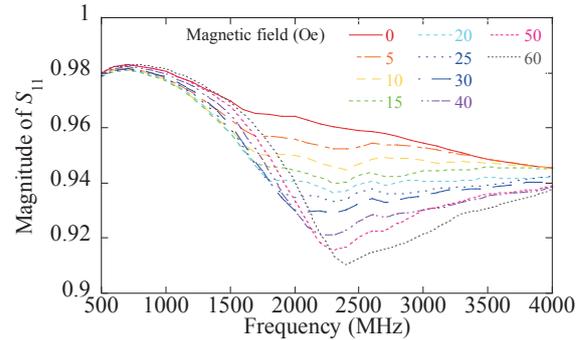


(a) amplitude of  $S_{11}$

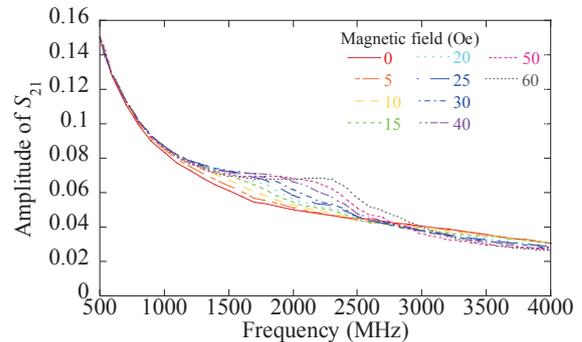


(b) amplitude of  $S_{21}$

**Fig.11** Measured amplitude of S parameter.



(a) amplitude of  $S_{11}$



(b) amplitude of  $S_{21}$

**Fig. 12** Calculated amplitude of S parameter.

### 3.3 Sパラメータとキャリアの減衰

Fig. 11 は周波数に対する S パラメータの実測値を示し、Fig. 12 は S パラメータの計算値を示したものである。それぞれ、(a)は反射係数( $S_{11}$ ), (b)は透過係数( $S_{21}$ )を示して

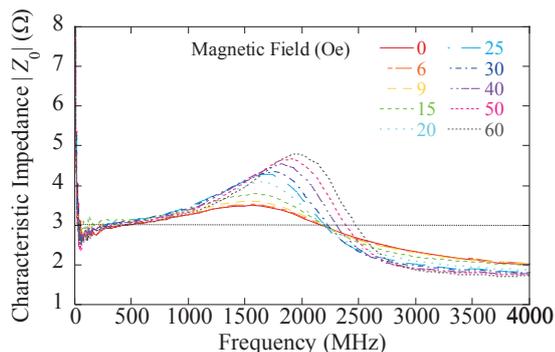


Fig. 13 Frequency dependency of characteristic impedance.

いる。磁界強度は 0 Oe~60 Oe を記載した。実測値と理論値は概ね対応しておりキャリアとしての動作周波数帯である 2 GHz 前後の周波数帯で透過係数( $S_{21}$ )の振幅は 0.1 以下に減衰した。一方、同程度の周波数帯で反射係数( $S_{11}$ )は 0.9 以上に大きくなった。

また、投入した電力 $P_{in}$ に対する損失 $P_{loss}$ の割合は次式<sup>15)</sup>であらわされる。

$$\frac{P_{loss}}{P_{in}} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2)$$

よって透過係数( $S_{21}$ )と反射係数( $S_{11}$ )からセンサ素子におけるコプレーナ導体での損失、磁性薄膜の渦電流損、および強磁性共鳴による損失を求めると例えば 2 GHz 付近で 0.15 程度である。また、(2)式より求めた Fig. 3(b)の等価回路における Z 行列からインピーダンス Z とアドミタンス Y を用いて、線路の特性インピーダンスは次式であらわされる。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (3)$$

(3)式から特性インピーダンスを計算し、その周波数特性を Fig. 13 に示した。Fig. 13 より、周波数に対して一定になっている値からセンサの特性インピーダンスは約 3 Ω であり 50 Ω から大きくずれているため、 $S_{21}$ の減衰は主としてインピーダンス不整合による反射が要因であることが確認された。これより、磁性薄膜を組み合わせた状態で特性インピーダンスを 50 Ω に近づける設計がセンサシステムの高 SN 比のために重要であることが了解された。

#### 4. 結論

1. アモルファス CoNbZr 薄膜と SrTiO 薄膜を組み合わせた直線コプレーナ線路構造の薄膜磁界センサを微細加工プロセスにより作製した。
2. 同寸法のセンサ素子に対して三次元有限要素法電磁界解析を用いて、CoNbZr 薄膜の強磁性共鳴、渦電流損等の周波数依存性を考慮した解析を行い、センサ素子の高周波インピーダンス、S パラメータ等を解析した。

3. 実測値と理論値は磁界依存性、周波数依存性ともに良好に対応し、本解析法の有効性を示した。
4. 試作したセンサ素子では CoNbZr 薄膜によるインピーダンス不整合による反射が支配的であり、これが透過係数( $S_{21}$ )の減衰の主要因であることがわかった。

**謝辞** 電磁界解析にご支援いただいた東北大学学術研究員宮澤安範様に感謝いたします。本研究の一部は、科研費(16H04378)、JSPS「二国間交流事業共同研究」(JPJSPBP120197704)、総務省「電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発」(J20000404)の研究成果である。

#### References

- 1) T. Tsuji and M. Kotani: *The Japanese journal of medical instrumentation*, **60**, 327-332 (1990).
- 2) T. Tomita, A. Arakawa, K. Shinada, N. Matsuda, K. Nakano, Y. Yamada, and Y. Yoshida: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**, 913 (1998).
- 3) S. Groeger, G. Bison, P. E. Knowles, R. Wynands, and A. Weis: *Sensors and Actuators A*, **129**, 1 (2006).
- 4) T. Uchiyama: *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, **136**, 10 (2016).
- 5) I. Sasada, and H. Karo: *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, **136**, 18 (2016).
- 6) Y. Ando: *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, **136**, 22 (2016).
- 7) S. Yabukami, K. Kato, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **38**, 25 (2014).
- 8) S. Yabukami, K. Kato, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai: *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, **133**, 372 (2013).
- 9) S. Yabukami, H. Uetake, K. Moriya, T. Tominami, and H. Onodera: *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, **137**, 460 (2017).
- 10) H. Uetake, T. Kawakami, K. Moriya, S. Yabukami, and T. Ozawa: *IEEE Trans. Magn.*, **51**, 4005003 (2015).
- 11) H. Uetake, T. Kawakami, S. Yabukami, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 4007604 (2014).
- 12) H. Uetake, S. Yabukami, T. Chiba, T. Ozawa, N. Suzuki, N. Kobayashi, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **38**, 83(2014).
- 13) M. Yamaguchi, S. Yabukami, K. I. Arai, *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 4941(1996).
- 14) S. Muroga, Y. Asazuma, M. Yamaguchi, *IEEE Trans. Magn.*, **49**, 4032(2013).
- 15) H. Ono, T. Ito, S. Yoshida, Y. Takase, O. Hashimoto, and Y. Shimada, *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2853(2004).

2021年11月12日受理, 2022年1月20日採録