

Fig. 6 Signal level and noise level as functions of the carrier current density.

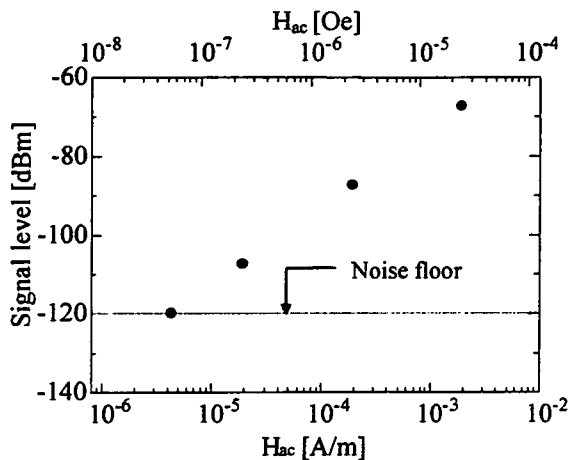


Fig. 7 Signal level as a function of the ac magnetic field.

を使用し、幅 0.8 mm、長さ 30 mm、厚さ 18 μm の直線形状とした。磁性膜を設置しない状態では特性インピーダンスはほぼ 50 Ω であった。また、伝送線路上にのせる $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜は一辺 25 mm の正方形、厚さ 4 μm とした。磁性膜上に塗布したレジスト厚さは約 5 μm とした。

Fig. 5 に Fig. 4 のセンサのインピーダンスと印加磁界のグラフを示す。キャリア周波数が 700 MHz においてインピーダンス変化率の最大値は 47.8 Ω/Oe (0.601 $\Omega/(\text{A/m})$) であった。

Fig. 6 に Fig. 4 のセンサの信号強度及びノイズレベルの通電電流密度依存性のグラフを示す。キャリア周波数は 700 MHz とした。測定交流磁界は周波数 501 kHz、振幅は 2.4×10^6 Oe (1.9×10^4 (A/m)) とした。Fig. 6 より伝送線路型センサによる磁界検出が可能であることが示された。センサの通電電流密度を上げた場合、ノイズレベルの上昇は磁性体に直接通電する場合と比較して小さかった。これは磁性体への直接の通電を避けることで、キャリア電流による大振幅励磁磁が起きにくくなるためと考えられる。

Fig. 7 は Fig. 4 のセンサの SN 比が最大となる条件における測定交流磁界強度と信号強度のグラフである。交流磁界強度と信号強度は比例関係にあり、信号強度がノイズフロアと同じレベルとなるときの交流磁界強度がこのセンサの磁界検出分解能となる。この実験では、交流磁界周波数 501 kHz において磁界検出分解能 5.4×10^{-8} Oe/Hz^{1/2} ($5.4 \times$

10^{-12} T/Hz^{1/2}) (4.3×10^{-6} (A/m)/Hz^{1/2}) を得た。

4.2 共振を利用したセンサ素子

伝送線路型センサを共振状態で動作させることで、センサ素子のインピーダンス変化率を大きくし、信号強度の増大を意図したセンサ素子を試作した。

Fig. 8 に共振を利用したセンサ素子の外観写真および断面の模式図を示す。伝送線路部分は厚さ 0.5 mm のテフロン基板を使用し、幅 0.8 mm、長さ 10 mm、厚さ 18 μm 、3 ターンのミアンダ形状とした。また、伝送線路上にのせる $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜は一辺 25 mm の正方形、厚さ 4 μm とした。磁性膜上に塗布したレジスト厚さは約 5 μm とした。

Fig. 9 に Fig. 8 のセンサのインピーダンスと印加磁界のグラフを示す。周波数 600 MHz、印加磁界 68 A/m (0.86 Oe) のとき、共振によってセンサ素子のインピーダンスが大きく変化した。このときインピーダンス変化率の最大値は約 41000 Ω/Oe (515.3 $\Omega/(\text{A/m})$) を得た。磁性膜の共鳴周波数付近に共振周波数を設計することにより、所望の寸法条件で共振が発生するセンサ素子の作製が可能と考えられる。

Fig. 10 に Fig. 8 のセンサの信号強度およびノイズレベルの素子通電電流密度依存性のグラフを示す。キャリア周波数は 600 MHz とした。測定交流磁界は周波数 501 kHz、振幅は 2.4×10^6 Oe (1.9×10^4 (A/m)) とした。バイアス磁界はセンサ素子で SN 比が極大となるように設定した。●▲は Fig. 8 のセンサであり、○△は比較のための直線状センサ (Fig. 4) である。共振を利用した Fig. 8 のセンサの信号強度は直線状センサと比較して約 30 dB 大きかった。これは共振状態におけるインピーダンスの大きくなった効果とマイクロストリップ線路の長さがより長いためである。

一方、ノイズレベルの上昇は共振を利用した Fig. 8 のセンサの方が顕著であった。SN 比の最大値を比較すると、共振を利用した Fig. 8 のセンサのほうが約 18 dB 大きくなった。

Fig. 11 は Fig. 8 のセンサの SN 比が最大となる条件における測定交流磁界強度と信号強度のグラフである。交流磁界強度と信号強度は比例関係にあり、信号強度がノイズレベルと同じレベルとなるときの交流磁界強度がこのセンサの磁界検出分解能となる。この実験では、交流磁界周波数 501 kHz において磁界検出分解能 7.6×10^{-9} Oe/Hz^{1/2} (7.6×10^{-13} T/Hz^{1/2}) (6.1×10^{-7} (A/m)/Hz^{1/2}) を得た。

4.3 マイクロストリップ導体の上下層に磁性膜を配置したセンサ素子

伝送線路の上下に磁性膜を配置することでより効果的にインピーダンス変化を得ることが可能と考えられる。そこで、伝送線路の両面に磁性膜を配置したセンサ素子を作製した。Fig. 12 に作製したセンサ素子の外観写真および断面の模式図を示す。伝送線路部分は厚さ 25 μm のポリイミド基板を使用し、幅 0.6 mm、長さ 20 mm、厚さ 18 μm 、4 ターンのミアンダ形状とした。また、伝送線路を挟む 2 枚の $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜は一辺 25 mm の正方形、厚さ 4 μm とした。磁性膜上に塗布したレジスト厚さは約 5 μm とした。

Fig. 13 に Fig. 12 のセンサのインピーダンスと印加磁界のグラフを示す。周波数 570 MHz、印加磁界 238 A/m のとき、共振によってセンサ素子のインピーダンスが大きく変化した。このときインピーダンス変化率の最大値は約 11000 Ω/Oe (138.4 $\Omega/(\text{A/m})$) を得た。Fig. 12 のセンサ

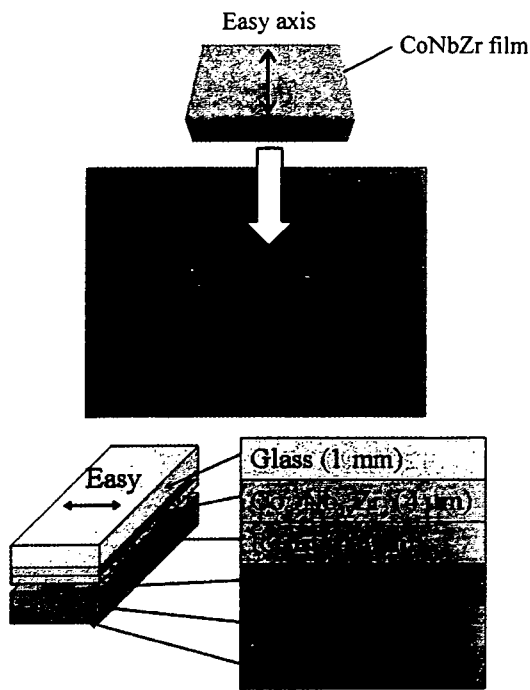


Fig. 8 Sensor element.

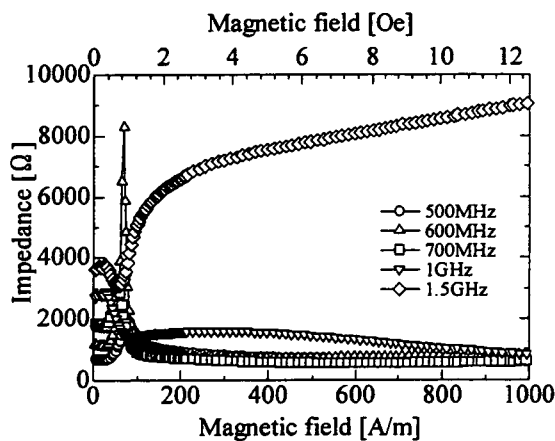


Fig. 9 Impedance of the sensor element.

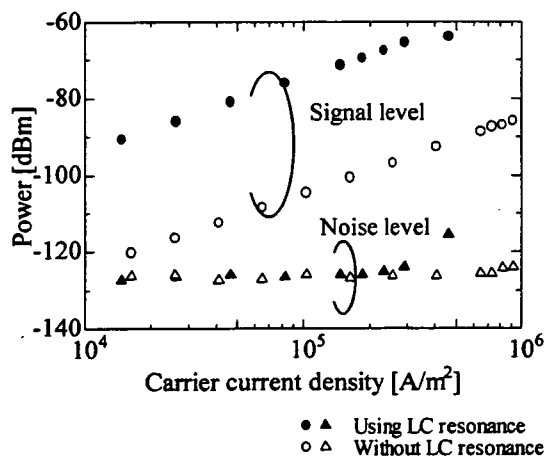


Fig. 10 Signal level and noise level as functions of the current density.

において磁界検出分解能は、交流磁界周波数 501 kHz において磁界検出分解能 7.4×10^{-9} Oe/Hz^{1/2} (7.4×10^{-13}

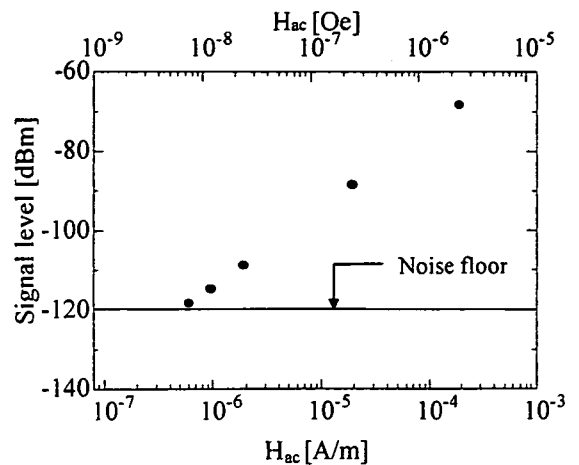


Fig. 11 Signal level as a function of the ac magnetic field.

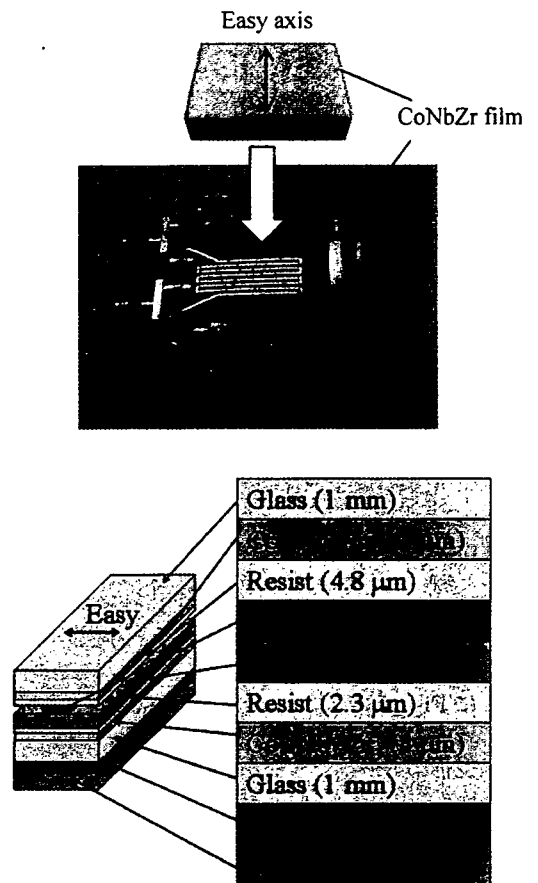


Fig. 12 Sensor element.

T/Hz^{1/2}) (5.9×10^{-7} (A/m)/Hz^{1/2})を得た。

4.4 センサのSN比に関する考察

以上の実験結果を踏まえて、共振を用いた本論文のセンサのSN比の向上の要因について考察する。本論文で試作したセンサ素子は共振時におけるインピーダンスの変化を検出しているため、インピーダンス変化率の最大値は共振の性能指数（共振の鋭さ）にほぼ比例すると考えられる。Fig. 14はセンサの信号強度およびノイズレベルのキャリア電流密度に対するグラフを示した。Table1には上記の3種類のセンサについて共振子としての性能指数 (Q)、インピ

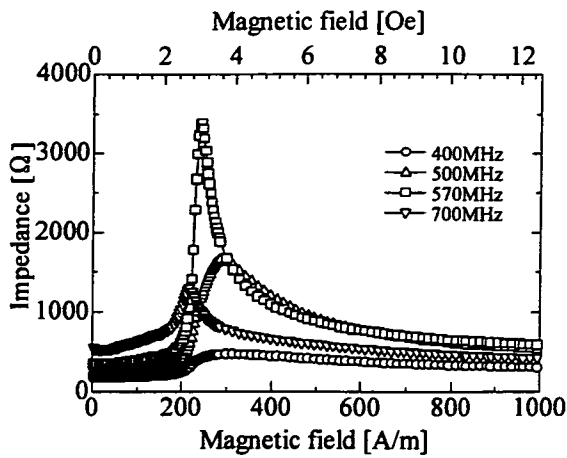


Fig. 13 Impedance of the sensor element.

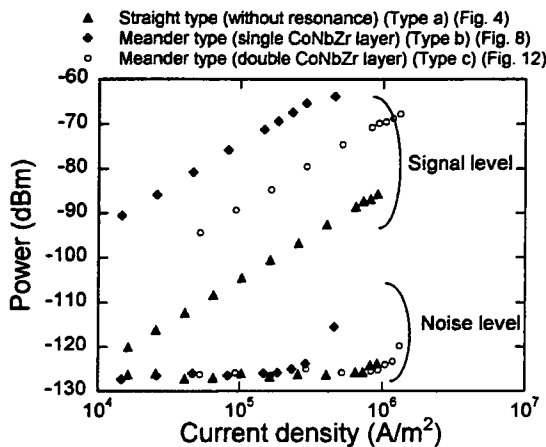


Fig. 14 Signal level and noise level as functions of the current density.

Table 1 Relationship between Q, dZ/dH and current density when noise increased.

Sensor	Quality factor	Impedance change (Ω/(A/m))	Current density when noise increased (A/m²)
Straight type (Type a) (Fig. 4)	-	0.6	9.0×10⁵
With a single CoNbZr layer (Type b) (Fig. 8)	32.7	515.3	3.0×10⁵
With double CoNbZr layers (Type c) (Fig. 12)	9.2	138.4	1.0×10⁵

インピーダンス変化率(dZ/dh)の最大値, ノイズレベルが熱雑音レベルから 3dB 以上上昇し始める電流密度を示す. センサは直線状センサ (センサ a) (Fig. 4), ミアンダ型導体の上部に単層の CoNbZr 薄膜を配置したセンサ (センサ b) (Fig. 8), ミアンダ型導体の両面に CoNbZr 薄膜を配置したセンサ (センサ c) (Fig. 12) について示した. 測定交流磁界は周波数 501 kHz, 振幅は 2.4 × 10⁻⁶ Oe (1.9 × 10⁻⁴ (A/m)) とした. バイアス磁界は SN 比が極大となるように設定した.

Table 1 において性能指数は周波数に対するインピーダンスの極大値付近における半値幅から求めた. センサ b (Fig. 8) はセンサ c (Fig. 12) と比較して性能指数は約 3.6 倍,

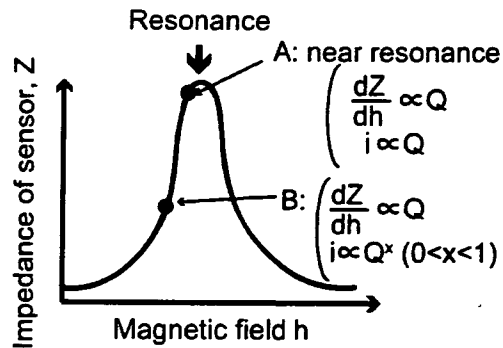


Fig. 15 Impedance of the sensor element.

インピーダンス変化率は約 3.7 倍となり, インピーダンス変化率は性能指数にほぼ比例した.

一方ノイズレベルの上昇は, 性能指数が大きいほど顕在化すると考えられる. 本センサで扱うノイズはキャリア電流の増大により, 磁性膜表面において磁界強度が増大し, 磁化の非線形応答に起因するものと考えられる. すでに通電するキャリア電流の増大に依存して, ノイズが増大する実験結果が得られている⁹⁾. 並列共振時にセンサ内部では, キャリア電流が大きくなるため, ノイズレベルが上昇したと考えられる. 一般に知られているように, 並列共振回路中のインダクタンス素子内部を流れる電流 i は(2)式のように性能指数に比例して与えられる.

$$i = -jQI = -j(L/C)^{1/2}I/R \quad (2)$$

ただし, L , R および C はそれぞれ並列共振回路の抵抗, インダクタンス, キャパシタンスを表す. I は共振回路の外から与えた等価電流源 (定数) である. (2) 式より, 共振回路の性能指数が大きいほど共振回路内部の電流が大きくなり, 磁性膜の非線形駆動に起因したノイズレベルが上昇すると考えられる. なおこのノイズレベルの上昇のメカニズムについては稿を改めて詳細に報告する.

Table 1 においてノイズの上昇する電流密度は Fig. 14 においてノイズレベルが熱雑音のレベルから 3dB 以上上昇する時のキャリア電流密度とした. なおこの電流密度は伝送線路の断面に均一に電流が流れていることを仮定して求めたものであり, 実際には表皮効果が顕在化することから, 素子表面では Table 1 の電流密度よりも大きな電流密度になっていると考えられる. Table 1 によれば, ノイズが上昇する時の電流密度は単層磁性膜を用いたセンサ b (Fig. 8) において, 両面に磁性膜を用いたセンサ c (Fig. 12) に比較して, 約 3.3 倍であり, 共振時の性能指数の比率 (3.6) よりも若干小さかった. これは実際のバイアス点が共振点よりも低いインピーダンスにおいて動作しているため, ノイズの上昇が性能指数に比例する傾向よりも緩和されたためと考えられる.

Fig. 15 には共振を用いることでセンサの SN 比が向上する理由を模式的に示した. 動作点を並列共振点にほぼ一致させると (A 点), センサの信号強度は性能指数にほぼ比例し, さらにノイズレベルを決める共振回路の内部電流は性能指数に比例するため, SN 比は向上しないと考えられる.

一方実際のセンサ素子の動作点はバイアス磁界を調整して, 共振点よりも低バイアス側に設定されている (B 点). これによりインピーダンスの変化率はほぼ性能指数に比例し, かつ共振回路の内部の電流は共振点の電流よりも小さく

設定できるため、センサの SN 比は向上したものと考えられる。本センサの SN 比を向上させる基本的設計指針としては性能指数を可能な限り大きくしつつ、共振回路内部の電流を低減させることが必要であると考えられる。本センサは更なる高感度化に向けて、最適導体寸法の検討、伝送線路の選定、内部導体パターンの選択、素子全体の薄膜デバイス化、サイズと磁界検出分解能の関係についての検討が必要である。

5. まとめ

1. $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜を用いた高周波キャリア型薄膜磁界センサにおいて磁性体への直接の通電を避ける構造の伝送線路型センサを作製した。
2. 伝送線路型センサを用いることで、センサへの投入パワー増大に伴うノイズレベルの上昇を緩和した。
3. 磁性膜を導体パターンの上下層に使用した伝送線路型センサにおいて共振を利用して $11000 \Omega/\text{Oe}$ ($138.4 \Omega/(\text{A/m})$) のインピーダンス変化率を得た。試作したセンサで 501 kHz の交流磁界を $7.4 \times 10^9 \text{ Oe/Hz}^{1/2}$ ($7.4 \times 10^{13} \text{ T/Hz}^{1/2}$) ($5.9 \times 10^7 \text{ (A/m)/Hz}^{1/2}$) の磁界検出分解能で測定した。
4. 本センサは正確に共振点で動作させれば、センサの信号強度およびはほぼ性能指数に比例し、SN 比は向上しないと考えられる。本センサは共振点よりも低バイアス側で動作させるため、信号強度はほぼ性能指数に比例し、ノイズレベルの増大が抑制されたため SN 比が向上したと考えられる。

謝辞 本研究の一部は経済産業省地域新生コンソーシアム (16G2012) 及び文部科学省の科学研究費補助金 基盤 A (16206041) による研究成果である。

References

- 1) H. Yamadera, Y. Nishibe, T. Morikawa and Y. Nonomura, *T.IEE Japan*, vol. 118-A, pp. 689-694, Oct. 1998.
- 2) D. Atkinson and P.T. Squire, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, pp.3364-3366, 1997.
- 3) A. Takayama, T. Uehara, A. Yuguchi, H. Kato, K. Mohri and T. Uchiyama, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, pp. 3643-3645, 1999.
- 4) D. Robbes, C. Dolabdjian, Y. Monfort, and P. Ciureanu, *Physica C*, vol. 372-376, pp. 249-253, 2002.
- 5) S. Yabukami, T. Suzuki, N. Ajiro, H. Kikuchi, M. Yamaguchi, and K. I. Arai, *IEEE Trans. Magn.*, 37, 2019 (2001).
- 6) M. Takezawa : Doctoral dissertation of Tohoku University, p. 216 (1999).
- 7) Y. Murayama, T. Ozawa, S. Yabukami, K. Ishiyama, and K.I. Arai, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 30, 237 (2006).
- 8) H. Kikuchi : Doctoral thesis of Tohoku university. (2002)
- 9) S. Yabukami, Y. Murayama, K. Ishiyama, K.I. Arai, H. Okuno, *The Intermag2005 Conference*, FV-09 (2006).

2006年8月8日受理, 2006年11月13日採録

Magnetic Field Measurement Using a Step-Like GMI Sensor Combined with a Differential Circuit

T. Nakai, K. Takada, H. Abe, N. Hoshi*, H. Suzuki*, K. Ishiyama**, and K. I. Arai**

Industrial Technology Institute, Miyagi Prefectural Government, 2-2 Akehdohri, Izumi-ku, Sendai 981-3206, Japan

* NEC TOKIN Corporation, 6-7-1 Koriyama, Taihaku-ku, Sendai 982-8510, Japan

**Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

A giant magnetoimpedance sensor with a step-like impedance property was obtained in the case of amorphous $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ soft magnetic thin film in a rectangle shape with an in-plane uniaxial easy axis in a direction nearly 60 degrees relative to the width direction of the element. It was shown experimentally that the magnetic field in which the step-like impedance change occurs has an almost constant value with a standard deviation in the microtesla (μT) range. The magnetic field in which the step-like change occurs includes information on the external magnetic field. To realize a magnetic field sensor with an accuracy of $\text{nT}/\text{Hz}^{1/2}$ by using this step-like phenomenon, a differential circuit was studied in combination with an alternating bias field in the kilohertz (kHz) frequency range. The aim of the differential circuit was to make the driving circuit into a digital logic circuit, by using pulse signals timed to coincide with the step-like changes. The alternating bias field increases the sampling number, because of the step-like changes in the bias frequency. The aim of the ac bias is to improve the sensor accuracy by using an averaging effect. This paper reports a first trial of the method. As a result, a high-linearity sensor without hysteresis was obtained, which had a linearity error of less than 0.5% in the range of $\pm 100 \mu\text{T}$. A measurement accuracy of 460 nT was achieved with a 20 Hz time constant of the output low pass filter (LPF).

Key words: magnetic field sensor, magnetic thin film, magnetoimpedance, high frequency, step-like impedance

不連続的インピーダンス変化特性を有した薄膜 GMI センサと 微分回路を組合せた磁界検出方法に関する検討

中居倫夫・高田健一・阿部宏之・星則光*・鈴木秀夫*・石山和志**・荒井賢一***

宮城県産業技術総合センター, 仙台市泉区明通 2-2 (〒981-3206)

*NEC トーキョー株式会社, 仙台市太白区郡山 6-7-1 (〒982-8510)

**東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

1. はじめに

GMI センサ (Giant magnetoimpedance sensor) は, 外部磁界の変化でインピーダンスが変化する現象に基づき磁界を検出するセンサ素子である。このセンサは, 室温で動作する磁界センサとして非常に高い分解能を有し¹⁾, 生体磁気計測や非破壊検査などへの応用が期待されている。また, 小型で低消費電力であることから, 携帯電話に搭載される地磁気検出に基づいた方位センサや自動車の回転機構における回転速度検出等に応用されている。高周波キャリア型磁界センサにおける素子インピーダンス変化の原因は, 素子を構成する磁性体の通電電流に対する透磁率が外部磁界で変化し, このことに起因して通電電流の表皮効果が変化することにある²⁾。センサ磁性体の透磁率変化は, 磁気異方性に基づいた磁気モーメントの磁化回転および磁壁移動に起因するものであることも知られている。

外部磁界の変化で不連続的にインピーダンスが変わる薄膜 GMI センサに関しては, センサ素子である薄膜軟磁性体に付与する磁気異方性の容易軸を角度制御することで実現することが報告されている³⁾。不連続的なインピーダンス変化は, センサ磁性体の磁区構造がストライプ磁区構造から単磁区構造に転位することに起因

することも報告されている⁴⁾。また, インピーダンス不連続現象が発生する磁界強度のばらつきは, 10 mOe (0.8 A/m) 以下になることが実験的に確認され, 外部磁界強度に比例して不連続点の発生磁界が移動することを利用して, インピーダンス不連続現象発生点の磁界を検出することで mOe オーダーの精度を有する磁界センサを構築できる可能性が示されている⁵⁾。さらに, インピーダンス不連続点が発生する磁界強度の温度変化特性から, 不連続現象発生点の磁界検出に基づいた磁界センサの簡易な温度補償方法も提案されている⁶⁾。

本論文では, 不連続的インピーダンス変化特性を有する薄膜 GMI センサを用いた磁界センサモジュールを構築する際の電子回路を検討した。提案する電子回路は, 急峻なインピーダンス変化を有効に利用することを目的として, センサ素子に交流バイアス磁界を印加し, 発生する不連続点を微分回路を用いて高感度で検出する方法に基づいている。

2. 実験方法

2.1 実験に用いたセンサ素子とその特性

Fig. 1 は, 本論文の検討に用いた, 外部磁界変化に対し不連続的なインピーダンス変化特性を有するセンサ素子の外観写真と磁区構造写真である。図における磁区構造は, Kerr 効果顕微鏡を用いて観察したものである。センサ素子の磁区構造は, 磁性体に誘導

(現在の所属)

**1 (独) 情報通信研究機構仙台リサーチセンター, 仙台市青葉区南吉成 6-6-3 (〒989-3204)

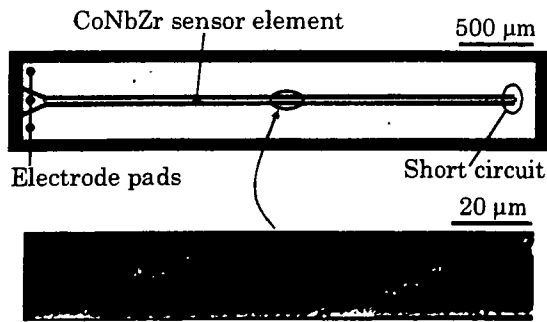


Figure 1 View of the sensor element and magnetic domain.

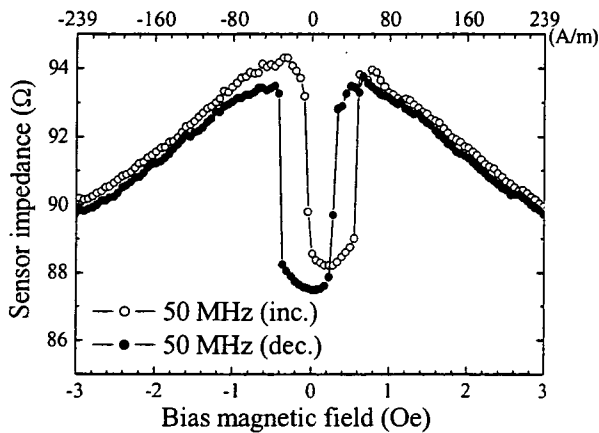


Figure 2 Variation in the sensor impedance as a function of the bias magnetic field.

する磁気異方性の方向を制御して得られ、素子幅方向から膜面内に角度制御されたストライプ状磁区構造を有している。本図における 180° 磁壁の方向は、素子幅方向を基準として平均で 62° である。センサ素子構造は、電極をコプレーナ形状に配置して、一方の端部を電極パッドとし、もう一方の端部をセンサ磁性体と短絡させた素子構造とした。本素子におけるセンサ磁性体は、Ar 雰囲気中で RF スパッタした $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ のアモルファス薄膜であり、寸法は、幅 $20\ \mu\text{m}$ 、長さ $3000\ \mu\text{m}$ 、膜厚 $2.7\ \mu\text{m}$ で、リフトオフ法を用いて成形した素子である。磁気異方性は、真空磁界中熱処理で誘導した。熱処理条件は、 $673\ \text{K}$ - $240\ \text{kA/m}$ の回転磁界中熱処理を 2 時間、 $673\ \text{K}$ - $240\ \text{kA/m}$ の静磁界中熱処理を 1 時間とした。静磁界中熱処理における磁界印加方向は、素子幅方向を基準として 60° とした。

Fig. 2 は、センサ素子インピーダンスのバイアス磁界依存性を示す。バイアス磁界は、センサ素子の長手方向に付与した。図は、バイアス磁界を $-400\ \text{A/m}$ ($-5\ \text{Oe}$) を基点として $+400\ \text{A/m}$ ($+5\ \text{Oe}$) まで単調増加させた後に、 $+400\ \text{A/m}$ ($+5\ \text{Oe}$) から $-400\ \text{A/m}$ ($-5\ \text{Oe}$) に単調減少させながら測定した結果である。インピーダンス測定の際に、センサ素子に通電した高周波電流は、入力電力 $-14\ \text{dBm}$ 、周波数 $50\ \text{MHz}$ とした。素子インピーダンスの測定は、ネットワークアナライザを用い、反射法を用いて行った。Fig. 2 から、本素子は、バイアス磁界増加時には $-8\ \text{A/m}$ ($-0.1\ \text{Oe}$) 付近でインピーダンスが不連続的に減少し、 $+48\ \text{A/m}$ ($+0.6\ \text{Oe}$) 付近でインピーダンスが不連続的に増加する特性を有し、バイアス磁界

減少時には $+8\ \text{A/m}$ ($+0.1\ \text{Oe}$) 付近でインピーダンスが不連続的に減少し、 $-48\ \text{A/m}$ ($-0.6\ \text{Oe}$) 付近でインピーダンスが不連続的に増加する特性を有していることがわかる。本測定条件における素子インピーダンスの最小値は、約 $88\ \Omega$ であり、不連続的インピーダンスの変化幅は、約 $5\ \Omega$ である。

2.2 回路構成

本論文で提案する磁界センサの駆動回路は、センサ素子に kHz 近い交流バイアス磁界を印加して、素子のインピーダンス不連続点を微分パルスとして検出する駆動回路である。この微分パルスが発生する時点におけるバイアス磁界強度を電氣的に取得することで外部磁界を測定するものである。

Fig. 3 に、駆動回路を説明する概念図を示す。Fig. 3 の下段は、素子に印加される交流バイアス磁界、中段は、バイアス磁界に対応した素子のインピーダンスである。ここでは、被測定量である直流磁界 H_{ex} が交流バイアスに重畳した状態でのインピーダンス変化を示している。素子は、ヒステリシス特性を有することから、バイアス磁界増加時を実線、バイアス磁界減少時を破線として示

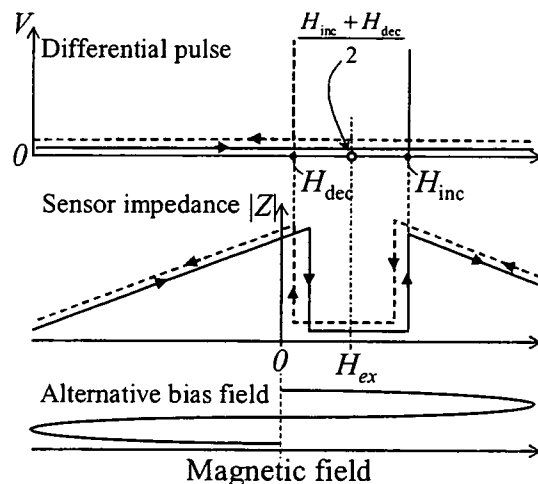


Figure 3 Schematic illustration of the fundamental elements of the driving circuit.

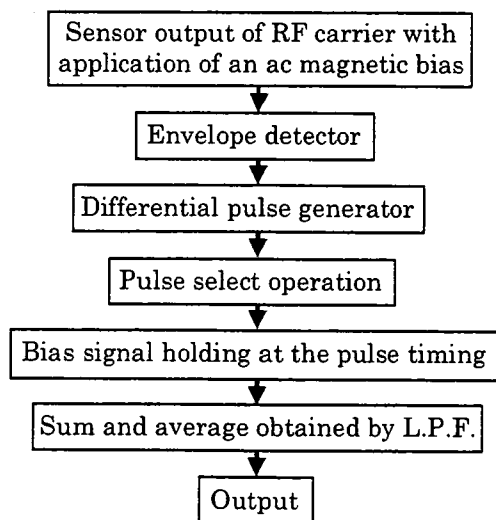


Figure 4 Algorithm of the driving circuit.

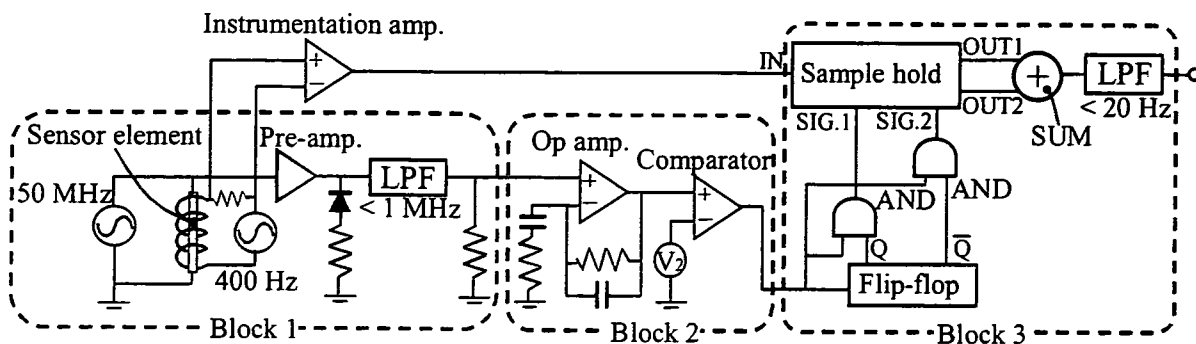


Fig. 5 Schematic diagram of the driving circuit.

した。図の上段は、素子の出力波形を微分して得られたパルス波形である。ここでは、+側のパルスのみ利用している。インピーダンス不連続点の発生は、 H_{ex} に対し左右対称になることから、バイアス磁界増加時と減少時の不連続点バイアス磁界を加算平均して H_{ex} を求める方法とした。この加算平均の方法は、インピーダンス不連続点が発生する磁界強度の温度変化特性に基づいた磁界センサの温度補償方法¹⁰⁾に対応する方法でもある。

Fig. 4 に、駆動回路の信号処理アルゴリズムを示す。センサ素子に通電される信号（キャリア信号）は、高周波電流であることから、素子のインピーダンス変化に伴う出力信号も高周波信号である。本論文で提案する回路構成においては、素子インピーダンスの不連続点を微分パルスに変換する方法であることから、キャリア電圧の波形を包絡線検波する必要がある。本検討では、キャリア信号より十分に小さな周波数で交流バイアスを挿入し、包絡線検波されたキャリア信号を用いて素子インピーダンス不連続特性を微分処理できるように回路定数を定めている。素子インピーダンス不連続点に対応した微分パルスは、デジタルロジック回路で処理できるパルス波形に整形した後、パルス演算回路でそれ以降の処理に必要なパルス信号を選択し、このパルスタイミングにおけるバイアス磁界強度信号をサンプルホールドして、バイアス磁界増加時とバイアス磁界減少時のインピーダンス不連続点におけるホールド信号を加算平均した。本駆動回路の最終的な出力信号は、交流バイアス磁界の周期より長い時定数に設定することで、不連続点が発生する磁界強度のばらつきを平均化して検出精度を向上させることができる。

Fig. 5 に、試作したセンサ駆動回路の回路図を示す。図のブロック 1 は、周波数 400 Hz、振幅 4 Oe (320 A/m) の交流バイアスをセンサ素子に印加し、半波整流された周波数 50 MHz のキャリア信号を包絡線検波する部分である。ブロック 2 は、包絡線検波された信号波形を微分し、コンパレータでパルス波形を整形する。ブロック 3 において、素子インピーダンスの不連続点で発生したパルス信号からバイアス磁界信号のサンプルホールドを行うために必要なパルス信号を選択するデジタル演算を行い、サンプルホールドされた信号から外部磁界を演算して出力する。出力の直前に時定数 20 Hz のローパスフィルタを配置して出力を平均化した。

以下に示す実験では、この回路を用いて検討を行った。

2.3 センサ素子の接続方法と実験装置

2.2 節で示した磁界検出回路にセンサ素子を接続して、交流バイ

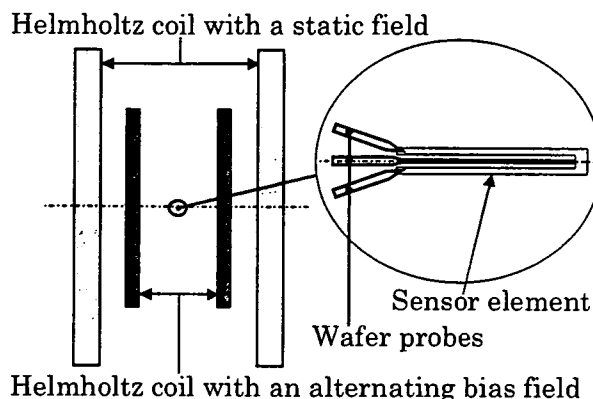


Fig. 6 Schematic illustration of the Helmholtz coil and the sensor arrangement.

アス磁界と被測定磁界である直流磁界を素子に印加する実験回路を構築するために、Fig. 6 に示すような装置を作製した。センサ素子と駆動回路の接続は、G-S-G 型のウェハプローブを用い、センサ素子への磁界印加は、二重のヘルムホルツコイルを用いて交流バイアス磁界と直流磁界を印加した。

3. 回路の評価と測定結果

Fig. 7 は、Fig. 5 に示す回路図のブロック 1 におけるローパスフィルタ直前の信号波形をデジタルオシロスコープで観測した波形図である。Fig. 7 の測定を行った際の条件は、交流バイアスが Fig. 5 に示す値と異なった周波数条件ではあるが、周波数 1 kHz、振幅 4 Oe (320 A/m) とした。キャリア信号は、出力インピーダンス 50 Ω のシグナルジェネレータで発生させ、周波数 50 MHz、出力電力 -4.7 dBm の交流波形である。本図は、交流バイアス 1 周期分の波形である。図は、デジタルオシロスコープのサンプリング周期とキャリア信号周波数が近いことに起因したサンプリング誤差を含んだ波形になっているが、Fig. 2 に示されたバイアス磁界と素子インピーダンスの関係に対応した観測波形が得られていることがわかる。このことは、交流バイアス周波数が 1 kHz の場合でも不連続的なインピーダンス変化特性が発生し得ることを示している。

Fig. 8 は、Fig. 5 に示す条件値と等しい交流バイアス条件である、周波数 400 Hz、振幅 4 Oe (320 A/m) として観測したブロック 1 におけるローパスフィルタ直前の信号波形と、ブロック 2 における微分回路の出力波形を同じ時間軸で示した図である。本図からわかるように、インピーダンス不連続現象の発生と同時に大きなパルス電圧が発生している。本検討の電気回路では、この微分バ

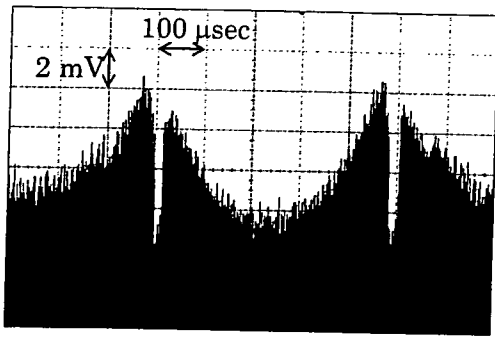


Fig. 7 Waveform of a 50 MHz carrier signal with application of a 1 kHz ac bias of 4 Oe (320 A/m).

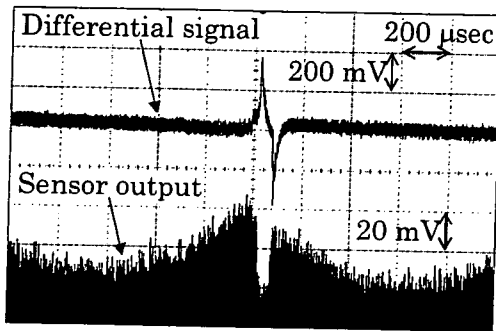


Fig. 8 Waveform of the differential pulse and carrier signal in an ac bias field of 400 Hz, 4 Oe (320 A/m).

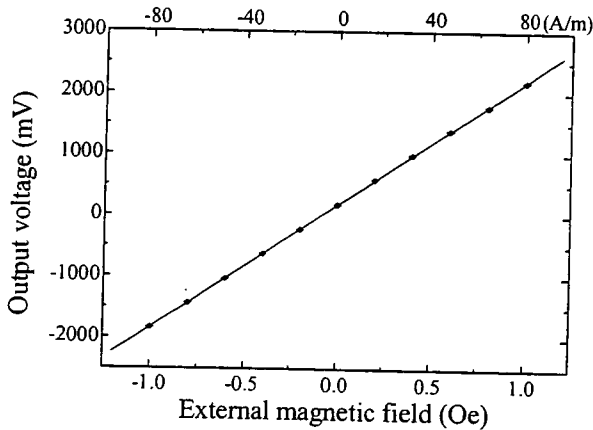


Fig. 9 Variation in the output voltage as a function of the external magnetic field.

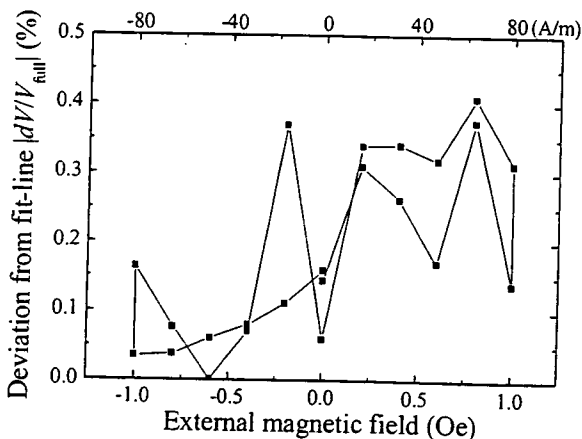


Fig. 10 Variation in the linearity error as a function of the external magnetic field.

ルスをシュミットトリガを用いたコンパレータ回路でパルス波形整形した後、デジタルロジック回路を用いた演算処理を行ない、最終的にこのパルスをトリガとしてバイアス磁界信号をサンプルホールドしている。このように微分回路を用いて、インピーダンス不連続現象発生タイミングをパルス信号に変換する利点として、センサ駆動回路をデジタル的な信号処理回路にすることで回路設計を容易にできること、また、駆動回路に混入するノイズ信号に強い回路が構築できることが挙げられる。さらに、次節でも述べるが、従来キャリア周波数を低くした場合に生じる磁界変化に対する素子インピーダンス変化量の減少、すなわち、キャリア周波数低下に伴うセンサ感度低下の問題が、微分パルスがノイズレベルから弁別できる周波数までキャリア周波数を低下させることが可能になるという利点もある。

Fig. 9に、本論文で提案する磁界検出回路を用いて測定した外部磁界と出力電圧の関係図を示す。出力は、1 Oe (80 A/m) で2Vの出力電圧になるように回路を調整した。図から、 ± 1 Oe (± 80 A/m) で良好な直線性が得られることが分かる。さらに、本測定は被測定磁界を往復させて出力を測定した結果であるが、測定結果にヒステリシス特性が有意に現れない結果が得られた。

Fig. 10は、Fig. 9の測定結果の直線性誤差を表した図である。直線性誤差は、理想的な直線関係からのずれをフルスケール電圧（すなわち2V）で規格化した値である。本図からわかるように、直線性誤差は、0.5%以下である。磁界測定誤差は、出力の標準偏差として4.6 mOe (0.37 A/m)であった。

本磁界検出回路の出力安定性を評価する目的で、一定の被測定磁界を印加した状態で60分間連続測定した。その結果、検出磁界の経時的誤差は、測定誤差である標準偏差4.6 mOe以下であった。

4 小型低周波化への可能性について

本検討の磁界検出回路の利点として、磁界変化に伴うセンサ素子インピーダンスの変化量が減少しても、インピーダンス不連続現象に起因する微分パルス信号がノイズレベルよりも大きい限り、駆動回路として動作可能であることが挙げられる。Fig. 11は、幅10 μm 、長さ500 μm 、膜厚2.1 μm の素子において、キャリア周波数を10 MHzとした場合の外部磁界と素子インピーダンスの関係図である。キャリア周波数10 MHz

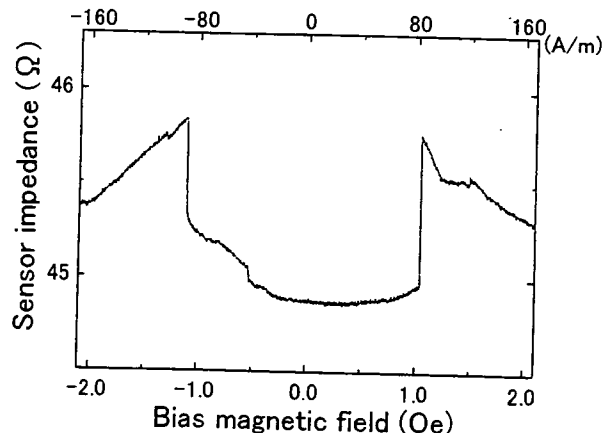


Fig. 11 Variation in the sensor impedance as a function of the bias magnetic field.

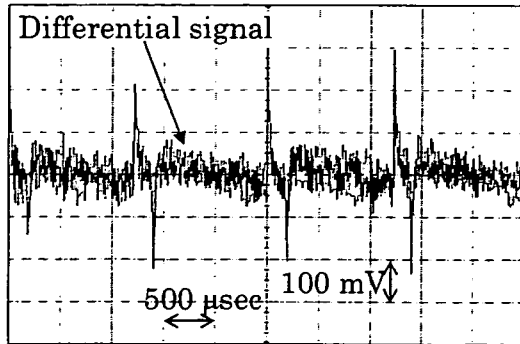


Fig. 12 Waveform of the differential pulse with a carrier frequency of 10 MHz.

では、素子インピーダンスの変化量が 1Ω 程度まで減少していることがわかり、従来の方法では磁界センサとして動作させることが困難である。しかしながら、本論文の提案するセンサ駆動回路においては、キャリア周波数 10 MHz でも磁界センサとして動作する。Fig. 12 は、キャリア周波数 10 MHz でセンサを駆動した場合の微分波形をデジタルオシロスコープで測定した結果である。図から、ノイズレベルより明らかに大きな微分パルスが発生していることがわかる。このように、従来手法では、センサとして有効に機能しなかった小型素子を、本論文で提案する手法では、低いキャリア周波数で動作させることを可能にするものである。以上、本手法を用いることにより、薄膜 GMI センサの薄型化すなわち成膜時間減少に伴う低コスト化、および、キャリアの低周波化が実現できる可能性が示された。

5. まとめ

磁界変化に対して不連続的なインピーダンス変化特性を有する薄膜 GMI センサを用いて、mOe オーダーの精度を有する磁界検

出を行うためのセンサ駆動電子回路の提案を行った。

提案した方法は、センサ素子に交流バイアス磁界を印加して素子インピーダンスの不連続的变化を微分パルスとして検出し、この微分パルスが発生するバイアス磁界強度から被測定磁界である外部磁界を検出する方法である。電子回路を試作して特性評価を行った結果、 $\pm 1\text{ Oe}$ ($\pm 80\text{ A/m}$) の測定範囲で有意なヒステリシスの無い直線性誤差 0.5% のセンサ特性が得られた。この場合の磁界測定誤差は、標準偏差で 4.6 mOe であった。60 分間の連続測定を実施したところ、出力ドリフトは、この測定誤差以下であった。

今後は、本現象の発生原理を解明するとともに、不連続点のばらつきを低下させるセンサ素子の構築方法を検討し、一般的なフラックスゲートセンサの感度である 0.1 mOe の実現を目指す。

謝辞 本研究の一部は、(独) 科学技術振興機構 研究成果活用プラザ宮城の事業化可能性試験によるものである。また、本研究の一部は、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究 (採択番号 H17/A02) によるものである。

References

- 1) H. Mawatari, H. Kikuchi, S. Yabukami, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 414 (2003).
- 2) L. V. Panina, K. Mohri, K. Bushida, and M. Noda: *J. Appl. Phys.*, **76**(10), 15, 6198(1994).
- 3) T. Nakai, H. Abe, S. Yabukami, and K. I. Arai: *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **290-291**, 1355(2005).
- 4) T. Nakai, H. Abe, and K. I. Arai: *The Physics of Metals and Metallography*, **101**, S41-S44(2006).
- 5) T. Nakai, H. Abe, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **29**, 747(2005).
- 6) T. Nakai, H. Abe, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **29**, 675(2005).
- 7) T. Nakai, H. Abe, M. Yamaguchi, S. Yabukami, H. Kikuchi, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 419 (2003).

2006年9月22日受理, 2007年3月19日採録

Anisotropy Control of a High-Frequency Carrier-Type Magnetic Field Sensor by Shape Anisotropy

T. Kato, K. Ishiyama, and K. I. Arai

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., *Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan*

We tried to control the magnetic anisotropy of a high-frequency carrier-type magnetic field sensor by varying the shape of the magnetic film instead of the induced anisotropy. We confirmed that the impedance of the sensor was changed by applying a magnetic field, and showed that the properties of the sensor could be controlled through the design of the magnetic film's shape.

Key words: high-frequency carrier-type magnetic field sensor, shape anisotropy, anisotropy control, thin film

形状磁気異方性による高周波キャリア型磁界センサの異方性制御

加藤 智紀, 石山 和志, 荒井 賢一

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

1. はじめに

高透磁率磁性体へ高周波電流やパルス波を直接通電し, 外部磁界を印加することで, その透磁率変化を介し, 表皮効果及び自然共鳴によりインピーダンスが大きく変化することを利用した磁界センサは, MI センサあるいは高周波キャリア型磁界センサと呼ばれ, 高感度化の研究及び産業応用が議論されている¹⁾²⁾. このセンサ素子の磁界検出の感度限界は熱による磁化のゆらぎで決定され, その値は室温で 10^{-13} T 台に達すると報告がある³⁾. この磁界センサの高感度化においては, 磁性薄膜の一軸磁気異方性を制御することが重要となる.

これまでに, 磁界中熱処理によってアモルファス CoNbZr 薄膜に誘導磁気異方性を付与した高周波キャリア型磁界センサが報告されている⁴⁾. このセンサ素子は熱処理温度により磁性薄膜の異方性強度を制御し高感度化を図ったものであった. 一方, 磁性薄膜の異方性分散を低減させると, インピーダンス変化が急峻になり更なる高感度化が望めると考えられる. しかし磁界中熱処理による異方性制御のみでは, 磁性薄膜の異方性強度と異方性分散を共に制御することは困難であった.

本研究は磁界中熱処理に代わる新たな異方性制御を試みることで高周波キャリア型磁界センサの更なる高感度化を目指すものである. 本報告では新たな異方性制御の一つとして形状磁気異方性に注目し, 磁性薄膜の反磁界を制御することによりセンサ特性の制御を試みた結果について述べる. 具体的には, 形状磁気異方性を利用したセンサを提案し, 素子の異方性強度を小さくすることを目的とした素子設計を行った. さらに設計に基づいて試作したセンサのインピーダンスを測定し, センサ特性を評価した.

2. 形状磁気異方性を利用したセンサ

2.1 センサ構造

Fig. 1 に従来のセンサ素子と本研究で提案するセンサ素子の概念図を示す. 従来のセンサ素子は磁性薄膜に磁界中熱処理を施すことにより, 磁化容易軸を素子幅方向とした誘導磁気異方性を付与していた. これに対して提案するセンサ素子は磁性薄膜を磁化容易軸を長辺とする短冊状に加工し, 素子に形状磁気異方性を

与した. これにより磁性膜は通電方向に対して分断されるため, 導電体を形成しここにキャリア電流を通電する構造とした. このように磁性薄膜を短冊状に加工し導電体にキャリア電流を通電する構造は, 千田氏らによる先行研究⁵⁾⁶⁾と類似した構造となっている. 先行研究では外部磁界入射方向の膜面内反磁界を抑えるため磁性薄膜を短冊状に加工しているのに対して, 本研究では素子の異方性を磁性薄膜の形状により制御する事を目的とし Fig. 1(b) に示すようなセンサ構造とした.

このようなセンサ構造にすることにより磁性薄膜の寸法比によりセンサ素子の異方性強度の制御が可能となる. また, 素子の異方性は磁性薄膜の形状でのみ決まるので, 磁性薄膜の形状を精度よく加工することにより異方性分散の低減化も期待される.

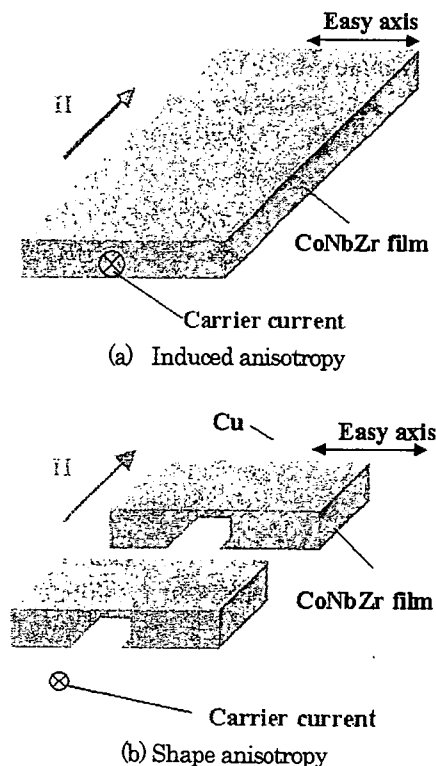


Fig. 1 Conceptual diagram of sensor elements.

2.2 素子設計

本センサは理論的には素子の異方性強度と等しい磁界強度を印加した時にインピーダンスが最大となる。これは、外部磁界によって磁性薄膜の磁化が回転し、磁化が全て困難軸方向を向いた時に透磁率が最大となるためである。インピーダンスが最大値となる外部磁界を小さくすることによりインピーダンスはより急峻に変化するため、センサの高感度化においては磁性薄膜の異方性強度を小さくする必要がある。本センサ素子では磁性薄膜の磁気特性が等方性であると仮定すると、磁化が困難軸方向に飽和する時の磁界強度と磁性膜幅方向の反磁界強度は等しくなる。そこで磁性膜幅方向の反磁界強度を素子の異方性強度と仮定して素子設計を行った。(1)式に磁性膜幅方向の反磁界強度 H_d の計算式を示す。

$$H_d = N \frac{M_s}{\mu_0} \quad (1)$$

M_s は磁性薄膜の飽和磁化量を表しており、本研究では磁性体としてアモルファス CoNbZr を用いたので 1 T とした。また、 N は反磁界係数を表しており、回転楕円体近似によって計算することが出来る⁷⁾。磁性膜幅方向の反磁界係数を求める計算式を式(2)および式(3)に示す。

$a \geq b \gg c$ の時

$$N = \frac{c}{a} \frac{E - (1 - e^2)K}{e^2(1 - e^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$e = (1 - \frac{b^2}{a^2})^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで a は磁性薄膜の長さ、 b は幅、 c は膜厚を表しており、 K は e を引数とした第 1 種完全楕円積分、同様に E は第 2 種完全楕円積分である。

式(1)～式(3)を用いて従来のセンサの異方性磁界強度と同じ値である 7 Oe (0.6 kA/m) を指標として、磁性薄膜の短冊の寸法を計算した。従来のセンサと同程度のセンササイズにするには磁性薄膜の長さを 100 μm 以下にする必要があるが、この場合磁性薄膜の膜厚を数 10 nm にする必要がある。しかし、膜厚を非常に薄くすると磁気特性が劣化してしまう恐れがあるため、本研究では磁性薄膜の膜厚を最低 0.5 μm と設定した。この場合反磁界も大きくなるため磁性薄膜を大きくする必要がある。そこで今回は磁性膜の長さを 1 mm とした。このとき磁性膜の幅を 400 μm とすれば反磁界強度は 11 Oe (0.9 kA/m) となり従来のセンサに近い値となる。

3. センサ素子

3.1 素子作製

Fig. 2 に作製したセンサの模式図を示す。本研究では磁性体として $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ を用い、高周波キャリアを通電する導電体として Cu を用いた。前述のように磁性膜のサイズが決定されたことからセンササイズはこれまでの検討に比べて大きくなり、Cu の寸法は長さ 15 mm、幅 100 μm 、膜厚 0.5 μm となった。CoNbZr の寸法は長さ 1 mm、幅 w を 100 μm 、200 μm 、400 μm 、膜厚 0.5 μm とした。また隣接する磁性薄膜が互いに影響を及ぼさないように

するために、磁性薄膜の間隔を $4w$ とした。このように磁性薄膜の幅 w を可変とすることで、磁性薄膜の形状を変化させてセンサ素子の異方性強度を制御した。

Fig. 3 にセンサの作製工程を示す。作製手順は以下の通りである。

1. レジストを 1 インチのガラス基板上に厚さ約 2 μm 塗布しフォトリソグラフィ技術によりレジストパターンニングを行う。
2. RF スパッタ法により CoNbZr 薄膜を成膜する。CoNbZr 薄膜の成膜条件は投入電力 200 W、Ar ガス圧 20 mTorr とした。また成膜時に磁界は印加せず、成膜後の熱処理も施さなかった。
3. 有機溶剤によりレジストおよびレジスト上に成膜された磁性膜を同時に剥離し(リフトオフ)、パターンニングを行う。
4. 1～3 の手順を繰り返し Cu 薄膜、CoNbZr 薄膜(2 層目)の順にパターンニングを行いセンサを作製した。

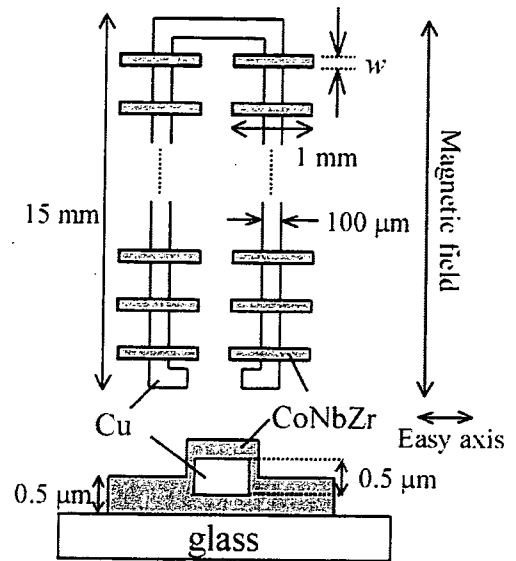


Fig. 2 Schematic view of sensor elements.

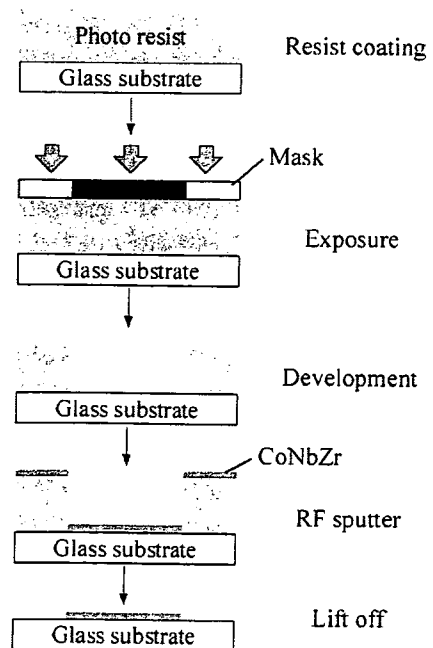


Fig. 3 Process chart.

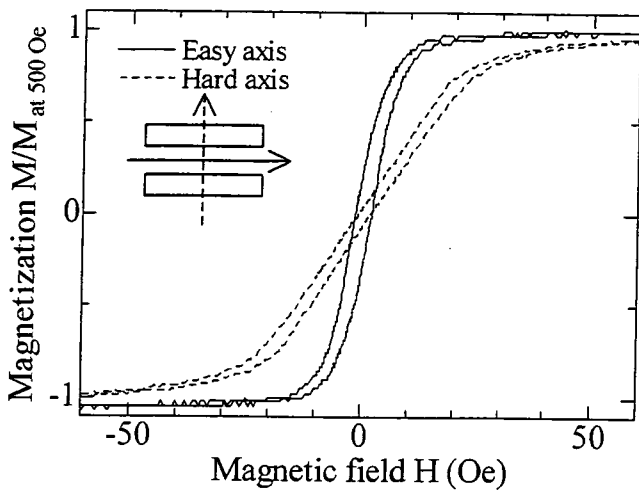


Fig. 4 M-H loops of the sensor.

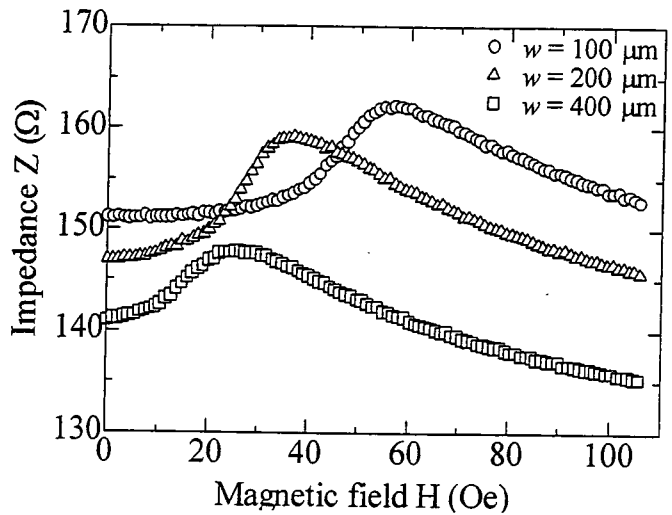


Fig. 6 Relationship between the magnetic field and the impedance of the sensor.

3.2 磁気特性

Fig. 4 に作製したセンサ素子の磁化曲線を示す。測定した素子は磁性薄膜の幅が 200 μm の素子であり、振動試料型磁力計(VSM)を用いて測定した。Fig. 4 において実線は磁性膜長さ方向の磁化曲線であり、破線は磁性膜幅方向の磁化曲線である。測定結果から磁性膜長さ方向を磁化容易軸とする一軸磁気異方性が付与されていることが分かる。この結果から形状磁気異方性によって素子に一軸磁気異方性が付与されていることを確認した。

式(1)を用いて測定した長さ 1 mm, 幅 200 μm , 膜厚 0.5 μm である磁性膜の幅方向の反磁界強度を計算した。その結果 24 Oe (1.9 kA/m) という計算値を得た。Fig. 4 から磁性膜幅方向では磁化が飽和し始める磁界強度と反磁界強度の計算値は概ね一致している事がわかる。この結果から、反磁界強度の計算の妥当性が示された。

4. 実験

4.1 実験方法

センサ素子の外部直流磁界対インピーダンスの関係を測定した。Fig. 5 はセンサ素子のインピーダンス測定系を示したものである。インピーダンスはネットワークアナライザを用いて反射法⁸⁾により測定した。外部直流磁界はヘルムホルツコイルによりセンサ素子の磁化困難軸方向に印加した。ネットワークアナライザからセンサ素子への入力電力は -10 dBm で一定とし、磁化容易軸方向に微小振幅の交流励磁が行われるように高周波キャリアを通电した。

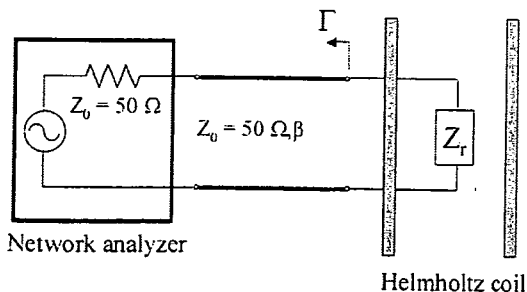


Fig. 5 Impedance measurement system.

Table 1 Relationship between H_{dc} at maximum impedance and the demagnetizing field.

Width of the magnetic film (μm)	H at maximum impedance (Oe)	Demagnetizing field (Oe)
100	55	49
200	37	24
400	26	11

4.2 実験結果

外部直流磁界 H に対するセンサ素子のインピーダンス変化の測定結果を Fig. 6 に示す。丸プロットは磁性薄膜の幅 100 μm の結果、三角プロットは幅 200 μm の結果、四角プロットは幅 400 μm の結果である。キャリア周波数は 550 MHz であり、このとき全てのセンサ素子でインピーダンスの変化量が最大となった。

磁性薄膜の幅 100 μm のセンサ素子のインピーダンスは、外部磁界 0 の時に 151 Ω であったが磁界の増加とともに上昇し、外部磁界 55 Oe (4.3 kA/m) で最大値 162 Ω をとり、その後減少した。他の 2 つのセンサ素子についても同様な傾向を示し、幅 200 μm のセンサ素子では 147 Ω であったインピーダンスは外部磁界 37 Oe (2.9 kA/m) の時最大値 159 Ω となり、幅 400 μm のセンサ素子では 141 Ω であったインピーダンスは外部磁界 26 Oe (2.1 kA/m) の時最大値 148 Ω となった。この実験結果から形状磁気異方性を利用したセンサ素子で磁気-インピーダンス効果が生じること示した。また、磁性膜の幅によってインピーダンスピーク時の外部磁界強度が変化していることを確認した。

Table 1 にインピーダンスが最大値となる外部磁界強度と磁性膜幅方向の反磁界強度の計算値を示す。Table 1 からインピーダンスが最大値となる外部磁界強度と幅方向の反磁界強度は概ね一致していることが分かる。この結果から磁性薄膜の形状によって異方性強度の制御が可能であることを示した。

これらの結果から、形状磁気異方性を利用したセンサが高周波キャリア型磁界センサ素子として実現可能であることを示した。

5. 今後の課題

本報告で作製したセンサ素子はまだ反磁界が大きく、センササイズを小さくするとさらに反磁界が大きくなる。そのため磁性膜の形状による異方性制御に加え、新たな異方性制御を導入する必要がある。そこで我々は磁性薄膜の間隔を減少させることにより磁化困難軸方向の反磁界を緩和することを考えている。磁性薄膜の間隔を狭くすると、磁性薄膜が密になり接続する磁性薄膜の静磁結合によりマクロ的には1つの短冊状の磁性薄膜とみなすことが出来る⁹⁾。これを利用した磁性薄膜の間隔による新たな異方性制御の検討を開始している。

6. まとめ

反磁界強度を求めることによりセンサ素子設計の指針とした。指針に基づきセンサ素子を製作し、磁気インピーダンス効果が生じることを確認した。また、磁性薄膜の形状によって異方性強度を制御出来ることを示し、これらの検討により形状磁気異方性を利用したセンサが高周波キャリア型磁界センサとして実現可能であることを示した。

References

- 1) A. Takayama, T. Umehara, A. Yuguchi, H. Kato, K. Mohri, T. Uchiyama : *J. Magn. Soc. Jpn.*, 24, 763 (2000).
- 2) S. Yabukami, T. Suzuki, N. Ajiro, H. Kikuchi, M. Yamaguchi, and K. I. Arai : *IEEE Trans. Magn.*, 37, 2019 (2001).
- 3) M. Takezawa : Doctoral dissertation of Tohoku University, p. 216 (1999).
- 4) Y. Murayama, T. Ozawa, N. Horikoshi, S. Yabukami, K. Ishiyama, and K. I. Arai : *J. Magn. Soc. Jpn.*, 30, 237 (2006).
- 5) M. Senda, O. Ishii, Y. Koshimoto and T. Toshima : *IEEE Trans. Magn.*, 30, 4611 (1994).
- 6) M. Senda, H. Takei, O. Ishii, Y. Koshimoto and T. Toshima : *J. Magn. Soc. Jpn.*, 19, 465 (1995).
- 7) J. A. Osborn : *Physical Review*, 67, 351(1945).
- 8) K. I. Arai, M. Yamaguchi, and H. Ohzeki : *IEEE Trans. Magn.*, 28, 2175(1992).
- 9) M. Masuda, S. Shiomi and M. Shiraki : *J. Appl. Jpn.*, 26, 1680(1987).

2006年10月5日受理, 2007年3月19日採録

Case Report

Amyloid deposition in primary pulmonary marginal zone B-cell lymphoma of mucosa-associated lymphoid tissue

Tetsuo Satani, Tomoyuki Yokose, Takayuki Kaburagi, Yuji Asato, Masayuki Itabashi and Ryuta Amemiya

Thoracic Oncology Group, Ibaraki Prefectural Central Hospital and Regional Cancer Center, Ibaraki, Japan

A rare association between primary pulmonary marginal zone B-cell lymphoma of mucosa-associated lymphoid tissue (MALT lymphoma), and pulmonary immunoglobulin light chain (AL) amyloidosis is described in a 65-year-old woman suffering from rheumatoid arthritis (RA). All four nodules in the resected upper lobe of the lung had a similar histological appearance. They were composed of small-medium-sized atypical lymphocytes. Centrocyte-like cells had lymphoepithelial lesions. Immunohistochemically, the tumor cells clonally expressed B-cell markers, and demonstrated clonal rearrangement of the immunoglobulin heavy chain gene on polymerase chain reaction. Based on these findings the diagnosis of primary pulmonary MALT lymphoma was made. In addition, uniform eosinophilic material deposition was identified randomly within the tumor. It was Congoophilic and exhibited apple-green birefringence on polarizing microscopy, and remained unaffected by potassium permanganate digestion. Deposited material was immunoreactive to lambda light chain. It was concluded that this material was AL amyloid in primary pulmonary MALT lymphoma. Plasma cells with mRNA of lambda chain was found infiltrated along the border of amyloid deposition. Finally, it is speculated that primary pulmonary MALT lymphoma developing in an autoimmune setting, RA in the present case, is associated with overproduction and abnormal clearance of immunoglobulin by the tumor cells, resulting in AL amyloidosis within the tumor.

Key words: AL type, amyloidosis, marginal zone B-cell lymphoma of mucosa-associated lymphoid tissue, pulmonary lymphoma, rheumatoid arthritis

Pulmonary amyloidosis is a rare condition, not related to any systemic disease, and is often asymptomatic and discovered

on a routine chest radiograph. Furthermore, amyloid deposition in a malignant pulmonary lymphoma lesion has also been only rarely reported. We describe the case of a 65-year-old woman suffering rheumatoid arthritis (RA), who developed primary pulmonary marginal zone B-cell lymphoma of mucosa-associated lymphoid tissue (MALT lymphoma), with deposition of the immunoglobulin light chain (AL) amyloid within the lymphoma lesions. It is generally said that RA is associated with the serum amyloid A (AA) amyloid; in contrast, malignant lymphoma is associated with the AL amyloid. To our knowledge only one pulmonary and one breast case have been reported as AL amyloid-producing MALT lymphoma associated with autoimmune disease,^{1,2} and no similar case in other organs has been reported as yet. We discuss the histogenesis of lymphoma-associated amyloidosis.

CASE REPORT

A 65-year-old woman presented with a 20 year history of RA. She was a non-smoker and had undergone implantation of a cardiac pacemaker due to complete atrioventricular block 8 years previously. On examination swan-neck deformity of both the hands was observed; there was no supraclavicular or cervical lymphadenopathy. The patient did not have sicca syndrome associated with Sjogren syndrome. CRP was high (0.57 mg/dL), serum rheumatoid factor was positive (248 IU/mL), and IgG and IgM were elevated (2130 mg/dL and 382 mg/dL, respectively). Anti-nuclear antibody, anti-SS-A antibody, and anti-SS-B antibody were negative. Urine protein was negative and Bence-Jones protein was not detected on electrophoresis. A chest radiograph obtained during a routine follow-up examination showed an abnormal opacity in the left upper zone; the aortic knob was enlarged, with an irregular margin (Fig. 1). Chest CT indicated two mass lesions in the left upper lobe; 1 cm and 3 cm in diameter, with irregular margins (Fig. 2), but no mediastinal lymphadenopathy was identified. Isotope bone scanning and CT of the brain and abdomen did not indicate any abnormality.

Correspondence: Tomoyuki Yokose, MD, Thoracic Oncology Group, Ibaraki Prefectural Central Hospital and Regional Cancer Center, 6528 Koibuchi, Kasama, Ibaraki 309-1793, Japan. Email: yokose-t@kccch.jp

Received 27 February 2007. Accepted for publication 25 June 2007.

© 2007 The Authors

Journal compilation © 2007 Japanese Society of Pathology

Because malignancy could not be ruled out, a thoracoscopic biopsy was performed. The larger tumor detected on CT was incised and partially resected. Intraoperative examination of frozen sections indicated a diagnosis of malignant lymphoma. Therefore, left upper lobectomy was performed. Lymph nodes, obtained from subaortic and subcarinal areas showed no histological evidence of lymphoma.

PATHOLOGICAL FINDINGS

There were four nodules in the resected upper lobe; the two nodules in S1 + 2 were 15 × 8 mm and 40 × 20 mm in size, respectively, and the two nodules in S3 were 10 × 7 mm and 3 × 3 mm in size, respectively. All of the nodules were hard in consistency, and were poorly delineated from the surrounding lung parenchyma (Fig. 3a). The four nodules had a similar histological appearance. They were composed of atypical small-medium-sized lymphocytes. Reactive lymph follicles with active germinal centers were scattered within the tumor, but many of them were abortive due to surrounding tumor cells (Fig. 3b). Monotonous infiltration of medium-sized centrocyte-like (CCL) cells characterized by moderately abundant, clear or very finely granular cytoplasm and round or indented nuclei was often recognized. Plasma cell differentiation was not prominent, but several plasma cells gathered around eosinophilic materials in the nodules. Dutcher body was rarely found. Atypical lymphocytes with CCL-like cells infiltrated the bronchial or bronchiolar epithelium, corresponding to a lymphoepithelial lesion (LEL, Fig. 3c). Immunohistochemical staining of formalin-fixed paraffin-embedded sections was performed retrospectively

using the labeled streptavidin-biotin method (LSAB2 kit; DakoCytomation, Carpinteria, CA, USA) and commercially available antibodies listed in Table 1. B-cell markers of CD20 (Fig. 3d) and CD79a were observed diffusely in the tumor cells. Bcl-2 was also diffusely observed in the tumor cells but not in reactive lymph follicles. In contrast, bcl-1 was negative. CD10 was positive only in the germinal centers of reactive lymph follicles. Furthermore, using primers framework 3A (FR3A) and low JH for polymerase chain reaction (PCR), a single faint band was detected, indicating the presence of a clonal B-cell population in the lesion. This was further confirmed on subsequent semi-nested PCR using primers FR3A and very low JH, which gave a more definite single band on the gel (data not shown). Based on these findings, we made

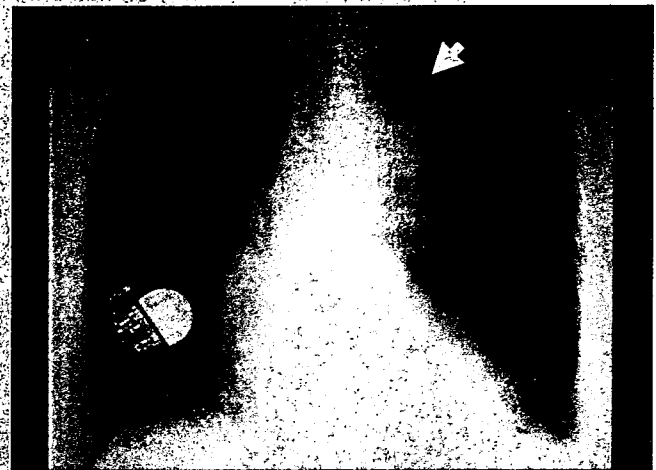


Figure 1 Chest radiograph. An irregular-margin mass in contact with the aorta in the left upper lobe (arrow).

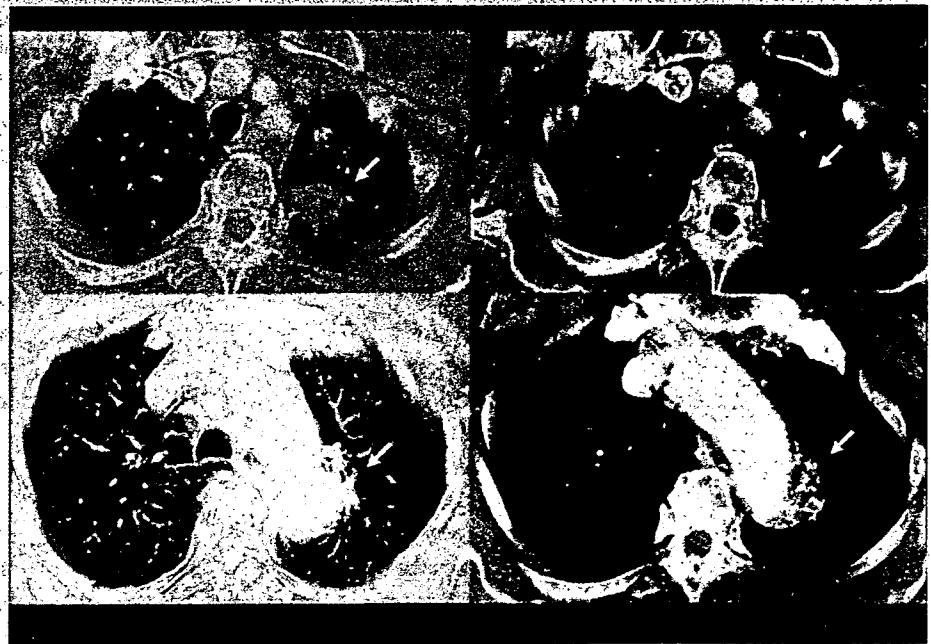


Figure 2 CT image. Two irregular nodular lesions (1 cm and 3 cm in diameter) were observed in the left upper lobe (arrows).

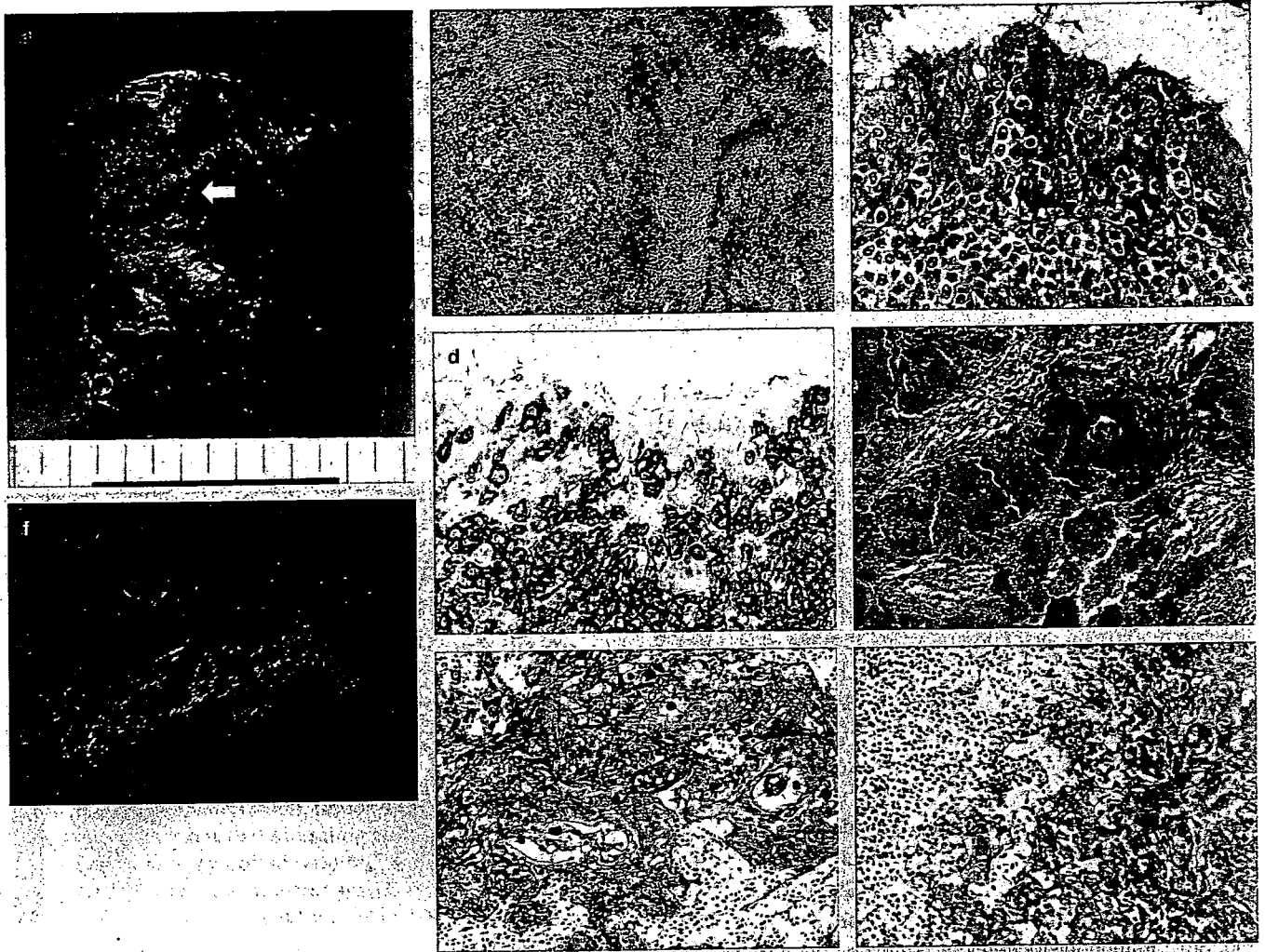


Figure 3 Macroscopic, microscopic, immunohistochemistry and *in situ* hybridization findings: (a) The largest one among four nodules, located in S1 + 2 of the lung. The nodule was hard in consistency and was poorly delineated from the surrounding lung parenchyma. (b) Histologically, nodules are composed of monotonous proliferation of atypical lymphoid cells surrounding a reactive lymph follicle with an active germinal center (HE). (c) Within the nodules, atypical lymphoid cells with centrocyte-like cells infiltrate the bronchial or bronchiolar epithelium, corresponding to a lymphoepithelial lesion (HE). (d) Atypical lymphoid cells in a lymphoepithelial lesion and subepithelial area show strong immunoreaction for CD20 (immunohistochemical staining (IH)). (e) Reticular or nodular-shaped eosinophilic materials are observed among the lymphoma lesions (HE). (f) It was stained positively with Congo red staining and had apple-green birefringence on polarizing microscopy. (g) Amyloid deposition shows immunoreaction for lambda chain. Several plasma cells are around or within the deposition (IH). (h) Plasma cells with mRNA of lambda chain are stained with coloring reagent (black in this figure). They infiltrate along the border of amyloid deposition, which is observed in the right half area of the photograph (*in situ* hybridization).

the diagnosis of primary pulmonary MALT lymphoma. There was no evidence of lymph node involvement in this patient.

In contrast, uniform eosinophilic material deposition was identified randomly within the tumor (Fig. 3e). It was stained positively on Congo red, exhibited apple-green birefringence on polarizing microscopy, and remained unaffected by potassium permanganate digestion (Fig. 3f). The deposition was immunoreactive for lambda chain (Fig. 3g). We therefore identified this material as amyloid of the AL (Λ) type. Rectal biopsy did not show any amyloid deposits, thus, there was no evidence of systemic amyloidosis. We conducted *in situ* hybridization to detect mRNA of kappa and lambda chain

using Ventana XT-System Benchmark and ISH IVIEW Blue Detection Kit (Ventana Japan, Yokohama, Japan). We found that more plasma cells contained mRNA of lambda chain compared to kappa chain in a ratio of at least 10:1, and they infiltrated along the border of amyloid deposition (Fig. 3h).

DISCUSSION

Although approximately 40% of all patients with non-Hodgkin's lymphomas have extranodal disease,³ primary pulmonary involvement is comparatively rare. In addition,

Table 1 Immunohistochemistry and ISH of the tumor cells

Antibody (Clone)	Source	Result
IgA	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
IgM	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
IgG	Dako Japan, Kyoto, Japan	+
IgD	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
CD3	Novocastra Laboratories, Newcastle, UK	-
CD5	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
CD8	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
CD10	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
CD20 (L-26)	Dako Japan, Kyoto, Japan	+
CD23	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
CD30 (BerH2)	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
CD45	Dako Japan, Kyoto, Japan	+
CD79a	Dako Japan, Kyoto, Japan	+
Keratin (AE1/AE3)	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
Bcl-1	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
Bcl-2	Dako Japan, Kyoto, Japan	+
Kappa chain	Dako Japan, Kyoto, Japan	+ (Low in number)
Lambda chain	Dako Japan, Kyoto, Japan	+ (High in number)
Kappa chain (ISH)	Ventana Japan, Yokohama, Japan	+ (Low in number)
Lambda chain (ISH)	Ventana Japan, Yokohama, Japan	+ (High in number)
Amyloid A	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
Amyloid P	Dako Japan, Kyoto, Japan	-
β 2-microglobulin	Dako Japan, Kyoto, Japan	-

ISH, *in situ* hybridization.

primary pulmonary malignant lymphoma accounts for only 0.3% of all malignant pulmonary tumors.⁴

Pseudolymphoma of the lung, which refers to localized lymphoid proliferation in the lung, usually presents as a single nodule confined to one lobe. However, recent advances in immunological and molecular biological study techniques have led to most of these cases with so-called pulmonary pseudolymphoma being classified as low-grade malignant lymphomas, also known as MALT lymphomas, first described by Isaacson and Spencer.⁵ The present case was diagnosed as MALT lymphoma based on the identification of low-grade lymphoma cells with LEL.

A thorough review of the literature yielded 12 reports of pulmonary MALT lymphomas complicated by pulmonary amyloidosis.¹⁻⁶⁻¹⁰ They had female preponderance (male : female, 1:11) and age at diagnosis ranged between 45 and 85 years (median, 66 years). The lung nodules were usually multiple (10 out of 12 cases). Autoimmune disease was infrequent. Only one patient had complication, not RA but Sjogren syndrome. Sjogren syndrome is well-known to be associated with MALT lymphoma and primary amyloidosis,¹¹ but MALT lymphoma containing amyloid deposits in Sjogren syndrome is extremely rare.

Two types of pulmonary amyloidosis have been described: the localized type, in which amyloid deposition is found only in the lungs, and the systemic type, in which amyloid deposition in the lungs is observed as a part of generalized amyloidosis. Localized pulmonary amyloidosis has further been subdivided into the nodular, tracheobronchial, and diffuse parenchymal

types, according to the localization of the amyloid deposits.¹² The present case was classified as the nodular type.

The characteristics of the amyloid deposits and mechanisms underlying the deposition of the amyloid protein in localized amyloidosis have not yet been clarified in detail, but it has been said that the proteinaceous deposit is derived from immunoglobulin light chains (AL). The deposit in the present case was determined to be the AL type on immunohistochemistry and Congo red staining; it remained uninfluenced by potassium permanganate digestion and had apple-green birefringence on polarizing microscopy.

Amyloidosis complicating rheumatoid arthritis is well-known, but secondary amyloid deposits in RA are usually not the AL type but the AA type. Because the amyloid in the present case was the AL type, and the amyloid deposits were localized within the lymphoma lesion, we considered that this may not be a case of RA-associated amyloidosis but MALT lymphoma-associated amyloidosis.

It has been reported that MALT lymphoma may occur as an acquired lymphoproliferative lesions in cases of chronic inflammation and autoimmune disorders, such as RA.¹³ Laeng *et al.* reported that the tumor cells in MALT lymphoma of the nervous system produced amyloid, usually of the AL type.¹⁴ We speculate that primary pulmonary MALT lymphoma developing in an autoimmune setting, RA in the present case, is associated with overproduction and abnormal clearance of immunoglobulin by the tumor cells, resulting in AL amyloid deposition within the lymphoma lesion. Interestingly, light chain immunohistochemistry and *in situ*

hybridization showed a close correlation between amyloid deposition and plasma cells with regard to lambda chain. This observation strengthens our speculation.

A rare case of MALT lymphoma with pulmonary light chain deposition disease was reported recently.¹⁵ The locations of the two lesions were not clearly stated. That report showed that plasma cells with kappa light chain were infiltrated dominantly along the margin of amyloid-like deposition; in contrast, amyloid-like deposition was negative for Congo red staining. In the present case eosinophilic materials were Congoophilic, therefore we consider the deposition of the present case to be different from that of light chain deposition disease.

Prognosis of pulmonary MALT lymphoma with RA has not been clarified as yet, but generally the prognosis of pulmonary MALT lymphoma is good, and the 5 year survival rate after surgery often exceeds 90%, especially in the localized type.¹⁶ Lim *et al.* reported that the 5 year survival rate was approximately 66% in the cases of pulmonary MALT lymphoma with amyloid deposition⁸ but they had only six patients, therefore further investigation is needed. The prognosis of patients with the pulmonary nodular type of amyloidosis is favorable, and deaths are extremely rare among patients with this type of lesion.⁶ The present patient remained well during follow up, without any postoperative recurrence; but she died of cerebral infarction 4 years and 11 months after the operation. Because autopsy was not performed it remains unknown whether the lymphoma or amyloid had recurred. We suspect that the patient would have had a favorable prognosis if she had not died of cerebral infarction.

REFERENCES

- Nakamura N, Yamada G, Itoh T *et al.* Pulmonary MALT lymphoma with amyloid production in a patient with primary Sjögren's syndrome. *Intern Med* 2002; **41**: 309–11.
- Gupta D, Shidham V, Zamba-Palko V, Keshgegian A. Primary bilateral mucosa-associated lymphoid tissue lymphoma of the breast with atypical ductal hyperplasia and localized amyloidosis. *Arch Pathol Lab Med* 2000; **124**: 1233–6.
- Sutcliffe SB, Gospodarowics MK. Localized extranodal lymphomas. In: Newland AC, Burnett A, Keating A, Armitage, J, eds. *Haematological Oncology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992; 189–222.
- Miller DL, Allen MS. Rare pulmonary neoplasms. *Mayo Clin Proc* 1993; **68**: 492–8.
- Isaacson PG, Spencer J. Malignant lymphomas of mucosa-associated lymphoid tissue. *Histopathology* 1987; **11**: 445–62.
- Matsuda N, Okada M, Taniguchi I *et al.* A case of pulmonary malignant lymphoma associated with localized amyloid plaque. *J Jpn Assoc Thorac Surg* 1994; **42**: 2242–6.
- Wieker K, Rocken C, Koenigsman M, Roessner A, Franke A. Pulmonary low-grade MALT-lymphoma associated with localized pulmonary amyloidosis. A case report. *Amyloid* 2002; **9**: 190–93.
- Lim JK, Lacy MQ, Kurtin PJ, Kyke RA, Gertz MA. Pulmonary marginal zone lymphoma or MALT type as a cause of localized pulmonary amyloidosis. *J Clin Pathol* 2001; **54**: 642–6.
- Dacic S, Colby TV, Yousem SA. Nodular amyloidoma and primary pulmonary lymphoma with amyloid production. *Mod Pathol* 2000; **13**: 934–40.
- Davis CJ, Butchart EG, Gibbs AR. Nodular pulmonary amyloidosis occurring in association with pulmonary lymphoma. *Thorax* 1991; **46**: 217–18.
- Sugai S. Mucosa-associated lymphoid tissue (MALT) lymphoma and primary amyloidosis in the lung in Sjögren's syndrome. *Intern Med* 2002; **41**: 251–2.
- Falk RH, Skinner M. The systemic amyloidosis: An overview. *Adv Intern Med* 2000; **45**: 107–37.
- Pabst R, Gehrke I. Is the bronchus-associated lymphoid tissue (BALT) an integral structure of the lung in normal mammals, including humans? *Am J Respir Cell Mol Biol* 1990; **3**: 131–5.
- Laeng RH, Altermatt HJ, Scheithauer BW, Zimmermann DR. Amyloidomas of the nervous system: A monoclonal B-cell disorder with monotypic amyloid light chain lambda amyloid production. *Cancer* 1998; **82**: 362–74.
- Bhargava P, Rushin JM, Rusnock EJ *et al.* Pulmonary light chain deposition disease. Report of five case and review of the literature. *Am J Surg Pathol* 2007; **31**: 267–76.
- Cordier JF, Chailleux E, Lauque D *et al.* Primary pulmonary lymphoma; a re-appraisal of its histogenesis and its relationship to pseudolymphoma and lymphoid interstitial pneumonia. *Histopathol* 1988; **13**: 1–17.

肺癌術前リンパ節転移診断における、コンベックス走査式 超音波気管支鏡ガイド下生検 (EBUS-TBNA) の実際

中島崇裕^{2,3}・安福和弘^{1,2}・栗本典昭²・坂 英雄²・坪井正博²・
堀之内宏久²・磯部 宏¹・今村文生^{1,3}・大野 康¹・佐藤雅美^{1,3}・
土田敬明¹・梶 博久¹・林真一郎¹・松井 薫¹・宮澤輝臣¹・
横山 晶¹・本多英俊³・渋谷 潔^{1,3}・藤澤武彦^{1,*}

要旨——目的. 肺癌術前縦隔肺門リンパ節転移診断における、コンベックス走査式超音波気管支鏡ガイド下生検 (Endobronchial ultrasound-guided transbronchial needle aspiration; EBUS-TBNA) の手技およびその有用性について解説する。方法. 日本肺癌学会肺癌取扱い規約改定第6版に示されている縦隔肺門リンパ節の定義に従い、現在市販されている、オリンパス社製コンベックス走査式超音波気管支鏡 (BF-UC260F-OL8) を用いた、肺癌術前縦隔肺門リンパ節転移診断の手順を示した。系統的に全てのリンパ節を見落とさずに描出するために、一定の順序に従い、リンパ節の観察を行うことが望ましい。結果. 文献から、肺癌術前 105 症例を対象とした検討において、正診率 96.3% と非常に良好な結果が報告されている。また、現在までに EBUS-TBNA に関連した重篤な合併症の発生は認めていない。結論. 系統的に正しくリンパ節を描出し、穿刺を行うことにより、病理学的に非常に高い診断率で肺癌術前縦隔肺門リンパ節転移診断を行うことができる。さらに、局所麻酔下で合併症なく安全に検査を施行することが可能である。本報告をもとに、次回肺癌取扱い規約において、EBUS 所見分類 (案) を追加する予定である。(肺癌, 2007;47:207-214)

索引用語——コンベックス走査式超音波気管支鏡ガイド下生検

Endobronchial Ultrasound-guided Transbronchial Needle Aspiration for Lymph Node Staging of Lung Cancer

Takahiro Nakajima^{2,3}; Kazuhiro Yasufuku^{1,2}; Noriaki Kurimoto²; Hideo Saka²; Masahiro Tsuboi²;
Hirohisa Horinouchi²; Hiroshi Isobe¹; Fumio Imamura^{1,3}; Yasushi Ohno¹; Masami Sato^{1,3};
Takaaki Tsuchida¹; Hirohisa Toga¹; Shinichiro Hayashi¹; Kaoru Matsui¹; Teruomi Miyazawa¹;
Akira Yokoyama¹; Hidetoshi Honda³; Kiyoshi Shibuya^{1,3}; Takehiko Fujisawa^{1,*}

ABSTRACT—— Endobronchial ultrasound-guided transbronchial needle aspiration (EBUS-TBNA) is a new modality for the evaluation of hilar and mediastinal lymph nodes. Although many centers have adopted this new device, little has been described concerning the actual procedure and the systematic mediastinal and hilar lymph node assessment in patients with lung cancer. Here we describe the standard for systematic visualization and biopsy of mediastinal and hilar lymph nodes in patients with primary lung cancer. Lymph node stations were defined based on the General Rules for Clinical and Pathological Recording of Lung Cancer (Sixth edition), by the Japan Lung Cancer Society. Lymph nodes were scanned starting from the hilum, working up to the upper mediastinum. All enlarged lymph nodes or suspicious nodes were biopsied under real time ultrasound guidance. N3 nodes were punctured first followed by N2

¹日本肺癌学会気管支鏡所見分類委員会, ²EBUS 手技と所見分類ワーキンググループ, ³蛍光内視鏡ワーキンググループ, *日本肺癌学会気管支鏡所見分類委員会委員長。

別刷請求先: 藤澤武彦, 日本肺癌学会気管支鏡所見分類委員会委員長, 千葉大学大学院医学研究院胸部外科学, 〒260-8670 千葉県千葉市中央区支鼻 1-8-1 (e-mail: fujisawat@faculty.chiba-u.jp).

Reprints: Takehiko Fujisawa, Department of Thoracic Surgery, Graduate School of Medicine, Chiba University, 1-8-1 Inohana, Chuo-ku, Chiba-shi, Chiba 260-8670, Japan (e-mail: fujisawat@faculty.chiba-u.jp).

© 2007 The Japan Lung Cancer Society

and N1 nodes to avoid contamination. The diagnostic accuracy of mediastinal lymph node staging in 105 lung cancer patients was 96.3%. We have never experienced any major complication. In conclusion, EBUS-TBNA is a safe and accurate tool for the assessment of the mediastinum as well as the hilum in patients with lung cancer. (*JJLC*. 2007;47:207-214)

KEY WORDS — Endobronchial ultrasound-guided transbronchial needle aspiration (EBUS-TBNA), Convex probe EBUS

はじめに

コンベックス走査式超音波気管支鏡 (Convex probe EBUS; CP-EBUS) は、本邦で開発され、現在欧米諸国を含め多くの施設で臨床応用に至っている。コンベックス走査式超音波気管支鏡ガイド下生検 (Endobronchial ultrasound guided transbronchial needle aspiration; EBUS-TBNA) は、それまで縦隔鏡に頼っていた縦隔リンパ節転移診断を含む、気管・気管支周囲病変に対する病理診断を、リアルタイムに局所麻酔下で経気管支的に行うことを可能とした画期的な検査法である。肺癌において、リンパ節転移を正しく診断することは、その後の治療法や予後を左右する重要な因子である。現在までに PET を含む様々な画像診断法が開発されてきたが、画像診断の診断率には限界があり、様々な点で病理診断を行える利点は大きい。このため、欧米ではすでに数多くの施設で施行され、縦隔鏡に代わる検査として注目されている。しかし、EBUS-TBNA は手技が若干複雑で、習熟するまでにある程度のトレーニングが必要である。現在市販されている、オリンパス社製コンベックス走査式超音波気管支鏡 (BF-UC260F-OL8) は、2002 年より EBUS-TBNA 手技の開発を開始し、切除肺での検討を経て、¹ 専用の 22 G 穿刺針開発によって、臨床応用を果たした。² 本報告では、現在行われている EBUS-TBNA 手技の実際とその有用性について述べる。

機器の種類

現在、日本ではコンベックス走査式超音波気管支鏡として、オリンパス社製コンベックス走査式超音波気管支鏡 (BF-UC260F-OL8) (図 1) およびペンタックス社製コンベックス走査式超音波気管支鏡 (FB-19UV) (図 2) が使用されている。どちらも専用の穿刺針 (22 G 針) を用いたリアルタイムでの針生検が可能である。プローブを気管壁に密着させるため、オリンパス社製では生理食塩水を満たしたバルーンを使用し、ペンタックス社製では、リドカインゼリーを使用する。内腔は斜視のファイバースコープでの観察となるため、気管支鏡の操作には若干の習熟を要する (図 3)。

本報告ではオリンパス社製コンベックス走査式超音波気管支鏡 (BF-UC260F-OL8) を使用した場合の EBUS-TBNA 手技について解説する。機器の準備や穿刺針の取

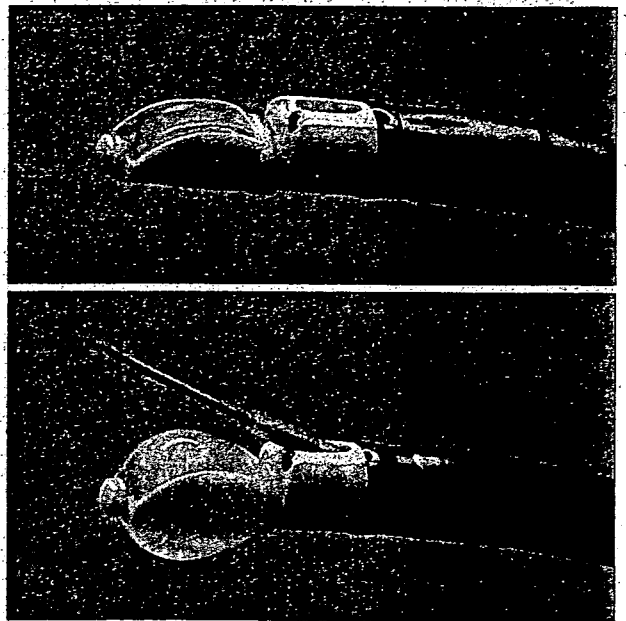


図 1. オリンパス社製。

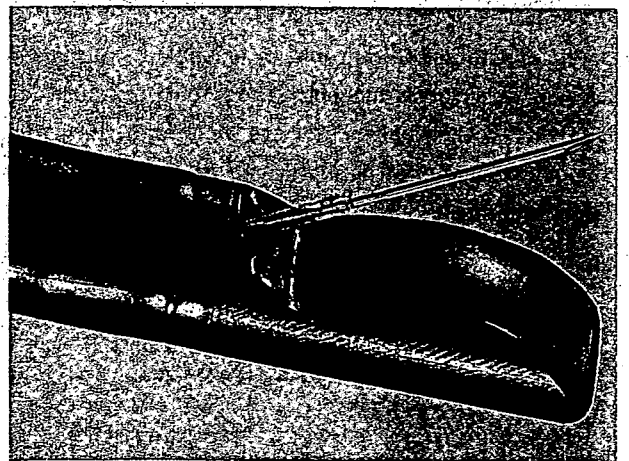


図 2. ペンタックス社製。