

いて磁歪は0である。この連続した矩形磁性体にCu薄膜をコプレーナ構造となるように配置して電極とした。磁性体の膜厚は2 μm 、幅は20 μm ならびに80 μm とした。また端部磁性体の長さ X は次節にて説明するシミュレーション結果より0から1 mm とした。

Fig. 2 に本素子作製プロセスのプロセスチャートを示す。この図はFig.1中の破線部分の断面を見たものである。ガラス基板にフォトリソグラフィによりレジストをパターンニングし、その後にCoNbZrをRFスパッタ法により製膜した。その後、温度400°C下で、磁界強度3 kOeの回転磁界中熱処理を2時間、磁性体の幅方向に対して50°傾けた方向に3 kOeの静磁界中熱処理を1時間行なって、斜め方向に磁気異方性を誘導した。熱処理後、電極となるCu薄膜を1層目のCoNbZr薄膜と同様にRFスパッタ法ならびにリフトオフ法で作製し、素子が完成する。

完成した素子の概観写真をFig. 3に示す。この素子の磁性体幅は20 μm 、端部磁性体長さは $X=1$ mm である。Fig. 4にカー効果

顕微鏡にて観察したこの素子の磁区構造を示す。磁化は図中矢印の方向を向いていると考えられる。ストライプ状磁区の磁壁は、素子幅方向から平均で45°面内に傾斜していることが確認できる。

3. 素子内部磁界分布解析

端部磁性体長さに対する素子の反磁界の影響を調べるため、3次元有限要素法によるシミュレーションを行った。Fig. 5は幅20 μm ならびに80 μm 、厚さ2 μm 、長さ1.2 + 2X mmの磁性体の長手方向に1 Oeの外部磁界を印加した場合の素子内部の磁界分布をシミュレーションした結果である。図における縦軸は、磁界の絶対値である。シミュレーションの条件としては、磁性体の飽和磁束密度が9.4 kG (0.94 T)、異方性磁界6 Oeの磁化容易軸を50°傾けた条件を模擬して行った。すなわち、磁性体のM-H曲線は、センサ素子と同じ条件となるように磁化容易軸を50°傾け、センサ素子の磁界印加方向と対応した方向の外部磁界

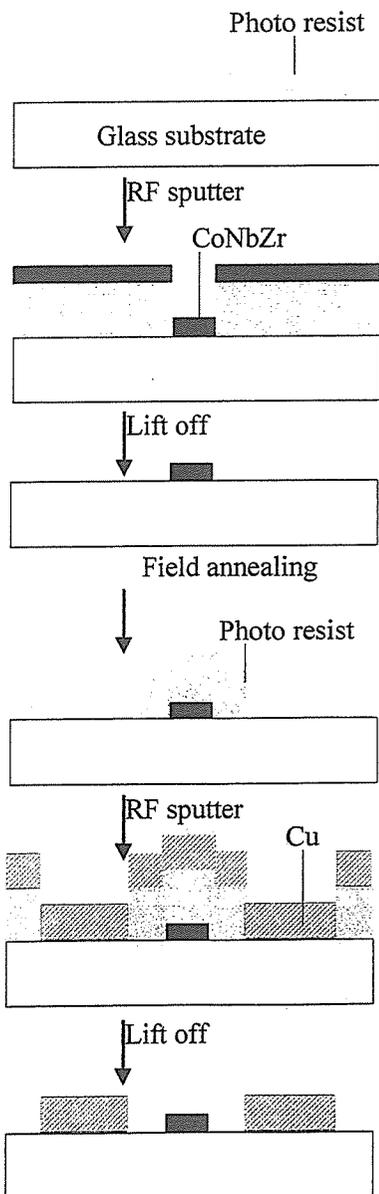


Fig. 2 Fabrication process for the sensor.

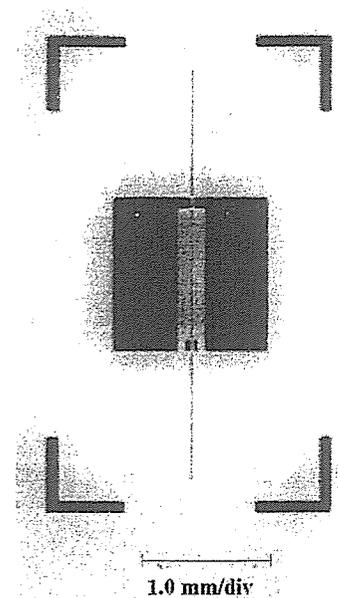


Fig. 3 Photographic view of the fabricated HFC-type magnetic field sensor.

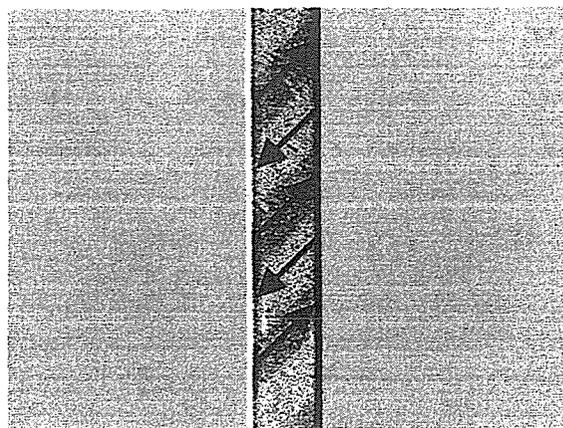


Fig. 4 Domain structure of the sensor (width = 20 μm , $X = 1$ mm).

によるM-H曲線を $\phi 5\text{mm}$ の円盤形状の磁性薄膜において測定したものを用いた。なお、本解析の条件では磁性体は飽和していない。さらに本解析は磁区構造を考慮しないバルク的な解析である。また、素子長手方向中心を 0mm とし、センサ部となる 1mm の領域に縦線をひいてある。ここでセンサ部とはFig. 1上下2つの電極に挟まれた領域を示し、素子インピーダンスの測定部分である。幅 $20\ \mu\text{m}$ 、 $80\ \mu\text{m}$ いずれの場合でも端部磁性体長さ X を大きくすることでセンサ部における磁界が均一化することがわかる。特に $X=1\text{mm}$ ではセンサ部における磁界がほぼ均一であるため、本研究では、端部磁性体長さ X が 0 から 1mm の素子を作製した。

4. 実験方法

Fig. 6 に素子のインピーダンス測定装置を示す。素子イ

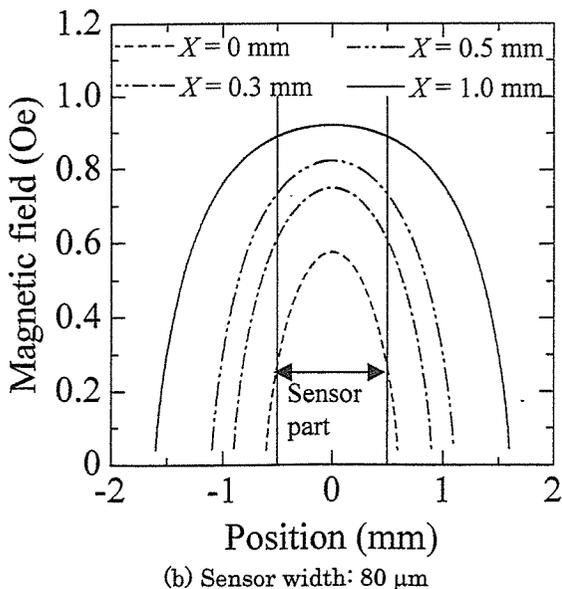
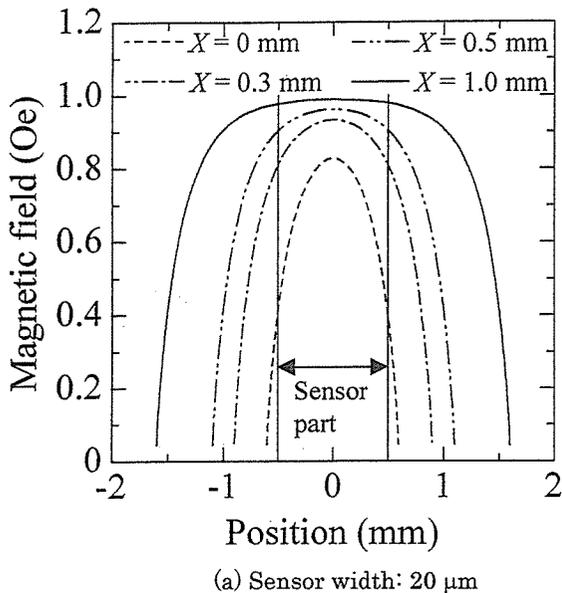


Fig. 5 Simulated magnetic field in the sensor element.

ンピーダンスの測定は、3端子ウェハープローブを用い、ネットワークアナライザによりS11を測定することで行った⁴⁾。測定は、ヘルムホルツコイルにより外部磁界をセンサ長手方向に印加し、その磁界強度に対する素子インピーダンス特性を測定することで行った。なお、センサ素子に通電した高周波電流（以下、キャリア電流またはキャリアと呼ぶ）は、 $-10\ \text{dBm}$ と入力電力一定とした。

5. 実験結果

磁性体幅 $20\ \mu\text{m}$ のセンサ素子について外部磁界強度に対するセンサ素子インピーダンスの測定結果をFig. 7に示す。丸プロットは端部磁性体長さ $X=0\text{mm}$ で素子に通電したキャリア周波数 $600\ \text{MHz}$ での実験結果、四角プロットは $X=1\text{mm}$ 、キャリア周波数 $500\ \text{MHz}$ の実験結果である。キャリア周波数が異なるのは、センサ感度最大の条件を選んだためである。図よりインピーダンスの変化は、 $X=0\text{mm}$ のときは $1.2\ \text{Oe}$ 付近で、 $X=1\text{mm}$ のときは $0.5\ \text{Oe}$ 付近で不連続的なものとなっている。そこでインピーダンスが連続的と認められる点(図中には実線で示した)においてセンサ感度を導出すると、 $X=0\text{mm}$ では $19\ \Omega/\text{Oe}$ 、 $X=1\text{mm}$ では $63\ \Omega/\text{Oe}$ と約3倍の感度増加が得られた。磁性体

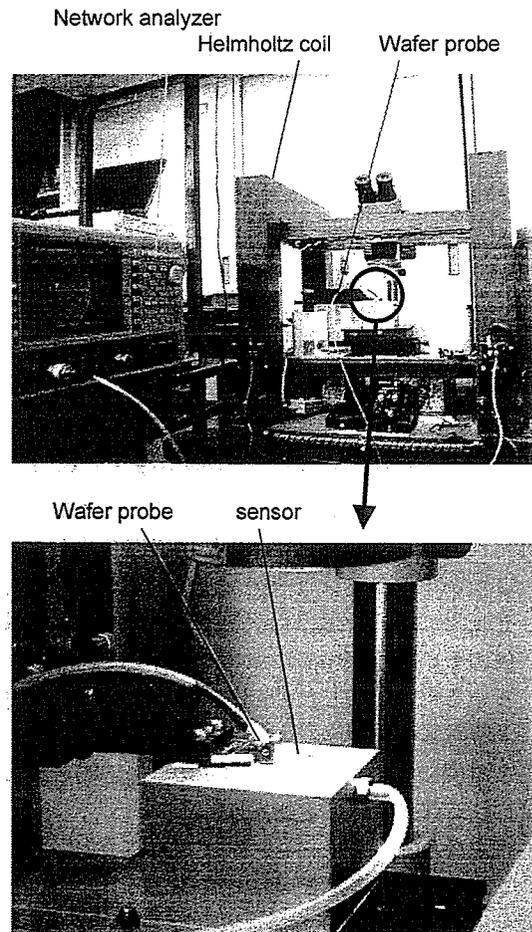


Fig. 6 Impedance measurement system.

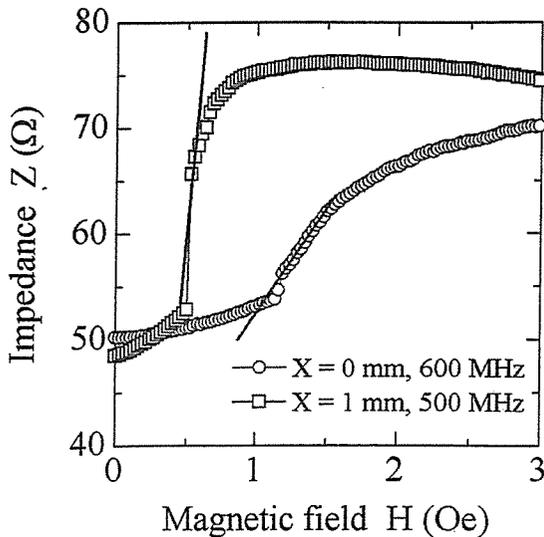


Fig. 7 Dependence of the sensor impedance on the external field (width 20 μm).

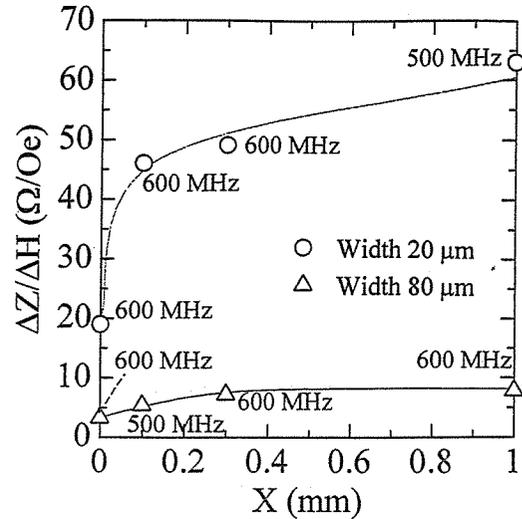


Fig. 9 Dependence of the sensor gain $\Delta Z/\Delta H$ on the edge extension length X .

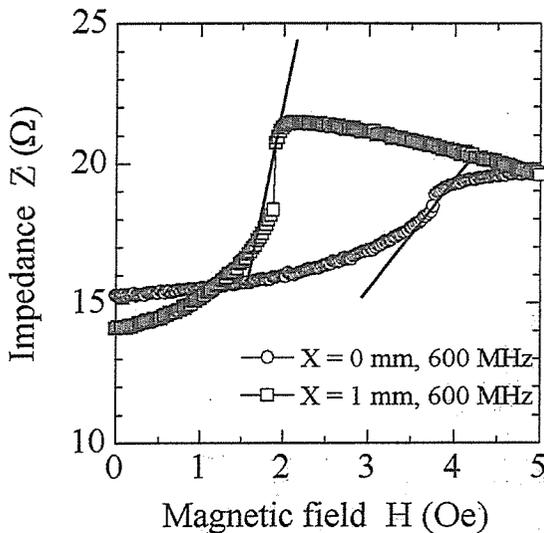


Fig. 8 Dependence of the sensor impedance on the external field (width 80 μm).

幅 80 μm の素子のインピーダンス測定結果を Fig. 8 に示す。幅 20 μm と同様にセンサ感度を測定すると、 $X=0$ mm では 3.3 Ω/Oe 、 $X=1$ mm では 7.8 Ω/Oe と約 2.4 倍の感度増加が得られた。インピーダンス特性に不連続的な点が生じる原因については、インピーダンスが不連続的に変化する現象と Fig. 4 に示したような傾斜したストライプ状磁区構造が消失あるいは出現する現象とが対応していることが報告されている⁵⁾。しかしながら、本報告において外部磁界変化による磁区構造変化の測定は行っていない。従って、不連続点を感度を含める可能性を除くために、明らかに連続とみなされる部分で感度を計算した。

以上の結果からインピーダンスが連続的に変化している点において、端部磁性体長さ X に対するセンサ感度 $\Delta Z/\Delta H$ の最大値を求めると Fig. 9 のようになる。図から、端部長

さの増大によりセンサ感度が増加することがわかる。

以上の結果より、端部磁性体の配置は高周波キャリア型磁界センサの感度向上に有効であることが示された。

6. まとめ

端部磁性体の配置により小型かつ高感度な高周波キャリア型磁界センサを実現することを目的に、傾斜磁区ならびに端部磁性体を持つセンサ素子の作製およびインピーダンス特性の測定を行った。端部磁性体を配置することで、高周波キャリア型磁界センサの磁界検出部における反磁界の影響を除去でき、その結果、幅 20 μm の素子で端部長さ $X=0$ mm に対して $X=1$ mm の素子では約 3 倍の感度増加が得られた。同様に幅 80 μm の素子では 2.4 倍の感度増加が得られた。このことより、端部磁性体の配置はセンサ部長さ 1 mm と小型な高周波キャリア型磁界センサの感度向上に有効であることが示された。

謝辞 本研究の一部は平成 16 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業 (受付番号 16G2012) により行った。

References

- 1) H. Mawatari, H. Kikuchi, S. Yabukami, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: *J. Magn., Soc., Jpn.*, **27**, 414 (2003).
- 2) T. Nakai, H. Abe, S. Yabukami, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: *J. Magn., Soc., Jpn.*, **27**, 832 (2003).
- 3) Y. Amamoto, K. I. Arai, M. Yamaguchi: Japanese patent unexamined published, 2004-039837 (2004).
- 4) T. Nakai, H. Abe, M. Yamaguchi, S. Yabukami, H. Kikuchi, and K. I. Arai: *J. Magn., Soc., Jpn.*, **27**, 419 (2003).
- 5) T. Nakai, H. Abe, N. Hoshi, H. Suzuki, and K. I. Arai: *The papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Jpn.*, MAG-04-248 (2004).

2005年10月19日受理, 2006年1月16日採録

Enhancement of High-Frequency-Carrier Type Magnetic Field Sensors by Controlling the Annealing Temperature

Y. Murayama, T. Ozawa, N. Horikoshi, S. Yabukami, K. Ishiyama, and K. I. Arai
 Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

We designed high-frequency-carrier type thin-film sensors to obtain high impedance change by controlling the annealing temperature, and investigated the relationships between the noise level, magnetic permeability, and domain structure. Meander-type sensor elements were fabricated, and a magnetic field resolution of 3.4×10^{-8} Oe/Hz^{1/2} at 501 kHz was obtained.

Key words: high sensitivity, high-frequency-carrier type thin film magnetic field sensor, annealing, noise level

熱処理温度制御による高周波キャリア型薄膜磁界センサの高感度化

村山芳隆・小澤哲也・堀越直・藪上信・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⁾。この磁界センサ素子の検出感度の限界は磁化の熱ゆらぎで決定されると考えられ、その値は室温で 10^{-9} Oe (7.95×10^{-8} A/m) 台に達するとの報告がある³⁾。この磁界センサを高感度化するにはセンサ素子自体の感度を高めるとともに、信号検出時のノイズの抑制が重要となる。

本論文では、磁性薄膜の熱処理温度を制御することにより、センサ素子の磁気異方性を低下させて高周波キャリア型薄膜磁界センサのインピーダンスを大きく変化させ、信号強度を大きくすることを意図した。

一方、高周波キャリア型薄膜磁界センサではノイズレベルは主として位相雑音と熱雑音で決まることが報告されているものの²⁾、高いSN比を得るためにセンサへの投入パワーを増加させることによるSN比の悪化およびノイズレベルの上昇については議論されておらず、このノイズの発生要因とセンサ内部の磁気特性、磁区構造との関係について検討が必要である。

そこで本稿では搬送波強度を大きくした場合のノイズレベルの増大の問題を実験的に検討することを目的とし、ノイズ増大時の周波数スペクトル、熱雑音との関係、磁性薄膜の比透磁率および磁区構造とノイズレベルの上昇について議論した。得られた知見に基づき、熱処理温度の制御によりセンサ素子を試作し、信号強度の増大とノイズレベル上昇の抑制が両立可能であることを示した。

2. 高周波キャリア型薄膜磁界センサの動作原理

Fig. 1は高周波キャリア型薄膜磁界センサの動作を模式的に示したものである。センサ素子は短冊あるいはミアンダ形状としており、磁化容易軸は短冊の幅方向へ磁界中熱処理によって付与する。バイアス磁界および交流磁界(測定磁界)は短冊長手方向へ印加する。搬送波電流は短冊長手方向へ通電される。外部からの印加磁界によって素子幅方向の磁化が回転し、透磁率及びインピーダンスが変化す

る。インピーダンスの変化を利用して磁界検出を行う。

Fig. 2は微小交流磁界の計測方法を概念的に示したものである。搬送波電流はシグナルジェネレータによりセンサ素子へ加えられ、出力信号はスペクトラムアナライザ等の50Ω系の測定装置で計測される。センサ素子には、直流バイアス磁界をインピーダンス変化率が最大となるように印加している。計測される交流磁界は振幅変調され、磁界強度は側波帯に比例する。信号強度は線形領域での励振であれば、振幅変調波の側波帯⁴⁾として(1)式で近似できる。

$$|v_o(\omega_c \pm \omega_s)| = \frac{JS(Z_b + 50)R_o h_{ac}}{2(Z_b + R_o + R_i)^2} \left(\frac{\Delta Z}{\Delta H} \right) \quad (1)$$

ただし v_o は側波帯レベル、 ω_c は搬送波の角周波数、 ω_s は微小交流磁界の角周波数、 J はセンサ素子に通電する搬送波の電流密度、 S はセンサ素子の断面積、 h_{ac} は測定される交流磁界強度、 R_i はシグナルジェネレータの入力抵抗、 R_o はスペクトラムアナライザの入力抵抗であり、 Z_b は素子の動作点におけるインピーダンス、 $\Delta Z/\Delta H$ は印加磁界に対するインピーダンス変化率である。

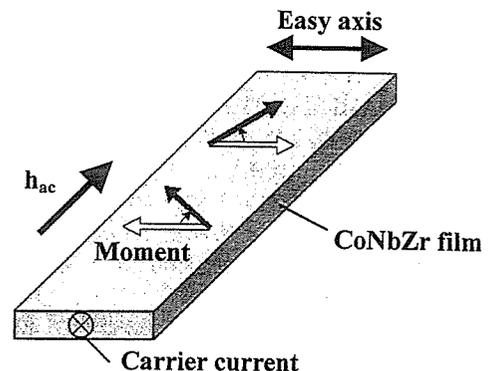


Fig. 1 Schematic view of a sensor element.

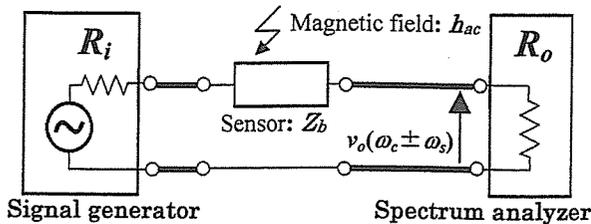


Fig. 2 Equivalent circuit.

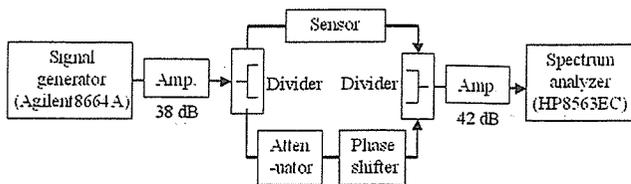


Fig. 3 Carrier-suppressing circuit.

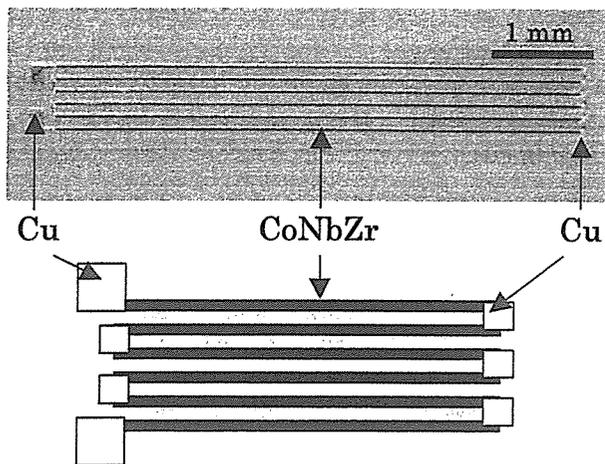


Fig. 4 Sensor element.

3. 実験方法

3.1 センサ素子の作成

センサ素子は $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ の短冊薄膜により構成され、それらを Cu 薄膜電極により電氣的に接続してミアンダ構造にしている。 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜はアモルファスであり、磁歪は 0 である。 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜は RF スパッタ法により投入電力は 200 W, Ar ガス圧は 20 mTorr の条件でガラス基板 (MATSUNAMI 製 S-1111) に約 4 μm 成膜し、リフトオフにより微細加工を施した。その後、電極の Cu 薄膜を RF スパッタ法により 3 μm 成膜し、リフトオフにより加工した。その後、磁界中熱処理を施し短冊の幅方向に磁界を印加しながら異方性を付与した。熱処理条件は回転磁界中熱処理 (2 時間, 3 kOe (238.5 kA/m), 400°C) の後、静磁界中熱処理 (1 時間, 3 kOe (238.5 kA/m)) で行い、静磁界熱処理の温度は 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C とした。 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜では熱処理温度が低くなると異方性磁界が弱くなる傾向が見られ、インピーダンス変化率と熱処理温度との関係を実験的に検討した。

素子のインピーダンスは、素子長手方向に直流磁界をヘルムホルツコイルで印加しながら、ネットワークアナライザ (HP 8752A) を用いて透過法で S_{21} を測定し算出した。

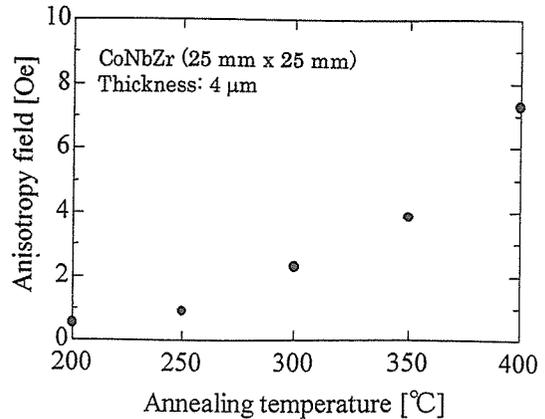


Fig. 5 Anisotropy field of CZN film.

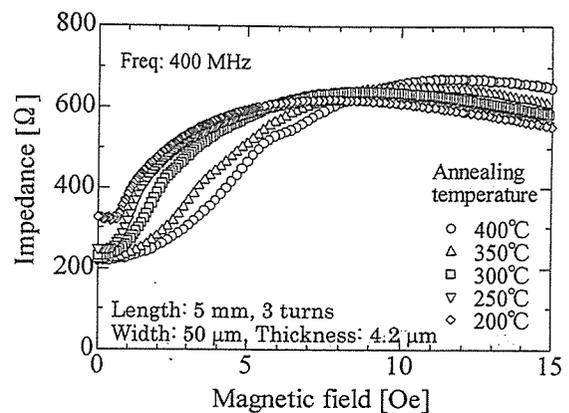


Fig. 6 Impedance of the sensor element.

3.2 ノイズレベルおよび微小磁界計測

ノイズレベルの計測及び微小磁界計測には Fig. 3 に示す搬送波抑制回路²⁾を用いた。シグナルジェネレータ (Agilent 8664A) から出力される搬送波信号は、低雑音増幅器 (NOGAWA NHP-2046) により増幅され、センサ側および減衰器側に分けられる。センサ素子に通電される搬送波信号は、センサに入力される交流磁界により振幅変調される。分岐されたもう一方では搬送波を上段と振幅が等しく位相が 180° 異なるように、移相器 (ARRA 2448A) および減衰器 (Agilent 8494B, KEYCOM KAT-001010-M) により調整した。これらの信号を合成することで搬送波成分を 60 dB 以上抑制し、オフセット周波数 501 kHz における位相雑音を熱雑音以下に低減した。側波帯強度およびノイズレベルの測定はスペクトラムアナライザ (HP8563EC) を用いた。実験は全て、磁気シールドルーム (遮蔽率は 1 Hz で約 35dB, 500 kHz で約 60 dB) で行った。

4. 実験結果

4.1 磁性膜の熱処理温度と異方性

Fig. 4 に試作したセンサ素子の外観写真と構成図を示す。Fig. 4 に示したセンサ素子は 1 本の短冊の幅が 50 μm , 厚さが 4.2 μm , 隣接短冊の間隔が 50 μm であり、3 ターンのミアンダ構造を有している。

Fig. 5 に 1 辺 25 mm, 膜厚 4 μm の $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜における異方性磁界強度の静磁界中熱処理温度依存性を示す。静磁界中熱処理温度が低いほど異方性が弱くなる傾向

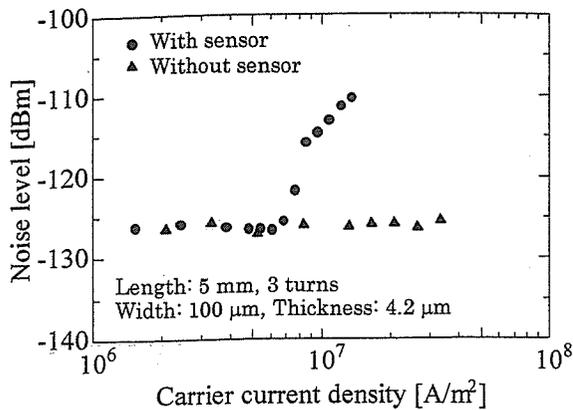


Fig. 7 Noise level dependence of the current density.

が見られる。従ってセンサ素子の短冊幅方向に一軸異方性を付与する際に、熱処理温度制御によって異方性が制御できる。

Fig. 6 にセンサ素子のインピーダンスと印加磁界のグラフを静磁界中熱処理温度を 200°C~400°C で変化させた場合について示す。センササイズは短冊幅 50 μm, 間隔 50 μm, 膜厚 4.2 μm, 長さ 5 mm, ターン数は 3 ターンである。測定した搬送波周波数は 400 MHz, センサへの投入パワーは -10 dBm とした。静磁界中熱処理温度を 400°C 以下に設定すると、インピーダンス変化率は 400°C の場合に比較して増加した。静磁界中熱処理温度が 250°C のときインピーダンス変化率は最大値をとり、約 190 Ω/Oe (2.39 Ω/(A/m)) を得た。一方、静磁界中熱処理温度が 200°C の場合においては、素子幅方向の異方性が弱くなり、膜内部において素子長手方向を容易軸とする磁化成分が増えるため、印加磁界が 0 の時のインピーダンスが増加し、インピーダンス変化率は低下した。以上より静磁界中熱処理温度を 250°C に設定することで信号強度 (振幅変調の側波帯) は向上すると考えられる。

4.2 ノイズレベル

4.2.1 ノイズレベルと搬送波電流密度

Fig. 7 は搬送波電流密度に対してノイズレベルを示したものである。搬送波は 400 MHz であり、交流磁界は印加しなかった。ノイズレベルは振幅変調の側波帯に対応する 400.501 MHz において測定した。電流密度は動作点におけるセンサのインピーダンス、50 Ω 系の特性インピーダンスを考慮し、電流がセンサ素子断面に均等に流れるとして求めたものである。表皮効果が顕在化する条件では、表面付近の実際の電流密度はさらに大きいと考えられる。●はセンサからの出力信号を搬送波抑制回路を通して計測したものであり、▲は搬送波抑制回路においてセンサを除去し、その部分を短絡させた状態でのノイズレベルを示したものである。

Fig. 7 の●をみると、ノイズレベルは電流密度に換算して 7×10^6 A/m² 以下では概ね -125 dBm 程度であり、これは熱雑音に相当すると考えられる。一方 7×10^6 A/m² 以上ではノイズレベルが急速に上昇した。なおセンサのみを除去した Fig. 7 の▲によればノイズレベルは上昇しなかった。このためノイズレベルの上昇はセンサ素子そのものに起因すると考えられる。このように搬送波の振幅を大きくした場

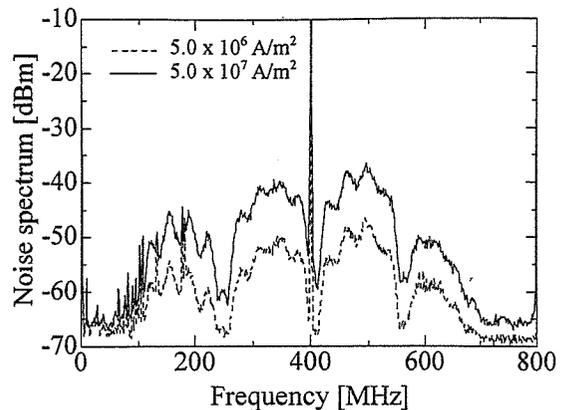


Fig. 8 Noise spectrum of a carrier-suppressing circuit.

合にノイズレベルの上昇が顕在化することからノイズの発生要因は磁性膜の飽和に伴う非線形励振と関係することが示唆される。

Fig. 8 に搬送波抑制回路におけるセンサの出力信号の周波数スペクトルを示す。搬送波周波数は 400 MHz であり、交流磁界を印加しなかった。素子通電電流密度は 5.0×10^6 A/m² と 5.0×10^7 A/m² の場合とした。 5.0×10^7 A/m² の電流密度を流した状態のノイズレベルは 5.0×10^6 A/m² の電流密度を流した状態に比較して、400.501 MHz (振幅変調時の側波帯周波数に相当) において約 12 dB 上昇した。ノイズレベルは使用したアンプの周波数帯域 (300 MHz~600 MHz) の範囲ではほぼ周波数に対して一様に上昇した。なお搬送波の両側の凸状のスペクトルは搬送波抑制回路における多重反射によるものと考えられる。

4.2.2 熱雑音および温度上昇による影響

Fig. 8 よりノイズは 300~600 MHz 帯でほぼ一様に上昇したため、ここでは熱雑音あるいは温度上昇にともなうノイズレベルの上昇との関連性について検討した。Fig. 9 は Fig. 7 のノイズレベルの上昇を熱雑音による上昇と仮定して、等価的な温度に換算したものである。温度とノイズレベルとの関係は(2)式を用いた。

$$P_n = kTB \quad (2)$$

ただし k はボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K), T は絶対温度 (K), B は帯域幅 (Hz) である。

Fig. 9 によれば 6×10^7 A/m² 以下の電流密度では換算温度は概ね室温程度であるが、ノイズレベルが 10 dB 程度増加した 1×10^7 A/m² では温度に換算すると約 4000 K となり非現実的な換算温度となった。従って本稿で議論するノイズレベルの上昇は温度上昇に伴う熱雑音の増加では説明できないと考えられる。

さらに物理的にセンサを冷却および加熱することでノイズレベルが変化するかどうかを実験した。Fig. 10 はセンサを液体窒素により冷却した場合、およびメタルハライドランプにより加熱した場合の実験方法を模式的に示したものである。液体窒素による冷却は Fig. 10 に示すようにアルミニウムの容器に液体窒素を満たし、容器を熱伝導用グリース (Sunhayato 製 SCH-20) を介してセンサと接触させた。なおアルミニウムの容器をのせたことによるセンサのインピーダンス変化は実測で 1 Ω 以下であり、ノイズ上昇による

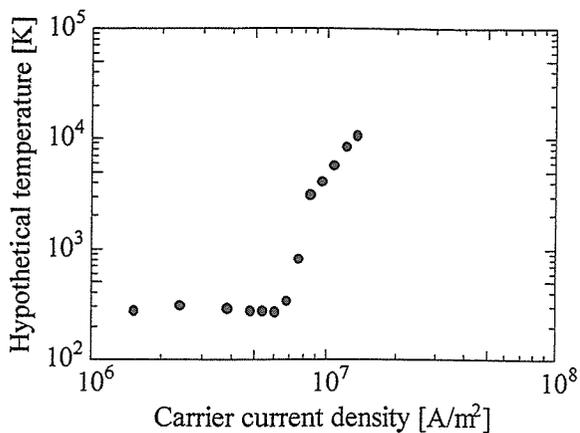


Fig. 9 Thermodynamic temperature dependence of the current density.

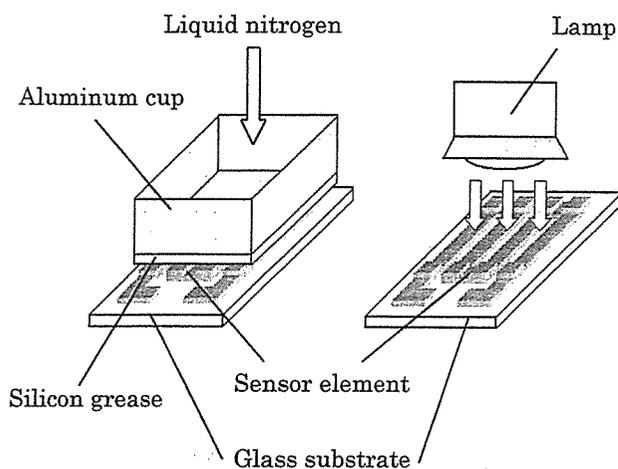


Fig. 10 Experimental model.

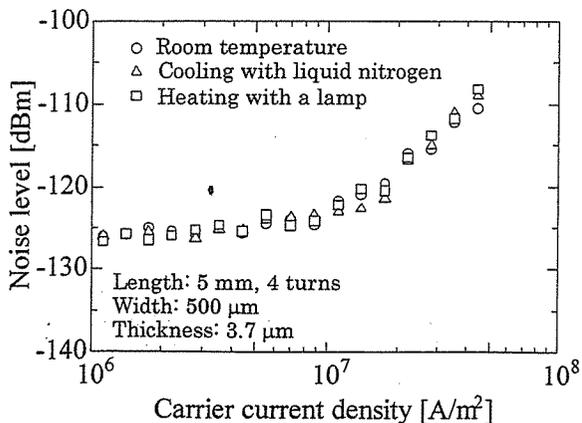


Fig. 11 Noise level dependence of the current density.

変化に比較すると十分小さいことを確認した。またメタルハライドランプ (PHOTRON 製 HVC-SL) をセンサ素子に約 100mm の距離に配置して、センサ素子付近の温度を上昇させた。素子表面の大まかな温度は市販の赤外線反射温度計 (Avio 製 TVS-2200) で測定し、液体窒素によりセンサを冷却した場合のセンサ表面の温度は約 -120°C であり

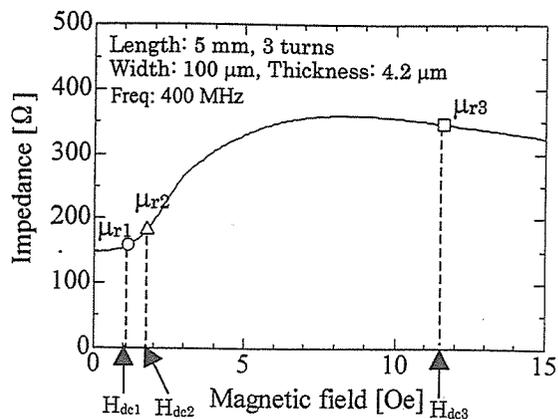


Fig. 12 Impedance of the sensor element.

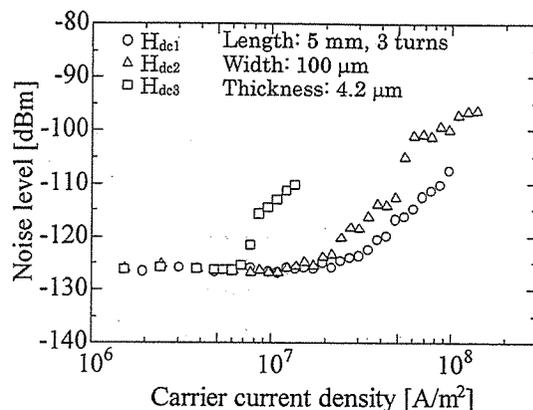


Fig. 13 Noise level dependence of the current density.

メタルハライドランプにより加熱した条件では約 90°C であった。

Fig. 11 は室温、液体窒素による冷却、メタルハライドランプによる加熱をそれぞれおこなった場合における搬送波の電流密度とノイズレベルの関係を示したものである。それぞれの実験時には 5 分間ほど経って定常状態に達したことを確認した。模擬的に温度上昇および冷却を加えた場合でも、ノイズレベルに有意な差は見られなかった。この結果から ±100°C 程度以内の範囲ではノイズレベルの温度依存性は小さいものと考えられる。

4.2.3 センサ素子の比透磁率とノイズレベル

検討対象としているノイズレベルの上昇は搬送波の電流密度を大きくすることにより顕在化するため、その要因は磁性薄膜の磁気的な飽和ともなう非線形現象が寄与していることが考えられる。そのためここでは磁性膜の比透磁率を変化させてノイズレベルの上昇を測定した。これは比透磁率の大きな状態では小さな磁界強度で飽和しやすいと考えられるためである。センサ素子の寸法は短冊幅は 100 μm、隣接する短冊の間隔は 50 μm、磁性膜の膜厚は 4.2 μm、短冊の長さは 5 mm、ターン数は 3 ターンとした。Fig. 12 で示すように異なる 3 点のバイアス点を設定して、それぞれにおけるノイズレベルの上昇を比較した。搬送波周波数は 400 MHz とした。交流磁界は印加しなかった。このセンサ素子は素子幅方向が容易軸であり、バイアス磁界

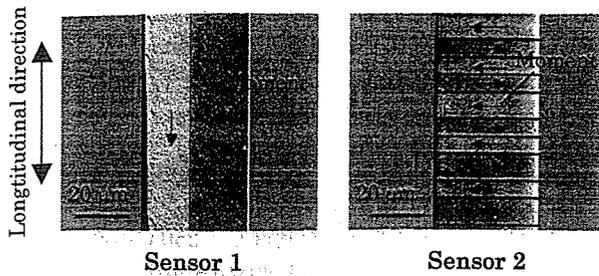


Fig. 14 Domain structure of the sensor element.

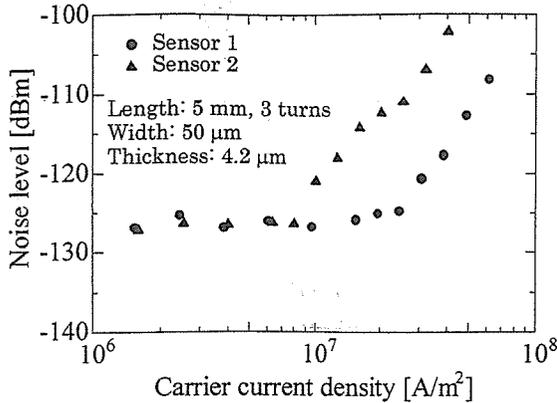


Fig. 15 Noise level dependence of the current density.

が十分小さい場合には幅方向の比透磁率は 1 に近いと考えられる。一方長手方向へのバイアス磁界を大きくするに従い、幅方向へ磁化が回転しやすくなることで、幅方向への比透磁率も増加する。したがって、Fig. 12 における 3 点のバイアス点はセンサ幅方向の比透磁率に換算すると $\mu_{r1} < \mu_{r2} < \mu_{r3}$ となっていると考えられる。この 3 点のバイアス磁界において、通電電流の増加に伴うノイズレベルの上昇を測定した。

Fig. 13 に Fig. 12 の 3 点のバイアス点におけるノイズレベルと搬送波の電流密度の関係を示す。400.501 MHz (振幅変調時の側波帯周波数に相当) におけるノイズレベルを測定した。グラフ内の○は H_{dc1} , △は H_{dc2} , □は H_{dc3} にそれぞれ対応している。Fig. 13 より、ノイズレベルは素子幅方向の比透磁率が大きいほど上昇しやすいことがわかり、センサ素子の磁化しやすさとノイズレベルは明確に対応した。これは容易に飽和する磁化状態のセンサ素子ほどノイズレベルが上昇することを示唆している。

4.2.4 素子の磁区構造とノイズレベル

磁区構造とノイズレベルとの関係を検討した。Fig. 14 は長手方向に異方性を誘導したセンサ素子 (センサ 1) と幅方向へ異方性を誘導したセンサ素子 (センサ 2) についての磁区写真をカー効果顕微鏡 (NEOARK 社製 BH-780IP) を用いて観察したものである。センサ素子の寸法は短冊幅は 50 μm 、隣接する短冊の間隔は 50 μm 、磁性膜の膜厚は 4.2 μm 、短冊の長さは 5 mm、ターン数は 3 ターンとし、写真の上下が短冊長手方向である。搬送波周波数は 400 MHz とし、交流磁界は印加しなかった。

Fig. 15 は上記のセンサ素子についての 400.501MHz (振幅変調時の側波帯周波数に相当) におけるノイズレベルの

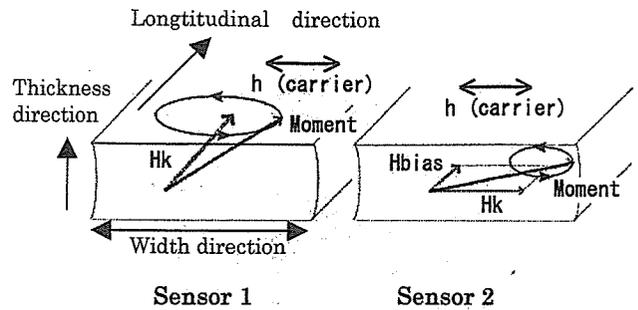


Fig. 16 Moment model.

上昇を示した。センサ 1 へのバイアス磁界は 0 Oe とし、センサ 2 へのバイアス磁界は約 4.5 Oe とした。これにより素子幅方向の比透磁率 (微小振幅の範囲) はほぼ一致させる条件に設定した。Fig. 15 によれば長手方向に磁化が向いている状態のほうが幅方向に磁化が向いている状態に比べてノイズレベルの上昇が抑制された。

Fig. 16 はセンサ 1 とセンサ 2 において、搬送波周波数の磁界による磁化の応答を模式的に示したものである。センサ 1 では磁化が主として長手方向へ向いているため搬送波による発生磁界により磁化は幅方向へ歳差運動をする。一方センサ 2 では容易軸方向から長手方向へ磁化が傾いた状態を安定状態とし、そこから素子幅方向へ歳差運動をする。センサ 1 とセンサ 2 の歳差運動を比較すると、大きな搬送波周波数の磁界が印加された場合には、センサ 2 のように安定方向が幅方向へ向いている状態の方が、飽和しやすいものと考えられ、これによりセンサ 2 よりもセンサ 1 の方がノイズレベルの上昇が抑制されると考えられる。

4.3 SN 比を高めるためのセンサ素子および微小磁界計測

以上の検討からノイズレベルの上昇を抑制するための条件として、短冊幅方向の比透磁率が低いこと、および磁化が短冊幅方向へ飽和しにくい構造とすることが効果的であることが実験的に明らかになった。一方側波帯強度を大きくするためには、センサ素子の中の一定面積以上は幅方向への容易軸が付与されていることが必要である。そこで主として電流が集中し、磁性膜が磁的に飽和しやすい短冊幅方向の端部では長手方向へ容易軸が付与し、中央部では短冊幅方向へ容易軸が付与される構造を提案した。熱処理温度を制御することで所望の磁区構造を有するセンサ素子を試作した。

Fig. 17 は上記の磁区構造を有するセンサ素子の磁区写真である。このセンサ素子は熱処理温度 250°C で静磁界中熱処理を行ったものである。センササイズは短冊幅 50 μm 、間隔 50 μm 、膜厚 4.2 μm 、長さ 5 mm、ターン数は 3 ターンである。短冊中央部においては素子幅方向へ磁化容易軸が付与され、短冊幅方向端部では長手方向へ容易軸を還流磁区として形成した。

Fig. 18 に試作したセンサ素子のノイズレベルおよび側波帯と搬送波の電流密度依存性を示す。●▲は Fig. 17 のセンサであり、○△は比較のために、400°C で静磁界中熱処理をして、幅方向へ容易軸を付与したセンサ素子である。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。側波帯は幅方向へ容易軸を付与したセンサと比較して、Fig. 17 のセンサの方が大きくなった。一方ノイズレベ

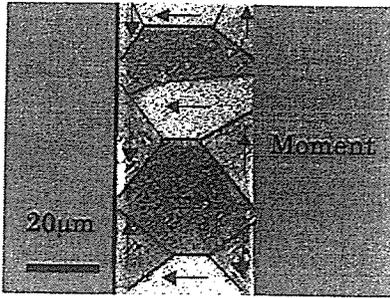


Fig. 17 Domain structure of the sensor element.

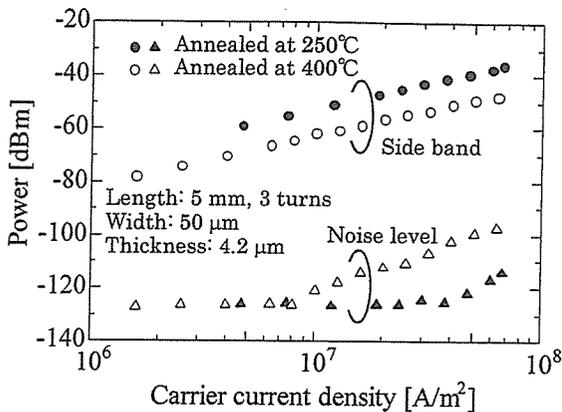


Fig. 18 Signal level and noise level dependence of the current density.

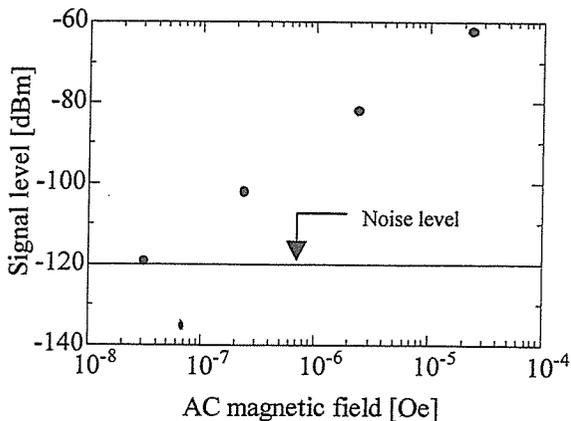


Fig. 19 Signal level dependence of the ac magnetic field.

ルは Fig. 17 のセンサにおいて幅方向へ容易軸を付与した場合よりも抑制された。このことからセンサ素子の中央において幅方向の容易軸を持つ磁区と、幅方向の端部に長手方向に容易軸を有する磁区を作成することで信号強度（側波帯）を大きくしつつ、ノイズレベルを低減することを両立可能であることを示した。

Fig. 19 は 4.3 で試作したセンサ素子について搬送波抑制回路を用いて、SN 比が最大となるときの交流磁界（501 kHz）と側波帯レベルのグラフである。側波帯レベルがノイズフロアに埋もれる時の磁界信号強度がこのセンサ素子

の磁界検出分解能となる。このとき磁界検出分解能は $3.4 \times 10^{-8} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$ ($2.7 \times 10^{-6} \text{ (A/m)/Hz}^{1/2}$) を得た。

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膜の熱処理温度を変化させることでセンサ素子の異方性を制御し、250°Cの熱処理温度において $190 \text{ } \Omega/\text{Oe}$ ($2.39190 \text{ } \Omega/(\text{A/m})$) のインピーダンス変化率を得た。
2. 搬送波強度の増大に伴って、ノイズレベルが上昇すること、およびノイズレベルが電流密度に換算して 10^7 A/m^2 付近以上で上昇することを示した。ノイズレベルの上昇は比透磁率および磁区構造に明確に対応することを実験的に示した。大振幅励磁による磁化の飽和による非線形応答を抑制することができればノイズレベルの上昇が抑制可能との知見を得た。
3. 上記の知見に基づき、熱処理によりセンサ素子の磁区構造を制御し、信号強度（側波帯）の増大およびノイズレベル上昇の抑制を両立可能であることを示した。試作したセンサで 501 kHz の交流磁界を $3.4 \times 10^{-8} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$ ($2.7 \times 10^{-6} \text{ (A/m)/Hz}^{1/2}$) の磁界検出分解能で測定した。

なお本報告で検討したノイズレベルの上昇の発生要因はカオスであると考えられ、その発生メカニズムについての詳細な検討は稿を改めて報告する。

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。マスクは東北大学ベンチャービジネスラボラトリー(VBL)のパターンジェネレータを使用しました。

References

- 1) A. Takayama, T. Umehara, A. Yuguchi, H. Kato, K. Mohri, T. Uchiyama: "Field Detection Characteristics of Differential Magnetic Sensor Using Integrated Thin-film MI Sensor Heads", *J. Magn. Soc. Jpn*, **24**, 763 (2000).
- 2) S. Yabukami, T. Suzuki, N. Ajiro, H. Kikuchi, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: "A High Frequency Carrier-Type Magnetic Field Sensor Using Carrier Suppressing Circuit", *IEEE Trans. Magn*, **37**, 2019 (2001).
- 3) M. Takezawa: Doctoral dissertation of Tohoku University, p. 216 (1999).
- 4) K. Hiramatsu: *Tsushin houshiki* (in Japanese), (Koronasha, 1985)
- 5) H. Mawatari, H. Kikuchi, S. Yabukami, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: "High-Frequency-Carrier Type Thin Film Magnetic Field Sensor for AC Detection", *J. Magn. Soc. Jpn*, **27**, 414 (2003).

2005年10月20日受理, 2006年1月16日採録

Development of Wireless Magnetic Multi-position Detecting System Using FFT Analysis

M. Toyoda, S. Hashi, S. Yabukami*, M. Ohya, K. Ishiyama*, Y. Okazaki, K. I. Arai*

Faculty of Engineering Gifu University, 1-1 Yanaino, Gifu 501-1193, Japan

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

A wireless multi-position detecting system using three *LC* resonant magnetic markers was developed and demonstrated. The markers were given individual resonant frequencies of 183 kHz, 487 kHz, and 730 kHz, respectively. The new measuring technique described in this paper was applied to the system in order to reduce the acquisition time: the markers were excited by a superposed wave corresponding to the resonant frequencies, while the voltage signals induced through the pickup coils are separated into each frequency spectrum by *FFT* analysis. Regardless of the number of markers, the necessary voltage amplitude of each frequency spectrum can be obtained easily at the same time. Thus, our proposed system can detect multiple markers at a time. All the positional accuracies of the three markers are less than 5 mm within 100 mm of the pickup coil array.

Key words: multi-position detecting, *LC* resonant magnetic marker, wireless sensing, *FFT* analysis

複数 LC 共振型磁気マーカを用いた多点位置検出システム

豊田征治, 栢修一郎, 藪上信*, 大矢雅志, 石山和志*, 岡崎靖雄, 荒井賢一*

岐阜大学工学部, 岐阜市柳戸 1-1 (〒501-1193)

*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

これまでにモーションキャプチャに代表される 3 次元空間内における物体の位置や方向を計測する手法については、様々な方式が考案され実用化されている^{1) - 5)}。しかしながら検出対象物が光学的に遮蔽された空間に存在し、貼付するマーカへの配線が困難または望ましくないような状況下で高精度な計測を行う方式はほとんど見あたらない。そこで著者らは、このような状況に対応可能な、*LC* 共振型ワイヤレス磁気マーカ (以下、*LC* マーカと呼ぶ) を用いた位置・方向検出手法を提案し検討を行っている。この方式で用いるマーカは配線およびバッテリーの搭載が不要なため小型化が可能であり、また *LC* マーカに異なる共振周波数を個別に設定することで多点計測が可能となるため、例えば、指先など生体の複雑な動きを正確に捉える用途に適している。具体的な応用例として仮想空間内における入力デバイスが挙げられる。これは、指先に添付したマーカの位置を検出し各指先の動きをトレースすることで、仮想的なキーボード操作を可能にするものである。この例では、指の動きによってマーカがセンサの死角に入る場合が

考えられる。また指の自然な動作を妨げないように、マーカは小型・軽量で駆動のための配線が無いことが望ましいと言える。Table 1 は本論文で試作したシステムと他のシステムとの仕様を比較できるようにまとめたものである。本システムに比べて他のシステムでは以下のような問題点が挙げられる。同じ交流磁気式ではマーカに配線が必要であること、永久磁石を用いた直流磁気式ではマーカ数が 2 個までに限られ、また地磁気の影響を受け易いこと、光学式についてはマーカがカメラの死角に入った場合や背景に対してマーカのコントラストが十分得られない場合には検出不可能になること、多点計測の際に全てのマーカの動きを視認できる位置にビデオカメラを配置する必要があるため設置位置の自由度が少ないことが挙げられる。しかし、*LC* マーカを用いたシステムではこれらの問題を解決可能であると考えられる。我々はこれまでに、この手法を用いたシステムを試作し、100 mm 立方の空間内に配置した 1 個の *LC* マーカの位置および方向を、計測速度 1 Hz 程度、相対位置精度 2 mm 以下で検出可能であることを示してきた^{6) - 8)}。

Table 1 Specification comparison of proposed system with other system.

	This paper	AC magnetic	DC magnetic ¹⁾	Optical
System	LC resonant magnetic marker / Pickup coil	AC magnetic field source 3-axial magnetic sensor	Permanent magnet Hole sensor	Luminescent, Color contrast Video camera
Wired/Wireless	Wireless	Wired	Wireless	Wireless
Detectable range	50-100 mm	≤ 760 mm	≤ 50 mm	≤ 30 m
Position accuracy	5 mm cubic	0.76 mm cubic	0.3 mm cubic	range / 1,000
Detection speed	1 Hz (3 Hz)*1	120 Hz	100 Hz	60 Hz
Number of markers	≥ 3*2	≤ 16	≤ 2	≤ 64

*1 Under a sufficient number of instruments and CPUs, *2 Under consideration.

今回、著者らはこのシステムを更に発展させ、複数の LC マーカの位置および方向を同時に検出するシステムを試作し、多点計測に関する基礎検討を行った。本論文に示すシステムの特徴は、個々の LC マーカに異なる共振周波数を設定することによって各マーカを同時かつ個別に検出できる点である。このために、LC マーカに印加する励磁磁界に複数の周波数成分を重畳した重畳励磁波を用いた。また、磁界検出コイルの誘起電圧の測定には高速サンプリングが可能なデジタイザを用いて誘起電圧波形を取得し、得られた波形データを FFT 解析することにより個別の周波数成分に分離して電圧振幅を得る方式を採用するなど、計測系の見直しを行った。更に、過去に報告されている永久磁石をマーカに用いた直流磁気式⁹⁾に対する優位性を示すため、3 個の LC マーカを用いた同時検出についての検討を行った。その結果、Table 1 に示すように、検出コイルアレイから 50~100 mm の範囲を 5 mm 立方以内のばらつきで 3 個のマーカを同時検出可能であることが明らかとなった。以下にその詳細を報告する。

2. システムの構成と位置検出原理

2.1 システムの構成

構築したシステムの模式図を Fig. 1 に示す。直径 210 mm のテフロン製ボビンに巻かれた励磁コイル（線径 0.26 mm×10 回巻き）と、直径 25 mm のアクリル製ボビンに巻かれた 25 個の検出コイル（線径 0.1 mm×50 回巻き）が 45 mm 間隔で 5×5 のマトリクス状に配置されている検出コイルアレイを 150 mm の間隔且つ励磁コイルおよび検出コイルアレイ中心に配置した検出コイルの中心軸が一致するように対置している。また、各検出コイルはスイッチモジュールを介して誘起された電圧波形を計測するためのデジタイザに接続されている。これに加えて、励磁波を生成するための任意波形発生装置およびパワーアンプと、システム全体を制御し LC マーカの位置を算出するためのパソコンから成る。今回使用したデジタイザは 2 系統の入力端子を有しているため、スイッチモジュールを 2 台用いて、それぞれに 13 個と 12 個の検出コイルを割り当て、同時に 2 個ずつの検出コイルの電圧測定を行うことが可能である。

外部磁界による駆動が可能な LC 共振型磁気マーカを Fig. 2 に示す。直径 3 mm、長さ 10 mm のフェライト磁心 (TDK 製 PC40, Mn-Zn フェライト, $\mu_r = 2,300$, $B_s = 0.51$ T) に施した 335 回の巻線の両端にチップコンデンサが接続されている。これよりマーカ自身が LC 共振回路を構成している。また今回作製した LC マーカ 3 個の仕様を Table 2 に示す。各マーカはコイル巻数とコンデンサ容量によって共振周波数を変化させているが、サイズは全て Fig. 2 に示すように、直径 4 mm、長さ 10 mm、重さは 0.64g 程度である。また LC マーカは、Fig. 1 に示すような座標系を設定し、非磁性、非金属の台座によって検出空間内に、1 mm 程度の設置精度で配置した。

2.2 誘起電圧計測方法

検出空間内に配置された LC マーカの位置と方向を求めるには、LC マーカから発生される誘導磁界を検出コイルによって測定する必要がある。しかし、LC マーカを駆動するための励磁磁界と LC マーカの発する誘導磁界は同じ周波数成分を持つため、直接測

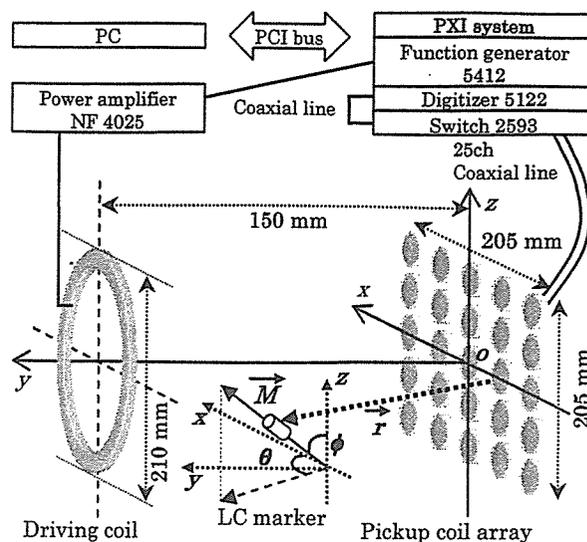


Fig. 1 Schematic diagram of the system.

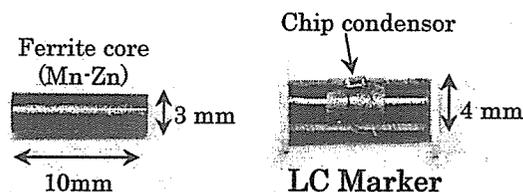


Fig. 2 Shape of the LC resonant magnetic marker.

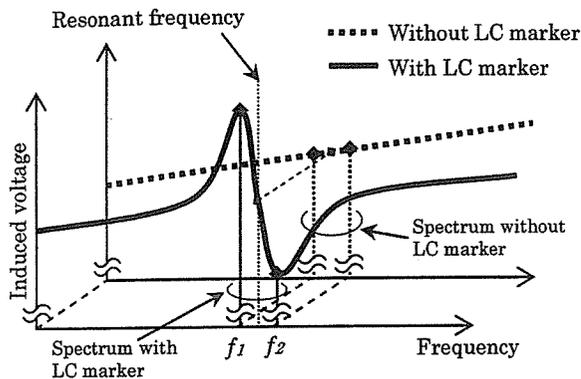
定することは困難である。しかし、以下の手順を経ることで間接的に測定することが可能である。

検出コイルに誘起される電圧について、検出空間内の LC マーカの有無に対する LC マーカ共振周波数付近の周波数特性を Fig. 3 (a) に示す。また両者の差分をとった結果を Fig. 3 (b) に示す。これらが共振周波数の前後に極値を持つのは、励磁磁界に対して誘導磁界の位相が大きくずれるためである。このピーク-ピーク電圧が LC マーカの発する磁界強度に比例することから、本論文ではマーカ寄与電圧 V_{MK} と定義し、検出コイル毎の V_{MK} を用いて、2.3 で述べる算出原理に基づいて位置および方向を求めている。しかし、Fig. 3 (b) に示すようにマーカ 1 個につき 2 点の周波数 (f_1, f_2) の電圧計測を行う必要があり、電圧計測器として DMM (Digital Multi-Meter) を用いた以前のシステムでは⁷⁾、マーカ個数の増加に伴って測定周波数を切り替える回数が増加し、計測速度の低下が懸念される。Fig. 4 は、3 個の LC マーカの V_{MK} を測定する場合の周波数特性の概略図である。3 個の場合、各 LC マーカの共振周波数前後の $f_1 \sim f_6$ についての電圧を計測し V_{MK} を得る必要がある。

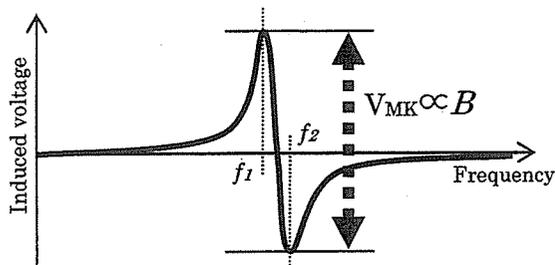
そこで、必要な複数の周波数成分を重畳させた重畳波 (PC 上で作成) でマーカの励磁を行い、高速サンプリングが可能なデジタイザで誘起電圧波形を測定し、PC 上で FFT 解析を行うことで各周波数成分のスペクトル強度として電圧振幅を得る手法を用いた。これにより LC マーカの数に依存せず同時に複数の周波数成分の電圧測定が可能となる。Fig. 3 (a) にその概念図を示す。また、FFT

Table 2 Specifications of LC markers.

	Marker 1	Marker 2	Marker 3
Resonant frequency (kHz)	183	487	730
f_1 (kHz)	182	481	720
f_2 (kHz)	185	492	740
Diameter of core (mm)	3	3	3
Coil turns	335	335	280
Condensator (pF)	680	68	33
Inductance (μH)	1026	1598	1546
Quality factor	59	27	27



(a) Influence on the induced voltage of the LC marker, and amplitude spectrum after FFT



(b) Marker's contribution voltage
Fig. 3 Background and marker's contribution.

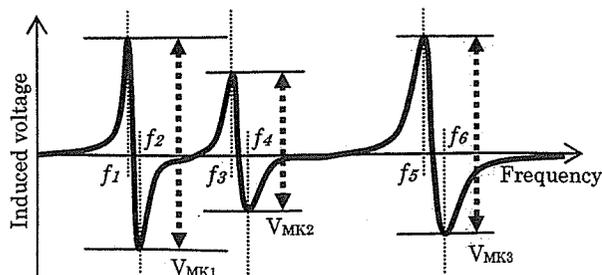


Fig. 4 Marker's contribution voltage when three markers are detected.

解析後のスペクトルの周波数分解能はデジタイザのサンプリング周波数とサンプリング数に依存するが、サンプリング数が増えるとFFT解析にかかる時間が増加する。一方、本論文のシステムではスイッチの切り替えおよびその安定までの待機時間が必要なため、FFTの計算にかかる時間はスイッチが安定するまで十分待機

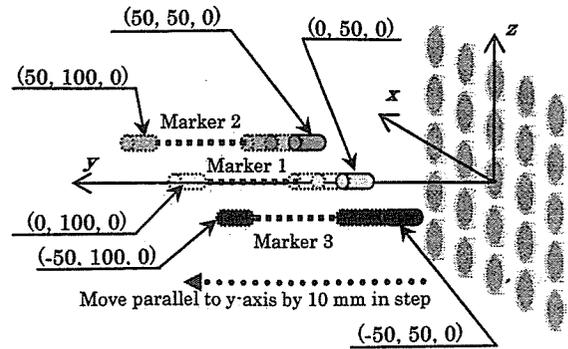


Fig. 5 Arrangement of the markers and pick-up coil array.

できる時間と同程度になるよう検討した結果、サンプリング数を50,000個とした。これに対しFFT解析の周波数分解能が1kHzになるように、サンプリング周波数を50MHzとした。

2.3 位置算出原理

本研究ではLCマーカから発生する誘導磁界をダイポール磁界に近似できると仮定して、式(1)~(3)からマーカの位置および方向を算出し、Gauss-Newton法¹⁰⁾により最適化を行った。

$$S(\vec{p}) = \sum_{i=1}^n |\vec{B}^{(i)}_{meas} - \vec{B}^{(i)}_{cal}(\vec{p})|^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (1)$$

$$\vec{B}^{(i)}_{cal}(\vec{p}) = \frac{1}{4\pi} \left\{ -\frac{\vec{M}}{r_i^3} + \frac{3(\vec{M} \cdot \vec{r}_i) \cdot \vec{r}_i}{r_i^5} \right\} \quad (2)$$

$$\vec{p} = (x, y, z, \theta, \phi, M) \quad (3)$$

ここで $S(\vec{p})$ は評価関数、 n は検出コイルの数、 i は検出コイルの番号(1~25)、 $\vec{B}^{(i)}_{meas}$ は検出コイル*i*における磁束密度の測定値、 $\vec{B}^{(i)}_{cal}$ はダイポール磁界を考慮した検出コイル*i*における磁束密度の理論値、 \vec{r}_i は検出コイル*i*の中心からマーカまでの位置ベクトル、 \vec{M} はマーカの磁気モーメント、 θ は xy 平面に射影したモーメントの方向ベクトルと x 軸とのなす角、 ϕ はモーメントの方向ベクトルと z 軸とのなす角(Fig. 1参照)、 \vec{p} はマーカのパラメータにより構成されるベクトル量である。

3. 実験結果および考察

3個のLCマーカ(1~3)をFig. 5のように x 軸と平行な直線上に並べ、10mm刻みで $50 \leq y \leq 100$ の範囲の各位置において100回ずつマーカの位置・方向の検出を行った。各LCマーカはマーカのコイル部の中心軸と励磁コイルおよび検出コイルの中心軸が平行($\theta = 90^\circ$, $\phi = 90^\circ$)になるように設置した。なお、LCマーカの実際の設置座標は検出コイル側のマーカ端面の中心を基準とした。

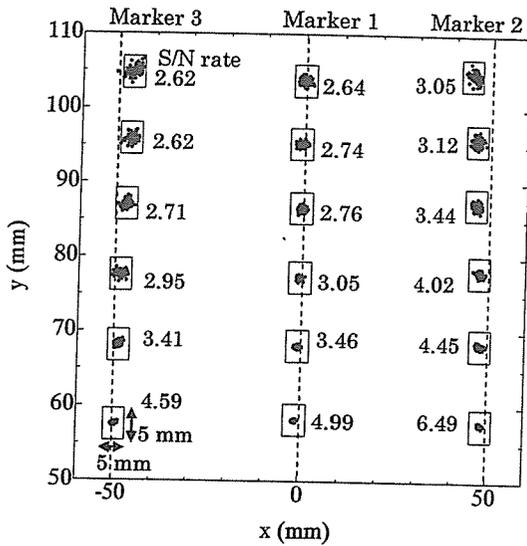
Fig. 6は、検出の結果を(a) xy 平面、(b) yz 平面から見たものである。各検出位置におけるLCマーカの信号対雑音比(S/N比)を数値で示した。なお、このS/N比は各検出コイル25個のS/N比の二乗和平均値で算出しており、本システムのノイズレベルは30μV程度であった。Fig. 6より、どの位置でも検出位置のばらつきはおよそ5mm立方以内となった。標準偏差で評価した検出位置のばらつきとS/N比の関係を図7に示す。図から、S/N比が低

い位置ではばらつきが大きくなることが分かる。S/N 比が1桁台にもかかわらず検出位置のばらつきがこの程度に収まっているのは、マーカとの距離が比較的近い検出コイルのS/N 比は高いが、全体としてはS/N 比が低いものが多いためである。

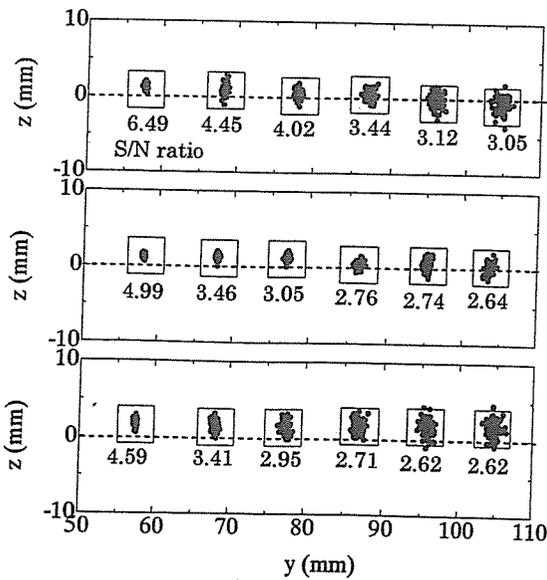
また Fig. 6 (a)より、検出コイルからの距離が大きくなるにしたがって、マーカ2 およびマーカ3 の検出位置が徐々に中心へずばんでいくことが分かる。実際の LCマーカの設置位置には1 mm 程度の不確定さがあるが、このずれはそれを超えているため、S/N 比の低い検出コイルの配置に原因があるのではないかと考えた。そこで、マーカ2 を座標 (50, 100, 0)に配置したときの実測データからS/N 比がそれぞれ3 および5 以下となる検出コイルの配置を調べ、各検出コイルのデータを式(2)より求められるダイポール磁界がつくる理論値に置き換えて位置算出を行い、実測値のみの場合と比較した結果を Fig. 8 に示す。これよりS/N 比の低い検出コイルのデータを理論値に置き換えることで、算出位置が実際のマ

ーカ設置位置に近づくことがわかる。また Fig. 9 に、マーカ2 の設置位置がそれぞれ(a) (50, 50, 0), (b) (50, 100, 0)のときの各検出コイルのS/N 比の分布を示した。Fig. 9 (a) に示すように、マーカが検出コイルアレイに対して比較的近い位置にある場合はマーカに近い検出コイルのS/N 比が高いため、S/N 比の低い検出コイルの影響を受けにくい。Fig. 9 (b) ではS/N 比が最大のもので30 程度しかなく、更にS/N 比の低い検出コイルがマーカから見て右よりに偏っていることがわかる。以上のことから、S/N 比が全体的に低く、またS/N 比が5 以下の検出コイルがアレイの片側に偏って存在するような場合にはマーカの検出位置への影響が大きくなるものと思われる。なお、Fig. 9 に示すS/N 比について、検出コイルアレイに対する LC マーカの配置や姿勢角によって、マーカの発する磁界ベクトルの検出コイルへの鎖交状況は大きく変化するため、単純にマーカと検出コイルの距離に対応した値にはならず、ある一定の距離を境に検出コイル裏側から回りこんで鎖交する磁界ベクトルの影響も考慮する必要がある。

また、検出にかかった時間を Fig. 10 に示す。検出コイル 25 個



(a) x-y plane



(b) y-z plane

Fig. 6 Calculated position and S/N ratio of each position.

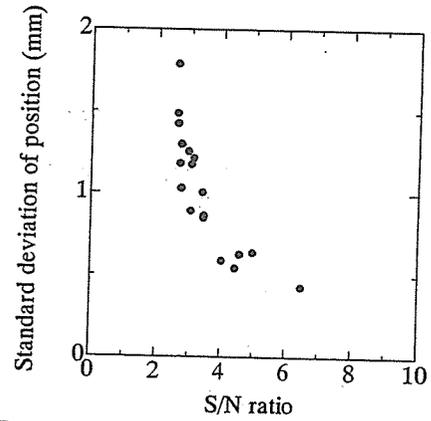


Fig. 7 Position unevenness as a function of the S/N ratio.

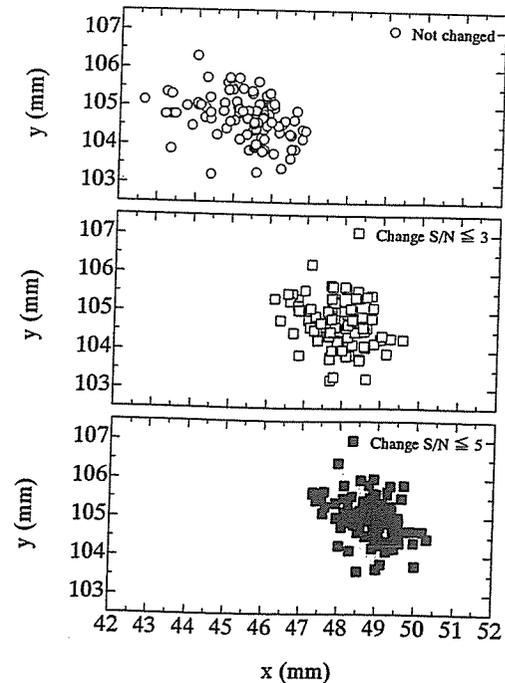


Fig. 8 Position calculated by changing V_{MKS} which have low S/N ratios to theoretical values.

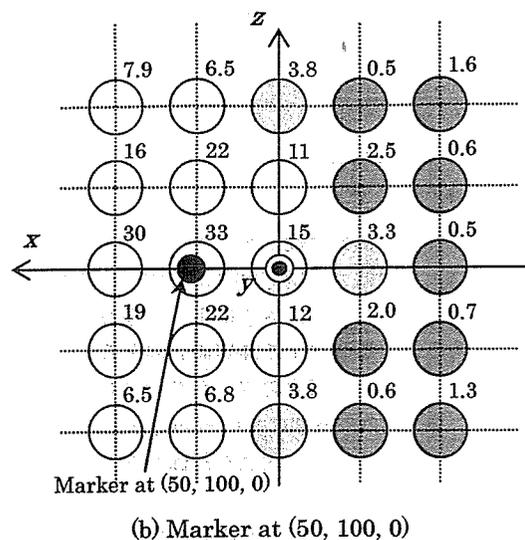
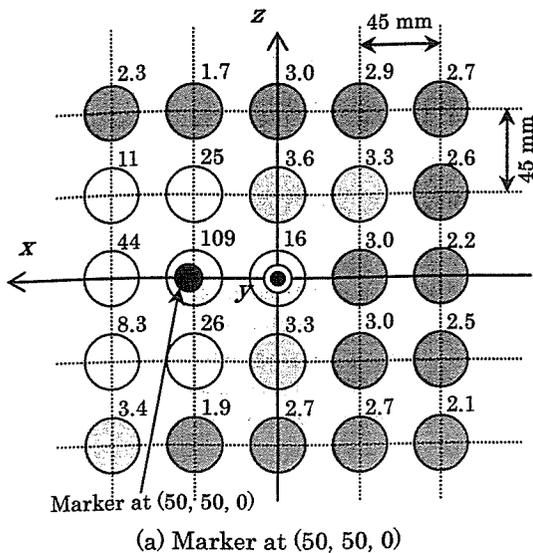


Fig. 9 S/N ratio of each pickup coil (S/N ratio of light grey coils ≤ 5 , dark grey coils ≤ 3).

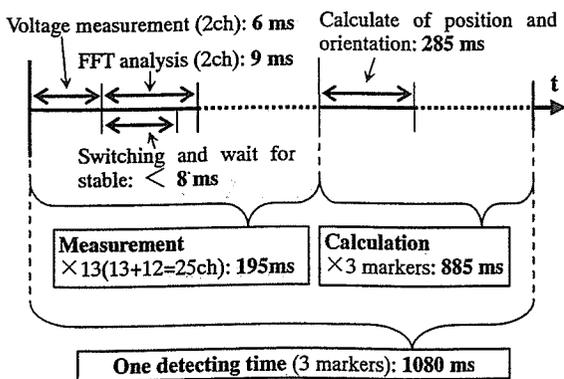


Fig. 10 An acquisition time chart for the motion of the marker.

分の電圧計測およびFFT変換に195 ms, 位置算出に3個で885 ms (1個のマーカあたり295 ms), 1回の検出あたりで1080 ms, 検出速度としておよそ1 Hz という結果を得た。ただし, 計測器を各検出コイル分, また算出用CPUを各LCマーカ分用意すること

で, 検出にかかる時間は1chの電圧測定にかかる15 msとマーカ1個にかかる295 msの和の310 msとなり, 検出速度にして3 Hz程度が実現可能である。位置算出アルゴリズムの最適化によって更なる高速化が可能であると考えられる。また一度に検出可能なマーカの数については, 現時点では詳細な検討を行っておらず今後の課題であるが, マーカ共振回路の性能指数や検出コイルの周波数特性について検討を行うことで更に増やすことが可能である。

4. まとめ

重畳励磁波とデジタイザを用いたFFT解析による複数のLCマーカの位置検出手法を提案し検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 3個のLCマーカの位置検出を行った結果, 検出コイルアレイから50~100 mmの範囲で検出位置は5 mm立方程度のばらつきであった。
- (2) 3個のLCマーカの位置を検出するのに要する時間は1080 msで測定速度にするとおよそ1 Hzであった。その内訳は電圧計測に195 ms, 3個のLCマーカの位置算出に885 msであった。
- (3) LCマーカをある特定の領域に配置したとき, S/N比が低い検出コイルが検出コイルアレイ中に偏って分布し, 実際のマーカの位置よりも数mm程度ずれて検出されることがわかった。

謝辞 本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構の「産業技術研究助成事業」(プロジェクトID:03A47063a)により行った。また本研究の一部は総務省の「戦略的情報通信研究開発制度」(5E5番126号)の助成により行った。

References

- 1) F. R. Raab, E. B. Blood, T. O. Steiner, and H. Jones, *IEEE Trans. Aero. Electro.*, AES-15, 709 (1979).
- 2) S.V. Marshall, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, VT-27, 65 (1978).
- 3) W.M. Wynn, C.P. Frahm, P.J. Carroll, R.H. Clark, J. Wellhoner, M.J. Wynn, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-11, 701 (1975).
- 4) J. E. Mcfee, Y. Das, *IEEE Trans. Antennas and propagation*, AP-29 282 (1981).
- 5) N. M. Prakash and F. A. Spelman, *Proc. 19th Inter. Conf. IEEE/EMBS*, 2394 (1997).
- 6) S. Yabukami, S. Hashi, Y. Tokunaga, T. Kohno, K. I. Arai, and Y. Okazaki, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 28, 877 (2004).
- 7) Y. Tokunaga, S. Hashi, S. Yabukami, T. Kohno, M. Toyoda, T. Ozawa, Y. Okazaki and K. I. Arai, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 29 153 (2005).
- 8) S. Hashi, Y. Tokunaga, S. Yabukami, T. Kohno, T. Ozawa, Y. Okazaki, K. Ishiyama and K. I. Arai, *J. Magn. Magn. Mater.*, 290-291, 1330 (2005).
- 9) S. Yabukami, H. Kikuchi, M. Yamaguchi, K.I. Arai, A. Itagaki and N. Wako, *IEEE Trans. Magn.*, 36, 3646 (2000).
- 10) T. Nakagawa, Y. Koyanagi, *Experimental Data Analysis by the least square method*, (in Japanese) p. 95, (The University of Tokyo Press, Tokyo, 1982).
- 11) S. Yabukami, K. Arai, H. Knetaka, S. Tsuji, K.I. Arai, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 28, 711 (2004).

2005年10月19日受理, 2006年2月21日採録

Wireless Magnetic Motion Capture System for Multi-Marker Detection

Shuichiro Hashi¹, Masaharu Toyoda¹, Shin Yabukami², Kazushi Ishiyama², Yasuo Okazaki¹, and Ken Ichi Arai²

¹Department of Materials Science and Technology, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

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

A wireless multi-motion capture system using five LC resonant magnetic markers has been developed and is demonstrated. Each marker has an individual resonant frequency, 157, 201, 273, 323, and 440 kHz, respectively. A new measuring technique is applied in order to reduce the acquisition time. In this new technique the markers are excited by a superposed wave corresponding to the all resonant frequencies, while the voltage signals induced through pick-up coils are separated in a frequency spectrum by FFT analysis. Regardless of the number of markers, the voltage amplitude for each resonant frequency can be easily obtained simultaneously and thus the proposed system can detect multiple markers. The positional accuracy for five markers is less than 2 mm within 100 mm of the pick-up coil array.

Index Terms—FFT analysis, LC resonant magnetic marker, multi-marker, wireless motion capture system.

I. INTRODUCTION

WIRELESS motion capture for multi-point detection at close range is a candidate technique for virtual input devices or medical treatment applications. In such applications, particularly for measurements of the motion of fingers, the markers used must be small and free from electric wiring to allow normal motion. In addition, the location and orientation of the markers must be known exactly during the measurement. Furthermore, if a dead angle is likely to occur, an optical method is unfavorable. There have been several investigations into determining the position of a magnetic object by measuring its magnetic field [1]–[6]. However, conventional systems require a comparatively large magnetic object as a marker or the marker must contain electric wiring, in order to obtain a high SN ratio for the magnetic signal from the marker. To address this, we have proposed and developed a wireless magnetic motion capture system using a magnetically-coupled LC resonant marker [7], [8]. The small sized marker uses a soft ferrite core with a coil, representing a minimal LC circuit with no battery, driven wirelessly by electromagnetic induction. The magnetic signal of the marker is detected by a matrix-designed pick-up coil array. Our proposed system allows the approximate orientation and the position of a single marker to be determined accurate to within 1 mm in a space 150 mm from the pick-up coil array. It also allows multi-point detection because the system allows the use of several markers with individual frequencies. In this paper, we extend our system to detect multiple markers and we examine the accuracy of the system in detecting the positions and orientations of the markers.

II. COMPONENTS AND MEASURING METHOD OF THE SYSTEM

Fig. 1 shows a schematic diagram of the motion capture system for multi-marker detection. The system is composed of measurement instruments and a coil assembly, consisting of a

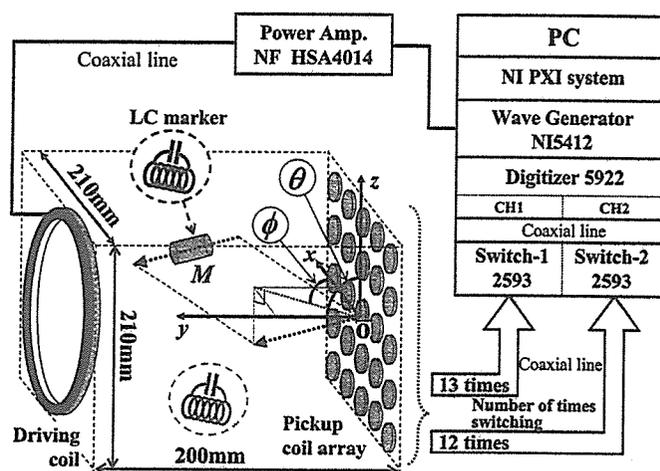


Fig. 1. Schematic diagram of the proposed wireless motion capture system for multiple markers.

driving coil, LC markers, and a pick-up coil array. The marker consists of a Ni-Zn ferrite core (3 mm in diameter and 10-mm long) with a wound coil and a chip capacitor, representing an LC series circuit designed for resonant frequencies of 157, 201, 273, 323, and 440 kHz. The pick-up coil array consists of 25 coils placed at intervals of 45 mm on an acryl board, configuring a matrix layout. Each coil is made of 40 turns of polyester enameled copper wire (PEW) around an acryl bobbin 25 mm in diameter. An excitation of 22 V is applied to the driving coil (10 turns of PEW around the Teflon coil, 200 mm in diameter) and the markers are strongly excited at their resonant frequency by electromagnetic induction. However, the system becomes slow with an increase in the number of markers, owing to time required to switch frequencies and make multiple measurements. In this paper, a new signal measurement method is adopted to increase the system speed. All the markers are excited simultaneously by a superposed wave corresponding to all the resonant frequencies of the markers. As shown in Fig. 2, the induced wave measured by the pick-up coil is analyzed into a frequency spectrum by FFT analysis. First, the spectrum is measured without the markers and then the spectrum is

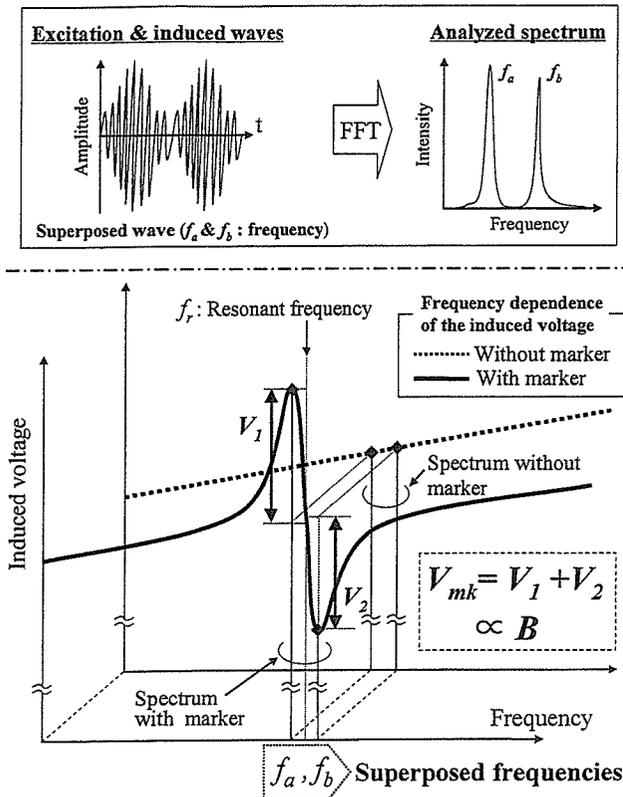


Fig. 2. Signal of LC marker acquisition technique (superposed wave excitation and FFT analysis).

measured with the markers. The induced voltages of the marker contributions, V_{mk} , can be obtained by subtracting as vectors the amplitude of the spectrum without the markers from the amplitude of the spectrum with the markers. The amplitudes V_{mk} measured by each pick-up coil are different from each other and proportional to the flux densities B that the markers produce at the location of the pick-up coils. The position and orientation of each marker is obtained by solving an inverse problem. However, several values (25 values in our study) of the flux density at a known location specify the magnetic flux source. To solve this problem, the generated flux density from a marker is considered to be a magnetic dipole field. Under this assumption, the position and orientation of a marker are calculated using the nonlinear method of least squares by the Gauss-Newton method [9]

$$S(\vec{p}) = \sum_{i=1}^n \left| \vec{B}_{\text{meas}}^{(i)} - \vec{B}_{\text{cal}}^{(i)}(\vec{p}) \right|^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (1)$$

$$\vec{B}_{\text{cal}}^{(i)}(\vec{p}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left\{ -\frac{\vec{M}}{r_i^3} + \frac{3(\vec{M} \cdot \vec{r}_i) \cdot \vec{r}_i}{r_i^5} \right\} \quad (2)$$

$$\vec{p} = (x, y, z, \theta, \phi, M). \quad (3)$$

Here $S(\vec{p})$ is an objective function (the least squares value), i is the coil number, n is the total number of coils, $\vec{B}_{\text{meas}}^{(i)}$ is the measured flux density, $\vec{B}_{\text{cal}}^{(i)}$ is the theoretical flux density that takes into account the magnetic dipole field, \vec{p} represents the parameters of the marker, \vec{M} is the magnetic moment, (x, y, z) is the

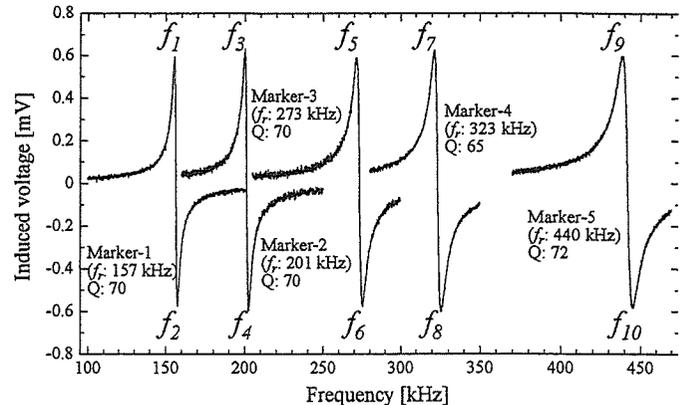


Fig. 3. Induced voltages due to excitation of five markers.

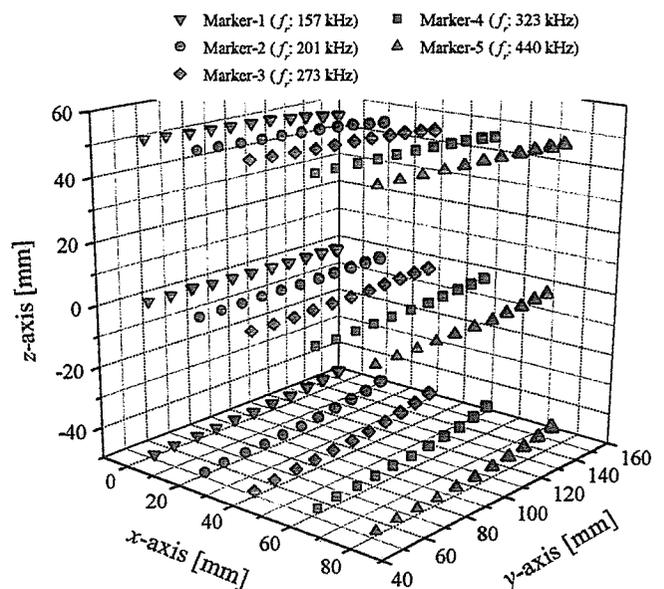


Fig. 4. Evaluation results of detected position (displayed in three dimensions).

position of the marker, and \vec{r} is an ideal dipole field expressed as a function of position and orientation. As shown in Fig. 1, ϕ is the angle between the x -axis and the direction vector when the moment is projected on an xy -plane and θ is the angle between the direction of the moment and the z -axis.

Fig. 3 shows the frequency dependence of the induced voltage from the markers. Sharp signals due to LC resonance of the markers were observed and there is no influence on neighboring signals from the skirts of the signals. In practice, the superposed wave, which is composed of ten frequencies corresponding to upper and lower peaks ($f_1 - f_{10}$), shown in Fig. 3 was used for excitation.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The position accuracy was verified experimentally for the system. Fig. 4 shows the detected positions and Fig. 5 shows the detected orientations when the five markers were lined up in five ranks parallel to the y -axis at 20-mm intervals. The markers were swept from $y = 50$ mm to 150 mm in 10-mm steps along the y -axis in the xy -plane at $z = 50$ mm, 0 mm, -50 mm (refer

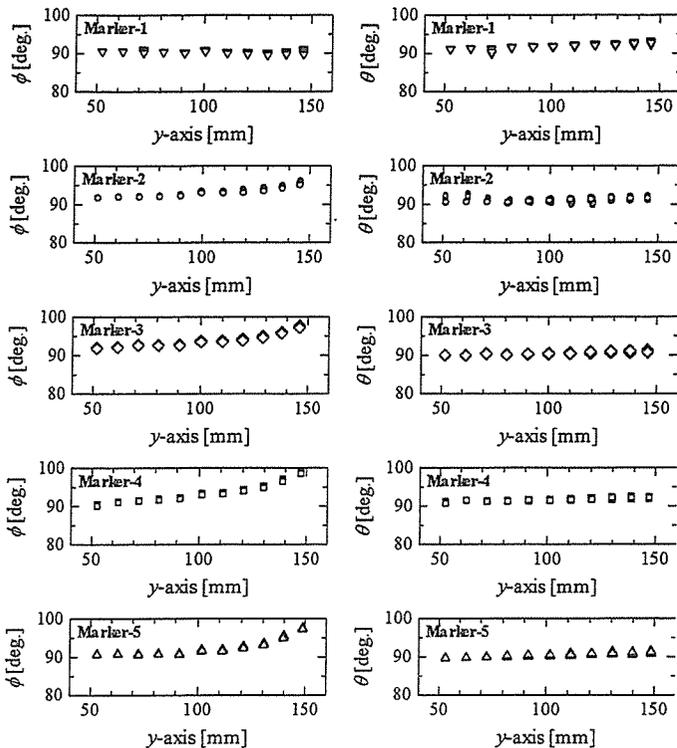


Fig. 5. Evaluation results for ϕ and θ (xy -plane at $z = 0$ mm).

to Fig. 1 for the coordinate system). As shown in Figs. 4 and 5, results can be distinguished to less than 1 mm and the position accuracy for each marker is within 2 mm. Approximately correct orientations were obtained when the markers were located up to 100 mm from the pick-up coil array. These results show that the system is capable of simultaneously capturing the motion of multi-markers wirelessly with a high accuracy. However, the detected positions were deflected toward the y -axis (the center axis of the pick-up coil array) gradually as the marker position increases over 100 mm from the pick-up coil array. Accordingly, the deviation of the attitude angle ϕ increases gradually up to about 10 degrees. A maximum positional deviation of around 6 mm was observed for markers located at (80, 150, 50), (80, 150, 0), and (80, 150, -50), whereas, as shown in Fig. 6, the intervals between adjacent markers were less than 3 mm in terms of relative position accuracy. The relative error of the measured position of all the points at intervals between adjacent markers was evaluated and expressed as an averaged value with a standard deviation. The results are as follows: 19.03 ± 0.88 mm at Mk1-2 (interval between Marker 1 and Marker 2), 18.79 ± 0.25 mm at Mk2-3, 19.88 ± 0.65 mm at Mk3-4, and 20.55 ± 0.41 mm at Mk4-5.

The increase in the detection error for large distances is thought to be due to the relation between the size and arrangement of the driving coil and the pick-up coil array, though the exact cause of these defects is not yet clear.

IV. CONCLUSION

The performance of a proposed wireless magnetic motion capture system for multi-markers was evaluated for five LC res-

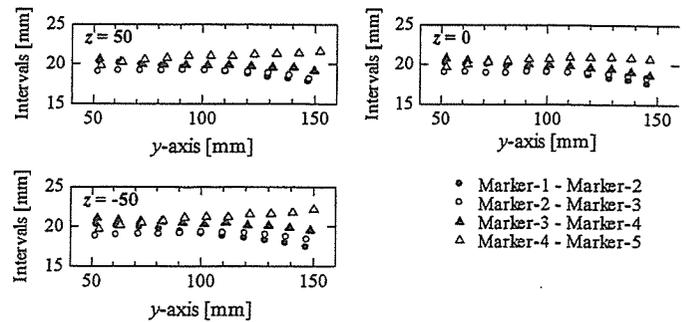


Fig. 6. Intervals between adjacent markers.

onant magnetic markers with individual resonant frequencies. The positional accuracy of the markers was found to be less than 2 mm and the approximate orientation of a marker could be determined when the marker was located within 100 mm^3 , up to 100 mm from the pick-up coil array. However, the detected positions were deflected toward the y -axis (the center axis of the pick-up coil array) gradually as the distance of the marker from the pick-up coil array increased.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the Industrial Technology Research Grant Program in 03A47063a from the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) of Japan, and also in part by Strategic Information and Communication R&D Promotion Programme (SCOPE) in the Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications (MPHPT).

REFERENCES

- [1] F. Grant and G. West, *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. New York: McGraw-Hill, 1965, pp. 306–381.
- [2] S. V. Marshall, "Vehicle detection using a magnetic field sensor," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-27, pp. 65–68, 1978.
- [3] W. M. Wynn, C. P. Frahm, P. J. Carroll, R. H. Clark, J. Wellhoner, and M. J. Wynn, "Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-11, pp. 701–707, 1975.
- [4] F. H. Raab, E. B. Blood, T. O. Steiner, and H. R. Jones, "Magnetic position and orientation tracking system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-15, pp. 709–718, 1979.
- [5] J. E. Mcfee and Y. Das, "Determination of the parameters of a dipole by measurement of its magnetic field," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-29, pp. 282–287, 1981.
- [6] J. A. Paradiso, K. Hsiao, J. Stricken, J. Lifton, and A. Adler, *IBM Syst. J.*, vol. 39, no. 3 & 4, pp. 892–914, 2000.
- [7] S. Yabukami, S. Hashi, Y. Tokunaga, T. Kohno, K. I. Arai, and Y. Okazaki, "Development of a position-sensing system for a wireless magnetic marker," *J. Magn. Soc. Jpn.*, vol. 28, pp. 877–885, 2004.
- [8] Y. Tokunaga, S. Hashi, S. Yabukami, T. Kohno, M. Toyoda, T. Ozawa, Y. Okazaki, and K. I. Arai, "Precision position-detecting system using an LC resonant magnetic marker," *J. Magn. Soc. Jpn.*, vol. 29, pp. 153–156, 2005.
- [9] T. Nakagawa and Y. Koyanagi, *Experimental Data Analysis by the Least Square Method*. Tokyo, Japan: Univ. Tokyo Press, 1982, pp. 95–99.

Reprinted From

**The
American
Journal
of Surgery**

FEBRUARY 2006 VOLUME 191, NUMBER 2

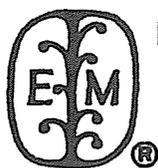
**Sentinel lymph node biopsy examination for breast cancer patients with
clinically negative axillary lymph nodes after neoadjuvant
chemotherapy**

**Takayuki Kinoshita, M.D.^a, Miyuki Takasugi, M.D.^a, Eriko Iwamoto, M.D.^a,
Sadako Akashi-Tanaka, M.D.^a, Takashi Fukutomi, M.D.^a, Shoji Terui, M.D.^b**

^a*Division of Surgical Oncology, National Cancer Center Hospital, 5-1-1, Tsukiji Chuo-ku, Tokyo 104-0045, Japan*

^b*Division of Nuclear Medicine, National Cancer Center Hospital, Tsukiji Chuo-ku, Tokyo, Japan*

pp. 225-229



Sentinel lymph node biopsy examination for breast cancer patients with clinically negative axillary lymph nodes after neoadjuvant chemotherapy

Takayuki Kinoshita, M.D.^{a,*}, Miyuki Takasugi, M.D.^a, Eriko Iwamoto, M.D.^a,
Sadako Akashi-Tanaka, M.D.^a, Takashi Fukutomi, M.D.^a, Shoji Terui, M.D.^b

^aDivision of Surgical Oncology, National Cancer Center Hospital, 5-1-1, Tsukiji Chuo-ku, Tokyo 104-0045, Japan

^bDivision of Nuclear Medicine, National Cancer Center Hospital, Tsukiji Chuo-ku, Tokyo, Japan

Manuscript received February 10, 2005; revised manuscript June 22, 2005

Abstract

Background: The feasibility and accuracy of sentinel lymph node (SLN) biopsy examination for breast cancer patients with clinically node-negative breast cancer after neoadjuvant chemotherapy (NAC) have been investigated under the administration of a radiocolloid imaging agent injected intradermally over a tumor. In addition, conditions that may affect SLN biopsy detection and false-negative rates with respect to clinical tumor response and clinical nodal status before NAC were analyzed.

Methods: Seventy-seven patients with stages II and III breast cancer previously treated with NAC were enrolled in the study. All patients were clinically node negative after NAC. The patients then underwent SLN biopsy examination, which involved a combination of intradermal injection over the tumor of radiocolloid and a subareolar injection of blue dye. This was followed by standard level I/II axillary lymph node dissection.

Results: The SLN could be identified in 72 of 77 patients (identification rate, 93.5%). In 69 of 72 patients (95.8%) the SLN accurately predicted the axillary status. Three patients had a false-negative SLN biopsy examination result, resulting in a false-negative rate of 11.1% (3 of 27). The SLN identification rate tended to be higher, although not statistically significantly, among patients who had clinically negative axillary lymph nodes before NAC (97.6%; 41 of 42). This is in comparison with patients who had a positive axillary lymph node before NAC (88.6%; 31 of 35).

Conclusions: The SLN identification rate and false-negative rate were similar to those in nonneoadjuvant studies. The SLN biopsy examination accurately predicted metastatic disease in the axilla of patients with tumor response after NAC and clinical nodal status before NAC. This diagnostic technique, using an intradermal injection of radiocolloid, may provide treatment guidance for patients after NAC. © 2006 Excerpta Medica Inc. All rights reserved.

Keywords: Sentinel node biopsy; Neoadjuvant chemotherapy; Clinically node negative; Intradermal injection

Currently, the status of the axillary lymph nodes remains the most important prognostic indicator for breast cancer and helps the physician in guiding adjuvant therapy. More than 40 peer-reviewed pilot studies published between 1993 and 1999 have established the validity of sentinel lymph node (SLN) biopsy examination technique for clinically node-negative breast cancer [1], and the SLN biopsy procedure has become the standard of care for axillary staging in these patients.

Recent studies report identification rates of more than 90%, with false-negative rates ranging from 2% to 10% [2,3]. To ensure a high SLN identification rate and a low false-negative rate, some relative contraindications for SLN biopsy examination have been established: these include T3 or T4 tumors, multicentric or multifocal lesions, a large biopsy cavity, previous axillary surgery, previous chest-wall irradiation, and neoadjuvant chemotherapy (NAC) [4,5].

The application of SLN biopsy examination in NAC-treated patients may, as in nonneoadjuvant chemotherapy groups, identify patients who do not necessarily require an axillary lymph node dissection (ALND). Several studies

* Corresponding author. Tel.: +81-3-3542-2511; fax: +81-3-3542-3815.
E-mail address: takinosh@ncc.go.jp

Table 1
Patient demographics

	Number of patients
Age, y	
Mean	51.1
Range	27–75
Clinical tumor size, cm*	
Mean	4.82
Range	2.7–12
Tumor classification*	
T2	50 (65.0%)
T3	24 (31.2%)
T4	3 (3.8%)
Lymph node status*	
N0	42 (54.5%)
N1	28 (36.4%)
N2	7 (9.1%)
Tumor type	
Invasive ductal	74 (96.1%)
Invasive lobular	3 (3.9%)
Type of NAC	
FEC plus paclitaxel	73 (94.9%)
Paclitaxel alone	4 (5.1%)
Clinical response of the tumor	
CR	41 (53.2%)
PR	28 (36.4%)
SD	8 (10.4%)
Pathologic response of the tumor	
pCR	17 (22.1%)
pINV	60 (77.9%)
Pathologic nodal status	
Negative	47 (61.0%)
Positive	30 (39.0%)

CR = complete response; FEC = fluorouracil/epirubicin/cyclophosphamide; PR = partial response; SD = stable disease; pCR = pathologic complete response; pINV = pathologic invasive.

* Before NAC.

have evaluated the use of SLN biopsy examination in patients with breast cancer after NAC but results are varied and inconclusive [6–14].

Recently, several studies have shown the feasibility and accuracy of SLN biopsy examination using peritumoral injection of radiocolloid for patients with NAC-treated breast cancer. However, false-negative rates varied considerably among these studies [6–13]. It is possible that tumor response to chemotherapy may alter or interrupt the lymphatic drainage, thus causing the lower SLN identification rates and higher false-negative rates as opposed to nonneoadjuvant studies. Our hypothesis is that the lymphatic flow within the skin lesion overlying the tumor is less damaged by the chemotherapy than that in the parenchyma surrounding the tumor, except in T4 tumors. Thus, the usefulness of SLN biopsy examination with intradermal injection of radiocolloid for patients with NAC-treated breast cancer has yet to be established.

The aim of this study was to determine the feasibility and accuracy of the SLN biopsy procedure using intradermal injection of radiocolloid over the tumor in clinically node-negative NAC-treated breast cancer patients.

Methods

Between May 2003 and January 2005, 77 patients with T2–4N0–2 breast cancer underwent NAC with SLN biopsy examination plus ALND performed by a single surgeon. The pathologic diagnosis was established by core needle biopsy examination in all patients.

Patients younger than 65 years of age received 4 cycles of 5-fluorouracil (500 mg/m²)/epirubicin (100 mg/m²)/cyclophosphamide (500 mg/m²) plus 12 weekly cycles of paclitaxel (80 mg/m²), and patients older than 65 years of age received 12 weekly cycles of paclitaxel (80 mg/m²) alone. After NAC, we enrolled the 77 clinically node-negative patients in this study.

Lymphatic mapping was performed using a 3-mL combination of blue dye (Patent blue V; TOC Ltd, Tokyo, Japan) and 30 to 80 MBq of technetium-99m–labeled Phytate (Daiichi RI Laboratory, Ltd, Tokyo, Japan). The day before surgery, the radiotracer was injected intradermally into the area overlying the tumor, and blue dye was injected into the subareolar site intraoperatively. For non-palpable lesions, injections were performed under mammographic or ultrasonic needle localization. Sentinel lymph nodes were identified as being stained blue, radioactive, or both. The SLN biopsy procedure then was followed by a standard level I/II ALND.

All sentinel nodes were evaluated histologically by submitting each node as a 3-mm to 5-mm serial section stained with hematoxylin-eosin. Lymph nodes submitted as part of the axillary dissection were totally submitted and evaluated using standard hematoxylin-eosin staining.

Results

Patient characteristics, type of chemotherapy, clinical response of the tumor, and pathologic findings are summarized in Table 1. All patients underwent breast-conserving therapy or mastectomy and were clinically node negative at the time of surgery.

As shown in Table 2, the overall SLN identification rate was 93.5% (72 of 77). Of the 72 patients in whom an SLN could be identified, 24 (33.3%) had positive SLNs. Within

Table 2
Results of sentinel node biopsy examination

	Number of patients
Total number of patients	77
SLN identified	72 (93.5%)
SLN positive	24 (33.3%)
SLN was only positive lymph node	11 (45.8%)
SLN identification method	
Radiocolloid and blue dye	53 (73.6%)
Radiocolloid only	11 (14.3%)
Blue dye only	8 (11.1%)