

研究テーマ 室温・超高感度磁気センサの開発

研究者名	荒井賢一	東北大学電気通信研究所	客員研究員
	山口正洋	東北大学電気通信研究所	客員研究員
	石山和志	東北大学電気通信研究所	客員研究員
	藪上 信	東北大学電気通信研究所	客員研究員
	鈴木 哲	仙台電波工業高等専門学校	客員研究員
	若生直樹	株式会社トーキン	企業出向研究員
	板垣 篤	凌和電子株式会社	企業出向研究員
	辻 真哉	凌和電子株式会社	企業出向研究員
	菊地敏明	有限会社八ヤマ	企業出向研究員
	荒井 薫	みやぎ産業振興機構	研究員
	中居倫夫	宮城県産業技術総合センター	共同研究員
	阿部宏之	宮城県産業技術総合センター	共同研究員
	天本義己	宮城県産業技術総合センター	共同研究員

1 センサ素子の高感度化

フェーズ :

(1) 概要

高周波キャリア型薄膜磁界センサ素子と搬送波抑制回路を組み合わせることで基本的な超高感度磁界検出システムを構築した。

(2) 目標

薄膜磁界センサ素子、搬送波抑制回路からなる基本的な高感度センサシステムを構築する。

(3) 実施内容

後述する。

フェーズ :

(1) 概要

フェーズ1のセンサシステムにおいて、方向性結合器、電流密度とノイズレベルとの関係の検討、センサ素子の厚膜化、センサ素子の多層化等の諸検討を行うことにより、室温で 10^{-8} Oe 台の超高感度磁界検出分解能を実現した。

(2) 目標

10^{-8} Oe 台の磁界検出分解能を得る。

(3) 実施内容

後述する。

1-1 搬送波抑制回路を用いた高感度化

搬送波抑制回路を用いて、搬送波の位相ノイズを信号検出限界である熱雑音以下に低減し、センサ素子の高感度化を計った。センサ素子に入力するパワーは発振器の最大出力である 16dBm までとした。センサはノイズフロアの上昇が起こらない範囲で最大のパワーを印加して駆動した。駆動周波数は一定の磁界を印加しながら周波数を変化させたときに、側波帯の最大値が得られる周波数を選択した。その結果、 S-1 に示すように幅 50 μ m, 長さ 5mm, 膜厚 1 μ m (CoNbZr0.5 μ m / Nb5nm / CoNbZr0.5 μ m) のセンサ素子を用いた場合に、入力 16dBm, 駆動周波数 200MHz において 9×10^{-8} Oe (磁界の周波数

は 501kHz) の磁界感度を達成した。すなわち本班の基本目標である「 10^{-8} Oe 台の感度」は基本的に達成された。続いて搬送波抑制回路の一部に方向性結合器を使用してセンサの信号低下を改善し、交流磁界に対してセンサを高感度化することについて検討した。用いた素子は幅 $50\mu\text{m}$ 、長さ 5mm 、膜厚 $1\mu\text{m}$ (CoNbZr $0.5\mu\text{m}$ /Nb 5nm /CoNbZr $0.5\mu\text{m}$) である。今期は結合度 10dB、周波数 500MHz の方向性結合器を用いて、その有用性の確認を行った。キャリア周波数 500MHz において得られていた最高感度はこれまで 3×10^{-7} Oe であったが、方向性結合器を用いることにより 1.5×10^{-7} Oe と感度を 2 倍向上させることができ、方向性結合器の使用が高感度化に有用であることを明らかにした。また、本来この素子は、キャリア周波数 200MHz で最も感度が得られる。さらに、よりセンサの高感度化を実現させるために必要とされる方向性結合器の結合度は 5-6dB である。よって、結合度 5-6dB、周波数 200MHz の方向性結合器を作製中であり、これが実現できれば 5×10^{-8} Oe 程度の磁界検出感度が得られる見込みである。

一方直流磁界の検出感度についても検討を行った。これまで得られていた検出感度は 2×10^{-4} Oe であったが、搬送波抑制回路を用いて、オフセット出力を低下させることにより、高感度な磁界検出を可能にし  S-2 に示すように、 2.5×10^{-5} Oe とこれまでより 1 桁感度を向上させることができた。

1-2 電流密度とノイズレベルとの関係

搬送波抑制回路を用いた高周波キャリア型薄膜磁界センサにおいてセンサの電流密度の増大によるノイズレベルの上昇を検討し、センサでの電流密度とノイズフロアの関係を検討した。センサ部での電流密度をシグナルジェネレータの入力パワーと素子の断面積から換算し、電流密度が $2 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 付近において本来のノイズレベルである -130dBm から、-120dBm へと上昇し、電流密度によりノイズレベルが上昇した。  S-3 はノイズレベルの平均的電流密度依存性を示したものである。

上記実験結果に基づき、ノイズレベルの上昇を抑制することと、センサ素子の磁気特性を維持することを両立し、センサの高感度化を図ることを目的として、断面積の異なるセンサ素子(幅 $60\mu\text{m}$ 長さ 5mm 膜厚 $1\mu\text{m}$ の CoNbZr 膜と幅 $120\mu\text{m}$ 長さ 10mm 膜厚 $1\mu\text{m}$ の CoNbZr 膜)を作成して、SN 比が向上するかの基礎実験を行った。この素子の外部磁界とインピーダンスの関係を測定したところ、幅 $60\mu\text{m}$ の素子において $20.56\Omega/\text{Oe}$ 、幅 $120\mu\text{m}$ の素子において $12.26\Omega/\text{Oe}$ と前期までに報告したセンサ素子とほぼ同等のインピーダンス変化が得られた。この素子と搬送波抑制回路を組み合わせると微小磁界を計測したところ、 $3 \times 10^{-3} \text{ Oe}$ の交流磁界印加時の側波帯とノイズレベルの SN 比は 84dB であり、 $9 \times 10^{-8} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$ の検出感度を得た以前の測定結果に比較して 8dB 増加した。  S-4 は入力パワーに対する側波帯およびノイズレベルの変化を示したものである。これにより 10^{-8} Oe 台前半の感度が実現できる見通しを得た。

上記の実験結果に基づき、熱雑音によるノイズレベルを抑えるためセンサへ流れるキャリア電流密度を $2 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 以下に抑えるよう素子断面積を決めることが必要であるため、この条件のもと、単位面積 (1mm^2) あたり最も高 SN 比を得るためのセンサ寸法を透磁率がバイアス磁化理論により決まることを仮定して設計した。  S-5 に作成素子の写真を示す。試作したセンサ素子は、膜厚 $4.2\mu\text{m}$ 、長さ 1mm 、幅 $20\mu\text{m}$ 、間隔 $20\mu\text{m}$ の 6 本の CoNbZr 短冊により構成されるミアンダ形状とした。試作した素子のインピーダンス変化率 (dZ/dH) は 500MHz 時において約 $30 \cdot /\text{Oe}$ であった。  S-6 は 501kHz の微小交流磁界に対する側波帯の出力を示したものである。測定バンド幅は 1Hz、アベレージングは 100 回とした。 $4.5 \times 10^{-8} \text{ Oe}$ の磁界を印加した際に約 -130dBm の出力がえられ、これまでの最高感度である 6×10^{-8} Oe を更新した。

1-3 磁区観察

高周波キャリア型薄膜磁界センサの高感度化のためには素子膜厚を大きくすることが有効であることがわかり、素子を厚膜化した場合の磁区構造とセンサ特性を検討した。また磁区構造の制御のために CoNbZr/Nb/CoNbZr の積層膜素子を作製し単層膜と比較した。

 S-7 は CoNbZr 単層膜素子のインピーダンス特性である。膜厚が $4.2 \mu\text{m}$ の素子に

おいては、最大で約 $30 \Omega/\text{Oe}$ という良好なインピーダンス変化率が得られた。しかしその他の膜厚の素子では、インピーダンスの極大値をとる磁界が増大した。図 S-8 は $\text{CoNbZr}/\text{Nb}/\text{CoNbZr}$ の積層膜素子のインピーダンス特性である。4.9 μm 厚の積層膜素子において約 $35 \Omega/\text{Oe}$ のインピーダンス変化率が得られ、単層膜時に見られたインピーダンスが極大値となる磁界の増大はみられなかった。図 S-9 にインピーダンス変化率の膜厚依存性を示す。厚膜化した際、積層膜化することで単層膜素子に見られるインピーダンス変化率の低下は抑えられている。これは積層化することで短冊エッジ部での磁極発生を抑える事ができ、素子幅方向に一軸異方性が誘導できていると考えられる。それを検証するために、磁気カー効果顕微鏡 (BH-780IP) を用いて、これら素子の磁区構造を観察した。図 S-10 に磁区構造写真を示す。全ての素子において、おおむね素子幅方向に異方性が誘導できている。単層膜 4.9 μm , 5.3 μm の素子においては、180 度磁壁がジグザク状となっているのに対し、これは積層膜では見られなかった。これは積層化することにより静磁エネルギーが下がっているためと考えられる。しかし、当初目的としていたエッジ部での還流磁区は、はっきりと観察できていない。これは素子断面形状が蒲鉾状になっているためである。磁区構造とセンサ特性を検討していく上で、素子断面形状を矩形に近くする微細加工プロセスの導入を検討する必要がある。さらに磁気特性を検討するために VSM で M-H ループを測定した。図 S-11 は、単層膜センサ素子幅方向の M-H ループである。インピーダンス変化率が良好であった膜厚 4.2 μm の素子より、インピーダンスが極大値をとる磁界が増大した膜厚 4.6 μm の素子は、飽和磁界に約 15 ~ 20 Oe に増加しており、センサのインピーダンス変化率が減少したと考えられる。約 $35 \Omega/\text{Oe}$ のインピーダンス変化率が得られた素子で搬送波抑制回路を使用し、微小磁界測定を行ったところ 4.5×10^{-8} Oe の磁界を検出した。

1-4 積層化によるセンサ断面の矩形化

一回のプロセスの膜厚を 1 μm 程度としてこれを 5 回繰り返すことにより、矩形の断面構造を有する素子を作製した。また、作製した素子のインピーダンス変化率を評価した。

作製手順を図 S-12 に示す。矩形断面の素子を作製するため、矩形に近い構造で作製できる膜厚 1 μm の磁性膜を分けて成膜した。素子膜厚が 5 μm になるように 5 段階に分けて作製した。作製した素子形状は、長さ 1mm、幅 20 μm 、間隔 20 μm 、本数 6 本の CoNbZr によるミアンダ形である。各層の間に不純物が混入しないように、各層を成膜する前に逆スパッタを施した。また 2 層目以降のレジストのパターニングは位置精度が要求されるため、アライメントマークは 20 μm 角を用い、誤差は 2 μm 以下となるようにした。5 回の成膜工程があり再現性の悪化が考えられたので、同一工程のサンプルは、3 個作製した。膜厚依存性を観察するため、2 層を成膜・加工し、膜厚 2 μm の素子も併せて作製した。

図 S-13 は、表面粗さ計による作製した素子のパターン形状である。膜厚は設計値どおりほぼ 5 μm となった。レジストパターニング直後のアラインメントの合せ誤差は約 2 μm 程度であった。図 S-14 は、前回作製した断面が蒲鉾上になった素子(a)と今回作製した素子(b)の素子断面の電子顕微鏡像である。図中の左右方向が素子幅方向であり、上下方向が素子厚さ方向である。基板劈開時に素子パターンが崩れることを防ぐため、樹脂でモールドし劈開した。5 層積層したことにより素子断面は矩形に近い構造となった。

図 S-15 は作製した 膜厚 5 μm の素子の外部磁界 インピーダンスの関係である。サンプル 1、2、3 は別ウエハで作成、および加工した素子であり、膜厚はすべて約 5 μm である。サンプル 1 とサンプル 2 は、インピーダンス変化率が最大となる外部磁界が、約 5.5 Oe であり、特性に再現性が見られた。サンプル 3 は、サンプル 1 とサンプル 2

に比べ、インピーダンス変化率が最大となる外部磁界が約 2 Oe 大きかった。

図 S-16 は作製した 膜厚が 2 μm の素子の外部磁界 インピーダンスの関係である。インピーダンス変化率が最大となる外部磁界が、約 5 Oe であり、インピーダンス変化率の最大値は 58 /Oe と大きな値となった。これは、直流抵抗自体が約 200 と高いためである。

図 S-17 は前回報告した単層膜素子・積層膜素子の各膜厚におけるインピーダンス変化率と今回作製した素子のインピーダンス変化率を素子膜厚に対して示したものである。今回作製した 2 μm 膜厚素子のインピーダンス変化率は 100 で規格化して示した。実線はバイアス磁化率理論により求めた計算値である。図 S-17 によればサンプル 1、2、3 についてはインピーダンス変化率が約 23 /Oe となった。インピーダンス変化率は計算値に対して約 30% 低下した。これに対し膜厚 2 μm のサンプル 4 のインピーダンス変化率は計算値とほぼ一致した。これは厚膜化による磁気特性劣化と考えられるが、詳細な検討が必要である。

図 S-18 は、サンプル 1 (膜厚 5 μm) とサンプル 4 (膜厚 2 μm) のカー効果顕微鏡による磁区写真である。図 7 から両膜厚素子ともに素子幅方向に磁気異方性が誘導されており、インピーダンス特性を劣化させる還流磁区は表面的には観察されなかった。

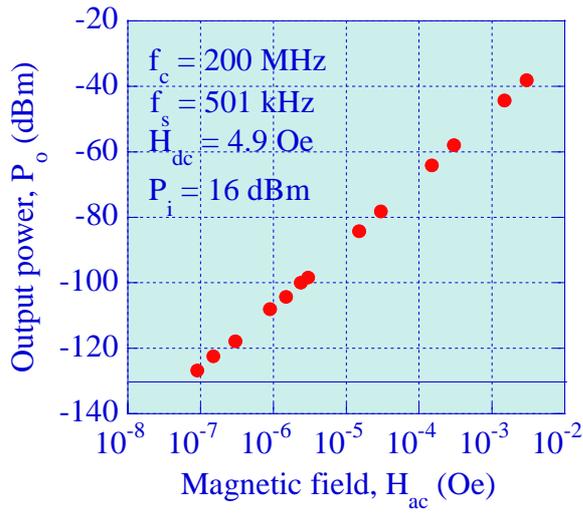


図 S-1 外部磁界に対する測定パワー

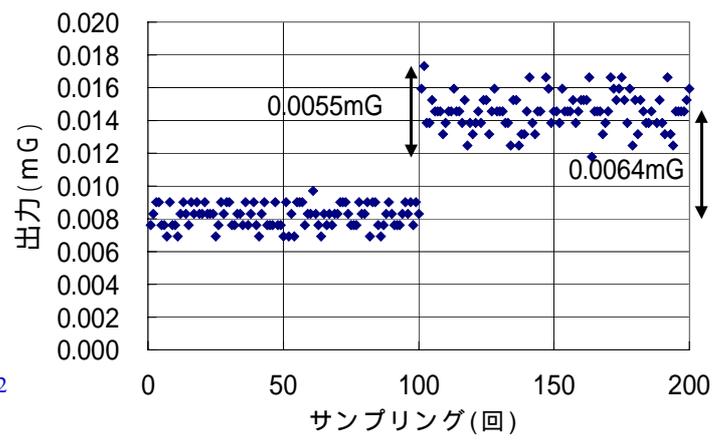


図 S-2 磁界ステップ応答

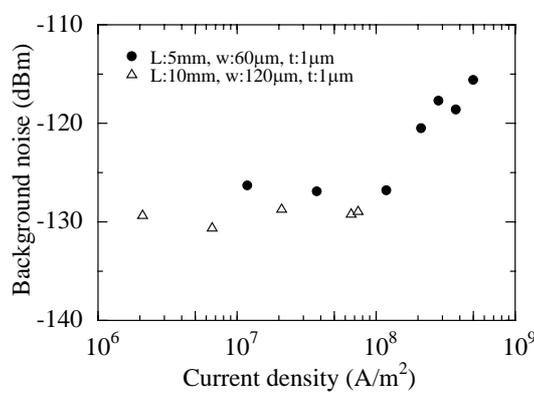


図 S-3 電流密度とノイズレベル

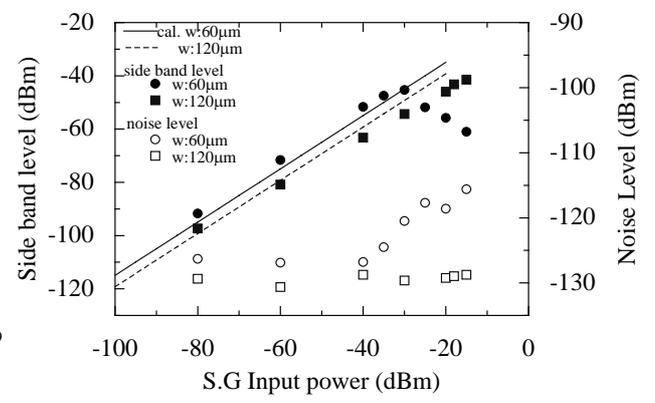


図 S-4 側波帯とノイズレベルの入力パワー依存性

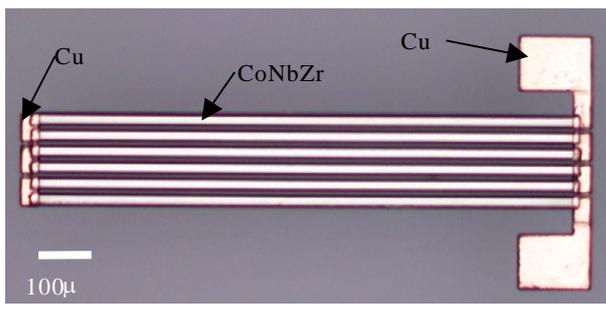


図 S-5 試作したセンサ素子

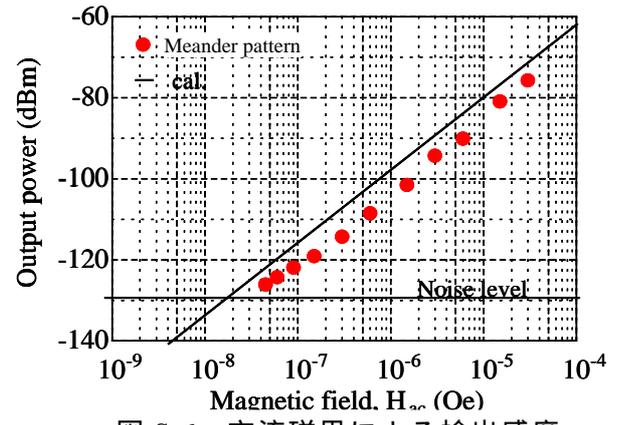


図 S-6 交流磁界による検出感度.

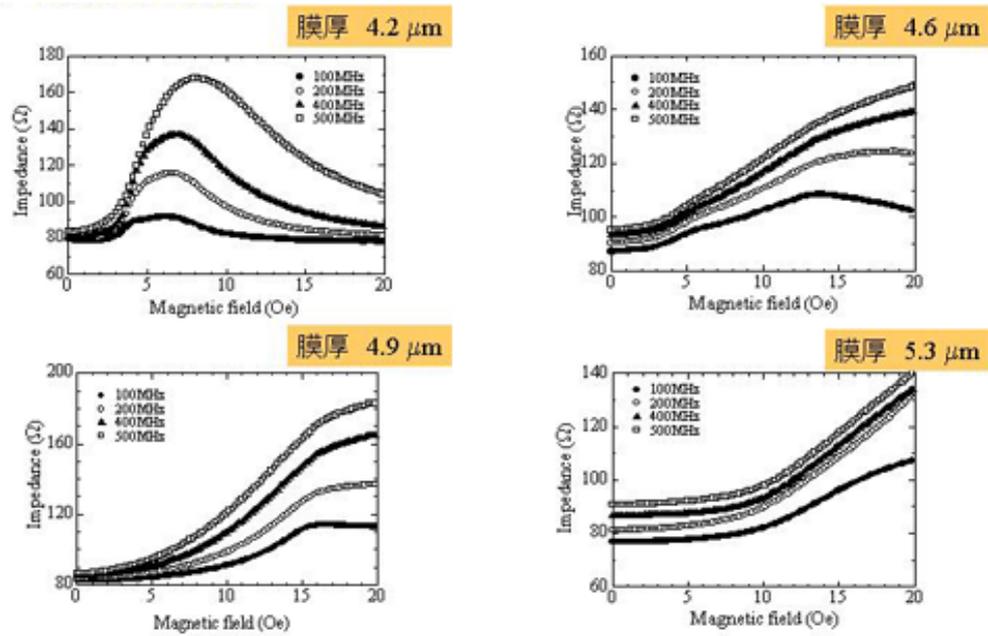


図 S-7 単層膜素子におけるインピーダンス特性

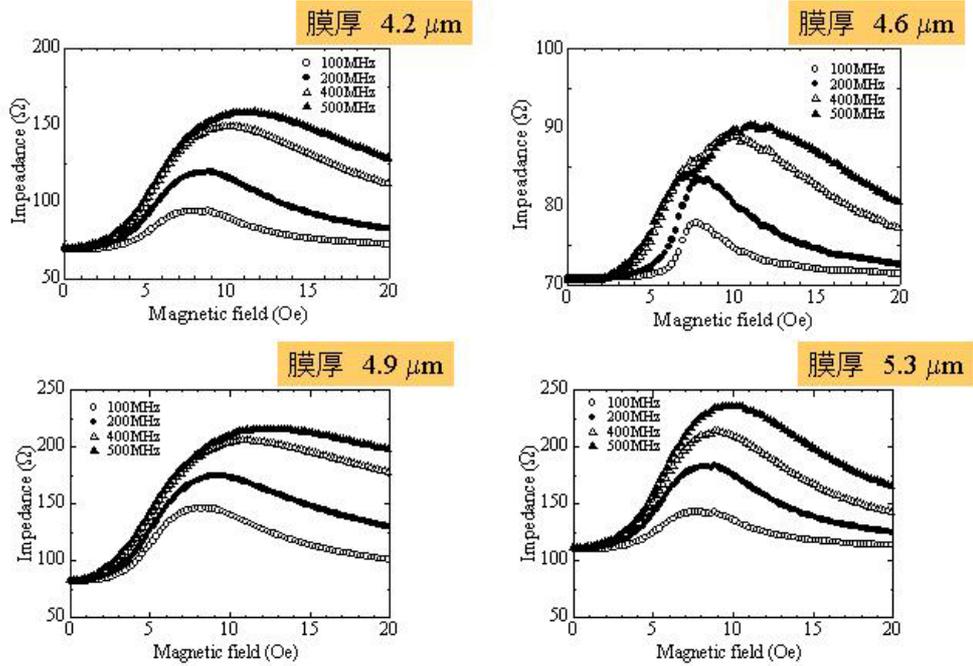


図 S-8 積層膜素子におけるインピーダンス特性

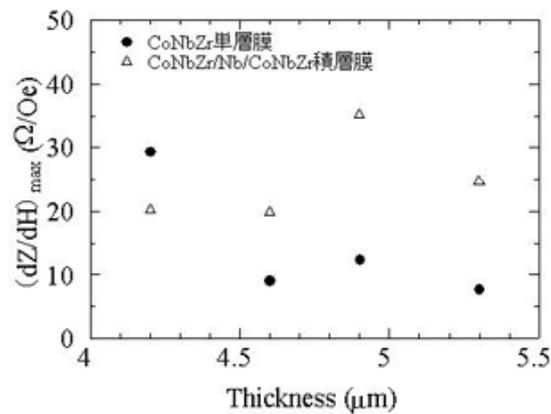


図 S-9 インピーダンス変化率の膜厚依存性

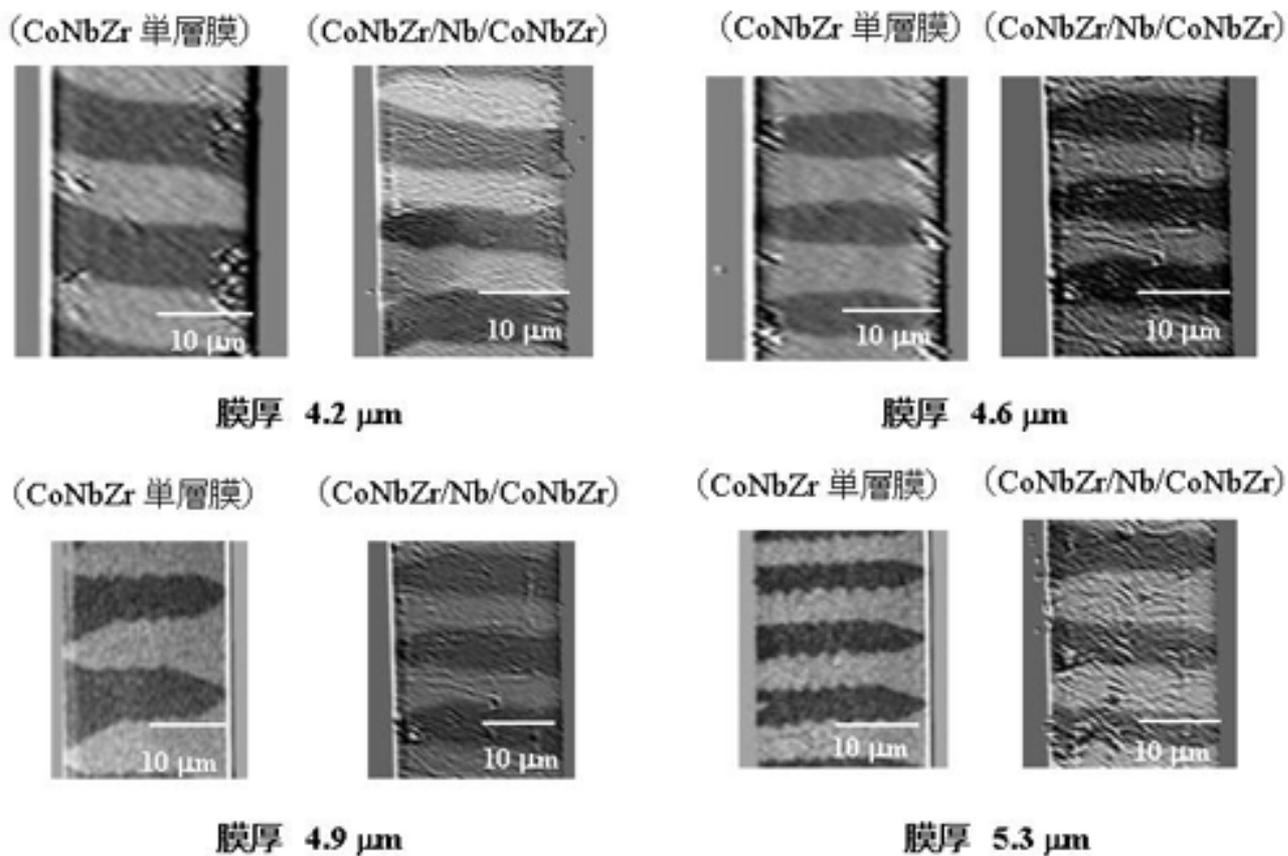


図 S-10 磁区写真

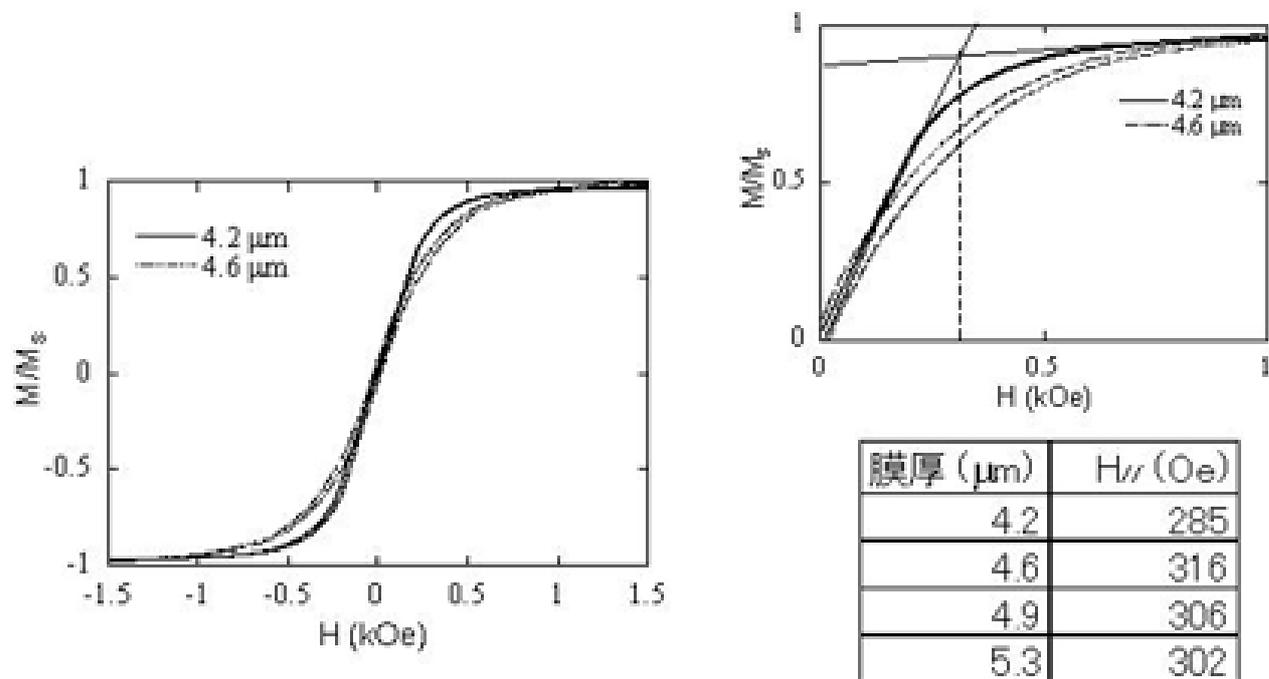


図 S-11 単層素子の M-H カーブ

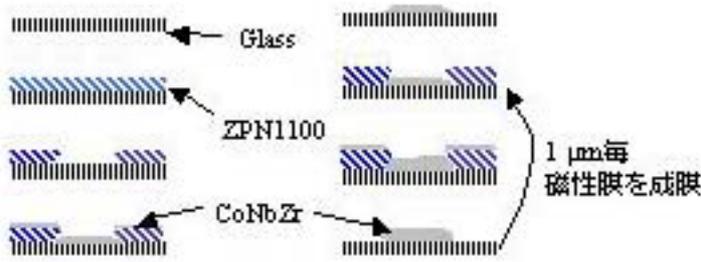


図 S-12 作製プロセス

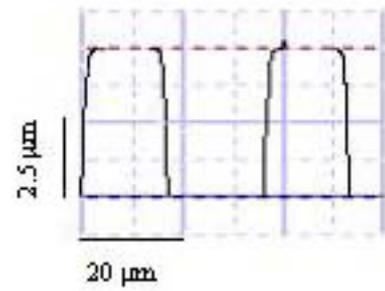


図 S-13 素子断面のプロファイル



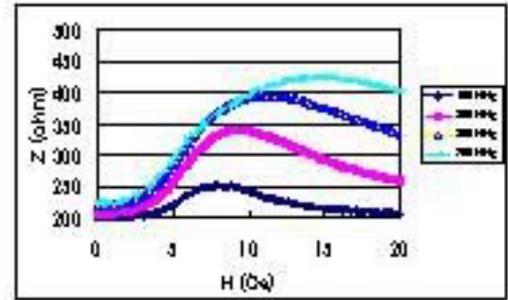
(a) 一度の成膜で作製



(b) 五段階に分けて作製

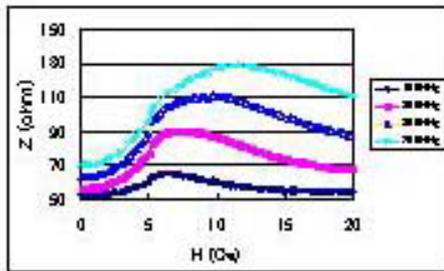
10 μm

図 S-14 作製素子の断面形状

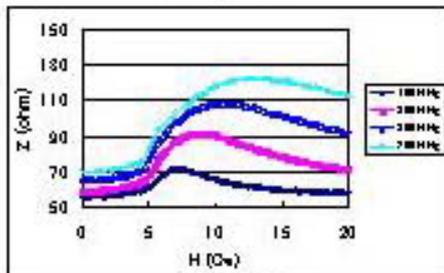


Sample 4

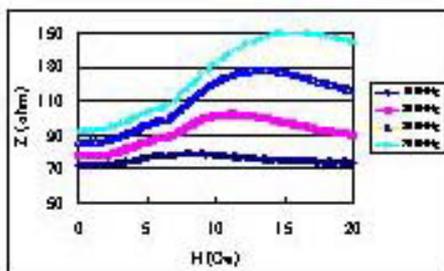
図 S-16 センサ素子 (膜厚 2 μm) のインピーダンス



Sample 1



Sample 2



Sample 3

図 S-15 センサ素子 (膜厚 5 μm) のインピーダンス

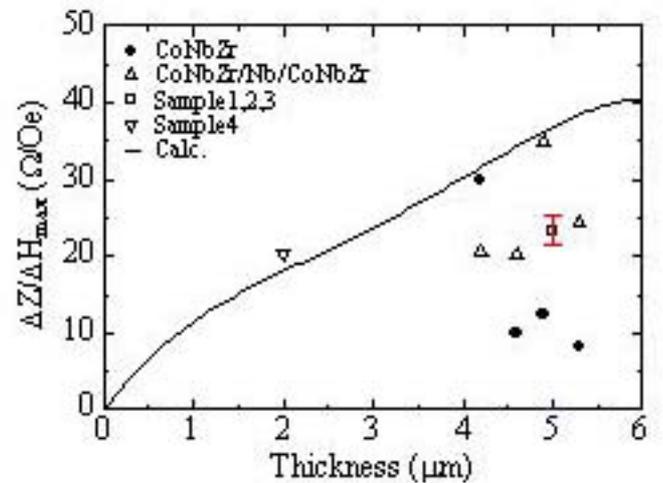
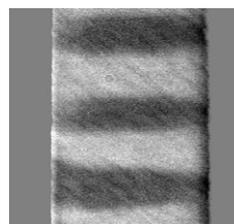
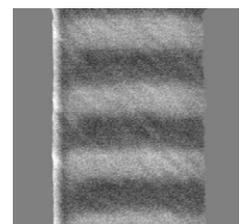


図 S-17 インピーダンス変化率と素子膜厚との関係



Sample 2



Sample 4

図 S-18 磁区写真

2 センサ素子の低バイアス化および薄膜磁石バイアス構造の実現

宮城県産業技術総合センターは、委託研究テーマ名：「室温・超高感度磁気センサの開発」に共同研究として参加して、高周波キャリア型磁界センサの産業応用実現の視点を保ちながらセンサ素子特性改善を行なってきた。特性改善の方向性として、高感度化・低消費電力化をキーワードとした。このキーワードは、高周波キャリア型磁界センサが、小型高感度な特性を有し、このメリットを最大限に生かした磁気センサ製品分野への実用化が有望視されていること、さらに、本開発センサを実用化する際に大きな問題となる素子駆動電力の低減化実現を開発目標とすることを意味するものである。

我々は、本事業において、以下の3項目について検討を行なった。

- 1．磁気共鳴を利用した高感度素子の開発（フェーズⅠ）
- 2．反磁界制御による高感度化（フェーズⅡ）
- 3．磁壁傾斜角度の制御による素子高感度化と低バイアス化（フェーズⅡ）
- 4．薄膜磁石バイアスの複合化（フェーズⅡ）

なお、宮城県産業技術総合センターの研究開発は、実用化を視野に入れたものであるため、これらの開発素子における製造歩留り向上や使用環境による特性劣化の確認等についても併せて検討している。

以下、これらの内容について報告する。

2-1 磁気共鳴を利用した高感度素子の開発

一軸磁気異方性を有する磁性薄膜において、容易軸に対し垂直方向に直流外部磁場（バイアス磁場）を印加した場合に、このバイアス磁場強度に応じて容易軸方向の高周波透磁率が大きく変化する現象は、バイアス磁化現象として良く知られている。この際、容易軸方向の微小高周波磁場の周波数を数百 MHz という周波数領域まで増加することで、容易軸に対し垂直方向に印加するバイアス磁場がしかるべき値のときに磁気共鳴現象が発生する。この現象はバイアス磁気共鳴現象と呼ばれている。図 I1-1 に、一辺 3.9mm の正方形形状、膜厚 0.4 μ m、異方性磁界 $H_k=70e$ の一軸磁気異方性を有する $Co_{85}Nb_{12}Zr_3$ アモルファス薄膜において、容易軸に垂直方向にバイアス磁場を印加した際の、容易軸方向の高周波透磁率の変化の実験値を示す。周波数 600MHz 付近において、バイアス磁場 70e で透磁率虚部がピークとなっていることがわかる。また、この近辺での透磁率変化が急峻であることもわかる。

図 I1-2 に、高周波キャリア型磁界センサの感度と駆動周波数の関係を示す。本図は、実験的に得られたものである。この結果から、磁気共鳴周波数（600MHz）近辺で感度が最大になることがわかる。

本テーマにおいては、バイアス磁気共鳴現象により生じる透磁率虚部のバイアス磁場による急峻な変化を有効に利用しセンサ素子を高感度化するために、センサ素子寸法を最適化することを目的として研究を行なった。研究は、電磁界シミュレータによる素子寸法パラメータの検討と、実験による実証試験を行なった。

図 I1-3 に試作評価した高周波キャリア型磁界センサの外形図と試作工程を示す。センサ素子の磁化容易軸は、磁場中熱処理を施すことで、素子幅方向に誘導した。

図 I1-4 に高周波キャリア型磁界センサの外部磁場 - 素子インピーダンスの関係（以下、GMI 特性と呼ぶ）を測定した測定系の外観図、および、センサ素子を固定、ワイヤボンディングして測定するための測定治具、さらに、測定系をキャリブレーションするためのキャリブレーション治具の概略図を示す。高周波インピーダンスの測定には、ネットワークアナライザ HP4396B を用い、反射法（s11）で測定した。外部磁場は、ヘルムホ

ルツコイルで印加した。

図 I1-5 に周波数 500MHz における GMI 比と素子膜厚の関係図を示す。評価した素子寸法は、長さ 5mm、幅 100 μm である。図には、複素透磁率を考慮したコンピュータシミュレーションによる解析結果も併せて示してある。本図から、GMI 比を大きく取るためには膜厚 2.3 μm 以上が必要であることがわかった。

図 I1-6 に周波数 500MHz における素子感度と素子膜厚の関係図を示す。評価した素子寸法は、長さ 5mm、幅 100 μm である。図には、複素透磁率を考慮したコンピュータシミュレーションによる解析結果も併せて示してある。本図から、感度を最大にする最適膜厚が存在することが明らかになり、本測定の寸法条件においては、膜厚 2.4 μm が感度最大とする膜厚条件であることがわかった。

上記の素子感度を最大とする最適膜厚条件の存在は、以下のように考察される。すなわち、複素透磁率虚部の値が実部より大きくなる条件においては、図 I1-7 のように磁性体内部の膜厚方向における瞬時的電流分布に大きな振動が発生する。この振動は膜厚に対して電流方向の符号が反転する程大きな振動であり、このことは、物理的には磁性体内部に大きな渦電流が発生することを示す。この渦電流の渦の膜厚方向における直径は、周波数と複素透磁率の値で決定されることは、理論的にも示される。磁気共鳴を利用した高周波キャリア型磁界センサにおいては、透磁率虚部がピークとなる条件において、渦電流による損失が最大になるような膜厚、すなわち、渦電流の渦の膜厚方向直径と素子膜厚が一致する条件となるように素子膜厚を設計することで、素子感度を最大とすることができる。

結果として、薄膜磁性体の複素透磁率に合わせて、センサ素子膜厚を所定の範囲に設定することでインピーダンス増加率およびインピーダンス変化率を最大にする設計方法を明らかにした。

なお、本件については、国際学会への発表 (JEMS01、France(2001)) と論文投稿 (T. Nakai *et al.*: J. Magn. Magn. Mater.、242-245、1142-1145 (2002))、特許出願 (特願 2000-273053) を行なった。

さらに、磁性体 - 非磁性導電体 - 磁性体の積層構造においても、透磁率虚部を有効利用した高感度化の条件を明らかにし、特許出願 (特願 2001-321959) を行った。

2-2 反磁界制御による高感度化

コンピュータシミュレーションを用い、高周波キャリア型磁界センサの磁性体内部の反磁界を制御して素子を高感度化する手法について検討し、特許出願 (特願 2002-194331) した。詳細は、以下の通りである。

高周波キャリア型磁界センサは、一軸異方性を有した軟磁性体薄膜をセンサ素子に使用して、外部磁界による素子磁性体透磁率の変化を素子インピーダンスとして検出する磁界検出素子である。本素子は、長さ数 mm、幅数十 μm 、厚さ数 μm の短冊形状薄膜磁性体で構成されている。この素子磁性体を、検出すべき磁界の中に静置すると、磁性体が磁化し、これに伴う磁極が素子端部に生じ、この磁極は素子磁性体内部に反磁界を発生させる。本検討では、コンピュータシミュレーションを用いて、この反磁界の空間分布を解析し、素子内部の磁界分布を均一化する素子構造を実現することで、素子感度の向上を図るものである。

2-3 磁壁傾斜角度の制御による素子高感度化と低バイアス化

2-3-1 高周波対応素子形状の導入

ここで、以降の実験精度向上のために、高周波駆動に対応した素子形状と、測定系の改良を行なった。

図 I3-1 に改良した素子形状を示す。高周波における測定安定性を確保するため、さらに、測定準備にかかる作業時間短縮のため、ワイヤボンディングによる素子接続を止め、高周波プローブによるインピーダンス測定に対応する目的で、コプレーナ形状を有したセンサ素子を導入した。測定系も基本構成は、以前と同じであるが、ウエハプローブをセンサ素子に正確に接触させるために、3軸マイクロメータからなる高精度3軸マニピュレータを導入した構成とした。図 I3-2 に改良した測定系の外観図を示す。コプレーナ形状センサ素子は、反射測定 (s_{11}) 対応するために終端を短絡させた構造とした。

コプレーナ形状素子の、幾何学的形状が素子インピーダンス測定精度に及ぼす影響について、高周波電磁界シミュレーションを用いた検討を行なった。検討の結果、センサ素子インピーダンスと素子電極間の変位電流量の間には相関関係があることが明らかになり、この変位電流に起因して発生する負のリアクタンスと幾何学的な形状から生じるインダクタンス(すなわち正のリアクタンス)が相互に影響し合いながら、素子インピーダンスに測定誤差として重畳することが明らかになった。

磁気センサとしての商品イメージを想定して、我々が試作評価した素子寸法範囲における測定誤差は以下のようになる。すなわち、 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 磁性体薄膜をセンサ素子として使用する場合、センサ長さ 1 mm から 3 mm、センサ幅 10 μm から 100 μm 、ギャップ間隔 20 μm 、周波数 100 MHz から 1 GHz の条件において、形状インダクタンスは直流抵抗 110 Ω 以下で、変位電流は直流抵抗 110 Ω 以上で影響が顕著になる。一例として、図 I3-3 に、 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 磁性体薄膜の抵抗率を用いて計算した R_{100} および X/R_{100} のセンサ寸法に対する変化を示す。なお、ここで使用する特徴量の定義式は、以下のようになる。すなわち、キャリア周波数 100 MHz におけるインピーダンス実部成分を R_{100} とする。キャリア周波数 100 MHz におけるインピーダンス虚部成分を X_{100} 、キャリア周波数 1 GHz におけるインピーダンス虚部成分を X_{1G} とし、その差を X 、すなわち $X = X_{1G} - X_{100}$ とする。図 I3-3-1 は、 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ の膜厚 1 μm の場合で、図 I3-3-2 は、膜厚 2 μm の場合である。これらの図から、変位電流の影響が現われる ($X/R_{100} < 0$) のは、 R_{100} が 110 Ω 以上になった場合であることがわかる。

本検討から、コプレーナ型高周波キャリア型磁界センサの設計指針として、センサ感度を発生させる磁性体の効果を、電流を磁生体から逃がすことにより減少させるギャップ間変位電流は、極力小さくするように設計するべきであることがわかった。また、形状インダクタンスが大きすぎると磁気センサ感度に対し不要インピーダンスが大きくなることになってしまうため、これらを考慮した適正な素子設計が必要になることがわかった。

コプレーナ形状素子の形状影響に関する検討は、学会発表(日本応用磁気学会学術講演会(2002))を行い、論文投稿(日本応用磁気学会誌、Vol.27、No.4(2003))した。

2-3-2 高周波キャリア型磁界センサにおける素子断面アスペクト比制御による高感度・低バイアス化

高周波キャリア型磁界センサを低バイアス化するとともに高感度化する手法を開発した。

高周波キャリア型磁界センサは、インピーダンスが急峻に変化する領域を利用するためにバイアス磁界と呼ばれる磁界をあらかじめ素子に与えておく必要がある。バイアス磁界は、センサ素子に巻いたコイルあるいは素子に複合化した磁石により印加可能であるが、大きなバイアス磁界が必要となる場合、コイルの大型化、消費電力増加が問題に

なり、また、磁石の面積、厚さの増大が問題になる。いずれも、製品コストに大きな影響を及ぼすとともに、センサモジュールの大型化につながる。

本研究では、矩形状薄膜素子の幅と膜厚の制御により低バイアス化を実現した。図 I3-4 に素子幅と膜厚に対する GMI 特性を示す。図に示すように、膜厚が一定で素子幅を小さくすることでバイアス磁界の低減が可能となる。ただし、素子幅を小さくしすぎた場合はインピーダンス変化 (Z) が大きく低下する。

この現象を一般化させるために、素子断面アスペクト比 (素子幅 / 膜厚) とバイアスポイントの関係を図 I3-5 に示す。バイアスポイントは、GMI 特性のプロファイルにおける直線部の中点とした。図には素子長さ 2 mm と 1 mm の場合を示す。図 I3-5 に示されるように、素子断面アスペクト比とバイアスポイントは強い相関関係を示し、素子断面アスペクト比でこの低バイアス化現象を一般化して表現できると推測される。なお、本素子の試作プロセスは、従来と同じであり、以下の通りである。

レジストスピンコート
フォトリソによるパターニング
CoNbZr の RF スパッタ (Ar 雰囲気)
リフトオフ
回転磁界中熱処理 (673K - 40 k A/m、60rpm)
静磁界中熱処理 (673K - 40 k A/m)
電極パッドの作製 (リフトオフ法による)

ここで、さらに注目する点は、低バイアス化に伴う感度の向上である。図 I3-6 にその一例を示す。図は、素子長さ 2 mm、幅 20 μm で、膜厚を 1 μm から 3 μm まで変化させた場合のインピーダンス特性である。

この場合の感度とインピーダンス変化の膜厚に対する変化を図 I3-7、図 I3-8 に示す。なお、これらのデータは、キャリア周波数 600MHz におけるデータを示す。感度は 135 /Oe に達し、この際のインピーダンス変化は、30%程度低下する。しかしながら、バイアスポイントを低下させ感度を向上させる際、バイアスポイントを小さくしすぎるとインピーダンス特性に不連続性やヒステリシスなどの非線形性が生じる問題があることも明らかになった。以降の節において、これを踏まえた最高達成感度の検討を行なう。

ここでは、これらの実験結果を踏まえ、特許出願 (特願 2001-327068) を行なった。

2-3-3 素子断面アスペクト比制御による高感度・低バイアス化の原理考察

高周波キャリア型磁界センサにおける、素子断面アスペクト比 (素子幅 / 膜厚) 制御による高感度化に関する検討を前節で報告したが、この現象に関して発生原理の考察結果を以下に示す。

この現象におけるキーパラメータを矩形状磁性体薄膜の膜面において観察される磁壁の傾き角度として考察を行なった。図 I3-9 に磁壁傾斜角度の定義を示す。矩形状素子のキャリア電流通電方向に垂直な方向を幅方向とし、幅方向からの傾きを磁壁傾斜角度と呼ぶこととする。図 I3-10 に、高周波キャリア型磁界センサの GMI 特性の代表的なプロファイルを示す。本図におけるインピーダンスが極大値を取る点における外部磁界 (以下では“ピーク磁界”と呼ぶ) と素子断面アスペクト比の関係を示した図を図 I3-11 に示す。本関係図は、素子断面アスペクト比とバイアス磁界の関係図として以前の節で示した図と同等の図である。断面アスペクト比 15 以下でピーク磁界が低下し、この部分で感度が向上する。図 I3-12 は、断面アスペクト比と磁壁傾斜角度の関係図である。本図から、磁壁傾斜角度は、断面アスペクト比と密接な関係があることが示される。図 I3-13 にセンサ感度と磁壁傾斜角度の関係を示す。図 I3-13 より、磁壁傾斜角度で素子感度が増加する範囲を限定することが可能であることがわかる。

この素子感度増加の原理について、以下の考察をおこなった。すなわち、磁壁傾斜角度を磁化容易軸の方向と一致すると仮定し、単磁区無限大の薄膜磁性体のモデルを導入して、容易軸の傾斜が素子インピーダンスに与える影響を考察した。図 I3-14 において、磁化容易軸を X 軸方向とし、薄膜磁性体は XY 面内にあるとする。外部直流磁界 H_{dc} は XY 面内に印加されると仮定し、磁化容易軸と外部磁界のなす角度を δ 、磁化容易軸と高周波励磁磁界 h のなす角度を β とする。本報におけるモデルでは、磁化は薄膜面内方向のベクトルを有すると仮定し、仰角 φ は零度とする。異方性磁界と外部磁界により定まる磁化の安定方向の角度を ϕ_0 とすると、この系の高周波複素透磁率 ($\mu_{ri} = \mu_{ri}' - j\mu_{ri}''$) は、式(1)、(2)で表される。

$$\mu_{ri}' = \frac{\gamma^2}{\mu_0^2} \cdot \frac{M_s^2 \sin^2(\phi_0 - \beta)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (4\pi\lambda\omega)^2} (\omega_0^2 - \omega^2) \quad (1)$$

$$\mu_{ri}'' = \frac{\gamma^2}{\mu_0^2} \cdot \frac{4\pi\lambda\omega M_s^2 \sin^2(\phi_0 - \beta)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (4\pi\lambda\omega)^2} \quad (2)$$

本モデルにより、容易軸が傾斜角度を有した場合の、高周波透磁率の外部磁界依存性を計算した結果を図 I3-15 に示す。本図は、前述のように、磁化容易軸が磁壁角度と一致するという過程のもと、磁壁角度の変化に対する高周波透磁率の外部磁界依存性を示した。ピーク磁界と磁壁傾斜角度の関係を図 I3-16 に示す。図 I3-15、図 I3-16 より、理論と実測は、傾向として一致していることがわかる。しかし、定量的には差が大きい結果となった。これは、梯子状磁壁となる多磁区構造を有する幅数十 μm の素子に対して、面積無限大の単磁区薄膜モデルを導入したこと、さらに、磁壁傾斜角度に関する異方性強度の低下と角度スキューの増加の影響を無視したことが原因と考えられ、より定量的な考察をするためには、これらの影響を考慮したモデル構築が必要であると考えられる。

本検討は、日本応用磁気学会誌 Vol.27、 No.7 (2003) に論文掲載された。

2-3-4 素子断面アスペクト比制御による高感度化の限界点に関する検討

本検討では、この傾斜磁区制御による素子高感度化について限界点を明らかにした。以下にその結果を示す。

傾斜磁区の傾斜角を素子幅方向を基準にした傾斜角として定義すると、この傾斜角度を大きくすることでバイアス点が低磁界側にシフトし、素子感度も増加する。図 I3-17 にその例を示す。この条件から更に、磁区傾斜角度を増加させると、図 I3-18 に示すようなインピーダンスが不連続なステップ状に急激に変化する現象が生じる。高周波キャリア型磁界検出素子における高感度磁界測定は、外部磁界変化による素子インピーダンスの変化を利用しているため、連続でヒステリシスのないインピーダンス特性が有効である。図 I3-19、図 I3-20 に図 I3-17、図 I3-18 の素子特性を高精度に測定した結果を示す。測定は、磁気シールドルーム内部で外部磁気ノイズを遮断した状態で測定した。図 I3-19、図 I3-20 の高感度部分を更に高精度に測定した結果を図 I3-21、図 I3-22 に示す。図 I3-22 に示されるように、インピーダンス特性にステップが生じる特性では、精度を上げた測定においても 1 ステップで不連続的に変化する特性を示しており、しかもこの部分には磁場増加と減少でヒステリシス特性を有することが明らかになった。連続部分を利用した素子感度は、図 I3-21 において、86 / Oe (at 120) を達成していることが確認された。

以上の結果から、傾斜磁区制御による素子高感度化は、インピーダンス特性にステップ現象が発生する限界まで磁壁傾斜角度を傾斜させることで、最高感度が達成できることがわかった。そして、この感度は、 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ のアモルファス薄膜を素子材料として使用した高周波キャリア型磁界センサの場合は、 $86 \text{ } / \text{Oe}$ (at 120 、 500MHz) 程度であることが明らかになった。

2-3-5 高感度・低バイアス素子の環境安定性

高感度・低バイアス素子について使用環境における特性安定性を評価することを目的にいくつかの検討を行なった。以下に詳細を述べる。

高感度磁気センサは、実用化を考慮した場合、使用環境に対して安定した特性を有することが求められる。

図 I3-23 は、特性評価を行った測定系の外観図である。本開発磁気センサは、磁性体薄膜の強磁性共鳴周波数において感度が最大になる膜厚条件 (特願 2000-273053) を同時に満たしているため、駆動周波数 500MHz 付近で感度最大になる。このような高周波において、素子の電気特性を正確に評価するために高周波プローブを用いた測定系を構築し、これを用いて温度特性評価を行った。測定系は、試料固定部と高周波プローブマニピュレータ、磁場を印加するヘルムホルツコイル、ネットワークアナライザ、そしてデータ収集用コンピュータからなり、試料固定部と高周波プローブそしてヘルムホルツコイルを恒温恒湿槽内部に設置して評価を行なった。本評価系の測定誤差は、別途検討を行なった結果、本測定条件範囲内では、 ± 0.3 以内である。

図 I3-24 に、駆動周波数 500MHz における、外部磁界に対する素子インピーダンスの温度変化特性を示す。図 I3-24(1) は、温度範囲 -20 から 20 の結果で、図 I3-24(2) は、温度範囲 20 から 70 の結果である。図 I3-25 はこれらの測定値から、センサ動作点におけるインピーダンスの温度変化率を抽出したグラフである。本図より、 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ アモルファス薄膜で構成される本開発センサは、 $\pm 3\%$ 以内の良好な温度安定性を有することがわかる。

次の検討としてセンサの方位特性について検討を行なった。本開発センサは、素子の低バイアス化に伴い磁壁が素子幅方向に対し、斜めを向いた磁区構造を有することが明らかになっている。この斜め磁区が素子特性の非対称性を発生させる原因となるか否かについて検討を行なった。実験は、ヘルムホルツコイルで一定磁界を印加した状態でセンサ素子を基板面に 360° 回転させながらインピーダンス特性を測定することで行った。図 I3-26 に結果を示す。本指向性チャートにおいて、半径は素子インピーダンスを示す。本検討より開発素子は、斜め磁区に起因する特性の非対称性は発生しないことが明らかになった。

次に、 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ アモルファス薄膜で形成される高周波キャリア型磁界センサの温度劣化および湿度劣化を評価した。

試験項目は、以下の4項目である。

- (1) 湿度劣化 85 85%RH (200 時間)
- (2) 温度劣化-40 (100 時間)
- (3) " 120 (100 時間)
- (4) " 150 (100 時間)

評価は、50 時間ごとのインピーダンス特性 (キャリア周波数 50MHz) と外観検査を行なった。

図 I3-27 は、85 85%RH 湿度劣化試験における外観の一例である。Cu 電極の腐食が観察される。図 I3-28 は、本試験による素子インピーダンス $|Z|$ と素子感度 $|S|$ の磁場変化である。図の左半分は、素子幅 $20 \mu\text{m}$ の素子であり、右半分は素子幅 $100 \mu\text{m}$ の素

子の結果である。

図 I3-29 は、-40 温度劣化試験における外観の一例である。Cu 電極の腐食は観察されない。図 I3-30 は、本試験による素子インピーダンス $|Z|$ と素子感度 $|S|$ の磁場変化である。図の左半分は、素子幅 20 μm の素子であり、右半分は素子幅 100 μm の素子の結果である。

図 I3-31 は、120 温度劣化試験における外観の一例である。Cu 電極の変色が観察される。図 I3-32 は、本試験による素子インピーダンス $|Z|$ と素子感度 $|S|$ の磁場変化である。図の左半分は、素子幅 20 μm の素子であり、右半分は素子幅 100 μm の素子の結果である。

図 I3-33 は、150 温度劣化試験における外観の一例である。Cu 電極の変色が観察される。図 I3-34 は、本試験による素子インピーダンス $|Z|$ と素子感度 $|S|$ の磁場変化である。図の左半分は、素子幅 20 μm の素子であり、右半分は素子幅 100 μm の素子の結果である。

以上の結果をまとめると、 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ アモルファス薄膜で形成される高周波キャリア型磁界センサ素子は、保護膜なしでも高い耐環境特性を示すことがわかった。外観検査によると、素子の劣化は、Cu 電極部分が腐食劣化することが支配的である。

本事業で特許出願を行なった、細線低バイアス素子と低バイアス化が現われない条件の素子では、センサ特性の環境劣化特性が違っている。図 I3-28、30、32、34 に示されるように、本事業の発明である細線低バイアス素子は、いずれの条件でも良好な耐環境性を有していることがわかった。この理由については、熱膨張に起因する応力の発生や、細線化に伴う磁区構造の安定性変化等が考えられるが現在考察中である。

2-3-6 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ アモルファス薄膜の成膜安定性向上の検討

RF スパッタ装置による、1 バッチ複数基板成膜時の特性安定性向上について検討した。本検討は、素子歩留り向上という意味で産業化に直結する検討であるとともに、以降に報告する、薄膜磁石バイアス素子のセンサ素子のバイアス磁界と磁石薄膜の発生するバイアス磁界を正確に一致させるためにも重要な検討である。

本検討では、スパッタターゲットと基板の間に配置する遮蔽板の効果について検討した。

図 I3-35 に遮蔽板のない場合の概略図を示す。図 I3-36 は、遮蔽板を設置した場合のスパッタ装置内部の概略図である。

基板ホルダ上には、角度 120 度間隔で 3 枚の基板がセットしてあり、これを回転させることにより、1 枚ずつ順番に成膜した。この際の遮蔽板の効果は、以下が考えられる。

遮熱効果による基板温度条件の均一化

拡散的スパッタ粒子によるコンタミの防止

図 I3-37 に遮蔽板のない場合の複数基板成膜時のセンサ特性を示す。図には、キャリア周波数 100MHz 以下と 100MHz~1GHz の場合を別に表示してある。この場合、基板 1 枚目は良好なセンサ特性を有しているが、2 枚目、3 枚目は、キャリア周波数 100MHz 以下において特に特性劣化が激しい結果となっている。

図 I3-38 は、遮蔽板のある場合の複数基板成膜時のセンサ特性である。スパッタターゲットと基板の間に遮蔽板を配置することで、3 枚の基板いずれのセンサ特性も良好な特性が現われている。なお、本検討では、膜厚増加に伴う低バイアス化の発生条件を確認するために、3 枚の基板に 0.1 μm づつ膜厚を増加させて成膜した。図 I3-38 の結果は、膜厚変化に伴うバイアス磁界の低下を明瞭に示している。

以上の結果より、磁気センサ作製時の遮蔽板の有効性が確認できた。

2-4 薄膜磁石バイアスの複合化

2-4-1 薄膜磁石バイアス複合素子の試作

高周電流で波駆動される高周波キャリア型磁界センサへの適用を考慮して、センサ素子の特性インピーダンスが 50 に整合された薄膜磁石バイアス複合構造の検討を行なった。検討は、コンピュータシミュレーションを用いて行なった。具体的には、特性インピーダンス 50 のコプレーナライン配置を構成するように、長方形薄膜センサ素子の両側に間隔を隔てた磁石薄膜を配置した。センサ素子と磁石薄膜の間隔は特性インピーダンス 50 となるように制御した。結果として、この配置で必要な強度のバイアス磁場を印加可能であることが明らかになるとともに、バイアス磁場分布を均一化するためには、センサ素子より磁石薄膜の長さを長くすることが有効であることを明らかにした。

また、薄膜磁石として採用した SmCo_5 薄膜について、センサ素子との複合化プロセスについて検討を行ない、センサ素子の作製工程で不可欠な熱処理工程において SmCo_5 磁石薄膜の磁化が劣化することが明らかになり、複合素子の作製手順として以下の手順をとることが有効であることを明らかにした。

(手順 1) 高周波キャリア型磁界センサ素子 ($\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$) 作製

(手順 2) バイアス磁石薄膜 (SmCo_5) 作製

磁石薄膜をセンサ素子に対してコプレーナ配置する構造は、この作製手順と相性が良く、しかも、薄膜プロセスで作製する際、少ない工程数で寸法精度が高い素子を作製できるなどメリットが大きい。

本検討では、以上の知見に則り、コプレーナ配置の薄膜磁石バイアス構造を採用し試作評価することとした。

試作した素子の寸法を [図 I3-39](#) に示す。センサ素子は $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ のアモルファス薄膜で膜厚 $2.1\ \mu\text{m}$ とした。このセンサ素子の動作点は $3\ \text{Oe}$ であった。これより、本検討では、バイアス磁界 $3\ \text{Oe}$ を目標値としてバイアス磁石薄膜の複合素子を試作した。

[図 I3-40](#) に試作した薄膜磁石バイアス複合素子の拡大写真を示す。 SmCo_5 アモルファス薄膜は、RF スパッタによる磁場中成膜で、成膜と同時に磁化が形成されている。

薄膜磁石バイアスを複合化した素子の GMI 特性を [図 I3-41](#) に示す。本図には、薄膜磁石バイアスが複合化される前の GMI 特性も併せて示した。本図から、薄膜磁石バイアスを複合化すると、これにより発生するバイアス磁界のため、インピーダンスが極小となる位置が $2.8\ \text{Oe}$ まで移動し、外部磁界 $0\ \text{Oe}$ においてほぼ素子動作点となることがわかった。

本構造の素子は、良導体である SmCo_5 磁石薄膜を導電路としても作製可能である。このような構造を採用することで、素子構造を簡略化することが可能であり、素子の小型化、製造コスト低減に有効である。本構造については、特許出願 (特願 2003-126923) を行なった。

2-4-2 薄膜磁石バイアス複合素子の環境安定性

[図 I3-42](#) にバイアス複合素子の温度特性を示す。本図から、 $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜で作製されるセンサ素子単体の温度特性に比較してインピーダンスの温度ドリフトが 30% 程度改善していることがわかった。この原因として、 SmCo_5 磁石の残留磁束密度の温度変化がセンサ素子と逆の符号を持ち、お互いに打ち消し合っているためと考えられる。

以前の検討で、センサ素子である $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ 薄膜の耐環境特性は良好であることを明らかにしたが、今期は薄膜磁石バイアスに用いた SmCo_5 アモルファス薄膜の耐環境特性についても検討した。

図 I3-43 に、SmCo₅ アモルファス薄膜の BH ループの温度変化を示す。室温において、保磁力は 30 Oe であったが、70 °C では 20 Oe と低下した。120 °C ではさらに低下し 15 Oe 以下となった。

図 I3-44 にバイアス磁界の温度変化である残留磁束密度の温度変化を示す。室温から 150 °C まで単調に減少し、その減少率は、平均すると-0.03 [%/°C] であった。150 °C まで加熱した後、室温まで冷却した再にも非可逆的な特性を示さないことが明らかになった。

図 I3-45 は、85 °C 85%RH の恒温恒湿環境で長時間保持した場合の残留磁束密度の変化である。85 °C 85%RH に 175 時間放置しても残留磁束密度の変化は 0.4% 以下と良好であった。

図 I3-46 に 85 °C 85%RH への放置時間が、125 時間のサンプルにおける BH ループを示す。放置時間が長くなるにつれ保磁力が増加し、125 時間で 100 Oe まで増加することがわかった。この結果は、SmCo₅ アモルファス薄膜の保磁力増加の可能性を示すものである。

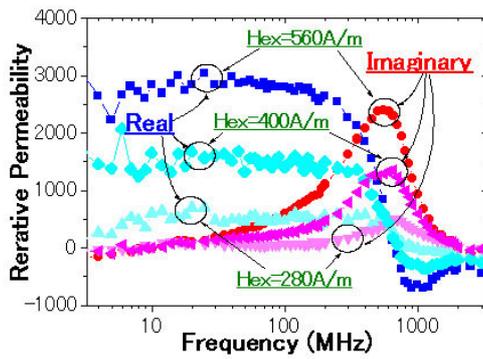


図 I1-1

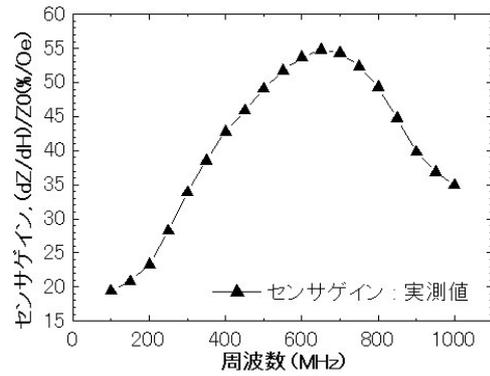
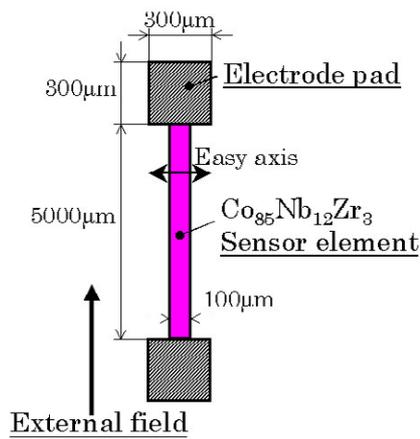
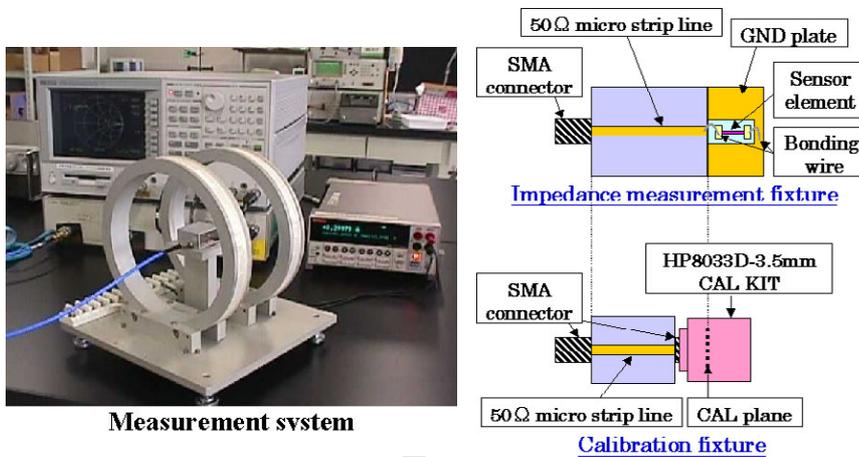


図 I1-2



- Fabrication of sensor element
1. PE(ZPN1100)
 2. CoNbZr RF-sputter
 3. Lift-off
 4. Anneal(673K)
 - ①40kA/m rotational
 - ②40kA/m static
 5. PE(AZ4620)
 6. Cu RF-sputter
 7. Lift-off
- Fabrication of electrode pad

図 I1-3



Measurement system

図 I1-4

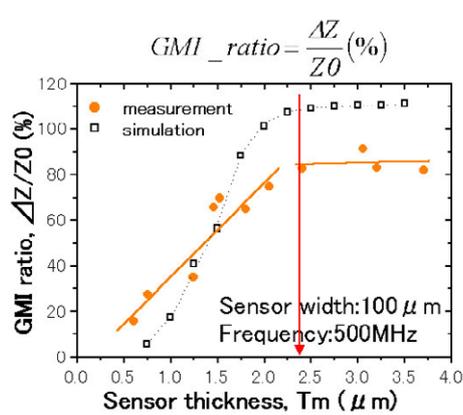


図 I1-5

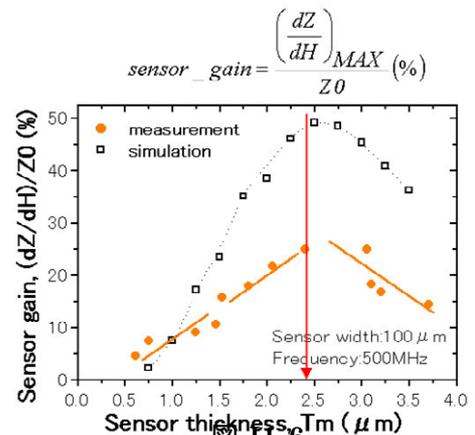


図 I1-6

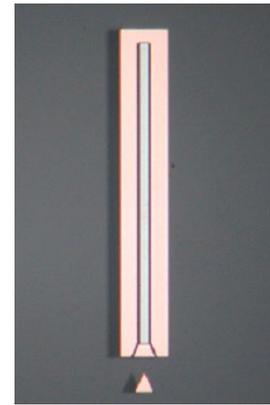
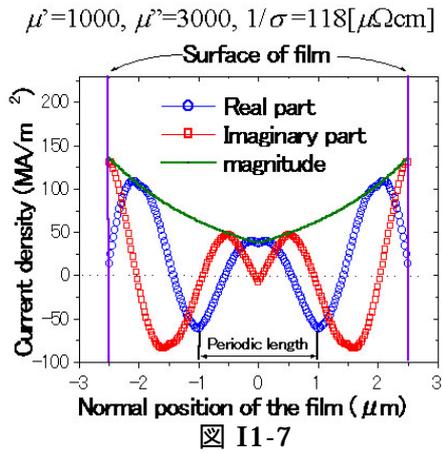


図 I3-1

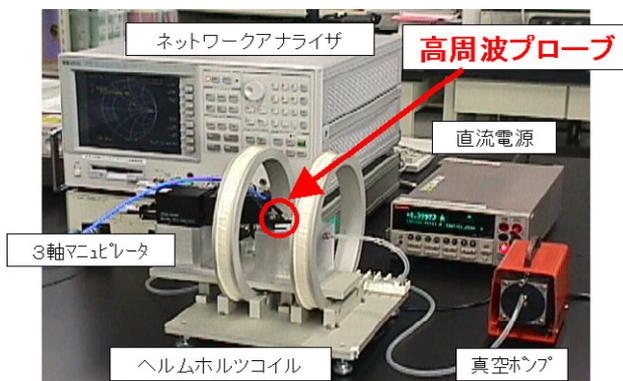


図 I3-2

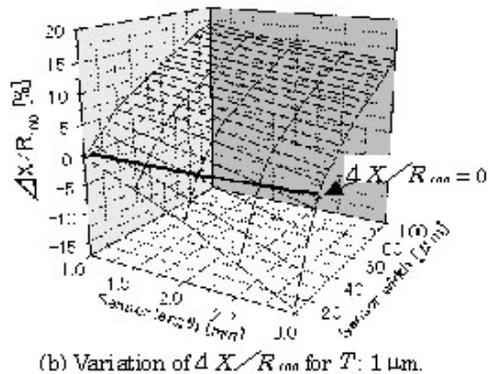
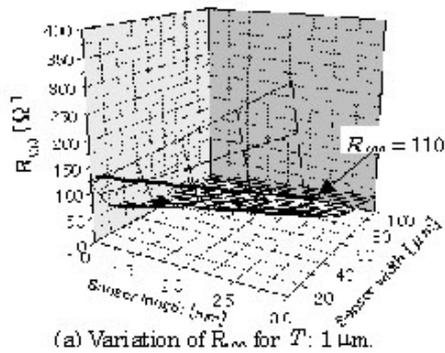


図 I3-3-1

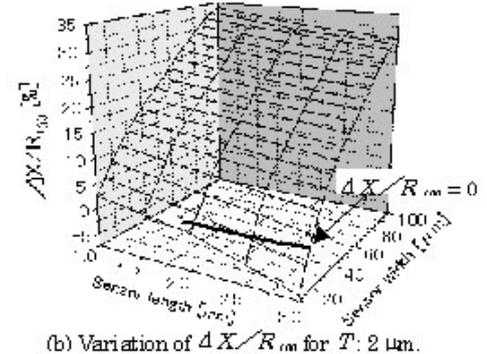
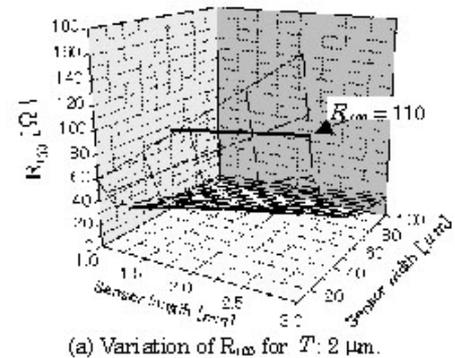
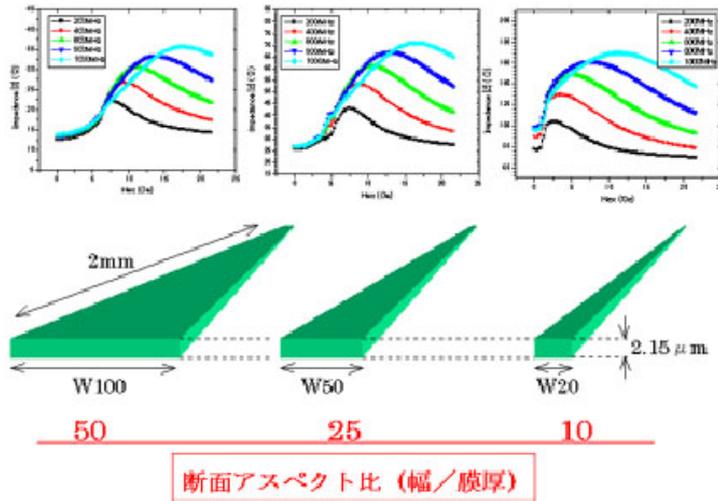
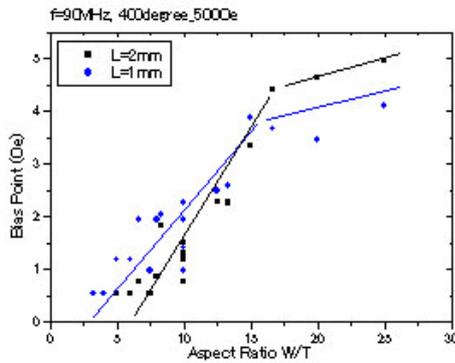


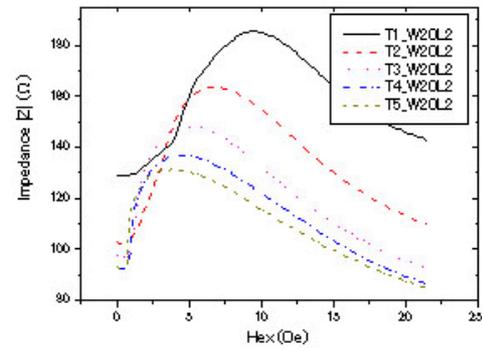
図 I3-3-2



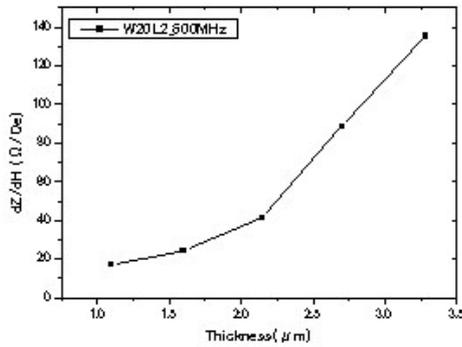
☒ I3-4



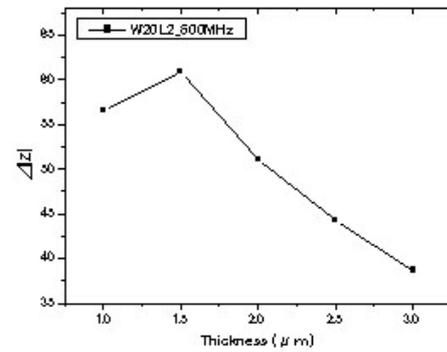
☒ I3-5



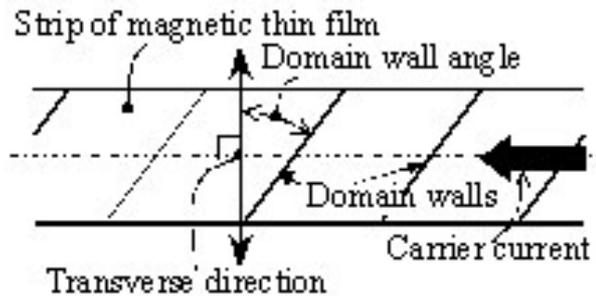
☒ I3-6



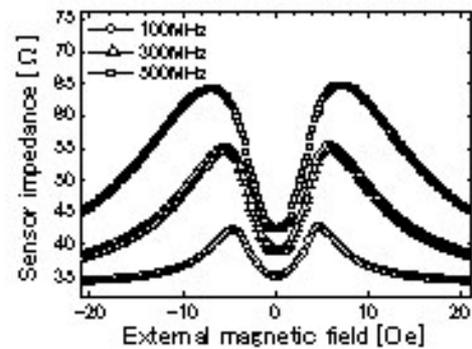
☒ I3-7



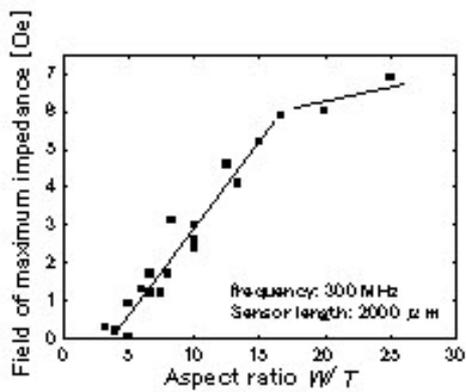
☒ I3-8



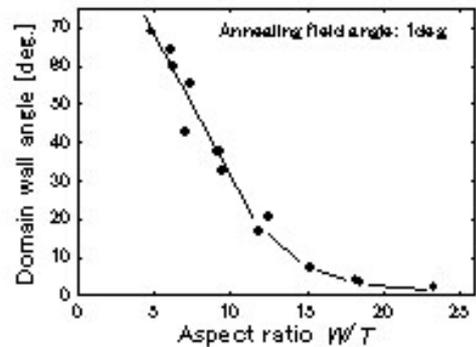
☒ I3-9



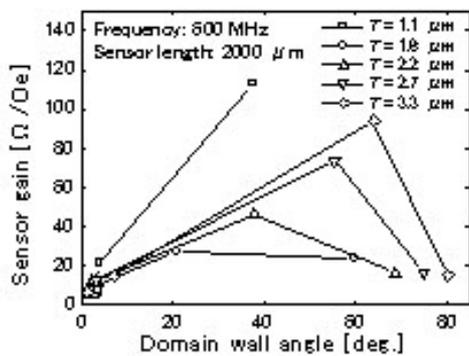
☒ I3-10



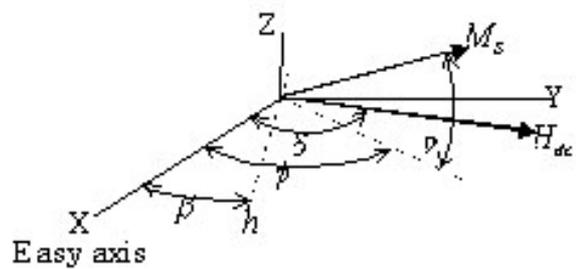
☒ I3-11



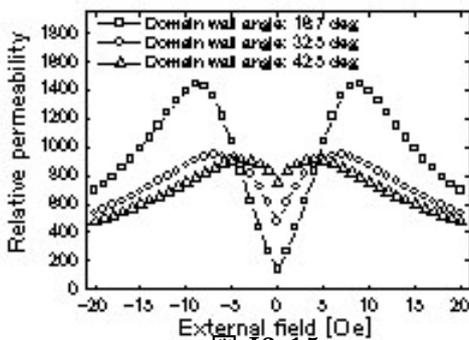
☒ I3-12



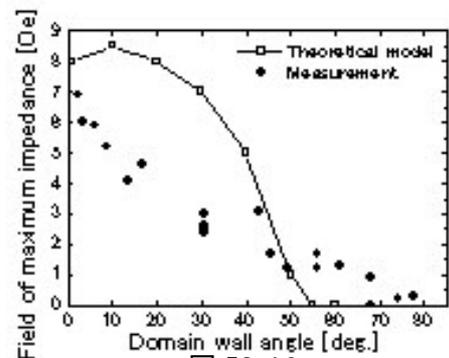
☒ I3-13



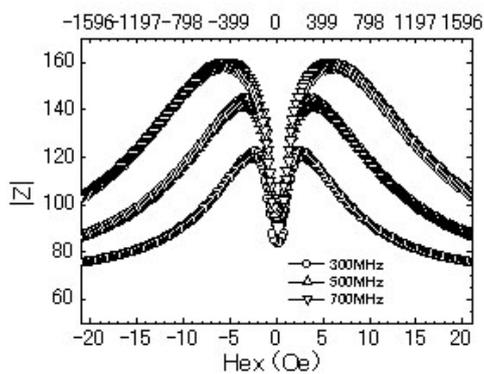
☒ I3-14



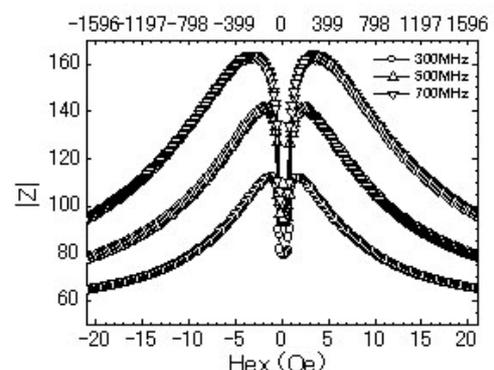
☒ I3-15



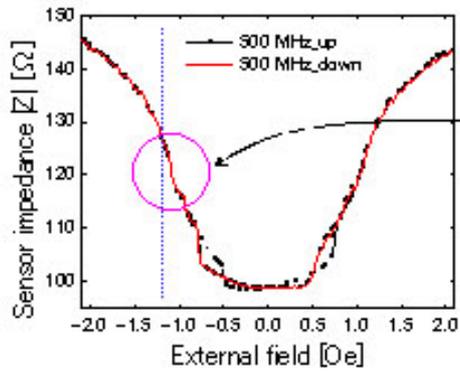
☒ I3-16



☒ I3-17

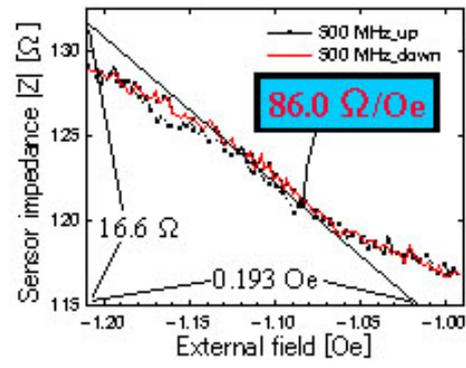


☒ I3-18



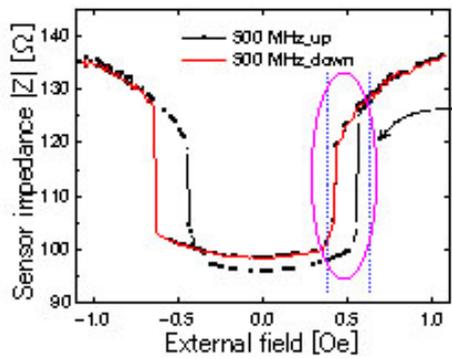
$$\Delta H_{\text{Hex}} = 21.6 \text{ [mOe]}$$

☒ I3-19



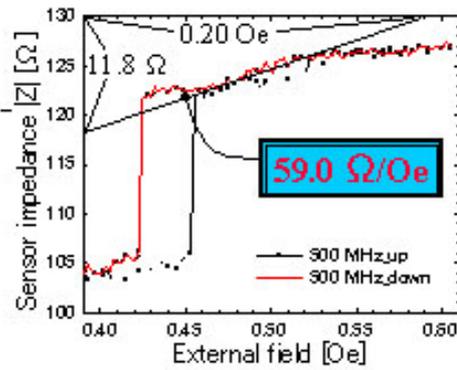
$$\Delta H_{\text{Hex}} = 2.16 \text{ [mOe]}$$

☒ I3-21



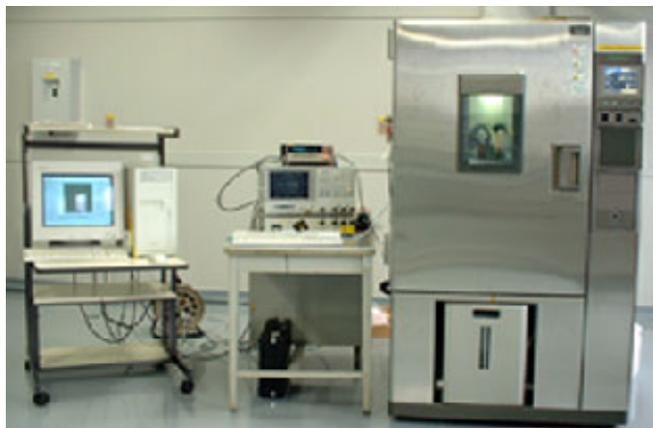
$$\Delta H_{\text{Hex}} = 10.8 \text{ [mOe]}$$

☒ I3-20

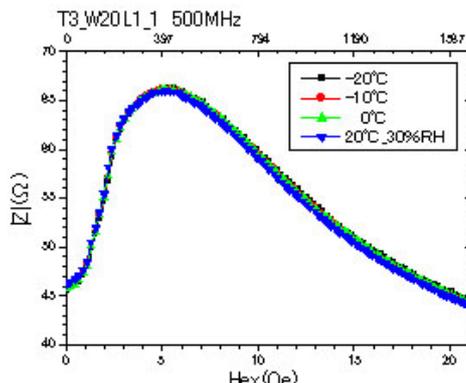


$$\Delta H_{\text{Hex}} = 2.16 \text{ [mOe]}$$

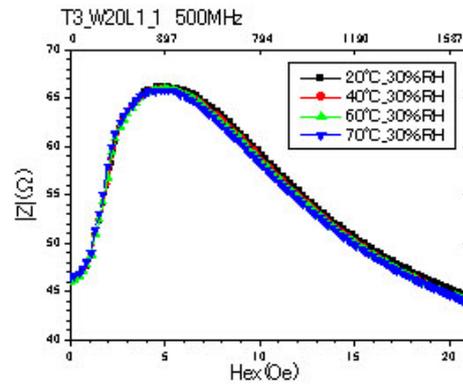
☒ I3-22



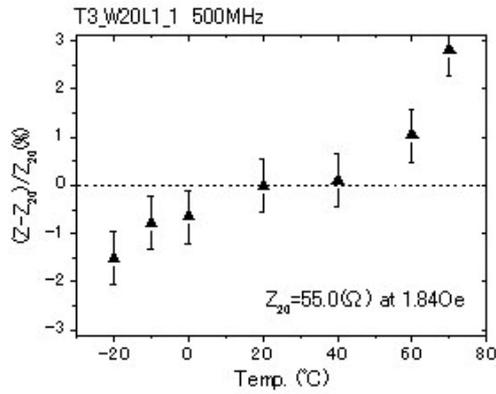
☒ I3-23



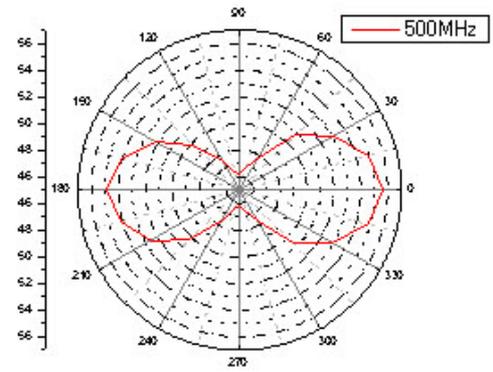
☒ I3-24(1)



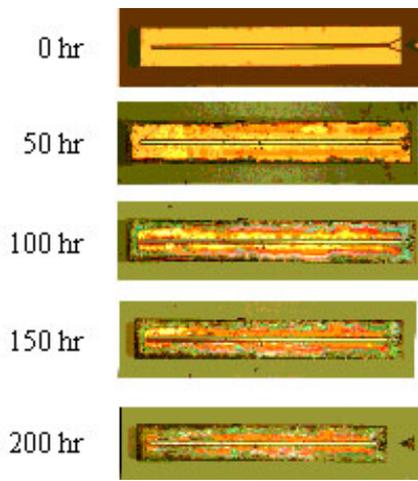
☒ I3-24(2)



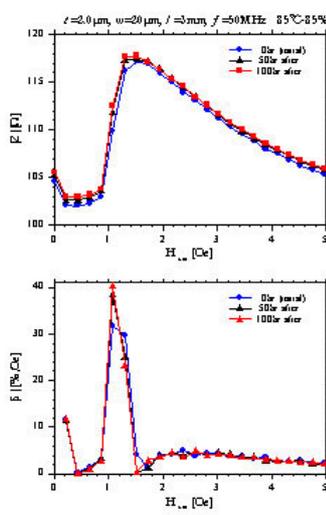
☒ I3-25



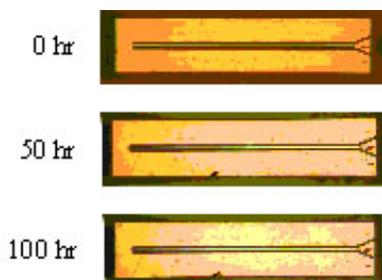
☒ I3-26



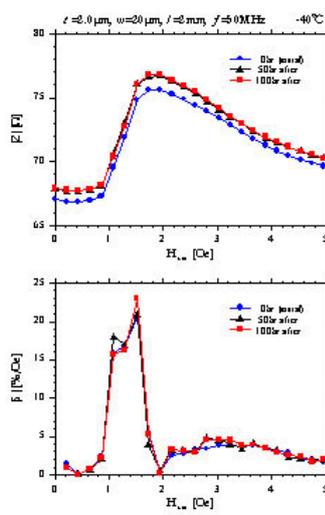
☒ I3-27



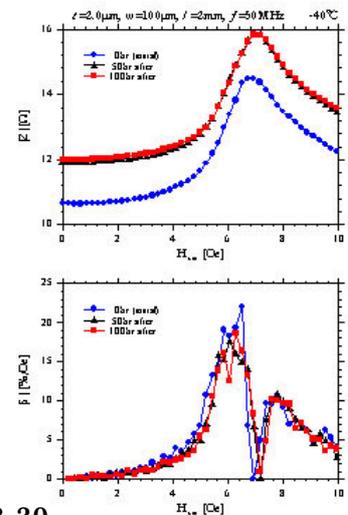
☒ I3-28



☒ I3-29



☒ I3-30



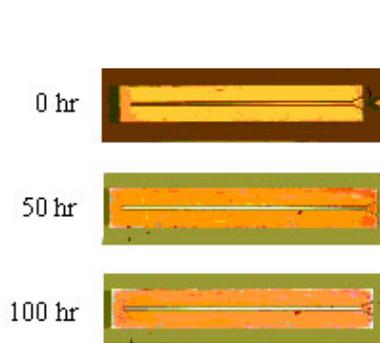


図 I3-31

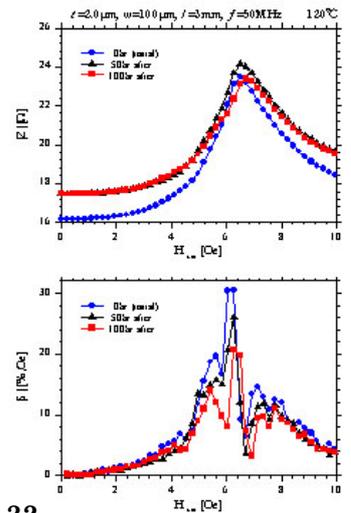
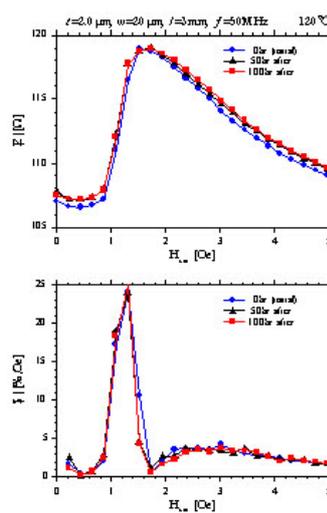


図 I3-32

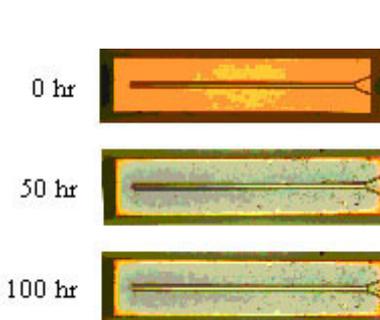


図 I3-33

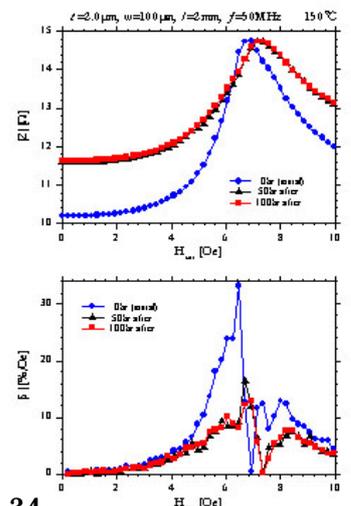
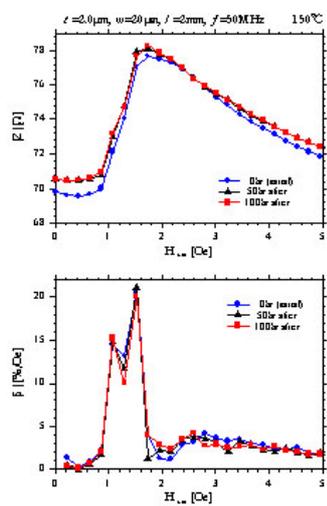


図 I3-34

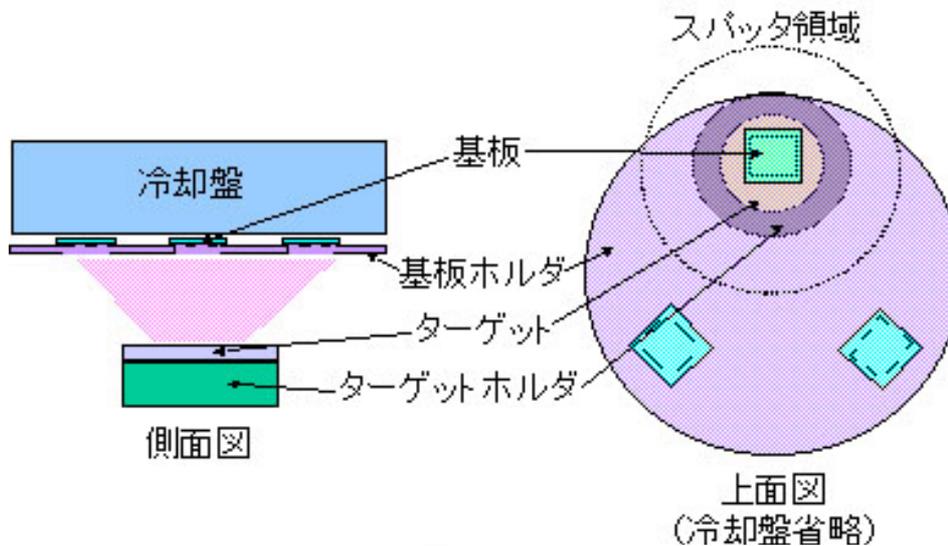


図 I3-35

3 ac マーカおよび検出回路の製作

フェーズ :

(1) 概要

マーカ内蔵型電池、発振回路および交流磁界発生コイルからなる ac マーカを提案し、交流磁界発生コイルの基本的な設計を行った。

(2) 目標

交流磁界発生コイル部の設計指針を得ることとおもに、発振回路の基本的な設計をする。

(3) 内容

後述する。

フェーズ :

(1) 概要

発生磁界を最大とするためのコイルの設計指針を確立した。発振回路と組み合わせて超高感度な交流磁界検出システムを構成した。

(2) 目標

磁界発生コイルの最適設計をする。発振回路と組み合わせることで実際に ac マーカを動作させる。

(3) 実施内容

後述する。

3-1 設計シミュレーション

AC マーカからの発生磁界を最大にするためのフェライト寸法・巻線方式について計算により検討した。マーカの外形寸法は 7mm × 12mm、電源部の仕様は 305kHz、2V、150mA と定め、表皮効果による抵抗増加を抑制するため巻線としてリッツ線を施すものとし、リッツ線の素線の直径は 250μm 以下にすることを計算条件とした。

コイルとコンデンサの接触抵抗が十分小さい場合について発生磁界が最大になる寸法は、フェライトの寸法が 0.3mm × 12mm、リッツ線の巻数が 4 ターンであることを得た。この形状で得られる発生磁界強度は、マーカのマーカ端面から 100mm の位置で、計算上 3.8mOe である。

このマーカではコイルおよびコンデンサ間の接続部における抵抗が発生磁界に影響を与えることが考えられるため、接続部の抵抗を 10mΩ - 1000mΩ の場合について、発生磁界が最大になるマーカ形状と発生磁界強度を検討した。その結果、コイルとコンデンサの接触抵抗の大きさによって発生磁界が最大になるフェライト寸法・巻線形状は異なり、また、接触抵抗が大きいほど得られる磁界強度は小さくなる。

最適設計への最後の関門は、300 ~ 500kHz 帯では、コンデンサの容量が周波数に対して低下する (ESL の影響) ことと、等価直列抵抗 (ESR) がフェライト磁心の抵抗分に比べて大きいことである。

3-2 試作と評価

ac マーカからの発生磁界を最大とするためのフェライトコア寸法・巻線方式について引き続き検討しているが、シミュレーションと同時に、実際にマーカを試作・評価し、シミュレーションデータとの比較を行う必要があり、部材の手配・入手及び作製加工を行った。

平成 13 年度第 1 四半期に報告したように、コイル層間の相互インダクタンスを適切に計算することによって、インダクタンスの計算誤差は高々 11% に収めうるようになっている。この解析法を設計に適用し、5 種類 (305、335、365、395 および 425kHz) の AC マーカを作製し、発生磁界測定について実験した。

☒ A-1 に示すように 305、335 および 365kHz で動作するコイルのインダクタンスについては、実験値と計算値とは誤差 8% 以内で一致した。しかし 395、425kHz のコイルは誤差が 20% になっていた。この原因は、リッツ線を作製する場合の占積率に個人差があ

ったためと考えられる。

このコイルと並列にコンデンサを接続し、共振回路を構成した。コンデンサ容量は、共振周波数を f_r とすれば基本的に $C = 1/4\pi^2 f_r^2 L$ と求められる。しかし、公称値がこの値にほぼ等しい積層セラミックチップコンデンサを接続した場合、実際の共振周波数は、計算値を下回った。その理由は静電容量の公称値と実際の値との間にばらつきがある為と推察しているが、詳しくは今後検討する。

以上の状況に基づき、実験では共振周波数が所定の値となるよう、コンデンサ容量を合わせこんだ。合わせ込みは $\pm 3\text{kHz}$ 以内で可能であった。共振時のインピーダンスは、電源回路に整合をとり 13.3Ω となるよう設計されている。しかし、実際には $5\sim 8$ と低かった。これには、コンデンサの等価直列抵抗 (ESR) が影響した可能性がある。上述したコンデンサの公称値と実際値との関係も含め、早期に積層セラミックチップコンデンサの特性を掌握する必要がある。

以上のようにして出来上がった LC 共振回路から交流磁界を発生させ、発生磁界強度を測定した。センサには本研究により開発した高周波薄膜磁界センサを用い、これを遮蔽率 60dB の一端開口型パーマロイ 3 重磁気シールドケース内に収めた。AC マーカをセンサから徐々に遠ざけつつ、センサ出力を測定した。ここで、検出回路方式として搬送波抑制回路を用いることにより $6.2 \times 10^{-7}\text{Oe}$ の微弱な磁界を測定できた。また、その時のセンサ・マーカ間距離は 1150mm であった。

ここで、マーカがシールドケース開口端に 9cm まで近づくと発生磁界強度が変化した。これは 5 種類のマーカすべてで同じであった。その原因は、磁気シールドケースがマーカから発生する交流磁束の磁路の一部を構成しており、その磁路構成がマーカの位置によって変化するためと推察している。実際のモーションキャプチャシステムではシールドケースは用いないため、これは特段問題にならないと考えている。

すでに交流磁性マーカからの発生磁界強度を一端開口型シールドケースの内部から外部に跨って測定すると、シールドケース開口部の 9cm 内側で発生磁界強度が変化したことを報告したが、この原因は、磁気シールドケースが磁性体の役割を果たし磁気鏡像が生じているためと考えられる。そこで、シールドケースを使わずにセンサにはヘルムホルツコイルを使用してバイアスを加えて発生磁界強度測定をした。その結果、問題となっていた発生磁界強度の変化は認められなくなり、交流磁性マーカからの距離の - 3 乗に比例して発生磁界強度が単調減少する傾向がみられた。

次にコイル部の設計、製作方法について述べる。新たに、コイルとコンデンサの装着用にプリント基板を用い、またコイルの巻線を施すための巻治具を使用した。プリント基板を用いる事でコイルの引き出し線が短く出来ること、コンデンサの取り付けが容易になり以前と比べ、少ない半田の量で取り付けできた。またコイルを作製する際に巻治具を使用した結果、コイルのインダクタンスの実験値は計算値と比較して 5% 以内で収まり、作成者によるばらつきも改善できた。なお従来は、作成者二人の間の誤差は約 20% と大きかった。

更に、共振インピーダンスを AC マーカの電源 2V 、 150mA の比に等しい内部抵抗 13.3 に近い値を得るために、その妨げとなるコンデンサの等価直列抵抗 (ESR、Equivalent Series Resistance) について検討した。測定にはロックインアンプを用いた。ロックインアンプは精度が良く、プローブを使うことにより四端子測定ができるので接触抵抗が除去できるなどの利点が挙げられる。共振用コンデンサとしては、従来は測定で一番 ESR の低かった 104Z ($10 \times 10^4 \text{pF} = 100\text{nF}$ の意味) のコンデンサのみを用いることとし、ロックインアンプによる測定も同規格の部品に限った。その測定結果に基づいて ESR の小さい部品を選び、共振回路 ($305\sim 425\text{kHz}$ 用) を作製した。共振点は 5 つの駆動周波数の $\pm 3\text{kHz}$ 以内で収めることができた。共振インピーダンスは 13.3 付近まで上げることに成功した。しかし、それに満たない共振回路については同じコンデンサ (104Z) でも ESR のばらつきがあるからか、もしくは補足に違うコンデンサを使用したために ESR が増加したのではないかと考えられる。

続いて回路中のすべてのトランジスタが正しいバイアスで動作するように各抵抗素子の値を再調整した。また TR2 と TR3 の接続をエミッタホロアにすることでコイルに加わる電圧を増加させ、セラミック振動子の共振周波数を共振回路の共振周波数である

407kHz に正確に一致させた。下図はその回路図を示したものである。この回路の修正により共振回路のコイルに加えられる電圧を $2V_{0-p}$ にすることが出来た。図 A-2 はその際の回路図を示したものである。今後は AC マーカを駆動する際にさらに安定な発振をはかる回路構成を検討する。

3-3 AC マーカ用処理回路の開発

ac マーカ検出部の製作：高周波キャリア型磁界センサを用いた 3 軸（X、Y、Z 軸）磁界センサの製作において現時点で以下の結果を得ている。現在解析中の部分も含まれているが、1）X 軸センサに対して隣接する Y、Z 軸センサを 10 mm の距離に設置した場合 X 軸の出力に対する誤差の影響は 2 % 以下であった。この 2 % が妥当であるか検討した。2）外部高周波磁界に対し、センサ角度を変えた場合 0 度（磁界と平行）方向から 75 度までは角度と共に検出信号は減衰するが 75 度から 90 度までの角度で出力が増加する傾向が観測されている。これはについて電子回路、センサ、バイアスコイルが 1 つの基板上に搭載されているため分離した計測を行なう必要がある。

3-3-1 検出回路の高精度化と小形化（AC マーカ検出回路）

平成 12 年度第 1 四半期では、前年試作を終えたコイルセンサを用いた検出回路のオペアンプの再選定と、フロントエンド回路周りを中心に低雑音化設計・製作により、年初 0.4mGpp あった雑音を 0.1mGpp、0.026mGpp と段階的に低減したことを報告した。引き続き今期は、広ダイナミックレンジの確保を目指し、更なる低雑音化と線形応答領域拡大の改善を行った。

低雑音対策としては、ミキサ回路に入力するローカル信号源を改造し、周波数を高周波側に変更すると同時に振幅を安定して寄生雑音スペクトルの発生を抑制した。また、抑圧比の高い中間周波フィルターへ変更して不要スペクトルを除去した。直線応答領域の確保策としては、入力信号の大きさに応じて利得を 10 倍切り換える回路を採用し、検波回路に入力する信号振幅を約 10mV 以上となるようにした。

以上の結果、0.0065mG の磁界を on/off スイッチした時、出力応答を示す図 2 から判る通り弁別可能であった。オン時の雑音は 0.0055mGpp であり、従来の約 1/5 に低減している。入力磁界に対する出力電圧の応答は、図 A-3 に示される。0.016mG ~ 100mG 以上の範囲で直線性が確保されており、これは当初要求仕様である 0.05mG ~ 100mG を十分に満足するものである。

AC マーカ検出回路は、基本的に所期の目的を満たす性能を実現できた。残る課題は、見直しが不十分な整流回路の改善と、ソフト処理を含めた回路全体の最終纏めと、その特性評価である。

3-3-2 検出回路の高精度化と小形化（AC マーカ検出回路）

AC マーカにより発生する高周波磁界の高感度・高精度検出回路の機能検証開発として、フロントエンド回路の低雑音化、ミキサ回路の不要周波数成分の除去、最終段増幅回路のレンジ切り替えなどを試み、雑音レベルは 0.006mGpp 以下、直線応答領域は約 0.016mG ~ 100mG が得られた。今期は最後の詰めとして、多チャンネル動作させ、クロストーク特性と最終的な特性評価を行った。

クロストークについては、一つのセンサに最大入力磁界 100mG を印加すると同時に、別のセンサの入力をショートして零とした時の出力を測定した。その結果は、0.06mG であった。フロントエンド回路部出力には AC 出力信号は認められず、後段の増幅回路で生じている。原因は、基板の GND と電源をベタパターンで設計してあり、後段の増幅回路が互いに結合していることによる。これを解決するには、GND 間のアイソレーションと各チャンネル間の電源ラインに高周波抑圧フィルターを設けるように変更すれば良い。このような再試作を実施すれば、クロストークは一桁以上減少して雑音レベルと同等以下にまで下がることが予測できる。しかし、クロストークがある現状でも、0.1mG の測定精度の確保には問題がない。

続いて、一つのセンサに 305kHz の磁界を任意の振幅で印加すると同時に、別のセンサには 335kHz の 100mG の磁界を ON/OFF 変調して印加した。最初のセンサの出力は、

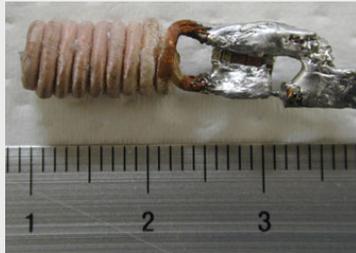
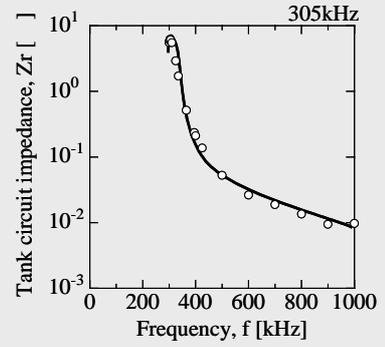
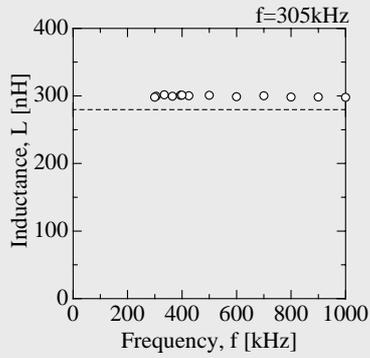
335kHz の磁界に影響されずに一定の 305kHz の磁界を計測することができた。これは、AC マーカ同士の周波数が 30kHz 離れていれば周波数弁別特性が良好で、雑音以下に納まっているを示しており、要求仕様を十分に満たしている。

最終回路に対する線形応答性についても、高精度な特性評価を実施した。従来の測定では、印加した AC 磁界強度は信号発生器自身が示す値に比例するものと見なしてきた。しかし、数%の誤差が不可避のため、見かけ上直線性は必ずしも良くなかった。今回は発生器の出力を校正する手段を導入した結果、校正誤差は 0.001mG 以下が得られた。☒ A-4 に示される通り、最小二乗近似直線と実測値との乖離が 0.005mG 以内に収まる直線応答領域は、共に 0.016mG まで直線応答していることが判った。

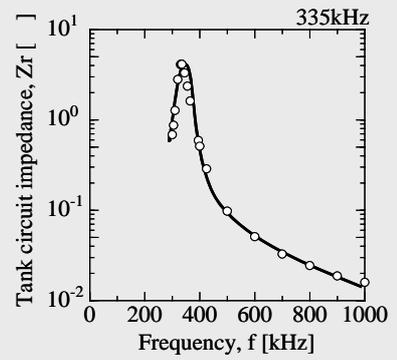
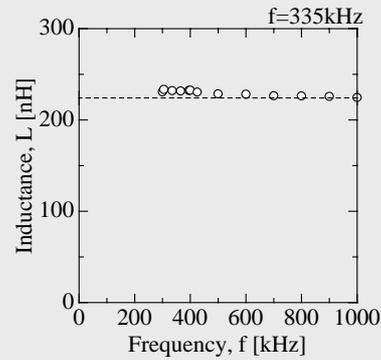
今回で、クロストーク特性には多少問題は残すが、検出回路は全体的に要求仕様を満たす結果が得られた。なお、残った問題も本格試作時には解決できる。



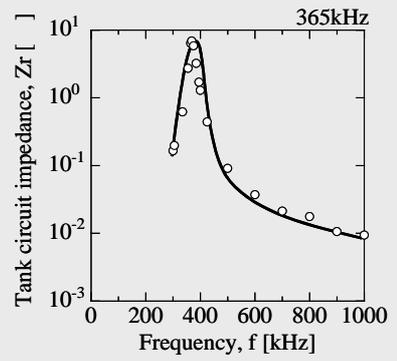
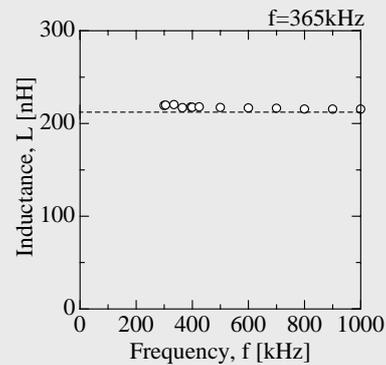
コンデンサ容量 $C_r = 812 \text{ nF}$
共振点 308 kHz



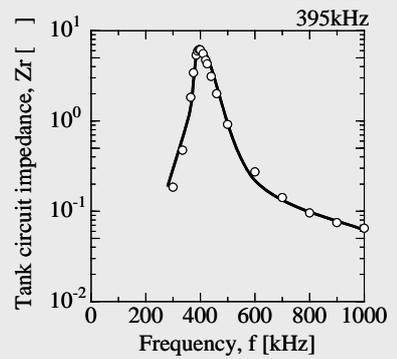
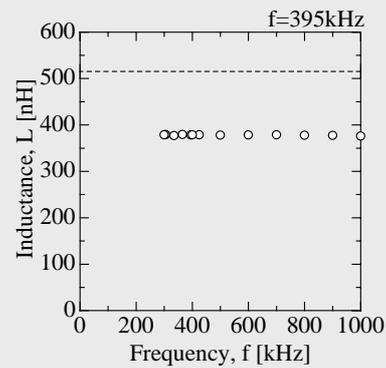
コンデンサ容量 $C_r = 766 \text{ nF}$
共振点 336 kHz



コンデンサ容量 $C_r = 841 \text{ nF}$
共振点 367 kHz



コンデンサ容量 $C_r = 383 \text{ nF}$
共振点 392 kHz



コンデンサ容量 $C_r = 442 \text{ nF}$
共振点 426 kHz

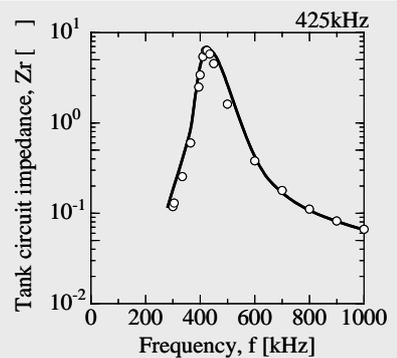
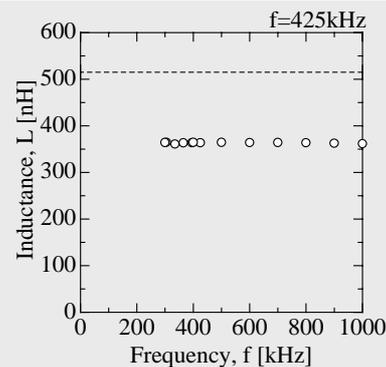
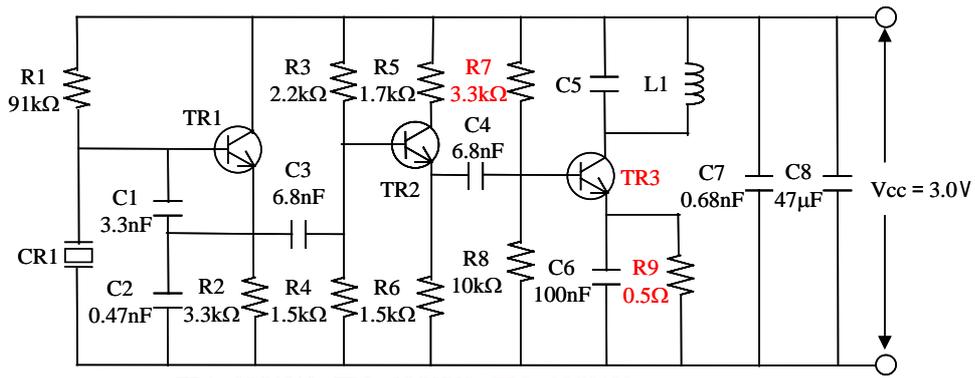
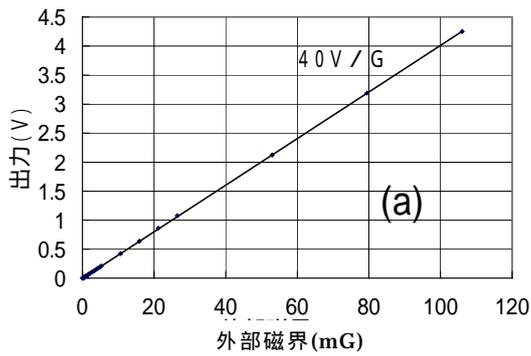


図 A-1 305 ~ 425kHz AC マーカ (電子回路なし)

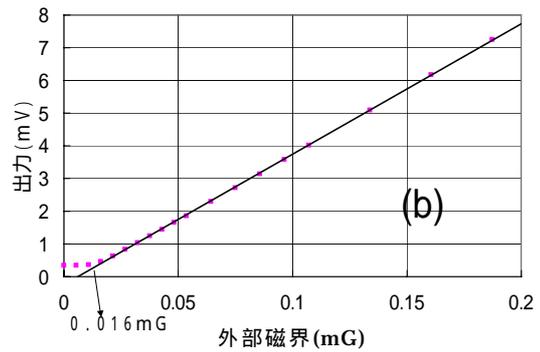


TR1 : 2SC1213 , TR2 : 2SC2758 , TR3 : 2SC2120

図 A-2 交流磁性マーカ用発振回路

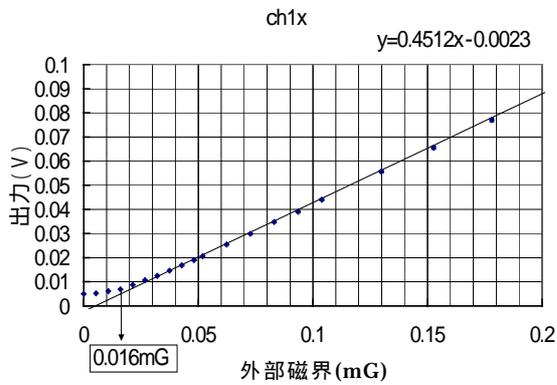


(a)大信号応答

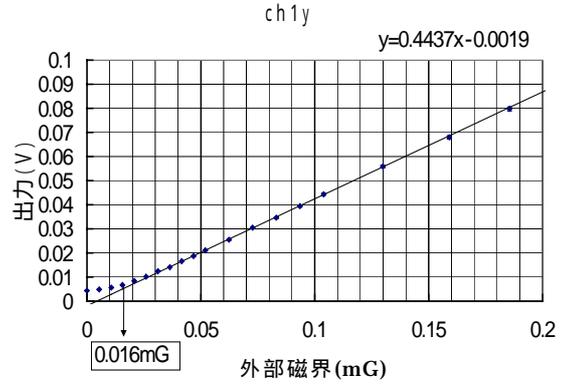


(b)小信号応答

図 A-3 センサ感度特性



(a) x チャンネル



(b) y チャンネル

図 A-4 センサ感度特性

4 関節運動リアルタイムセンシングユニット

フェーズ

(1) 研究の概要

交流磁界を用いた3次元位置検出システムを関節運動リアルタイムセンシングに応用、1次試作として1関節運動、2次試作として2関節運動を表す装置を製作。センサの姿勢角およびセンサと発振マーカとの相対位置、方向の計測が基本的に可能となり、リアルタイム計測を確認した。

また、信号の飽和を自動的に防ぐオートレンジ機構を1次試作に適用、正常に動作していることを確認した。

(2) 研究の目標

四肢関節運動リアルタイムセンシングシステムの開発

(3) 実施内容

【マーカとしての直流磁界と交流磁界】

いままで取り組んできた顎運動計測システム、無配線情報入力システムは直流磁界をマーカとして用いた位置検出システムであったが周りの直流磁界の環境に影響されやすいこと、5自由度までの動きまでしか検出できないことなどの問題を含んでいた。

これに対し、交流磁界をマーカとして用いた場合、同一中心に巻いた3軸コイルを用いれば6自由度までの動きを検出することが可能で、周りの直流磁界の影響も無視することができる。ただし、発生磁界を直流磁界並の強さにするには無配線で行うことは同一サイズで考えると難しく有線で励磁を行う。

【一般市販品との比較】

交流磁界の位置検出装置としてはアメリカのポヒマス社が販売している3SPACE

FASTRAKが有名であるが、大きく異なる点は本システムが交流と直流両磁界検出可能で地磁気を検出して地上に対しての姿勢を反映させることが可能なことである。また、発生磁界とセンサの個数関係であるがポヒマスは発生磁界1に対しセンサ多、本システムは発生磁界多に対しセンサ1という関係を持っている(本試作は1対1)。

前者は、発生磁界1個を固定にし、動いているセンサ群がその磁界を拾う形をとり、ある固定空間内では検出可能であるが磁界の弱い固定空間外では検出できなくなってしまう恐れがある。

これに対し本システムは、マーカ(図K-2)、センサ(図K-3)共に比較的小さくできているため、それらを体に取り付ければ、センシングシステム本体へつながるケーブルが届く範囲で移動可能なため上記のような制約は受けない(図K-1)。

【ハードのブロックダイアグラム】

ハードのブロックダイアグラムを図K-4に示す。

図中30の発信器から出た交流信号(15.36kHz)は31のマルチプレクサ、増幅器を通り、48Hzごとに3つのコイルを励磁する。そのタイミングを図K-5に示す。

48Hz(20.83msec)間隔でマーカのX軸、Y軸、Z軸に巻かれたコイルマーカ1X、マーカ1Y、マーカ1Zが最初の5.2msecを無励磁区間とした後、交互に5.2msecづつ励磁される。

35、36、37のコイルから励磁された交流磁場は直角に置かれた3つのMRセンサによってx、y、z成分として捉えられる。このとき直流成分である地磁気の情報もあわせて捉えられる。さらに信号はセンサケース内で約1000倍に増幅、その後ケーブルを経て本体ユニットのケースへ導かれ信号処理が行われる。

本体ユニット内では最初に図 K-6 で示した AC/DC 分離回路で直流と交流に信号が分離される。AC の信号はマーカの周波数である 15.36kHz のセンター周波数 (Q=10)

をもつバンドパスフィルターを通過し、直流信号はカットオフ周波数 1 kHz のローパスフィルターを通過、それぞれ 19、20 のマルチプレクサに導かれる。

マルチプレクサ 19 を通過した 15.36kHz の信号は電圧監視回路によって 0.8V 以上の電圧を感知した時、次に続く一連のデータ収集の間 (5.2msec × 3=15.6msec) 増幅器 22 のゲインを 1/10 に減衰する。これによって、ロックインアンプ 22 で 10 倍した信号を AD 変換器の入力レンジ ±10V 以内に収めることが可能となる。

ロックインアンプを通過した 15.36kHz の信号は直流に変換され地磁気の直流成分とともに AC/DC 切り替えスイッチ 23 を通り AD 変換器へと導かれる。このとき信号の並びは図 K-5 の最上段の波形となる。地磁気およびセンサの捉えた信号の前にある 5.2msec の信号区間にコンピュータ側が受け取った信号が圧縮された AC 成分であるか判断するための信号を挿入し、圧縮された信号を受け取った場合はコンピュータ側で 10 倍している。

【位置算出方法】

全体の測定手順を図 K-9 に、また、逆問題の解法の手順を図 K-10 に示す。

$S(x, y, z, \dots)$ は評価関数と称するもので B_{mi} は各マーカから r 離れた位置にあるセンサから得られる磁束密度測定値、 $B_{ci}(x, y, z, \dots)$ は磁束密度の理論値式 (1.6) である。式 (1.1) が最小となるベクトル $p(x, y, z, \dots)$ が最小二乗法の解である。

評価関数 S が $p(x, y, z, \dots)$ で極小値を取れば

$$\left. \frac{\partial S}{\partial p_k} \right|_{p=\bar{p}} = 0 (k=1, 2, \dots, m)$$

を満たす。これはパラメータが 6 個 ($m=6$) あれば 6 元 1 次の連立方程式となりニュートン法により (注 1) 1 階偏微分の方程式となり式 (1.2) となる。この連立方程式から $p^{(L)}$ を求めさらに式 (1.3) から $p^{(L+1)}$ を求める。求めたベクトル p は式 (1.4) で判定を行い より小さな値に収束した時点でそのベクトル p を解とする。

は縮小因子と呼ばれるもので を小さくすれば安定して収束するが収束は遅くなる。 は収束条件で、真の値からの誤差を示す。

求めたマーカの座標は地磁気から算出された回転行列 (2.8) が掛けられ地上に対する姿勢が求まる。測定および計算/表示は並列に処理が進められ 48Hz 毎にセンサ位置、マーカの表示をモニター上へ繰り返す。

【オートレンジ機能のシミュレーション】

オートレンジ回路は検出した電圧が閾値を超えたのを受けてアンプのゲインを自動的に減衰、復帰を繰り返す信号を作り出すところである。これを机上で考えるのは限界があるため、アルテラ社のウェブサイトより MAX プラスというロジックシミュレータをダウンロード、考案したロジックのシミュレーションを行い実際の回路へ応用した。初期値の問題が残ったものの時間の節約には大きな効果があった。ロジックシミュレータ画面の一部を図 K-12、K-13 に示す。

【ソフトの内容】

逆問題の解法フローチャートおよび仕様を提示し、測定したマーカとセンサの相対位置を地磁気が反映した形でコンピュータ画面に表示されるソフトの作成を外部 ((有) ピー・ソフトハウス様) へ発注した。さらにセンサ、マーカを下肢に取り付けたとき下肢がリアルタイムで動くアニメーションの表示も出来るようにした。

図 K-14、K15 は関節運動リアルタイムセンシングシステムと本体内部、図 K-16

はそれを使って足の動きを示したアニメーション表示の一例である。

【1 関節から 2 関節運動リアルタイムセンシングシステムへ】

これまでの製作は 1 関節運動をリアルタイムにセンシングし、表示するものであったが、これを踏まえ 2 関節運動（膝と足首）のセンシングおよび表示システムの仕様を決め、ハードを外部へ発注（通研電気工業様）した。ソフトもあわせて前回製作を依頼したところへ発注した。

1 関節運動のシステムと大きく異なる点はマーカ対センサの数が 1 対 1 から 2 対 1 へと変わることである。ただし、センシングと表示のタイミングは 1/48 ごとであるため取り込むデータが倍近くなる。そのためデータの読み取り間隔は約半分となり、ハード条件は厳しくなる。

さらに、ロックインアンプと、発振回路を内蔵することでシステム全体のコンパクト化を図った。2 関節運動リアルタイムセンシングユニットの概観を図 K-17 に示す。

(4) 結果

【マーカとセンサの相対位置精度】

マーカを脛の側面、センサを大腿部側面に取り付けリアルタイムに足のモデルが動作することを確認した。

次にセンサ、マーカとの相対距離とセンサの AC 検出磁界の関係（図 K-19）を測定した。これはまだ、オートレンジ機能を搭載していない状態でのデータであり、20～30mm 以下でセンサが飽和してしまう。

さらに、マーカとセンサの相対位置精度を測定した。実験の様子は図 K-18 に示す。アクリルの下にセンサを貼り付け、アクリル板上をマーカが移動した時に逆問題を解いて出てきた計算上の位置と、実際位置を比較することでこの装置の精度評価を行った。ただし、ある空間内を等間隔で測定する必要があるが今回は時間の関係とまだ改善の余地があることからセンサから 25mm 上方の面内にある、直交する 2 つの線上での評価のみである。

図 K-20 は X 軸方向にマーカをずらしていったときの座標計算位置と実際位置の関係である。実際モニター上で安定して見えるのは $\pm 100\text{mm}$ 以内でそれ以上の距離になるとマーカが大きく振動してくる。本来 y、z の座標値は一定とならなくてはならないが $\pm 100\text{mm}$ までの値について言えば $\pm 30\text{mm}$ のずれがあり、右肩あがりの曲線を描いている。また、x の値は単調増加の直線にならなければならないが原点付近でセンサが飽和していることから 0 付近で直線から大きくずれている。

図 K-21 は Y 軸方向にマーカをずらしていったときの座標計算位置と実際位置の関係である。これは X 軸方向の動き（図 K-20）と比較するとかなりきれいな動きをしている。 $\pm 100\text{mm}$ 以内であれば Y 軸座標のずれは $\pm 14\text{mm}$ 程度に納まっている。

【改善内容】

センサの飽和を防ぐため自動的にレンジを変更するオートレンジ機能を付加したことは前述した。

また、マーカの検出範囲を半径 100mm から 150mm 以上にするためマーカの励磁出力を増加できるようにオーディオアンプ（約 6W）を発振器のあとに接続した。

これらの効果を測定するのはこれからである。

また、位置精度を向上させるためには磁気モーメントおよびゲイン係数を求めるキャリブレーション作業を厳密に行わなければならない。残された期間これらの作業あて、本システムの性能向上に努めたい。

2 関節運動リアルタイムセンシングシステムについてはマーカ出力が 1 関節同様小さいため出力アップを図る予定であるが更に取り込むデータを 1 回につき 5 個取り込み平均値を読み込む作業をしている。これについても今後データ取りをしていく予定である。

フェーズ

最終的には、現在逆問題の位置算出計算、地磁気による回転計算を DSP に行わせ、USB でデータをパソコンに高速転送、アニメーション表示をリアルタイムで行うのが理想的な形と考えている。

そうすれば、リハビリ、運動解析、エンターテイメント分野への応用がもっと進みやすいものとなる。

図 K-2 . マーカ

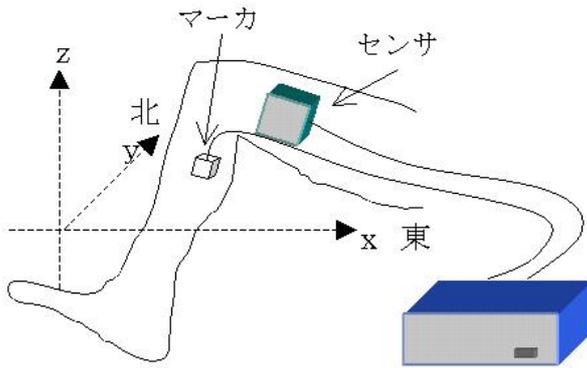
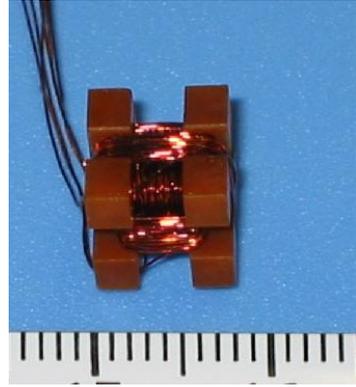


図 K-1 . システム概念

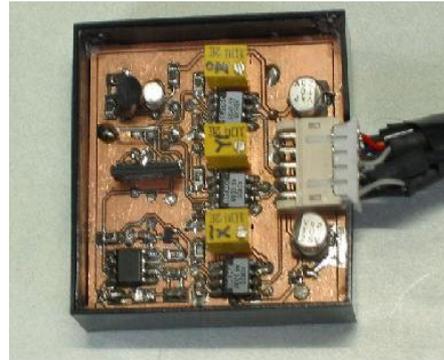


図 K-3 . センサ

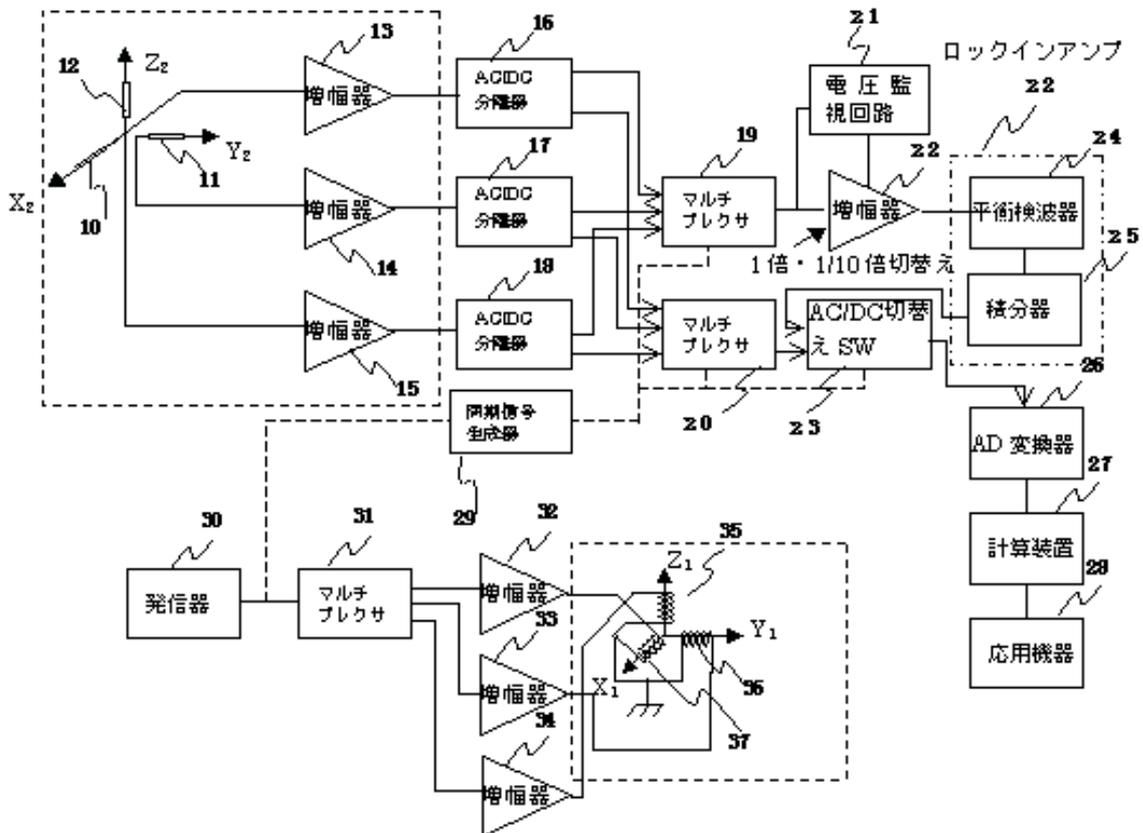


図 K-4 . ブロックダイアグラム

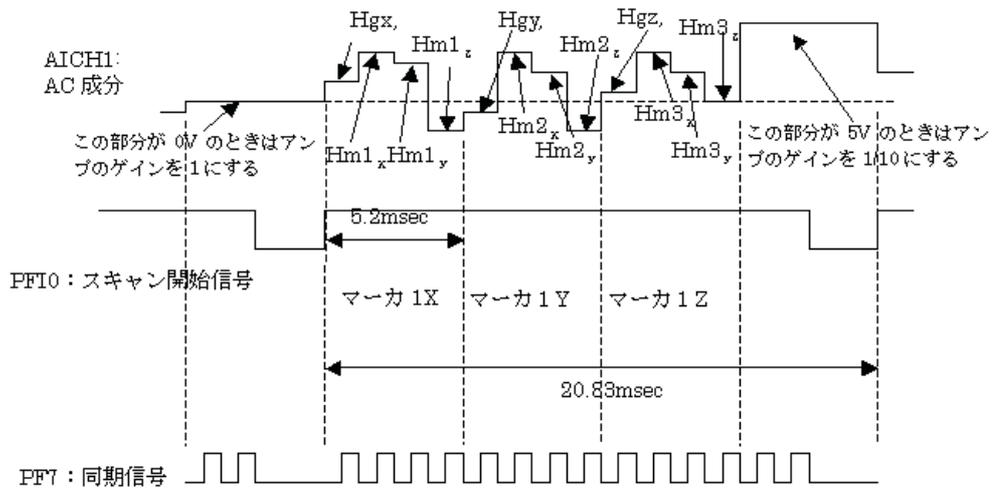


図 K-5 .
タイミング図

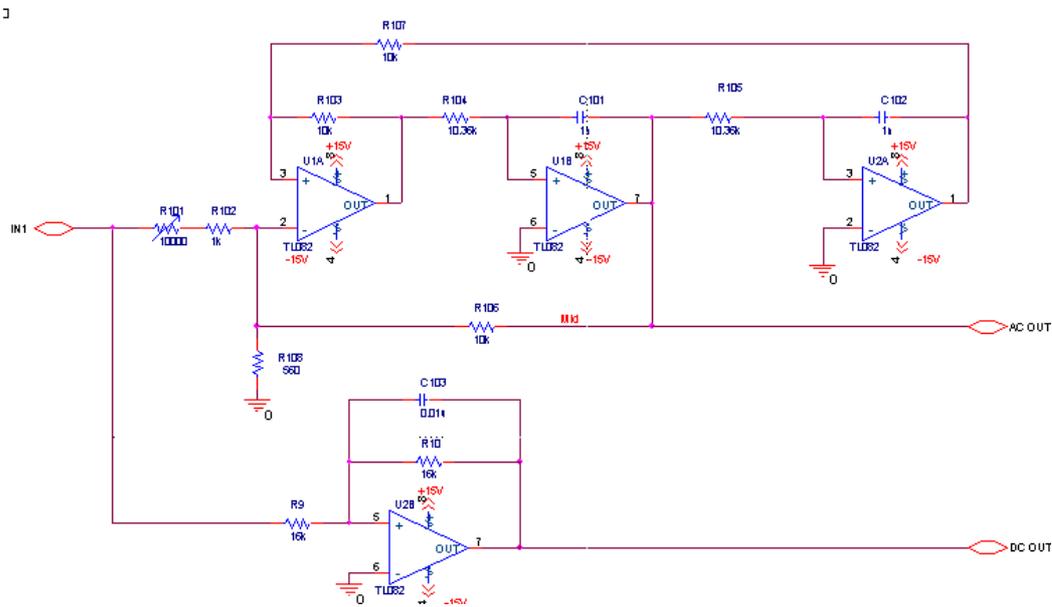


図 K-6 . AC/DC
分離回路

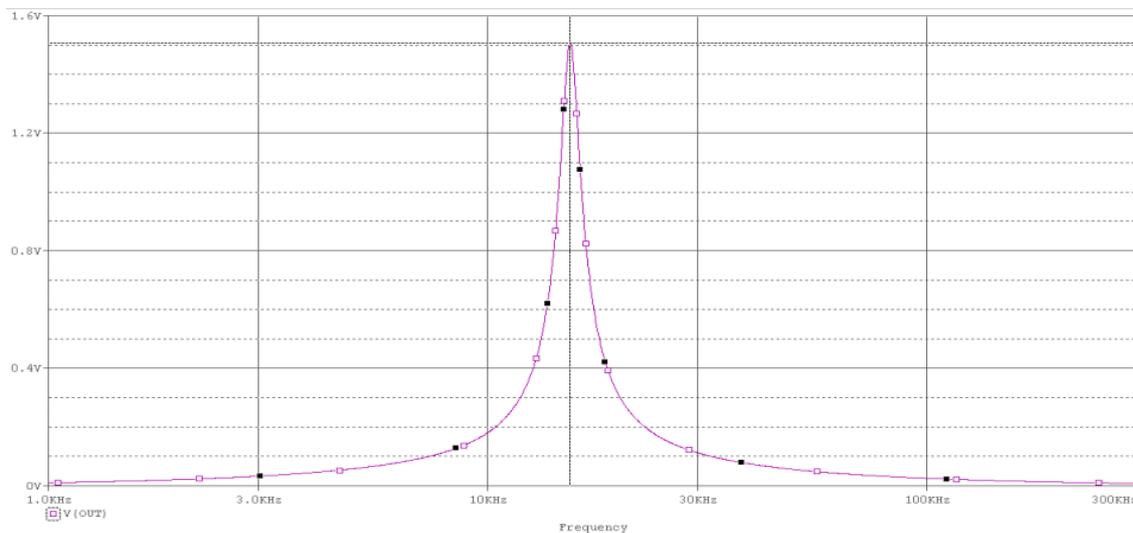


図 K-8 . 15.36kHz バンドパスフィルター

全体の測定手順

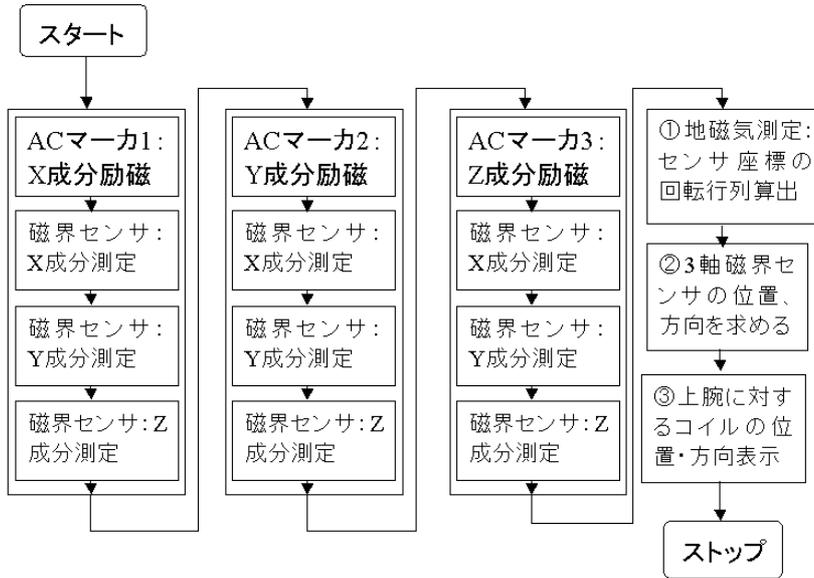
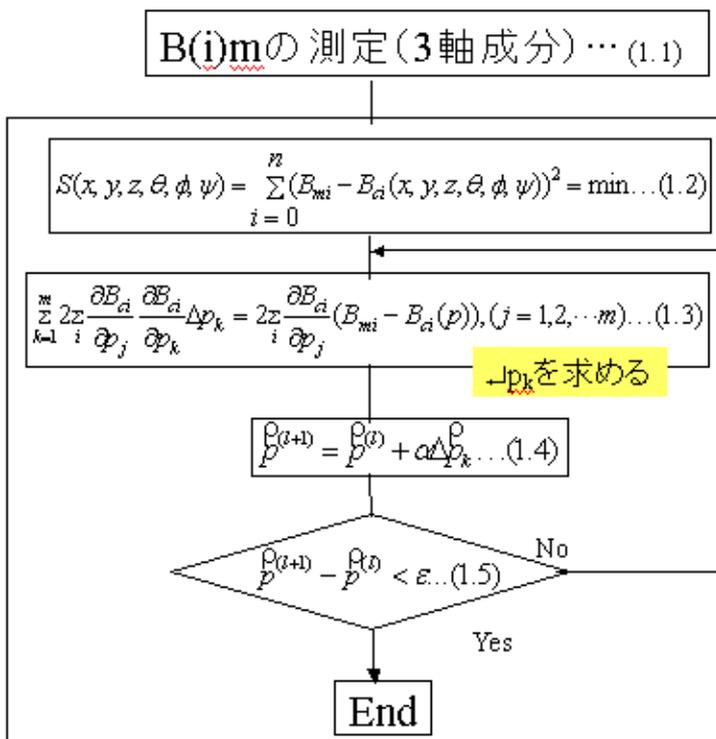


図 K-9.全体の測定手順

下肢に対するコイルの
位置・方向表示の求め方



S:評価関数
 (x,y,z):センサの励磁コイルに対する位置ベクトル
 θ: x軸に対する回転角
 φ: y軸に対する回転角
 ψ: z軸に対する回転角
 n:センサの測定成分(9)
 m:パラメータの数
 j,k:パラメータ, x:1, y:2, z:3, θ:4, φ:5, ψ:6
 i:センサの番号: x成分x励磁:1, y成分x励磁:2, z成分x励磁:3, x成分y励磁:4, y成分y励磁:5, z成分y励磁:6, x成分z励磁:7, y成分z励磁:8, z成分z励磁:9
 p:パラメータのベクトル
 α=0.5~1 縮小因子
 ε:収束条件
 B_{ci}:磁束密度の理論値
 B_{mi}:磁束密度測定値

$$B_a(x, y, z, \theta, \phi, \psi) = \frac{1}{4\pi\mu} \left(-\frac{M}{r^3} + \frac{3(M \cdot F) \cdot F}{r^5} \right) \dots (1.6)$$

$$p = (x, y, z, \theta, \phi, \psi) \dots (1.7)$$

図 K-10. センサに対するマーカの位置、方向の求め方

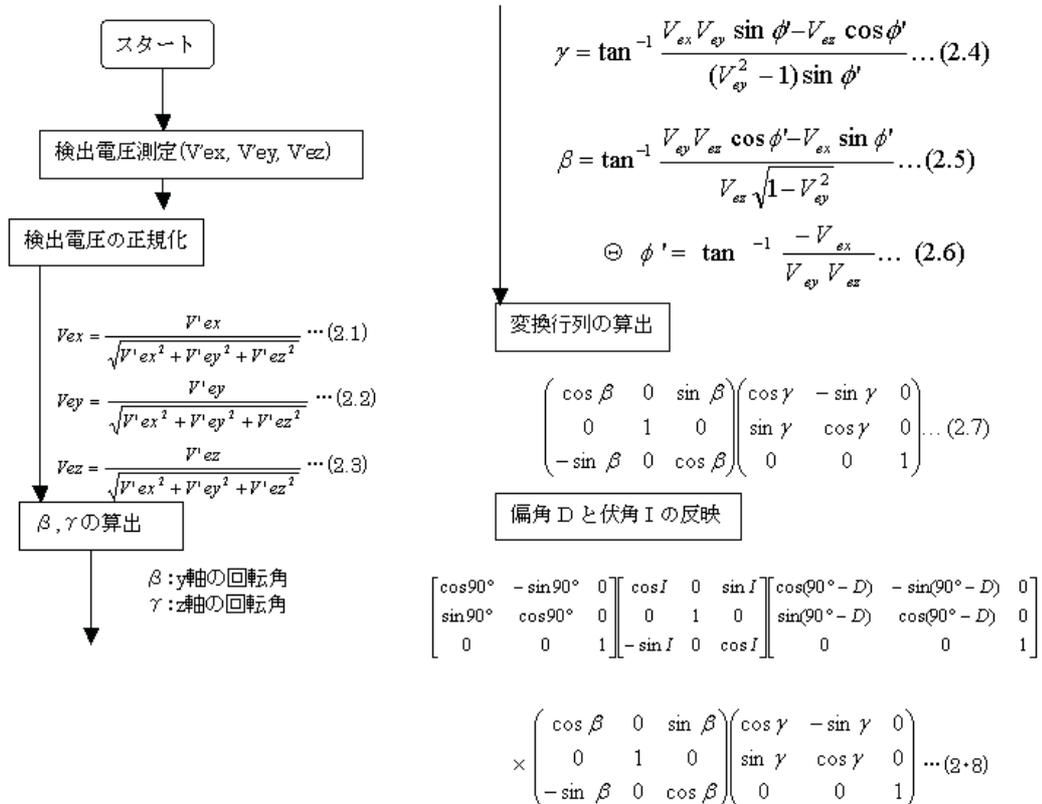


図 K-11.地磁気から対象物の姿勢を求める計算

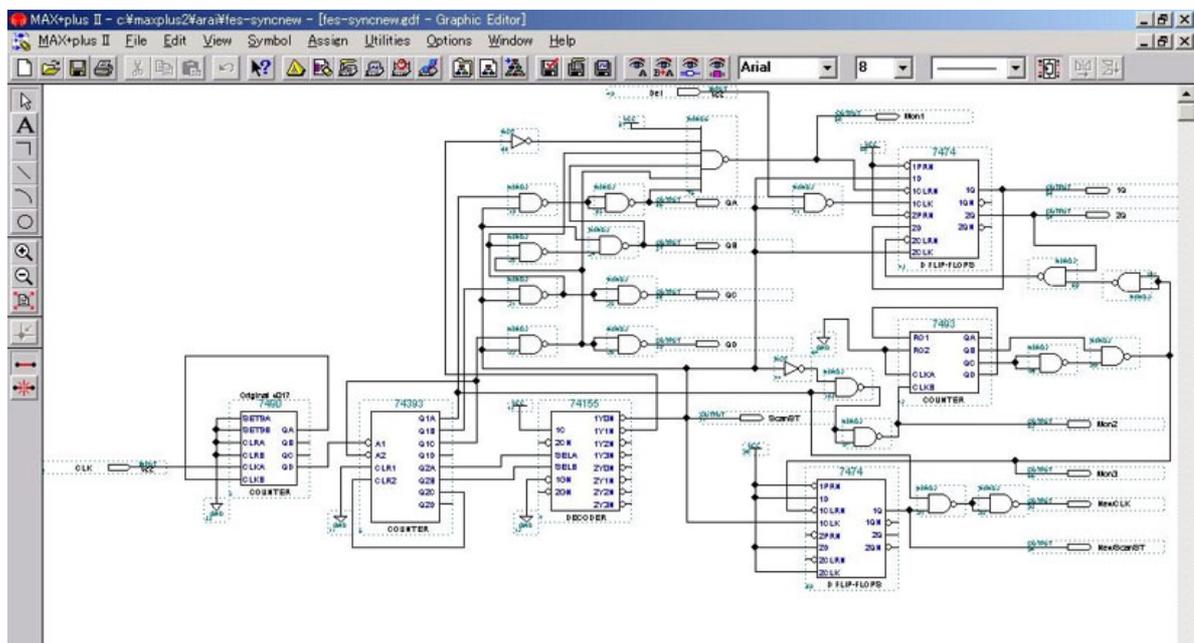


図 K-12.アルテラ社のロジックシミュレータを用いたオートレンジ回路の検討 (1)

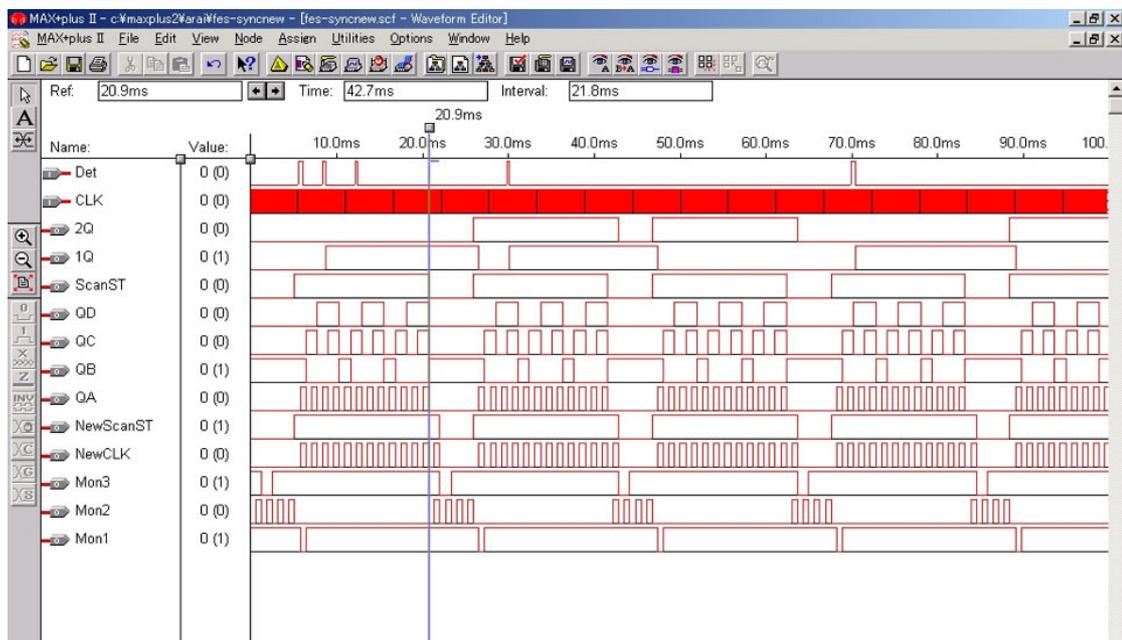


図 K-13. アルテラ社のロジックシミュレータを用いたオートレンジ回路の検討 (2)

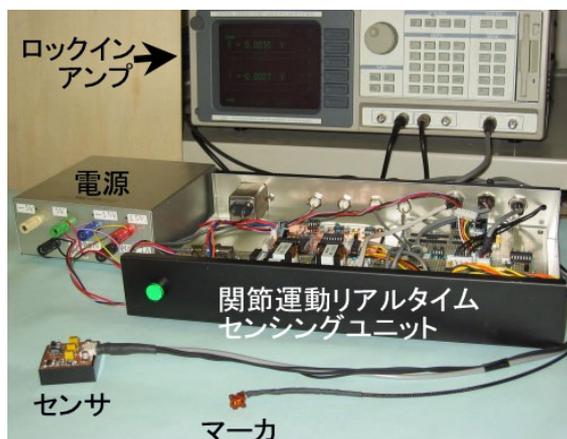


図 K-14. 1 関節運動リアルタイムセンシングシステム

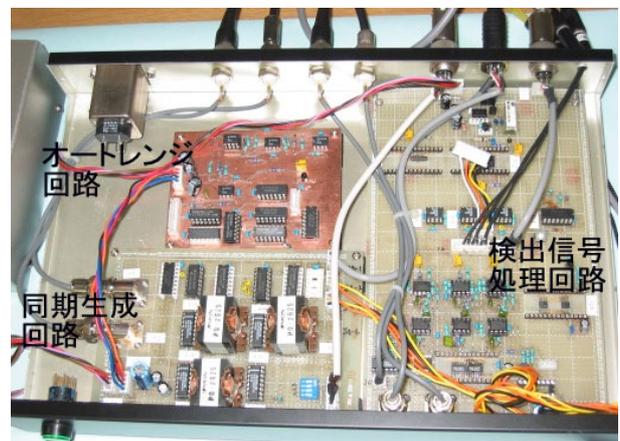


図 K-15. 本体内部

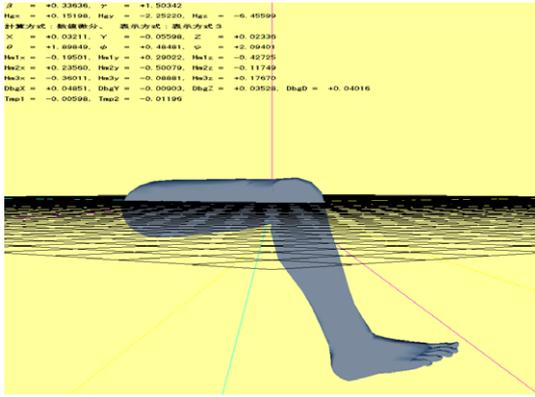


図 K-16.アニメーション表示
例 (1 関節タイプ)



図 K-17. 2 関節リアルタイムセンシング
ユニット本体 (2 関節タイプ)

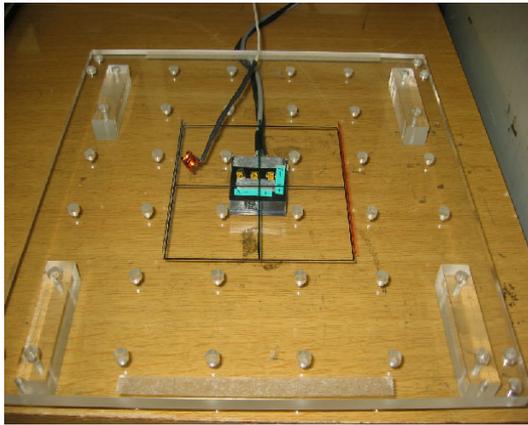


図 K-18. マーカとセンサの相対位置
精度測定

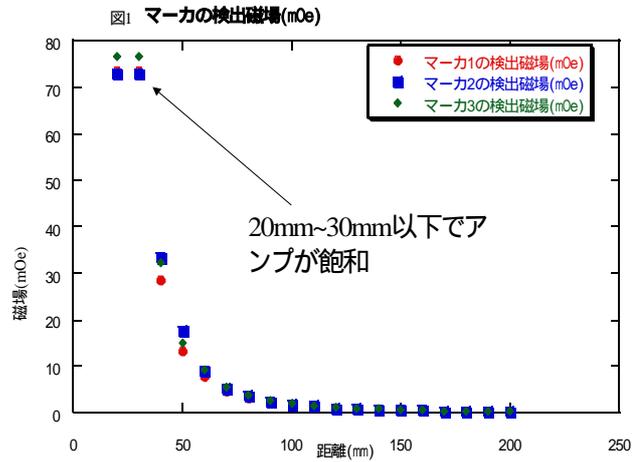


図 K-19. マーカからの距離と AC 検出磁界
の関係

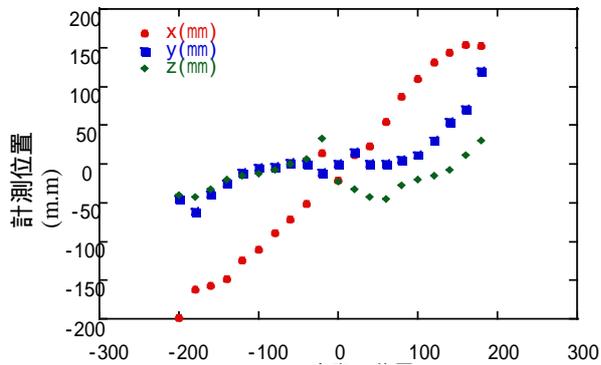


図 K-20. X 軸方向の位置偏移

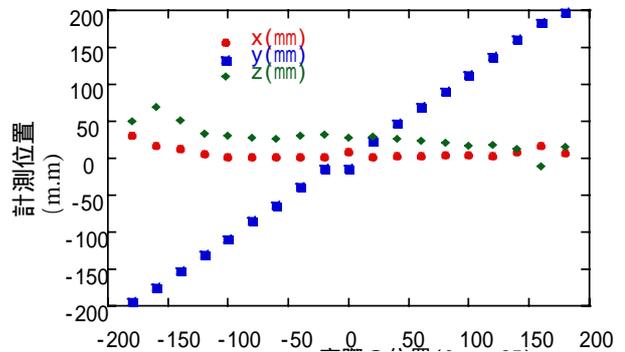


図 K-21. Y 軸方向の位置偏移

5 多点磁性マーカ検出実験装置の高感度化と高精度化

フェーズ

(1) 研究の概要

顎運動計測システムおよびワイヤレス情報入力機器への応用の準備として、平成 11 年度～平成 12 年度には多点磁性マーカ検出実験装置の高感度化と高精度化を検討した。テスト基板上に試作し温度ドリフトをこれまでの 1/10 以下に低減できることを示したフラックスゲートセンサの処理回路において、この電子回路をセンサユニットプリント基板上に作製し実装した。またセンサ出力を AD 変換する回路はセンサユニットとは切り離す構成とした。試作機の評価および試験は平成 11 年 12 月下旬に改良磁界センサの完成を待って行った。

一個および二個のマーカの磁気モーメントを既知とし、センサ数を可変とした最小二乗法による位置検出計算プログラムを作成した。マーカがつくるダイポール磁界に対して一定値の誤差をセンサの磁束密度に与えた場合、計算される位置の誤差は磁界強度の大きなセンサエレメントに一定誤差を与えた場合よりも、磁界強度の小さなセンサエレメントに一定値の誤差を与えた場合ほど悪化した。また一定量の誤差を加えた場合においてセンサの個数を多くするほど、誤差は小さくなることがわかった。

さらに現行の磁界センサを用いて 1 個のマーカを計測する場合、4 個の 3 軸センサの出力磁界を用いて位置計測をしたところ、2 個の 3 軸センサを用いた場合に比較して、位置の誤差は約 1/2 に改善された。また 4 個の 3 軸センサの各エレメントから磁界強度の大きな成分を取り出して 2 個の 3 軸センサと同数のエレメントの磁束密度を用いて位置を計算したところ最大で誤差は約 1/2 に改善された。

これより位置精度を向上させるためには磁束密度の大きなセンサエレメントの情報を優先的に用い、かつ測定時間の許容範囲でセンサ数は出来る限り多くすることが重要であることがわかった。

(2) 研究の目標

多点マーカの位置検出システムにおける基本的な設計指針を明らかにする

(3) 実施内容

次頁以降に記載する

フェーズ

(1) 研究の概要

(b-1) 情報入力機器への応用

永久磁石の動き（位置）を 3 個 6 軸の磁気センサを用いて検出し、検出ユニットから USB インターフェースで接続される PC のマウスカーソルを制御する。基本演算部には「磁気式モーションキャプチャシステム（本研究班特許）」の基本原理を用い、これとすでに（株）トーキン独自で開発済みである USB のマウスエミュレータソフトウェアと組み合わせることによって、ワイヤレスマウスの第 1 試作品とした。センサのノイズ低減、12bit 出力の変調回路の設計、演算ドライバ（dll）の開発などの課題がある。詳しくは後述する。

(b-2) 顎運動計測システムへの展開

東北大学大学院歯学研究科金高助手らとの打ち合わせの過程で、永久磁石を顎部に貼付して、その位置および方向を求めることで、歯科分野において懸案となっている、自然な状態における顎運動の精密な計測に応用可能であることが了解され、これを応用のひとつとすることとした。詳しい検討内容は後述する。

(2) 目標

(b-1) 情報入力機器への応用：ワイヤレスマーカによる情報入力機器を試作する。

(b-2) 顎運動計測システムへの展開：位置精度 0.1mm 以内の顎運動計測システムを開発する。

(3) 実施内容は後述する。

5 - 1 顎運動計測システムの開発

5-1-1 第 1 次試作機の開発

第 1 次試作機としての顎運動計測装置用の位置検出システムを開発した。このシステムは 32 チャンネルの 2 軸フラックスゲートセンサ (TMC3000NF)、センサホルダ、AD 変換器、電源、パーソナルコンピュータ、2 個の永久磁石 (6mm×5mm×2.5mm) から構成される。図 J-1 は本システムを用いた顎運動計測の様子を示したものである。磁界センサにおける計測磁界を用いて最小二乗法により永久磁石の位置および方向を求めた。2 個の永久磁石を磁界センサから 50mm 離れた状態に配置して、下方の磁石を下方向へ約 50mm 移動させた場合、位置精度は 3mm 以内であった。また上下顎および顎関節の回転運動を模擬した非磁性顎模型を作成し、回転運動時の位置精度を計測したところ、図 J-2 に示すように、口を閉じた位置から下顎を下方向へ移動させたところ、15mm の移動では位置精度は約 5mm 以内、40mm の移動では位置精度は最大 47mm であった。このとき磁石の方向の誤差は最大で約 30 度であった。この誤差が大きい要因は磁界センサの校正が不十分である問題、あるいは評価関数が真値と異なる極小解に収束する問題 (ローカルミニマム) 等が考えられる。今後の課題は評価関数の収束過程を詳細に観察することが必須であり、場合によってローカルミニマムの問題を軽減できるアルゴリズムを導入することも必要と考えられる。また位置精度を向上させるために、ヘッド寸法の小さい高周波キャリア型薄膜磁界センサを顎運動計測システムへ適用することが待望されている。

5-1-2 顎運動計測システム(第 1 次試作機)の誤差解析

磁気シールドルーム内において、試作した顎運動計測システムの上顎に対する下顎の永久磁石の位置精度は標準的な顎運動の範囲において約 5mm 以内であった。測定磁界から永久磁石の位置・方向を求める最小二乗法演算において、解は半径 30mm 以内、±30 度以内の範囲で局所的にはほぼ一意に収束することを確認した。

図 J-3 は図 J-2 における最も位置精度の悪い点における、最小二乗和 (評価関数) の値を繰り返し計算過程においてモニタしたものであり、解は 5 回程度の繰り返し計算で収束している。これよりシステムの誤差は解の一意性によるものではなく、磁束密度の測定値とダイポール磁界との誤差によるハードウェアに起因するものであると考えられる。

測定磁界とダイポール磁界との誤差の発生要因は、キャリブレーション時の誤差、2 個の磁石間の相互作用、磁石およびセンサの寸法効果であることが考えられる。このうちキャリブレーション時の誤差はキャリブレーション時に検出磁界が 0 に近い場合に大きくなった。また 2 個の永久磁石間の相互作用により誤差が最大で 10mG 程度におよぶことが実験的に確かめられ、これより 2 個の永久磁石の磁気モーメントを小さくする必要があることが明らかになった。

さらにセンサおよびマーカの寸法効果による誤差はスキャン時に磁束密度が極値を有する場合と磁界勾配が大きな計測点を有する場合に顕著であることがわかった。今後の検討課題としては外来ノイズが加わった場合における位置精度を実験により検討すること、位置・方向検出計算において最適なセンサ配置、フラックスゲートセンサの寸法、強磁性体の影響、方向角を加えた顎運動 6 自由度計測、センサ素子の小型化があげられる。

これまで磁場検出に用いる 3 2 個のセンサのキャリブレーションは、基準点に永久磁石を配置して行ってきたが、磁場の強度が 0 に近いところではセンサのゲイン係数誤差が大きくなること、再現性が悪いこと等の理由によりセンサ周辺に配置したコイルにより基準磁界を発生させ、磁界センサのゲイン係数を決定する方式に改めた。これによりこれまでの校正方法に比較してゲイン係数は Y 軸成分および Z 軸成分ともに約 0.8 とのばらつきが小さくなった。さらにこれまで 15 分以上かかった校正を約 3 分に短縮した。

2 個の永久磁石を下顎切歯部および額に貼付した顎運動計測システムにおいて、磁界センサを同一平面内に配置することを想定して誤差の小さなセンサ配置を設計した。磁界センサにおける測定誤差はガウス分布をもつことを仮定した場合の位置の推定誤差を見積もり、この位置の推定誤差を最小とするセンサの間隔および個数を設計した。計算の結果、一軸センサを用いて標準偏差 0.1mG の誤差を仮定した場合、49 個の磁界センサを 34mm の等間隔で配置した場合に誤差の最小値は約 59 μm であった。2 軸センサおよび 3 軸センサを用いた場合に位置の推定誤差が最小となる条件はセンサの個数がそれぞれ 121 個、191 個であり、センサの間隔が 23mm および 15mm、推定誤差はそれぞれ 55 μm 、および 53 μm であった。センサの個数および測定成分は少ないほうが望ましいこと、センサ間の相互作用を低減するためにセンサ間隔は大きい方が望ましいことを考慮して、1 軸センサを用いて 49 個を 34mm 間隔で配置することが適切と判断した。

試作したフラックスゲートセンサによる顎運動計測システムの位置および角度の推定誤差要因として(1)センサと永久磁石の配置、(2)発生する磁界分布の乱れによる誤差、(3)準双極子磁界を有限寸法の磁界センサで計測する際の誤差、(4)最適化問題における誤差に分類しそれぞれを詳細に検討した。その結果、2 個の磁石のうち上磁石と下磁石によるセンサへの磁束密度の寄与分は同程度にすべきであること、磁界センサの配置は十分な情報量を得るよう、磁石の周囲に配置する必要があること、永久磁石の磁化量を $V \cdot S \cdot M$ 等で正確に評価したものをを用いることが重要であることを示した。また最小二乗法による最適化問題は半径 50mm 以内であれば 100% 同一点へ収束することを確認した。図 J-4 は上記の知見に基づき、上部磁石、下部磁石の位置および方向のプロファイルを示したものである。図 J-4 (a)、(b)、(c)は下部の magnet1 についての位置および方向角を magnet1 の Y 座標に対して示したものである。図 J-4 (d)および(e)は静止している上部の magnet2 の位置および方向角を magnet1 の Y 座標に対して示したものである。図 J-5 は顎模型を示している。

は本システムで得られた値であり、実線は 3 次元計測装置で求めた値である。図 J-4 (a)は顎運動を側面から見た配置であり、Y 座標が大きくなるにしたがって口を開けた動作を表している。また図 J-4 (b)は顎運動を上部から見た配置に相当する。本論文の誤差解析で得られた知見に基づき、上部磁石の磁気モーメントを小さいものを使用し、上下磁石の発生磁界のセンサに対する寄与をなるべく等しくした。使用した永久磁石は NdFeB 磁石で下部磁石は 6mm \times 5mm \times 2.5mm (磁気モーメント: $4.4 \times 10^{-8} \text{Wbm}$)、上部磁石は 3mm \times 2mm \times 1.25mm (磁気モーメント: $0.73 \times 10^{-8} \text{Wbm}$) であった。2 個の永久磁石は 1mm 以内の位置精度、2 度以内の角度精度で計測でき、13mm の最大寸法を有するフラックスゲートセンサと 6mm の最大寸法を有する永久磁石を用いて、位置精度 1mm 以内は可能であることが示された。2 個の磁石とフラックスゲートセンサを用いた顎運動計測システムの位置精度を決定するための技術的な要点として以下の 3 点について定量的に明らかとした。これらは(1)磁石からセンサを見た立体角、(2)2 個の磁石からセンサで計測される磁束密度の寄与分のバランス、(3)磁石およびセンサの寸法による磁束密度の測定誤差である。図 J-6 はすでに作成した顎模型の下顎切歯部に NdFeB 磁石(6mm \times 5mm \times 2.5mm、磁気モーメントは $4.4 \times 10^{-7} \text{Wbm}$) を 1 個貼付し下顎を開口した場合における、磁気モーメントの姿勢角のプロファイルを磁石からセンサアレイを見た立体角に対して表したものである。1 は磁気モーメントベクトルと z 軸のなす角度、1 は磁気モーメントのベクトルを xy 平面へ投影して、そのベクトルと x 軸とのなす角度である。

はシステムから得られた実測値であり、実線および破線は理論値である。図 J-6 によれば誤差は立体角が小さくなるに従って大きくなった。角度精度を 2 度以内にするためには立体角を約 (全球の 1/4) 以上確保することが必要であることがわかった。図 J-7 は 2 個の磁石を顎模型の切歯部と額に相当する部分に貼付して、下顎をスキャンし、下顎部の磁石の方向角を 2 個の磁石からの磁束密度の寄与分の比率に対して表したものである。寄与分の比率は下顎に貼付した磁石と上部に貼付した磁石がそれぞれ各センサへの磁束密度の寄与分を足し合わせて求めた。寄与分の比率が 1 のとき、2 個の磁石からセンサへの磁束密度の寄与は等しいことになる。図 J-7 の 1 および 1 は図 J-5 の定義と同一である。図 J-7 によれば、2 個の磁石から発生する磁束密度の寄与分が近いほど誤差は小さいことがわかる。角度の測定精度を 2 度以内に抑えるためには、寄与分のバランスを約 $\pm 20\%$ 以内とすることが必要であることがわかった。図 J-8 は磁石 (6mm \times 5mm \times 2.5mm) とセンサ (ヘッド寸法: 13mm \times 13mm \times 2mm) の寸法による磁束密度の誤差を下顎に貼付した磁石の y 座標に対して示したものである。磁束密度の誤差は磁

束密度の測定値と最適化問題により得られた位置・方向からダイポール磁界を仮定して求めた磁束密度の理論値の誤差率として示した。図 J-8 によれば磁束密度の誤差率は 1.5~4% 程度であった。これはすでに作製したフラックスゲートセンサと磁石の校正治具を用いて同様の寸法効果を評価した際に得られた誤差とおおむね近い値であった。これより本システムで使用した磁石とセンサを用いて両者の距離をおおむね 50mm~150mm 程度に配置した場合には 1.5~4% 程度の寸法効果による誤差が発生することがわかった。

上述の知見に基づき、顎運動計測システムの実用化に必要な 0.1mm 以内の位置精度を達成可能であることを示すためのシステムの設計を行った。図 J-9 はマーカとセンサの配置を概念的に示したものである。2 個のマーカはこれまでと同様に下顎切歯部と額部分に貼付することを想定する。マーカの磁気モーメントはこれまでよりも 1 桁程度小さくし、上部および下部のセンサおよびマーカの相互作用が無視できるものとする。磁界センサは上下に分離する構造として、位置精度を向上させる。下顎部周辺のセンサは約 40 個、額周辺のセンサは約 20 個であり、センサ相互の間隔は 20mm 程度とする。この配置で磁石とセンサの寸法から発生する誤差を 2% と仮定すると 0.1mm 以内の位置精度が得られると見積もられる。またマーカは 1 個の磁石により 5 自由度を得るタイプ、2 個の磁石を相対的な距離および方向をガイドにより固定して 6 自由度を得るタイプ、あるいは 3 軸コイルにより 6 自由度を得るタイプを候補として試作することにした。

5-1-3 顎運動計測システム（第 2 次試作機）の開発

顎運動計測システムの実用化に必要な 0.1mm 以内の位置精度を達成可能なシステムを試作し、評価を進めた。図 J-9 はマーカとセンサの配置を概念的に示したものである。2 個のマーカは下顎歯列部と額部分に貼付する。磁界センサおよび 2 個の永久磁石は上下に分離する構造として、上部と下部のセンサおよびマーカでは磁気的な相互作用が無視できる配置にした。図 J-10 はセンサホルダの概観図、図 J-11 はセンサアレイおよび信号処理回路を示したものである。下顎部周辺の下部センサアレイのセンサ数は 42 個、額周辺の上部センサは 20 個とした。隣接するセンサヘッドの間隔は約 20mm とした。図 J-12 は測定の配置、図 J-13 は磁気シールドルーム内で測定した下部磁石の重心位置のプロファイルを示したものである。下部の永久磁石についての位置を magnet1 の Y 座標に対して示した。magnet1 のみ移動させ、magnet2 は静止させた。は本システムで得られた値であり、実線は 3 次元計測装置で求めた値である。同図は顎運動を頭部側面から見た配置であり、Y 座標が大きくなるにしたがって口を開けた動作を表している。永久磁石の位置はおおむね正確に計測できたと考えられる。位置推定誤差はおおむね 0.1mm 程度が得られた。永久磁石の有限寸法による誤差はセンサユニットの内部雑音と同等レベルまで低減できた。また上部磁石を取り去った場合と 2 個の磁石を貼付した状態を比較したところ、両者のプロファイルはほぼ一致し、設計段階で意図した上部および下部の磁気的な相互作用は十分小さかった。



図 J-1 センサユニットに顎部および頭部を接近させた様子

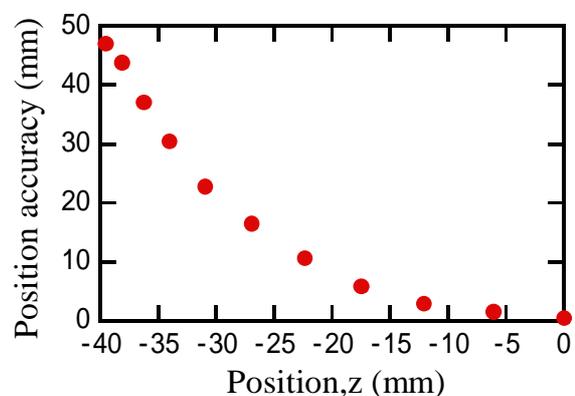


図 J-2 下顎を下方向へ移動した際の位置精度

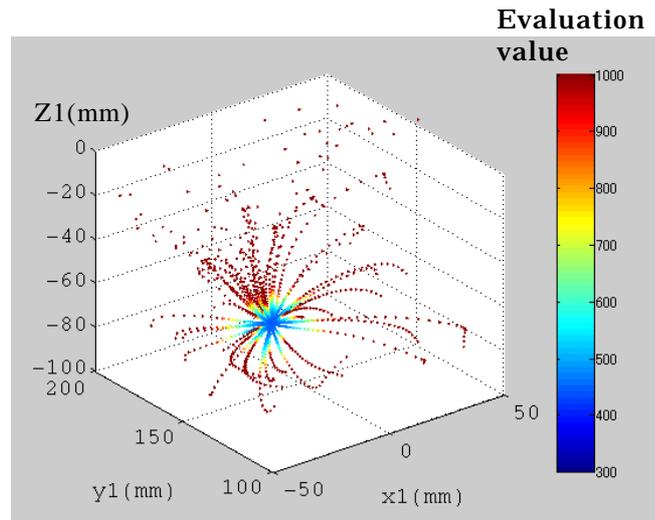
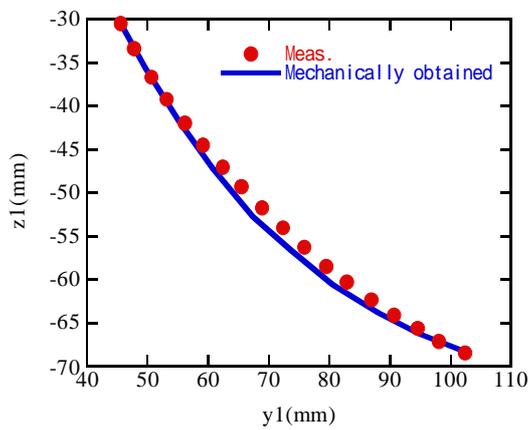
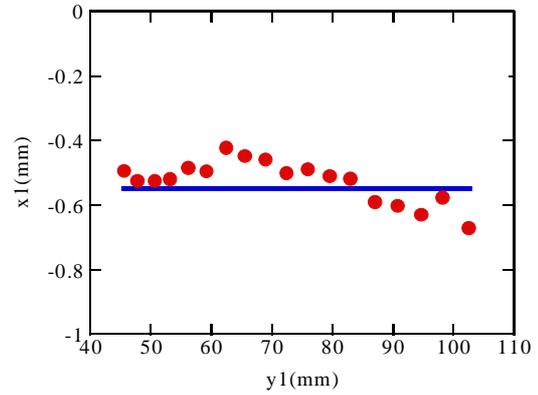


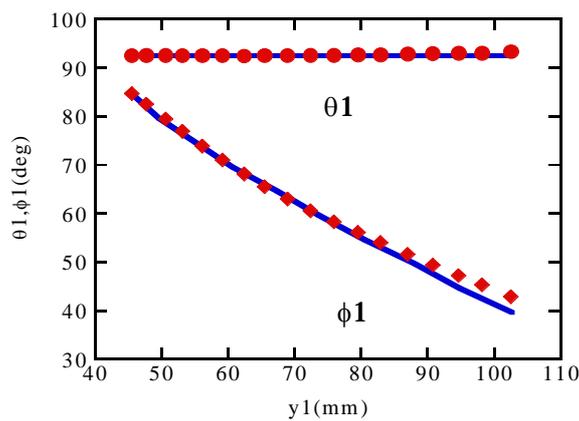
図 J-3 最小二乗法における評価関数の収束過程.



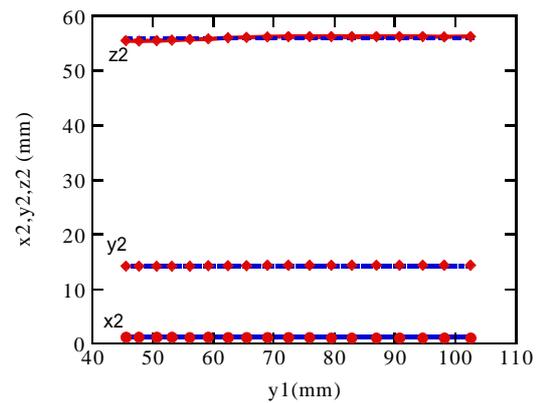
(a) y-z 平面におけるプロファイル



(b) y-x 平面におけるプロファイル

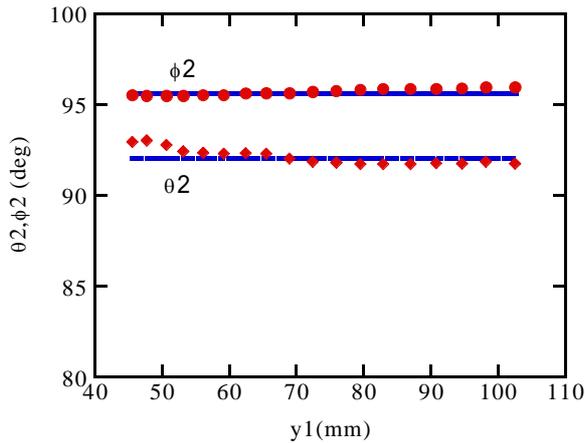


(c) magnet1 (下部磁石) の方向



(d) magnet2(上部磁石)の位置

図 J-4 永久磁石のプロファイル



(e) magnet2 の方向
 図 J-4 永久磁石のプロファイル

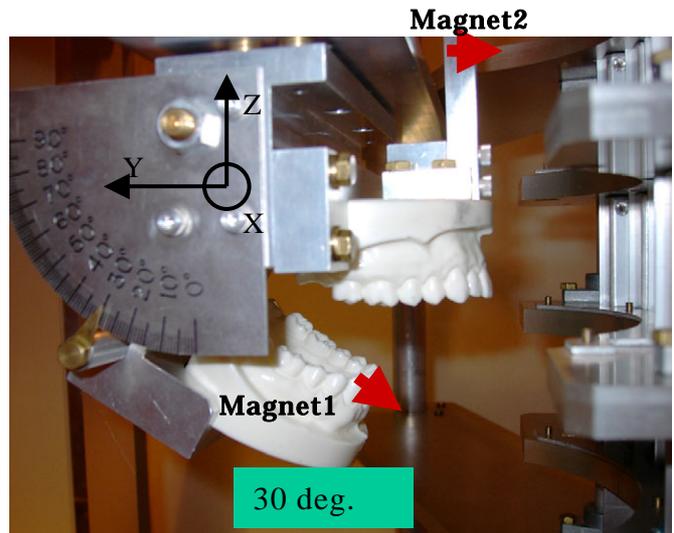


図 J-5 顎モデルと永久磁石の配置

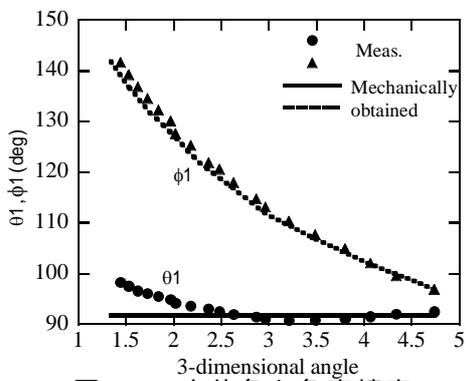


図 J-6 立体角と角度精度

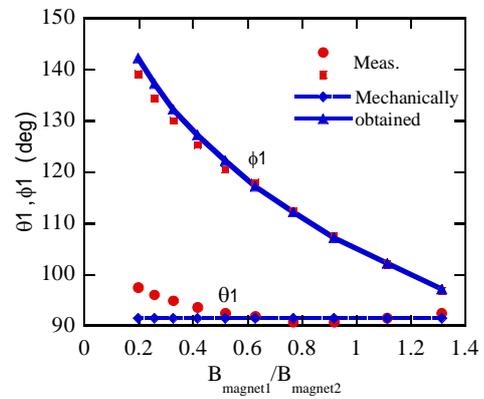


図 J-7 磁石からの磁束密度の寄与分と角度精度

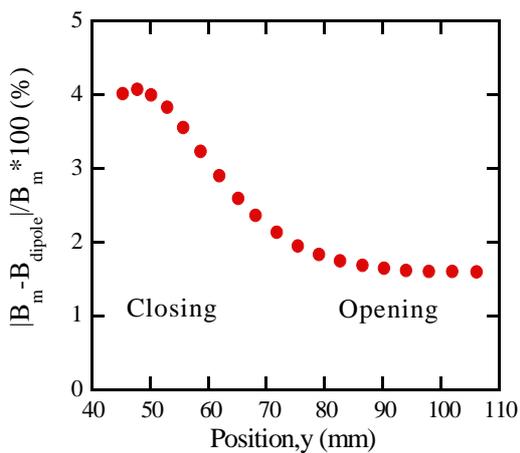


図 J-8 寸法効果による磁束密度の測定誤差

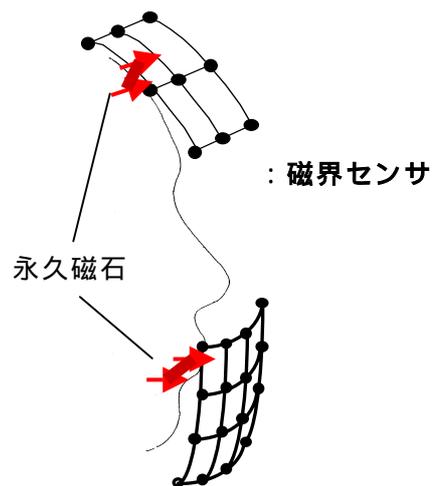


図 J-9 新規作製顎運動計測システム

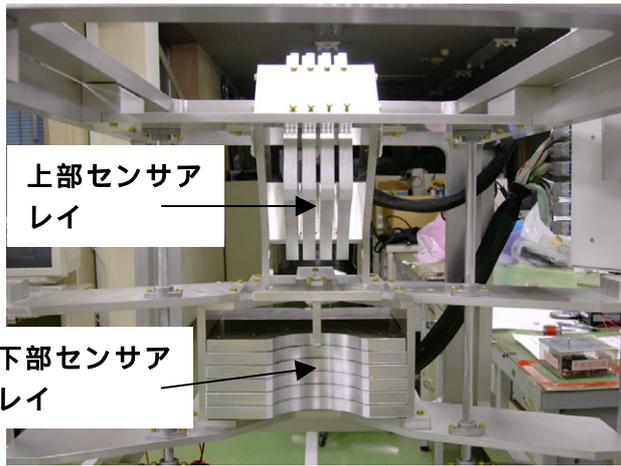


図 J-10 試作した顎運動計測システム

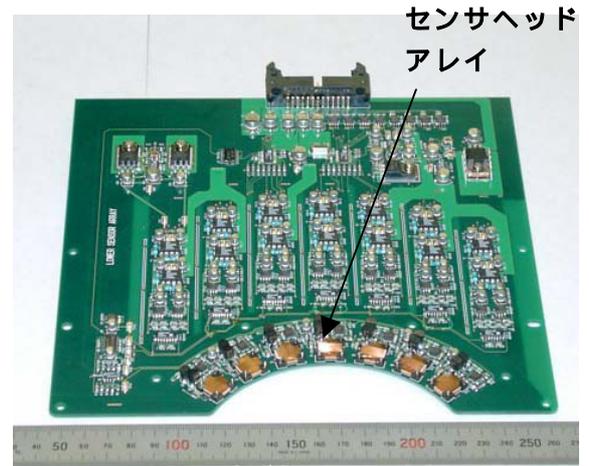


図 J-11 磁界センサヘッドおよび信号処理回路

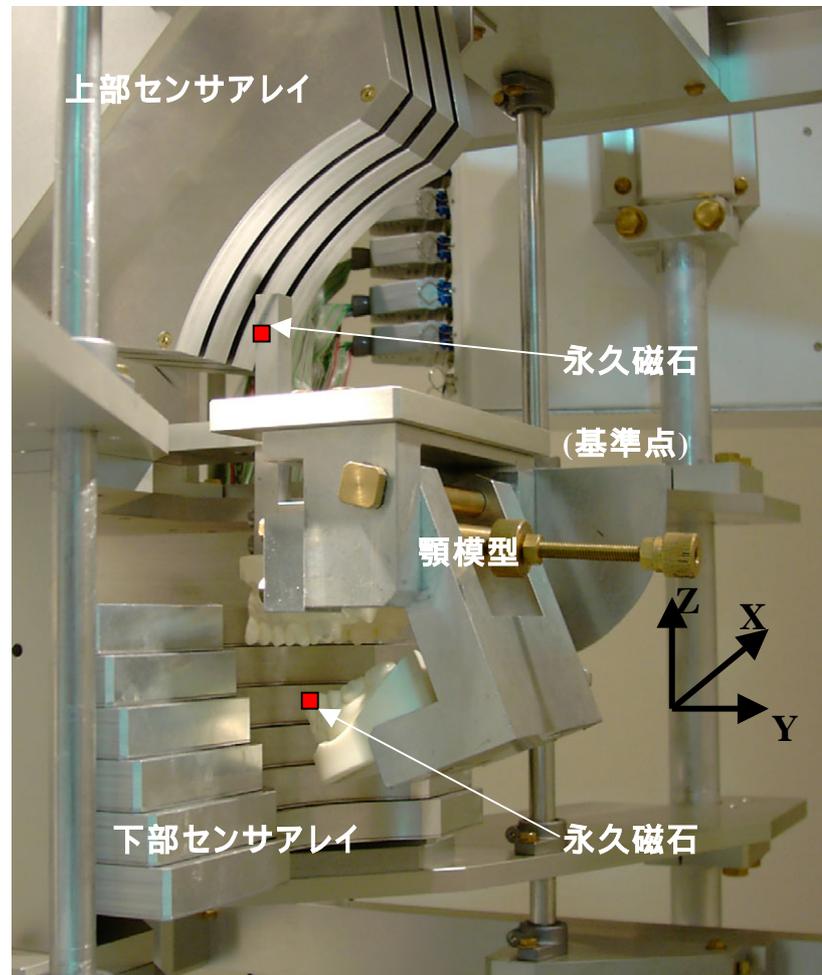
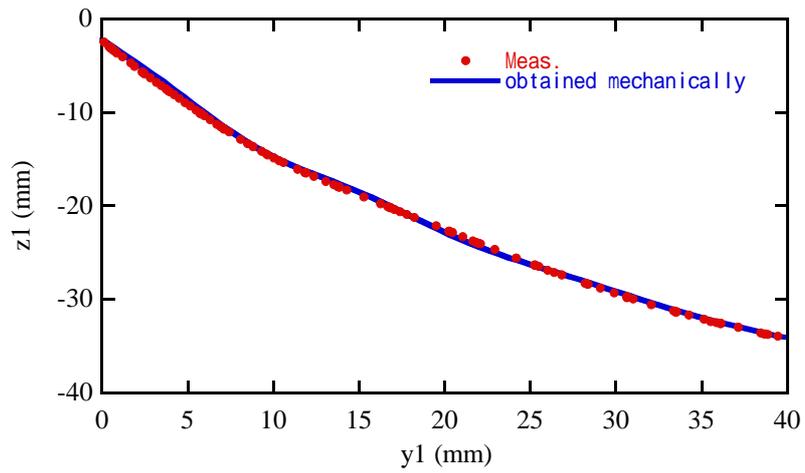
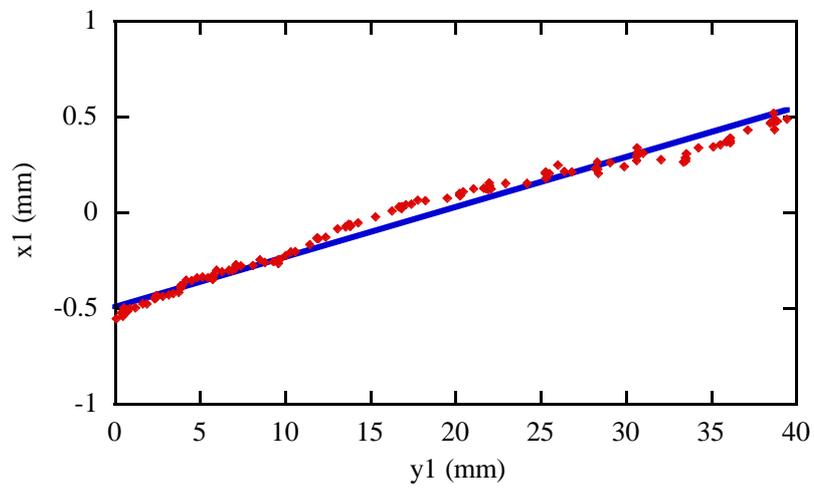


図 J-12 下部磁石の移動軌跡



(a)側面からの見たプロフィール



(b)上部からの見たプロフィール

図 J-13 永久磁石のプロファイル

5-2 磁気マーカを用いた無配線情報入力システム

無配線情報入力システムにおいて必要な仕様とセンサ、マーカの配置、ノイズ、検出分解能との関係をシミュレーションした。3個の平面型二軸センサを直線状に約50mmずつ離して配置して、情報入力システムとしての位置精度と磁界検出分解能、ノイズの関係を見積もった。情報入力システムとしての位置精度の要求仕様は「15インチのモニタ画面を横方向に100分割した距離以内」と決め、位置精度として3mm以内を目安とした。マーカは6mm×5mm×2.5mmのNdFeB磁石を想定し、センサユニットから100mm程度はなれた空間を一辺100mmの正方形の範囲で磁石を任意に移動することを仮定した。シミュレーションの条件としてはセンサの検出分解能、変動性の外来ノイズ、センサ回路の内部ノイズを仮定して、位置精度を求めた。その結果、センサの分解能は0.5mG、内部ノイズ1mG、外来ノイズ1mG程度であれば、3mm以内の位置精度が確保できる見通しを得た。これよりセンサのAD変換の分解能は12ビットで充分であり、センサ内部のノイズや電圧安定性を1mG相当分以内でなるべく低減することが重要であることがわかった。

つづいて上記をベースにシステムの基本構成を固めた。1個の永久磁石、2個の3軸MIセンサ(トーキン開発品)あるいは3個の2軸フラックスゲートセンサ(TMC3000NF)、センサユニットとパソコンとの接続はUSBを基本とする。USBでセンサへの供給電源の安定性が悪い場合には、電源部を別供給とする。その判断の指標は前期報告書に記載したシミュレーション結果に基づく。またセンサからの出力のAD変換機およびUSBにより磁界のデータをパソコンへ取り込む回路の設計を始めた。さらに東北大が作成した位置検出ソフトウェアとセンサADコンバータとのデータ渡し(各センサの磁界、マーカのパラメータ等)の基本仕様を決めた。

NECトーキン製2軸フラックスゲートセンサ、およびNECトーキン製3軸MIセンサを平面的に配置することを想定してセンサ配置を設計した。センサホルダ上方75mmの高さの点を中心として、50mm×50mm×50mmの範囲内に1個の永久磁石を配置した場合の平均的な位置の誤差をみつめた。この設計に基づいて3個の2軸フラックスゲートセンサを用いて位置検出システムを試作した。磁界センサはパーソナルコンピュータからUSBケーブルを接続して駆動した。マーカを検出範囲内で移動させた場合、システムから出力された座標は実際の移動とほぼ対応した。しかし位置精度は20mm~30mm程度と大きいものであった。これはセンサのオフセットキャリブレーション時の誤差、センサの配置精度、マーカの設置精度によると考えられる。一方磁界センサの出力におけるノイズは約8mGであった。なお磁界センサで測定された磁束密度を用いて最小二乗法による最適化問題を解いたところすべてのケースで解は一意的に存在し収束することを確認した。

図W-1は試作した情報入力機器の写真である。このシステムはパソコン、指先に貼付した永久磁石、平面型フラックスゲートセンサユニットから構成される。センサユニットはUSBでノートパソコンに接続可能である。



図 W-1 試作したワイヤレス情報入力機器

フェーズ の取組み予定

- (1) 1Hz ~ 1 kHz における低周波磁界において 10^{-9} T 台の磁界検出分解能を目指す。心臓、脳等から発生する微小磁界を計測可能な超高感度磁界センシングシステムを目指す。
- (2) 関節運動リアルタイムセンシングシステムは FES フィードバックシステムへの組み込みを目指す。
- (3) 顎運動計測システムは実用化を前提とした共同開発体制の構築を目指す。