

平面コイルを用いたLC共振型ワイヤレス磁気マーカの開発に関する研究

分担研究者 藪上 信 東北学院大学工学部・准教授

【研究要旨】

本研究では、生体への利用を考慮し、装着時に違和感の少ない薄型コイルを磁気マーカとして利用することを目的とし、平面コイルを用いたLC共振型ワイヤレス磁気マーカの開発を行った。新しく製作された自作コイルと製作済みのコイルを使用し実験を行い、薄型マーカであることを考慮して共振周波数を10 MHz、5 MHz、1 MHzに設定し、Q(共振の性能指数)とSN比がどの程度得られるか検討した。

A. 研究目的

摂食・嚥下時の顎運動や舌運動など測定を目標とする薄型ワイヤレス磁気マーカを製作し、高精度の計測を行うシステムを構築することを目的とする。

顎運動や舌運動等の顎顔面部の運動計測では検出コイルと励磁コイルの距離が100～150 mm程度必要である。そして位置精度を1 mm程度にするためにSN比が20～30得られる薄型マーカを製作していくのが課題である。

B. 研究方法

プリント基板加工装置(CAM21-RS)を使いコイルを製作する(本研究では線幅、銅体間隔0.4mm、巻数両面10回巻きのコイルを製作(図1)。

次に共振周波数の設計値のインダクタンスをネットワークアナライザ(Anritsu MS4630B)で測定す

る。コイルに取り付けるコンデンサの値を算出する。(1)式を(2)式に変換し、測定したインダクタンスを代入し計算する。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$C = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{L} \quad (2)$$

算出したコンデンサをコイルに接続しマーカを製作する(図2はコンデンサを外している状態)。製作したマーカをネットワークアナライザで共振周波数を測定する。測定した結果からVout Vを求め、測定範囲の周波数とのグラフをだしグラフよりQ(性能指数)とSN比を求める。マーカは図3のように励磁コイルと検出コイルの中央に設置し共振周波数を測定する。

C. 研究結果

C-1 製作済みコイルの測定

図4～10は使用したマーカの写真である。コイルはプリント基板加工装置で製作した物ではなく研究室にあったコイルを使用し、それぞれの共振周波数の設計値でQとSN比を検討した。検出コイルと励磁コイルの距離は可能な限り近づけて測定した(約20mm)。図11～15で示したようにネットワークアナライザの設定はRB=1 kHz、0 dBmで透過係数を測定した。

コンデンサの値を算出する為に、ネットワークアナライザ(Anritsu MS4630B)の反射法よりインダクタンスを測定する。コンデンサは(2)式を使い計算する。

図16～19はマーカの共振特性を示したものである。共振周波数の測定、ネットワークアナライザを使い測定した。検出コイルと励磁コイルの距離は可能な限り近づけた時(約20mm程度)とする。

C-2 2個直列マーカのSN比とQの検討

検出コイルと励磁コイルの距離は25 mmとし、共振周波数の設計値を10、5、1 MHzに設計し測定する。コイルは製作したコイルではなく研究室にあるコイルを使用した。ネットワークアナライザの設定はRB=1 kHz、0 dBmで測定した。

C-3 3個直列マーカの測定

共振周波数の設計値を10 MHzとし、検出コイルと励磁コイルの距離は可能な限り近づけて測定した(約25mm)。ネットワークアナライザの設定はRB=1 kHz、0 dBmとした。

C-4 コイルの製作と測定

プリント基板加工装置(CAM21-RS 図20)を使い、図21のミリングカッタで銅箔を削り両面10回巻き線幅、銅体間隔0.4mmを製作する。

共振周波数の設計値を10、5、1 MHzに設定し、検出コイルと励磁コイルの距離は25mmとした。ネットワークアナライザの設定はRB=1 kHz、0 dBmとした。

C-5 2個直列両面マーカの測定

C-4で製作したマーカを2個直列に接続してQとSN比を検討する。マーカの詳細はC-4と同じである。図22は試作したマーカの写真である。検出コイルと励磁コイルの距離は25mm、ネットワークアナライザの設定はRB=1 kHz、0 dBmとした。

図23は共振周波数付近のマーカ誘起電圧の周波数依存性をネットワークアナライザにより測定したものである。ほぼ設計どおり約8MHzで共振するマーカができた。

下記の表はQおよびSN比を表したものである。

マーカの 種類	共振周波数の 設計値 [MHz]	共振周波数の 測定値 [MHz]	Q	SN比
2個直列 両面マ ーカ	10	8.00	46	167
	5	2.97	15	113
	1	1.11	6	24

C-6 検出コイルと励磁コイルの距離を離して測定

次に最もSN比が高かった、2個直列両面マーカの共振周波数の設計値が10 MHzのマーカを使い検出コイルと励磁コイルの距離を50、100、150 mmと離していった時のQとSN比を検討する。図24は励磁コイルと検出コイル間の距離が100 [mm] のときのコ

イルおよびマーカの配置を示したものである。図25は共振周波数付近（約8MHz）におけるマーカ誘起電圧の共振特性を示したものである。所望の共振が得られていることがわかる。下記表は試作したマーカにおけるQとSN比の実測値を示したものである。検出コイル間距離が100mmの場合には、共振はノイズに埋もれて、評価することは困難であった。このことからマーカの層数を増やすことで、SN比の向上を図る必要があることが了解された。

測定結果

マーカの種類	検出距離 [mm]	共振周波数 [MHz]	Q	SN比
2個直列両面マーカ	50	8.224	32.9	32.5
	100	8.152	23.3	2.11
	150			

C-7 ネットワークアナライザの設定を変え測定

C-5で使用した2個直列マーカを使い、共振周波数の設定値は5、1 MHzとしネットワークアナライザの設定を0 dBmと15 dBm時のそれぞれのQとSN比を測定する。又、検出コイルと励磁コイルの距離を25、50 mmの時も検討する。

C-8 位相を考慮した電圧の変換

今までの電圧の変換方法はマーカ設置時と非設置の電圧の絶対値の差を求め、電圧の絶対値と測定範囲の周波数とでグラフを出しグラフより求めていた。

マーカはC-4で製作したコイルを4個直列に接続

した物を使用した。共振周波数の設定値は10 [MHz]、検出コイル間の距離100 mm、0 dBmの条件で測定し、RB=1 kHz、RB=10 Hzの時もそれぞれ測定し検討した。

$$v_m = \sqrt{(V_{out} \cdot \cos \theta - V_b)^2 + (V_{out} \cdot \sin \theta)^2} \quad (7)$$

(7)式を使い電圧を求め、測定範囲の周波数とでグラフを出しグラフよりQ、SN比を検討していく。Voutはマーカを設置した時の電圧(C-1の(4)式を使い求める) Vbはマーカ非設置時の電圧(3-1の(4)式を使い求める)、θはネットワークアナライザで位相のデータ(マーカ設置時、非設置時)を取り差を出したものである。図26は約7MHz付近で共振させたマーカの共振特性を示したものである。下の表はマーカを4個接続し、8層の導体層により構成した際のSN比を示したものである。RBが10Hzの場合にコイル間距離を100mmとした場合にSN比は11.2程度得られ、目標スペックをかるうじて達成することができた。

マーカ	RB [Hz]	Signal [μV]	Noise [μV]	SN比
4個直列マーカ	10	0.56	0.05	11.2
	1000	0.73	0.32	2.28

D. 考察

C-1の実験では研究室にあるコイルを使用しQとSN比を検討した。この実験では結果より周波数の設計値が高いほどSN比が高く得られる結果となった。

C-2では検出コイル間の距離を25 mmとし測定したが、共振周波数の設計値が5 MHz時のSN比が2.79、1 MHz時が8.89となっている。共振周波数

の設計値が高いほどSN比は高くなると思っていたが、高く値は得られなかった。なんらかの誤差のせいかもしれないC-4でも同じような誤差がみられる。

C-6の実験では検出コイル間の距離が100、150 mmまで離すとSN比が小さくなり、150 mmは評価できなかった。

C-7の実験ではネットワークアナライザの設定を0 dBmから15 dBmに変えるとsignalの値は約10倍以上得られるが、noiseも高くなっているので0 dBm時と15 dBm時のSN比の値はあまり変わらなかった。

C-8この実験ではRBの値を変えて測定している。RBを10 Hzで測定するとnoiseは $0.05 \mu\text{V}$, RB=1 kHzでは $0.56 \mu\text{V}$ と約10倍noiseが小さくなった。Noiseが小さいためSN比も高く得られる結果となった。

E. 結論

顎運動や舌運動等の顎顔面部の運動計測では、検出コイルと励磁コイルの距離が100 ~150 mm程度必要である。そして位置精度を1 mm程度にするためにSN比が20~30得られる薄型マーカを製作していくのが課題である。

本研究では、SN比が10程度までの薄型マーカを製作できたが、今後はさらにSN比を向上させるために、コイルの製作面では今使用しているコイルより薄く、線幅、銅体間隔は小さく巻き数があるコイルを製作いく予定である。

E. 研究発表

1. 論文発表

[1] S. Hashi, S. Yabukami, M. Toyoda, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Magnetic motion capture system using LC resonant magnetic marker composed of Ni-Zn ferrite core," Journal of Applied Physics, Vol. 99, No. 8, p. 08B312 (2006).

[2] 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: 「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」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 30, No. 3, pp. 391-395 (2006).

[3] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Wireless magnetic motion capture system for multi-marker detection," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, pp. 3279-3281 (2006).

[4] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Development of magnetic motion capture system for multi-position detection," Sensor Letters, Vol. 5, No. 1, pp. 300-303 (2007).

2. 学会発表

[1] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Development of Wireless Magnetic Motion Capture System for Multi-Marker Detection," International Conference on Magnetics 2006, Presentation No.: EV-08, Date: May 11, 2006.

[2] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, and K. I. Arai: "Development of magnetic motion capture system for multi-point detection," 6th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, Presentation No.: AP280-MP8, Date: July 3, 2006.

[3] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Evaluation of a new type of magnetic motion capture system," International Conference on Magnetism 2006, Presentation No.: PSTu-L-483, Date: August 22, 2006.

[4] 豊田征治, 栢修一郎, 大矢雅志, 藪上信, 石山和志, 岡崎靖雄, 荒井賢一: 「多点検出可能なワイヤレス磁気モーションキャプチャシステム」, 第30回日本応用磁気学会学術講演会, 講演番号: 13pB-10, 講演日: 平成18年9月13日

[5] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Wireless magnetic motion capture system? compensatory tracking of positional error caused by mutual inductance -," 10th Joint MMM-Intermag Conference, Presentation No.: AR-05, Date: January 8, 2007.

[6] 豊田征治, 栢修一郎, 大矢雅志, 藪上信, 石山和志, 岡崎靖雄, 荒井賢一: 「LC共振型磁気マ一カを用いた位置・方向検出システムー数値解析による検出位置精度向上化の検討ー」, 平成19年電気学会全国大会, 講演番号: 2-158, 講演日: 平成19年3月17日

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

[1] 米国特許出願 (P C T指定国移行)
 名称 : INSTRUMENT AND METHOD FOR MEASURING THREE- DIMENSIONAL MOTION
 米国特許出願番号 : 11 / 547050
 移行手続日 : Oct. 2, 2006
 発明者 : Hiroyasu Kanetaka(33.3%), Ken-ichi Arai(33.3%), Shin Yabukami(33.3%)
 特許出願人 : Japan Science and Technology Agency(100%)

[2] ドイツ特許出願 (P C T指定国移行)
 名称 : INSTRUMENT AND METHOD FOR MEASURING THREE- DIMENSIONAL MOTION IN LIVING BODY
 ドイツ特許出願番号 : 112005000700.6
 移行手続日 : Oct. 2, 2006
 発明者 : Hiroyasu Kanetaka(33.3%), Ken-ichi Arai(33.3%), Shin Yabukami(33.3%)
 特許出願人 : Japan Science and Technology Agency(100%)

[3] 中国特許出願 (P C T指定国移行)
 名称 : INSTRUMENT AND METHOD FOR MEASURING THREE- DIMENSIONAL MOTION IN LIVING BODY
 中国特許出願番号 : 200580017779.7

移行手続日 : Nov. 30, 2006

発明者 : Hiroyasu

Kanetaka (33.3%), Ken-ichi Arai (33.3%),

Shin Yabukami (33.3%)

特許出願人 : Japan Science and

Technology Agency (100%)

2. 実用新案登録

該当なし

3. その他

該当なし

II-3 分担研究報告書 (図表一覧)

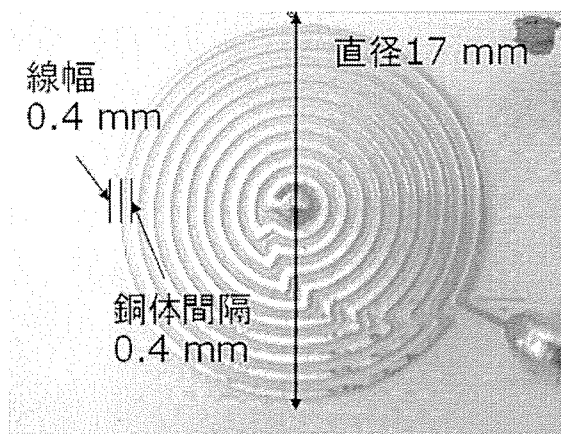


図1 製作したコイル

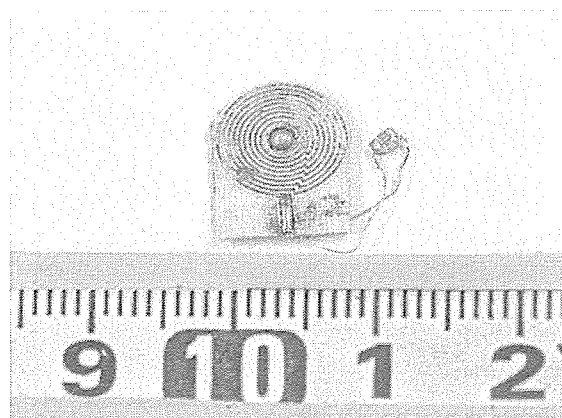


図4 共振周波数の設計値10 MHz
片面10回巻き

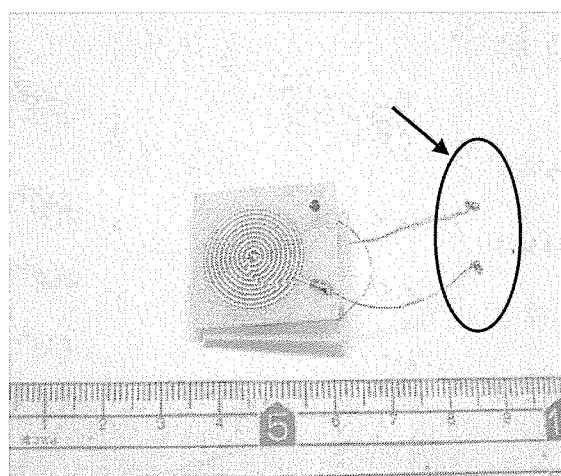


図2 完成したマーカ

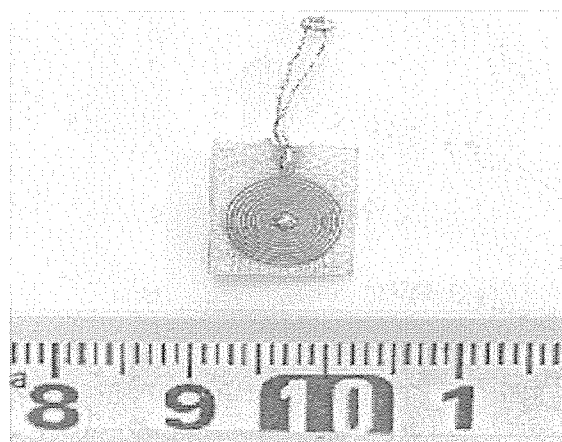


図5 共振周波数の設計値5 MHz
片面10回巻き

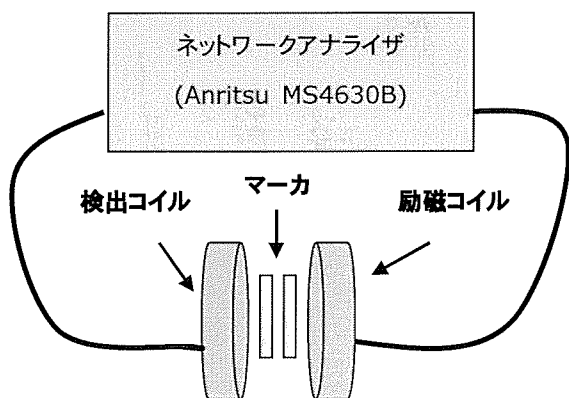


図3 共振周波数の測定

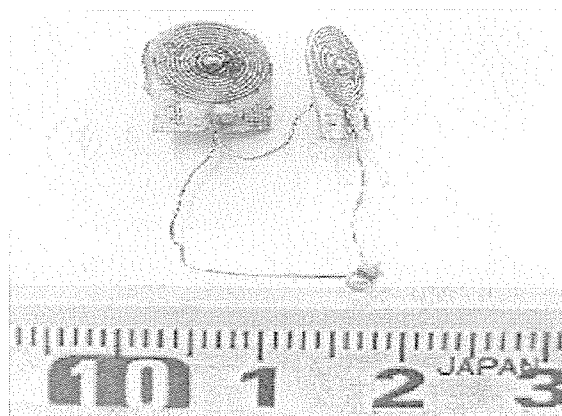


図6 共振周波数の設計値5 MHz
片面10回巻き 2個直列マーカ

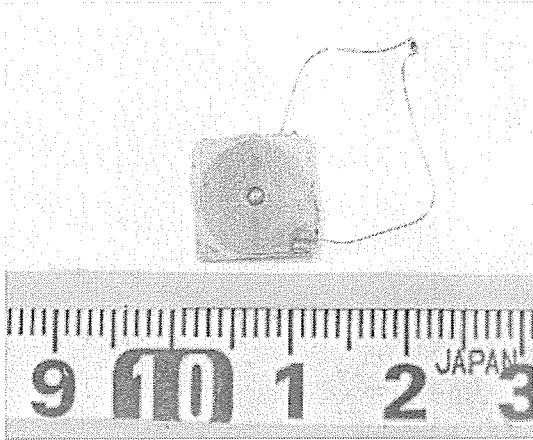


図7 共振周波数の設計値1 MHz
片面20回巻き

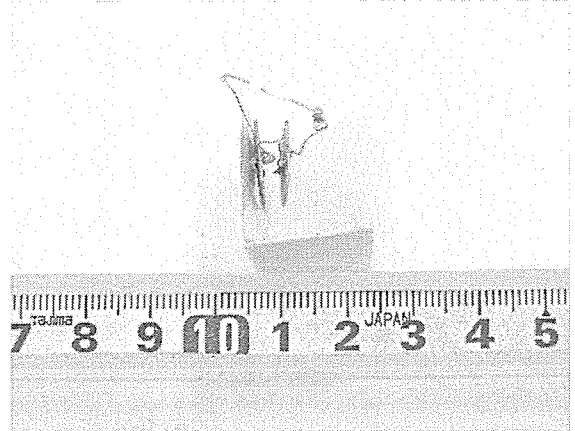


図10 マーカの固定方法(横からみた写真)

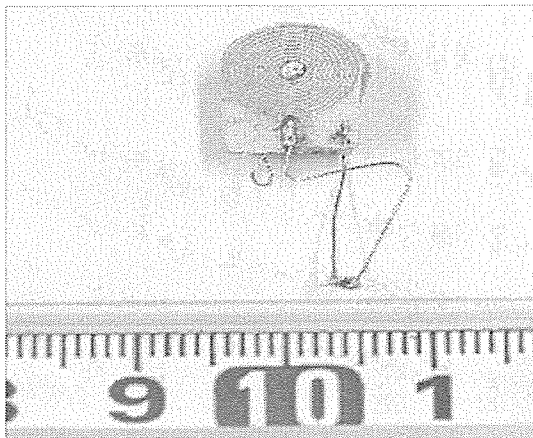


図8 共振周波数の設計値1 MHz
片面10回巻き 2個直列マーカ

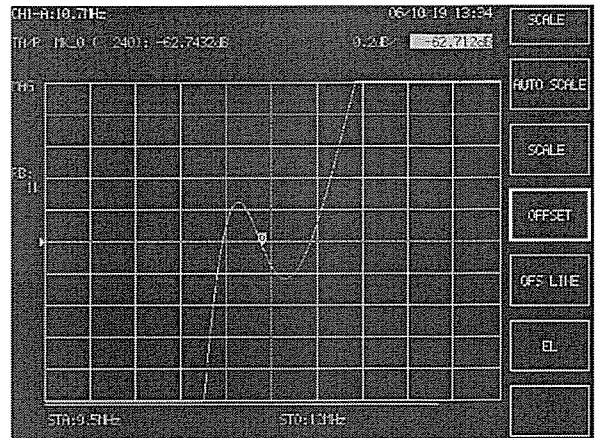


図11 共振周波数の設計値10 MHz
片面10回巻き

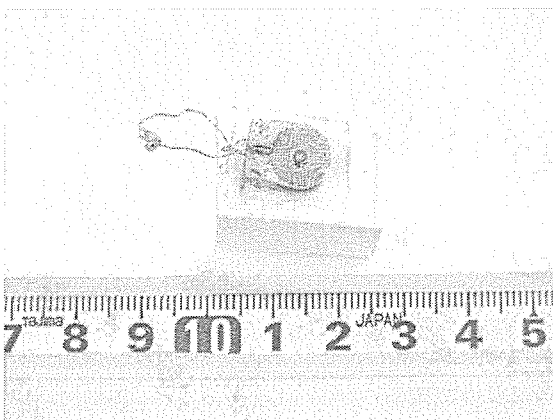


図9 マーカの固定方法(正面からみた写真)

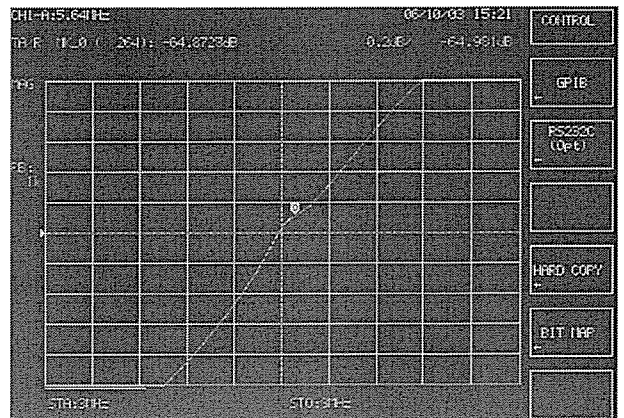


図12 共振周波数の設計値5 MHz
片面10回巻き

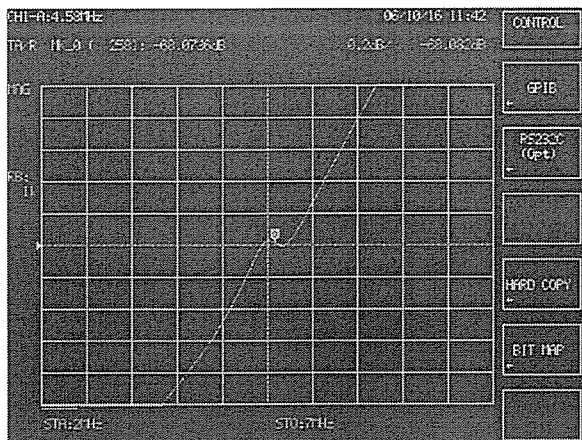


図13 共振周波数の設計値5MHz
片面10回巻き 2個直列マーカ

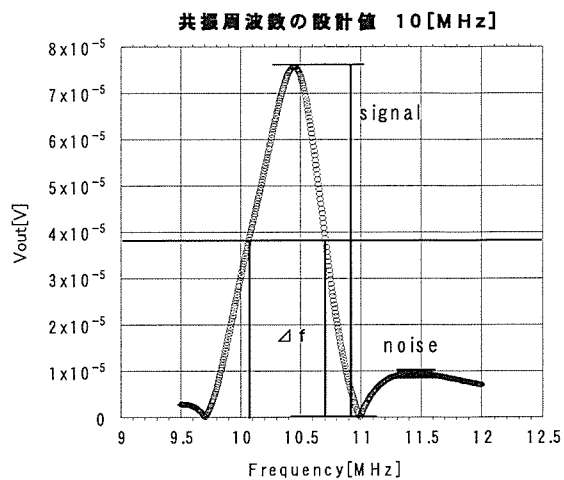


図16 共振周波数の設計値10 MHz
片面10回巻き

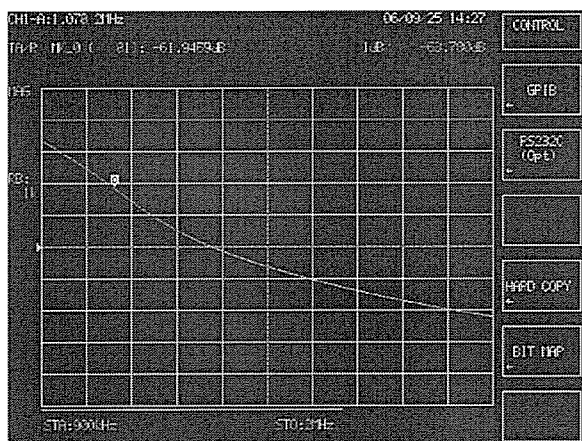


図14 共振周波数の設計値1 MHz
片面20回巻き

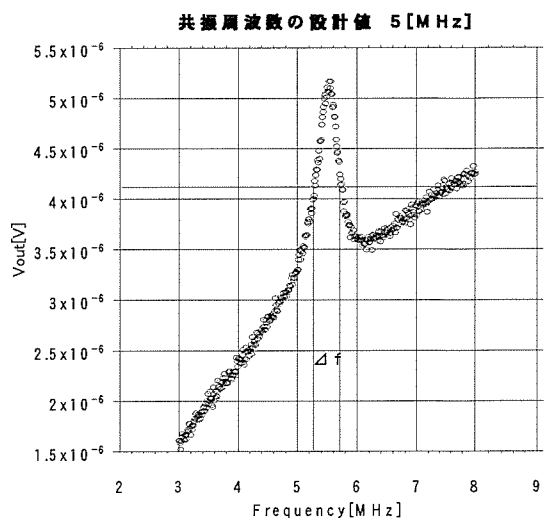


図17

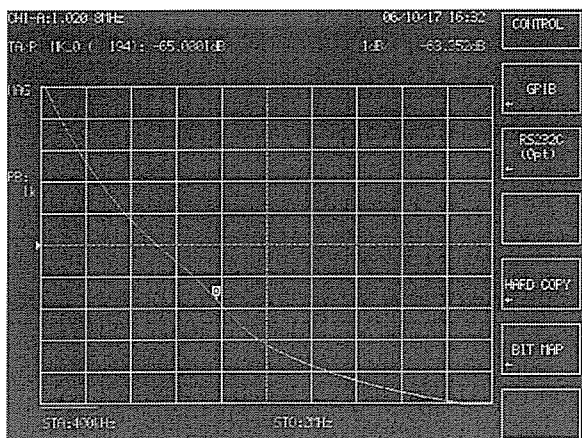


図15 共振周波数の設計値1MHz
片面10回巻き 2個直列マーカ

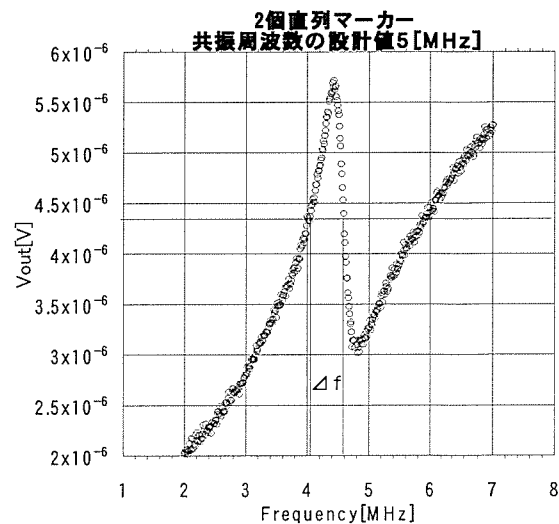


図18

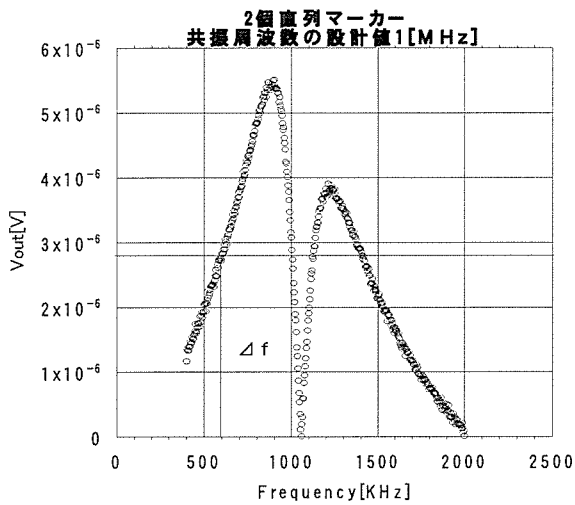


図19

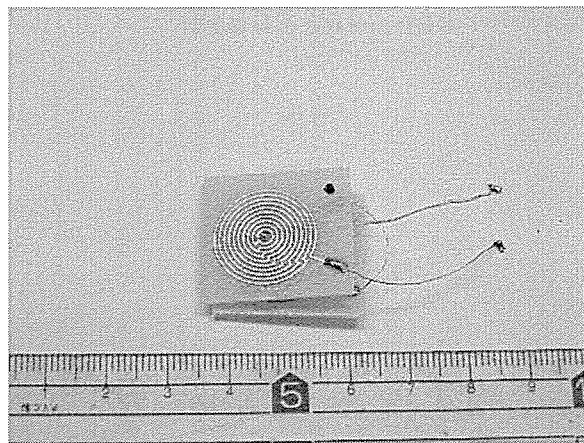


図22 完成したマーカ

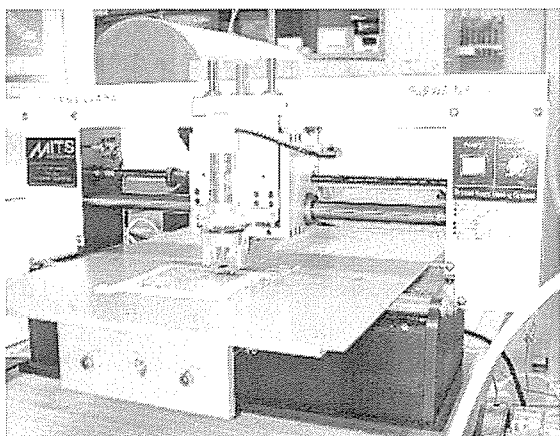


図20 プリント基板加工装置(CAM21-RS)

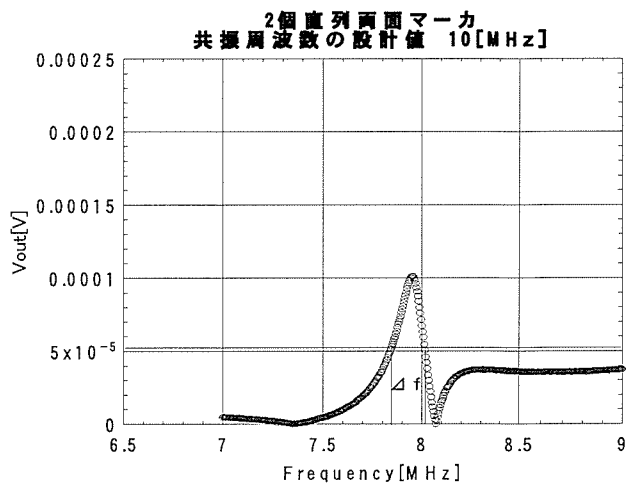


図23

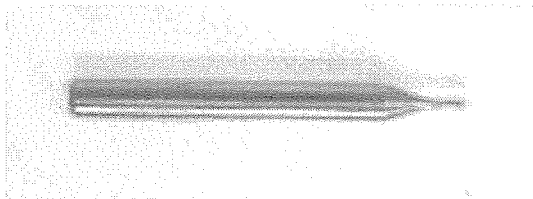


図21 ミリングカッタ

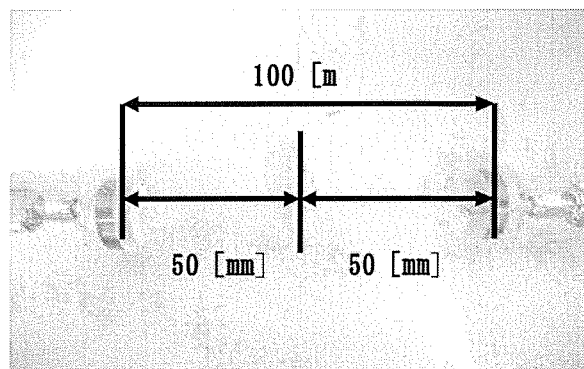


図24 検出コイル間の距離100 [mm]

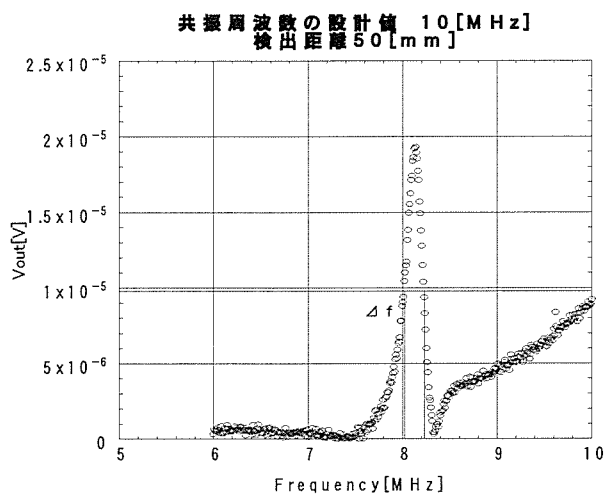


図25

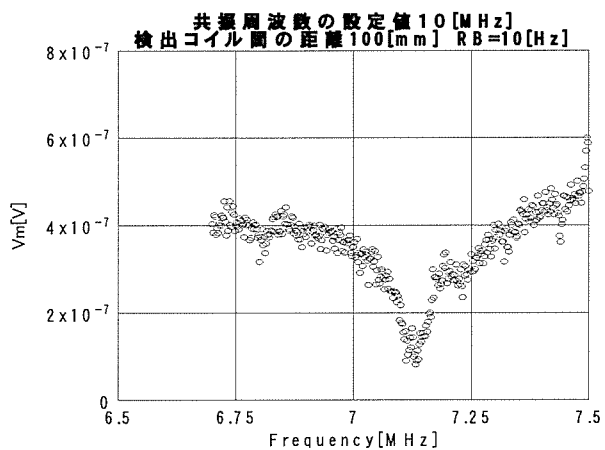


図26

LC 共振型磁気マーカを用いた位置検出システムの位置精度検証と薄型マーカの開発に関する研究

分担研究者 荒井 賢一 電気磁気材料研究所・理事

研究要旨

複数個の LC 共振型磁気マーカを用いた多点位置検出システムを構築し、その検出精度について検証を行った。LC マーカの配置が、LC マーカを駆動するための励磁コイルに近づくに従って、検出位置精度が悪化する傾向がみられた。この原因は、LC マーカと励磁コイル間に働く電磁気学的な相互誘導（相互インダクタンス）が原因であることが明らかとなり、その影響を検出時の位置算出過程で考慮することにより、検出位置を補正するアルゴリズムを開発しシステムに組み込んだ。その結果、検出コイルアレイから 140mm^3 の空間内で 6 個の LC マーカを用いた場合でも、 2mm 以下の検出位置精度を実現した。

また口腔内への適用を考慮して、LC マーカの主要構成部品である磁気コアの低背化による LC マーカの薄型化の検討を行った。その結果、厚さ $20\mu\text{m}$ 程度のアモルファスリボンに絶縁積層した磁気コアを用いることで、LC マーカ全体の厚みを 1mm 以下に抑えるための知見が得られた。

A. 研究目的

(A-1) これまでに基礎的な検討を行ってきた、単数の LC 共振型磁気マーカを用いた位置検出システムを拡張して、複数個の LC マーカに対応できる手法を提案する。また実際にそのシステムを構築して性能評価を行うと共に、検出位置の高精度化を図ることを目的とした。

(A-2) さらに LC マーカの中核構成部品である磁気コア材の見直しを行い、口腔内部にもストレスフリーで貼付可能なサイズの薄型 LC マーカを開発することを目的とした。

B-1. 研究方法（複数個マーカの性能評価）

B-1-1) システムの構成

構築したシステムの模式図を図 1 に示す。一辺 390mm の正方形型アクリル製巻き枠に巻かれた励磁コイル（線径 $0.26\text{mm} \times 10$ 回巻き）と、直径 25mm のアクリル製ボビンに巻かれた 25 個の検出コイル（線径 $0.1\text{mm} \times 40$ 回巻き）が 45mm 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 200mm 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 13 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 共振型磁気マーカの一つ

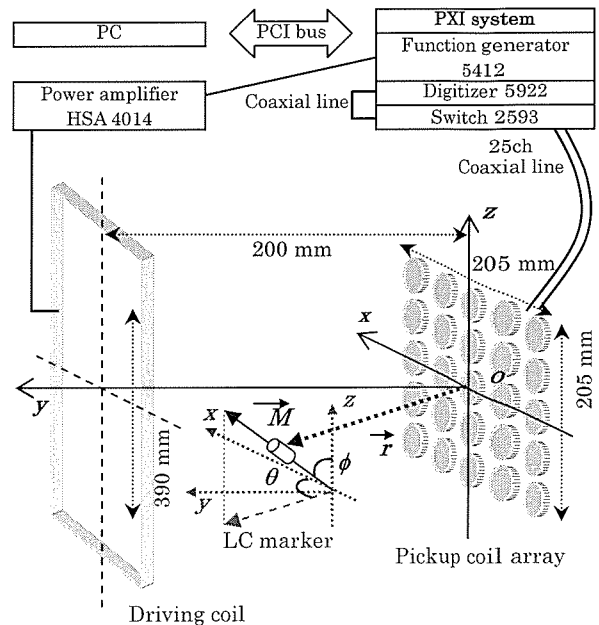


図 1 システムの概略図

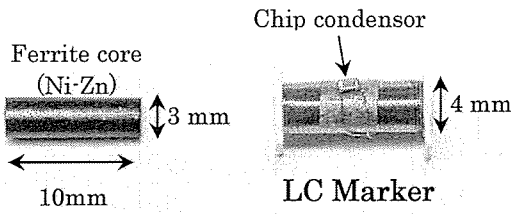


図 2 LC 共振型磁気マーカ

表 1 LC マーカの仕様

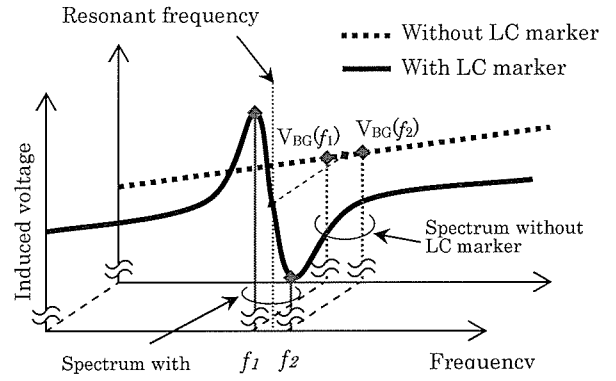
	Mk1	Mk2	Mk3	Mk4	Mk5	Mk6
Resonant frequency (kHz)	108	183	201	273	323	441
f_1 (kHz)	107	182	200	271	321	438
f_2 (kHz)	109	185	203	276	326	445
Diameter of core (mm)	3	3	3	3	3	3
Coil turns	500	350	300	270	220	120
Condensator (pF)	910	910	680	680	470	910
Inductance (μ H)	2400	1135	917	720	515	143
Quality factor	69	61	78	62	68	75

を図 2 に示す。直径 3mm、長さ 10mm のフェライト磁心 (TDK 製 L6、Ni-Zn フェライト、 $\mu_i = 1,500$ 、 $B_s = 0.28T$) に施した 120~500 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 6 個の仕様を表 1 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、サイズは全て図 2 に示すように、直径 4mm、長さ 10mm、重さは 0.5~0.8g 程度である。また LC マーカは、図 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配置した。

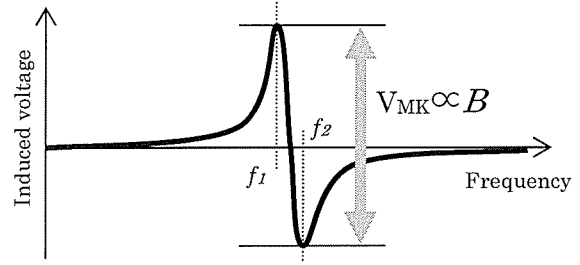
B-1-2) 誘起電圧計測方法

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、直接測定することは困難であるが、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図 3 (a) に示す。ここで、LC マーカ挿入前に検出コイルに誘起された電圧をバックグラウンド電圧: V_{BG} と定義する。また両者の差分をとった結果を図 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



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



(b) Marker contribution voltage

図 3 バックグラウンド電圧とマーカ寄与電圧

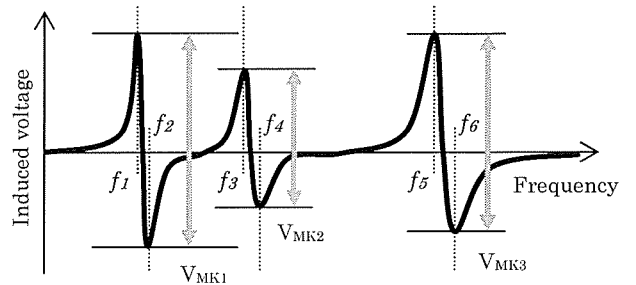


図 4 マーカ 3 個の場合のマーカ寄与電圧

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、B-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。図 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。図 3 (a) にその概念図を示す。本論文のシス

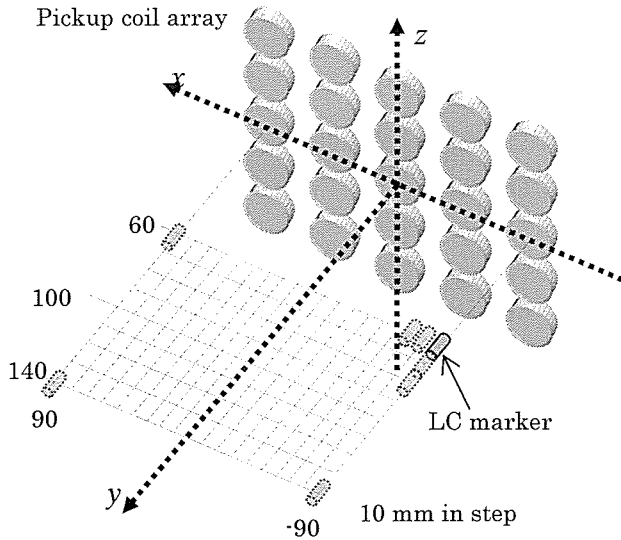


図 5 LCマーカと検出コイルの配置図

テムでは、使用周波数帯域幅を考慮し、サンプリング周波数を 5MHz 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、サンプリング数を 5,000 個とした。

B-1-3) 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 法により最適化を行った。

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

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

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

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)、 $\vec{B}_{meas}^{(i)}$ は検出コイル i における磁束密度の測定値、 $\vec{B}_{cal}^{(i)}$ 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 x - y 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(図 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。

C-1. 研究結果および考察

C-1-1) 絶対位置精度試験

1 個の LC マーカを図 5 に示すような x - y 平面に配置し、

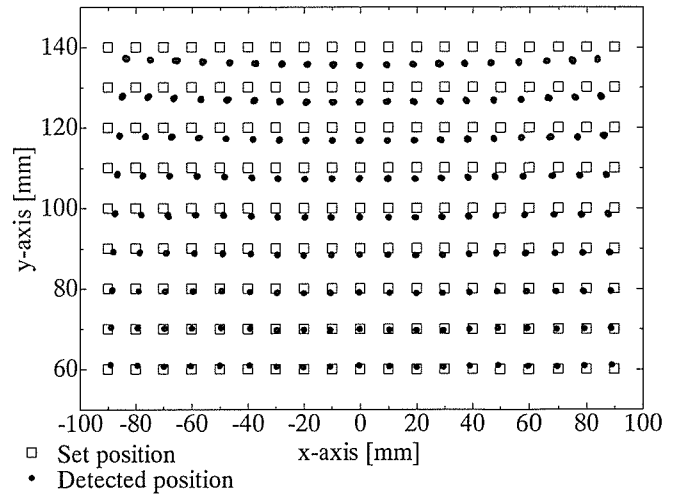


図 6 検出された位置 (x - y 平面)

位置検出性能評価を行った。LC マーカの設置には設置位置精度 0.1mm 以内で配置可能な 3 次元配置ステージを用いた。LC マーカを 3 次元配置ステージの稼動範囲である、 $-90 \leq x \leq 90$ 、 $60 \leq y \leq 140$ 、 $z = 0$ の領域を x 、 y 方向とも 10mm 間隔で、LC マーカのコイル断面が検出コイルおよび励磁コイルの断面に平行になるように配置して移動させた。

位置検出の結果を図 6 に示す。検出された LC マーカの位置は実際に配置された位置から、特に検出コイルアレイの中心から離れるにしたがって検出コイルアレイ中心方向へ、検出コイルアレイから離れるにしたがって手前へずれていることが分かる。この原因について以後に考察を行った。

C-1-2) 数値解析による検討

LC マーカの配置と検出位置の関係に対する詳細な検討を行うために、数値解析による検証を行い、検出される LC マーカの位置に対する挙動を調べた。数値解析の流れは、バックグラウンド磁界から LC マーカが発生する誘導磁界および各検出コイルに発生する磁界を数値計算によって求め、本システムで用いている位置算出ルーチンを使って LC マーカの位置を算出するというものである。そのフローチャートを図 7 に示す。まず、LC マーカを鎖交するバックグラウンド磁界を求め、それより LC マーカのコイルに誘起される電圧を得て、LC マーカ内のコイルを流れる電流を求める。LC マーカが発生する磁界は LC マーカをソレノイドコイルと仮定して求めた。ただし、位置の算出においては B. 研究方法で述べたとおり、ダイポール磁界として近似した。次に各検出コイルに誘起される電圧を算出する。ここで、各検出コイルを鎖交する磁束について検出コイルの断面積および巻き厚を考慮し、検出コイルが占める体積内の磁界強度の平均値を鎖交磁束とした。そして最後に本システムで用いている位置算出ルーチンを

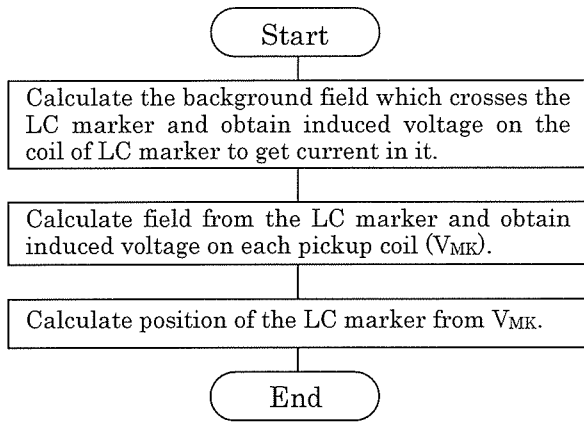


図 7 数値解析実験のフローチャート

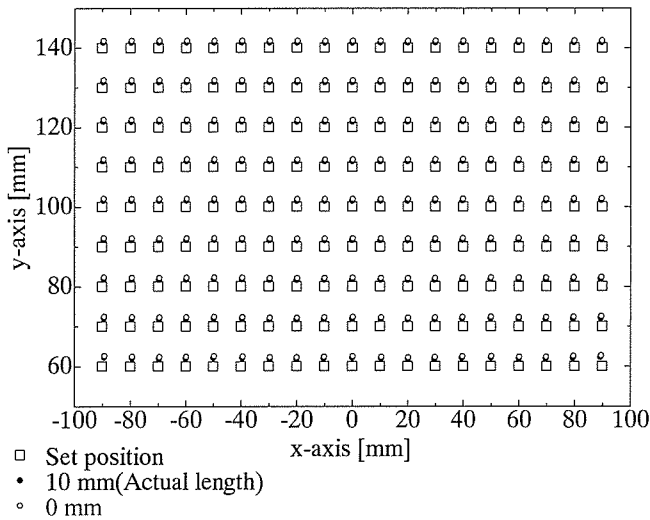


図 8 LC マーカの長さによる検出位置の比較.

用い、LC マーカの位置を算出する。

この数値解析により、LC マーカの長さについて、検出コイルの直径、個々の検出コイルのインピーダンス特性差、LC マーカ挿入による励磁コイルのインピーダンス変動、の4点について、実際の位置検出性能評価で LC マーカを配置した位置と同じ場所について検討した。

(1) LC マーカの長さの影響

LC マーカの長さについて、実際の長さである 10mm と長さ無し (0mm) の 2 種類を仮定して位置算出を行った。それぞれの位置算出結果を比較したものを図 8 に示す。図より LC マーカの長さは検出位置のずれに対する影響は非常に少ないと言える。

(2) 検出コイルの直径の影響

検出コイルの直径について本システムでいた実際のサイズ (25 mm) と点 (0 mm) の場合とで検討を行った。比較

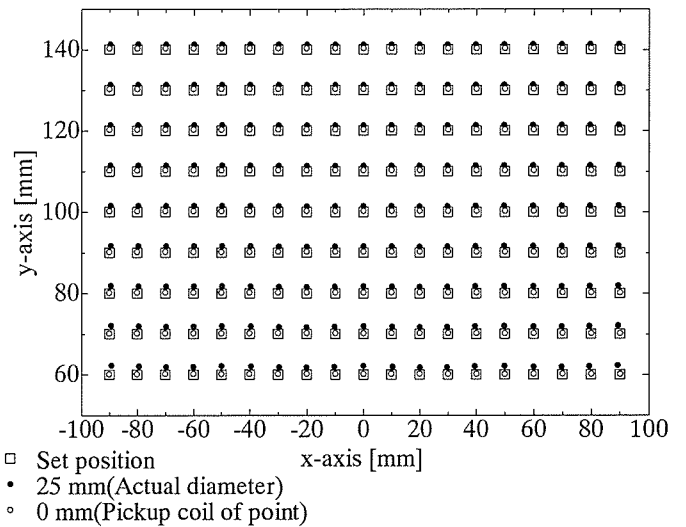


図 9 検出コイルの直径による検出位置の比較

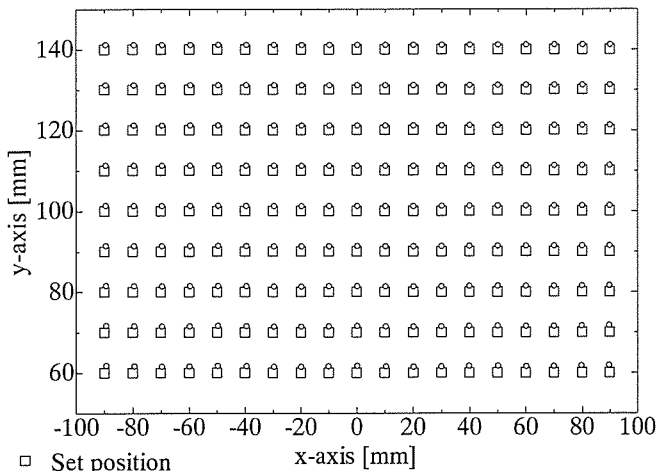
表 2 各検出コイルのインピーダンス特性

	Z [Ω]	Deviation [%]		Z [Ω]	Deviation [%]
ch1	111.50	0.04	ch14	110.95	0.53
ch2	110.91	0.56	ch15	110.96	0.52
ch3	111.62	-0.07	ch16	110.51	0.92
ch4	111.44	0.09	ch17	111.09	0.41
ch5	111.95	-0.37	ch18	111.04	0.45
ch6	112.23	-0.62	ch19	111.22	0.29
ch7	111.43	0.10	ch20	112.37	-0.74
ch8	112.01	-0.42	ch21	112.61	-0.96
ch9	112.73	-1.07	ch22	110.94	0.54
ch10	111.10	0.40	ch23	112.24	-0.63
ch11	111.48	0.06	ch24	111.38	0.14
ch12	111.64	-0.09	ch25	111.27	0.25
ch13	111.90	-0.32			

結果を図 9 に示す。図より、検出コイルが点の場合は LC マーカを設置した位置に検出できているが、直径が 25mm のときは全体的に検出位置が y 座標については 1~2mm ほど大きく検出されていることが分かる。この算出結果は図 6 の結果とは大きく異なっているが、検出コイルの直径が大きい場合には検出位置の y 座標は実際の座標よりも大きく検出されることが予測できる。

(3) 検出コイルのインピーダンス特性差についての検討

本システムで使用した検出コイルのインピーダンスとその平均値からの偏差を表 2 に示す。表から本システムで使用する検出コイルのインピーダンスのばらつきは 1~2%程度であることが分かる。なお、本システムで用いたデジタルサイザの入カインピーダンスは 1MΩである。表 2 から V_{MK} に対して検出コイルのインピーダンスによる分圧を考



- Set position
- Not considered
- Considered

図 10 検出コイルのインピーダンス特性の差を考慮した場合の検出位置の比較

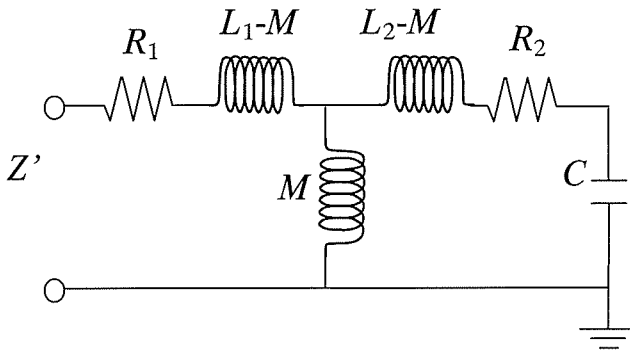
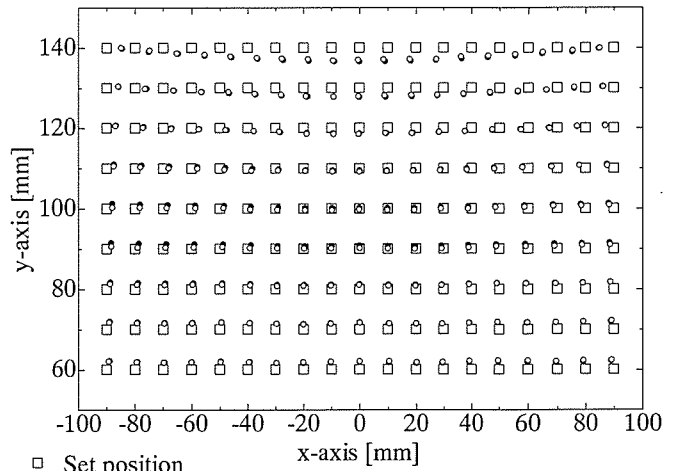


図 11 励磁コイルと LC マーカの電磁結合の等価回路図

慮し、検討を行った。結果を図 10 に示す。図から検出コイルのインピーダンスの特性差を考慮した場合としない場合では全く検出位置に変化が無いことがわかる。

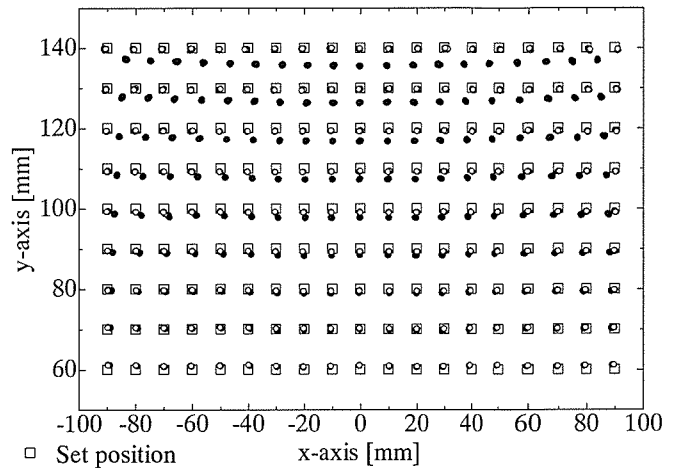
(4) LC マーカ挿入前後での励磁コイルのインピーダンスの変動に関する検討

励磁波形はパワーアンプにより定電圧で入力しているため、LC マーカ挿入時には励磁コイル—LC マーカ間に発生する相互インダクタンスによって励磁コイルのインピーダンスが変化し、励磁界が変化してしまうため必然とバックグラウンド電圧が変動することが考えられる。そこで、この相互インダクタンスを求め、励磁コイルのインピーダンスの変化を考慮した場合の検討を行った。相互インダクタンスは Biot-Savart の法則により励磁コイルが LC マーカ内に作り出す磁界を求めることによって求めた。そして、励磁コイル—LC マーカ間の電磁結合を図 11 の等価回路のように考慮し、励磁コイルの入力インピーダンスの変化量： ΔZ を求めた。LC マーカ挿入前の励磁コイルのインピーダンス： Z と挿入後のインピーダンス： Z' は次のように求まる。



- Set position
- Calculated position
- Experimental value

図 12 バックグラウンド電圧の変動を考慮した場合と実測値の比較



- Set position
- Detected position
- Corrected position

図 13 実際に検出された位置とバックグラウンド電圧の変動を考慮して修正された位置

$$Z = R_1 + j\omega L_1 \quad (4)$$

$$Z' = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (5)$$

ここで、 R_1 、 L_1 は励磁コイルの直流抵抗成分および自己インダクタンス成分、 R_2 、 L_2 、 C は LC マーカの直流抵抗成分、自己インダクタンス成分およびキャパシタンス、 M は励磁コイル—LC マーカ間に生じる相互インダクタンスである。ここで、LC マーカ挿入前後のバックグラウンド電圧： V_{BG} 、 V'_{BG} はそれぞれ励磁コイルのインピーダンスに反比例するため、

$$V_{BG} \propto \frac{1}{|Z|}, \quad V'_{BG} \propto \frac{1}{|Z'|} \quad (6)$$

が成り立つ。すると、次の式が成り立つ。

$$\frac{V'_{BG}}{V_{BG}} = \frac{|Z|}{|Z'|} \quad (7)$$

これより、バックグラウンド電圧の変化量： ΔV_{BG} は

$$\Delta V_{BG} = V'_{BG} - V_{BG} = \frac{\Delta Z}{|Z|} V_{BG} \quad (\Delta Z = |Z| - |Z'|) \quad (8)$$

と求まる。式(8)を用いてバックグラウンド電圧の変化量を求め、その影響を考慮して V_{MK} を変化させ、位置算出を行った。実際の位置検出の結果と比較したものを図 1 2 に示す。図から、LC マーカ挿入によるバックグラウンド電圧の変化を考慮した場合、図 6 で発生した検出位置のずれと酷似した結果を得ることができた。よってずれの原因は LC マーカ挿入による励磁コイルのインピーダンスの変動によるバックグラウンド電圧の変動であると考えられる。

C-1-3) 検出位置の補正

検出位置のずれの原因が LC マーカ挿入による励磁コイルのインピーダンスの変化であるとの数値解析の結果より、図 6 で得られた結果に対しこれを考慮した補正を行った。補正の方法は、実験で得られた V_{MK} に対し、それから求められた LC マーカの位置情報から励磁コイルとの間に発生した相互インダクタンスを求め、そこから得られるバックグラウンド電圧の減少量を V_{MK} に加えて LC マーカの位置を再計算するというものである。元の結果と補正後の結果の比較を図 1 3 に示す。図から実際の位置検出性能評価を行った領域においては補正後の LC マーカの検出位置は、設置した位置から 2mm 以内で検出できていることが分かる（検出コイルから 100mm までの範囲においては、1mm 以下）。

C-1-4) 6 個の LC マーカ同時検出に対する検出位置補正の適用

6 個の LC マーカに対する検出位置補正を試みた。それぞれの LC マーカの配置を図 1 4 に示す。6 個の LC マーカを x 軸方向へ一直線に 20mm 間隔で配置し、検出コイルから 60~140mm の範囲を 10mm 間隔で移動させた。検出結果と補正後の位置を図 1 5 に示す。補正後は設置位置から 2mm の位置に検出できていることが分かる（検出コイルから 100mm までの範囲においては、1mm 以下）。これより、LC マーカが複数個ある場合でもこの補正方法は有効であることが実証された。

D-1. 結論

複数個の LC マーカに対応した位置検出システムについて位置検出の性能評価を行った結果、励磁コイルのインピーダンス変動によって検出位置がずれることを指摘し、その補正

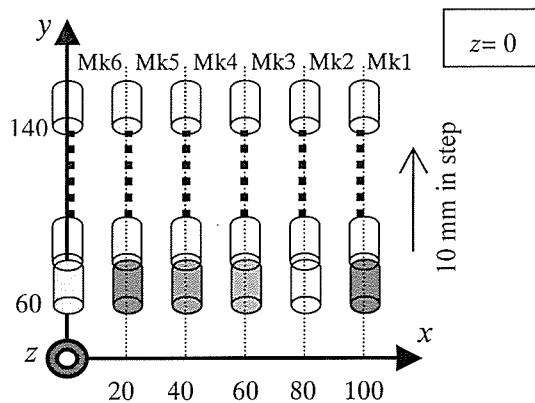


図 14 6 個の LC マーカの配置図

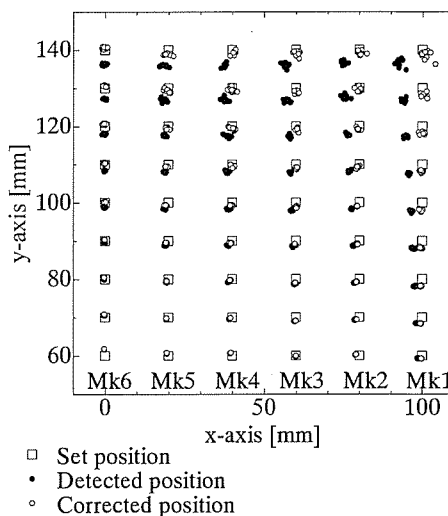


図 15 複数 LC マーカの検出結果と補正後の位置

方法を示した。その結果、検出コイルから 60~140mm の範囲において 2mm 程度の位置精度で検出可能であることが明らかとなった（検出コイルから 100mm までの範囲においては、1mm 以下）。

B-2. 研究方法（薄型 LC マーカの開発）

LC マーカを薄型化するには、これまでマーカの磁気コア材として使用してきた直径 3mm、長さ 10mm の円柱状のフェライト材を単に薄くするだけでは不十分である。フェライト材はセラミックス（酸化物）材であるため脆く、板厚の減少に伴う機械的強度の低下と、物性定数である単位体積あたりの磁化が低いことから、体積減少に伴う磁界（磁気信号）発生能力の極端な低下が大きな課題であった。そこで本研究では、磁化がフェライト材の 4 倍程度大きく、また薄くても機械的強度の高いアモルファス金属磁性箔帯の適用の可能性について検討を行った。

図 16 にアモルファス箔帯（厚さ 20 μ m）で磁気コアを構成した際の LC マーカの模式図を示す。厚みが 20 μ m と非常に薄いため、見かけ上の電気抵抗が高く高周波磁束の鎖交により箔帯内に生じる渦電流の低減が可能であるが、単体（1枚）では体積が小さいことから LC マーカを構成した場合の

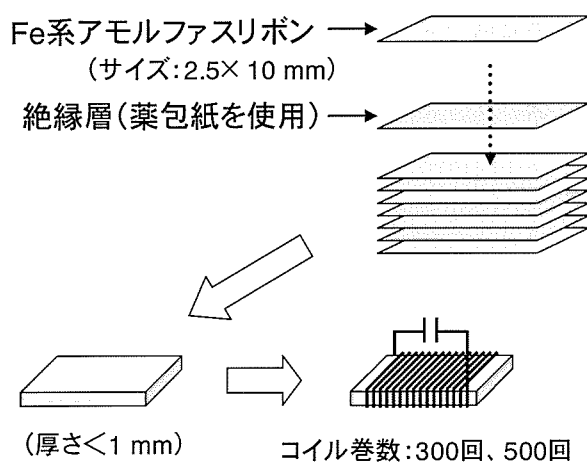


図 16 積層アモルファス箔帯磁心を用いた LC マーカ

アモルファスリボンを挿入した状態

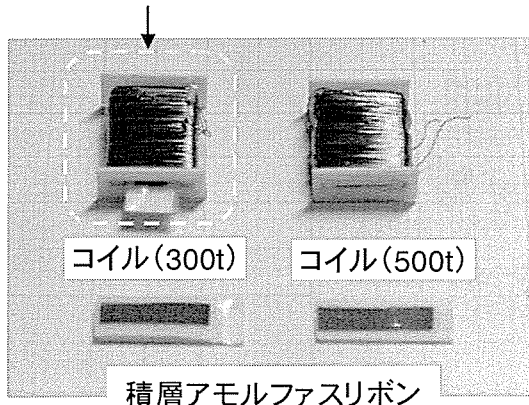


図 17 試作した薄型 LC マーカ

磁界発生力が乏しい。そこで図 16 のように積層することで磁気コア材としての体積を稼ぎ、磁界発生力の向上を図る。アモルファス箔帯の寸法は 2.5×10mm である。箔帯間に絶縁層を挿入しているのは、導通により前述の渦電流が積層箔帯全体にわたって流れ、磁界発生力の低下を招くのを防ぐためである。実際に試作した薄型マーカを図 17 に示す。アモルファス箔帯の積層数による効果を検討するために、磁気コアが抜き差し可能なコイル巻枠を作製し、それに線径 0.1mm のポリエステル被覆銅線を巻き、300回巻、500回巻の二つのコイルを用意した。また箔帯の積層数は 1, 2, 5, 8 枚の計 4 種類を用意した。以下の 2 点について検討を行った。

(1) まず箔帯積層コアを挿入したコイルのインダクタンスの周波数特性を測定し、その結果よりコイルの性能指数である Q 値（共振の鋭さ）を求め、LC 共振周波数が Q 値の高い周波数帯に設定されるようにチップコンデンサの静電容量値を選んで LC マーカを作製する。

(2) 作製した各 LC マーカについて、B-1 で述べたシステムを用いて、マーカの発生磁界力の目安となる誘起電圧測定を行う。

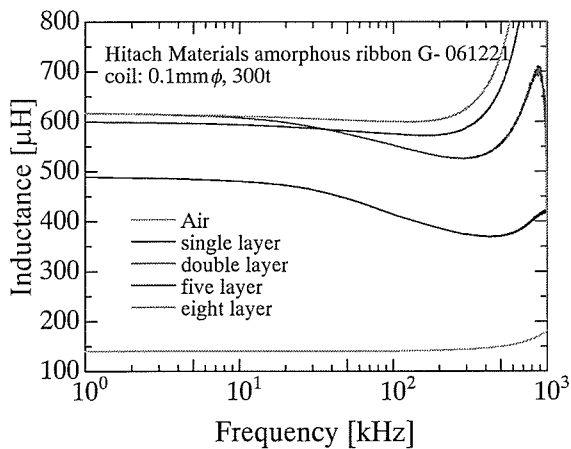
C-2. 研究結果および考察

C-2-1) インピーダンスの周波数特性

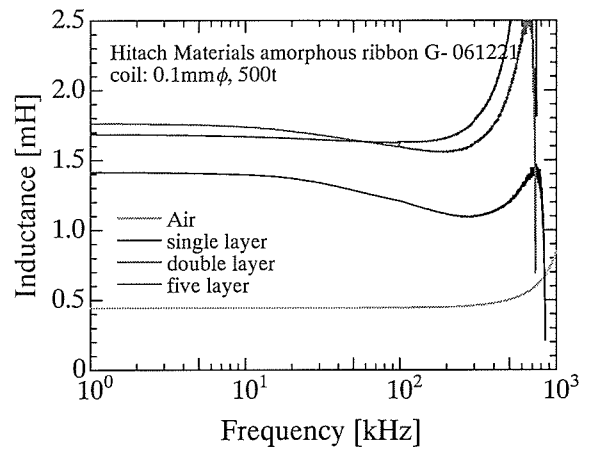
C 300回巻、500回巻のコイルを用いた場合の 1kHz ~1MHz における測定結果をそれぞれ図 18、図 19 に示す。(a)がインダクタンス、(b)が Q 値であり、「Air」とあるのは、箔帯コアを未挿入（空心）の結果である。これまで検討を行ってきた動作周波数帯である 100kHz 以上において、図 18 (a)、図 19 (a)のインダクタンスを比較してみると、300回巻に比べ 500回巻の方が 2 倍程度大きな値を示すことが判る。またアモルファス箔帯の積層数が多い方が大きな値を示すが、積層数が増えていくに従ってその効果は小さくなっている。これは磁気コア全体としての断面積が大きくなると実行的な反磁界が大きくなり、磁性材料としての特性を十分発揮できなくなるという、形状的效果による磁性材料ならではの欠点のためである。

次に図 18 (b)、図 19 (b)の Q 値の測定結果より、300回巻の箔帯 8 層で約 16 (@200kHz)、500回巻の箔帯 5 層で約 14 (@100kHz) が得られた。B-1 で使用した表 1 の円柱フェライトコアから成る LC マーカ Mk1 の約 69 (@110kHz) に比べると約 1/4 程度である。これは単純に磁気コアの体積が減少したことが大きな要因である。

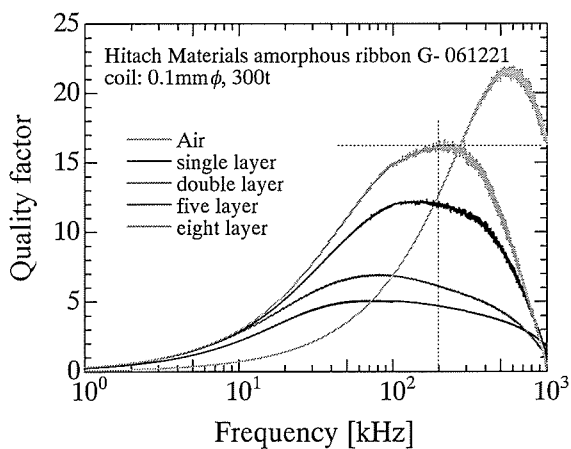
C-2-2) 薄型 LC マーカの誘起電圧測定



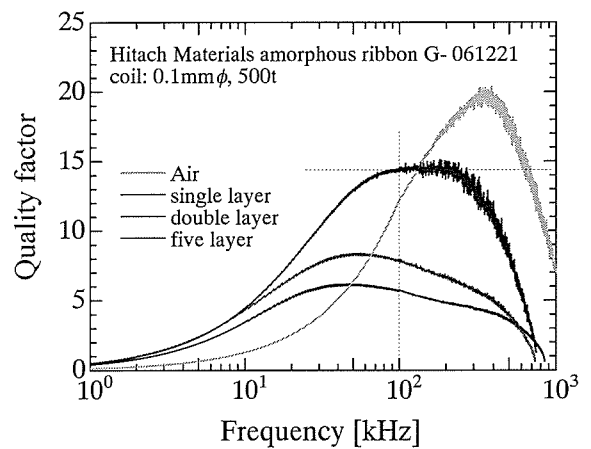
(a) インダクタンスの周波数特性



(a) インダクタンスの周波数特性



(b) Q値の周波数特性



(b) Q値の周波数特性

図 18 300 回巻コイルを用いた場合の周波数特性

図 19 500 回巻コイルを用いた場合の周波数特性

次に、前述の(a)300回巻の簿帯8層および(b)500回巻の簿帯5層について、最も高いQ値を示した周波数(それぞれ200kHz、148kHz)に共振周波数を設定すべく、適当な値のチップコンデンサをコイルの両端に接続してLCマーカを作製し、出力特性(誘起電圧特性)の測定を行った。実際の測定の様子を図20に示す。25個の検出コイルアレイの中心に配置された検出コイルの中心軸上から、50mm、100mmの距離に薄型LCマーカを配置して誘起電圧の測定を行った。その際、薄型LCマーカの長手方向が検出コイルの中心軸に平行になるように配置した。結果を図21(a)、(b)にそれぞれ示す。両者共にピークピーク電圧値で、約0.47mV_{p-p}(@50mm)、約0.1mV_{p-p}(@100mm)を示した。この値は円柱フェライトコアからなるLCマーカの場合の約1/7程度であるが、本測定(位置検出)システムに用いている電圧計測器(デジタル)は0.5μV程度の測定分解能を持つため、図21の測定結果をSN比に換算すると、それぞれ940(@50mm)、

200(@100mm)となる。以前の基礎検討段階で行った結果によれば、25個の検出コイル全体のSN比の平均値が10以上あれば、検出位置精度1mm以下を実現できるとの見積もりが得られており、薄型LCマーカは十分な磁界発生力を持っていると思われる。また、今回は都合により積層数が8層までの検討結果であったが、簿帯間の絶縁層を薄くすることで積層数の増加し、Cマーカの磁界発生力を増すことは可能であると考えられる。

D-2. 結論

LCマーカの主要構成部品である磁気コアの低背化によるLCマーカの薄型化の検討を行った。その結果、厚さ20μm程度のアモルファスリボンを絶縁積層した磁気コアを用いることで、LCマーカ全体の厚みを1mm以下に抑えるための知見が得られた。

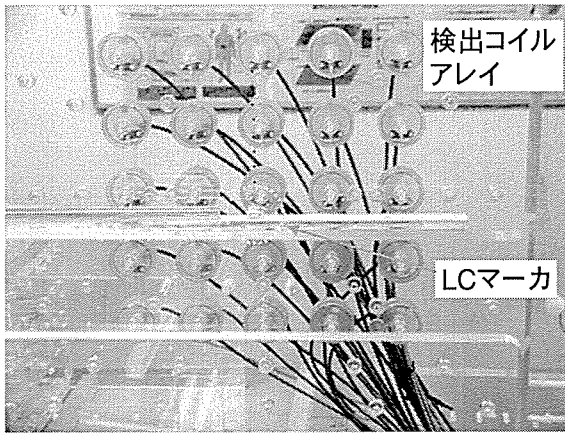


図 20 実際の薄型 LC マーカと検出コイルアレイ

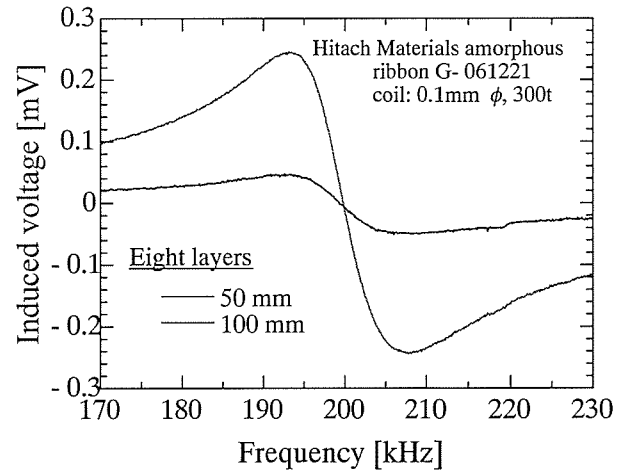
E. 研究発表

1. 論文発表

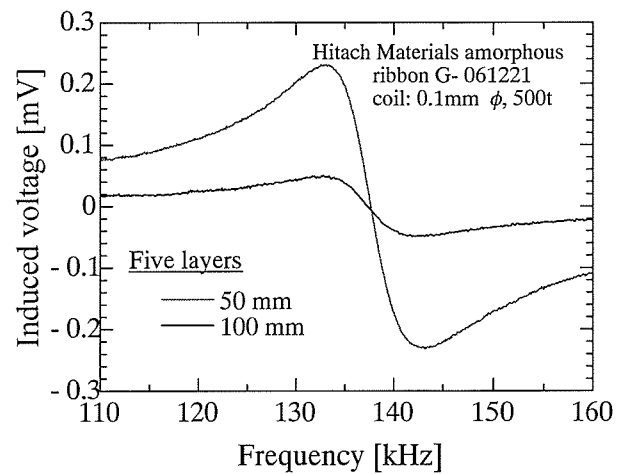
- [1] S. Hashi, S. Yabukami, M. Toyoda, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Magnetic motion capture system using LC resonant magnetic marker composed of Ni-Zn ferrite core," Journal of Applied Physics, Vol. 99, No. 8, p. 08B312 (2006).
- [2] 豊田征治, 栢修一郎, 藪上信, 大矢雅志, 石山和志, 岡崎靖雄, 荒井賢一: 「複数 LC 共振型磁気マーカを用いた多点位置検出システム」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 30, No. 3, pp. 391-395 (2006).
- [3] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Wireless magnetic motion capture system for multi-marker detection," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, pp. 3279-3281 (2006).
- [4] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Development of magnetic motion capture system for multi-position detection," Sensor Letters, Vol. 5, No. 1, pp. 300-303 (2007).

2. 学会発表

- [1] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Development of Wireless Magnetic Motion Capture System for Multi-Marker Detection," International Conference on Magnetics 2006, Presentation No.: EV-08, Date: May 11, 2006.
- [2] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, and K. I. Arai: "Development of magnetic motion capture system for multi-point detection," 6th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, Presentation No.: AP280-MP8, Date: July 3, 2006.
- [3] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Evaluation of a new type of magnetic motion capture system," International Conference on Magnetism 2006, Presentation No.: PSTu-L-483, Date: August 22, 2006.
- [4] 豊田征治, 栢修一郎, 大矢雅志, 藪上信, 石山和志, 岡崎靖雄, 荒井賢一: 「多点検出可能なワイヤレス磁気モーションキャプチャシステム」, 第 30 回日本応用磁気学会学術講演会, 講演番号: 13pB-10, 講演日: 平成 18 年 9 月



(a) 300 回巻コイルに 8 層の積層コアを挿入



(b) 500 回巻コイルに 5 層の積層コアを挿入

図 21 薄型 LC マーカの誘起電圧特性

13 日

- [5] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: "Wireless magnetic motion capture system ? compensatory tracking of positional error caused by mutual inductance -," 10th Joint MMM-Intermag Conference, Presentation No.: AR-05, Date: January 8, 2007.
- [6] 豊田征治, 栢修一郎, 大矢雅志, 藪上信, 石山和志, 岡崎靖雄, 荒井賢一: 「LC 共振型磁気マーカを用いた位置・方向検出システム—数値解析による検出位置精度向上化の検討—」, 平成 19 年電気学会全国大会, 講演番号: 2-158, 講演日: 平成 19 年 3 月 17 日

F. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

①

米国特許出願 (PCT 指定国移行)

名称 : INSTRUMENT AND METHOD