磁気抵抗素子を応用した無接触変位計測装置の開発

幸阪 保雄 小笠原浩一

後藤 忠正 藍 稔

New Measuring Device for Displacement using Magnetoresistive Element

Yasuo Kohsaka, Kouichi Ogasawara, Tadamasa Goto and Minoru Ai

I. 緒 言

欠損補綴の目的を具体化する補綴方法には種々のものがある。最良の補綴方法の選択・決定にあたっては、補綴物の装着効果と予後とが大きな判断基準であり、そしてそれは補綴方法それ自体の評価にも繋ってくる。この判断基準を求めるには、補綴物装着に対する生体側の応答を知り、さらにそれが時間的にどのように変化するかを予測しなければならない。このような生体側の応答を把握するためには、口腔内で各種の力学量を計測する必要がある。特に咬合・咀嚼力と関連した変量、ことに力量および変位量の計測が主体である。

口腔領域における変位計測の対象は、1 μ m 前後の歯の脈動から、数 cm に及ぶ下顎の限界運動路まで非常に広範であり、したがって計測方法も多種多様である。従来、変位センサとしてはストレインゲージ応用のもの、差動トランス応用のものが主であった。しかし、いずれも接触型センサであるため、変位検出にあたって種々の制約があり、特に動変位の計測には不適である。

近年、磁気を利用した各種センサが、優秀な磁性体の開発と相俟って注目されている。磁気センサは、① 無接触検出が可能である、② 厳しい環境条件のもとでも利用できる、③ 経年変化が少ない、④ 過負荷に強い、⑤ 比較的大きな出力が得られる、などの利点がある¹⁾。

歯科領域においても、下顎運動の計測 (Mandibular Kinesiograph²⁾, Sirognathograph³⁾), 歯の動揺測定^{4,5)}, 下顎位の測定⁶⁾, 顎間距離の測定⁷⁾, などに応用されている。しかし、いずれもセンサ部がかなりの大きさを持ち、一部を除いては口腔内での計測には困難を伴う。

今回、著者らは磁気を利用した非常に小型の変位センサを口腔内での計測に応用して、好結果を得たので、計測装置の概要および精度、応用例について報告する。

追加

なお、先に当教室では非接触式の変位センサとして、うず電流効果を応用した非接触微小変位測定装置を考案し、主として歯の動揺測定に用いている⁸⁾。本センサも同様に非接触式のものであるが、磁気抵抗素子の開発に関する加藤 厚氏の論文⁹⁾に従って無接触変位センサとした。また II-1 および 2 項は、同論文に従って記載した。

II. 無接触変位計測装置の概要

1. 変位センサ用磁気抵抗素子

半導体の電気抵抗が磁界の作用で増加する現象を磁気抵抗効果といい、本センサはこの現象を応用した無接触式のものである。

磁気抵抗素子 (KMR-15 L, 勸業電気機器製) は、受感部が InSb (インジウム・アンチモン化合物) の薄膜ラスタプレート形のものであり、これを 2 個対にしてセラミックス基板上に形成してある (それぞれの素子を象限素子という) (図 1)。

2 個の象限素子を対にして用いる形式を差動型磁気抵抗といい、① 直線性のよい出力を得ること、② 抵抗の

東京医科歯科大学歯学部第一歯科補綴学教室 (主任: 藍 稔 教授)

The First Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Tokyo Medical and Dental University (Chief: Prof. Minoru Ai)

昭和 59 年 9 月 26 日受付

図 1 (中央) 差動型磁気抵抗素子 (KMR-15 L) と対向磁石 (ハイコレックス H-22 A)
(右) 差動型磁気抵抗素子 (KMR-10 H)

図 2 無接触変位センサの構成

温度変化を補償すること、を目的としている。素子の表面はカバーガラスで覆われ、全体がプラスチックモールドで外界から保護されている。対になっている2個の象限素子は、電磁気的特性が同一のものであり、直列に接続されていて、その両端および中間の接続点から端子が引き出されている。これらの端子は、従来のスライドポテンショメータの両端とスライド端子に対応するもので、本センサの等価回路はスライドポテンショメータと考えられる。

2. 変位センサの構成

1) 構成および原理

磁気抵抗素子は、小さな磁石と組合せて変位センサとして応用される。通常は素子を固定部に、磁石を移動物体に取り付け、物体の移動を素子と磁石の相対変位として検出する。変位の方法は、象限素子の並びの方向（感度方向）になるようにする（図2）。

磁石は、その磁界から発生する磁束が受感部の面に垂

図 3 無接触変位センサの作動原理

図 4 変位と分圧比の関係

直に通過するように配置する。極性は S、N いずれでもよく、磁石と素子は接触する必要はない。

作動原理は以下のようである（図3）。

磁石と素子との相対移動によって、磁石から出た磁束は受感部の2個の象限素子を差動的に通過する。このとき磁束は受感部の一部分のみを通過するのであるから、素子の磁極の下にある部分のみが磁気抵抗効果によって電気抵抗が増加する。いま、磁石の位置が受感部の中央にあれば、磁束は象限1と2を等分に通過するから、端子1, 2間の抵抗 R_1 と端子2, 3間の抵抗 R_2 は、磁気抵抗効果を等しく受けることになり、 $R_1 = R_2$ である。磁石が象限2の方に移動 (X) すると、象限素子2は磁極の下にある部分が多くなるので、磁気抵抗効果の影響を多く受けるため、抵抗 R_2 が大きくなる。これに対して、象限1では磁気抵抗効果の影響が減少して、抵抗 R_1 は小さくなる（なお全抵抗 $R_1 + R_2$ は磁石がどの位置にあっても、全体として磁気抵抗効果の影響が同じなので変わらない）。

以上のように、差動型の磁気抵抗素子は、電気的にはスライドポテンショメータと等価である。そこで端子1, 3間に入力電圧 E_1 を加えると、端子1, 2間に分圧された出力電圧 E_2 が現れ、分圧比 E_2/E_1 が磁石の位置によって変化する（図2, 4）。この特性を利用して差動型磁気抵抗素子を変位センサとして応用するものである。

図 5 変位センサの外部回路

2) センサ回路

差動型磁気抵抗素子の等価回路は、スライドポテンシオメータであるから、その外部回路も基本的には同じである(図5)。ただ原理的に、片側の象限素子の抵抗がゼロになるような操作はできないので、ストロークの一端で残留する出力電圧をキャンセルするためのゼロ点補償電圧が必要となる。

また、センサの感度すなわち出力電圧は、素子自体の磁界感度のみならず、対向磁石の強さ、磁石と素子との間隙などによって影響を受けるから、感度調整を設ける必要がある。

3) 対向磁石

素子と組合せる対向磁石の大きさによって、変位の有効検出範囲(有効ストローク)が違ってくるが、これが最大となるのは、移動方向での磁石の長さ(図2のa)が、象限素子の中心間隔に等しい場合である。このとき磁束が理想的に各部で等しく、かつ磁極面に垂直であれば、有効ストロークは象限素子の長さに等しくなる。実際には、磁束の端の方で磁束が広がる縁効果(Fringing Effect)のため磁束密度が減少しており、ストロークの端の方では直線性が損われ、出力はS字形特性となる。

磁石の幅(図2のb)は、素子受感部の幅より十分に大きいことが望ましい。また磁石の着磁方向の厚さは、磁石材料の減磁特性によって決めることになる。

対向磁石の磁束密度は、大きいほど変位検出の感度が高くなる。一般にはS/N比を考慮して、空隙磁束密度は0.2 T以上が望ましいとされている。また磁石と素子とはできるだけ接近するように配置する。

磁束の縁効果を軽減し、出力の直線範囲を上げ、かつ空隙磁束密度を大きくする目的で、素子の裏面、すなわち磁石との対向面と反対側に軟磁性のバックヨークを設けることもできる。

今回、対向磁石として、サマリウムコバルト合金磁石(SmCo₅ 磁石)であるハイコレックス H-22 A(日立金属

図 6 変位と出力との関係(素子と磁石との間隙 500 μm)

製)を使用した。SmCo₅ 磁石は、保磁力と最大エネルギー積が大きく、永久磁石として最も優れている。ハイコレックス H-22 A の磁性特性は、残留磁束密度 Br 8.5~9.5 (kG)、保磁力 Hc 8.0~9.5 (kOe)、磁気エネルギー積(BH) max 18~22 (MGOe)である⁹⁾。磁石の形態は、象限の大きさ(約4×2.5 mm)に十分見合うものとして、φ4 mm の円板状とし、厚さは磁気特性を最大に発揮できるもの(10:4)として、1.5 mm のものである(図1)。

3. 作動精度

差動型磁気抵抗素子(KMR-15 L)と、サマリウムコバルト合金磁石(H-22 A)との組合せによる変位センサの精度について、以下のように検討した。検定には、三次元精密測定用マニピレータ(共和理研製)、およびデジタルテスター(岩崎通信機製)を用いた。

1) 精度

磁気抵抗素子と磁石との間隙は、できるだけ接近していることが望ましいが、口腔内での定位の難しさ、測定時の両者の接触の恐れなどを考慮して検討の結果、素子および磁石の中心を合わせて両者の間隙を500 μmに設定した(温度 21°C、湿度 65%)。

対向磁石を感度方向に移動させた時の変位と出力との関係は、図6のようである。中心から±300 μmの範囲における直線性は2%以内であった。

2) 計測環境の変化による影響

口腔内で用いるセンサは、温度および湿度の変化により影響が極力少ないものが望ましい。

図 7 温度変化による影響

図 9 磁気抵抗素子と対向磁石との間隙による影響
(300 μm より 700 μm まで 100 μm ずつ間隙を大きくした場合の出力変化)

本センサの温度変化による影響をみると、室温 (21°C) と開口時口腔内温度 (31°C) における変位と出力の関係は図 7 のようである。直線の傾きが僅かに異なるが、変位 500 μm における誤差は 0.6%/°C にとどまっている。

ついで、急激な温度変化による影響をみると (図 8)、室温から 36°C まで、一過性の温度変化を与えると、瞬時に出力は変化するが、約 10 秒後には元の出力に戻っ

図 8 急激な一過性の温度変化による影響

ている。以上のことから、本センサは、呼吸などによる急激な温度変化に対しては、若干の出力変化がみられるが、環境温度の計測結果への影響は僅かである。

なお湿度変化については、45~100% まで出力への影響はみられず、さらに水中においても同様であった。

3) 磁気抵抗素子と対向磁石との位置関係による影響

① 素子と磁石との間隙

図 9 は、素子と磁石との間隙を 300~700 μm まで 100 μm ずつ変化させた場合の変位と出力との関係を示している。間隙が大きくなると、変位による出力は低くなり、かつ変化量に対する出力率も低下する、つまり感度が低くなる。したがって、素子と磁石との間隙設定は、本センサの定位にあたって重要である。

② 変位方向と感度方向

このセンサは象限素子の配列方向が感度方向であるが、素子と磁石との相対移動が感度方向から“ズレ”た場合について検討した。

図 10 は移動方向がセンサ面と平行ではあるが、感度方向に対して傾斜している場合のものである。10 度までの傾斜では、変位と出力との関係に与える影響はごく僅かである。

センサの定位に際して、素子に対して対向磁石が傾斜して設定された場合などを考慮して、磁石が傾斜したまま移動した場合の影響を検討した (図 11)。各角度における変位と出力との関係は、検出感度は変わらず、角度の変化は各直線を単に平行移動するだけであり、計測への支障はない。

4) センサの定位

磁気抵抗素子および対向磁石との位置関係についての検討から、センサの定位、特に素子と磁石との間隙の設定が重要であることが示唆された。そこで、両者の位置関係を校正時に固定し、そのまま計測部位へ設定する。そして設定前後の素子からの出力値をモニターし、大きく異なるときは再度設定し直すこととした。

5) 対向磁石相互の影響

本センサを数個同時に使用する場合には、近接する他の対向磁石によって、素子の出力が影響を受ける可能性がある。

図 10 変位方向が素子の感度方向に対して傾斜した場合の影響

図 12 対向磁石相互の影響

図 11 磁石が傾斜したまま移動した場合の影響

図 12 は、対向磁石に他の磁石（同一規格）を 3 mm まで接近させた場合の出力への影響を示している。磁石の接近によっても変位と出力との関係にはほとんど影響がなく、隣接する 2 歯への本センサの応用も可能である。

III. 考 察

磁気を応用したセンサは、一般には磁界が磁束に感ず

る素子ということになるが、これについて最近の大きな傾向は、磁界の検出にとどまらず、磁界を媒体として各種の力学量を測定したり、磁性体のもつ各種の物理現象を仲介として温度や変位、電流などを検出しようという方向にある¹⁰⁾。

著者らは、磁気抵抗効果を応用した差動型磁気抵抗素子に着目し、口腔内での変位センサとして、その可能性を検討した。この素子は約 6×7 mm、厚さ 0.5 mm の薄板状であり、また組合せる磁石は φ4 mm、厚さ 1.5 mm の円板状である。このように本センサは非常に小型であり、また水中でも何ら支障なく作動するから、口腔内という特殊な計測環境での使用に適している。歯の動揺を計測対象として、精度ならびに有効検出範囲ともに十分である。ただし、急激な一過性の温度変化によって出力が若干変化するため、センサの設置に際しては、呼吸などの影響を考慮して行う必要がある。また素子と磁石との間隙によって変位と出力との関係が違ってくため、センサの定位には十分な配慮が要る。

磁石同士の干渉による影響が少ないため、隣接している数歯の同時測定も可能である。さらに今回応用の素子より有効検出範囲の長い素子（KMR-10 H）もあり、大きな測定範囲にも十分対応できる（図 1）。

図 13 は、上顎中切歯の歯根方向へ 500 g 荷重を加えた場合の、歯軸方向での歯の変位を示している。素子は小型で薄板状であるから、センサ設置による突出量は僅かであり、固定用シーネにほとんど組み込まれてしまう（図

図 13 500 gm 荷重による歯の変位 (上顎中切歯)

図 14 歯根方向の歯の変位測定装置 (上), 固定用シーネと素子 (下)

14).

磁気抵抗素子は、薄板状であるためこの素子を組合せることによって、2次元的な変位検出の可能なセンサを構成できると思われる。そこで、2コの素子を組合せて、2次元センサを試作した (図 15)。

このセンサは、それぞれの素子の中心点を合わせ、互いの感度方向が直交するように、X-Y 軸に対応させて組合せたものである。このセンサに X-Y 方向に2次元の変位を与えて、変位と出力との関係を X-Y レコーダに描記したものが図 16 である。それぞれ一辺 $50 \mu\text{m}$ の小四角形であるが、周辺部では少しずつ歪んでいる。しかしその誤差は最大 $\pm 5\%$ にとどまっている。

この2次元センサは、小型かつ軽量で、1つの対向磁石で X-Y 平面の2次元変位が検出できるという大きな利点がある。しかし、素子の組合せ方、中心点をはずれた場合の変位と出力との関係の歪みなど、まだ問題点が残っており、今後の検討が必要である。

磁気抵抗素子は、その受感部を通過する磁束の分布変

図 15 試作した2次元センサ

図 16 試作センサによる2次元変位の測定

化によって、磁石の相対的位置を検出するものであるから、磁石移動の軌跡に合わせて素子受感部のパターンを形成することで、特注素子も可能である。しかし磁気回路を工夫すれば、大量生産による安価な汎用素子を使って多様なセンサが構成できる (KMR-10 H 素子は回転角の検出用として、ビデオカメラの絞りアクチュエータに実用化されている)⁸⁾。

以上のように磁気抵抗素子は、変位センサとして適用範囲が広い、本センサの特徴はつぎのようである⁹⁾。

- ① 検出対象物との間に機械的連結機構がないので、摩擦抵抗その他の移動を妨げる反力を及ぼさない。
- ② 素子自体に電気的接点がなく、長期間の使用による誤差、電気的雑音の恐れがない。
- ③ 形状が小型で、限られた空間での応用に都合がよい。
- ④ 差動型の素子は変位と出力との直線性がよく、半導体特有の抵抗の温度特性は対の素子が互いに補償し合う。

- ⑤ 素子の構造が簡単で信頼性が高い。
- ⑥ 供給電源回路が簡単である。
- ⑦ 光式センサにおける光源、超音波式における発音源に対応するものは、小型の磁石であり、電力消費もなく信頼性も高い。

IV. 結 論

磁気抵抗効果を応用した差動型磁気抵抗素子について、口腔内での変位センサとしての可能性を検討し、以下の結論を得た。

- 1) 磁気抵抗素子と小型磁石を組合せた変位センサは、非常に小型の薄板状であり、かつ無接触計測であるから、口腔内での利用に適している。
- 2) 変位の有効検出範囲は、素子中心から $\pm 300 \mu\text{m}$ で 2% 以内の直線性を示す (素子 KRM-15 L と磁石ハイコレックス H-22 A の組合せの場合)。
- 3) 素子と磁石との間隙によって、変位と出力との関係は違ってくるから、計測にあたってはセンサの定位が重要であり、 $500 \mu\text{m}$ 程度が適当と思われる。
- 4) 温度および湿度変化による計測への影響は僅かである。ただし急激な一過性の温度変化により、若干出力変化がみられるから、口腔内での計測では呼吸に留意する必要がある。
- 5) 複数の素子を組合せて、2 次元センサなど多様な

センサを構成できる。

文 献

- 1) 原田耕介：磁気利用の力学量センサ，計測と制御，17：682，1978。
- 2) クインテッセンス出版編集部：咬合検査機器ガイド，153～162，クインテッセンス出版，東京，1981。
- 3) 丸山剛郎：私の臨床咬合論 (2)，ザ・クインテッセンス，3：791，1984。
- 4) 五十嵐順正，藍 稔：非接触微小変位センサーによる歯の動態観察，第 1 報 装置の概要と測定方法，補綴誌，24：457，1980。
- 5) 加藤 均：歯周組織の機能状態に関する研究，第 1 報 2 次元微小変位計，補綴誌，25：733，1981。
- 6) 坂東永一：下顎位のテレメータリングによる経時的観察，補綴誌，14：183，1970。
- 7) 田中伐平：咬頭嵌合位における補綴物の高さが顎口腔系に及ぼす影響，補綴誌，19：666，1976。
- 8) 加藤 厚：磁気抵抗素子を用いた無接触変位センサ，自動化技術，15 (6)：99，1983。
- 9) 田村 武，他：永久磁石を応用した Over denture，日本歯科評論，433：67，1978。
- 10) 桜井良文：磁気を利用したセンサ，計測と制御，17：657，1978。