

アモルファス磁性合金を利用した変位センサ 「リニアエース」の開発*

川崎製鉄技報
24 (1992) 1, 68-73

Displacement Sensors Using Amorphous Magnetic Alloy, "LINEAR ACE"



矢部 直
Tadashi Yabe
川鉄テクノロジー研
究開発センター 主
任研究員(部長)



水野 俊行
Toshiyuki Mizuno
川鉄テクノロジー研
究開発センター 主
任研究員(課長補)



大野 昌章
Masaaki Ohno
川鉄テクノロジー研
究開発センター 主
任研究員(課長補)



秋山 武司
Takeshi Akiyama
川鉄テクノロジー研
究開発センター 主
任研究員(樹長)

要旨

川鉄テクノロジー研ではアモルファス磁性合金を使用した高性能の変位センサ「リニアエース」を開発した。リニアエースはCo基のアモルファス磁性合金ワイヤを磁心に用い、インダクタンスの変化を電流量に変換するのにマルチバイブレータ回路を採用して小型化、高速応答化を図った新しいセンサで、1987年より販売を開始した。その後、耐熱性を付加して180°Cの使用を可能としたもの、超軽量のものとして磁心重量0.1gとほぼ反力を無視できるもの、またコイル電流2mAの低消費電力型などのものが開発され、好評を得ている。

Synopsis:

Kawasaki Steel Techno Research Corp. has developed and marketed a displacement sensor, "LINEAR ACE", that uses magnetic core of Co-based amorphous alloy wire. LINEAR ACE is a new type sensor, using a selfexcitation circuit (multi-vibrator), that enables a high-speed response and a very small outline. The authors improved the operating temperature to 180°C and the sensor head size, in addition to reducing the magnetic core weight only to 0.1 g, allowing measurements to be achieved without impressing any load on the target measurement object, and allowing the coil current to be reduced to 2 mA. LINEAR ACE has received favorable responses from users.

1 はじめに

コンピュータの社会全般への普及に象徴されるように、近年のエレクトロニクス化は目覚ましく、高度の宇宙開発から身近な家電製品に至るまで、とどまることを知らないかの状況を示している。

よく知られているように、自動化・制御システムは、状況を検知する感覚に当たるセンサ、その信号を受けて判断し指令を出す頭脳である制御部、制御信号により動作し、状況(制御対象)に変化を与える手足に相当するアクチュエータのクローズドループで構成される(Fig. 1)。近年の自動化の推進に最も寄与しているのは、頭脳に当たるコンピュータの革新であるのは異論のない所である。それに刺激を受けて、五感に当たるセンサと、手足に当たるアクチュエータの開発・改良についても多品種化と高性能化(小型、高速応答)低価格などが進められている。

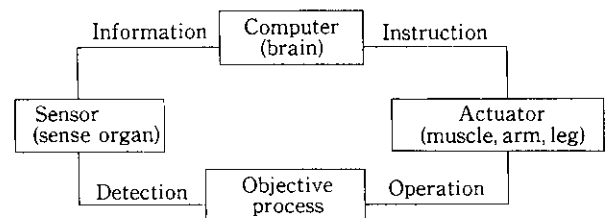


Fig. 1 Control system unit

センサは情報をキャッチし、現状を把握するには不可欠である。当然のこととして、センサの能力を超えた高精度の制御は不可能であり、制御結果の良否は選択されたセンサにより決定されるともいえる。把握したい情報は多種多様であり、それに対応するセンサも多種多様にならざるをえないが、使用条件、精度、設置環境などを勘案すると、選択の幅は非常に狭まり、一般に使用されているセンサの種類はそれほど多いとはいえず、常に新しいセンサの登場が待たれている。

* 平成3年9月26日原稿受付

センサの中でも、磁性体を用いた磁気センサ (magnetics sensor) は、かなり以前から安定性・高信頼性を生かした利用¹⁾がなされてきたが、高速応答性・小型化の面では遅れていたといえる。この状況を打開したのは新素材の開発で、磁気に関しては半導体 (ホール素子) とアモルファス磁性合金 (リボン—1972年, ワイヤ—1981年) の市場への出現である。ホール素子²⁾は非常に小さく、安価なことが大きな特徴であり、広範な分野で多量に使用されているが、高温に弱いなどの面もあり、万能とはいえない。

一方、アモルファス磁性合金³⁾は磁気特性に優れているのに加え、微細形状 (リボンで厚さ $\sim 30\ \mu\text{m}$, ワイヤで $5\sim 120\ \mu\text{m}$ 径) を有するため、小型軽量化に有利であり、

- (1) 高透磁率で飽和磁束密度が大きく、センサヘッドは高感度で小型・軽量化が可能。
- (2) 高い周波数まで安定に動作するので、高速応答性を有する。
- (3) 高温 (約 200°C) まで特性が安定している。
- (4) センサヘッドの構造が簡単。
- (5) 高抗張力の材質特性を有するので、高強度の構成材として兼用できる。

などの特長を有する。

川鉄テクノリサーチ(株)では、アモルファス磁性合金の優れた特性を活かした自動化・省力化のための新しい磁気応用センサの開発を進め、1987年に高性能変位センサの新製品「リニアエース」を出した。その後、高温型、超軽量型など各種の改良型製品の開発が進められ、「リニアエース」はメカトロニクスの広い分野で使用され、好評を得ている。

以下に、現在までの開発経過と製品特性について述べる。

2 アモルファス磁性合金センサ

磁気センサの素材としては、パーマロイ、けい素鋼、アモルファス磁性合金などがあり、その磁気特性の組み合わせによる磁気的諸効果 (magnetic effect) がセンシング機能の基礎となる。アモルファス磁性合金は新しい磁性材料として近年用途開発が進められている。アモルファス磁性合金には多くのものがあり、その特性で分類すると次のように大別される⁴⁾。

- (1) 軟磁性材料
- (2) 強磁歪材料
- (3) 磁気光学材料
- (4) インバー・エリンバー材料

センサとしては、(1)と(2)の特性を応用したもので、外部からの微弱な電磁氣的エネルギーのインプットに対し強く反応する。アモルファス磁性合金は、本質的には結晶磁気異方性が零で、広い周波数にわたって高い透磁率を保ち、キュリー温度も高いのが特徴である。各材料⁵⁾との比較を Table 1 に示す。

各種磁性体の持つ磁気特性を組み合わせた磁気的諸効果がセンシング機能の要素となる。また、場合によっては効果を増強したり、あるいは安定させるために、素材に種々の処理 (熱的, 化学的, 機械的) を施す必要がある。諸効果を利用したセンサヘッドと、これと組み合わせられる変換回路は、安定性, 感度, 耐ノイズ性, 使用電力などを総合して設計される必要がある。

アモルファス磁性合金を使用する場合、磁歪特性により大別すると二つに分類される。磁歪が零のもの、磁歪が大きいものとして、その特性を活用して Fig. 2 のような利用法が考えられている⁶⁾。

取扱いの容易さなどを考えると零磁歪型が取り組みやすいが、イ

Table 1 Characteristics of various magnetic materials

Material	Permalloy		Sendust		Amorphous	
	Ni	79 %	Si	9.5 %	Fe	4.5 %
	Fe	17 %	Al	5.5 %	Co	70.5 %
	Mo	4 %	Fe	85.0 %	Si	15 %
					Bo	10 %
Characteristic						
Bs (T)	0.87		1.00		0.84	
He ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)	3.98		1.59		0.398	
$\mu\epsilon$ (1 kHz)	5 000		6 000		50 000	
ρ ($\mu\Omega\text{-cm}$)	55		80		180	
Tc ($^\circ\text{C}$)	460		500		620	

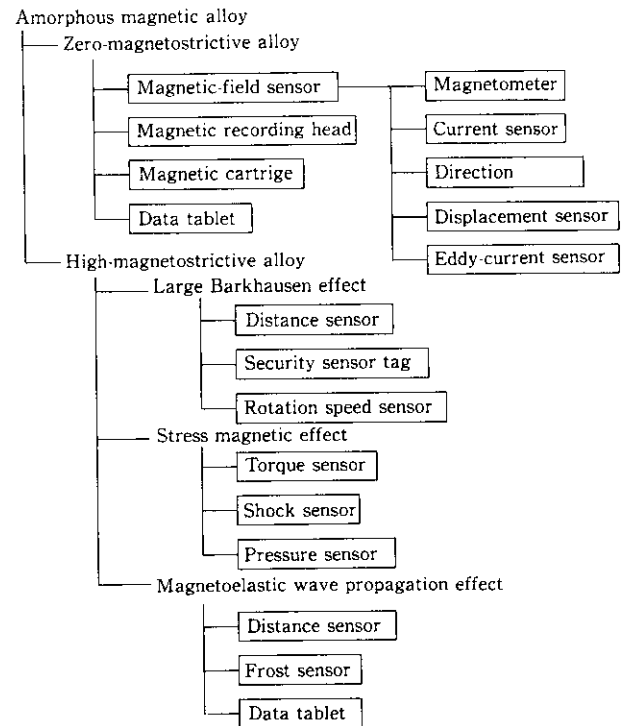


Fig. 2 Various sensors using amorphous magnetic alloy

ンテリジェントセンサ, アクチュエータ組み込みセンサなどを対象とすると強磁歪型の方が将来性のある研究開発の対象といえる。しかし、今回の開発対象としては、測定の基本であり、用途が広く、製作も容易である変位センサを選択し、磁心には磁氣的に安定している Co 基合金 (零磁歪, 高透磁率) を使用することにした。

3 変位計開発の経過

磁性合金を使用したセンサは、インダクタンスの変化を何らかの形で電気量の変化に変換するのが普通で、変換回路は多くの方式が工夫されてきた。今回の開発では、変換回路には毛利教授 (現在名古屋大学教授, 当時九州工業大学教授) の提唱するマルチプレータ回路^{7,8)}が、回路部品点数が少なく、小型になると考え、採用することにした。

変位センサは、2個のコイルとアモルファス磁性合金製の磁心を組み合わせるもので (Fig. 3), 磁心とコイルの相対変位がインダクタンスの変化として自己発振の回路と組み合わせ、電気量の変化と

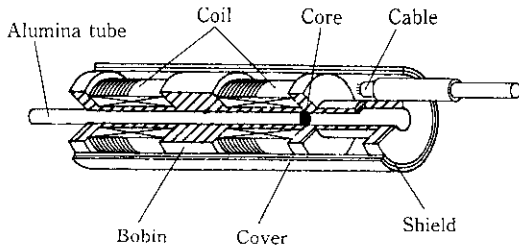


Fig. 3 Construction of displacement sensor-head

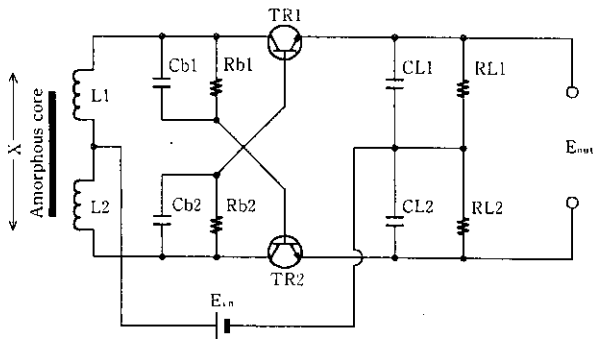


Fig. 4 Multivibrator circuit

するものである。原理としては簡単だが、調査すべき要因は多く、実験しやすい数値を選んで着手、各部の定数を決定した。

センサヘッドを決めるための諸定数は、

- (1) コイル部： 内径、長さ、線径、巻き数、コイル間隔
- (2) 磁心部： 素材形状（太さ・長さ）、結束本数、材質

などがあり、相互に関連しているため、全体の傾向と相互の関連を調査、把握することにした。変換回路についても、自己発振の条件、消費電流、温度特性、出力信号レベル、応答特性、電子部品の選択などの項目を検討した。

また、今回の開発では、従来から変位センサとして広く使用されている差動変圧器よりも小さいことを特長の一つとすることにした。磁心の大きさがコイルの中心径を決める最大の要素であるが、これを従来より大幅に小さくした実験用のセンサヘッドを試作、実験を開始した。検討を始めたセンサの回路は Fig. 4 に示されるように、非常に簡単である。図中のセンサヘッドのコイルに当たる L1, L2, 自動用のコンデンサ Cb, 抵抗 Rb, 信号取り出し用の負荷抵抗 RL を、それぞれの相関を求めて最適値を決定するため、用意したコイルを基準にデータの採取を行った。

最初に検討すべき条件は、コイルに流す最適電流値であるが、これは Fig. 5 のような飽和磁気特性を測定する実験装置を準備し、飽和磁界に達する条件で判定することにした。アモルファス磁心の素線径と結束本数に対して周波数と電流を変化させ、飽和磁界となる電流の下限値を決定し、コイル素線径による電流上限値と併せて、励磁条件を決定した。実験の条件は、当初はコイル (L1, L2) を一定として、種々の Cb, Rb の回路と組み合わせ、さらに磁心の長さを変えて、データを採取した。

測定項目としては、(1) 電圧、(2) 電流、(3) 変位と出力信号、(4) 発振周波数で、磁心長さ、結束本数を変更、これを繰り返した。

初期の実験で、どのような種類のコンデンサを Cb に使用すべきかも調査した。広い範囲の周波数を対象とするため、周波数に依存しないものが望ましく、価格・安定性の面からフィルムタイプと積

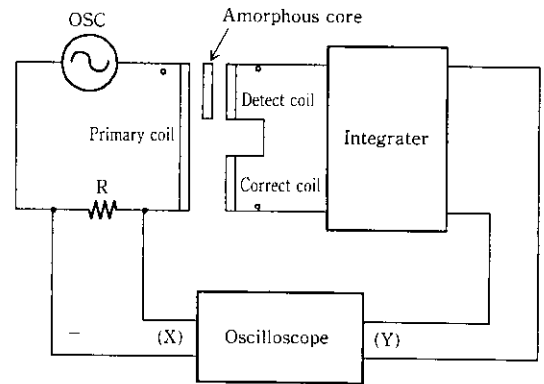


Fig. 5 Measuring method of saturation magnetization

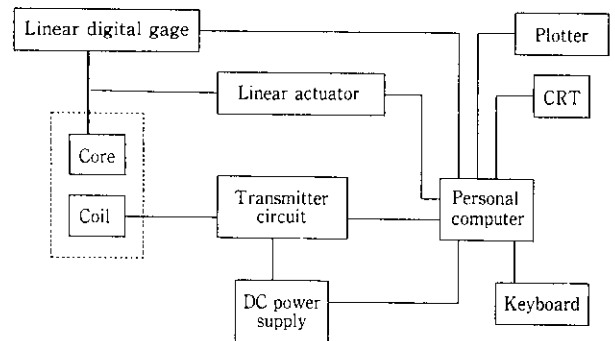


Fig. 6 Blockdiagram of auto measuring system

層セラミックタイプを候補とし、多数の購入品を測定、種々の事項も検討し、結果として温度特性の良い積層セラミックタイプを採用することに決めた。

実験を具体的に進める技法として、できるだけ自動化を図った。

実験方法を考え、その方法に誤りはないかを手動で確認し、その後はパソコンを主体とした自動計測でデータ採取を行い、データ処理したグラフをプロットアウトするようにした。なお、当初より測定機器類はすべて GP-IB などのインターフェースを有するものを採用、実験に対応してソフトウェアは自作した。

変位センサ開発における直線性測定方法で一例を示すと、Fig. 6 のようなブロックダイアグラムで表される。被測定コイルをセットして、磁心との位置合わせを行い、変換回路に指定された電圧を供給する。測定を開始すると、ステッピングモータは指令により磁心を変位させ、磁心を出力ゼロの位置に移動させ、この位置を運動するデジタルリニアゲージで記憶し、変位の測定開始点とする。磁心は開始点より決められた間隔の変位を順次与えられ、その時点での出力信号を記憶し、変位と出力のデータを得る。測定回数・間隔などは測定に先立ちキーボードより自由に設定される。以上のように、あらかじめ設定した条件（変位の範囲、移動間隔、印加電圧など）に基づき、実験データは自動的に採取され、記憶される。

測定後、直ちに計算結果とグラフが CRT に表示され、必要であれば Fig. 7 のようなフォーマットで出力される。このようにすることで実験の結果が短時間で図示され、個々の各定数でのセンサ特性が即座に判断できた。

以上のようにして、種々のコイルと磁心に対する回路定数、印加電圧、発振周波数、直線範囲、出力信号レベルなどに関するデータが収集され、最適条件を検討した。

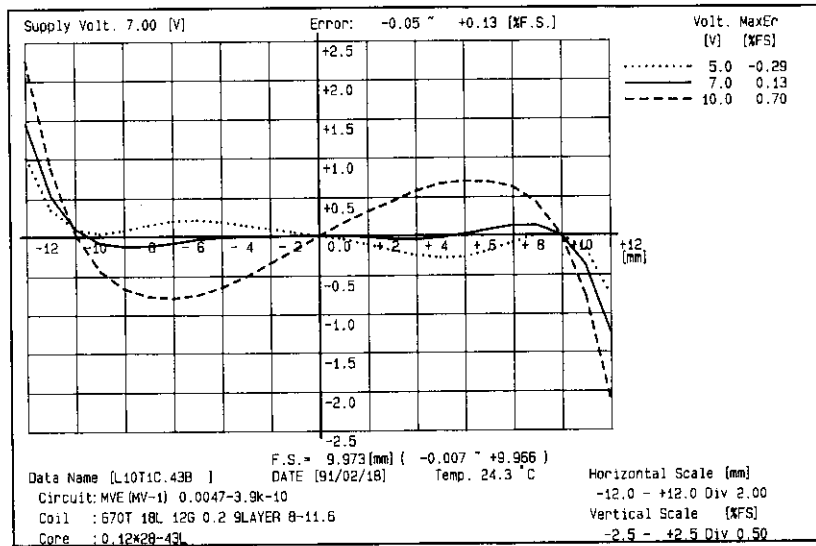


Fig. 7 Output data of linearity (example)

- 測定したデータより判明したことを幾つか述べると、
- (1) コイル (L1, L2) のインダクタンスと発振回路の Cb・Rb の組み合わせにより、発振周波数は広範囲に選択できる。
 - (2) 変位センサとして重要な直線範囲は、コイルの仕様に応じて磁心の長さを選択する必要がある。磁心に使用したアモルファスの結束本数にはあまり関係しない。
 - (3) 回路電流を主に決めるのは Rb であり、その他の構成電子部品も影響を与えるが、その度合いは軽微である。
 - (4) 出力抵抗 RL は、回路全体のインピーダンスと比較して、小さい方が直線性は良くなるが、出力信号も小さくなるので、直線性に影響を与えない範囲で大きい方が望ましい。
 - (5) センサヘッドを構成するコイルの仕様は、温度特性と密接な関連を有し、最終的には実験により決めざるをえなかった。なお、磁気式センサの中でも、コイルを使用するものでは、コイルの材料である銅線の温度変化による抵抗の変化は温度特性に大きく影響するが、使用周波数を高めることによってインピーダンス変化を小さくし、温度特性の改良をすることができた。
- などである。

以上のような判明事項と集積したデータより、従来の差動変圧器⁹⁾に比べ、

- (1) センサヘッド・磁心は小型軽量にできる (Table 2)。
- (2) 応答性は格段に向上する。

Table 2 Comparison of displacement sensors

Measuring Range	±2 mm		±5 mm		
	LINEAR ACE LC-02	Other maker's sensor	LINEAR ACE LC-05	Other maker's sensor	
Sensor				A	B
Bobin					
Diameter (mm)	12 × 30	16 × 22	16 × 41	22 × 35	16 × 57
Length (mm)					
Weight (g)	7	27	14	41	
Core weight ^{a)} (g)	0.4	5	0.4	7	7
Accuracy (%)	±0.35	±0.50	±0.35	±0.50	±1.0
Frequency response / oscillating frequency	1 kHz / 30 kHz	100 Hz / 3 kHz	500 Hz / 10 kHz	100 Hz / 3 kHz	70 Hz / 2 kHz

^{a)} Including shaft

- (3) 変換回路の部品点数が少なく、安価に出来る。などの点で優れているとの結論を得た。

4 製品化の検討

研究開発による試作品を、さらに製品化するため種々の点で細かい詰めを行った。

4.1 磁心の構造

磁心に関しては、初期にはアモルファスのリボンを使用し、保持には銅糸 (断面 1 × 3 mm) を用いて、その端面に何層も接着剤で貼りつけたものを実験に供していたが、加工が面倒なことから、製品化した場合の均一性に欠けるなどの問題があった。その後、アモルファスワイヤの入手が可能となり、束ねて使用することにした。

束ねたアモルファスワイヤの保持には、非磁性である必要上からアルミナのチューブに着目、丈夫で、曲げおよび衝撃力に強い材料を見出し採用することにした。

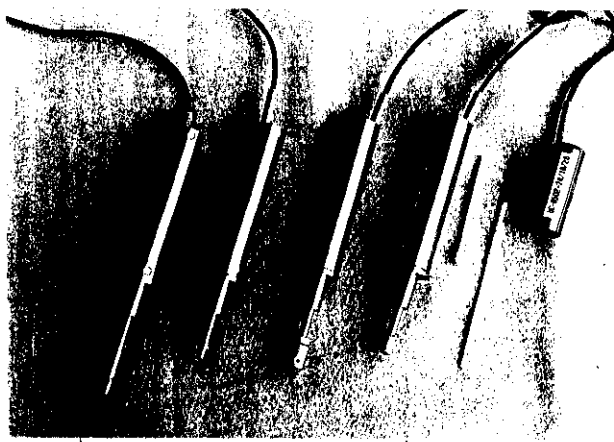
磁心を保持する材料が決まり、標準の外径を製作しやすい 2 mm として、量産に移った。このようにして、従来の磁心が 3~4 g であるのに比べ、本開発品では 0.4 g とほぼ一桁軽くて耐衝撃性の高いものが出来た。

4.2 変換回路のトランジスタ

変換回路の発振部で使用されるトランジスタ (Tr) は、安定した動作を維持するため、増幅率の同じものを対で、温度も均一となるようにして使用する必要がある。Tr は品質のばらつきが大きく、使用を予定した数種の Tr について増幅率を調査した結果、選別無しでは使用できないことが判明した。個々の Tr を選別して組み合わせることを避けるため、許容電流は小さいが相互の増幅率が一致しているペア Tr を採用できるレベルにまで回路電流 (コイル電流) を下げ、同時に回路部の小型化を可能とした。

4.3 シールド対策

外部磁界からの外乱を防ぐため、センサヘッドにシールドを施す必要があり、コイルの保護を兼ねて、どのような形状、金属などが有効かを調査した。各種の材料を円筒状に成形し、コイルに被せて、外部より磁場を与え、影響の度合いを比較した。その結果現状では、シールドの材質を軟鋼板、形状を C 型とし、絶縁体にはカバ



Sensors with various contact head Core Head

Photo 1 Displacement sensor LINEAR ACE (LCP-2)

一を兼ねて熱収縮チューブを被せるのがよいとの結論を得た。

これらの検討結果から、1987年7月に小型、軽量、高速応答などの性能に優れ、価格的にも従来品に勝るアモルファス合金変位センサをセンサ単体(LC型)と変位計(LCP型)として製品化し、商品名「リニアエース」で発表した¹⁰⁾(Photo 1)。

5 初期の製品に対する改善

新しい変位センサの発表後

- (1) 耐熱性の向上
- (2) 小型化
- (3) 分解能の向上
- (4) 低消費電力化

の改善・改良を加え、新機種の開発へ進展した。

5.1 耐熱性の向上

当初開発したセンサヘッドは、製作の容易さと低コストを考慮したため、通常($\sim 80^\circ\text{C}$)の使用には十分であるが、より高温で使用したいとの要望には、応えられなかった。ユーザの集約した意見は、 150°C 以上の耐熱性を有することである。センサヘッドを構成する素材を選択すれば、耐熱性を高めることが可能であるとの検討結果を得て耐熱型センサを開発した。通常型と耐熱型に使用した材料をTable 3に示す。この時の温度と温度ドリフトの関係はFig. 8に示すように、 120°C 以下では余り大きな変化を示さないが、これを超すと大きくなる。一方、変換回路の耐熱性は 120°C 位であるが、変換回路自体のドリフトは 80°C を超えると急激に大きくなるので、使用環境に応じて注意した取扱いを必要とする。

5.2 センサヘッドの小型化

従来の差動変圧器などに比較して、センサヘッドは小型化されているが、測定範囲は狭くても、もっと小型にとの要望が多い。

アモルファスを使用した一番の特長を活かし、一層の小型化に取り組むことにした。小さくできる限界は磁心の大きさにあり、アモルファスワイヤを保持するアルミナチューブに1.0mm径のものを採用することにし、コイル部もボビン無しの空心コイルを組み立てる構造とした。コイルを小さくすることは、コイルの巻き数が限定され、巻き数を増やすにはコイル線径を細くするしかなく、取扱い

Table 3 Materials of sensor head

Construction parts	Normal type		High temperature type	
	Material	Max service temperature	Material	Max service temperature
Coil wire	Polyurethane	120°C	Poliesterimide	180°C
Cable	Vynyl	60°C	Teflon	180°C
Bobin	PPS	260°C	PPS	260°C
Core	Amorphous	368°C	Amorphous	368°C
Core holder	Alumina	1700°C	Alumina	1700°C
Adhesion	Epoxy	60°C	Phenol	300°C

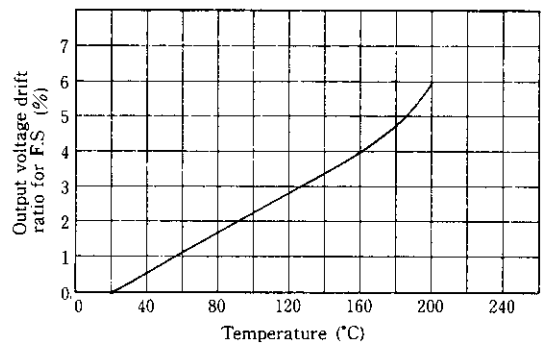


Fig. 8 Characteristics of displacement sensor at high temperature (span drift vs time)

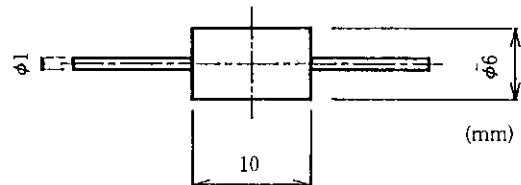


Fig. 9 Outlines of small sensor-head

に注意を要するのが短所といえる。測定範囲は $\pm 0.5\text{mm}$ であるが、磁心部の重量は0.1gと軽く、使用に際しての反力がほぼ無視できる、超小型変位センサが完成した(Fig. 9)。

5.3 分解能の向上

マルチバイブレータ回路は自己発振方式であり、信号を整流する時にどうしてもパルス状の波形が残り、フィルタでは完全には除去できない。信号を受け取る機器がアナログ式であれば、このような微細な信号は影響せず何ら問題にならないが、デジタル式では確率が低いとはいえ、万一受けた場合は誤信号となるので、対策を要する。このパルス状信号の大きさを分解能として、他の仕様との比較で0.1%に決定、減少させるためプリント基板のパターン変更、フィルタ回路の改良を施し目的を達成した。

5.4 低消費電力化

コイルに流れる電流は10mA以下に抑えているが、定電圧回路での消費もあり、回路への供給電流は30mA程度要する。商用電源が使用できない場所での電池による長時間駆動などを考慮して、消費電流を大幅に減少した変換回路が可能を検討した。インダクタ

Table 4 Specifications of LINEAR ACE

Items	Type	Standard type				High temperature type	
		LC-V5	LC-02	LC-05	LC-10	LC-02H	LC-05H
Measuring span	(mm)	±0.5	±2	±5	±10	±2	±5
Head size	(mm)	φ6×10 L	φ12×30 L	φ14×41 L	φ14×77 L	φ12×30 L	φ14×41 L
Linearity	(%/FS)	±0.35	±0.35	±0.35	±0.35	±0.35	±0.35
Output voltage	(V/mm)	1	1	0.1	0.1	1	0.1
Frequency characteristic	(Hz)	1 000 (-3 db)	1 000 (-3 db)	500 (-3 db)	500 (-3 db)	1 000 (-3 db)	500 (-3 db)
Oscillator frequency	(kHz)	100	30	10	40	30	10
Operating temperature	(°C)	-10~80°C				-25~180°C	
Thermal error	(%/FS·°C)	0.05				0.05	

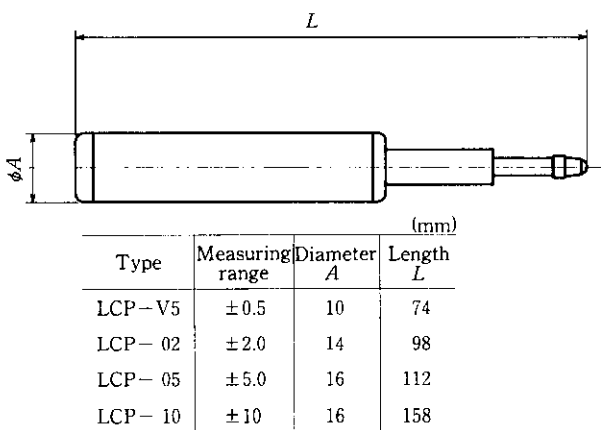


Fig. 10 Outline of LINEAR ACE

ンスの変化を電氣量に変換する回路は種々考案されているが、その一つとしてリング整流方式があり、この方式は消費電流が少ないので、採用を検討した。従来は、リング整流の素子としてダイオードが使用されているが、実験による特性評価では、温度特性が悪いとの結果が得られ、整流方式に工夫を要することがわかった。信号に位相の変化があることを予測し、同期整流で動作させることにし、ダイオードの代わりにアナログスイッチを使用した低消費電力（コイル電流 2 mA）の発振回路を考案した。現在ほぼ満足できるレベルに到達し、量産用試作品が完成した。

現在開発され、製品化されている変位センサの仕様を Table 4、変位計センサヘッドの外形寸法を Fig. 10 に示す。

6 結 言

川鉄テクノリサーチ(株)はアモルファス磁性合金を利用した新しい変位センサ「リニアエース」を開発した。この結果は以下のとおりである。

- (1) 小型、軽量で高感度の変位センサが製品化された。可動部の磁心は非常に軽量（0.4 g 標準）で、耐振性に優れ、応答性が高い（1 kHz 標準）ので、動的な測定に適している。
- (2) 耐熱性に優れ、180°C で連続使用が可能である。
- (3) インダクタンス変化を変換するマルチバイブレータ回路を習得、自社技術としての基盤を完成した。
- (4) 各種センサ、計測器の元素として組み込める小型の変

位センサヘッドを開発、さらに小型化が可能な知見を得た。

- (5) 低消費電力型の変換回路も開発され、他センサにも使用でき、携帯用、遠隔地用に適している。

変位センサを手始めに、アモルファスを利用した各種センサの開発¹¹⁾およびそれらを利用した測定機器の製品化を積極的に進めようとしており、これらを利用した測定システム、さらにメカトロニクス分野への展開を目指している。

今までの開発を通じ、アモルファスセンサの特長は、(1) 小型・軽量、(2) 高速応答、(3) 耐高温性にあり、今後の開発もこれらの特長を活かした方向で進めていきたい。

センサの宿命といえるが、各方面で多量に使用されるためには、精度、耐久性などは当然として、安価であることが絶対的な要素であり、研究開発を継続していく上での大きな問題である。開発対象の選択は、製品化された場合の市場価格と製造コストを推測、加工法・製造技術などを検討して可能か否かの判定が重要であり、その上に使用される状況・条件が把握されていることが必要である。しかし、このような事柄は、検討過程ではなかなか本場の事情がわからず、需要家の生の声を正確に把握する必要がある。

おわりに、アモルファス磁性合金センサの開発に指導いただいた名古屋大学毛利教授、センサ素材のアモルファスワイヤで協力いただいたユニチカ株式会社の各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 自動制御学会：自動制御ハンドブック、「機器応用篇」、(1983)
- 2) 柳田博明、相沢益男、矢部正也：新センサーハンドブック、「機能・応用篇」、(1982)、146-159、[サイエンスフォーラム]
- 3) 増本 健、深道和明：アモルファス合金、(1981)、234-257、[アグネ]
- 4) 柳田博明、相沢益男、矢部正也：新センサーハンドブック、「材料データ篇」、(1982)、481-484、[サイエンスフォーラム]
- 5) 楢垣寅雄：「機能材料便覧」、(1982)、102、[シーエムシー]
- 6) 毛利佳年雄：平成3年電気学会全国大会講演論文集分冊14 S19-1、(1991)、1-4
- 7) 毛利佳年雄：日経メカニカル、1982.11.8号、82-89
- 8) 毛利佳年雄、笠井克幸、松本光二郎、近藤敏則、藤原広澄：日本応用磁気学会誌、7 (1983) 2、143-146
- 9) 豊田 実、他：「新しいセンサの技術開発と最適な選び方・使い方総合資料集(上巻)」、(1982)、[経営開発センター]
- 10) 日経メカニカル、1987.8.10号、15
- 11) 中村久和、山崎二郎、吉田祐三、矢部 直、大賀末寿：第13回日本応用磁気学会学術講演概要集、(1989)、75