

課題番号 06-024

平成 20 年度シーズ発掘試験（発掘型）研究報告書


報告日：平成 21 年 4 月 1 日

技術分野 22


課題名：広い直線範囲と低温度ドリフト特性をもつ渦電流変位センサの開発

研究期間：平成 20 年 7 月 4 日～平成 21 年 3 月 31 日

1. 担当コーディネータ

氏名（役職）	藤井 國久（文部科学省産学官連携コーディネータ，教育特任教授）		
所属機関名	国立大学法人 信州大学 産学官連携推進本部		
連絡先	所在地	〒380-8553 長野市若里4-17-1	
	TEL/FAX	026-269-5627/ 026-269-5630	
	E-mail	kfujii@shinshu-u.ac.jp	

2. 代表研究者（代表研究者のみ記入してください。）

氏名（役職）	水野 勉（准教授）		
所属機関名	国立大学法人 信州大学 工学部		
連絡先	所在地	〒380-8553 長野市若里4-17-1	
	TEL/FAX	026-269-5200/ 026-269-5215	
	E-mail	mizunot@shinshu-u.ac.jp	

3. 共同研究者（JSTと委託研究契約を締結した共同研究機関の場合のみ記入してください。）

氏名（役職）			印
所属機関名			
連絡先	所在地		
	TEL/FAX		
	E-mail		

4. 試験研究の結果報告

(1) 試験内容

① 当初の目的/試験項目と内容

1) 目的

渦電流形変位センサ (EC 変位センサ) は測定対象とコイルとの間の変位を非接触で検出するセンサであり、磁気軸受のシャフトの変位測定や発電プラントの軸振動監視装置などに多用されている。現状の EC 変位センサは大形であるために磁気軸受などの小形化を阻害している。そこで、小形化のための指標である L_0/D (L_0 : 出力電圧の直線範囲, D : コイルの外径) を向上するために、図 1 に示した銅線 (COW) の外周に磁性薄膜 (Fe) をめっきした磁性めっき線 (MPW) を用いることで、従来技術と比較して 1.5 倍の L_0/D を実現した。本開発によって「従来技術と比較して 1.5 倍の L_0/D で、かつ低温度ドリフト特性」を有する EC 変位センサを開発する。

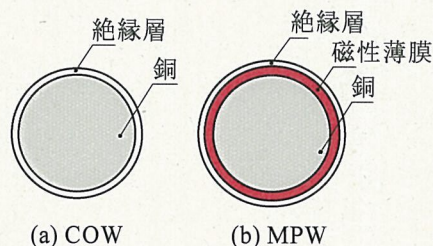


図 1 銅線(COW)と磁性めっき線(MPW)の構造

2) 試験項目と内容

(a) コイル構造と周波数の検討

現有の電磁界解析ソフトウェアおよび申請者が導出した理論式を用いてコイルの構造と励振周波数を設計する。

(b) 試作

発電プラントや磁気軸受のシャフトとして多用されているクロムモリブデン鋼 (SCM440、アニール熱処理) 製の測定対象、および透磁率 μ と抵抗率 ρ の温度特性を測定するための試料を作成する。また、上述の (a) 項で設計した磁性薄膜の厚さが異なる 3 種類のコイルを試作する。

(c) 実証実験

現有の恒温槽とインピーダンスアナライザを用いてコイルの Q 値の温度特性を評価する。さらに、電子回路を試作して新規購入の波形測定器を用いて出力電圧を測定することで低温度ドリフトを実証する。

② 試験期間において実施した内容

(a) コイル構造と周波数の検討

磁性薄膜の厚さ $t = 0.7, 1.0, 1.1 \mu\text{m}$ をもつ MPW を用いた 3 種類の EC 変位センサを設計した (予定どおり)。

(b) 試作

(a) 項で設計した磁性薄膜の厚さが異なる MPW を用いた 3 種類の EC 変位センサを試作した (予定どおり)。EC 変位センサの製造方法には多数の製造ノウハウがあるために、センサメーカーの協力を得て、巻線方法、耐熱樹脂の種類やモールド方法、同軸ケーブルの型番など、市販のセンサと同じ製造工程で試作した。温度ドリフトはコイルの寸法に依存している。そこで、試作機と同一寸法の外径をもつコイル (COW) を用いた EC 変位センサ (市販品) を温度ドリフトの比較対象とすることで、目標値をさらに明確にした (変更点)。

(c) 実証実験

SCM440 (アニール熱処理) の透磁率と抵抗率の温度依存性を実測した。さらに、MPW を用いた試作機と COW を用いた市販品の温度ドリフトを比較評価した (予定どおり)。

(2) 得られた成果

① EC 変位センサの試作

図 2 は MPW を用いた EC 変位センサの概観であり、その構造を図 3 に示した。コイルの外径 4.56 mm、軸方向長さ 2.15 mm であり、コイルの端末は同軸ケーブルに接続されている。また、コイルと同軸ケーブルはカバー内で樹脂によってモールドされており、温度変化があってもコイルが変形しない、すなわち、コイルの熱変形に依存する温度ドリフトは生じないように工夫されている。また、同軸ケーブルの内部導体はコイル内に 0.8 mm 挿入されている。なお、比較対象とした COW を用いた EC 変位センサ（市販品）も図 2 と同一の構造を有している。



図 2 MPW を用いた EC 変位センサの概観

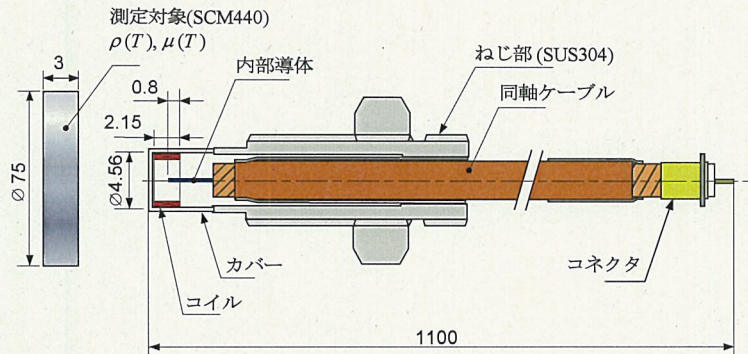


図 3 MPW を用いた EC 変位センサと測定対象の構造 (単位: mm)

② 研究成果

1) 目標との比較

図 4 は磁性薄膜の厚さ t をパラメータとする EC 変位の温度ドリフトである。温度範囲 0-80°C における COW を用いた EC 変位センサ（市販品）の温度ドリフト（目標値）は $D_T = -4\%/FS$ である。磁性薄膜の厚さ $t = 0.7$ と 1.0 および $1.1 \mu\text{m}$ の温度ドリフトのは、それぞれ、 -10 、 -6.5 、 $-4.5\%/FS$ となった。また、COW と MPW の直線範囲 L_0 は、それぞれ、2 と 3 mm である。すなわち、磁性薄膜の厚さ $t = 0.7 \mu\text{m}$ の MPW は COW と比較して 1.5 倍の L_0/D 、かつ COW と同等な温度ドリフトを実現した。

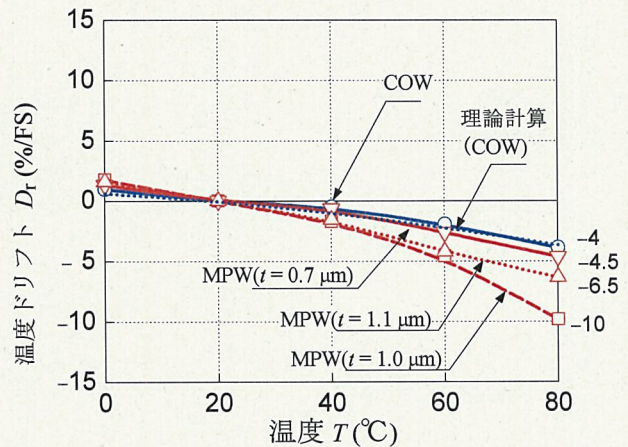


図 4 磁性薄膜の厚さ t をパラメータとする EC 変位センサの温度ドリフト (周波数: COW: 1 MHz, MPW: 1.3 MHz)

2) 温度ドリフトの理論計算の構築

図 4 中に青色の破線で理論式を用いた温度ドリフトの計算値を示した。実測値と理論計算の温度ドリフトの差は $0.5\%/FS$ であり、実用上十分な精度である。理論式は、物理現象を把握しやすく、かつ設計指針を与えており、また、有限要素法などの数値計算と比較して極めて簡便で短時間で温度ドリフトを求めることができる。従来の多数回の試作によって実現されてきた温度ドリフトの低減工程が、理論計算で簡便に求めることができるために、大幅な開発コストの削減ができることを示唆している。

3) 温度ドリフトの要因分析

図5はCOWを用いたEC変位センサの温度ドリフトの要因分析（理論計算）である。温度ドリフトは、同図中に示した各要素の温度変化によって生ずる抵抗変化に起因している。

すなわち、赤字の矢印で示した同軸ケーブルの内部導体に起因する温度ドリフトは、温度上昇とともに内部導体（図3参照）に生ずる渦電流損が増加することに起因している。また、青色の矢印で示した測定対象に起因する抵抗は、測定対象の抵抗率 ρ と透磁率 μ の両者が温度に依存するために生じている。さらに、緑色の矢印で示したケーブルに起因するドリフトは、同軸ケーブルの抵抗が温度とともに大きくなるためである。黒色の矢印で示したコイルに起因するドリフトは、温度上昇とともに銅線の抵抗率が大きくなりコイルの交流抵抗が変化するために生ずる。

同図は、温度ドリフトの主な要因が「同軸ケーブルの内部導体」であることを示している。そこで、コイルの右端から内部導体を3mm以上離す（図3参照）ことで、内部導体に生ずる渦電流損をゼロにできることを実験および理論計算の両面からすでに確認している。すなわち、内部導体が温度ドリフトに与える影響を完全に排除できて、温度ドリフトを現状の-4%/FSから-1%/FSまで低減できることを意味している。

同様に、コイルの右端から内部導体を3mm以上離すことで、MPWを用いたEC変位センサの温度ドリフトも-1%/FS程度までさらに低減できる見通しを得ている。

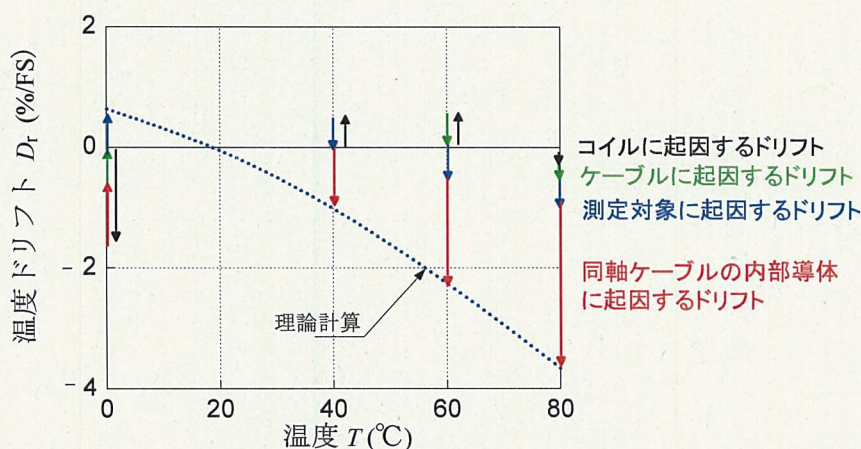


図5 COWを用いたEC変位センサ温度ドリフトの要因分析

③ 実用化の見通し

本開発で得られた磁性めっき線を用いたEC変位センサは、市販品と同程度の温度ドリフト特性で、かつ、1.5倍の L_0/D を有しており、十分実用化が可能であると考えられる。また、-1%/FS程度までさらに低減できる見通しを得ている。

磁性めっき線を用いたEC変位センサの実用化をさらに加速するためには、さらなる L_0/D の向上と低温ドリフト化が必要であろう。

(3) 今後の展開**①平成 21 年度内の予定**

- 1) 他制度への応募：本開発によって、温度ドリフト 1%/FS 程度が実現できる可能性が大きいことが分かり、目標 0.5%/FS も視野に置いて、さらに推進したい（JST の他制度への応募）。
- 2) 論文投稿：得られた成果を IEEE や電気学会などに投稿する。特に、温度ドリフトの理論計算技術は、現状のセンサ設計にすぐに活用できるために、産業界に与える影響が大きい。
- 3) 特許出願：温度ドリフト低減方法に関して重要な知見が得られている。基礎実験・特許調査後に出願する。
- 4) 共同研究：新川センサテクノロジー㈱と共同研究を開始している。本技術をさらに広く産業界に還元できるようにしたい。

②実用化に向けた長期的な展望

現状の銅線を用いた EC 変位センサでは、温度補償用のコイルを併用してブリッジを構成し、温度ドリフトをキャンセルする方法や、特殊合金、たとえば銀パラジウム合金を用いて導線の抵抗率を調整することで温度ドリフト 0.5 %/FS 以下が実現されている。前者はセンサが大形化・高価格化する欠点があり、後者は高価（銅線の 90 倍以上）である。

一方、磁性めっき線は銅線と比較して 2 倍程度のコストアップとなるが、センサに占めるコストアップは極めて僅かである。磁性めっき線を用いて、 $L_0/D = 2$ 以上で、かつ温度ドリフト 0.5 %/FS 以下を長期目標としており、これが実現できれば、磁性めっき線を用いた EC 変位センサは急速に拡大できよう。

なお、これらの目標を実現するために、高性能な磁性薄膜（パーマロイ）をめっきした磁性めっき線を東京特殊電線㈱と共同開発している。

(4) 知的財産権について**①今後出願を予定している知的財産権**

- 1) 渦電流形変位センサの低温度ドリフト化
- 2) 大きな測定範囲をもつ渦電流形変位センサ

②今後の知財権確保の計画・方針・展望

①の知的財産権を確保するためには、追加実験と先行特許の調査が必要である。

(5) 今後のフォローアップ等について（コーディネータ記載）

磁性めっき線は銅線と比較して 2 倍程度のコストアップとなるが、センサに占めるコストアップは極めて僅かである。磁性めっき線を用いて、 $L_0/D = 2$ 以上で、かつ温度ドリフト 0.5 %/FS 以下の長期研究目標を実現するために、高性能な磁性薄膜（パーマロイ）をめっきした磁性めっき線の実用化に向けた東京特殊電線㈱との共同開発をフォローする。

また、新川センサテクノロジー㈱とセンサ性能向上の共同研究を開始しているが、渦電流形変位センサの低温度ドリフト化と大きな測定範囲をもつ渦電流形変位センサが実現できれば、磁性めっき線を用いた EC 変位センサは急速に拡大すると考えられるので、実用化に向けてこの共同研究もフォローしていく。