

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007 ～ 2008

課題番号：19560421

研究課題名（和文） 磁性めっき線の開発と渦電流形変位センサへの適用に関する研究

研究課題名（英文） Research on development of magnetoplated wire and application to eddy-current displacement sensor

研究代表者

水野 勉（MIZUNO TSUTOMU）

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：90283233

研究成果の概要：渦電流形変位センサの直線範囲の拡大のために、高透磁率と高抵抗率の両者をもつパーマロイ薄膜（80% Ni）を銅線の外周にめっきした磁性めっき線を製作した。このパーマロイ薄膜の初透磁率は 200 程度であり、Fe 薄膜よりも 2 倍も初透磁率が大きいことが分かった。また、銅線コイルの温度ドリフトの実測値と理論計算値との差は 0.5%/FS 程度であり、実用上十分な解析精度があった。さらに Fe 薄膜をもつ磁性めっき線コイルの温度ドリフト特性は銅線コイルとほぼ同程度であった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：計測工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：渦電流形変位センサ、直線範囲、磁性めっき線、鉄、パーマロイ、近接効果、温度ドリフト

## 1. 研究開始当初の背景

渦電流形変位センサ（EC 変位センサ）は、コイルと電子回路だけで構成された簡素な構造をしているために、水、油およびほこり等が充満する空間でも測定できるなど耐環境性に優れていることから、回転機械監視機器や変位・振動計測、溶融面変動の監視などの産業分野で広く使用されている。

従来の EC 変位センサのコイルの外径  $D$  に対する測定範囲  $L$  の比は、 $L/D = 0.48$  程度であり、測定範囲を拡大するためにはコイルの

外径を大きくする必要があった。

申請者は、 $L/D$  の拡大のために銅線の外周に Fe 薄膜をめっきした構造の磁性めっき線（MPW）を用いたコイル（MPW コイル）を提案してきた。そして従来の銅線（COW）を用いた COW コイルと MPW コイルの物理現象およびインピーダンス特性を比較検討してきた。MPW は、磁気シールド効果によって近接効果による交流抵抗の増加を抑制し、かつインダクタンスを増加、さらに測定対象により多くの磁束を作用させることによって、従来の COW と比

較して大きなQ値の変化が得られる。そして、MPWを用いたEC変位センサとCOWを用いた従来のEC変位センサのL/Dは、それぞれ0.43と1.0であり、MPWコイルは従来のCOWコイルと比較して1.5倍のL/Dの拡大ができることを明らかにしてきた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、COWの外周にパーマロイ(NiFe)薄膜をめっきした磁性めっき線を用いることでEC変位センサの変位測定感度をさらに向上させて、L/Dを従来技術の4倍以上に拡大することにある。さらに、MPWとCOWコイルの温度ドリフト特性を明確にすることにある。

## 3. 研究の方法

図1はEC変位センサの基本構成であり、コイルと電子回路だけで構成された簡素な構造をしている。

EC変位センサのL/Dを拡大するためには、変位に対するコイルのQ値の変化を大きくすることが必要であり、図2に示した磁性めっき線の磁性薄膜が本研究のキーポイントとなる。すなわち、磁性めっき線の磁性薄膜には、大きな初透磁率と抵抗率の両者をもつことが必要であり、磁性薄膜としてNiFeを検討した。

研究の方法は以下の3点である。

### (1)磁性めっき線の特性把握

MPWの磁性薄膜には、高い透磁率( $m$ )と大きな抵抗率( $r$ )の両者の特性を有する材料が

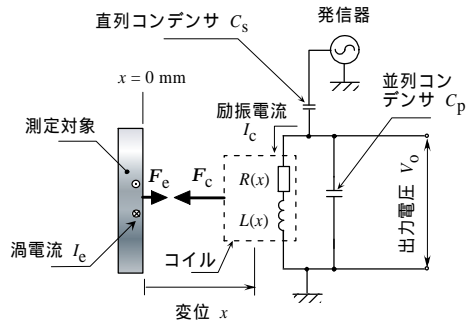


図1 EC変位センサの基本構成

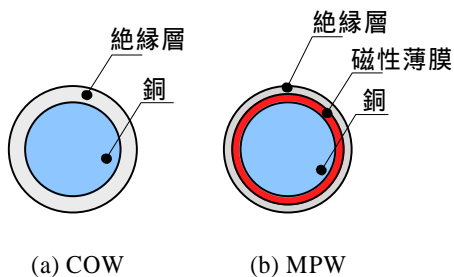


図2 銅線(COW)と磁性めっき線(MPW)の構造

望ましい。そこで、磁性薄膜の特性が銅線の渦電流損(コイルの交流抵抗)に与える影響を検討する。

### (2)NiFe薄膜をもつMPWの試作・評価

NiFe薄膜をもつMPWを試作して透磁率( $m$ )を評価する。

### (3)EC変位センサの温度ドリフト

温度特性はEC変位センサにとって極めて重要な特性の一つである。そこで、COWコイルとMPWコイルの温度特性を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1)磁性めっき線の特性把握

図3は磁性薄膜の比透磁率と抵抗率に依存する導線の渦電流損である。同図は、導線と直角方向に交流の外部磁界が作用した場合の導線内で生ずる渦電流損を理論解析によって求めた結果であり、コイルの近接効果に依存する交流抵抗を意味している。Fe薄膜(比透磁率 $m = 100$ 、抵抗率 $r = 9.8 \mu\Omega\text{cm}$ )をもつMPWの渦電流損はCOWの24%に低減できることを示している。さらに、NiFe薄膜( $m = 500$ 、 $r = 12 \mu\Omega\text{cm}$ )をもつMPWの渦電流損はCOWの4%に低減できることを示している。すなわち、MPWはコイルの近接効果に依存する交流抵抗の低減ができることを示しており、EC変位センサの高Q値ばかりでなく、コイルを用いた電気機器の抵抗低減、高効率化ができることを示唆している。

図4は、磁性薄膜の厚さに依存する渦電流損である。渦電流損が最小となる磁性薄膜の厚さ $t$ が存在することを示しており、Fe薄膜をもつMPWでは $3 \mu\text{m}$ 、NiFe薄膜をもつMPWでは $1.3 \mu\text{m}$ で渦電流損が最小となった。すなわち、磁性薄膜の $m$ と $r$ に応じて最適な磁性薄膜の厚さがあることを意味している。

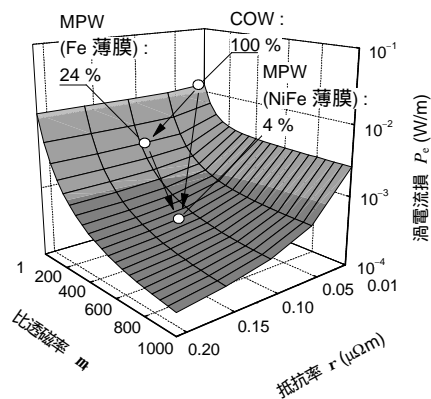


図3 磁性薄膜の比透磁率と抵抗率に依存する導線の渦電流損(銅線径:  $45 \mu\text{m}$ ,  $H = 1 \text{ kA/m}$ ,  $f = 1 \text{ MHz}$ ,  $t = 1 \mu\text{m}$ , Cu:  $m = 1$ ,  $r = 1.72 \mu\Omega\text{cm}$ , Fe:  $m = 100$ ,  $r = 9.8 \mu\Omega\text{cm}$ , NiFe:  $m = 500$ ,  $r = 12 \mu\Omega\text{cm}$ )

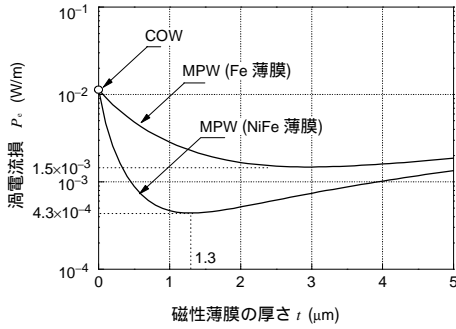


図4 磁性薄膜の厚さに依存する渦電流損  
(銅線径: 45  $\mu\text{m}$ ,  $H = 1 \text{ kA/m}$ ,  $f = 1 \text{ MHz}$ ,  
 $t = 1 \mu\text{m}$ , Cu:  $\mu_r = 1$ ,  $r = 1.72 \mu\Omega\text{cm}$ , Fe:  
 $\mu_r = 100$ ,  $r = 9.8 \mu\Omega\text{cm}$ , NiFe:  $\mu_r = 500$ ,  
 $r = 12 \mu\Omega\text{cm}$ )

(2) NiFe 薄膜をもつ MPW の試作・評価

図5は電気めっき法によって試作した NiFe 薄膜の比透磁率特性である。Fe 薄膜と NiFe 薄膜の比透磁率は、それぞれ 100 と 197 であり、NiFe 薄膜は約 2 倍の特性が得られ、コイルのさらなる交流抵抗の低減による高 Q 値化が期待された。しかし、絶縁層を塗布する工程において、約 200 の熱が作用するために磁気特性が悪化 ( $\mu_r = 50$  程度) した。現在、この原因の究明と対策を実施している。

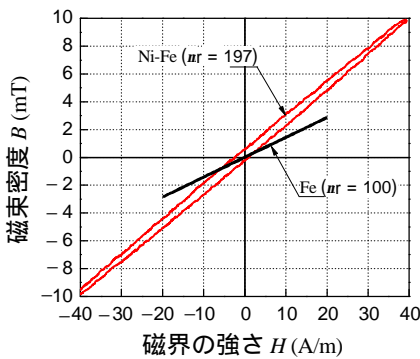


図5 磁性薄膜の磁束密度 - 磁界の強さ特性

(3) EC 変位センサの温度ドリフト

EC 変位センサと測定対象の構造

図6は Fe 薄膜をもつ MPW を用いた EC 変位センサの構造である。コイルの外径 4.56 mm、軸方向長さ 2.15 mm であり、コイルの末端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

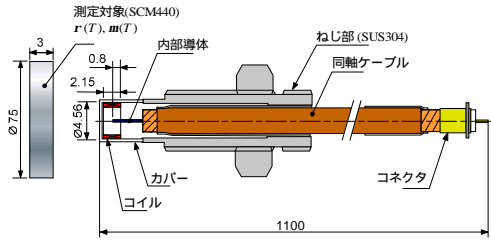


図6 EC 変位センサと測定対象の構造  
(単位: mm)

る。COW を用いた EC 変位センサ (市販品) も図6と同一の構造を有している。

温度ドリフトの理論計算の構築

図7は磁性 (Fe) 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 における COW を用いた EC 変位センサの温度ドリフトは 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  $L$  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  $L/D$ 、かつ COW と同等な温度ドリフトを実現した。

図7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。

図8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) であり、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。

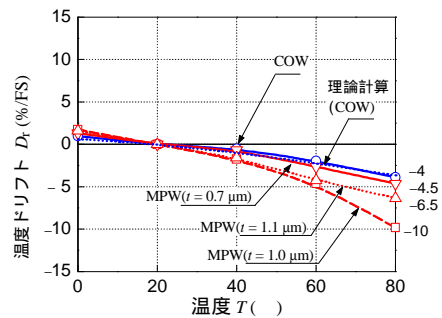


図7 磁性薄膜の厚さ  $t$  をパラメータとする EC 変位センサの温度ドリフト  
(周波数: COW: 1 MHz, MPW: 1.3 MHz)

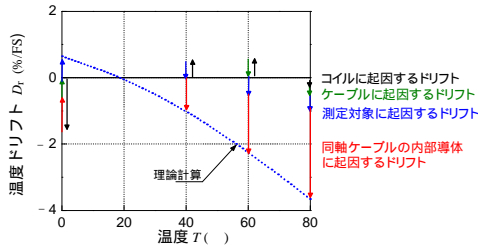


図8 COWを用いたEC変位センサ温度ドリフトの要因分析

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、温度上昇にともなって内部導体（図6参照）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 $r$ と透磁率 $m$ 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、温度上昇にともなって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6参照）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。

本研究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 $L/D$ 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 $L/D$ の向上と低温度ドリフト化が必要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5件)

Tsutomu Mizuno, Shigemi Enoki, Takayuki Suzuki, Takashi Asahina Masahiro Noda Hiroki Shinagawa (Reduction of eddy current loss in magnetoplated wire), The Interna-

tional Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, COMPEL, Vol. 28, No. 1, pp. 57-66, 2009, 査読有

水野勉, 松下和誉, 飯田和剛, 神谷旭, 山本大輔 (磁性めっき線を用いたリッツ線の交流抵抗), 第17回MAGAコンファレンス in 日立, 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス講演論文集, pp. 469-474, 2008, 査読無

水野勉, 榎木茂実, 朝比奈孝, 鈴木貴之, 前田浩幸, 旭尊史, 品川広樹 (測定対象の熱処理に依存する渦電流変位センサの出力電圧特性), 電気学会論文誌A, Vol. 128, No. 4, pp. 289-297, 2008, 査読有  
水野勉, 鈴木貴之, 朝比奈孝, 野田真裕, 榎木茂実, 品川宏樹, 植原精作, 北沢弘 (磁性めっき線を用いた導線内に生ずる渦電流損の低減), 電気学会論文誌A, Vol. 127, No. 10, pp. 611-620, 2007, 査読有  
T. Mizuno, S. Enoki, T. Hayashi, T. Asahina, T. Suzuki, M. Noda and H. Shinagawa (Reduction of proximity effect in coil using magnetoplated wire), IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 43, No. 6, pp. 2654-2656, 2007, 査読有

<http://hdl.handle.net/10091/258>

〔学会発表〕(計 3件)

T. Mizuno, S. Enoki, M. Noda, T. Suzuki, Y. Shimura, and H. Shinagawa (Temperature dependency of quality factor of coil using magnetoplated wire), Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, AP-SAEM08, 2008.7.24, Bangkok, Thailand  
野田真裕, 鈴木貴之, 志村祐介, 品川宏樹, 水野勉 (磁性めっき線を用いたコイルの温度特性), 電気学会東海支部若手セミナー, 2008.1.11, 長野

Tsutomu Mizuno, Shigemi Enoki, Takayuki SUZUKI, Takashi ASAHINA, Masahiro NODA, Hiroki SHINAGAWA (Reduction of eddy current loss in magnetoplated wire due to relative permeability and resistivity of magnetic thin film), XIV International Symposium on Theoretical Electric Engineering ISTET'07 and SEEM'07, 2007.6.20, Poland

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 勉 (MIZUNO TSUTOMU)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号: 90283233