

クロムモリブデン鋼およびステンレス鋼上に電析したパーマロイめっき膜中に存在する内部応力の外部応力検出感度に及ぼす影響

Effects of internal stress found in electro-deposition permalloy plating film on chromium molybdenum steel and stainless steel upon external stress detection sensitivity

石川 さとみ

本稿は、公益社団法人 日本金属学会 2018 年春期(第162 回)講演大会で発表した内容に基づくものです。

要旨

電動アシスト付き自転車に使われている磁歪式力学センサは、磁性体が寸法変化すると透磁率が変化する逆磁歪効果を用いた力検出センサで、高剛性かつ非接触式であることが利点である。そのセンサ素子として、透磁率の高いパーマロイめっき膜(Ni-Fe合金; λ (磁歪定数) >0)を選定し、基材と熱処理条件を変えて引張圧縮荷重に対する応力検出感度を測定するとともに、パーマロイめっき膜中に存在する内部応力を測定し、内部応力が応力検出感度に与える影響を考察した。

Abstract

The magnetostrictive mechanical sensor used in electrically power assisted bicycles is a force detection sensor using the inverse-magnetostriction effect in which the magnetic permeability changes with the dimensions of the magnetic material. This has advantages as it is highly rigid and is a non-contact type. As the sensor element, a permalloy plating film with high magnetic permeability (Ni-Fe alloy; λ (magnetostriction constant) >0) was selected, and the effect of the internal stress on the stress detection sensitivity was studied by measuring the stress detection sensitivity to tensile & compressive loading and the internal stress that exists in the permalloy plating film for different base materials and heat treatment conditions.

1 はじめに

高剛性かつ非接触式の力検出センサとして、磁歪式力学センサは有用である。電動アシスト付き自転車の踏力検出用トルクセンサには、クランク軸の高剛性化、およびペダル踏力の低減のために、磁歪式のトルクセンサが使われている。

磁歪式力学センサの素子は強磁性体であることが求められるが、バルク材では強度と応力検出感度の両立が困難である。そこで、基材に一般的な構造材を用い、軟磁性材料であるパーマロイをめっきし、熱処理することで、強度と応力検出感度の両立を狙う試みが実施されている^{[1][2]}。熱処理の目的はめっきと基材の密着強度の確保である。めっきが基材から剥がれるとセンサ特性が不安定になり、センサ特性を安定させるためには670 K以上の熱処理が必要である。一方で、応力検出感度は、Ni-Fe組成比と熱処理条件の組み合わせで複雑に変化する。

本稿では、シンプルな引張圧縮式の磁歪式力学センサを用い、Ni-Fe組成比、熱処理条件が応力検出感度に及ぼす影響とその要因を考察した。

2 試験方法

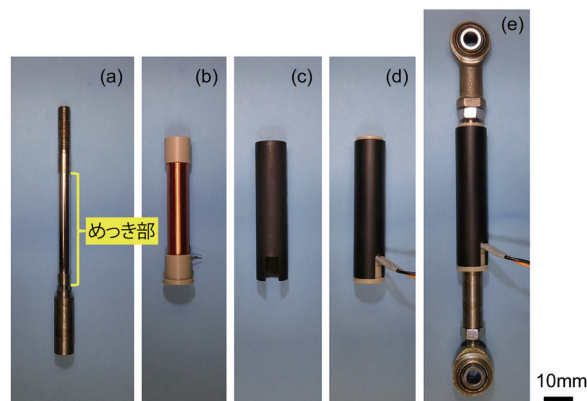
2-1. 試験片仕様

素子部は、上下に雄ネジと雌ネジを設けたクロムモリブデ

ン鋼(SCM435)あるいはステンレス鋼(SUS304)の円柱基材を用い、外径 ϕ 5.6の部位に0.5~1 μm の Niめっき下地を施し、その上にNi-Fe(組成20 - 37 at%Fe)を70 μm めっきした複合体を作製し、ガス置換炉(N_2 ガス雰囲気)を用いて、室温から目的の温度まで1時間で昇温し1時間保持(焼鈍)した後、炉の中で室温まで冷却(炉冷)した。

磁束検出部は、励磁と検出を兼ねるコイル(Cu細線整列巻き320ターン)と、磁路を形成する軟磁性体ヨーク(STKM11AE-C; N_2 ガス雰囲気中770 Kで熱処理済み)を重ね合わせ、接着剤で固定したものを使用した。

素子部と磁束検出部を組み合わせた後、上下にボールジョイントを接続した(図1)。



(a) 素子部 (b) 励磁および検出コイル (c) 軟磁性体ヨーク
(d) 磁束検出部(b)+(c) (e) (a)+(d)+ボールジョイント

図1 試験片形状

2-2. 応力検出感度測定

図1(e)の試験片について、万能試験機(島津製作所製, オートグラフAGX-plus)を用い荷重を印加しながら、インピーダンスアナライザ(榊岩崎通信機製, PSM1700)でコイルのインピーダンス Z を測定した。

万能試験機での印加荷重は ± 200 N、ストロークスピードは 0.03 mm/s、インピーダンスアナライザによる励磁条件は 2 kHz、 40 mA、サンプリング周期は 0.1 sとした。

図2は測定結果の一例である。

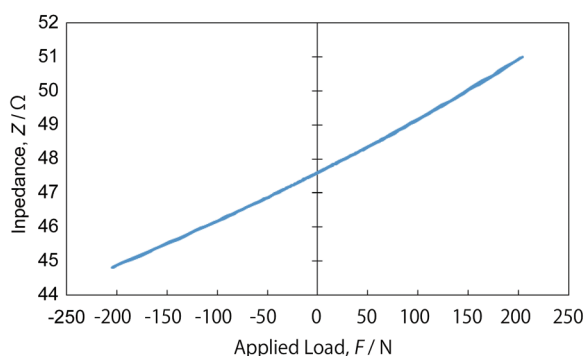


図2 応力検出感度測定結果例

2-3. 応力検出感度算出方法

応力検出感度算出フローを図3に示す。

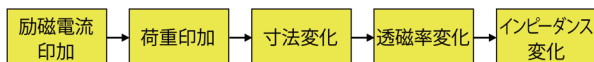


図3 応力検出感度算出フロー

磁束検出部に励磁電流を流した状態で試験片に荷重を印加すると、逆磁歪効果によって Z が変化する。

磁性体に交流磁界を与えた場合の Z は、①式で、透磁率 μ は②式で表される^[3]。

$$Z = R + j\omega L = R + j \cdot 2\pi f \cdot L \quad \cdots \textcircled{1}$$

$$\mu = \frac{Ll}{n^2 A} \quad \cdots \textcircled{2}$$

Z : コイルのインピーダンス
 j : 虚数単位
 L : 自己インダクタンス
 μ : 透磁率
 n : コイル巻数

R : コイルの直流抵抗
 ω : 角周波数
 f : 励磁周波数
 l : 磁性体の長さ
 A : 磁性体の断面積

①式に②式を代入した③式が Z と μ の関係を表す。

$$Z = R + j \cdot 2\pi f \cdot \mu \frac{n^2 A}{l} \cdots \textcircled{3}$$

③式の右边は、 μ を除いて定数であるため、 μ の変化率は Z の変化率と考えることができる。

このため、 X [N] 負荷時の Z を Z_x と表すと、応力検出感度 S は以下の通りと考えることができる。

$$S = \frac{Z_x - Z_0}{Z_0} \quad \cdots \textcircled{4}$$

今回、荷重は引張圧縮両方向に印加したため、引張の応力検出感度を S_+ 、圧縮の応力検出感度を S_- 、合計の感度を ΔS とし、

$$\Delta S = S_+ + S_- \quad \cdots \textcircled{5}$$

2-2の実測値から⑤式を用いて計算した。

2-4. 内部応力測定

素子部の内部応力を、微小部X線応力測定装置(リガク製 AUTOMATE II ; Cr管球)により測定した。図4に内部応力測定時の試料の配置を示す。測定は、(220)結晶面、傾斜角 ϕ を一定($\phi = 0 \sim 45^\circ$)、回折角揺動幅を 3° で行った。

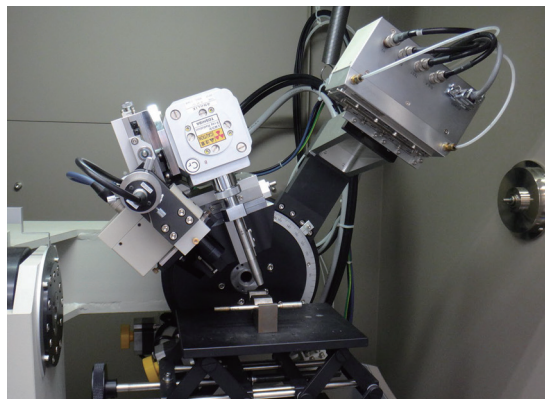


図4 内部応力測定時の試料配置

2-5. 熱膨張測定

めっき膜と基材界面に発生する熱応力(内部応力)を見積もるため、熱膨張率計(NETZSCH製 TD5020SE)を用い、温度 $370 \sim 770$ Kの範囲で基材であるSCM435とSUS304の試料長さ l を測定した。

クロムモリブデン鋼およびステンレス鋼上に電析したパーマロイめっき膜中に存在する内部応力の外部応力検出感度に及ぼす影響
Effects of internal stress found in electro-deposition permalloy plating film on chromium molybdenum steel and stainless steel upon external stress detection sensitivity

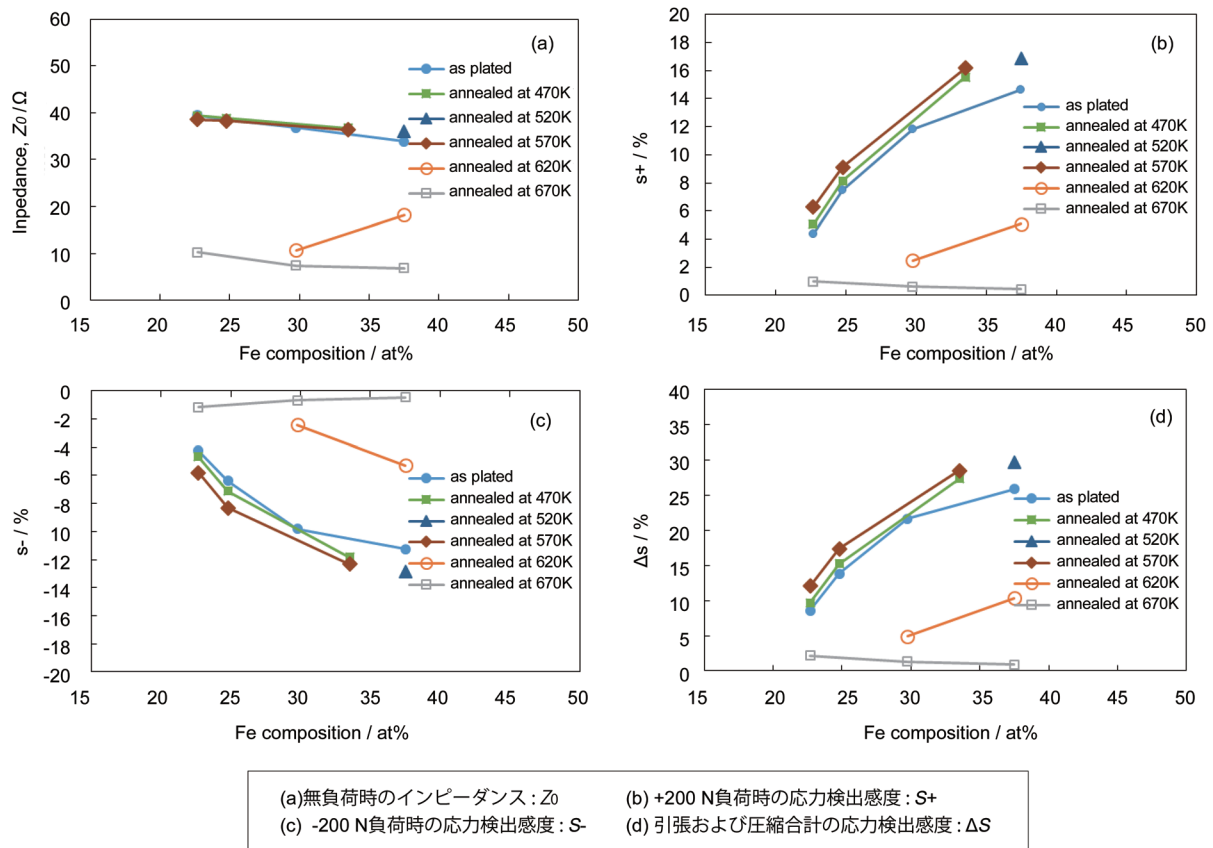


図6 SUS304基材上Ni-Feめっき膜のインピーダンスおよび応力検出感度に及ぼすめっき中Fe濃度および熱処理温度の影響

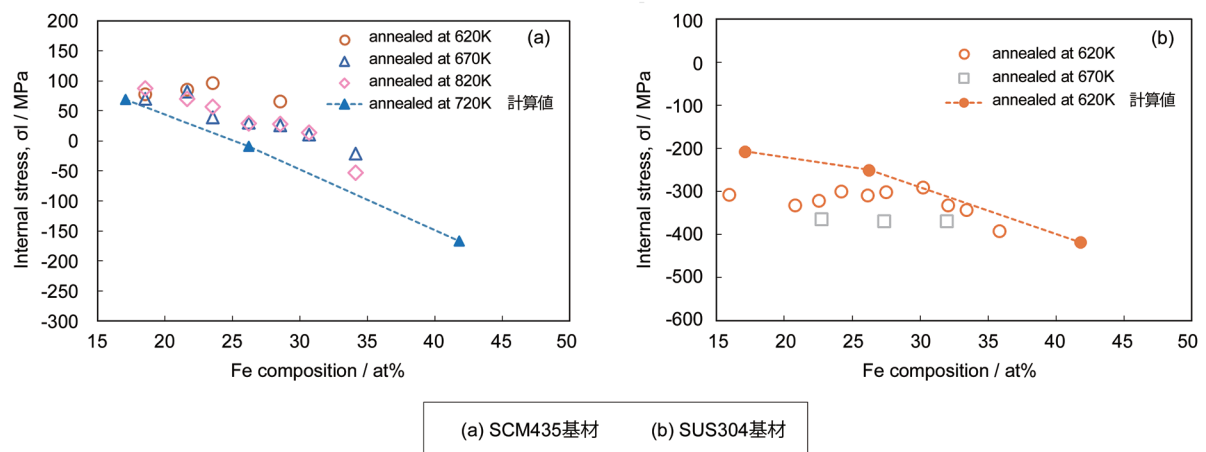


図7 Ni-Feめっき膜の内部応力に及ぼすめっき中Fe濃度および熱処理温度の影響

図7にSCM435基材上のパーマロイめっき膜およびSUS304基材上のパーマロイめっき膜の内部応力に及ぼすめっき中Fe濃度と熱処理温度の影響を示す。

どちらの基材でも、熱処理温度570 K以下では内部応力が測定できなかった。これはX線による内部応力測定はZ方向

(めっき膜の厚み方向)に応力分布があると測定できないことから、Z方向に応力分布があるものと推察される。620 K以上で測定できたのは、熱処理によって応力が緩和され、Z方向の応力分布がなくなった(小さくなった)からであると推察される。

620 K以上の熱処理では、SCM435は25-30 at%Feを境に低Fe濃度側で引っ張りの内部応力が、高Fe濃度側で圧縮の内部応力が検出された。SUS304では15-35 at%Fe全てで圧縮の内部応力が検出された。

めっき時に発生する内部応力は、めっき液の組成やめっき条件にもよるが、一般的に引張応力であると言われている^[5]。めっき時に発生した応力は620 K以上で緩和されると考えられるが、SUS304基材で大きな圧縮応力が検出されたことから、応力緩和と同時に新たな応力が付与されたと考えられる。この新たな応力は、SCM435の720 KとSUS304の620 Kの内部応力測定結果が、基材の熱膨張の実測値と格子定数から計算した値に近いことから、基材とめっき膜の熱膨張率の差によって発生した熱応力であることが確認できる。

応力緩和が起こったと推測される620 K以上で ΔS が変化し始め、大きな圧縮応力が入ったSUS304基材では ΔS が消失し、SCM435基材でも圧縮応力が検出された30 at%Fe以上で ΔS の低下が見られたことから、めっき膜中に圧縮応力が存在すると ΔS が得られず、引張応力が存在すると高い ΔS を得ることができると推測される。

4 おわりに

SCM435基材およびSUS304基材上に種々Fe濃度を変化させたパーマロイめっきを施した後、熱処理条件を変化させた磁歪センサ試験片を作成し、引張圧縮試験により応力検出感度の評価を実施した。その結果、応力検出感度を高くするには、めっき膜中に引張応力が存在するような線熱膨張を持つ基材、熱処理温度を採用する必要がある、本稿の検討においてはSCM435基材、約26 at%Feのパーマロイめっき膜を670 Kで熱処理したもので感度と強度が両立し、最大の応力検出感度を得られることが判明した。

今回検討した引張圧縮式の磁歪式力学センサは、寸法ばらつき等の影響を排除するため、比較的大きいサイズで作製した。実用においては、引張圧縮式でもトルク式でも、搭載スペースの制約がある。小型化は、応力検出感度の低下やセンサ特性の信頼性の低下を招くため、特性を保ちつつ小型化することが今後の課題となる。

■謝辞

本研究を遂行するにあたり、ご助言を賜った隅山兼治氏に感謝の意を表す。

また、めっき技術の指導を頂いた故神谷正市氏に深謝する。

■参考文献

- [1]小林秀之ら: PAS用磁歪式トルクセンサのめっきシャフト量産技術開発, ヤマハ発動機 技報 第53号, 14-17, 2017
- [2]向坊長嗣ら: ニッケル-鉄合金めっき膜中の水素および空孔の安定化熱処理, 日本金属学会誌第71巻第9号(2007) 809-814
- [3]太田恵造: 磁気工学の基礎Ⅱ—磁気的应用—(共立出版株式会社 1973年) P306-307
- [4]W.B.Pearson: A Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys, (Pergamon Press, 1958) P638 - 641.
- [5]永山富男: めっき法により作製したFe-Ni合金膜の金属組織学的研究と低熱膨張材料への展開(奈良先端大学博士論文 2017年) P16

■著者



石川 さとみ

Satomi Ishikawa

先進技術本部
研究開発統括部
基盤技術研究部