

「PAS」磁歪式トルクセンサのFe-Ni合金めっき工程における廃棄物削減工法の開発

Development of a Waste Reduction Method for the Fe-Ni Alloy Plating Process of "PAS" Magnetostrictive Torque Sensors

大西 弘道

Abstract

The power assisted electric bicycle "PAS" is named after the initials of the Power Assist System, and was launched by Yamaha Motor in 1993 as the world's first bicycle that assists the user in response to human power input. The market for power assisted electric bicycles with extremely low CO₂ emissions has been expanding in recent years due to growing interest in the Sustainable Development Goals, and further environmental considerations are required in the manufacturing process.

Yamaha Motor Electronics Co., Ltd. (hereinafter "the Company") develops and manufactures drive units that sense and generate drive power for the "PAS", and is taking various measures to reduce environmental impact, including power-saving and resource conservation in the manufacturing process. This study introduces the Company's resource conservation efforts in the Fe-Ni alloy plating process for magnetostrictive torque sensors that detect pedal force.

1 はじめに

電動アシスト自転車「PAS」は Power Assist System の頭文字が由来となっており、1993年にヤマハ発動機から世界で初めて人の力に応じてアシストしてくれる自転車として販売された。近年 SDGs への関心の高まりから CO₂排出量が極めて少ない電動アシスト自転車の市場は拡大しており、製造プロセスにおいてはより一層の環境配慮が求められる。

ヤマハモーターエレクトロニクス株式会社(以下、当社)では「PAS」のセンシングと駆動力発生を担うドライブユニットの開発および製造を手掛けており、製造プロセスの省エネ・省資源化など環境負荷低減のため様々な取り組みを行っている。本稿ではペダル踏力を検出する磁歪式トルクセンサのFe-Ni合金めっきプロセスにおける当社の省資源化の取り組みについて紹介する。

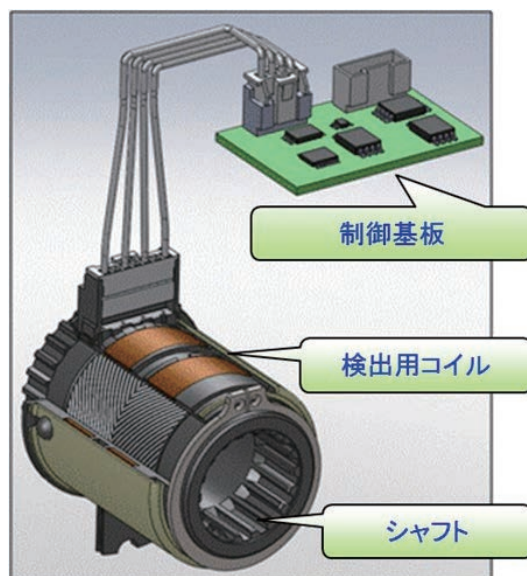


図1 トルクセンサの構成

2 磁歪式トルクセンサの構造

「磁歪式トルクセンサ」は磁歪効果を持つシャフト、検出用コイルと、電気信号を増幅かつノイズを除去する基板から成る。シャフトの表面には磁歪効果を高めるためFe-Ni合金の磁歪膜をシャフト軸に対し45°、-45°の角度で成膜している(図1、図2)。磁歪膜にはそれぞれに検出コイルが付帯しており、このときコイルのインピーダンスZおよびインダクタンスLは①式と②式で表される。



図2 シャフトと磁歪膜

磁歪膜にはペダル踏力に応じてそれぞれ引張、圧縮の応力が作用し、透磁率 μ はそれぞれ増大・減少する(逆磁歪効果)。透磁率の変化にともないインダクタンスおよびインピーダンスが増減するため、磁歪式トルクセンサでは各コイルのインピーダンスの差動を測定することでペダル踏力に比例するセンサ出力電圧を得ている。

$$Z = R + j\omega L \quad \dots ①$$

$$L = \frac{\mu S n^2}{l} \quad \dots ②$$

Z:コイルのインピーダンス R:コイルの直流抵抗

ω :角周波数 L:インダクタンス

μ :磁性膜の透磁率 S:磁歪膜の断面積

n:コイル巻線数 l:磁路長

シャフト表面の磁歪膜には Fe-Ni 合金を採用している。Fe-Ni 合金は高透磁率、低保磁力という優れた軟磁気特性と高い磁歪定数を持ち高感度のセンサを実現している。電解めっきにより成膜し熱処理することで基材と強固な接合が得られ、低コストと高信頼性を兼ね備える^[1]。

3 現状の課題分析と開発の狙い

Fe-Ni 合金めっきの特徴としては、めっき液に使用される有機化合物により Fe-Ni 以外の元素が磁歪膜内に共析し皮膜物性およびセンサ性能に影響を与えることが挙げられる。共析元素は結晶の微細化などセンサの磁気特性に有利に働く部分もあるが、有機化合物が分解されめっき液に蓄積することにより徐々に磁歪膜の物性が変化することが経験的に知られてきた。分解した有機化合物は一般的にめっき処理で用いられる活性炭濾過などでは除去できず、一定の処理台数に達するとめっき液を廃却・建浴しなおす必要があるため廃棄物量が課題となっている。

Fe-Ni 合金めっきに用いられる有機化合物としては液中で酸化した鉄イオンを還元する還元剤と、皮膜内に圧縮応力を付与する応力緩和剤が挙げられる。これらを用いためっき皮膜には炭素と硫黄が共析することが知られているが、めっき処理に伴う有機化合物の分解と共析する炭素・硫黄量の変化について扱った文献は少ない。そこで磁歪式トルクセンサのめっき処理台数と、めっき皮膜に共析する炭素・硫黄量の関係を調査することとした。分析には燃焼・赤外線吸収法を用い、得られた結果を図3のグラフに示す。めっき処理台数の増加にともない皮膜内に共析する炭素と硫黄が増加することが確認された。

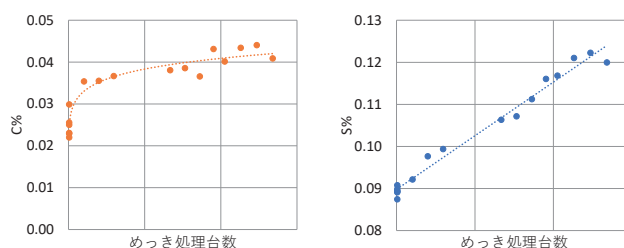


図3 めっき処理台数に対する磁歪膜の炭素共析量(左)と硫黄共析量(右)

このうち還元剤を用いない浴では炭素が増加しないことが実験的に確認されたため、皮膜内炭素が増加する原因が還元剤とその分解物であり、皮膜内炭素の増加がセンサ性能に影響を与えていると著者は考えている。同様に応力緩和剤を添加しない浴では皮膜内硫黄の増加が見られなかったため、応力緩和剤とその分解蓄積物が皮膜内硫黄量とセンサ性能に影響を与えていると考えられる。

本開発では還元剤と応力緩和剤の分解蓄積をそれぞれ対策することにより皮膜組成の変動とセンサ性能の変化を抑え、めっき液の廃棄を少なくすることを目標とした。

4 還元剤

4-1. 還元剤の役割

Fe-Ni 合金めっきを含む鉄系合金めっきにおいては、電解や空気酸化によりめっき液中の Fe^{2+} が酸化され Fe^{3+} となり、陰極電流効率が落ちる、皮膜が脆くなる等の問題が生じる^[2]。磁歪式トルクセンサにおいては Fe-Ni 合金比の変化によるセンサ性能の変化がいち早く顕在化する。そのため還元剤として有機化合物を用いて Fe^{3+} を Fe^{2+} に還元する対策が一般的にされている。

4-2. 還元剤の対策

還元剤を用いない方法としては弱電解処理による還元が挙げられるが、 Fe^{3+} 発生速度に対し著しく還元効率が悪く設備の大型化が避けられない。

そこで還元剤の分解物として有機化合物が蓄積しないよう、無機物を還元剤として用いることを検討した。候補としては皮膜成分である鉄・ニッケルが挙げられるが、Fe-Ni 合金めっきでは Fe^{2+} 量に敏感に反応し合金比が変化する。そのため金属ニッケルの粉末を用いて③式の反応による還元を試みた。



めっき液 1L にニッケル粉末 5g を投入し攪拌した際の Fe^{3+}

濃度の変化を図4のグラフに示す。 Fe^{3+} は経過時間に対し指数関数的に減少し、縦軸に対数を取ると概ね直線のグラフとなった。これを数式に表すと④式の通りとなる。還元速度は④式を微分することにより求まり、⑤式となる。還元速度は Fe^{3+} 濃度とグラフ傾きである反応速度定数 k に比例することが確認できる。

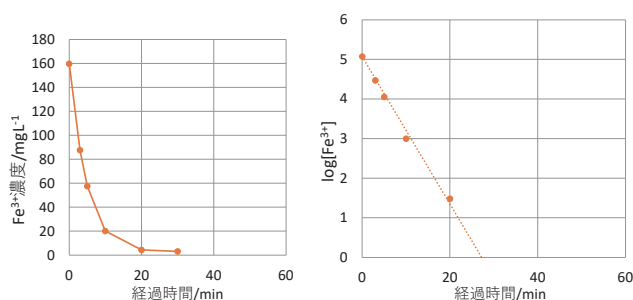


図4 めっき液中の Fe^{3+} 濃度推移

$$\begin{aligned} \log[Fe^{3+}]_t &= -kt + \log[Fe^{3+}]_0 \\ [Fe^{3+}]_t &= [Fe^{3+}]_0 e^{-kt} \end{aligned} \quad \dots(4)$$

$$\begin{aligned} (Fe^{3+} \text{還元速度}) &= \frac{d}{dt}[Fe^{3+}]_t \\ &= \frac{d}{dt}[Fe^{3+}]_0 e^{-kt} \\ &= -k[Fe^{3+}]_0 e^{-kt} \\ &= -k[Fe^{3+}]_t \end{aligned} \quad \dots(5)$$

t:時間 k:反応速度定数

$[Fe^{3+}]_t$:時間 t のときの Fe^{3+} 濃度

$[Fe^{3+}]_0$: Fe^{3+} の初期濃度

使用する粉末量の調整や、粉末でなくペレット等の粒を使用する等して表面積を変化させると、 k の値が表面積に比例することが確認できた(図5)。表面積はSEM(走査型電子顕微鏡)、光学顕微鏡を用いて各試料の粒径を計測し、平均粒径からおおよその表面積を算出した。

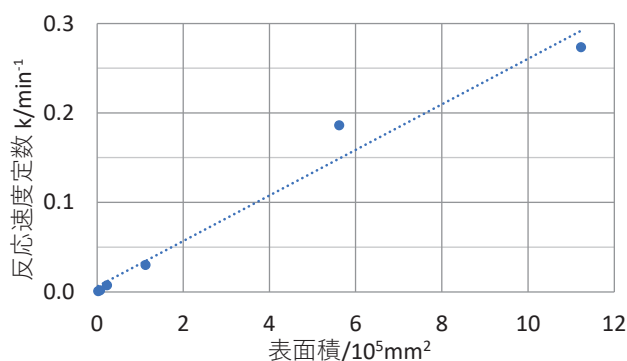


図5 ニッケル表面積と反応速度定数 k の関係

比表面積(重量当たりの表面積)はペレット等と比較し粒径の小さい粉末の方が圧倒的に大きく、少量・短時間で Fe^{3+} を還元できる。そのため還元装置自体は小型化が可能であるが、還元装置以外にも高度なる過装置が必要となり、金属粉末の取扱安全性にも課題がある。そこで比表面積の大きい粒状の多孔質ニッケルを用いることで還元速度の確保と設備小型化の両立を試みた。結果としては、予想に反して粒径から算出した表面積と k 値の関係が図5と同等になり、還元速度は速くならなかった。試験前後の試料表面SEM像を図6に示す。初期状態では試料表面に微細な凹凸があるが、めっき液から引き揚げた試料表面は凹凸が消失していることが確認できる。溶解により表面の凹凸が消失し表面積が小さくなったことが還元速度が速くならない原因であると考えられる。

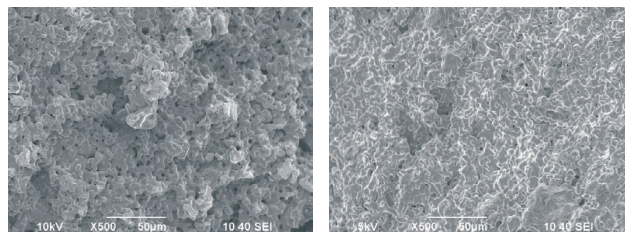


図6 多孔質ニッケル 使用前(左)と使用后(右)

そこで、溶解しても表面積が変わらないメッシュ状の連続気孔を持つ多孔質ニッケルを検討しセルメット®(住友電気工業)を選定した。使用したセルメットは $3750m^2/m^3$ という大きな比表面積を持ち、良好な還元速度を示した(図7、図8)。セルメットはニッケル水素電池の電極としても使用される材料であり、純度が高く比較的安価に入手できる。形状は多孔質のシート状であり任意の形状に加工して使用できる利点がある。事前にラボスケールの試験で Fe^{3+} の発生速度とセルメットの単位量当たりの反応速度定数さえ把握しておけば必要なセルメット量は⑤式より求まり、液量に応じた最適な規模の設備設計が可能である。

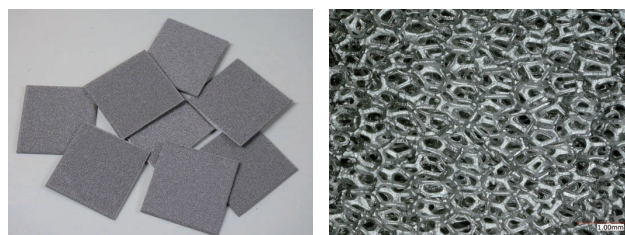


図7 セルメット外観(左)と拡大図(右)

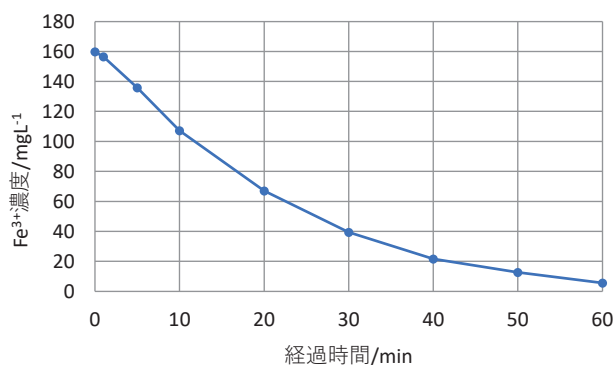


図8 セルメット使用時の Fe³⁺ 濃度推移

還元剤として有機化合物を使用した浴と、セルメットを使用した浴から析出しためっき皮膜中炭素量を分析した結果を図9のグラフに示す。セルメットを使用した浴では従来と異なり皮膜中の炭素量の増加は見られなかった。

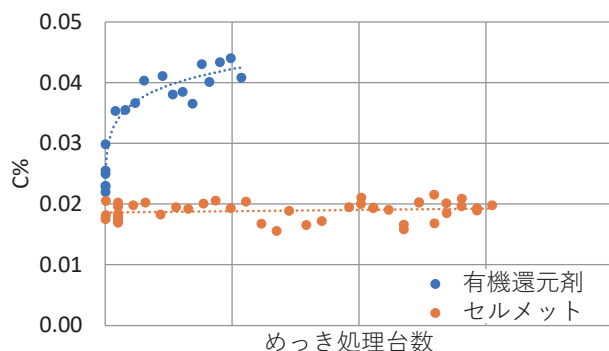


図9 皮膜内炭素増加の対策効果

5 応力緩和剤

5-1. 応力緩和剤の役割

応力緩和剤とは芳香族スルホン酸類や芳香族スルホンイミド類などの硫黄化合物のことであり、電解ニッケルめっきでも添加剤として広く用いられる^[3]。これらの硫黄化合物はめっき処理にともない陰極表面で分解され、めっき皮膜中に硫黄原子が共析することで皮膜に圧縮応力を付与する。さらにめっき皮膜の表面を平滑にする、結晶を微細化する、熱処理によって結晶粒界に偏析する等、複雑な挙動で皮膜物性とセンサ性能に影響を及ぼす。めっき皮膜に取り込まれなかった分解物はめっき液中に蓄積することとなる。

一方、陰極表面で硫黄原子が皮膜に取り込まれる反応以外にも陽極表面での電気分解やめっき槽のヒーター高温部等でも分解が進み、めっき液中には複数種類の硫黄化合物が共存する状態となる。分解物の多くは LC/MS (液体クロマトグラ

フィー質量分析法)によって検出が可能であり、単一の応力緩和剤が十種類以上の硫黄化合物に分解される様子が確認できる。各物質の挙動は明らかでないが、応力緩和剤がよりめっき皮膜内に取り込まれやすい構造に変化することでめっき皮膜内の硫黄量が増加すると筆者は考えている。

5-2. 応力緩和剤の対策

Fe-Ni 合金めっきでは成膜過程で皮膜内に引張応力が生じ、応力緩和剤を添加しない浴ではクラック(亀裂)が発生する。筆者らは応力緩和剤を用いずクラックを防止できる浴を検討したが、引張応力による信頼性への懸念を払拭しきれず実用化には至っていない。そのため陰極反応以外での応力緩和剤の分解を抑制することで皮膜内硫黄量の増加を緩やかにしめっき液の寿命を引き延ばす方法を検討した。

応力緩和剤は陰極反応以外に陽極で分解される場合がある。近年陽極のメンテナンス性等の観点から不溶性陽極の適用が報告されており^{[4][5][6]} 当社でも採用している。不溶性陽極の場合、めっき処理にともない陽極表面で水の電気分解、添加剤の酸化分解、Fe²⁺の酸化による Fe³⁺の発生等が起こる。陽極材として可溶性陽極を用いた場合、陽極表面での反応がほぼ100%陽極の溶解反応となるため添加剤の分解は抑制できる。可溶性陽極を用いた場合でも陽極電流密度が高くなると添加剤が分解されるため、可能な範囲で陽極表面積は広く取った方がよい。さらに可溶性陽極の場合、不溶性陽極よりも低い電圧で処理ができるため消費電力の低減にもなる。

また応力緩和剤を含む添加剤の一部は建浴直後から分解が進み、熱により分解が促進されることが知られている。Fe-Ni 合金めっきはヒーターで加温し浴温度50℃程度で処理されるが、使用するヒーターによってはヒーター表面温度が100℃を超え添加剤の分解が促進される。具体的には石英ヒーター等の直管形状であれば表面積が小さいため表面温度が高くなり、テフロンヒーター等のリング形状であれば表面積が大きいため表面温度は浴温よりわずかに高い程度になる。浴の攪拌によってもヒーター表面温度は変化するが、当社ではヒーター表面温度を浴温より15℃高い程度に抑えてめっき処理を行うようにしている。Fe-Ni 合金めっきに限らず、添加剤を含有するめっき浴は熱による添加剤分解の恐れがあるため表面積の大きいヒーターを用いることが望ましい。

めっき液中の応力緩和剤の濃度低下推移を図10に、皮膜内硫黄増加推移を図11に示す。条件1は不溶性陽極と直管型の石英ヒーター、条件2は可溶性陽極とリング型のテフロンヒーターを用いている。不溶性陽極は Ti 基材に Pt をコーティングしたもの、可溶性陽極は Handy-S (住友金属鉱山)を使用した。

めっき処理はめっき液1Lあたり1.9Ah相当の電気量で電解しているが、可溶性陽極を使用した場合の皮膜内硫黄量は電解量よりも経過時間と相関が強いためグラフ横軸には経過日数を置いた。図10の条件1は実際には濃度変化しないよう随時応力緩和剤を補給しているため、補給しなかった場合の濃度を分析値と補給量から算出している。条件2は応力緩和剤の補給をしなかったため実測値である。条件1と比較し、条件2の応力緩和剤分解速度は約91%低下し、皮膜内の硫黄増加速度は約72%抑制されていることが確認できた。

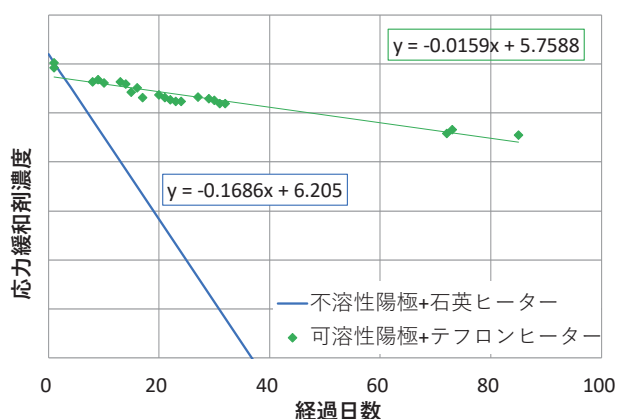


図10 めっき液中の応力緩和剤濃度推移

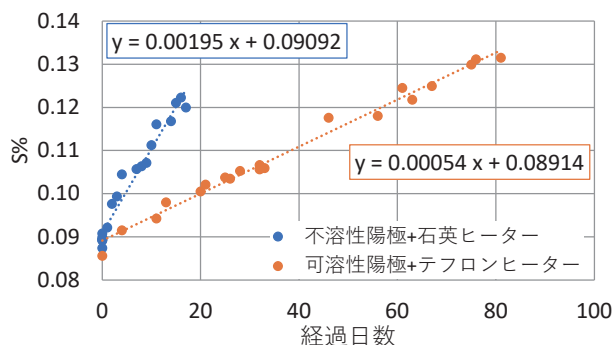


図11 皮膜内硫黄量増加の対策効果

6 おわりに

今回、「PAS」磁歪式トルクセンサの Fe-Ni 合金めっき工程における省資源化を検討し下記の結果を得た。

1. 磁歪式トルクセンサのめっき処理量の増加に伴う Fe-Ni 合金磁歪膜内に共析する炭素、硫黄量の増加を明らかにした。
2. 有機還元剤に代わり多孔質ニッケルを用いた Fe^{3+} の還元を行うことにより、めっき液劣化に伴う磁歪膜の炭素共析量の変化をゼロにした。

3. 陽極およびヒーター表面での応力緩和剤分解を抑制することにより、めっき液劣化に伴う磁歪膜の硫黄共析量の変化を72%削減した。

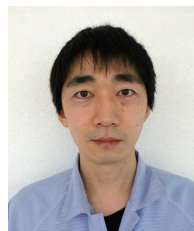
センサ性能の詳細は伏せるが、皮膜組成の変動を抑制することにより皮膜物性およびセンサ性能の変化が抑制できることが裏付けられている。これによりめっき液を長期間使用することが可能となり、廃液削減による省資源化を達成することができた。さらには原材料費の低減、センサ性能の向上にも有効な技術であると考ええる。

最後に、当社をはじめとし製造業界では製品に表面処理を必要とする場面が多々あり、カーボンニュートラルに代表されるSDGsに対応するため様々な取り組みが行われている。今回紹介しためっき工程における省資源化の見聞はトルクセンサのみならず、広範な領域で適用が可能な技術であると考ええる。本誌に寄稿することにより製造業全体のSDGs達成に資することができれば幸いである。

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, 2017)
- [2] 青谷薫;合金めっきⅨ -Fe 合金めっき p. 274(日本プレーティング協会, 2010)
- [3] 電気鍍金研究会;現代めっき教本 p. 67(日刊工業新聞社, 2011)
- [4] 岸富也;表面処理プロセスにおける不溶性アノード(表面技術42巻8号, 1991)
- [5] 梶野正樹ら;アルミニウム合金への高速・耐摩耗 Fe めっき(豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 33 No. 4, 1998)
- [6] 石田幸平ら;Fe-W 合金めっきにおける Fe(III) の影響とイオン交換膜-複数陽極システムを用いた連続めっき(表面技術67巻9号, 2016)

著者



大西 弘道
Hiromichi Onishi
ヤマハモーター
エレクトロニクス(株)
事業統括部
製品技術部