論文

ひずみ誘起変態を利用した磁気目盛りロッドの開発

浅川 基男** 上村 寛* 上田 晴久* 浜田 敏雄**

山鹿 純一** 保谷 暢男* 中里 雅一***

Development of Magnetic Scaling Rod and Stroke Sensing Output by Transformation-Induced Plasticity of Deformation

Motoo ASAKAWA **, Hiroshi UEMURA *, Haruhisa UEDA *, Toshio HAMADA **,

Jyunichi YAMAGA **, Akio HOUYA * and Masaichi NAKAZATO ***

(Received on February 28, 2013)

Intelligent actuators controlling their own stroke have contributed to robot system and factory automation. Usually, stroke is detected by using a sensor located on one end of the actuator and its construction is very complex. The space and the conditions for using the sensor are restricted because of its location. To solve this problem, a new kind of actuator was developed. This actuator's piston rod has magnetic scales made by irradiation with a laser beam. The scaling rod is robust and more accurate. However, irradiating with the laser incurs high cost because of the use of the expensive laser beam machine. Therefore, a new manufacturing process with plastic work is developed to improve productivity. In order to produce a one-body-type magnetic scale, we attempted martensitic transformation of steel by plastic deformation. Using a special austenite steel rod, a part of the surface was transformed into martensite by rotating a roll-die over the rod. The effect of crystal grain size on martensitic transformation was investigated. As a result, martensitic transformation was found to be more stable for finer grain. As magnetic scale became small through the grain refinement, the accuracy of stroke sensing became higher. We also discussed the possibility of fabricating a magnetic scale rod of a carbon steel.

Key words: magnetic scale, TRIP, austenite, martensite, laser beam.

1. 緒言

近年、信頼性の高い計測システム分野の発展はめざましい。その一つに油圧・空圧機器の位置制御機構が挙げられる。この機器はブルドーザーの自動運転あるいは自動車・新幹線のアクティブサスペンション、工場の自動搬送装置などの用途が広い。従来は外付けの計測器あるいはロッドに機械的目盛りを施し対応していた。そこでより堅牢で確実性の高い特殊ステンレス鋼による金属組織の最を活用した磁気目盛りロッドが開発・実用化されてきた。これは金属の変態を利用しているため、経年変化にも耐えられる。しかしレーザ機器は初期投資の負担が大きく、コスト高になっていた。そこで、次世代型磁気目盛りロッドとして新たに、量産に適した塑性加工で磁気目盛りを製作する方法を考案した。ここではその製造法と効果について報告する。

2. レーザ加工による磁気スケール製造法

従来のピストンロッドの位置検出法としては、Fig. 1に示すようにロータリーエンコーダなどを油空圧シリンダ外部に装着する方法や、ロッドに等間隔の溝を設け、銅等の磁性の異なる金属でその溝を埋め磁性部と非磁性部を交互に配列し、磁気センサで検知する方法が実用化されている。しかし、前者は堅牢さや検出精度に問題を抱え、後者はその構造の複雑さ、耐久性不足から信頼性に欠けていた。

Fig. 1 Stroke sensing system by rotary encoder method and magnetic scaling method with mechanical notches

* 早稲田大学大学院 基幹理工学研究科
〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1 59-317
Graduate School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University,
59-317, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan.

** 早稲田大学 基幹理工学部 同上
Fundamental Science and Engineering, Waseda University, ibid.

*** KYB 株式会社 〒105-6111 港区浜松町 2-4-1 世界貿易センタービル
KYB. Co., WTC.2-4-1 Hamamatsu-cho, Minato-ku, Tokyo 105-6111, Japan.

そこで、特殊ステンレス鋼を溶体化した材料をひずみ誘起変態によりマルテンサイト化(磁性)した後、レーザを一定間隔で加熱照射し再びオーステナイト化(非磁性)し、高精度かつ高強度の磁気目盛りロッドが著者らによって開発・実用化した。

Fig. 2 にレーザ加工による磁気スケールロッドの製造工程を示す^{1)~3)}。特殊ステンレス鋼を熱間圧延後溶体化処理(オーステナイト化)して非磁性化する(1)。続いて冷間引抜き加工誘起変態によりマルテンサイト化し、強磁性化する(2)。その後の冷間矯正は、材料の真直性を確保するとともに、表層の強磁性化をさらに促進させる。この加工法は特に検出信号のヒステリシス(往復誤差)の減少に著しい効果がある(3)。つぎに一定のスケール間隔に応じてレーザの加熱照射により局部的に溶融させる。溶融部に対し基体部分の体積が圧倒的に大きいので、溶融部は急速に冷却凝固し非磁性化する。こうして非磁性(溶融部)、磁性部(基体の冷間加工部)が交互に配列された磁気目盛りが形成される(4)。最後に必要に応じて表面を研削、平滑化し(5)、メッキ仕上げ後ピストンロッドとする。

Fig. 2 Manufacturing process of magnetic scaling rod irradiated with laser beam

Fig. 3 に磁気センサの原理を示す。センサはロッドとの間で強磁場を作り出す磁石と、磁場の強さにより抵抗値が変化する磁気抵抗素子により構成される。センサ下部を磁性体が通過すると、抵抗を横切る磁束が変化し、ブリッジ状に組まれた回路から電圧変化として出力される。レーザ加工による磁気目盛りでは、目盛り間隔、目盛り溶融幅などの目盛り精度に影響する要素を高精度に制御することができ、ピッチ 2 mm のときセンサ出力は振幅が一定で $\pi/2$ の位相差を持った 2 相の $\sin$ 波となる。図中の X の位置を求める場合、中間電圧をクロスする回数とその間のソフトウェア処理による細分化により、最終的には数十 μm の単位で精度よく X の位置を求めることができる。

Fig. 3 Magnetic sensor and scaling method

本研究ではアクチュエータのシリンダロッドに SUS304 をベースに **Table 1** に示すように Ni, C, N 分を少なくした特殊ステンレス鋼 SUS304 Modify を開発した¹⁾。これにより不安定オーステナイト状態とし、**Fig. 4** に示すように、通常の SUS304 に比較し、開発鋼はひずみが増大するとともに応力が急上昇し、ひずみ誘起変態が常温下でも生じている状況が観察される。**Fig. 5** に磁気目盛りロッドとこれを油圧シリンダ内に磁気センサとともに内蔵され堅牢になった機器の内部構造を示す^{1)~3)}。

Table 1 Chemical composition of tested materials (mass%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
SUS304	0.08	0.35	1.10	0.034	0.026	8.00	17.88	0.21	0.0521
SUS304 Modify	0.05	0.53	1.52	0.026	0.0003	7.12	17.21	0.12	0.0249

Fig. 4 Comparison of stress-strain curves between SUS304 and SUS304 Modify

Fig. 5 Magnetic scaling rod with laser beam for intelligent actuator

3. 塑性加工による磁気スケール製造法

このレーザ加工による磁気スケール製造法では、目盛り深さ、目盛り幅などの検出精度に影響する要素を高精度に制御することができ、極めて高精度の目盛り形成が可能である。しかし、高価なレーザ加工機を用いるためロッド加工のコストが高く、特殊な用途に限定されているのが現状である。そこで塑性加工によって同じような効果を有する磁気スケールを開発することにした。

Fig. 2 に示したようにレーザ加工法では、マルテンサイトの母材組織にオーステナイトの組織を付与している。一方、塑性加工を利用した方法では **Fig. 6** に示すように、レーザ法とは逆にオーステナイトの母材組織にマルテンサイトの組織を付与する。すなわち、溶体化した材料(1)を引抜き(2)、中心部をマルテンサイト組織にしたまま表層を高周波加熱で溶体化(3)した後、オーステナイト状態の表層組織に塑性加工を施しひずみ誘起変態によりマルテンサイトを

析出させる(4). この性質を利用し, 例えばロッドに圧印を施し, 非磁性体 (オーステナイト) と強磁性体 (マルテンサイト) を交互に生成させ, 磁気目盛りを形成させることにした. **Fig. 7** に回転加工法のプロセスを示す.

Fig. 6 Manufacturing process of magnetic scaling rod with coining

Fig. 7 Manufacturing process of magnetic scaling rod with form rolling

Fig. 8 にそれぞれの出力波形を比較したチャートと, 回転加工のダイス形状を示す. 圧印加工法ではピッチごとにマルテンサイト生成量にばらつきがあるため, 出力波形振幅が不安定となっているのに対し, 回転加工では押込み精度が高く, 微小変形の繰り返しにより一定量の塑性変形を付与できるため, 振幅変化が少なく安定した出力が得られている.

Fig. 8 Comparison of sensor output between coining and form rolling

具体的には, 表層部を溶体化したオーステナイトロッドに旋盤を利用してローラダイスにより回転加工を施す(**Fig. 9**). すると, 加工された部分がひずみ誘起変態によってマルテンサイト化する. この組織を一定ピッチで付与すると

加工部がマルテンサイト (磁性), 非加工部がオーステナイト (非磁性) となり, 目盛りが形成される.

Fig. 9 Manufacturing process of magnetic rod using roller die and surface shaving process

目盛りピッチ $P = 2$ mm, 目盛り深さ $t = 0.2$ mm, ローラ角度 $\theta = 45^\circ$ で, 測定精度は ± 0.1 mm となることが確認された. **Fig. 10** は目盛り部の長手方向断面の顕微鏡写真, **Fig. 11** は目盛り部長手断面のビッカース硬さ試験 (50gf) により推定したマルテンサイト分布図である. 両図より, ピッチ 2 mm に対し 0.2 mm 程度のわずかな圧痕により磁気目盛りが形成されている状況が観察される.

Fig. 10 Microscope photograph of magnetic scale

Fig. 11 Longitudinal distribution of martensite phase

また, ロッド表面の加工溝による強度低下を考慮し, 目盛り付与後, 表面を旋盤により切削 (片側 0.2mm, 800rpm) し平滑にした場合の波形を **Fig. 12** に示す. 平滑化前の出力値よりも平滑後はやや低下するものの安定した出力が維持されている. すなわち, レーザ法と同様な検出精度を実現できた^{4)~11)}.

Fig. 12 Sensor output of magnetic scaling rod

4. 磁気目盛り間隔の細密化による高精度化

磁気目盛りの間隔をさらに密にすれば測長を高精度化できることはレーザ法でも確認されている。そこで $\pm 12.5 \mu\text{m}$ の検出精度を目標として、マルテンサイト組織のピッチ間隔 P を 2 mm から $400 \mu\text{m}$ 、その幅間隔 w を $200 \mu\text{m}$ で付与する加工法を試みた。微小領域の加工誘起変態幅はオーステナイト結晶粒に影響されることが考えられ、SUS304 Modified を固溶化熱処理により粒径を $500 \mu\text{m}$ から $60 \mu\text{m}$ に調整し、回転加工を施した。その後、 $400 \mu\text{m}$ ピッチ用磁気センサによってマルテンサイトとオーステナイトの磁性差をサイン波形の磁気特性として出力した。各結晶粒径どちらも出力が最大となるローラダイスの押し込み深さは 0.1 mm 、荷重は 40 N であった。回転加工を施した試験片の断面を鏡面になるまで研磨してその上に磁性微粒子を含む液体を塗布して磁性分布を測定した。磁性微粒子は圧痕直下のマルテンサイト上に集まるため、高い輝度を放つ。これによってマルテンサイトに変態した領域が観察される。供試材粒径 $500 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m}$ の磁気記録棒に加工を施した後、切断面に磁性粒子を塗布した組織写真を Fig. 13 に示す。粒径 $500 \mu\text{m}$ ではマルテンサイト領域にばらつきが大きく幅方向に広がっているが、 $60 \mu\text{m}$ ではその広がりが少なく適度の領域がマルテンサイト化している状況が観察される。

Fig. 13 Microscope photograph of martensite phase by fine magnetic powder

Fig. 14 に平滑化する前のそれぞれの出力波形を比較したチャートを示す。結晶粒が大きいとマルテンサイト組織にばらつきが生じ、波形も変動しやすい。結晶粒が小さいと波形は一定の出力を示していることが観察される。表面平滑後の $400 \mu\text{m}$ ピッチ磁気スケールの位置検出精度は粒径 $60 \mu\text{m}$ 以下において $\pm 12.5 \mu\text{m}$ になることが確認された。

Fig. 14 Comparison of sensor output between coarse grain and fine grain in SUS304 Modified (roller dies $R = 100 \mu\text{m}$, 40 N)

5. 炭素鋼による磁気記録の可能性

今まで用いられた材料は常温で変態を起こしやすいように特別に成分を調整された特殊ステンレス鋼であった。

そこで、本報では容易で安価に入手しやすい炭素鋼 (S45C, SCM415) により、磁気目盛りロッドが可能性を検討するため、オーステナイト組織を作り出すために浸炭焼入れによる残留オーステナイトがひずみ誘起変態によりマルテンサイトに変化できないかを試みた。まず Fig. 15 の楕円領域に示すように、 $\phi 20 \times 100 \text{ mm}$ の炭素鋼に銅メッキによりマスキングしたロッド形状の鋼材に浸炭処理し、焼入れを施した。メッキ部は浸炭の影響を受けず、焼入れによりマルテンサイト (強磁性) が生成するが、非メッキ部は浸炭によりオーステナイト (非磁性) となり、両者間で磁性差ができる。これを利用して磁気目盛りを作成し、磁気センサで波形を検出した。炭素鋼を焼入れによりマルテンサイト変態させるさい、炭素含有量が多いと非磁性であるオーステナイトが多く残留する。浸炭条件は、炭素濃度 1.5% で、浸炭有効深さ 2 mm とした。また、焼入れは 900°C 油焼入れとし、オーステナイトを残留させるため焼戻しを行わない。作成した磁気スケールを評価するためにピッチ 2 mm の実験用磁気センサで出力波形測定した。

Fig. 15 Masking method by copper coating

Fig. 16 の楕円領域に示すように磁性差を 2 mm ピッチで並べ、磁気スケールとしての機能を測定した。S45C では出力波形が弱く、ほとんど磁性差が生じていなかった。一方 SCM415 では一定の出力波形を得ることができた。これは、SCM415 の焼入れ性が高く、浸炭されやすいため表層から深くオーステナイトが残留し、これによって磁性差が拡大され、出力波形が得られたと考えられる。

Fig. 16 Comparison of sensor output between plain carbon steel and low alloy steel

また、Fig. 17 の楕円領域に示すように浸炭部分の横幅はほぼ 1 mm で、左右の銅メッキをした部分に浸透しておらず、浸炭部はビッカース硬さ分布で 500~600 HV ほどに低下する。S45C に比べ、SCM415 では表層から深い部位まで硬さが低下しており、オーステナイトの残留が観察される。これは、SCM415 の焼入れ性が高く浸炭されやすいためである^{12)~14)}。ただし、磁気目盛り棒鋼の可能性が SCM415 においても見出されたが、検出力に一部ばらつきが観察される。安定した出力を得るためには、マスキングの精度、浸炭熱処理方法にさらなる改善が必要である。

Fig. 17 Distribution of austenite phase and martensite phase estimated by hardness test

6. 結 言

次世代型磁気目盛り棒として新たに、量産に適した塑性加工で磁気目盛りを製作する方法を考案した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 常温でひずみ誘起変態しやすい SUS304 Modify (18%Cr-7%Ni が基本成分)により、従来のレーザー法に比較し、生産性が格段に向上する塑性加工によるオーステナイト（非磁性）、マルテンサイト（強磁性）からなる磁気目盛りを開発した。
- (2) 回転加工による局部加工を施した後、切削・平滑化することで、安定したセンサ波形が得られた。目盛りピッチ $P=2$ mm, 目盛り深さ $t=0.2$ mm, ローラ角度 $\theta=45^\circ$ とするとレーザー加工と同等な ± 0.1 mm の位置検出精度を実現した。
- (3) さらに、磁気記録間隔を細かくし 400 μ m ピッチ磁気スケールの位置検出精度はオーステナイト粒径 60 μ m 以下において ± 12.5 μ m になることが確認された。
- (4) 銅メッキによりマスキングしたロッド形状の SCM415 に浸炭濃度 1.5%, 浸炭有効深さ 2 mm という過剰浸炭を施した焼入れ法により、特殊ステンレス鋼に代わる合金鋼による磁気目盛棒鋼の可能性を見いだした。
- (5) これらの磁気目盛りは金属の変態を利用しているため、経年変化にも充分耐えられる。

参 考 文 献

- 1) 浅川基男・須藤忠三・高祖正志・塚本孝：塑性と加工, **30**-347, (1989), 1593-1599.
- 2) Tsukamoto, T., Asakawa, M., Sudo, C. & Kouso, M.: Wire J. Int., (1992), 143-147.
- 3) 塚本孝・浅川基男・須藤忠三・高祖正志・中里雅一：まてりあ, **33**-4(1994), 435-437.
- 4) 浅川基男・堀口宗之・佐々木計人・加藤幸央・上村寛・山鹿純一：第 50 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1999), 421-422.
- 5) 浅川基男・堀口宗之・佐々木計人・加藤幸央・上村寛・山鹿純一：第 50 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1999), 423-424.
- 6) 浅川基男, 上村寛：第 192 回塑性加工シンポジウムテキスト, (2000), 33-40.
- 7) 上村寛・山鹿純一・佐々木計人・加藤幸央・浅川基男：平成 12 年度秋季フィールドパワーシステム講演会講演論文集, (2000), 108-110.
- 8) 上村寛・山鹿純一・佐々木計人・加藤幸英・浅川基男：日本機械学会・第 8 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2000), 371-372.
- 9) 上村寛・山鹿純一・浅川基男：CAMP-ISIJ, **14**(2001), 428.
- 10) 上村寛・田村隆・浜田敏雄・浅川基男, CAMP-ISIJ, **14**(2001), 429.
- 11) 浜田敏雄・浅川基男・上村寛：第 54 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2003), 465-466.
- 12) 上田晴久・浅川基男・浜田敏雄・京橋永興：日本機械学会・第 11 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2003), 267-268.
- 13) 保谷暢男・浅川基男・上田晴久：JSME annual meeting 2005(1), 641-642.
- 14) Asakawa, M., Uemura, H., Hamada, H., Yamaga, J., Sasaki, K., Katou, Y. & Tamura, T.: 3rd Conference in Material Processing Technology, (2006), 6-11.