

渦電流形変位センサの出力のターゲット表面状態の物性の影響

旭 尊史, 榎木 茂実

Influence of Target Surface Condition for the Output of Eddy Current Displacement Sensor

T. Asahi, S. Enoki

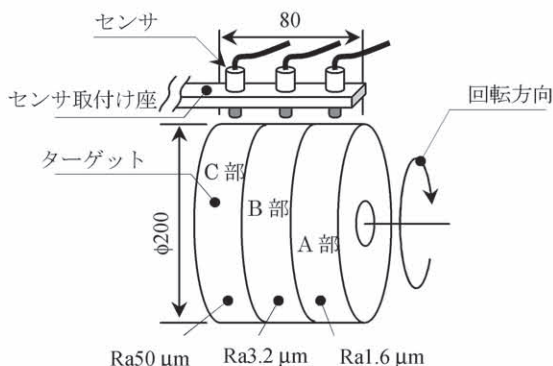
1. はじめに

渦電流形変位センサはセンサコイルに高周波電流を与えることにより、被測定物表面(導電体)に渦電流を発生させ、その近接効果によるコイルのインピーダンス変化を利用してセンサと被測定物表面間の距離を非接触で測定可能な変位センサである。従って、被測定物とセンサとの変位が一定であっても、渦電流の発生に影響を及ぼす被測定物表面の電気的物性(比透磁率や導電率など)が変化した場合センサの出力電圧も変動し見かけ上の変位が変化する。この現象はエレクトリカルランナウト(Electrical Run Out; ERO)と呼ばれている。本論文では表面粗さの異なる被測定物を製作し、表面状態における残留磁束密度、透磁率および残留応力と渦電流形変位センサ出力との相関について述べる。

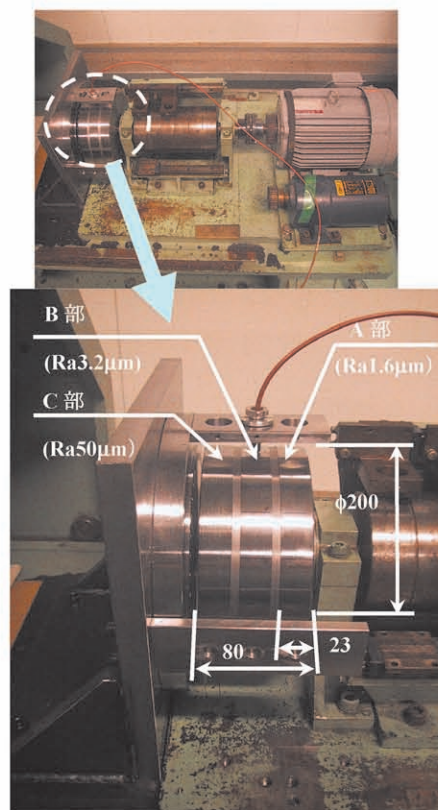
2. 被測定物

2.1 表面粗さ

製作した被測定物(以下、ターゲットと称す。)を図1に示した。材質はJIS SCM440で、素材を加工したのみを初期状態としており、熱処理等は施されていない。



測定表面状態として3種の表面粗さ(A部:Ra1.6 μm, B部: Ra3.2 μm, C部: Ra50 μm)となるよう機械加工した。ここでのRaとは、JIS B 0031で定義されている算術平均粗さである^[1]。また、このターゲットは、図2に示したように回転試験機に取付け試験した。



2.2 ターゲット取付け状態の確認

ターゲット表面の電気的物性値が変化することでセンサの出力電圧が変動し、見かけ上の変位が変化するEROに対して、ターゲットの取付け状態および偏心等により機械的な位置が変化することでセンサ出力が変動する。この現象はメカニカルランナウト(Mechanical Run Out; MRO)と呼ばれている。

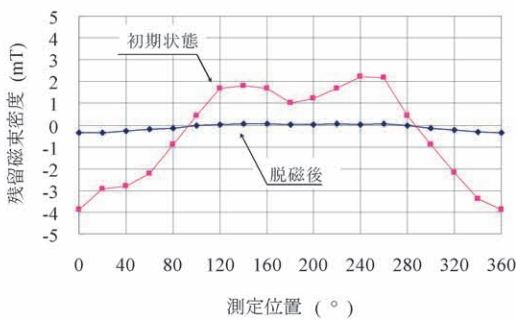
A, B及びC部のMROをダイヤルゲージにて確

認した。A 部および B 部は $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内、C 部は $\pm 20 \mu\text{m}$ 以内であった。C 部については他の測定位置と比較して MRO が大きな値を示していた。これは表面粗さを $Ra 50 \mu\text{m}$ とするために、スパイラル状に加工された表面の凹凸の差が大きい。それにより、ダイヤルゲージの測定子が影響を受けているためである。このターゲットにはほとんど偏心が無いことが確認された。

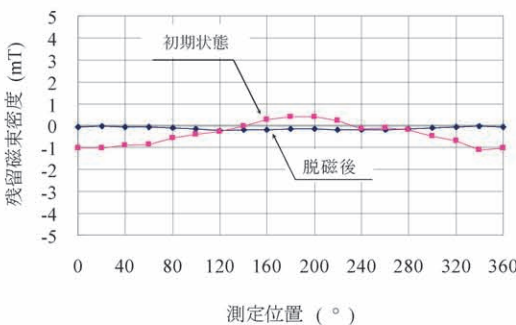
3. 磁気特性

3.1 残留磁束密度と出力電圧の関係

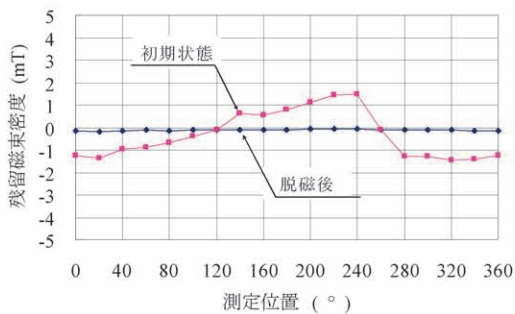
ターゲット表面の残留磁束密度と渦電流形変位センサの出力電圧との関係を知る目的で、脱磁前後における残留磁束密度について、ガウスメータを用いて測定した。実測結果を図 3 に示した。脱磁は、電子磁気工業製 交流脱磁装置により行った。



(a) A 部の残留磁束密度実測結果



(b) B 部の残留磁束密度実測結果

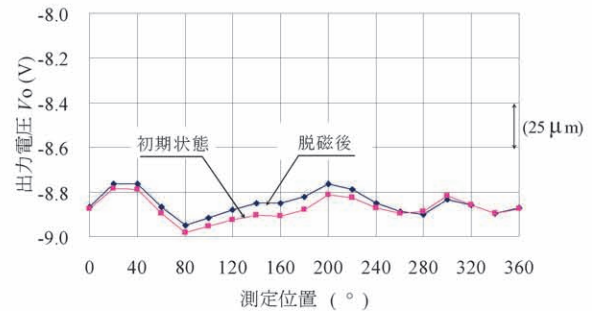


(c) C 部の残留磁束密度実測結果

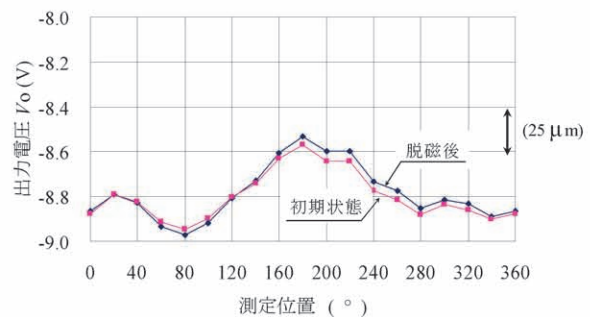
図 3 ターゲットの残留磁束密度実測結果

A, B 及び C 部において、初期状態は各々 $4 \sim +2.5 \text{ mT}$, $\pm 1 \text{ mT}$, $\pm 2 \text{ mT}$ 程度の結果を得た。脱磁後はどの測定部においても $\pm 0.2 \text{ mT}$ 以内の値を示した。($0.1 \text{ mT} = 1 \text{ gauss}$)

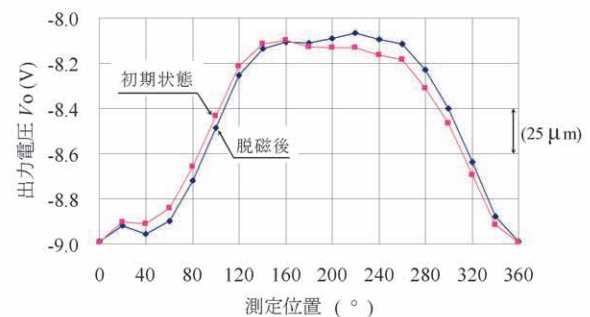
図 4 には、脱磁前後での渦電流形変位センサの出力電圧を示した。



(a) A 部の出力電圧(VK-202A, $0.8 \text{ V}/100 \mu\text{m}$)



(b) B 部の出力電圧(VK-202A, $0.8 \text{ V}/100 \mu\text{m}$)



(c) C 部の出力電圧(VK-202A, $0.8 \text{ V}/100 \mu\text{m}$)

図 4 渦電流形変位センサの出力電圧測定結果

各部とも脱磁後の出力変動幅は、初期状態と比べて大きくなる傾向にあり、この差が残留磁束密度の影響とも予想される。脱磁前後の出力変化とそれから換算した変位変化分は、A 部は約 0.04 V ($5 \mu\text{m}$ 相当)、B 部は約 0.10 V ($12 \mu\text{m}$ 相当)、及び C 部は約 0.01 V ($1 \mu\text{m}$ 相当) の出力変化が確認された。

脱磁により、残留磁束密度は大きな変化をみせたが、渦電流形変位センサの出力電圧はほとんど変化

を示さなかった。残留磁束密度と出力電圧は、初期状態ではB、C部において相関を示唆するデータであったが、A部において脱磁前後の出力波形に大きな差異がなく際立った出力電圧変化が無かった事実より、相関は小さいとの結果を得た。

3.2 ターゲットの簡易比透磁率測定

透磁率の変化に対する渦電流形変位センサの出力への影響については水野等により有用なFEM解析結果が示された^[2]。本論文では、透磁率を実測し、出力電圧と比較検討した。透磁率の相対測定器として豊田中央研究所製高透磁率計^[3]を利用し、ターゲット表面の比透磁率を測定した。測定時の概略を図5に示した。脱磁後の比透磁率の実測結果を図6に示した。A、B及びC部の各測定部において、各々、比透磁率は約120で一定、110～130、及び120～190の結果を得た。表面粗さが小さいほど、比透磁率のばらつきが小さい結果となった。各測定点における比透磁率の値と出力値との相関係数： γ は0.93を示し、図4の出力電圧の傾向と非常によく一致した。相関図を図7に示した。

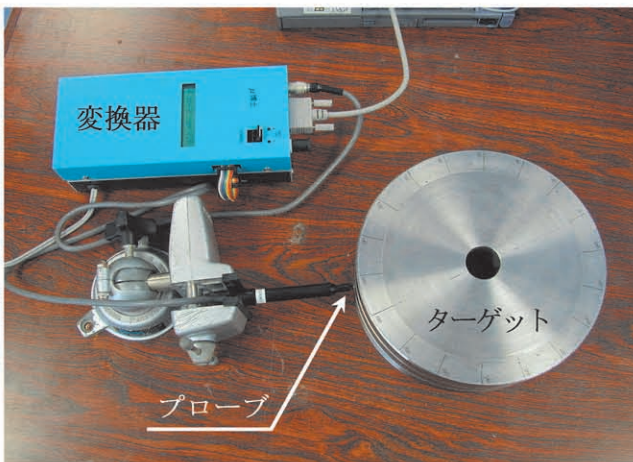


図5 簡易比透磁率測定の概略

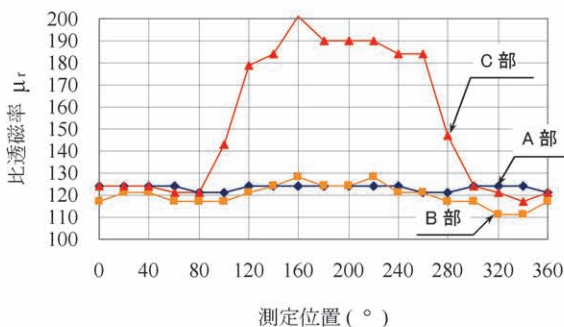


図6 ターゲットの比透磁率の測定結果

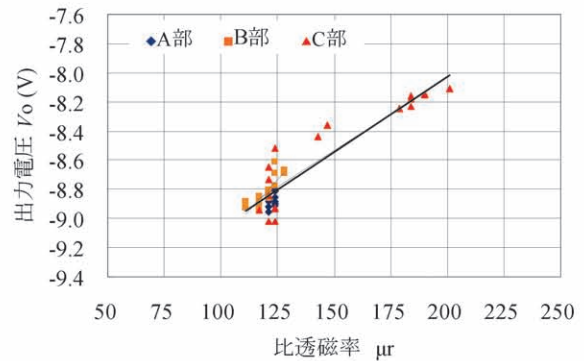


図7 比透磁率と出力電圧との相関図
(相関係数： $\gamma=0.93$)

4. X線残留応力測定

4.1 X線残留応力測定

X線応力測定装置により、ターゲットの表面のA、B及びC部の各測定部において、40度毎に9点の残留応力を測定した。残留応力の測定方向は円周方向とした。測定時の概略を図8に示した。

脱磁後の残留応力の測定結果を図9に示した。A、B及びC部の各測定部において、各々残留応力は約160～260 MPa、190～310 MPa及び330～490 MPaの結果を得た。

表面粗さが小さいほど、残留応力のばらつきが小さい結果となった。各測定点における残留応力値と出力値の相関係数： γ は0.82を示した。相関図を図10に示した。

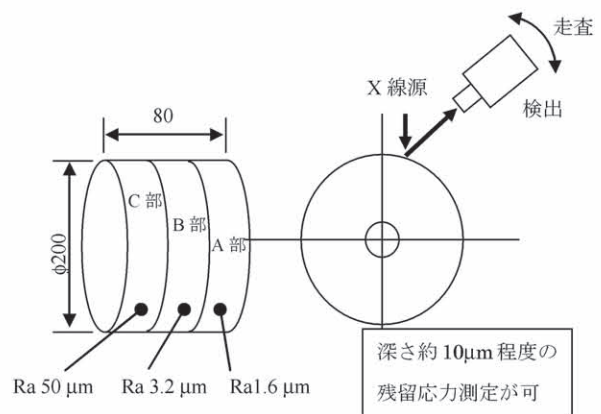


図8 X線残留応力測定概略 (単位: mm)
(理学電機株式会社, MSF-2M, 並傾法, Ψ_0 一定法)

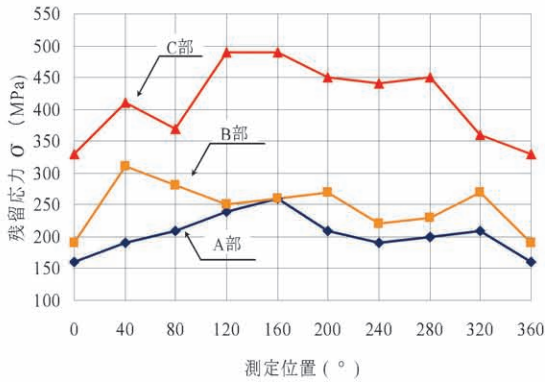


図9 ターゲットの残留応力実測結果
(理学電機株式会社, MSF-2M)

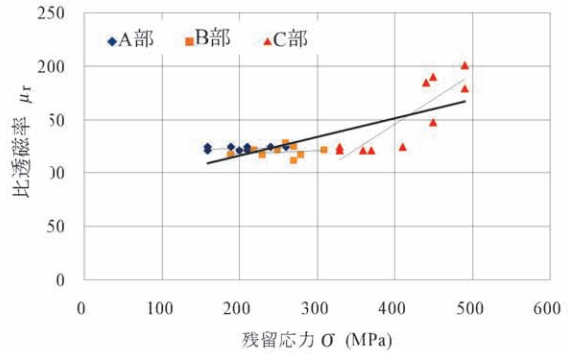


図11 残留応力と比透磁率との相関図
(相関係数: $\gamma = 0.76$)

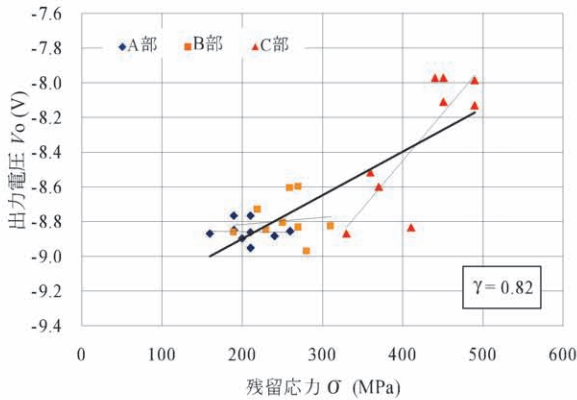


図10 残留応力と出力電圧との相関図
(相関係数: $\gamma = 0.82$)

4.2 考察

A, B 及び C 部の各測定部において、残留応力値と出力値の相関係数は 0.82 を示した。

ターゲット表面の残留応力は、渦電流形変位センサの出力電圧に影響を与える要素であることが確認できた。また、鋼材などの磁性材料の透磁率は応力により変化することが知られている^[4]。得られた残留応力(図9)と3.2で記した高透磁率計によって測定した比透磁率(図6)との相関係数: γ は 0.76 を示した。相関図を図11に示した。

残留応力が約 300 MPa 以下になると、比透磁率はほぼ一定になる傾向であった。ターゲットの比透磁率は、渦電流形変位センサの出力電圧に大きく影響を与える要素である。比透磁率がほぼ一定となる傾向と共に、渦電流形変位センサの出力電圧のばらつきも小さくなったものと考えられる。

図10より残留応力が約 400 MPa 以下になると、残留応力と渦電流形変位センサの出力電圧の相関は小さくなり、また、渦電流形変位センサの出力電圧のばらつきが小さくなる傾向であることが分かった。即ち、残留応力のばらつき(σ_{p-p})が小さいほど、出力電圧の変化量($V_{o,p-p}$)が小さいことが読み取れた。図12に残留応力のばらつき(σ_{p-p})と出力電圧の変化量($V_{o,p-p}$)の関係を示した。なお、図12中には別途製作した、表面粗さ $Ra = 0.4 \mu m$ のターゲットに対してのデータ(図12中のD部: 表面の残留応力は 315 ± 15 MPa)も示した。残留応力のばらつきと出力電圧の変化量は相関係数=0.96 となり強い相関を持つことが確認された。この事実から、渦電流形変位センサを相対変位センサとして使用する場合(振動測定等初期値からどれだけ移動したかを測定する場合)、EROの影響を除去するためには、ターゲットの表面粗さを小さくし、ターゲットの残留応力のばらつきを小さくすることが効果的である。

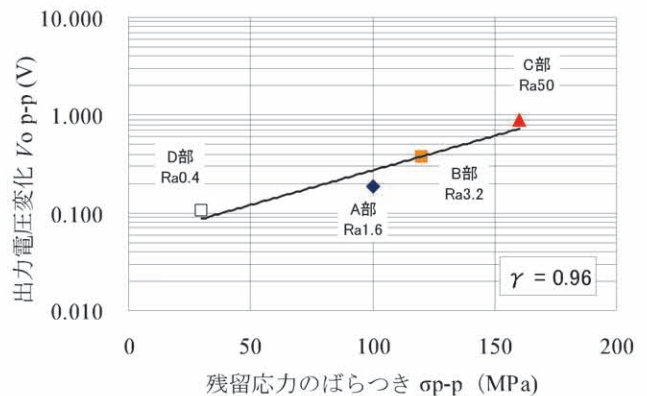


図12 残留応力のばらつき(σ_{p-p})と出力電圧の変化量($V_{o,p-p}$)の関係

5. まとめ

本報告書では、エレクトロカルランナウト(ERO)の研究の一環として、試作したターゲットの残留磁束密度の影響に関する実測結果を示した。また、簡易的な高透磁率計による比透磁率の測定結果及びX線残留応力測定装置による残留応力の測定結果と渦電流形変位センサの出力電圧とのそれぞれの相関に対して推定した。本報告書の内容を以下にまとめた。

(1) 残留磁束密度では、ターゲットの脱磁前後で、渦電流形変位センサの出力電圧はほとんど変化を示さず、相関は小さいとの結果を得た。

(2) 比透磁率では、製作したターゲットのA、B及びC部において高透磁率計により局所的な比透磁率を測定した。比透磁率は各々約120で一定、110～130、120～190の結果を得た。各測定位置における比透磁率の値と渦電流形変位センサの出力電圧との相関係数： γ は0.93を示し非常に強い相関を示した。

(3) 残留応力では、製作したターゲットのA、B及びC部においてX線応力測定装置により残留応力を測定した。残留応力は各々約160～260 MPa、190～310 MPa、330～490 MPaの結果を得た。各測定位置における残留応力値と渦電流形変位センサの出力電圧との相関係数： γ は0.82を示した。更に、残留応力と比透磁率との相関係数： γ は0.76を示した。

(4) 残留応力のばらつきと出力変化量では、残留応力のばらつきと出力電圧の変化量の相関係数： $\gamma=0.96$ となり、強い相関を示した。

本研究により、鋼材を渦電流形センサのターゲットとする場合において、EROはターゲット表面状態の物性として比透磁率、残留応力がセンサ出力に密接に影響することが分かった。さらに、渦電流形変位センサを相対変位センサとして使用する場合(振動測定等初期値からどれだけ移動したかを測定する場合)、EROの影響を小さくするためには、ターゲットの表面粗さを小さくし、ターゲットの残留応力のばらつきを小さくすることが効果的であることが確認できた。

謝 辞

本研究を推進するに当たり、元(株)日立製作所日立事業所 火力サービス部 伊藤 俊紀氏に多大の協力をいただき、感謝する次第である。また、元日立ハイテクノロジー(株) 竹下 邦夫 博士、元日立電子エンジニアリング(株) 岸本 哲 博士ならびに信州

大学 准教授 水野 勉 博士には、貴重な助言をいただき、感謝申し上げる次第である。

参考文献

- [1] JIS B 0031:03 製品の幾何特性(GPS)-表面性状の図示方法, 日本規格協会, 2005.
- [2] Mizuno T., Enoki S., Asahina T., Komeno F., Hayashi T., Yamada H., Maeda H., Asahi T., Shinagawa H., "Electrical Runout Estimation of an Eddy Current Displacement Sensor", Proceedings of SICE Annual Conference 2005, pp.3378-3381, 2005.
- [3] http://www.tytlabs.co.jp/japanese/tech/mat_myuhakase.pdf; 高透磁率計.
- [4] 安福 精一, "磁気異方性センサ", 磁気センサマニアル, トリケップス, pp.12-26-12-39, 1981.

著者略歴

旭 尊史(あさひ たかふみ)

1973年2月12日生まれ。1997年3月岡山理科大学大学院工学研究科修士課程修了。同年新川電機(株)に入社、2000年新川センサテクノロジー(株)に移籍入社、現在に至る。主に、渦電流形変位センサの応用製品開発に従事。

榎木 茂実(えのき しげみ)

1959年10月29日生まれ。1986年3月岡山理科大学大学院理学修士課程修了。同年新川電機(株)に入社、2000年新川センサテクノロジー(株)に移籍入社、現在に至る。主に、変位センサの開発に従事。博士(工学)。電気学会、日本磁気学会会員。