

# 研削焼けの非破壊検出技術の開発

## Development of Non-destructive Grinding Burn Detection Technology

伊藤 亮 R. ITO 東 孝幸 T. AZUMA

Nitric acid etching, which is the conventional method used in manufacturing plants to detect grinding burn, has a number of problems, described as follows: (1) detection level varies depending on the operator and the equipment used; (2) the tested pieces must be scrapped as it is a destructive inspection; and (3) outflow of defective products cannot be prevented perfectly as 100% inspection cannot be carried out. This study was performed to develop a non-destructive inspection system to detect grinding burn, which can be used to perform quantitative 100% inspection within a production line. For this inspection, an eddy current sensor is selected because of its short measurement time and low cost. In this paper, a new method that simultaneously measures eddy currents of two different frequencies is proposed. This method reduces the misdetection of grinding burn by eliminating the effect of variance in base material. Furthermore, a Grinding Burn Detection System has been prototyped, and it has been confirmed that quantitative inspection is indeed possible.

**Key Words:** grinding burn, non-destructive inspection, eddy current, retained austenite, magnetic permeability

### 1. はじめに

研削加工を行う際に生じる問題の一つとして、研削焼けが挙げられる。研削焼けは、広義では研削加工に起因する被削材表面の変色や変質を指すが、本研究ではその中でも研削熱による金属組織の変化（軟化・再硬化）に着目した。これらは部品の疲労強度に多大な影響を及ぼす。研削焼けの検査法として、従来生産現場で行われている硝酸腐食法には、検出レベルが人や設備環境により異なることや、破壊検査であるため全数検査が行えないことなどの問題点がある。このため、作業者の熟練度に関係なく、非破壊で全数定量的な検査が可能な研削焼け検出システムの開発が切望されている。研削焼けを検査できる非破壊検査手段はいくつか挙げられる<sup>1-4)</sup>が、生産ラインでの全数検査実施を考えた場合、検出感度に加え測定時間や装置コストも重要な要素となる。そこで、本研究では渦電流による方法が有望であると判断し、渦電流センサを用いた研削焼け検出システムの開発を行った。

### 2. 検出原理

図1<sup>5)</sup>に、研削焼けの程度が異なる2種類の試験体(材質: SUJ2)の断面写真と硬度を示す。色が濃く変色している部分は研削熱によって材料が軟化した部分(以下、軟化層)に相当する。研削焼けの程度が大きい場合では軟化層に加え、最表層に再硬化層(白層)が生じることがある。この部分は軟化層と比較し硬度が高くなるが非常に脆いため、軟化層・再硬化層ともに部品の疲労強度低下の原因となる。試験体の金属組織には、マルテンサイトの他に焼入れ・焼戻し後に変態しなかったオーステナイト(残留オーステナイト)が含まれている。図2<sup>5)</sup>は、3種類の試験体(材質: SUJ2)について、残留オーステナイト量(以下、残留 $\gamma$ 量)を測定した結果を示している。研削焼けがない場合は表面から深さ方向に残留 $\gamma$ 量が変化しないのに対し、軟化層では残留 $\gamma$ 量が減少し、再硬化層では残留 $\gamma$ 量は高くなることが分かる。このように、残留 $\gamma$ 量を測定することで軟化層の検出が可能である。なお、残留オーステナイトは非磁性体の組織<sup>6)</sup>であり、透磁率が他の組織と異なる。

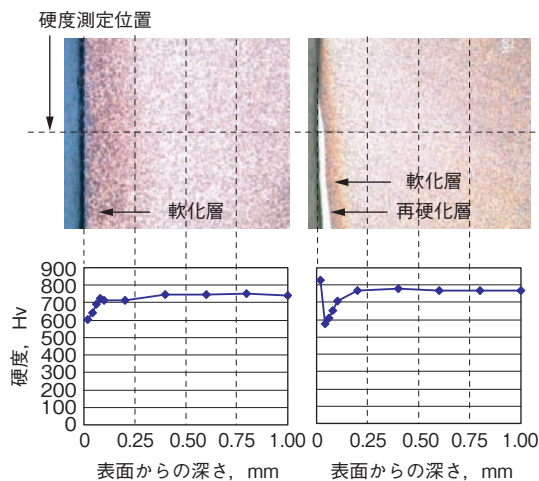


図1 研削焼けが発生した試験体の断面と硬度<sup>5)</sup>  
Etched cross section of test pieces and hardness

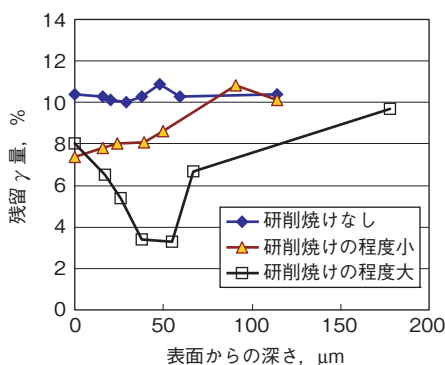


図2 表面からの深さと残留γ量<sup>5)</sup>  
Retained austenite content versus depth from top surface

渦電流センサは電磁誘導によって導体に渦電流を発生させ、渦電流が作る磁界をコイルのインピーダンスの変化として検出するセンサであり、研削焼けが生じている部分と生じていない部分の透磁率が異なることによって渦電流の流れが変化するため、研削焼けの検出が可能になる。図3に、本研究で用いる渦電流センサの概略図を示す。図3に示すように、励磁兼検出コイル、キャリブレーション用コイル、および二つの可変抵抗からなるブリッジ回路となっている。出力は、端子 ab 間の電位差  $V$  である。実際の測定では、マスターワークを用意し、その測定値を基準として、試験体の測定値と比較してどの程度差があるのかをみる。励磁兼検出コイルのインピーダンスについて、何も測定していない（試験体がセンサから十分に離れている）場合は  $Z_s$ 、マスターワーク測定時は  $Z_s + \Delta Z_{sm}$ 、試験体測定時は  $Z_s + \Delta Z_{sw}$  とおき、さらにマスターワーク測定時の端子 ab 間の出力を  $V_m$ 、検査対象のワーク測定時の端子 ab 間出力を  $V_w$  とおいたとき、渦電流出力  $V_{current}$  は次のように定義される。

$$V_{current} = V_m - V_w$$

$$= \frac{(\Delta Z_{sm} - \Delta Z_{sw}) Z_c}{(Z_s + \Delta Z_{sm} + Z_c)(Z_s + \Delta Z_{sw} + Z_c)} E \quad (1)$$

ここで、 $E$  は電源電圧、 $Z_c$  はキャリブレーション用コイルのインピーダンスである。また、渦電流センサは、励磁周波数によって浸透深さ（渦電流が表面の約 37% となる深さ）が変化するという特徴がある。浸透深さ  $\delta$  は次式で表される。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2)$$

ここで、 $f$  は励磁周波数、 $\mu$  は透磁率、 $\sigma$  は導電率である。したがって、検出したい欠陥の表面からの深さに合わせて励磁周波数を設定することで、より高精度な検出を行うことができる。

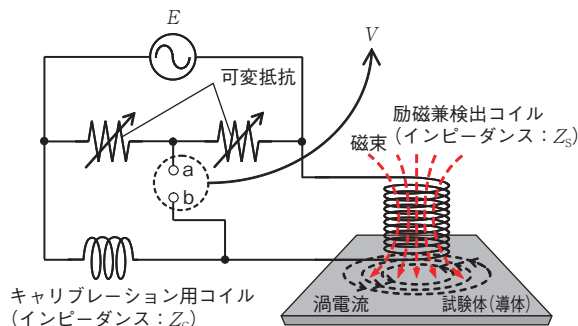


図3 渦電流センサの概略図  
A simplified diagram of the eddy current sensor system

### 3. 母材のばらつきとマルチ周波数測定法

図4は、製造ロットが異なる三つの玉軸受の外輪の渦電流出力の測定結果を示している。図4の左側に示すように、玉軸受外輪を回転させながら外周面の渦電流出力を測定した。試験体①および②は研削焼けがないもの、試験体③は外周面加工時に意図的に加工条件を変えて研削焼けを発生させたものである。研削焼けのない試験体②と研削焼けのある試験体③は、渦電流出力の差がほとんどなく、研削焼けの有無を判別することが困難であることが分かる。これは、母材の残留γ量にばらつきがあるためであり、研削焼けを検出するためには、残留γ量の絶対値ではなく、減少量（母材の残留γ量と軟化層の残留γ量の差）を検出する必要があるといえる。よって、本研究では図5<sup>5)</sup>に示すように、母材の残留γ量のばらつきの影響を抑制するため、より浸透深さが深い、低い励磁周波数での測定を、研削焼けを検出するための高

い励磁周波数での測定と同時に行い、二つの励磁周波数の結果の相関から研削焼けを判断する方法を考案した。低い励磁周波数での渦流出力と高い励磁周波数での渦流出力の差が大きいときに研削焼けがあり、差が小さいときは研削焼けがなしと判断される。渦流出力が母材の影響を受けるために十分に低い励磁周波数として、0.5kHzを選定した。高い励磁周波数としては、再硬化層が生じた場合でも軟化層の検出が可能であることを考慮し、250kHzを選定した。図6は、二つの周波数での渦流出力の同時測定法（マルチ周波数測定法）の一例として、図4と同一の試験体を測定した結果を示している。

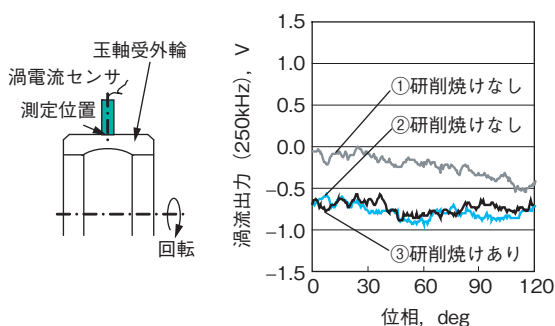


図4 材料のばらつきの影響<sup>5)</sup>  
Influence of dispersion of material properties

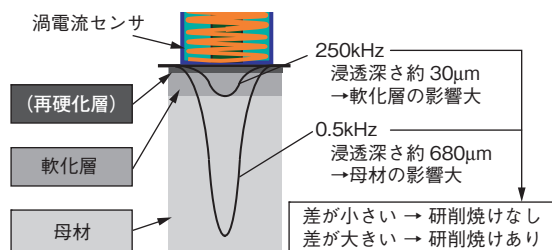


図5 マルチ周波数測定法の模式図<sup>5)</sup>  
Schematic view of multi frequency measurement

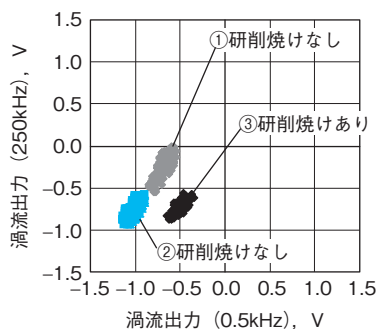


図6 マルチ周波数測定法による測定結果<sup>5)</sup>  
Results by multi frequency measurement

研削焼けがある場合、250kHzの渦流出力が0.5kHzの渦流出力より負に大きくなるため、図6のように信号が右下に出る。これによって、図4では検出できなかった研削焼けが検出可能になったことが分かる。

#### 4. 温度ドリフトの抑制

渦電流センサの温度ドリフトを抑制するため、本研究では図7に示すような位相の調整を行っている<sup>7)</sup>。渦電流センサの出力  $V$  はベクトル量であり、図7のように複素平面上に表すことができる。縦軸は  $V$  の虚数成分 ( $\text{Im} [V]$ )、横軸は  $V$  の実数成分 ( $\text{Re} [V]$ ) である。ここでは試験体の温度の影響により励磁兼検出コイルとキャリブレーション用コイルに温度差が生じた場合を想定している。ここで、 $V_m$  はマスターワーク、 $V_{w-S}$  は研削焼けの程度が小さい試験体、 $V_{w-L}$  は研削焼けの程度が大きい試験体をそれぞれ測定した際の信号を示している。図7の左側に示すように、複素平面上の  $V$  の動きに関して、温度変動によるものと研削焼けによるものは動き方が異なる。ここで、温度変動による複素平面上の動きが直線的であることから、一例として図7の右側に示すように、温度変動による信号の動きが横軸と平行になるように位相を回転させ、虚数成分 ( $\text{Im} [V]$ ) のみを有効な出力とすることにより、温度変動による渦電流センサの出力への影響を抑制することができる。なお、温度変動に対する渦電流センサの出力の複素平面上の動きは、センサ仕様、励磁周波数、試験体の材質などによって異なる。よって、位相調整の際に回転させる角度  $\Delta\theta$  は実験的に求める必要がある。

以上、本章で示した試験体の温度変動による外乱の抑制方法と、第3章で述べた母材の組織のばらつきの影響を抑制するためのマルチ周波数測定法より、本研究では、研削焼けを検出するために用いるパラメータとして、次式に示される渦流出力差  $V_d$  を用いる。

$$V_d = \text{Im} [V_{\text{current}} (f = 250\text{kHz}, \Delta\theta = \Delta\theta_{250})] - \text{Im} [V_{\text{current}} (f = 0.5\text{kHz}, \Delta\theta = \Delta\theta_{0.5})] \quad (3)$$

ここで、 $V_{\text{current}}$  は式(1)で表される渦流出力、 $f$  は励磁周波数、 $\Delta\theta$  は位相の回転角度、 $\Delta\theta_{250}$ 、 $\Delta\theta_{0.5}$  はセンサの仕様に合わせて実験的に求める定数である。

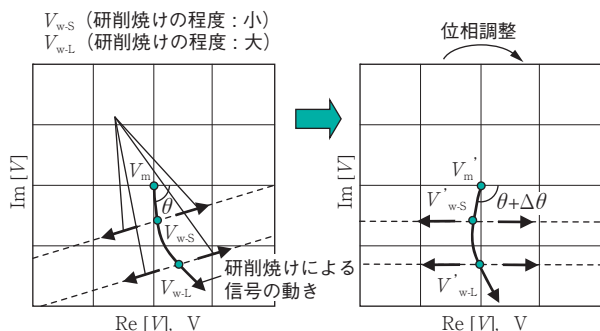


図7 温度ドリフトの抑制  
Prevention of thermal drift

## 5. 研削焼け検出装置の試作

### 5.1 装置概要

前述の研削焼け検出技術を適用した装置を試作した。図8に本装置の概略図を示す。本装置は、渦電流センサ、励磁・検出装置、駆動装置、データ処理装置より構成される。渦電流センサは、先端部をL字型形状とし、センサを保持する測定治具の予圧機構によりセンサと試験体との間にギャップの変化が生じないように、常に一定の力で押し付ける構成となっている。

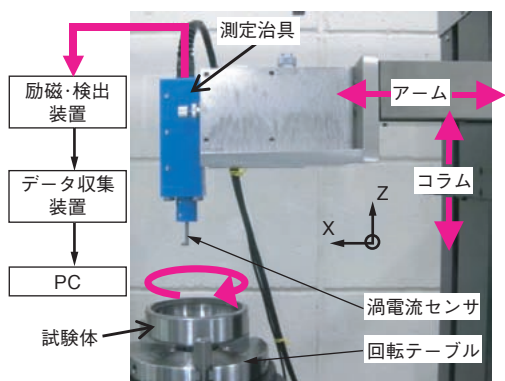


図8 研削焼け検出装置概略図<sup>7)</sup>  
Schematic of grinding burn detection device

### 5.2 実施例

試作した研削焼け検出装置による、研削焼け検出の実施例を図9および図10に示す。図9は、研削加工時に研削焼けが生じた円筒形状の試験体（材質：SUJ2）の外周面を、硝酸腐食法（上段）と本装置による方法（下段）でそれぞれ検出した結果を示したものである。なお、本装置による測定結果では、渦電流出力差  $V_d$  の値が負に大きいほど黒色であり、研削焼けのある部分は黒色に表示される。図9より、本装置では、硝酸腐食法で研削焼

けが検出された箇所（試験体の位相  $0^\circ \sim 90^\circ$  および  $180^\circ \sim 270^\circ$  にかけて）の他に、図中のA部やB部のように、硝酸腐食法では検出できない微小な金属組織の変化についても検出できていることが分かる。よって、渦電流センサを用いることで硝酸腐食法よりも高感度に研削焼け検出が行えるといえる。なお、硝酸腐食法による結果と本装置による結果の比較により、以後の実施例では  $V_d = -0.5V$  を研削焼け有無のいき値に設定した。

図10は、研削加工後の玉軸受外輪（材質：SUJ2）軌道面の研削焼け有無を評価した結果を示したものである。ここで評価した測定対象物は、生産工場流動品25個と意図的に研削焼けが発生しやすい加工条件で加工した試験品1個の計26個であり、測定前に脱磁処理を行ったものである。また、測定は、図10上に示すように渦電流センサを軌道面の底部に接触させ、測定対象物を回転させて1周走査して行った。なお、本装置は、工場内の室温管理されていない部屋に設置され、測定時に測定対象物の温度変化は最大  $3.9^\circ C$  であった。縦軸に励磁周波数  $250kHz$ 、横軸に励磁周波数  $0.5kHz$  の渦電流出力をとり、結果を図10の下側に示す。閾値として  $V_d = -0.5V$  を設定すると、測定値のプロットが図中の  $V_d = -0.5V$  の線の下側であれば研削焼けはあり、上側であれば研削焼けはなしと評価できる。図10より、今回測定した流動品からは研削焼けは検出されなかったが、意図的に加工条件を変えた試験品は研削焼けがありと評価された。また、流動品25個の渦電流センサの出力値には  $\pm 0.3V$  程度の出力ばらつきが生じたが、本装置による方法によって誤判定なく研削焼けを検出することができた。本試験（図10）では、温度による外乱影響の抑制をしている上、試験中の試験体の温度および室温の変化量は小さかったため、測定結果に含まれる温度による影響は十分に小さいと考えられる。

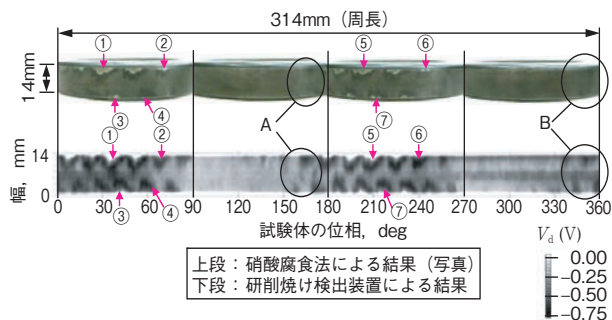


図9 試験体外周面の研削焼け検出結果<sup>7)</sup>  
Grinding burn detection in circumference of a workpiece

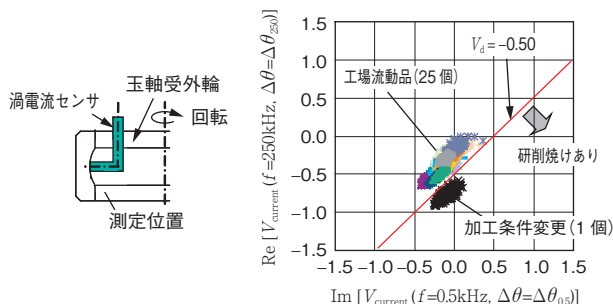


図10 玉軸受外輪軌道面の研削焼け検出結果<sup>7)</sup>

Grinding burn detection in raceway surface of outer race

## 6. おわりに

本研究では、非破壊で全数検査が可能な研削焼け検出技術として、渦電流センサを用いた研削焼け検出方法と装置を考案し、その検証を行った。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) 励磁周波数として、試験体の表層の状態を検出するための高周波と、母材の状態を検出するための低周波を設定し、これら2周波の測定値の差を比較することで母材の組織のばらつきの影響を抑制できる。
- (2) 温度変化による渦電流センサの出力の変化を把握し、渦電流センサの出力の位相を適切に調整し、実数成分または虚数成分のみを有効な出力とすることで、温度変化の影響を抑制できる。
- (3) 玉軸受の研削焼け検出試験において、本検出技術を適用することで、硝酸腐食法より高感度に、かつ定量的に研削焼けの検出を行うことができる。

## 参考文献

- 1) 伊藤勇一, 古屋泰文: バルクハウゼンノイズを用いた材料評価 その1-バルクハウゼンノイズ法の基礎-, 非破壊検査, vol. 45, no. 1(1996)3.
- 2) 日本非破壊検査協会編: 渦流探傷試験 I, 日本非破壊検査協会, (1995)17.
- 3) 下田秀夫: X線応力測定におよぼす加工変質層の影響, 非破壊検査, vol. 10, no. 5(1961)239.
- 4) 仙波卓弥, 谷 泰弘, 佐藤壽芳: 超音波顕微鏡による加工変質層の定量評価, 生産研究, vol. 39, no. 4(1987)145.
- 5) 伊藤 亮, 東 孝幸, 相馬伸司, 村上慎二, 厨川常元: 研削焼けの非破壊検出技術の開発-第1報: 渦電流センサによる研削焼け検出方法-, 砥粒加工学会誌, vol. 56, no. 8(2012)533.

- 6) 三上美和吉: 焼入鋼中の残留オーステナイト量の磁気的研究, 機械学会誌, vol. 37, no. 204(1934)217.
- 7) 伊藤 亮, 東 孝幸, 相馬伸司, 村上慎二, 厨川常元: 研削焼けの非破壊検出技術の開発-第2報: 渦電流センサの外乱抑制-, 砥粒加工学会誌, vol. 56, no. 10(2012)677.

## 筆者



伊藤 亮\*  
R. ITO



東 孝幸\*\*  
T. AZUMA

- \* 研究開発本部 先端基盤研究部 博士(工学)  
\*\* 研究開発本部 先端プロセス研究部