

# 微粒子ショットピーニング処理した鋼材表面の非破壊評価への 周波数掃引渦電流法の適用 —実証試験の結果—

機械・材料技術部 機械構造チーム 小島 隆  
 解析評価チーム 星川 潔  
 材料物性チーム 佐野 明彦

微粒子ショットピーニング処理した7種類の鋼材について周波数掃引渦電流法を実施し、残留圧縮応力が発生した表面層の深さを非破壊評価するのに有効な基礎データ ( $f-\Delta\theta$  線図) が得られるか否かを調べた。その結果、 $f-\Delta\theta$  線図の特徴は鋼材の熱処理によって大きく変化するが、いずれの場合も表面層の深さに対応した明確な極値を有しており、本方法が鋼種とその熱処理の広い範囲にわたって適用可能であることが確認できた。

キーワード：ショットピーニング，鋼材，残留圧縮応力，非破壊評価，渦電流

## 1 はじめに

微粒子ショットピーニングは、従来のショットピーニングに比べて被加工物表面の浅い領域（～数十 $\mu\text{m}$ ）に非常に大きな残留圧縮応力を導入できる。このため、被加工物の機械強度特性を大きく改善することが期待されるが、同時に、所定の残留圧縮応力を付与できたかどうかの検査がきわめて重要となっている。そこで、著者らは、鋼材表面に設置したコイルのインピーダンスの周波数応答特性を利用して、残留応力が発生した表面層の深さを非破壊評価する方法（周波数掃引渦電流法と称する）を研究してきた<sup>1)</sup>。本方法が有効であるか否かは、ショットピーニングがもたらす強加工に伴って材料の透磁率と抵抗率が如何に変化するかによるが、これを検討するためのデータや物性に関する知見は十分でない。よって、現段階では、鋼種ごとに実証的に調べなければならない。

本報では、本方法を微粒子ショットピーニング処理した数種類の鋼材の表面に応用した一連の実証試験の結果を述べ、さらに、その適用性が鋼種と鋼材の熱処理によって如何に変化するかを考察する。

## 2 周波数掃引渦電流法の原理

ショットピーニングによる残留圧縮応力は表面層の塑性変形（加工）に起因する。一方、鋼材が塑性変形すると、その電磁気特性（透磁率及び抵抗率）も変化する。本方法では、鋼材表面にコイルを配置し、この電磁気特性の変化がコイルのインピーダンスの周波数特性にもたらす変化を調べ、間接的に残留圧縮応力の分布する表面層の深さを評価する。具体的には、次式で定義する複素インピーダンスの偏角変化 $\Delta\theta$ の周波数特性 ( $f-\Delta\theta$  線図) を測定する。

$$\Delta\theta = \theta_{shot} - \theta_{non-shot} \quad \dots (1)$$

ここで、 $\theta_{non-shot}$ 、 $\theta_{shot}$  は、それぞれショットピーニング処理前後の複素インピーダンスの偏角である。 $f-\Delta\theta$  線図は極点を持ち、その位置をはじめ、曲線の特徴は表面層の電磁気特性と深さによって著しく変化する。鋼材を深さ $b$ の表面層を持つ二層の半無限体にモデル化（図1）して解析した結果から、以下の特徴が分かっている<sup>1)</sup>。

$f-\Delta\theta$  線図の形は、母材の値で規格化した表面層の透磁率 $\mu_1/\mu_2$ と抵抗率 $\rho_1/\rho_2$ の積 $C$ が1に対して大きいか、小さいかで特徴が大きく分かれる（図2）。すなわち、

$$C = (\mu_1/\mu_2) \cdot (\rho_1/\rho_2) > 1 \quad \dots (2)$$

が成り立つとき、上に凸となる。一方、

$$C = (\mu_1/\mu_2) \cdot (\rho_1/\rho_2) < 1 \quad \dots (3)$$

の場合は下に凸となる。そして、 $C$ が1に近づくと著しく小さくなり、 $C=1$ 、 $\mu_1=\mu_2$ 且つ $\rho_1=\rho_2$ であれば極値は完全に消失し、 $f-\Delta\theta$ 線図はベースライン ( $\Delta\theta=0$ ) と一致する。表面層の深さ $b$ が変化すると、 $f-\Delta\theta$ 線図の極値 $\theta_p$ とその周波数 $f_p$ が顕著に変化する。例えば、(2)式が成り立つ場合は、 $b$ の変化によって、 $f-\Delta\theta$ 線図は包絡線が上に凸の曲線群となる（図3）。

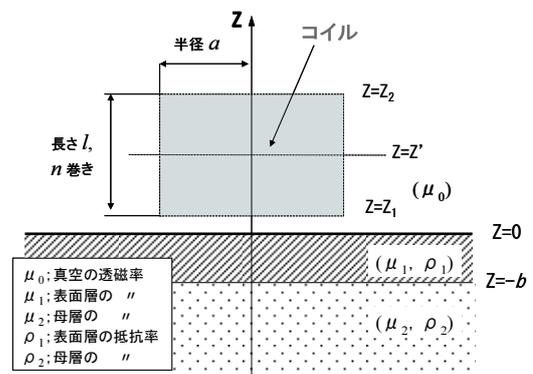


図1 解析モデル

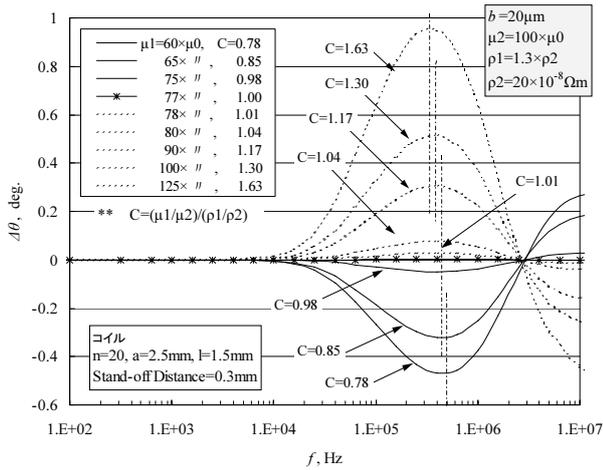


図2  $f-\Delta\theta$ 線図に及ぼす電磁気特性の影響

すなわち、積  $C$  が 1 から十分離れた値となる材料であれば、予め  $b$  が異なる一連の試料について  $\theta_p$  又は  $f_p$  を測定し  $b$  との関係を調べることが可能であり、それを校正曲線として検査対象試料の  $b$  の非破壊評価が可能となる。

### 3 実証試験の結果と考察

7 種類の鋼材（鋼種と熱処理は、図 4 中に示す）について噴射強度を変えた微粒子ショットピーニングを実施し、残留圧縮応力の発生状況が異なる試料をそれぞれ数種類準備した。これらについて  $f-\Delta\theta$  線図を測定し（用いた測定装置とコイルの詳細は前報<sup>1)</sup>を参照）、後に X 線を用いて測定した残留圧縮応力発生深さ  $b$  との関係を調べた。

その結果、いずれの鋼材でも  $b$  の変化に対応した曲線群が得られることを確認できた。また、曲線群は、試料の熱処理に対応して **A**~**D** の 4 グループに大別されることが分かった（図 4）。これについては以下のように理解できる。

熱処理によってショット前の試料の欠陥（転位、空孔等）密度は **D**~**A** の順に大きい。抵抗率はこの欠陥密度や熱処理組織に関係なく、加工（ショット）によって増加し  $\rho_1/\rho_2 > 1$  であると考えられるが、透磁率の変化はこれらの影響で著しく異なることが知られており<sup>2)</sup>、曲線群のグループ分けはこれを反映していると考えられる。即ち、加工前の欠陥密度が低い場合では、加工により透磁率が大きく減少するので  $\mu_1/\mu_2 \ll 1$  であり、曲線群 **A** は大きく下に凸となる。また、その減少量は欠陥の

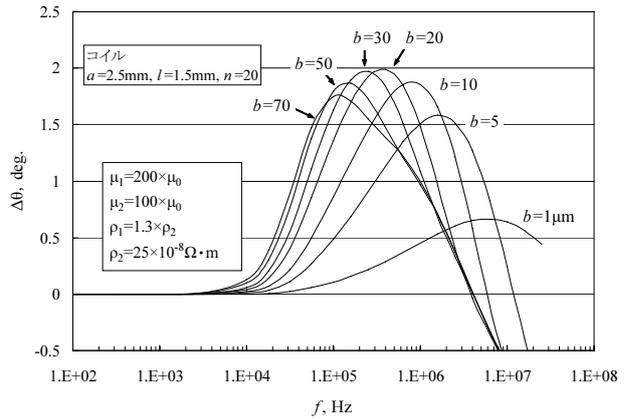


図3 表面層の深さが  $f-\Delta\theta$ 線図に及ぼす影響（(2)式が成り立つ場合）

増加で急激に小さくなるので、**B** では下に凸であるがそのピークは著しく低下する。一方、**C**、**D** では残留オーステナイトが加工によりマルテンサイト変態するので  $\mu_1/\mu_2 > 1$  であり曲線群は上に凸となるが、残留オーステナイト含有率（図 4 中参照）の違いで、更に **C** と **D** に分けられると考えられる。

### 4 まとめ

$f-\Delta\theta$  線図の特徴は鋼種とその熱処理によって大きく変化するが、いずれの場合も明確な極値を持ち、本方法の有効性が鋼種と熱処理の広い範囲で確認できた。

### 文献

- 1) 小島 隆, 星川 潔; 神奈川県産業技術センター研究報告, **12**, 6 (2006)
- 2) Jiles D.C.; J. Phys. D: Appl Phys., **21** 1196(1988)

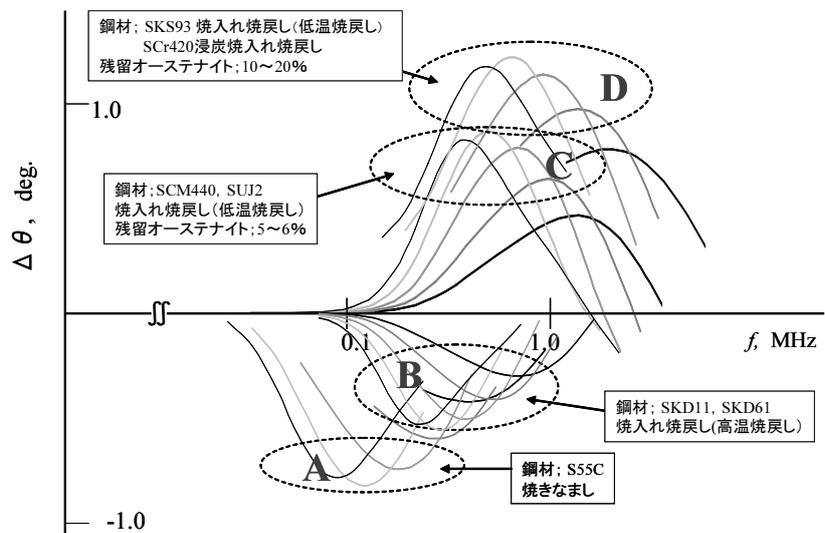


図4 各種鋼材の実証試験で得られた  $f-\Delta\theta$  線図の概略（模式図）