

# 表面処理による金型鋼の機能性向上に関する研究 (第2報)

八代 浩二・倉元 眞實\*1・堀越 康弘\*2・金子 充\*3・中田 七生\*4

## Study on Increase of the Function for Die Steel by Surface Treatment (2nd report)

Koji YATSUSHIRO, Makoto KURAMOTO, Yasuhiro HORIKOSHI Makoto KANEKO and Nanao NAKATA

### 要 約

ダイカストの製造現場において、金型劣化を検出できる電磁誘導方式のセンサー開発を行った。装置を試作し、劣化度の異なる試験片を測定したところ、センサー出力値との間に明瞭な相関関係が得られた。また、X線による応力測定値とセンサー出力値も良好な直線関係を示した。

### Abstract

To sense the damage rate of die casting die in the production field, the eddy current sensor was developed. Using the specimens which have different damage rates, the value of output voltage of the eddy current sensor corresponds with the damage rate. Also, the residual stress measured by the x-ray has good linearity to the value of the eddy current sensor.

### 1. 緒 言

素形材産業は、近代の工業製品の製造において不可欠な基盤産業である。その中でも工具である金型の製造、使用および管理技術は非常に重要である。本県においても慢性化した景気低迷の中で、素形材に関する技術開発は強く求められており、素形材業界の技術力向上は、基盤産業の競争力強化に大きく寄与できるものと考えられる。

金型は使用過程で劣化する。しかし、現状では金型の劣化を測定する手法は存在せず、金型の良否は製造された製品について目視検査で行っている。よって、金型のトラブルに対しては、トラブルが発生してからの場当たりの対応しかできなかった。したがって、何らかの手法で金型の劣化度が定量的に測定可能になると、トラブル発生以前の能動的な対応が可能となる。これにより、生産計画がより綿密なものとなるため、更なるコストダウンが達成できるとともに、企業の競争力も格段に向上すると考えられる。

これまでの結果から、窒化処理した金型は、熱疲労による劣化の過程で窒素が再拡散することが明らかとなっている。よって、この現象を利用して、金型表面に作為的に窒素を拡散させ、何らかの手法で窒化層の変化を測定する

ことが可能になると、金型の劣化度が定量的に測定可能になると考えられる。

本研究では、製造現場において金型表面の劣化度を簡易に検出できる電磁誘導方式のセンサーを開発し、実用化の可能性を見定めた。装置の評価は、X線による残留応力値との比較により行った。

### 2. 実験方法

#### 2-1 試験片

試験片形状をFig. 1に示す。

実験に用いた素材は、熱間金型用工具鋼 (SKD61) である。素材を試験片形状に機械加工し、焼入れ (1030℃ - 2 h, ガス冷却) 焼戻し処理 (580℃ - 3 h, 610℃ - 3 h, 2回処理, ガス冷却) を行い、表面硬さを48 ± 1 HRCとした。その後、530℃ - 5 hで窒化処理を施し試験に供した。なお、窒化処理層の安定形成ならびに組織の緻密化等の目的で、窒化処理前後にショットピーニング処理を併用した。

#### 2-2 熱疲労試験

Fig. 2に熱疲労試験機の概要と温度サイクルを示す。熱疲労試験機により加熱 (570℃) - 冷却 (100℃) の熱サイクルを負荷し、熱疲労段階の異なる4試験片、すなわち100, 1000, 2000, 5000サイクルの試験片を作製した。また、熱サイクルを負荷しない試験片および5000サイクル後に再度窒化処理 (以下、再窒化処理という) を施した試験片も併

\* 1 職業能力開発総合大学校

\* 2 (株) カナック

\* 3 (株) 京三製作所

\* 4 (株) ワカイダエンジニアリング

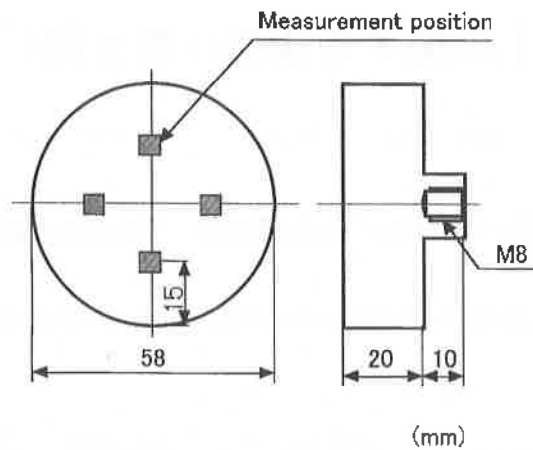


Fig. 1 Dimension of specimen

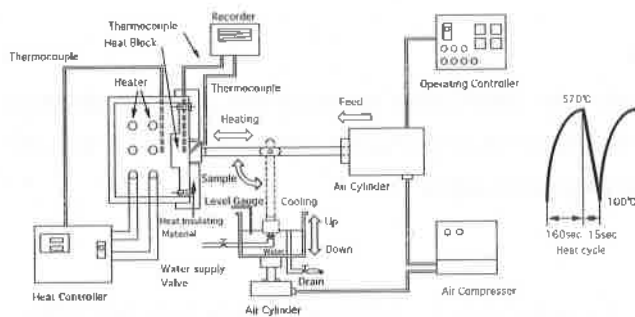


Fig. 2 Apparatus of thermal fatigue test

せて準備した。これらの試験片についてX線応力測定および電磁誘導試験による測定を行い、両測定法による結果を比較した。

### 2-3 X線応力測定

残留応力の測定には(株)リガク製、MSF-2Mを用い、平行ビームスリットを装着して並傾法で行った。回折線は、通常の鉄鋼材料の応力測定に用いる $\alpha$  Fe211を利用した。Table 1に残留応力測定条件を示す。

残留応力等の測定位置は、Fig. 1に示したように5 mm×5 mmの範囲を4カ所設定し、円周方向に測定した。測定値は4カ所の平均値を用いた。

Table 1 Condition of X-ray stress measurement

Diffraction	$\alpha$ Fe 211
Target	Cr
Tube Voltage	30 kV
Filament Current	8mA
Measuring Method	$\sin^2 \psi$
Stress Constant	-297 MPa/deg

### 2-4 電磁誘導試験

Fig. 3は、電磁誘導試験器の概略を示す。

試験器は、試験片に磁束を負荷する交流電源および1次コイル、ならびに、これにより発生した渦電流を検出する2次コイルおよび検出回路から構成される。測定値には、検出回路を通じて得られる電圧値を用いた。以下、この電圧値をセンサ出力値と呼ぶ。

両コイルの配置には多様な形態があるが<sup>2)</sup>、本報告ではFig. 3に示したように、1次コイルと2次コイルを同軸上とし、2次コイルを試験片側に配置した。測定プローブ径は $\phi$ 10mmであり、2次コイルと試験片は接触している。

測定位置は、X線応力測定と同一であり、各試験片について4カ所測定し平均値を算出した。

本実験では、X線応力測定法と電磁誘導試験による測定値を比較するとともに、1次コイルの周波数を70~150 KHzまで変化させ、センサ出力値の周波数依存性も併せて検討した。

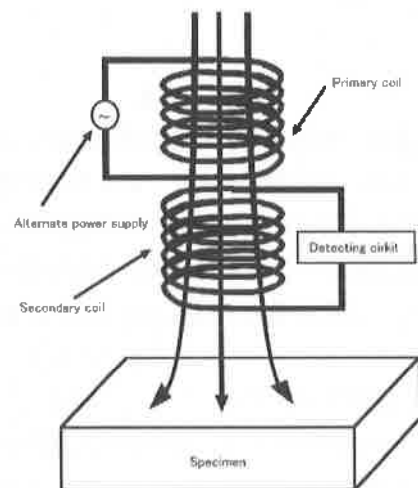


Fig. 3 Schematic view of eddy current sensor

## 3. 実験結果および考察

Fig. 4は、残留応力およびセンサ出力値の熱疲労試験サイクル数による変化を示す。

センサ出力は1次コイルへの負荷周波数をパラメータとして示し、残留応力との対応から縦軸を反転させて記した。また、一例として周波数70, 110, 150KHzについて各プロット間を直線で記した。

熱疲労試験前、すなわち0サイクルにおいて、残留応力は約-800MPaであった。100サイクルで-550MPaへと大きく低下し、その後、2000サイクルまで緩やかに減少した。2000サイクルから5000サイクルの間で応力は-200MPa付近まで大きく減少した。5000サイクル後に再窒化処理を施すことで残留応力は-1000MPa程度まで大きく増加した。

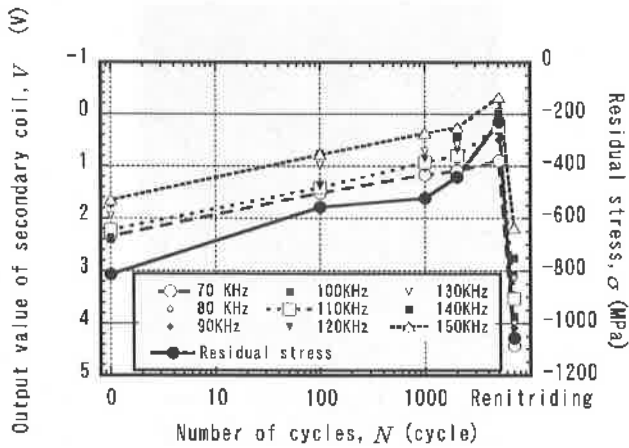


Fig. 4 Changes of residual stress and output value of secondary coil

この挙動は、試験面への熱応力の負荷と加熱による酸化処理層の劣化に起因するものであり、前報<sup>1)</sup>の結果とよく一致している。

一方、センサ出力は全周波数において、熱疲労試験サイクルの増加とともに徐々に低下する傾向を示した、特に、2000~5000サイクル間では大きく減少する傾向を示した。

再酸化処理後、センサ出力値は大きく増加し、いずれの周波数においても初期値、すなわち0サイクル時の値よりも増大した、これらの傾向は、前述の残留応力変化の傾向と同一であり、電磁誘導試験を利用した熱疲労過程における酸化処理層の劣化検出の可能性が示された。

Fig. 5は、残留応力値とセンサ出力との関係を1次コイルへの負荷周波数をパラメータとして示す。図中では、一例として70,110および150KHzの周波数について最小自乗法による近似直線を示した。

残留応力が約-1050MPaにおいて、センサ出力は約2~4Vの値を示した、圧縮残留応力が低下すると共にセンサ

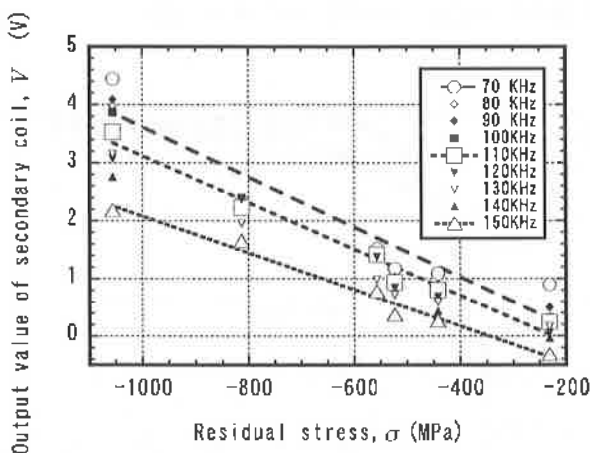


Fig. 5 Correlation of residual stress and output value of secondary coil

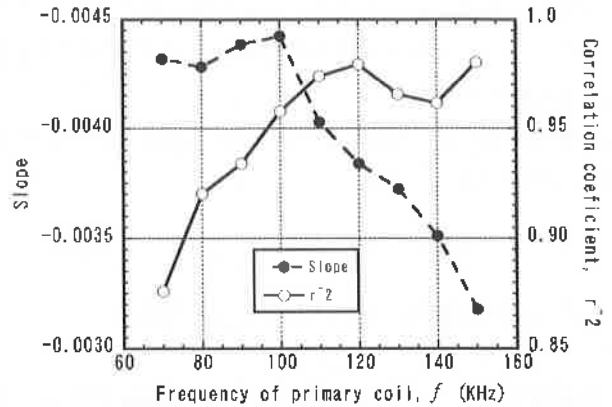


Fig. 6 Relation between frequency of primary coil to slope and correlation coefficient in Fig. 5

出力も低下し、約-250MPaで0V付近に収束した。この傾向は全周波数において同様であり、残留応力とセンサ出力との間には1次の相関関係があるものと考えられる。

Fig. 6は、Fig. 5で示した近似直線の勾配ならびに残留応力とセンサ出力との積率相関係数の負荷周波数依存性を示す。

近似直線の勾配は、残留応力変化に対するセンサ出力の変化、すなわちセンサの感度を示すが、70KHzから100KHz程度までは、ほぼ一定であった。周波数が100KHz以上では、周波数の増加と共に勾配が低下、すなわち、センサ感度が低下する傾向を示した。

一方、相関係数は周波数の増加とともに増加し、110KHzを超えるとほぼ一定となった、これにより、周波数が低いと感度は高いがばらつきが大きく、逆に周波数が高いと感度は低いがばらつきは少なくなることが明らかとなった。よって、本実験では100~120KHz程度の周波数を利用して測定を行うことが望ましいと考えられる。

Fig. 7は、熱疲労試験前の試験片断面写真を示す。

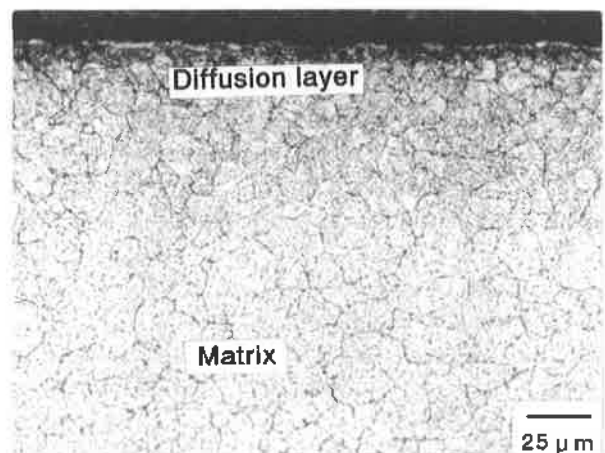


Fig. 7 Microphotograph of sectional area for specimen before the test

試験片の表面には、わずかに白色の化合物の形成が認められた。また、表面から内部へ約80 $\mu$ m程度の領域まで黒色の拡散層が認められた。

電磁誘導試験における磁束の試料中への浸入深さ $\delta$ は式(1)で与えられる<sup>2)</sup>。

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

$f$  : 試験周波数,  $\mu$  : 透磁率,  $\sigma$  : 導電率

本実験で設定した周波数は、70~150KHzであり、式(1)により純鉄の物性値を用いて磁束の試験片への浸入深さを算出すると30~40 $\mu$ mとなる。

一方、上述のとおり断面観察から窒化処理層の厚さは80 $\mu$ m程度である。よって本実験における電磁誘導試験の測定深さは窒化層厚さの約1/2と考えられる。

周波数を高くすると、より表面に近い領域の情報を得られるようになる。しかし、電磁誘導試験の測定値は、素材の電磁気的特性に応じて変化するため、高温環境で形成する酸化物やクラック、汚れなどの付着物の影響を受けやすくなる。よって、測定値のばらつきが増大が予測されることから適切な周波数の選択による測定深さの決定が重要になる。

一方、X線応力測定は浸入深さが5 $\mu$ m程度と浅いものの、表面付近の結晶を選択的に測定しているため、酸化物等の影響を受けにくく、比較的安定した測定値が得られているものと考えられる。

Fig. 8は、5000サイクルの熱疲労試験後における試験片断面写真を示す。

表面に約10 $\mu$ mの均一な酸化物層の形成が認められた。その直下には5 $\mu$ m程度の微細なクラックが存在し、その開口部には酸化物が形成されていた。また、拡散層の深さ

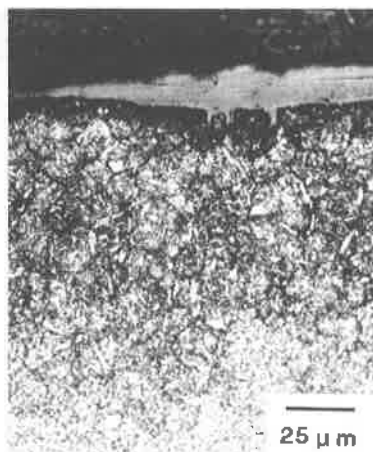


Fig. 8 Microphotograph of sectional area for specimen after 5000cycles

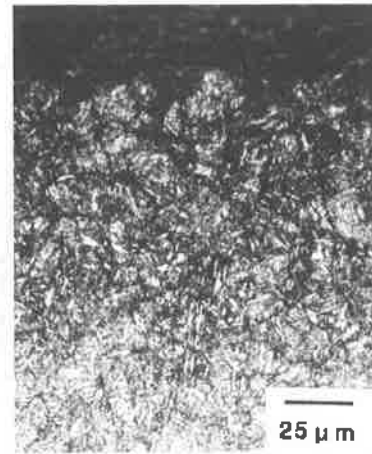


Fig. 9 Microphotograph of sectional area for specimen after the re-nitriding

は試験前と比較するとやや深くなる傾向を示した。

Fig. 9は、5000サイクル後、再窒化処理を施した試験片の断面組織写真を示す。

再窒化処理を施すと、最表面に形成していた酸化物層は消失し、クラックもほとんど観察されなくなった。これは、窒化処理前後に施したショットピーニング処理により試験片表面がわずかに除去された結果である。拡散層深さの差は再窒化処理前後で明確に認められなかった。

Fig. 10は、熱疲労試験前、5000サイクルの熱疲労試験後および再窒化処理後の表面から内部への残留応力分布を示す。

熱疲労試験前は、最表面に-1000MPa程度の圧縮残留応力が存在した。表面から内部への距離の増加と共に残留応力は低下し、約100 $\mu$ mで一定となった。

5000サイクル後、最表面の残留応力は-400MPa程度まで低下し、内部も同様に低下していた。また、残留応力の存在深さは約200 $\mu$ mまで増加した。再窒化処理後、最表面の応力は約-1100MPaまで回復するとともに残留応力の分布曲線も試験前とはほぼ同一の形態へ回復した。

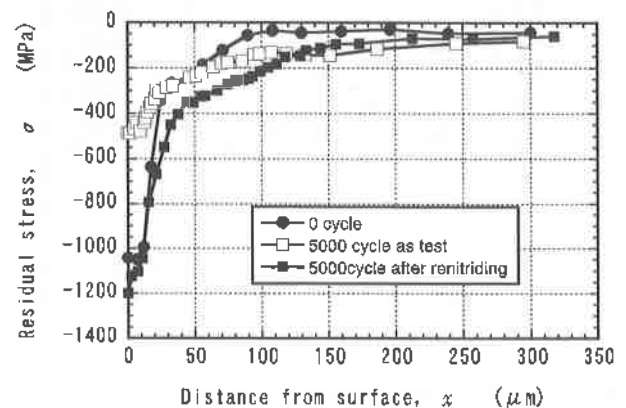


Fig. 10 Residual stress distribution of each specimen

このように、熱疲労過程において窒化処理層の残留応力が大きく変化するのは、試験片表面から $50\mu\text{m}$ 程度の領域であり、この範囲で窒化処理層の物性が大きく変化すると考えられる。前述のように電磁誘導試験による測定領域は、 $30\sim 40\mu\text{m}$ であることから、窒化処理層の物性変化に対して高感度で出力が変化したものと考えられる。

#### 4. おわりに

本報告では、熱間金型に形成させた窒化処理層の熱疲労過程における劣化度検出を行うことを目的とし、電磁誘導試験の適用性についてX線応力測定法との比較を行いながら検討した。得られた結果を下記に示す。

- 1) 残留応力およびセンサ出力値の熱疲労試験サイクル数による変化を測定したところ、両者ともに同様な傾向が得られ、電磁誘導試験による窒化処理層の劣化診断の可能性が示された。
- 2) 残留応力とセンサ出力との相関を検討したところ、全ての周波数の結果において、圧縮残留応力値の低下と共にセンサ出力値が直線的に低下する傾向を示した。
- 3) 電磁誘導試験によるセンサ出力値において、1次コイルの周波数依存性を検討したところ、測定感度および精度から最適な周波数範囲が存在することが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 八代浩二, 日原政彦, 倉元眞實, 非破壊検査, 47-8, pp. 658-664 (1998).
- 2) 日本非破壊検査協会編, 新 非破壊検査便覧, p. 379 (1992).
- 3) 八代浩二, 日原政彦, 岡田勝蔵, 藪内 智, 倉元眞實, 日本材料学会第35回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集pp. 270-275 (1999).