

# 表面処理による金型鋼の機能性向上に関する研究 (第3報)

## —電磁誘導試験による表面処理層の劣化診断—

八代浩二<sup>1</sup>, 佐野正明<sup>2</sup>, 米山 陽<sup>3</sup>, 介元眞實<sup>4</sup>, 早野 勇<sup>5</sup>, 堀越康弘<sup>3</sup>, 金子 亮<sup>3</sup>, 中田七生<sup>6</sup>

## Study on Increase of the Function for Die Steel by Surface Treatment(3rd report)

—Deterioration Diagnosis of Surface Treated Layer by Eddy Current Testing—

Koji YATSUSHIRO, Masaaki SANO, Akira YONEYAMA,  
Isamu HAYANO, Makoto KURAMOTO, Yasuhiro HORIKOSHI  
Makoto KANEKO, Nanao NAKATA

### 要 約

ダイカストの製造現場で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。試作装置により、窒化処理、母材材質および母材硬さが異なる試験片についてセンサ出力の相違を調べ、その適用性を検証した。また、金型を用いた実証試験を実施した。その結果、窒化処理などの処理条件が異なる場合においても前報と同様な結果が得られ、実用性が検証できた。金型を用いた試験結果では、測定位置による劣化速度の違いが明瞭に検出できた。

### Abstract

To sense the damage rate of die casting die in the production field, the eddy current sensor was developed. The testing device was produced and different types of nitriding, material and hardness of the matrix was discussed. Also the device was verified using the die casting die. As the result, the nitriding condition, material and hardness of the matrix did not influence to the eddy current testing. Also, difference of deterioration velocity was detected at measuring points.

### 1. 緒 言

金型は使用過程で劣化する。しかし、現状では鑄造過程で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ため、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合当たりの対応しかできなかつた。したがって、金型の劣化度が何らかの手法で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、県内企業の競争力も格段に向上すると考えられる。

本研究は鑄造用金型を想定し、窒化処理が施された金型の使用過程における劣化度の簡易測定装置を開発し、企業における製造コストの低減化を目標とするとともに、開発した装置の製品化が見込める場合には県内企業への

技術移転と事業化を目指して実施した。

これまでの結果<sup>1)</sup>で、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を明らかにしている。前報<sup>2)</sup>では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、劣化が計測できる実験室レベルの電磁誘導方式のセンサを試作開発し、実用化の可能性を見定めた。

本報では製造現場での適用を考慮し、新たに試作した装置を使用して実験を行った。まず、試験片を用いて市場に流通している種々の形態のダイカスト金型への適用性、すなわち、窒化処理、金型鋼素材、熱処理硬さが異なる金型鋼試験片を検証した。次に、実際の金型を用いて操業過程における金型表面の劣化検出を試みた。

### 2. 実験方法

#### 2-1. 試験片での適用性検証

試作センサの各種金型への適用の可能性を検証する目的で、熱疲労試験機を使用し、前報<sup>2)</sup>と同一の条件で劣化度の異なる数種類の試験片を作成した。試験片は、窒化処理、金型鋼素材、母材硬さの異なるものを用意し、各々について劣化診断を試みた。

\*1 職業能力開発総合大学校

\*2 (株)プログレス

\*3 (株)カナック

\*4 (株)京三製作所

\*5 (株)ワカイダエンジニアリング

2-1-1 窒化処理の種類

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℃-2h, ガス冷却) 焼戻し処理 (580℃-3h, 610℃-3h, 2 回処理, ガス冷却) を行い、表面硬さを48±1HRCとした。その後、2種類の窒化処理を施した。表1に処理条件を示す。窒化処理Aは、耐熱疲労特性を目的とした最表面に窒素化合物 (以下、化合物と呼ぶ) を形成させない処理であり、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。窒化処理Bは、耐溶損特性を目的とした化合物を作為的に形成させた処理である。

これらの処理は、侵入させる窒素量が異なり、前者の窒化処理Aの方がより窒素量が少ない。よって、両者は処理層内における透磁率や誘電率が異なっているため、センサによる測定の適用性が検証できる。なお、一般的に金型へ施される窒化処理は、これら2種類の処理に大別される。

表1 窒化処理条件

窒化処理A	530℃-3h (化合物なし)
窒化処理B	520℃-6h (化合物あり)

2-1-2 金型鋼素材

表2は、金型鋼素材の比較試験に用いた鋼種の一覧を示す。

一般的に、JISで規定された熱間金型用合金工具鋼 (SKD61) を基にして、製鋼メーカーが独自にクロム、モリブデン、バナジウム等の合金組成を変化させた、いわゆる改良材と呼ばれる鋼材が市販されている。これらの鋼材は、大物用、精密用などの用途により使い分けられることが多い。

そこで、合金組成が異なると電磁物性も異なるため、各改良材について測定の可能性を検証した。なお、試験片は前述の窒化処理Aを施したものを実験に供した。

表2 金型鋼素材の種類

JIS材(SKD61)	H社製 DAC
JIS改良材	D社製 DH21, DH31
	U社製 QRO90

2-1-3 母材硬さ

一般的なダイカスト金型は、焼入-焼戻後、45~50HRC程度の硬さで使用されることが多い。本実験では、表2で示したDH21材を用い、処理後の硬さが45および48HRCになるような条件を選択して熱処理を行い、両者の違いを検証した。なお、実験には窒化処理Aを選択した。

2-2 金型による試験

表3は、実験に用いた金型の概略と鋳造条件を示す。また、図1に、金型の概略と測定位置を示す。

表3 鋳造条件と金型概寸

鋳造素材	アルミ (ADC12)
鋳造機	東洋機械金属 BD350V3N (350tf)
製品寸法	170×200×5mm
金型寸法	285×335×70mm (2個取り)
埋子寸法	230×46×70mm
最終操業数	141,877ショット

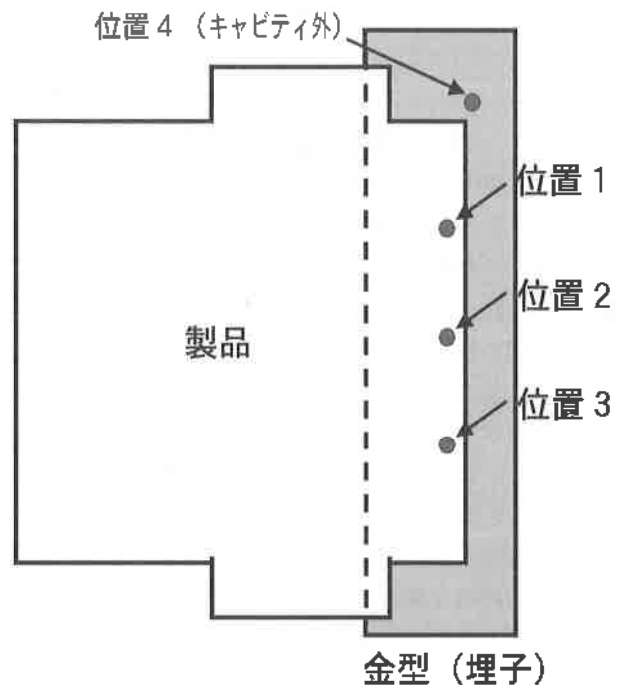


図1 金型の概略と測定位置

鋳造機には、東洋機械金属製BD350V3N (型締力350tf) を用いた。製品は、170×200×5mmの平板形状であり、測定は、キャビティ内3カ所、キャビティ外1カ所の合計4カ所で行った。

鑄造過程において、所定のサイクル毎に表面の劣化診断をセンサで行うとともに、X線応力測定を行い、センサ値との比較を行った。また、試験後の金型は切断して断面観察を行った。この金型の主な欠陥は溶損であるため、窒化処理Bを施して実験を行った。

### 2-3 X線応力測定

残留応力の測定には糊リガク製、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。表4に残留応力測定条件を示す。

残留応力等の測定位置は、図1に示した4カ所を設定した。また、キャビティ内の測定値は3カ所の平均値を用いた。

表4 X線応力測定条件

回折面	$\alpha$ Fe 211
ターゲット	Cr
管電圧	30 kV
フィラメント電流	8mA
測定手法	$\sin^2\Psi$
X線的応力定数	-297 MPa/deg

## 3. 実験結果および考察

### 3-1 試験片による適用性検証

#### 3-1-1 窒化処理の種類

図2に、2種類の窒化処理試験片について、熱疲労試験サイクル数とセンサ出力の関係を示す。

窒化処理の種類、すなわち、化合物層の有無に係わらず、センサ出力は試験サイクル数の増加にともない低下する傾向を示した。また、窒化処理Aと比較すると処理時間が長く、拡散した窒素量が大きな窒化処理Bは、試験過程のセンサ出力が大きな値で推移した。

熱疲労過程における窒化層の劣化現象は、表面加熱による化合物層の分解と固溶した窒素の再拡散である。本実験における渦電流の侵入深さは、 $50\mu\text{m}$ 程度であることから、渦電流の侵入領域において発生する窒化層の熱分解および固溶窒素の再拡散による窒素濃度の低下によってセンサ出力も低下したと考えられる。

図2において、試験開始前のセンサ出力に対する各サイクルの低下率 $I_N$ を(1)式により算出し図3に示す。

$$I_N = V_N / V_0 \quad (1)$$

ここで、 $V_N$ :各試験サイクル数におけるセンサ出力  
 $V_0$ :試験開始前のセンサ出力

向窒化処理試験片ともに試験サイクル数の増加にともない低下率は徐々に減少し、5000サイクルの試験後には、低下率は0.2近傍となった。

本センサの出力値は基準試験片に対する相対値であるため、実際の金型へ適応する際は図3のように初期値に対する変化率で管理することが現実的である。図2の結果では2種類の窒化処理の測定値は大きく異なるが、低下率で整理すると差は少ない。よって、ゲインを上げることで窒化処理Aのように化合物の少ない処理を施した金型でも高感度に劣化を検出できると考えられる。

なお、金型の使用限界は使用者や製品によって異なるため、センサ出力の低下率による生産管理を行うには、個々の事例毎に設定を行う必要がある。

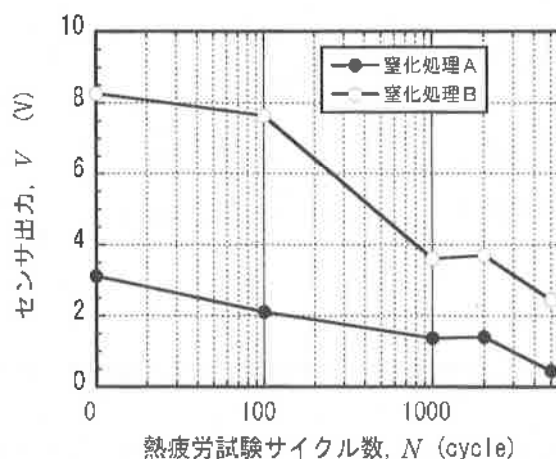


図2 2種類の窒化処理試験片の比較

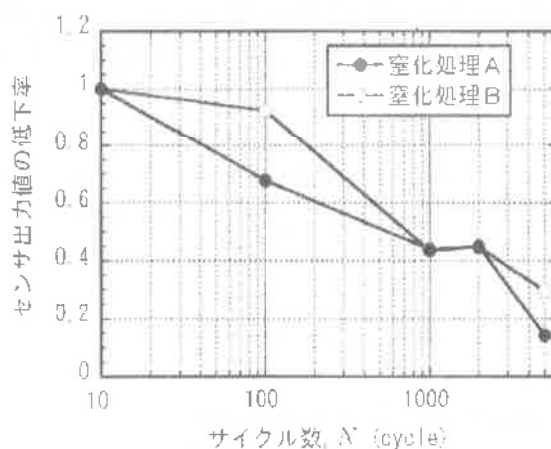


図3 2種類の窒化処理試験片におけるセンサ出力低下率

#### 3-1-2 素材および焼入硬さの違い

図4は、試験片素材についてJIS材(図中でSKD61と記

す)および3種類のJIS改良材のセンサ出力値の比較を示す。  
改良材は3種類ともにJIS材よりやや大きいセンサ出力値であった。

改良材は、いずれもJIS材を基にクロムやモリブデンなどの合金組成の配合比を変化させた素材である。合金組成の配合比が変化すると、素材の透磁率も変化するため、センサ出力に大きな影響を及ぼすことが懸念されたが、図4の結果が示したように、その影響はわずかであった。

素材メーカーの公称値では、今回実験に用いた素材の中でDH21材がもっともJIS材に近い合金組成である。しかし、センサ出力はDH21材がJIS材ともっとも離れた値を示した。この要因として、合金組成の違いにより形成した窒化処理層の形態が異なることも考えられるが、詳細については不明である。

図5は、焼入硬さの異なるDH21材におけるセンサ出力の変化を示す。45HRCおよび48HRCという焼入硬さの違いからはセンサ出力の差は明確に求められなかった。

製造現場での実用化に向け、窒化処理の種類、金型素材および焼入硬さの違いがセンサ出力に及ぼす影響を検証したところ、すべての試験片においてセンサ出力値が

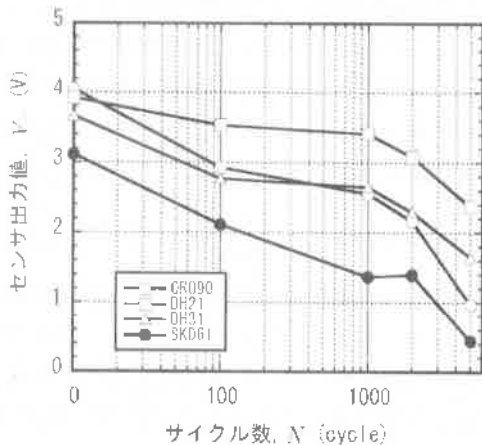


図4 JIS材およびJIS改良材との比較

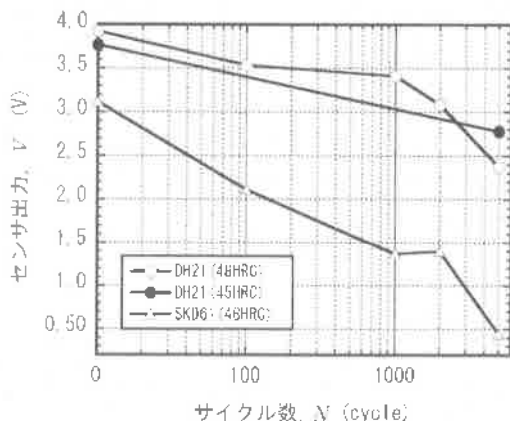


図5 母材硬さの違いがセンサ出力に及ぼす影響

測定レンジ内に収まったことから、今回の試作センサで十分劣化診断を行えることが判明した。

### 3-2 金型による実証試験

図6は、ダイカスト操業過程における金型表面のセンサ出力変化および残留応力変化を示す。

キャビティ内において、センサ出力は0から約9000ショットまでの間に約3.2Vから0.7Vまで大きく低下した。その後、センサ出力は徐々に増加し、90000ショット付近を変曲点として再び低下する傾向を示した。

キャビティ外において、センサ出力は20000ショット付近から徐々に低下し、50000ショット付近で約2.8Vとなった。その後、センサ出力値は約140000ショットの操業終了までほとんど変化が認められなかった。

一方、キャビティ内の残留応力は試験開始後から引張側へ徐々に増加した。40000ショット付近で約280MPaの最大値をとった後低下し、約140000ショットの操業終了後は約150MPaとなった。

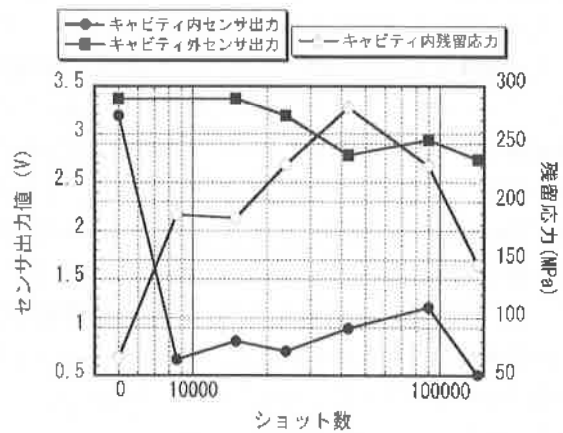


図6 操業過程におけるセンサ出力および残留応力変化

図7は、図6で残留応力測定に用いた $\alpha$ -Fe211のキャビティ内外におけるX線回折強度の変化を示す。

本金型へは最表面に化合物の形成した窒化処理Bを選択している。そのため、この化合物が健全であるとX線の侵入を阻害して、母材である $\alpha$ -Feのピークはわずかとなる。この際のピーク強度は、ほぼバックグラウンドの数値となるため、図中において、約1000cpsの位置にマーカーを記している。

回折強度は、キャビティ内では操業開始直後から急激に増加し、15000ショット程度以降は、約6000cpsのほぼ安定した値で推移した。キャビティ外では、25000ショット程度まで回折強度はほとんど増加しなかったが、その後、40000ショット付近で4000cpsをピークとして急激に増加した。約40000ショット以降は、ピーク強度は緩やかに約3000cps程度まで低下した。

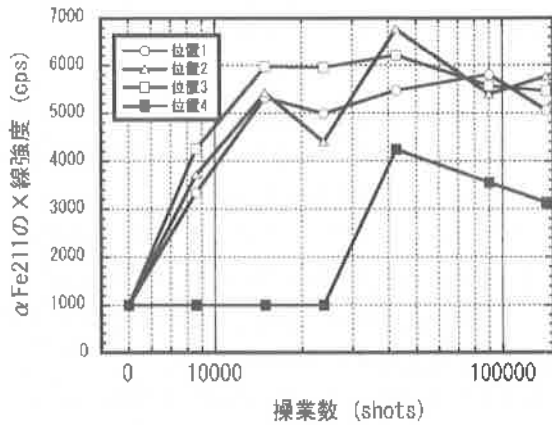


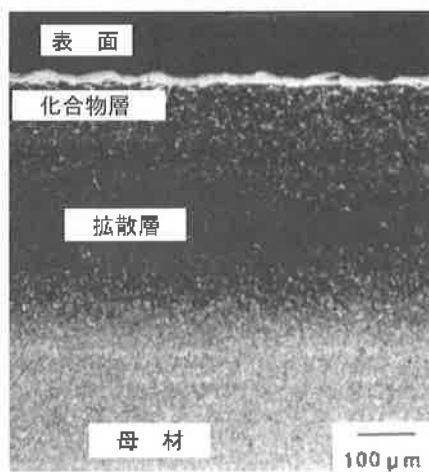
図7 操業過程におけるX線応力測定時の回折強度変化

金型の使用過程において、最表面に形成した窒化処理層に発生する現象は、(1) 溶融アルミとの接触加熱に起因した化合物の熱分解および固溶窒素の再拡散、高温酸化(2) 離型材塗布による冷却で発生する熱応力由来の熱疲労である<sup>3)</sup>。

上記、図6および図7の結果から、キャビティ内においては操業開始から10000ショット程の比較的初期段階で、アルミ溶湯と金型との接触で最表面に形成した化合物が著しく分解したと考えられる。その後、化合物の分解の進行と熱応力の繰り返し負荷によるバウンシング効果で引張残留応力が增大したが、40000ショット程で微細なき裂が発生して引張応力は低下したものと考えられる。

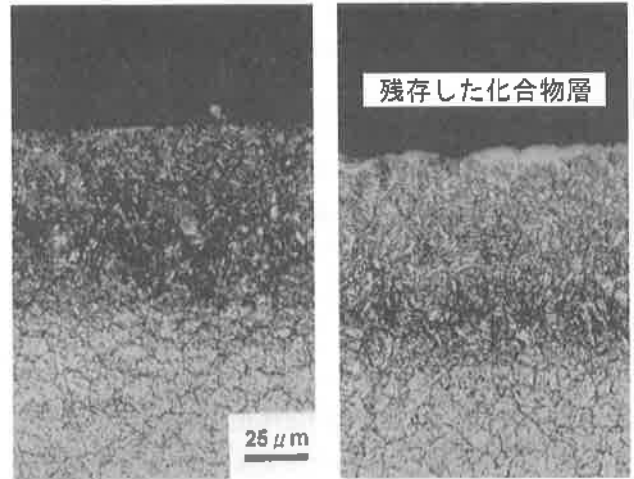
一方、キャビティ外では、アルミ溶湯との接触がないために窒化層の劣化速度が遅く、その結果、センサ出力の低下はキャビティ内と比較してわずかであったものと考えられる。

図8は、(a) 窒化処理のまま、(b) 操業後のキャビティ内、(c) 操業後のキャビティ外における断面観察結果を示す。



(a) 窒化処理のまま

図8 窒化処理層の断面観察結果



(b) 操業後のキャビティ内 (c) 操業後のキャビティ外

図8 窒化処理層の断面観察結果

窒化処理のままの状態(a)では、最表面に白色の化合物が明確に認められた。約140000ショットの操業後では、キャビティ内の化合物が完全に分解し、黒色に観察される拡散層のみが存在していた。それに対し、キャビティ外では、わずかに白色の化合物層が認められ、この位置における劣化速度が遅いことが明らかとなった。

以上のように、金型を用いた実証試験の結果においても試験片と同様に窒化処理層の劣化度を検出できることが明らかとなった。また、キャビティ内外における劣化速度の違いがセンサ出力値に明確に認められた。

#### 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の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試験片を用いた実験、および、実際の金型を用いて操業過程の窒化処理層の劣化度測定を行った。得られた結果を下記に示す。

- 1) 窒化処理の種類、すなわち、化合物層の有無にかかわらず、センサ出力は試験片の劣化進行にともない低下する傾向を示した。また、処理時間が長く、窒素濃度の大きな窒化処理Bは、窒化処理Aと比較するとセンサ出力は大きな値で変化した。
- 2) JIS材およびJIS改良材の鋼種や焼入硬さを変化させての検証の結果、多少の差はあるものの昨年度実施したJIS材と同様な傾向が得られ、適用性の広さが確認された。
- 3) 金型を用いた実証試験の結果、試験片と同様、窒化処理層の劣化度を検出できることが明らかとなった。また、キャビティ内外における劣化速度の違いはセンサ出力値の違いとして明確に認められた。

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) 八代浩二, 倉元眞實, 堀越康弘, 金子 亮, 中田七生, 山梨県工業技術センター研究報告,17, pp.1-5 (2003) .
- 3) 型技術協会熱間金型の寿命改善委員会編, 熱間用金型の寿命対策, 日刊工業新聞社, pp.175-183 (2001) .