

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 15 日現在

機関番号：50104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871025

研究課題名(和文) 鋳肌を有する球状黒鉛鋳鉄鋳造品の渦電流法による非破壊評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of nondestructive evaluation method for ductile cast iron with casting skin

研究代表者

堀川 紀孝 (HORIKAWA, Noritaka)

旭川工業高等専門学校・システム制御情報工学科・准教授

研究者番号：80344480

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：球状黒鉛鋳鉄鋳造品の鋳肌をはじめとした種々の表面から、渦電流法を用いて組織を評価する手法を検証した。表面状態が渦電流信号に与える影響を検証した結果、表面粗さならびに加工による残留応力により渦電流信号が大きく変化し、渦電流信号の分布状で判別は可能である。また、それらの影響を緩和するには試験周波数を1kHzなど低くする必要がある。鋳肌からの渦電流試験において、鋳鉄の肉厚による組織変化を検出可能であるが、鋳肌の粗さが組織、特にチル組織の検出に影響することを示した。

研究成果の概要(英文)：Nondestructive method for microstructure evaluation of ductile cast iron with various surface including casting surface was examined. Eddy current method was employed and the effects of the surface conditions on eddy current signal were investigated. Surface roughness and residual stress induced by machining indicated large effect on the eddy current signal. The effect of them can be distinguished by using both eddy current signals V_x and V_y . Lower testing frequency should be used to mitigate the effect of them. The change of the microstructure can be evaluated through the casting surface. The roughness of the casting surface affects detection of the chill structure.

研究分野：機械材料学，鋳造工学

キーワード：球状黒鉛鋳鉄 非破壊試験 渦電流試験 基地組織 鋳肌 表面粗さ 残留応力

1. 研究開始当初の背景

球状黒鉛鋳鉄は強度と成形性・生産性のバランスに優れることから、エンジンや足回り部品などの自動車部品に多用されている。近年の省エネルギー・省資源とCO₂排出規制への対応から、鋳鉄鋳造品についても軽量化が望まれている。しかし、軽量化のため球状黒鉛鋳鉄を薄肉に鋳造すると、冷却速度が速くなるため、脆いチル組織が生じて機械的特性、特に伸びを低下させることがあるほか、同じ化学組成でも肉厚により強度特性が大きく異なる。チル組織の晶出を抑制しながら、薄肉・軽量化を図る手法が国内外で開発されており、製造後の鋳造品の検査方法の開発が急務である。渦電流法等を用いた鋳鉄の組織の非破壊評価ではこれまでのところ研削面に対する評価に留まっており、実体の試験を考えると鑄肌を含めた鋳造品の種々の表面から評価することが求められている。

2. 研究の目的

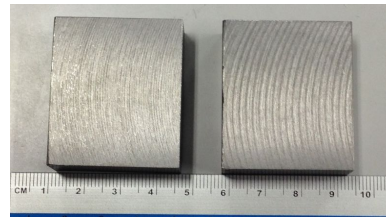
本研究は、球状黒鉛鋳鉄鋳造品の組織や強度の渦電流試験を用いた非破壊的な評価において、測定面の加工や鑄肌の影響を明らかにするとともに、表面の影響の少ない試験法を見いだすことを目的とする。

3. 研究の方法

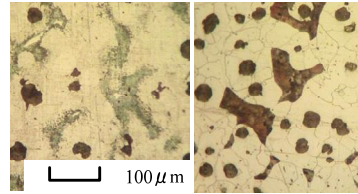
(1) 試験片

本研究では、測定面加工条件の影響の検証には、同一試験片から加工条件を変えた試験片を作製し、鑄肌を介した評価には実際のターゲットとなる薄肉の球状黒鉛鋳鉄試験片を用いた。

図1に示すような組織の異なる球状黒鉛鋳鉄試験片を肉厚30mm(CA, CB)ならびに50mm(FCD)のYブロックから切り出し、その1面を試料切断機(砥石による切断)、型削り盤、正面フライスを用いて切削して表面状態を変化させた。正面フライスによる切削では、切削速度を100~345m/min、送り速度を50~150mm/minの範囲で変化させた。また、薄肉の球状黒鉛鋳鉄試験片は中央部が肉厚2mmで両端が肉厚4mmである板状試験片であり、鑄型の砂粒度により鑄肌の状態を変えた試験片を作製した。細かい7号砂を用いた試験片Aならびに粗い5号砂を用いた試験片Bの2種類である。その組織は試験片A,Bともに図2に示すようにフェライト・パーライトの混在する組織で、一部にはチル組織も晶出している。また、試験片表面はショットブラストをかけていない。

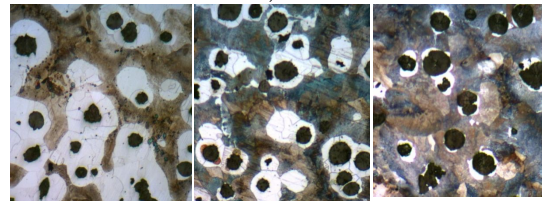


(a) 外観



CA

CB, CBR



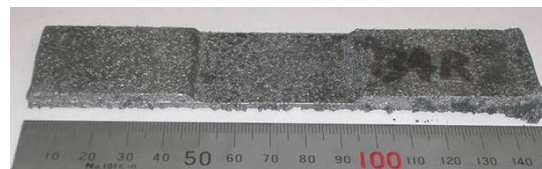
FCD450

FCD600

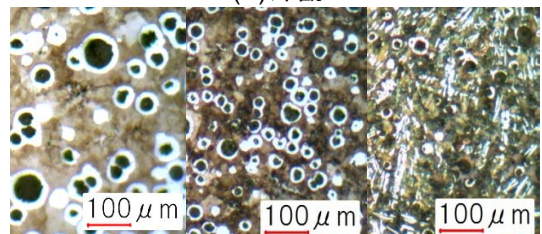
FCD700

(b) 顕微鏡組織

図1 球状黒鉛鋳鉄試料(ブロック試料)



(a) 外観



肉厚4mm

肉厚2mm

チル晶出部

(b) 顕微鏡組織

図2 薄肉球状黒鉛鋳鉄試料

(2) 渦電流試験装置

渦電流試験には、渦電流探傷器(アスワン電子 aect2000n)を用いた試験装置(図3)および、ファンクションジェネレータとロックインアンプによる渦電流試験装置(図4)を用いた。後者の渦電流試験装置は、本補助金にて導入・構成したものである。プローブとして渦電流探傷器には251ターンのコイル2個、および渦電流試験装置には50ターンの励磁コイルと200ターンの検出コイルで構成されたものを用いた。(図5)

試験周波数は10, 25, 50kHzを用い、試験片測定面の状態の渦電流試験に及ぼす影響を調査した。試験装置からの出力はいずれもV_x, V_yの2種類であり、それぞれプローブ(コイル)の抵抗成分とリアクタンス成分と相関

がある。なお、渦電流探傷器では、基準試験片を決めてそれとの比較した値が渦電流信号として出力される。

(3) 渦電流を伴うプローブ周りの電磁界解析

2次元の電磁界解析を実施し、プローブ回りの磁界ならびに渦電流の分布に対する表面の影響と試験条件の効果を検証した。電磁界解析のため、渦電流に対応した2次元電磁界解析ソフトウェアのNelson8.0を導入した。試験片表面の粗さや加工による残留応力の影響は、表面直下での導電率や透磁率の差となって現れる。そこで、試験片表面部100~200 μm の範囲の特性のみ変化させることで、表面状態の変化を模擬した。試験体とコイルをどちらも円柱形状と仮定し、図6に示す計算モデルを構築して解析を実行した。

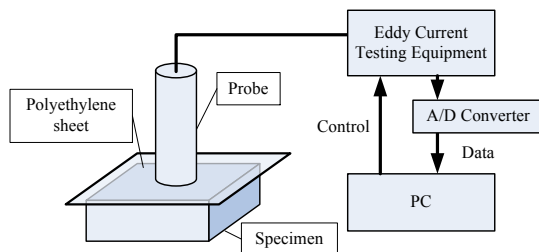


図3 探傷器を用いた渦電流試験装置の構成

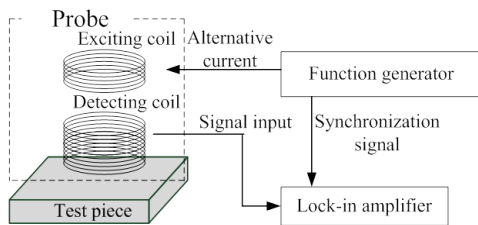
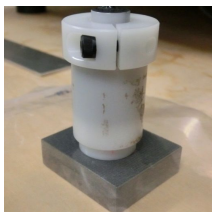


図4 ロックインアンプを用いた渦電流試験装置の構成



(1) 探傷器用 (2) 試験装置用

図5 渦電流試験プローブ

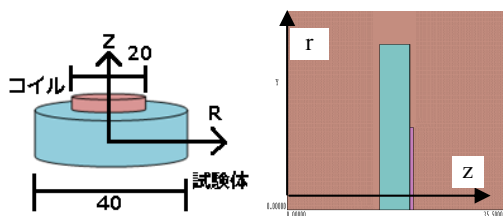


図6 渦電流試験プローブと試験体のモデル

4. 研究成果

(1) 測定面の加工方法・加工条件による渦電流信号の変化

測定面の加工した試験片に渦電流試験を行い、加工方法と加工条件が渦電流信号に与える影響を検証した。図7、図8に試験周波数25kHzにおける渦電流探傷器からの渦電流信号 V_x 、 V_y と表面粗さの関係を示す。基準試験片として試料切断機による切断面をもつCA試験片を用いた。

図7に示すように V_x と粗さが直線的な関係を示し、また、焼きなましの有無いずれの試験片もCAならびにCBの差はわずかである。ただし、焼きなましにより V_x の値が低くなっている。表面の残留応力をX線回折装置により測定したところ、いずれの加工条件においても、焼きなましにより表面の残留応力が低減されていた。したがって、この渦電流信号の変化は残留応力によるものと判断できる。

一方、図8に示す V_y の値は、特に焼きなましをしたCAとCBの間に明確な差が見られ、さらに粗さの大きな領域では粗さによらずほぼ一定の値を示している。したがって、 V_y が基底組織の判別に適していることが示された。

なお、試験片による V_x と V_y の変化の傾向は試験周波数により変化するため、適した周波数を選択するか、位相を変えて調整することで、粗さと組織を V_x と V_y にそれぞれ対応させて評価することが可能である。

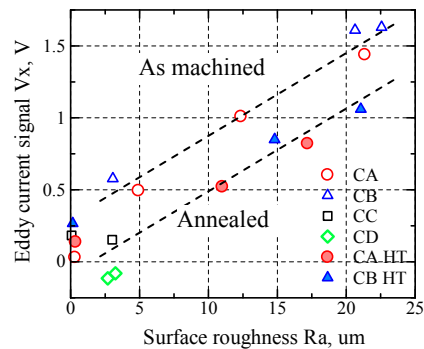


図7 渦電流信号 V_x と粗さの相関

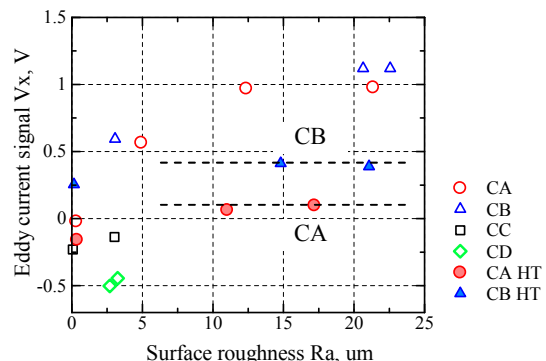


図8 渦電流信号 V_y と粗さ・組織の相関

測定面を正面フライスで加工する際の条件を種々に変えた試験片の測定結果を図9に示す。先の試験片で得られた測定値も比較のため同様に示した。CA, CB(CBR), FCDは図1に示すように組織も異なる。CBR 試験片()は正面フライスで切削条件を変えて加工した試験片であり、表面粗さはRa0.5~7.1の範囲である。測定値が直線状、右肩上がりに分布しているが、基準試験片($V_x, V_y=0$)より右上に分布しているデータはいずれもフライスの切削チップの状態により、大きな加工残留応力が付与されていた試験片である。したがって、この傾向は残留応力の大きさに依存するものと判断された。また FCD600 と FCD700 は FCD450 に比べて V_x, V_y ともに大きい値を示している。これらは FCD450 に比べて残留応力値も高く、信号の分布はそれを反映したものと考えられる。ただし、FCD600 と FCD700 の信号は明確に分離できることから、組織による変化も含まれている。後述するように渦電流による磁界の分布できる深さが浅いため、表面層の残留応力の影響をより強く受けたものと考えられる。

また、前述の CA および CB の結果では粗さと V_x の値に相関が見られた。これは、図7に示すような CA, CB 試験片では粗さが大きく、その影響が V_x に明瞭に現れたけれども、フライス加工した試験片の粗さはそれらに比べて小さく、 V_x への影響が限定的と考えられる。

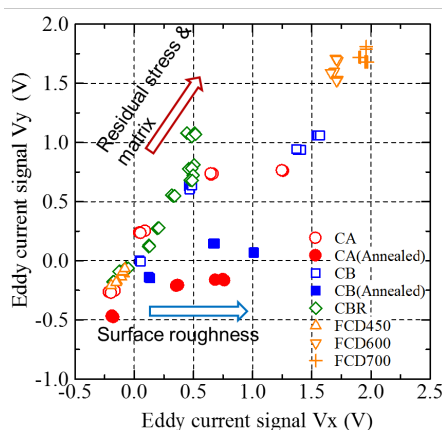


図9 加工方法・加工条件の異なる試験片の渦電流分布

(2) 鑄肌を介した薄肉球状黒鉛鑄鉄の組織評価。

鑄肌を有する薄肉の球状黒鉛鑄鉄試験片に対して、ロックインアンプによる渦電流試験装置を用いて渦電流試験を行った。測定周波数は10, 25, 50kHzである。

図10に、試料Bの5本の試験片における部位による渦電流信号分布ならびに対応する位置の組織のパーライト率を示す。渦電流

信号で V_x が大きく、 V_y の小さい右下に分布するほど、その位置でのパーライト率が高い。また、一部、渦電流信号が左下に位置している試験片の組織は基地組織パーライトのほか、チル組織(セメントイト)が晶出しており、チルの有無についても評価が可能である。これらの結果より、鑄肌上からでも渦電流信号をもとに基地組織の評価が可能であることが示された。

図11に鑄肌の状態の異なる試料AとBの試験片の渦電流信号分布を示す。A, Bそれぞれの試験片同士では図10と同様にパーライト率と渦電流信号に相関が見られ、肉厚2mmと肉厚4mm部の組織の判別が可能である。また、試料AとBの分布に差が見られ、図10におけるチル組織の有無と似た傾向である。しかしながら、試料AとBの試験片のうち、チル組織が晶出していないものでも渦電流信号に違いが見られ、AとBの分布は図11に示すように明瞭に分離した。そこで、鑄肌の粗さの大きい試料Bの試験片表面を研磨して表面粗さを小さくしたところ、試料Aの分布と一致した。したがって、渦電流信号の上では、鑄肌の粗さも反映していることが明らかとなった。

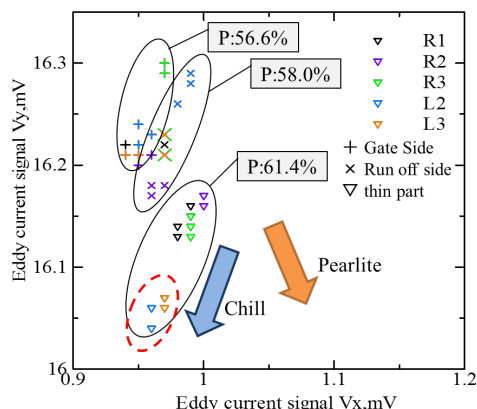


図10 試験片部位による渦電流信号の変化

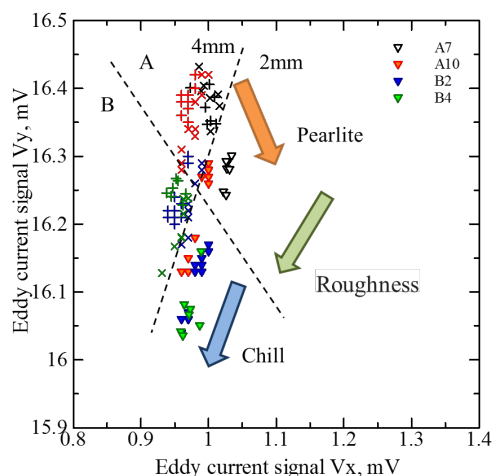


図11 鑄肌の状態の異なる試験片の渦電流信号分布比較

(3)プローブおよび試験片の電磁界解析

図 12 に電磁界解析により得られた試験片表面近傍の磁界分布を示す。表面層として透磁率ならびに導電率が 30%小さい領域を表面から 200 μm の深さまで設定してある。試験片表面における渦電流の発生により磁界が表面付近に集中しており、100kHz の試験周波数では磁界が分布しているのは 200 μm 以内の領域である。すなわち、それより深い領域の特性は渦電流信号に反映されにくいことがわかる。鑄肌はその粗さが最大高さ R_z で 200 μm を超えてしまうため、鑄肌からの評価にはより低い周波数が適していると考えられる。また、機械加工による残留応力層の厚さも 100 μm ~ 200 μm と推定されることから、機械加工面の評価においても低い周波数が望ましい。図 13 には試験周波数 1kHz の場合の磁界分布を示す。表面層 200 μm より大幅に深い領域まで磁界が分布しており、この条件であれば表面の影響があるものの、内部の特性も十分に反映できるものと考えられる。

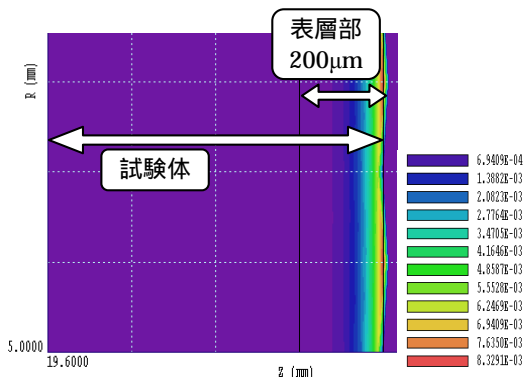


図 12 試験片表面近傍の磁界分布(100kHz)

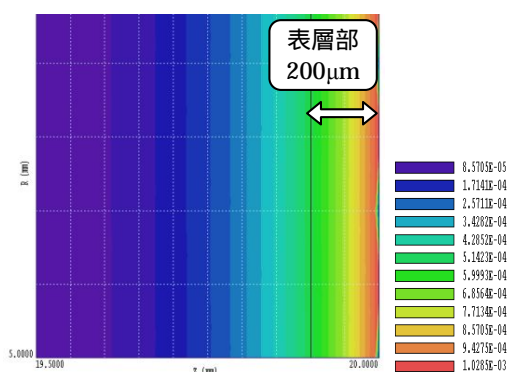


図 13 試験片表面近傍の磁界分布(1kHz)

(4)成果のまとめ

本研究では、機械加工面ならびに鑄肌からの球状黒鉛鑄鉄の組織評価について、表面粗さ、残留応力、鑄肌の影響を検証した。渦電流信号分布の分析により、組織や残留応力と表面粗さの影響の分離が可能であり、測定条件(試験周波数)の選択により、表面の影響を軽減して鑄造品の組織・強度評価が可能であることが示唆された。今後は測定プローブ

の改良も含めた測定条件の検討により、鑄肌からの鑄鉄の非破壊評価の実用化を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

堀川 紀孝, 基地組織の異なる球状黒鉛鑄鉄の渦電流信号に及ぼす表面性状の影響, 鑄造工学, 査読有, 85(12),(2013), pp.865-871

〔学会発表〕(計 6 件)

Noritaka HORIKAWA, Changes in Eddy Current Signal by Difference of Ductile Cast Iron Matrix and Surface Roughness, The 5th Japan-Korea Workshop for YFE, 室蘭工大(北海道) (2013)

Noritaka HORIKAWA, Effect of surface roughness on eddy current signal of ductile cast iron with different matrix, The 71st World Foundry Congress, ビルバオ(スペイン), (2014)

堀川 紀孝, 野田裕介, 球状黒鉛鑄鉄の渦電流信号に対する表面加工の影響, 日本鑄造工学会 第 164 回全国講演大会, 京都, (2014)

野田裕介, 堀川紀孝, 球状黒鉛鑄鉄の渦電流試験における測定面加工条件の影響, 日本鑄造工学会 第 166 回全国講演大会, 早稲田大学(東京都), (2015)

本間 渉人, 堀川 紀孝, 鑄肌を有する薄肉球状黒鉛鑄鉄の渦電流信号に対する組織と粗さの影響, 日本機械学会第 23 回機械材料・材料加工技術講演会, 広島大学(広島県) (2015)

Noritaka HORIKAWA, Takato HONMA, Effect of Surface Condition on Eddy Current Evaluation of Ductile Cast Iron Matrix, The 72nd World Foundry Congress, ポートメッセなごや(愛知県), (2016)

6. 研究組織

(1)研究代表者

堀川 紀孝 (HORIKAWA Noritaka)

旭川工業高等専門学校・システム制御情報工学科・准教授

研究者番号: 80344480