

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01299

研究課題名(和文) 交流磁界を使用した石油製油所内の加熱炉鋼管表裏面浸炭深さ同時検査法の開発

研究課題名(英文) Development of inspection method of both front side and rear side carburization depth in heating furnace steel tube using alternating magnetic field

研究代表者

後藤 雄治 (Gotoh, Yuji)

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：00373184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：石油プラントの加熱炉の鋼管は、高温環境で長年使用されているため、表裏面に浸炭が生じる。これらの浸炭深さが増加すると鋼管が突然破断し、大きな事故が発生する可能性がある。この事故を防ぐためには、鋼管の表裏面に生じている浸炭深さを把握することが重要である。本研究では、1つの電磁センサーを使用して2種類の励磁周波数を鋼管に印加させて表裏面に生じている浸炭深さを検出する電磁気検査手法を提案した。ここでは3次元非線形電磁界解析を使用して磁束密度の現象評価を行った。本研究を通して、浸炭層の透磁率と導電率の電磁気特性差を利用することで、鋼管の表裏両方の浸炭深さの検査が可能であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東日本大震災以降、日本では原子力発電所の使用が制限され、火力発電所とその原料供給のための石油製油所の稼働率が一気に高まった。石油製油所は、大震災以前は生産が縮小傾向であったため、中には老朽化が激しく、十分な設備更新が行われないままフル稼働を余儀なくされている製油所も多くある。特に製油所内の加熱炉鋼管の浸炭に伴う破裂事故が近年急増しており、非破壊検査法の開発が強く求められている。しかし、この加熱炉鋼管の浸炭度合いを非破壊で検査できる手法は無い。本研究では、加熱炉鋼管に生じている浸炭度合いを高速かつ簡単に診断する新しい電磁非破壊検査技術の開発を行い、石油製油所の事故を未然に防ぐ事を目的としている。

研究成果の概要(英文)：In the steel tube of a large-sized heating furnace in an oil-refining plant, both the front side and rear side are carburized because of being used for many years in high-temperature environments. If these carburization depths increase the steel tube will explode suddenly and a big accident may occur. Therefore, the measurement of both the front side and rear side carburization depth are important in order to prevent accidents. In this research, an electromagnetic inspection method using two kinds of exciting frequency for the carburized depth of both the front side and rear side of the steel tube is proposed. Both carburization depths are obtained by evaluating the flux density in layers with and without carburization using the 3-D nonlinear FEM. It is shown that the inspection for the carburization depth of both the front side and rear side of the steel tube is possible by using the deference in permeability and conductivity of carburized layer.

研究分野：計測工学

キーワード：石油精製プラント 加熱炉鋼管 表裏面浸炭深さ 交流磁界 三次元非線形磁界解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災以降、それまで稼動が縮小傾向であった石油精製所における非破壊検査の要求が増しており、従来実施していなかった設備においても検査の要望が出始めている。特に加熱炉鋼管内の表裏面浸炭層の検査需要は高く、緊急を要している。近年では、人身事故に発展はしていないものの、加熱炉鋼管の浸炭層増加が原因で発生した中・小規模の爆発事故が全国的に多発しており、検査技術の開発が急がれている。しかし日本国内で、この加熱炉鋼管の表裏面における浸炭度合いを両面同時に非破壊で検査できる手法は無い。我々は以前、非破壊検査企業と共同で X 線や発光分光分析法、超音波法等を使用した非破壊検査法の適応研究を進めた。どれも鋼管肉厚内の表面か裏面のどちらか一方に浸炭層がある場合での検査は行えるものの、表裏面の両面に浸炭層がある場合で、両方の浸炭深さを検査する事は不可能であった。そこで本研究では電磁気検査法に着目し、加熱炉鋼管の表裏面における浸炭度合いを、鋼管の外面側からのみの計測で検査が可能となる新たな電磁非破壊検査法の開発及び実用化を検討する。

2. 研究の目的

東日本大震災以降、我が国では原子力発電所の使用が制限され、火力発電所とその原料供給のための石油製油所の稼働率が一気に高まった。石油製油所は、大震災以前は生産が縮小傾向であったため、中には老朽化が激しく、十分な設備更新が行われなままフル稼働を余儀なくされている製油所も多くある。特に製油所内の加熱炉鋼管の浸炭に伴う破裂事故が近年急増しており、非破壊検査法の開発が強く求められている。本研究では、加熱炉鋼管の表裏面に生じている浸炭度合いを高速かつ簡便に診断する新しい電磁非破壊検査技術の開発を行い、これに伴う石油製油所の事故を未然に防ぐ事を目的としている。

3. 研究の方法

(1) 浸炭層の磁化曲線と導電率の測定

日本で使用されている加熱炉鋼管は外直径 $\phi 114\text{mm}$ で肉厚は 6mm と規格で定められており、材質も STFA26 材で統一されている。加熱炉鋼管では鋼管の表裏面から浸炭層が形成され、浸炭層は最大で約 3.8% の炭素が含まれており、その分布は生層(炭素濃度約 0.27%)まで非線形的であることも分かっている。そこで、本研究では STFA26 材を使用し、人工的に平均炭素含有量が約 3.8% の完全浸炭層と同等の浸炭鋼材を作製し、浸炭が施されていない STFA26 材(炭素濃度約 0.27%)と共に磁気特性($B-H$ 曲線)と導電率の測定を行う。

(2) 電磁気センサの開発

本研究で提案する電磁気センサの鳥瞰図と 1/4 領域モデル案を図 1 に示す。提案する電磁気センサは U 字形の電磁ヨーク材に交流励磁コイル部と、厚さ 1mm の電磁ヨーク板材に巻いた検出コイル部で構成されている。1 つの励磁コイルに高周波交流電流を 1 秒間印加した後低周波交流電流を印加させる。またそれぞれの印加磁界毎に鋼管表面の空气中に分布する交流漏洩磁束を検出コイルで計測するモデルとする。ここでは 3 次元有限要素法の電磁界解析と検証実験から、電磁気センサの最適な形状・寸法や磁化条件等の選定を行う。

(3) 三次元非線形電磁界解析による現象解明

本提案検査手法での現象解明を三次元有限要素法の非線形電磁界解析によって行った。本研究では浸炭の有無による電磁気特性の違いを考慮した step-by-step 法による非線形解析を行った。本解析($\mathbf{A}\text{-}\phi$ 法)の基本方程式は次式で与えられる。

(1)

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad } \phi \right)$$

$$\text{div} \left\{ -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad } \phi \right) \right\} = 0 \quad (2)$$

\mathbf{A} は磁気ベクトルポテンシャルであり、 ϕ はスカラーポテンシャル、 \mathbf{v} は磁気抵抗率、 \mathbf{J}_0 は電流密度、 σ は導電率である。磁気特性の非線形反復計算にはニュートン・ラフソン($N-R$)法を使用した。本研究では、電磁界解析を使用して本提案電磁気検査手法での検査原理の解明や検査条件の選定及び検証実験との比較を行った。

(4) 実物の加熱炉鋼管での検査実験

実際に 20 年以上に渡り石油精製プラントで使用されてきた加熱炉鋼管の一部を切り出し、断面マクロ試験で表裏面浸炭深さが予め把握できている浸炭鋼管を準備し、本提案手法を用いて、検査精度の確認を行う。実物の浸炭鋼管は、人工的に短時間で作製した浸炭鋼管

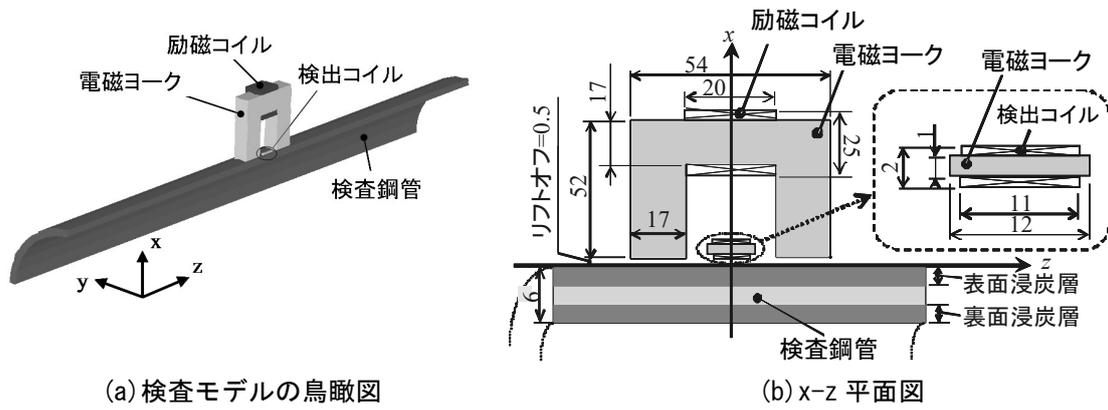


図1 提案電磁気センサと検査モデル(1/4領域)

とは炭素の浸透過程が異なり、また炭素以外の物質の混入や錆、腐食、減肉等の物質・形状・形態変化が生じていることが考えられる。ここでは、これら様々な変化にも影響を受けず、表裏面浸炭深さを検査できる検査条件を、検証実験を中心に実施する。特に、実現場での検査において、最終的な目標値である $\pm 0.5\text{mm}$ の検査精度が達成できるかの検討を行う。

4. 研究成果

(1) 浸炭による電磁気特性の評価

本研究では完全浸炭層(炭素濃度約 3.8%)と生層(炭素濃度約 0.27%)の領域における $B-H$ 曲線と導電率の測定を行った。図2に浸炭材(C:3.8%)と生材(C:0.27%)の $B-H$ 曲線を示し、図3に導電率の測定結果を示す。図2と3から生材に比べ浸炭材は透磁率が低下し、導電率は増加していることがわかった。

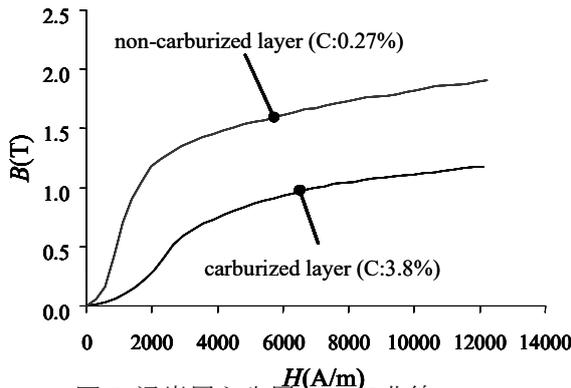


図2 浸炭層と生層の $B-H$ 曲線

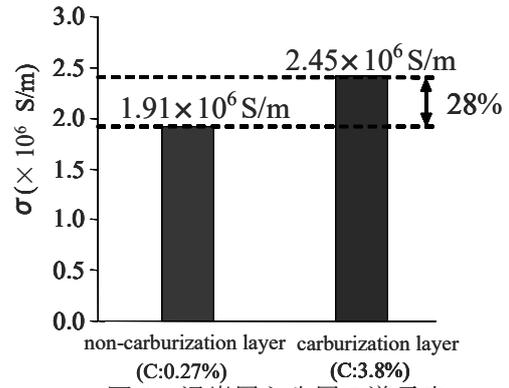


図3 浸炭層と生層の導電率

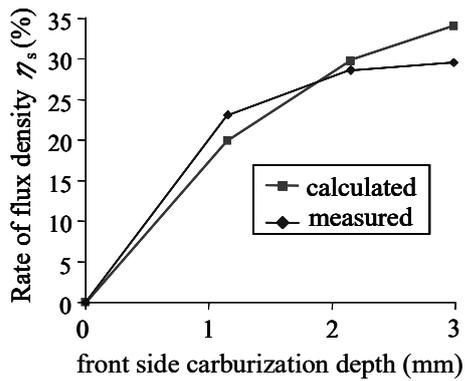
(2) 表裏面浸炭深さ評価法

本提案手法では始めに 500Hz、0.2A の励磁条件で表面浸炭深さ d_s のみを評価し、次に 15Hz、0.2A の励磁条件で裏面浸炭深さ d_o を評価する。本研究ではプラント内で限りなく生材(C \approx 0.27%)に近いと思われる鋼管を予め測定し、その信号を基準とする比較検査による検討を行うこととした。図4に表面と裏面浸炭の実験と解析を比較した結果それぞれ示す。図(a)は表面浸炭層のみが変化した場合の検査結果、図(b)は裏面浸炭層のみが変化した場合の検査結果を示している。図(a)は 500Hz を使用し、横軸に表面浸炭深さ d_s (mm)、縦軸には $d_s=0\text{mm}$ の検出コイルに鎖交した時の磁束密度を基準とした変化率 η_s (%) を示している。変化率 η_s (%) は以下の式によって算出される。

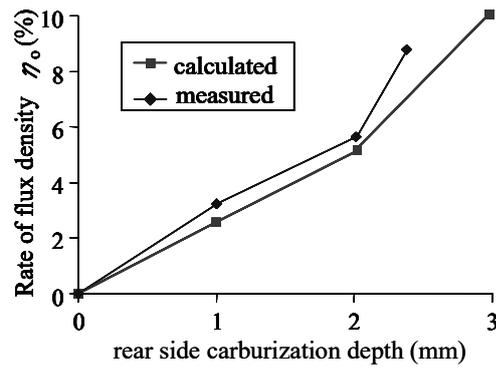
$$\eta_s = \frac{B_{zs} - B_{zs(0.27)}}{B_{zs(0.27)}} \times 100 \quad (3)$$

B_{zs} は任意の表面浸炭深さの鋼管の測定結果を示し、 $B_{zs(0.27)}$ は浸炭が生じていない鋼管の測定結果である基準値を示している。また図(b)は 15Hz を使用し、横軸に裏面浸炭深さ d_o (mm)、縦軸は $d_o=0\text{mm}$ の時の検出コイルに鎖交した磁束密度を基準とした時の変化率 η_o (%) を示している。変化率 η_o (%) は以下の式によって算出される。

$$\eta_o = \frac{B_{zo} - B_{zo(0.27)}}{B_{zo(0.27)}} \times 100 \quad (4)$$



(a) 表面浸炭深さ(500Hz)



(b) 裏面浸炭深さ(15Hz)

図4 検出コイル内に鎖交する磁束密度と浸炭深さとの関係(0.2A)

B_{z0} は任意の裏面浸炭深さの鋼管の測定結果を示し、 $B_{z0(0.27)}$ は浸炭が生じていない鋼管の測定結果である基準値を示している。図4から、実際のプラントで使用された鋼管で、浸炭が生じていない鋼管の測定値を基準とした比較検査では、実験と解析値は同様の傾向を示していることが分かる。

本研究では、検査に使用する浸炭深さ推定に必要な2つの検定曲線を解析によって作成した。図5に励磁条件を500Hz、0.2Aとし、表面浸炭深さ d_s のみをパラメータとした場合の解析によって得られた検定曲線を示す。次に、図6に励磁条件15Hz、0.2Aとし、裏面浸炭深さ d_o のみをパラメータとした場合の解析によって得られた検定曲線を示す。図の複数の曲線は、表面浸炭深さ d_s が各深さで固定された場合をそれぞれ示している。本検査手法では、この図5と図6を使用して表裏面浸炭深さの推定を行う。鋼管の表裏面浸炭深さの検査手順としては、始めに交流磁界条件500Hz、0.2Aで測定を行い、図5の検定曲線を使用して表面浸炭深さ d_s のみを推定する。次に、交流磁界条件を15Hz、0.2Aに変更して検出信号の測定を行う。前に、500Hz、0.2Aの磁界条件で表面浸炭深さが推定されているので、この d_s を使用し、図6の裏面検定曲線を使用して裏面浸炭深さ d_o を推定する。

本研究では以上の手順を使用して、実際の石油精製プラントで約20年間使用された加熱炉鋼管(STFA26)を切り出し、表裏面浸炭深さ測定を行った。結果を図7に示す。図内の横軸は図7(a)に示す鋼管の周方向の角度(22.5deg.ピッチ×16点)を表している。また縦軸は鋼管の内径から外径へ向けた肉厚6mmを表している。なお図内には、本提案手法の妥当性を確かめるために実施した各鋼管の断面マクロ試験による表裏面浸炭深さの測定結果も合わせて表している。図から、誤差が多少見うけられるものの、マクロ試験結果と類似した結果が得られた。

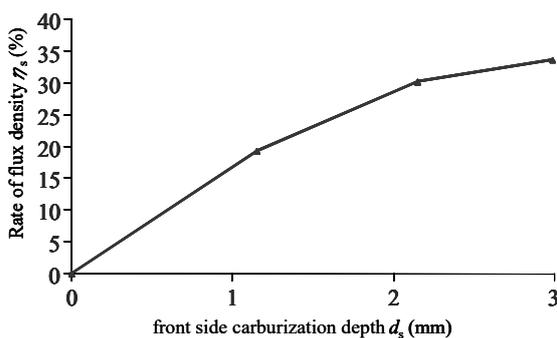


図5 表面浸炭深さが検出磁束密度に及ぼす影響(500Hz, 0.2A, 解析値)

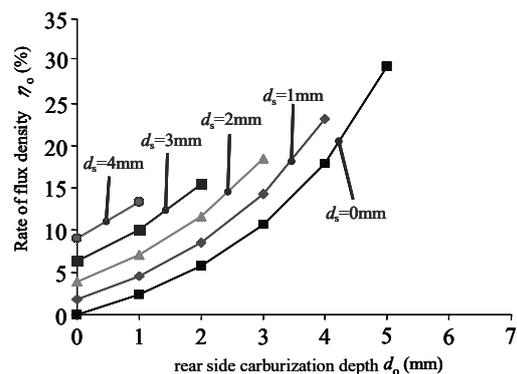


図6 裏面浸炭深さが検出磁束密度に及ぼす影響(15Hz, 0.2A, 解析値)

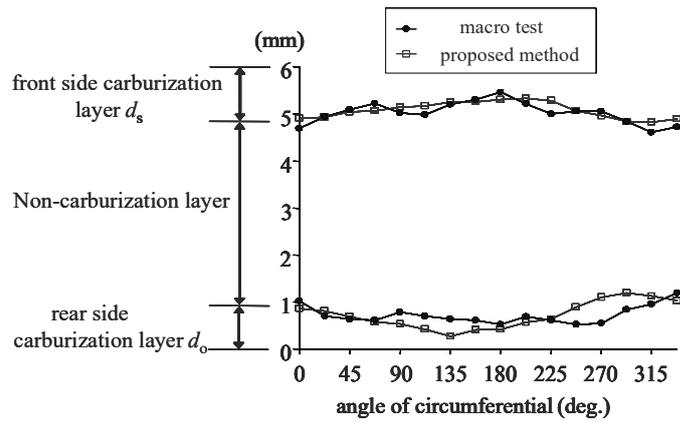
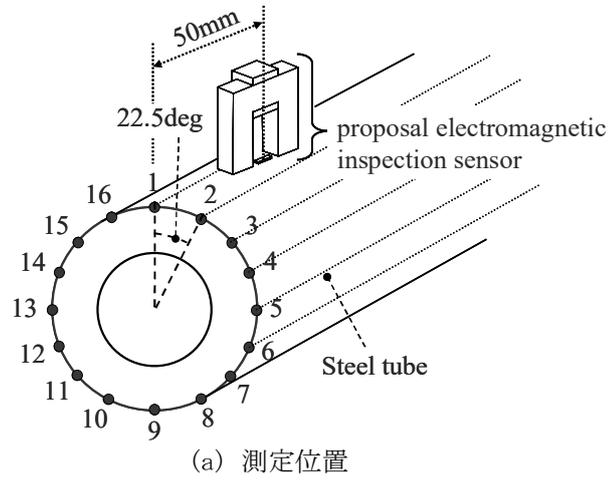


図7 実際のプラントで使用された浸炭層が表裏面に存在する鋼管での評価結果

(3) まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめて示す。

- ① 加熱炉鋼管(STFA26 材)の完全浸炭領域の炭素濃度は約 3.8%であり、浸炭のない領域に比べ約 14 倍程度炭素が浸透していることが分かった。また、完全浸炭領域の最大比透磁率は浸炭のない領域に比べて 69%低下し、導電率は 28%増加していることが分かった。
- ② 500Hz を印加した場合、浸炭層は生層に比べ電磁気特性が低いため、表面浸炭深さの増加と共に鋼管表面に漏れる磁束も増加することが分かった。15Hz を印加した場合、鋼管内の裏面浸炭の増加と共に生層と鋼管表面に分布する磁束も増加するため、裏面浸炭深さの測定が可能であることが分かった。したがって表裏面浸炭深さは、鋼管表面に漏洩する磁束の変化率で評価できることが分かった。
- ③ 本提案手法は 2 種類の周波数 500Hz、15Hz を交互に使用することで表裏面浸炭深さが推定できる可能性がある。しかし、本手法は磁気ヨーク材の両足間の平均的な磁束密度を漏洩磁束として検出し、表裏面浸炭深さに関連付けているため、鋼管軸方向において浸炭深さが著しく変化している場合は、推定誤差が大きくなると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 後藤雄治、久保山瑛基	4. 巻 90
2. 論文標題 直流バイアスを加えた矩形波交流磁界を使用する球状黒鉛鋳鉄板の裏面欠陥試験法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鑄造工学	6. 最初と最後の頁 124-129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Yoshioka, T. Marumoto, and Y. Gotoh	4. 巻 59
2. 論文標題 Electromagnetic Inspection Method of Carburization Depth Inside and Outside of Heating Furnace Steel Tube	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 1283-1290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Yoshioka, T. Tujigou and Y. Gotoh	4. 巻 53
2. 論文標題 Proposal of Electromagnetic Inspection of Opposite Side Defect in Steel using 3-D Nonlinear FEM Taking Account of Minor loop and Residual Magnetism	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Gotoh and N. Shigematsu	4. 巻 53
2. 論文標題 Slack Inspection Method of High Tension Bolt using Electromagnetic Field without Influence of Lift-off Between Bolt Head and Inspection Sensor	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Sasayama, Y. Gotoh and K. Enpuku	4. 巻 53
2. 論文標題 A Gastric Tube Monitoring System for Clinical Applications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S.Yoshioka and Y.Gotoh	4. 巻 53
2. 論文標題 Proposal of Thickness Measurement Method of Steel Plate with High Lift-Off using Pulsed Magnetic Field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 後藤雄治, 久保山瑛基	4. 巻 90
2. 論文標題 直流バイアスを加えた矩形波交流磁界を使用する球状黒鉛鋳鉄板の裏面欠陥試験法の提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鑄造工学	6. 最初と最後の頁 124-129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Y.Gotoh, S.Onita, T.Horino, and Y.Misaka
2. 発表標題 Detecting method of hardened depth in surface hardened steel by magnetic field on steel
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Conferece (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y.Gotoh, N.Shigematsu and T.Yamaguchi
2 . 発表標題 Slack Inspection Method of High Tension Bolt using Electromagnetic Field without Influence of Lift-off Between Bolt Head and Inspection Sensor
3 . 学会等名 IEEE International Magnetics Conferece (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Yoshioka, K. Shimamoto and Y.Gotoh
2 . 発表標題 Proposal of thickness measurement method of steel plate with high Lift-Off using pulsed magnetic field
3 . 学会等名 IEEE International Magnetics Conferece (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S.Yoshioka, E. Kuboyama and Y.Gotoh
2 . 発表標題 Proposal of evaluation method of opposite side depth on steel plate using magnetic field of square wave on direct current bias
3 . 学会等名 International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Yoshioka, T. Marumoto and Y.Gotoh
2 . 発表標題 Electromagnetic Inspection Method of Carburization Depth Inside and Outside of Heating Furnace Steel Tube
3 . 学会等名 International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----