

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23710194

研究課題名(和文) 交流磁界を使用した高張力ボルトの緩み非破壊検査法の開発

研究課題名(英文) Development of slack non-destructive inspection method of the high tension bolt using alternating magnetic field

研究代表者

後藤 雄治 (Gotoh, Yuji)

大分大学・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、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：高張力ボルトは自動車部品や高架橋等に多く使用されている。これらのボルトの緩みは重大事故につながる恐れがあることから、定期的な検査は大変重要である。本研究では、これらのボルトの締結によって生じるボルト頭部の圧縮応力を磁気特性変化として検出してボルトの緩みに換算する検査手法の検討を行った。ここでは、三次元有限要素法の圧縮応力と磁気特性の非線形を考慮する電磁界解析によって、この提案された検査手法の有用性が評価された。

研究成果の概要(英文)：Many bolt are used in the automobiles or bridges. Since loosening of the bolts many cause serious accidents, regular inspection is very important. In this paper, the slack inspection technique of high-tension bolt of detecting the magnetic property of changing by bolting stress was examined. The proposed bolt slack inspection technique was investigated in 3-D stress analysis and nonlinear electro magnetic FEM(finite element method).

研究分野：社会・安全システム科学

科研費の分科・細目：社会システム工学・安全システム

キーワード：高張力ボルト 三次元応力解析 三次元非線形電磁界解析 交流磁界 非破壊検査

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、高張力ボルトは各種プラント等に多く使用されている。それらの高張力ボルトに緩みが進行し、脱落すれば、破損事故につながる恐れがある。そのため高張力ボルトの緩み検査技術の開発が必要とされている。現場では多くの場合、ボルトの緩みはトルクレンチで点検されている。しかし、摩擦力のばらつきによりトルクレンチの値と実際の軸力には不一致が生じ、またボルトは締め付けすぎても緩みが生じるため、正確な評価が行えない。高精度なボルトの緩み検査法は超音波を用いた手法が挙げられる。しかし、この手法はボルト頭部にペンキ等のコーティングが存在する場合や、刻印等における凹凸があるボルトへの適用が難しく、また水等の媒体が必要となり、現場ではほとんど使用されていない。そこで本研究では、電磁現象を利用した高速かつ簡便に測定可能な検査手法の提案を行った。

2. 研究の目的

高張力ボルトは多くの場合、強磁性を示す鋼材が使用される。鋼材は弾性領域による伸びや圧縮によって透磁率が変化する。そこで締め付けによる圧縮によって変化するボルト頭部の透磁率変化を検出することで、ボルトの緩みが評価できる可能性がある。本研究ではまず、高張力ボルト (SCM435 材) と締め付け鋼板 (SS400 材) の圧縮応力に伴う初期磁化曲線と導電率の測定を行った。次に、ボルトを締め付けた際のボルト頭部における圧縮応力分布を有限要素法の三次元応力解析で求め、各応力分布に見合った初期磁化曲線を考慮した三次元非線形電磁界解析を利用して、締め付けによって変化するボルト頭部の磁気特性差を検出する電磁気検査センサを提案した。また数値解析と検証実験によって本提案検査手法の検査原理の解明や実用性の検討も行った。

3. 研究の方法

(1) 圧縮応力による電磁気特性測定

本研究では検査対象を、高張力ボルトやワッシャ、ナットとして多く使用されている SCM435 材と、締め付け鋼板として一般構造用鋼材である SS400 材とした。SCM435 材と SS400 材は  $5 \times 5 \times 150\text{mm}$  の直方体に加工し、圧縮応力の負荷に伴う初期磁化曲線と導電率の変化の測定を行った。実験条件を表 1 に、また実験装置を図 1 にそれぞれ示す。図は 1/2 領域を示し、弾性領域内で試験体を x 方向に圧縮する装置を示す。なお、SCM435 材の弾性

限界圧縮応力は 400MPa で SS400 材は 200MPa である。試験体を圧縮させる際、試験体の 4 側面 (x-z 面、x-y 面) に貼り付けたひずみゲージを用いて試験体が一様に x 方向に圧縮されているか、監視を行いながら圧縮を行った。磁気特性の測定は、励磁コイルに 0.5Hz の低周波交流磁界を印加し試験体が一様に磁化される様に二つのヨークを用いて磁束の閉ループが形成されるように工夫している。また、試験体内の磁束密度  $B$  は、鋼材に直接巻

表 1 圧縮応力下磁気特性測定条件

試験片 (SCM435, SS400)	長さ=150mm 1辺 5mm の正方形断面
検出コイル-1 (B コイル)	20 巻き、外径: 0.1mm 断面積=25.0mm <sup>2</sup>
検出コイル-2 (H コイル)	200 巻き、外径: 0.1mm 断面積=1.74mm <sup>2</sup>
SCM435 の圧縮応力	0~400MPa
SS400 の圧縮応力	0~200MPa

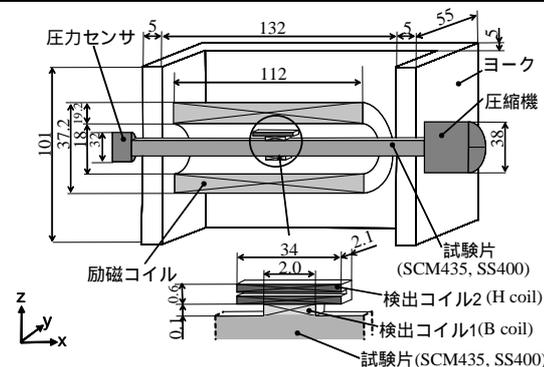
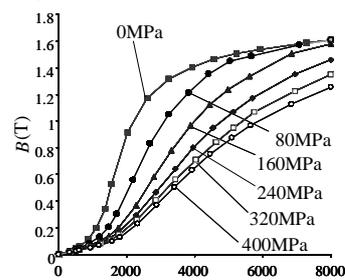
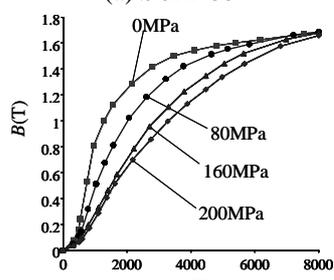


図 1 圧縮応力下における磁気特性測定装置 (1/2 領域)



(a) SCM435



(b) SS400

図 2 各圧縮応力下における磁化特性(0.5Hz)

いている検出コイル1のBコイル(20ターン)で、印加磁界の強さ  $H$  は検出コイル2のHコイル(200ターン)でそれぞれ出力電圧として測定する。また、Hコイルのエリアターンを校正するために、Hコイルよりも十分に長い巻幅を有し、中心付近の磁界分布をほぼ均一としたソレノイドコイル(長さ300mm、内径25mm、520ターン)を作成した。次に、その中心部にHコイルを入れ、様々な一様磁界を発生させて、Hコイルの断面積を確定した。

以上の手順で得られた各圧縮応力に伴う初期磁化曲線を図2にそれぞれ示す。図から、SCM435材とSS400材は両方とも圧縮応力が強くなるにつれ、同じ磁界の強さにおける磁束密度が小さくなることがわかった。次に各圧縮応力における導電率も測定した。その結果、導電率は圧縮応力による変化は無く、SCM435材は  $3.7 \times 10^6 \text{S/m}$ 、SS400材は  $5.4 \times 10^6 \text{S/m}$  で一定であることがわかった。

### (2) 電磁気検査センサの提案

本研究では、M10六角ボルトを検査対象とし、図3に示す電磁気検査センサを提案した。本提案電磁気検査センサはM10六角ボルトに合わせ、ヨーク、励磁コイル、検出コイルで構成される。励磁コイルは、検出コイルの外周に巻き、共にボルト頭部の形状に合わせて六角形に巻いている。ボルト頭部側面は締め付けによってボルトの軸方向に圧縮応力が加わるため、圧力に比例して透磁率が低下することが図2から予想される。そこで、この透磁率の変化量を検出コイル内に鎖交する磁束密度の変化分として検出し、締め付け度合いに換算する。

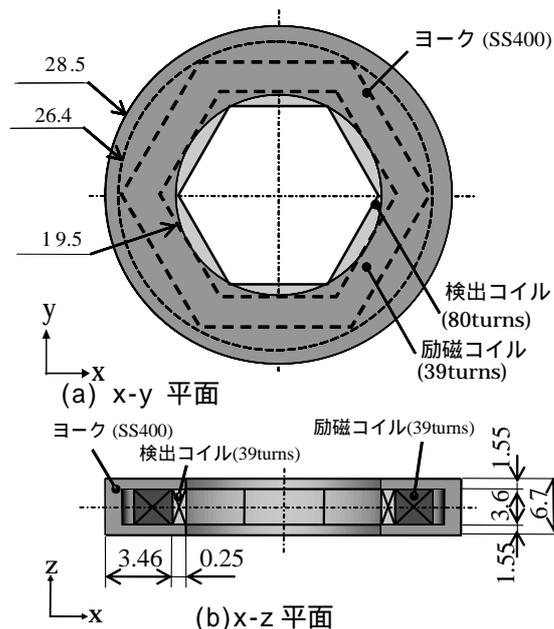
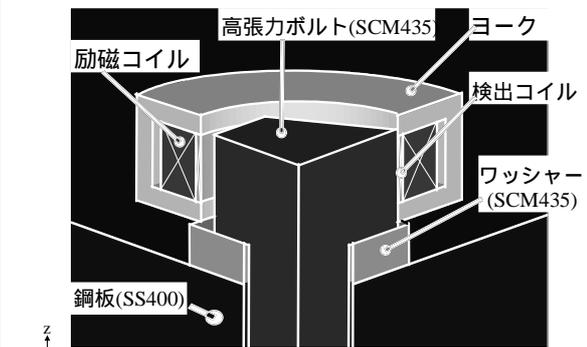


図3 本研究で提案した電磁気センサ

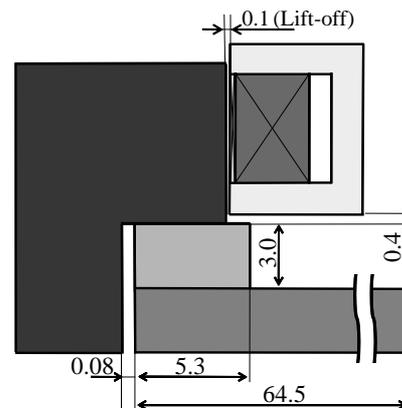
### (3) 応力分布を考慮した電磁界解析

ここでは、図3に示す提案電磁気検査センサをボルト頭部に配置し、交流磁界を印加した際の検出コイル内に得られる磁束密度を、応力分布を考慮した電磁界解析で算出した。解析ではまず、高張力ボルトで鋼板を弾性領域内で締め付けた時の、ボルト、ワッシャー及び鋼板内の圧縮応力分布を有限要素法の三次元応力解析で求めた。次に各要素内の応力に見合った初期磁化曲線を、図2を使用して線形補間で求め、三次元交流非線形電磁界解析で検出コイル内に鎖交する磁束密度を算出した。解析モデル(1/4領域)を図4に示す。

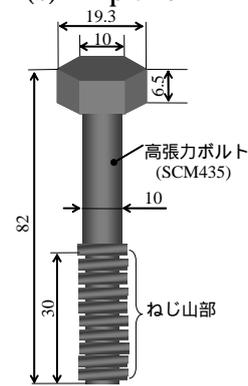
まず、弾性領域における高張力ボルトの各軸力に伴う三次元応力解析を行った。本解析では図4(c)に示す、M10の単一六角半ねじボ



(a) 鳥瞰図



(b) x-z plane



(c) 高張力ボルト

図4 検討モデル(1/4領域)

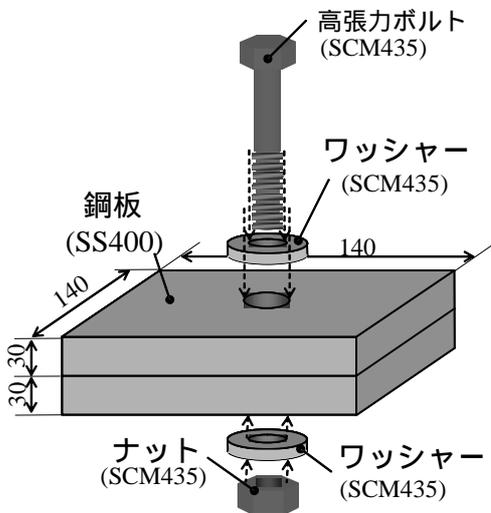


図 5 応力解析に用いた単一六角ボルト締め付モデル

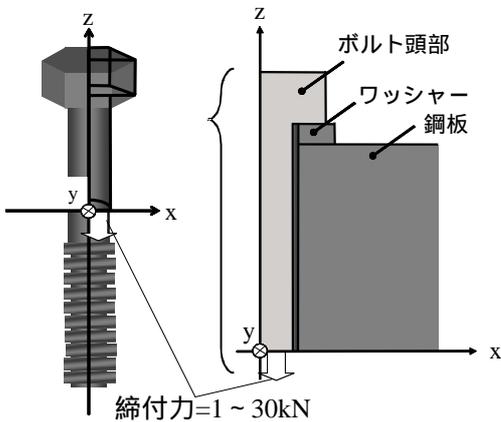


図 6 ボルト軸方向の応力モデル

ルトで、ボルトの足先部のみにねじ山が切っ  
てあるボルトを、図 5 に示す様に締め付け  
鋼板にワッシャを通して挿入し、ナットと共に  
締め付けるモデルを検討した。応力解析では  
解析領域を、ねじ部を省略した 1/4 領域とし、  
図 6 に示すようにボルト軸底面部を -z 方向に  
引っ張ることにより締め付けを解析的に模  
擬した。ボルトの軸力が 30kN における応力  
の分布を図 7 に示す。図はボルト頭部近傍の  
x-z 平面を表し、z 方向の応力  $\sigma_z$  のみを示し  
ている。図より、締め付けによるボルト頭部  
側面に圧縮応力が生じていることが理解で  
きる。

ここでは、1~30kN の各ボルトの軸力に伴  
う応力分布を考慮した三次元交流非線形電  
磁界解析を行い、提案電磁気検査センサ内の  
検出コイル内に鎖交する磁束密度変化を檢  
討した。非線形電磁界解析に用いたボルト、  
ワッシャ及び締め付け鋼板の磁気特性は図 2  
を基に、各応力に対応した初期磁化曲線を線  
形補間で算出した。また、強磁性体の磁気特  
性は等方性と仮定し、非線形計算を行った。

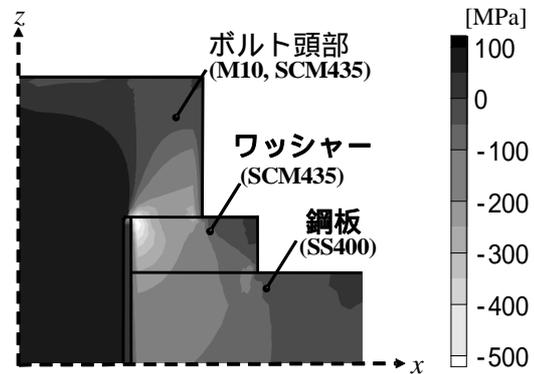


図 7 ボルト頭部近傍の応力解析結果 (30kN)

$$\frac{V_b - V_a}{b - a} = \frac{V_n - V_a}{n - a} \quad (V_a < V_n < V_b) \quad (1)$$

なお、ヨークの磁気特性は x、y、z の 3 方向  
とも線形(比透磁率:  $\mu_r=150$ )とした。本解析  
では一次六面体辺要素による三次元有限要  
素法を使用した。電磁界解析では、磁気ベク  
トルポテンシャル  $A$  と電気スカラーポテンシ  
アル  $\phi$  を未知数とした三次元電磁界解析(A-  
法)を使用し、高張力ボルトやワッシャ、締  
め付け鋼板の初期磁化曲線と渦電流を考慮  
した非線形解析を行った。非線形電磁界解析  
では、強磁性体の  $B-H$  曲線を磁気抵抗率  
( $=1/(\mu_0 \times \mu_r)$ )と磁束密度  $B$  の 2 乗  $B^2$  の  
 $-B^2$  曲線に変更して計算を行う。図 8 に、  
非線形電磁界解析で使用する  $-B^2$  曲線を示  
す。図中の実線は例として、応力  $a$  と応力  $b$   
時( $a < b$ )の  $-B^2$  曲線を示している。今、ある  
要素に任意の応力  $n$ ( $a < n < b$ )が加わっていると  
する。この時、要素内の磁束密度の 2 乗( $B^2=x$ )  
に対応する磁気抵抗率  $\nu_n$  は、式(1)を使用し  
て線形補間で求めた。なお式(1)中の  $a$  と  $b$   
は、 $B^2=x$  における応力  $a$  及び応力  $b$  の磁気抵  
抗率をそれぞれ示している。この線形補間計  
算を行い、任意の応力に対応する初期磁化曲  
線を求めて非線形電磁界解析を行う。

本提案電磁気検査センサで 1kHz、0.5A の  
交流磁界を印加させた場合の磁束密度ベク  
トル分布を図 9 にそれぞれ示す。図より、磁

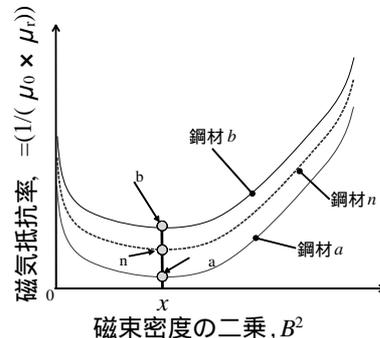


図 8  $\nu-B^2$  曲線を使用した線形補完例

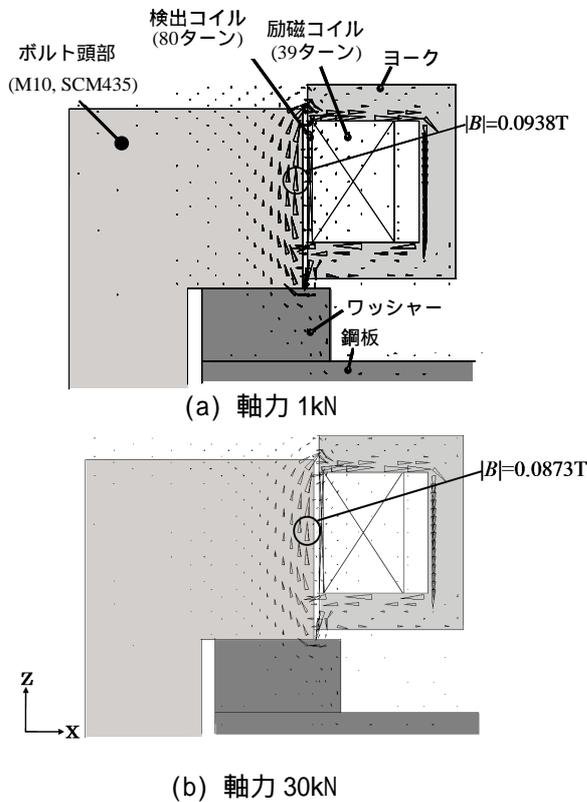


図9 各軸力における磁束分布(1kHz, 0.5A)

束は提案電磁気検査センサのヨークからワッシャを通りボルト頭部側面へ進入し、再び提案電磁気検査センサのヨークへ戻る閉ループを形成していることがわかる。また、図中に示す $|B|$ は検出コイル直下のボルト頭部側面に分布する磁束密度の値を表している。これらの結果からボルトの軸力が増加するにつれてボルト内側面の磁束密度が減少することがわかる。図からボルトの軸力が1~30kNの間でボルト側面の磁束密度が $6.5 \times 10^{-3}T$ 減少した。

#### (4) 検証実験

本検査手法における応力分布を考慮した非線形電磁界解析の信頼性を検証するため、検証実験を行った。実験モデルを図10に示す。本検証実験で使用したボルトやナット、ワッシャ、締め付け鋼板の全ては同ロットで製作されたものを使用し、締め付け鋼板は焼鈍材を使用している。検証実験では、全ての部品において1回の測定で使い切りとし、計5回の測定の平均値を示している。ここでは、SCM435の高張力ボルト(M10 単一六角半ねじボルト)をワッシャ(SCM435材)に挿入して締め付け鋼板(SS400材)に通すモデルを検討した。実験ではレンチを用いてナットを目標の軸力になるまで締め付け、本提案電磁気検査センサを用いて測定を行った。この時、基準

となる高張力ボルトの軸力は、ボルト軸中心部に埋め込んでいるひずみゲージによって測定した。また提案電磁気検査センサの励磁電流は0.5A、励磁周波数は1kHz一定とし、検出コイルに鎖交する磁束密度の最大値を測定し、ボルトの各軸力による変化率を検討した。実験結果を図11に示す。なお、図の縦軸は検出コイル内に得られる磁束密度の減衰率 $B_z$ を算出し、また比較のため応力分布を考慮した非線形電磁界解析結果も示している。図より、実験と解析では同じ傾向が見られ、本解析手法の信頼性が確認できた。

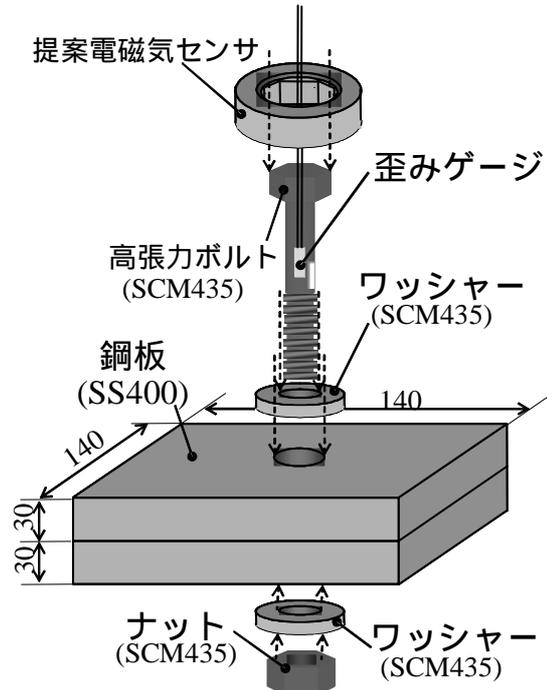


図10 検証実験モデル

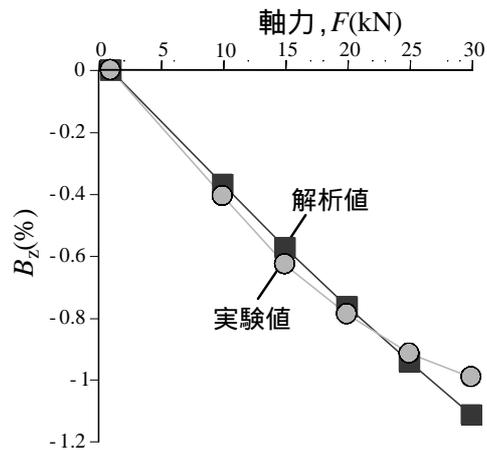


図11 検証実験結果(1kHz, 0.5A)

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 高張力ボルトに多く使用されている鋼材は、圧縮応力を受けると磁気特性が低下

- する。しかし、導電率は変化しない。
- (2) 高張力ボルトの軸力が増加すると、ボルト頭部接合付近の透磁率が減少するため、その変化分を本提案電磁気検査センサで検出することで、高張力ボルトの緩みを非破壊的に検査出来ることを確かめた。
  - (3) 本研究における応力解析は、ボルトやワッシャ、鋼板等における接合面を固着した近似計算とした。しかし、本来、すべりや摩擦、接触面の表面状態、面圧および接触変形などに依存するヒステリシスを含む現象を考慮して解析を行う必要がある。電磁界解析においても、圧縮、引張り、ねじれ方向等の全応力における磁化曲線を測定し、これら全てを考慮した非線形解析を行う必要がある。これらに関しては今後の検討課題としている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

向井健、後藤雄治、上野純平、岡城康治、笠原康正、”小型電磁気センサを利用したダクタイル鋳鉄の圧縮応力測定の検討”、*鋳造工学*、査読有、vol.85, no.12, 2013, pp.872-880.

Y.Gotoh, H.Jinnai, Y.Morimoto, and N.Takahashi,” Proposal of Electromagnetic Inspection Method of Tensile Strength in Steel Without Influence of Lift-Off Between Steel and Inspection Probe”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 査読有, vol.49, no.5, 2013, pp. 2053-2056.

手嶋康暁、後藤雄治、高橋則雄、“電磁現象を利用した高張力ボルトの緩み非破壊検査手法”、*非破壊検査*、査読有、vol.61、no.5、2012、pp.227-234.

Y.Gotoh, Y.Teshima and N.Takahashi,” Electromagnetic Inspection Method of Slack of High Tension Bolt ”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 査読有, vol.60, no.10, 2011, pp. 608-614.

〔学会発表〕(計8件)

向井健、後藤雄治 “電磁現象を利用した高張力ボルトの緩み非破壊検査手法 (三次元応力・交流非線形電磁界連成解析) ”、日本非破壊検査協会、表面3部門合同研究集会、pp.11-14、2013年10月11日、大分大学  
 上野純平、向井健、後藤雄治 “小型電磁気センサを利用したダクタイル鋳鉄の圧縮応力測定の検討”、実践教育研究発表会、実践教育訓練研究協会、C-6、p43、2013年8月24日、関東職業能力開発大学校  
 上野純平、後藤雄治、向井健、岡城康治、笠原康正、高橋則雄 “小型電磁気センサを

利用したダクタイル鋳鉄の圧縮応力測定の検討”、日本鋳造工学会、第162回全国講演大会、p.53、2013年5月26日、山梨大学、甲府キャンパス

上野純平、向井健、後藤雄治、岡城康治、笠原康正、高橋則雄 “小型電磁気センサを用いたダクタイル鋳鉄の圧縮応力測定の提案”、日本非破壊検査協会、九州支部、研究発表会、pp.9-12、2013年4月19日、九州機械工業振興会館

上野純平、向井健、後藤雄治、岡城康治、笠原康正、高橋則雄、”小型電磁気センサを利用したダクタイル鋳鉄の圧縮応力測定の検討”、第16回表面探傷シンポジウム、日本非破壊検査協会、pp.55-58、2013年3月19日、メルパルク京都

後藤雄治 “電磁界を利用した高張力ボルトの緩み検査センサの開発”、建設施工と建設機械シンポジウム、(社)日本建設機械施工協会、pp.228-238、2012年11月8日、機械振興会館

向井健、上野純平、後藤雄治、高橋則雄、岡城康治 “小型電磁気センサを利用したダクタイル鋳鉄の圧縮応力測定の検討”、第161回全国講演大会、(社)日本鋳造工学会、p.115、2012年10月14日、いわて県民情報交流センター

向井健、上野純平、後藤雄治 “圧縮応力下における磁気特性測定”、実践教育研究発表会、実践教育訓練研究協会、p.42、2012年、9月20日、神奈川県立産業技術短期大学校

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

後藤 雄治 (GOTOH YUJI)

大分大学・工学部・機械・エネルギーシステム工学科・准教授

研究者番号：00373184