

# 磁気計測による鋼板材料の微小欠陥・疲労度可視化システムの開発

研究代表者 岡山大学大学院自然科学研究科 堺 健司

## 1. はじめに

鋼板は建造物や橋梁，船舶などに使用されており，現代社会において重要な材料の1つである．鋼板が長年にわたって繰り返し力を受けると微小欠陥が発生した後欠陥が広がり，場合によっては鋼板の破壊まで進展する恐れがある．そのため，長期間鋼板が使用される建造物では定期的な検査や設備の更新が必要となる．特に現在の日本では，高度経済成長期に建設された構造物が耐用年数を迎える時期となっているが，コスト高を理由に精密な検査や設備の全面的な更新は思うように進んでいないのが現状である．

このような状況から鋼板の損傷や疲労度合いを早期にかつ簡便に検査することは，社会の安全性を考えるうえで非常に重要な課題である．また疲労度を適切に評価することは，設備全体ではなく疲労の生じた部分のみを交換することを可能にし，経年設備を有効に使用できるという利点もある．そこで，これまでに様々な原理を応用した非破壊検査法が提案され，実際の検査にも応用されている．例えば X 線を用いた検査では内部の構造を可視化することが可能であり，精度の高い非破壊検査ができる．また，超音波を用いた非破壊検査法も研究されており，構造物内部の傷などを検出することが可能である．

しかし，これらの検査法はある程度鋼板に傷やき裂が生じたものを対象としており，損傷が表面化していない鋼板の微小欠陥や疲労の発見は難しい．また，X 線は放射線を使用するため装置が大型になる点や安全性の問題があり，超音波は試料に接触しなければいけないという問題点もあるため，微小欠陥や疲労度を簡便かつ短時間に検出することは難しい．

そこで本研究では磁気を用いた非破壊検査法を応用し，鋼板の疲労度を検出・可視化するシステムについて検討を行った．これまでに磁気を用いた非破壊検査法には様々な方式のものが提案されているが [1-6]，今回は試料の内部に存在する欠陥も検出可能な低周波磁場を用いた漏洩磁束探傷法に着目しシステムの開発を行った．漏洩磁束探傷法は，試料内に磁束を通過させ，試料内に欠陥が存在する場合に透磁率の変化で漏洩する磁束を試料の表面上で検出し，欠陥などの検出を行うものである．疲労により鋼板内部の組織が変化し磁気特性が変化すると考えられ，疲労部の漏洩磁束分布をマッピングし可視化することで，鋼板の疲労に起因する磁場分布の変化を検討することが本研究の目的である．我々はこれまでに，漏洩磁束探傷法で検出した磁場の強度だけではなく位相成分にも着目することで，鋼板の裏面欠陥を精度よく検出できることを報告した[7]．今回はこの解析手法も適用し，応力を加え疲労を蓄積した部分の磁場分布を計測して，測定結果をマッピングすることで視覚的にもわかりやすい評価方法を検討した．また，測定時間，労力の低減と作業者の技量に依らず再現性の高い結果を得るため，磁場分布を自動で計測するシステムの構築を行った．

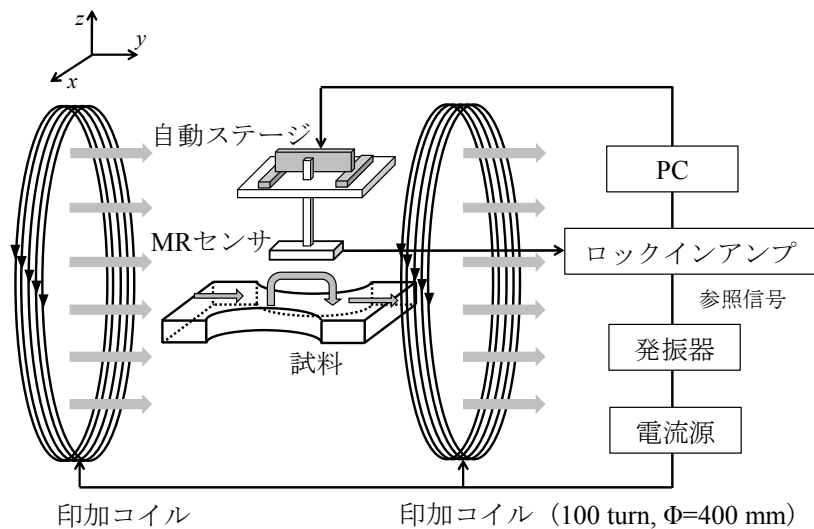
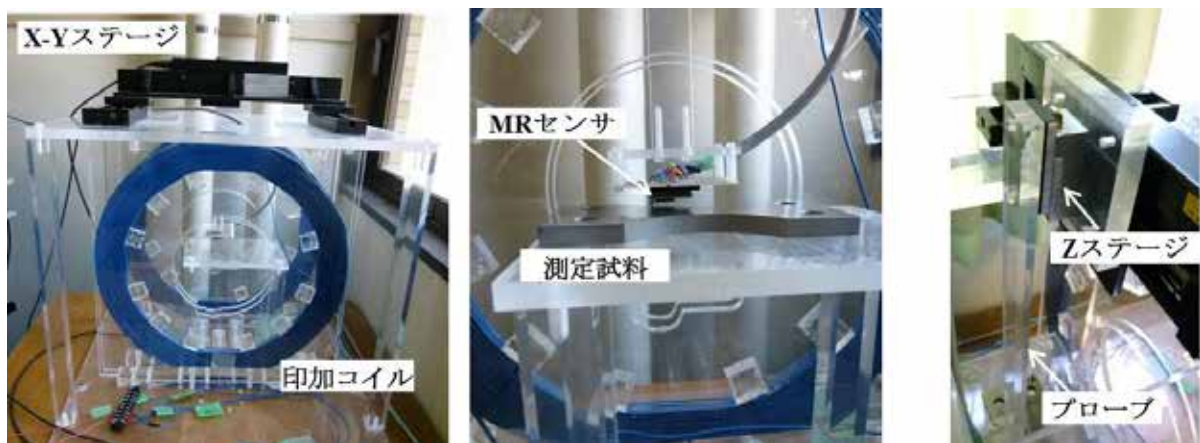


図1 漏洩磁束探傷法を用いた磁場分布自動計測システムの構成



(a) 装置全体

(b) 測定試料と磁場検出部

(c) プローブの高さ調整

図2 作製した自動計測システム

## 2. 磁場分布計測システムの構成

図1に本研究で開発した漏洩磁束探傷法による磁場分布自動計測システムの構成を、図2に自動計測システムの様子を示す。磁場の検出には3軸のMRセンサ(Honeywell, HMC2003)を使用した。MRセンサは検査プローブに取り付け、検査プローブをPC制御可能なXYステージ(COMS, PM80B-100X)に固定することでMRセンサをx-y平面上で走査し自動計測できるようにしている。測定試料に磁場を印加するため、図1、図2(a)に示すようにヘルムホルツコイルを用いて磁場を印加した。コイルの直径は400mmで、コイル1つの巻き数は100回である。

試料から発生する磁場の分布計測は以下のようにして行った。まず、交流電流源と発振器

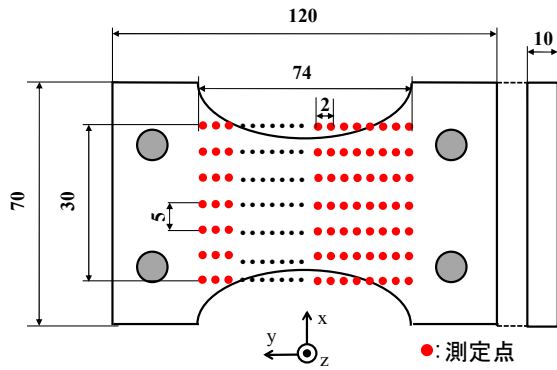


図3 測定試料

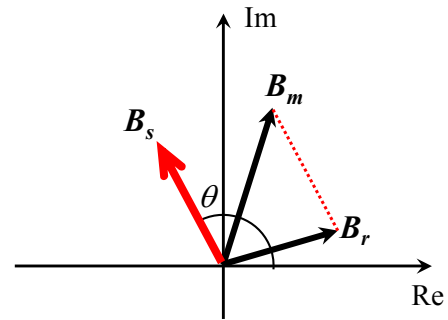


図4 測定試料

を用いてコイルに交流電流を流し、交流磁場を発生させる。表皮効果の影響を避けるため、低周波の磁場を印加した。このコイルで発生した磁束は試料内を通過し、欠陥や疲労部では周囲の媒質と透磁率が異なるため磁束が漏洩すると考えられる。この漏洩した磁束を試料上部に設置したMRセンサで検出した。検出した磁場は、発振器の出力を参照信号として、ロックインアンプにより印加磁場の周波数成分のみを取得する。実際の測定では、X、YステージのモータをPCで制御し、測定点に移動、MRセンサの出力からロックインアンプを通して取得したデータをPCに記録、次の測定点へ移動という動作を繰り返し行うことで平面内の漏洩磁束分布を取得した。

### 3. 実験方法

今回使用した試料の形状を図3に示す。試料には大きさ  $70 \times 120 \text{ mm}^2$ 、厚さ  $10 \text{ mm}$  の鋼板 (SS400) を使用し、中心部に応力を集中させるため図3のようなくびれ型の加工を施してある。応力の印加はシェンク式の繰返し疲労試験機を用いて行い、図1のy方向に応力が加わるようにした。今回は応力を3h加えた試料を準備し、応力を加えていない試料の磁場分布を比較した。応力振幅は  $294 \text{ N/mm}^2$ 、試験速度は  $30 \text{ Hz}$  である。なお、疲労試験機で応力を加え続けた結果、3.9hで破断が起ることを確認している。

磁場分布の測定は、印加コイルに  $50 \text{ Hz}$ 、 $1 \text{ A}$  の正弦波電流を加え、図1のx、y、z方向の磁場を測定した。測定範囲は図3に示すように試料中心部の  $30 \times 74 \text{ mm}^2$  とし、1ライン37点、7列の計259点で行い、各ラインにおける測定点の間隔は  $2 \text{ mm}$ 、各ライン間の距離は  $5 \text{ mm}$  とした。また、図2(c)に示した手動ステージを用いて、各測定時に試料とMRセンサの距離が  $1 \text{ mm}$  になるようにした。

検出した磁場は試料からの発生した磁場信号以外の情報も含まれているため、以下のような解析方法で試料からの応答磁場のみを取り出した。まず、ロックインアンプを用いて印加磁場と同じ周波数成分の磁場強度と位相成分を検波する。試料を設置していない状態の磁場ベクトル  $B_r$  と試料を設置した状態の磁場ベクトル  $B_m$  を測定し、これらを差分した  $B_s$  を求める。 $B_r$ 、 $B_m$ 、 $B_s$  の関係を図4に示す。 $B_r = (x_1, y_1)$ 、 $B_m = (x_2, y_2)$  とすると  $B_s$  は以下の式で表される。

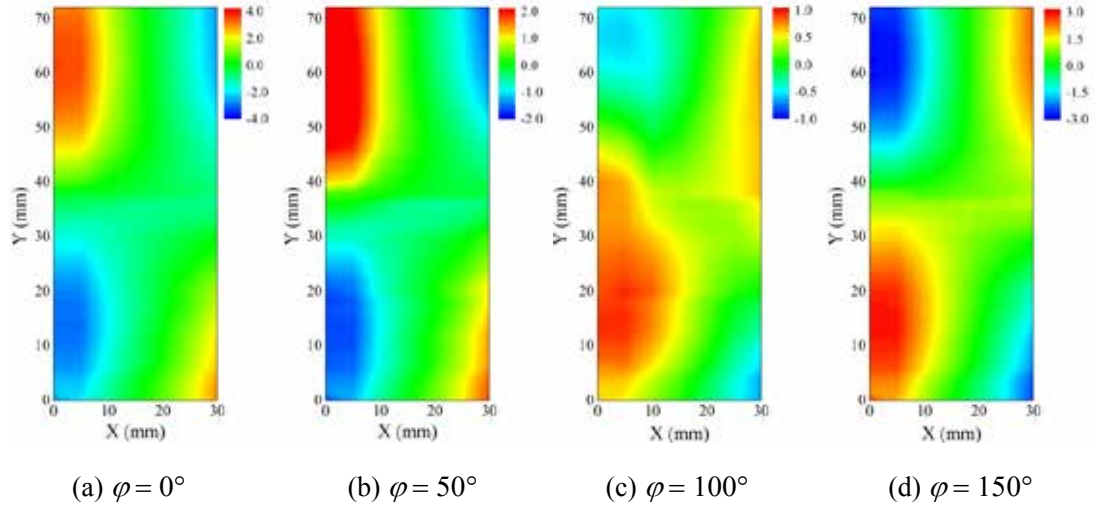


図5 疲労なしの試料で $\varphi$ を変化させた場合のx方向の磁場強度マッピング

$$\mathbf{B}_s = \mathbf{B}_m - \mathbf{B}_r = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$$

$$|\mathbf{B}_s| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)$$

さらに、 $\mathbf{B}_s$ の位相 $\theta$ に任意の位相シフト量 $\varphi$ を加算した $(\theta + \varphi)$ を位相とする虚数成分 $B_{imag} = |\mathbf{B}_s| \sin(\theta + \varphi)$ の値を算出した。自動計測システムで測定した各点における $\mathbf{B}_s$ について $\varphi$ の値を変化させてマッピング図を作成し、応力を加えたことによる磁場の変化を調べた。

#### 4. 実験結果

まず、位相シフト量 $\varphi$ の値による磁場分布の変化を確認するため、応力を加えていない健全な試料について、x方向の磁場を測定し3. で述べた $B_{imag}$ を算出してマッピングを作成した。位相シフト量 $\varphi$ は $10^\circ$ ごとに変化させて磁場分布の変化を確認したが、図5にはその中で代表的なものを示している。図中に示したカラーバーの単位は $\mu\text{T}$ である。位相シフト量が $\varphi = 0^\circ$ と $\varphi = 50^\circ$ の場合、磁場の強度に変化はあるものの磁場の分布に大きな差は見られなかった。一方、 $\varphi = 0^\circ$ と $\varphi = 100^\circ$ では $B_{imag}$ の分布に変化が見られ、 $\varphi = 0^\circ$ と $\varphi = 150^\circ$ を比較すると $B_{imag}$ の正負が反転したようなマッピングが得られた。このような結果は以前の報告例でも確認されており[7]、 $\varphi$ を変化させた磁場分布をマッピングにすることで、試料内部の磁気特性変化のみ反映した画像を取得できると考えられる。

次に応力を加えた鋼板と加えていない試料の磁場分布を比較した。どちらの試料もx, y, z方向の磁場応答を測定し、検出した磁場について $\varphi$ を $10^\circ$ ごとに変化させて $B_{imag}$ のマッピングを作成した。その結果、 $\varphi = 50^\circ$ とした場合x, y方向の $B_{imag}$ に違いが見られた。図6, 7にその結果を示す。図5と同様にカラーバーの単位は $\mu\text{T}$ である。図6に示したx方向の磁場分布について、応力を加えていない場合、中心部付近で $B_{imag}$ 分布に変化が生じているが、応力を加えた場合は中心部ではほぼ一樣な分布となっている。また、図7のy方向の磁場分布に

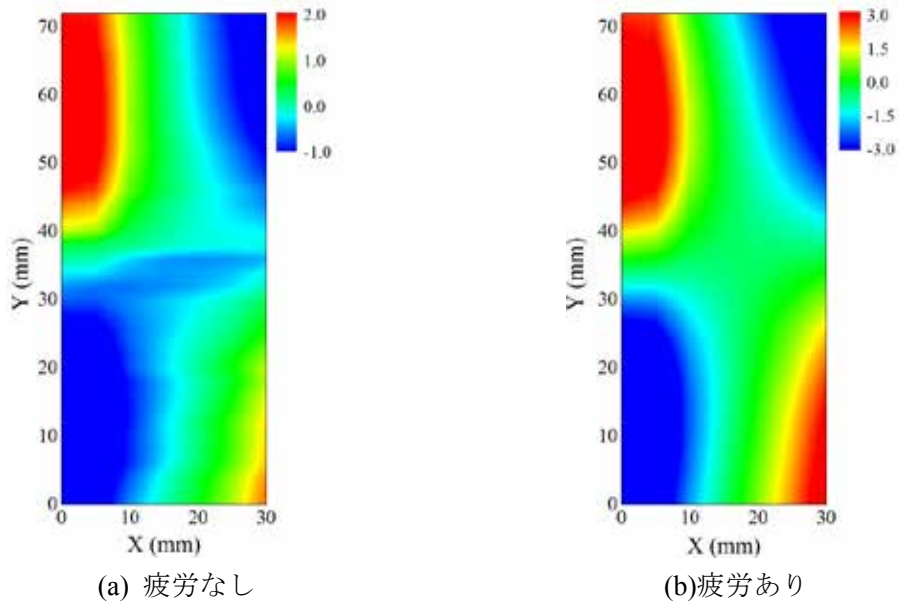


図6 x方向の磁場分布マッピング

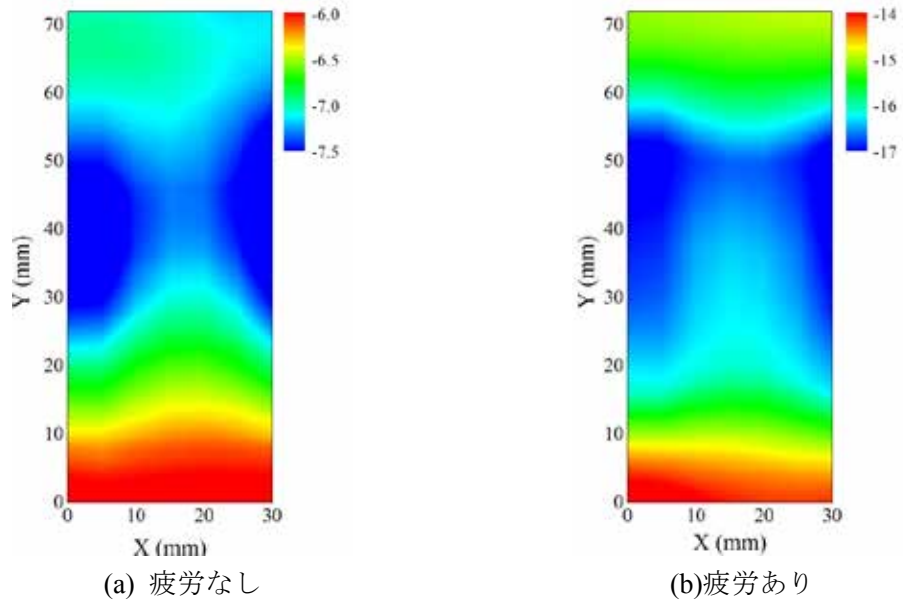


図7 y方向の磁場分布マッピング

についても、中心部付近における分布が少し異なっていることがわかる。さらに強度の変化に注目すると、応力を加えた場合に図6, 7で示したマッピング内での値の変化幅（マッピング内での最大値と最小値の差）は、応力を加えていない場合と比較して約2倍程度大きくなっていることがわかる。これらの結果が得られた要因の一つとして、応力を加えることにより鋼板の組織が変わり透磁率に変化が生じて、磁場応答の分布に変化が生じたことが考えられる。

一方、図8に示すz方向の磁場分布について比較を行うと、応力の有無にかかわらず磁場分布の様子は同じような傾向を示した。また強度についてはx, y方向と同様に応力を加えた方が変化の幅が大きくなっているが、x, y方向ほど大きな違いは見られなかった。この結果より、応力を加えた場合に磁気応答の変化が現れる方向とそうでない方向が存在することが



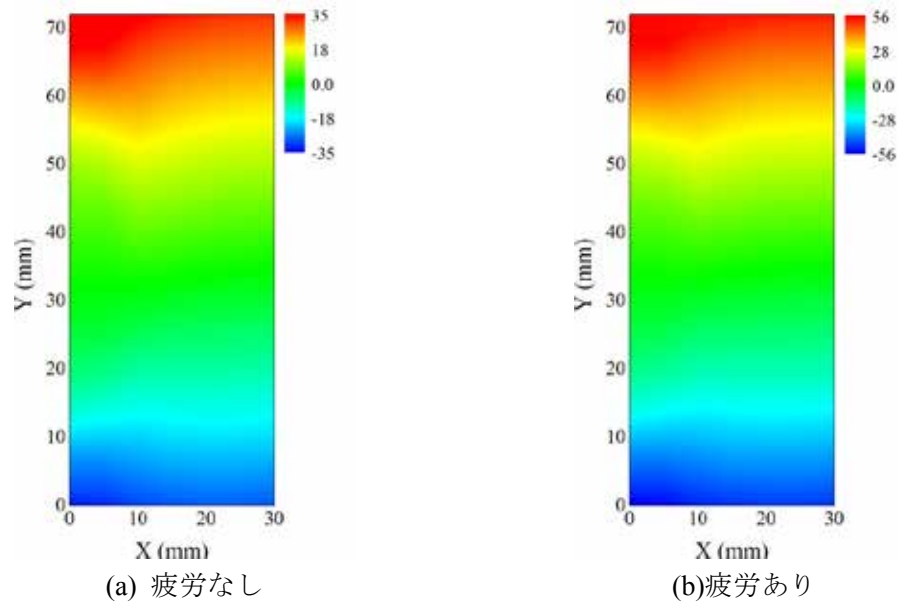


図8 z方向の磁場分布マッピング

考えられる。従って、適切な方向の磁場応答を検出することで鋼板の疲労と相関性のある磁気応答を検出できるのではないかと考えられる。

## 5. まとめ

磁場を用いて鋼板の磁場分布を自動計測、可視化する装置を作製し、鋼板に応力を印加した場合の磁場分布変化について検討を行った。磁場分布の解析ではロックインアンプで検波した磁場の位相成分に位相シフト量 $\phi$ を加算して解析を行った。その結果、 $\phi$ に応じて磁場分布が変化し、試料からの磁場応答のみを反映するマッピングが得られる可能性が示された。この解析方法を用いて、シェンク式の繰返し疲労試験機により人工的に応力を加えた試料と応力を加えていない試料の磁場分布を比較した。その結果、ある最適な $\phi$ の値を適用した場合、試料の応力が集中したと考えられる試料の中心部付近でx, y方向の磁場分布に変化が見られた。以上の結果より、鋼板に低周波磁場を印加し表面上の磁場分布を計測・マッピングすることで、鋼板の疲労度を可視化し評価するシステムの実現が期待できる。

## 謝辞

本研究は公益財団法人 JFE 21 世紀財団の 2012 年度技術研究助成によって行われた。ここに記し、感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] Dobmann G, Walle G, Holler P, “Magnetic leakage flux testing with probes: physical principles and restrictions for application”, NDT Int, 20, 101–4, (1987)
- [2] Romero Ramírez Alicia, Mason John SD, Pearson Neil. “Experimental study to differentiate between top and bottom defects for MFL tank floor inspections” NDT&E Int., Vol. 42, No. 1, pp. 16–21, (2009)

- [3] B. Weekes, D. P. Almond, P. Cawley, and T. Barden, “Eddy-current induced thermography-probability of detection study of small fatigue cracks in steel, titanium and nickel-based superalloy”, *NDT & E Int.*, Vol. 49, No. 7, pp. 47–56, (2012)
- [4] C. Ni, L. Dong, Z. Shen, and J. Lu, “The experimental study of fatigue crack detection using scanning laser point source technique”, *Optics & Laser Technology*, Vol. 43, Issue 8, pp. 1391–1397, (2011)
- [5] D. A. Cook and Y. H. Berthelot, “Detection of small surface-breaking fatigue cracks in steel using scattering of Rayleigh waves”, *NDT & E Int.*, Vol. 34, No. 7, pp. 483-492, (2001)
- [6] K. Tsukada and T. Kiwa, “Magnetic property mapping system for analyzing three-dimensional magnetic components”, *Rev. of Sci. Instrum.*, 77, 063703, (2006)
- [7] K. Tsukada, M. Yoshioka, Y. Kawasaki, T. Kiwa, “Detection of back-side pit on a ferrous plate by magnetic flux leakage method with analyzing magnetic field vector”, *NDT & E Int.*, Vol. 43, No. 4, pp. 323-328, (2010)