

# マルチチャンネル磁気抵抗センサを用いた 鉄鋼構造物の亀裂検出

林実, 中村喜浩, 堺健司, 紀和利彦, 塚田啓二  
(岡山大学)

Detection of Cracks in Steel Structures Using Multi-Channel Magnetic Resistive Sensors

M. Hayashi, Y. Nakamura, K. Sakai, T. Kiwa, K. Tsukada  
(Okayama University)

## はじめに

鉄鋼構造物の亀裂検出において、き裂による信号変化が、透磁率のばらつきや磁化などによる磁気雑音と区別できないことが課題であった。そこで本研究では、渦電流探傷法において、印加コイル内に2つのTMR（トンネル磁気抵抗）センサを設置し、センサ出力ベクトルを差分処理することで磁気雑音を打ち消し、亀裂による信号変化を抽出することを試みた。さらに手動でプロービングした場合での信号強度のリフトオフ変動などの影響を受けずに欠陥信号を抽出できる方法を考案したので報告する。

## 実験方法

計測に用いたセンサプローブと試験体サンプルの一例をFig.1に示す。センサプローブは印加コイルの同一辺上にTMRセンサを2つ設置した。印加コイルは銅線0.25φを用いて、60回巻、内径6.0×2.5 mm<sup>2</sup>、外径7.7×4.5 mm<sup>2</sup>とした。平面状の試験体サンプル(SM400A)は200×200 mm<sup>2</sup>で板厚7 mmとし、深さ0.5 mmから7 mmまでの8種類のスリットを設置した。

印加コイルに1 kHz、0.5 V<sub>pp</sub>の交流電圧を印加した。各スリットに対して、スリットを中心として走査方向としてx方向に0.1 mm刻みで、走査幅200 mmとして、z成分の磁場変化を測定した。

## 実験結果

Fig.2に差ベクトルによるリサーチ波形を示す。差ベクトル $\mathbf{S}$ は、センサ1出力 $\mathbf{S}_1$ などとして、 $\mathbf{S} = \mathbf{S}_2 - \mathbf{S}_1 = X + jY$ で求められ、複素平面上に表示できる。Fig.2のリサーチ波形は、3 mmのスリットにおいて測定した各点の差ベクトルを健全部と亀裂部に分けてプロットしたものである。健全部において差ベクトルはほぼ一定であり、磁気雑音が打ち消されていることがわかる。一方、亀裂部において差ベクトルは強度と位相が大きく変化しており、亀裂による信号変化が大きく反映されていることを確認できた。また、この解析方法は立体形状の構造物の亀裂でも同様に適用でき、健全部と亀裂部の信号を分離することができた。

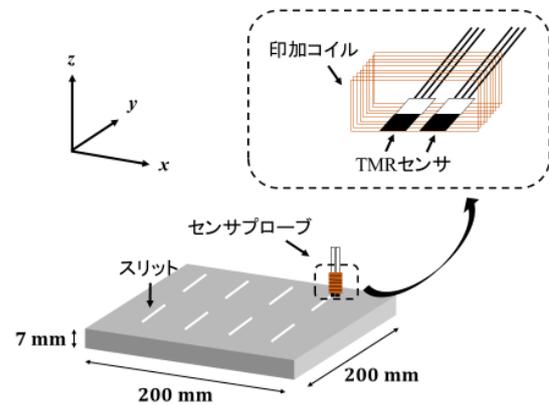


Fig.1 試験体とセンサプローブ

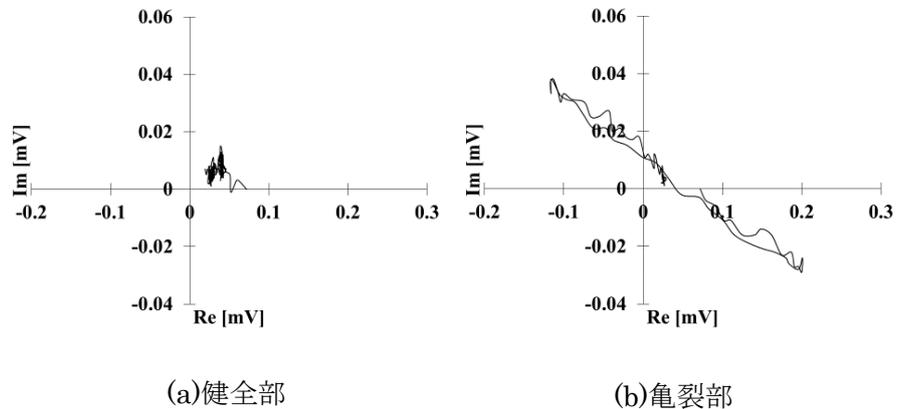


Fig.2 健全部とスリット部におけるリサーチ波形

# トンネル磁気抵抗センサを用いた金属材の微小欠陥の検出

神原匠, 堺健司, 紀和利彦, 塚田啓二, 鈴木雄太\*

(岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科, \*神戸製鋼所 技術開発本部)

Detection of micro defects of metal materials using tunnel magnetoresistive sensors

T. Kobara, K. Sakai, T. Kiwa, K. Tsukada, Y. Suzuki\*

(Graduate School of Interdisciplinary Science and Engineering in Health Systems, Okayama University

\*Technical Development Group, Kobe Steel, Ltd.)

## 研究背景

現在の我国の発展に大きな役割を担っている高速道路, 新幹線などの社会インフラに用いられる材料には, アルミニウムや鉄といった様々な金属材料が用いられている. これらの材料の製造過程あるいは, 構造物としての加工中などで発生した表面あるいは内部の微小欠陥を防ぐには初期の段階で破壊することなく検出, 評価できる非破壊検査が求められている. 本研究では, トンネル磁気抵抗センサを用いた渦電流探傷法を用いて, 鉄鋼材などの磁性体やアルミニウムなどの非磁性体などの電磁特性が異なる金属材の微小欠陥の検出とその信号の違いを評価した.

## 実験内容

測定装置は, 発振器, 磁場印加コイル, ナノグラニューラトンネル型磁気抵抗素子センサ(TMR センサ:大同特殊鋼製 Z21), X-Y 自動走査ステージ(X 軸モータ, Y 軸モータ), ロックインアンプ, PC, 測定サンプルにより構成される(Fig.1). 発振器から交流信号を磁場印加コイルに印加すると同時に, 発振器からロックインアンプに参照信号を入力する. コイルにより交流磁場を測定サンプルに印加し表面に渦電流を誘導する. TMR センサにより測定サンプルからの磁場応答を計測した信号をロックイン検波し, PC でデータ解析を行う. 測定サンプルは, 鋼板(SPCC), アルミニウム板(150 mm×120 mm×10 mm)の2種類を用い, 各板表面に幅と深さが異なる円形欠陥を6種類形成した. 欠陥寸法について Table.1 に示す.

## 測定結果

解析より, 欠陥エッジ部での電流分布が大きくなり, 欠陥による渦電流の2次的な磁場分布の変化が確認できた. Fig.2 にアルミニウム板から得られた2次的な磁場による信号強度を示す. 欠陥エッジ部で, 信号強度は低くなっている. これは, 欠陥エッジ部で電流密度が大きくなるため, 発生する2次的な磁場も大きくなり, 印加磁場と欠陥信号の総和としてセンサの信号強度が低くなるためである. この磁気信号の変化はシミュレーションでも確認することができた. 磁性体と非磁性体で信号変化が異なることが分かった.

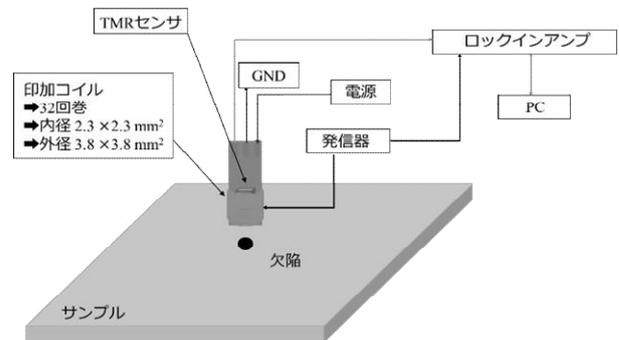


Fig.1 Measurement system

Table.1 Size of the sample

| Defect No. | ①    | ②   | ③   | ④   | ⑤   | ⑥   |
|------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Width(mm)  | 2.0  | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 |
| Depth(mm)  | 1.35 | 1.0 | 1.3 | 1.0 | 1.0 | 0.2 |

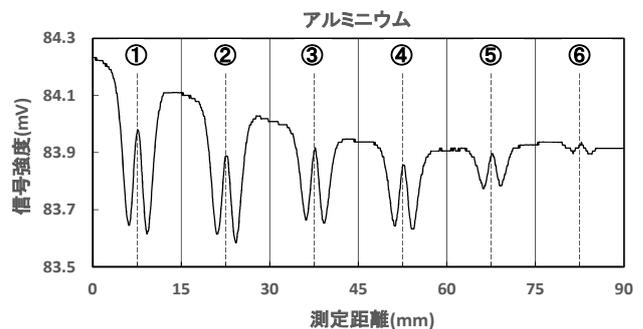


Fig.2 Signal intensity by the secondary magnetic field

## 参考文献

Y.Majima et al., Electromagnetic Nondestructive Evaluation, (2018), in press

# 鋼材裏面のスリット状亀裂の検出に向けた 低周波渦電流探傷法の周波数依存性の検討

吉村航、笹山瑛由、圓福敬二  
(九州大学)

Frequency dependence of low-frequency eddy-current testing  
for detecting cracks on the backside of steel plate

W. Yoshimura, T. Sasayama, K. Enpuku  
(Kyushu University)

## はじめに

渦電流探傷法は、一般的に表皮効果の影響から検査対象表面の探傷に用いられることが多い。特に、強磁性体は表皮効果が顕著に現れるため、鋼材を検査する場合は、表皮効果の影響を避けるため低周波での検査が必要になる。しかし、周波数を低くすればするほど渦電流による信号が小さくなってしまいうため、周波数を適切に選択する必要がある。そこで本研究では、より裏面亀裂の検出に適した周波数の検討を行った。

## 実験方法

自動ステージを用いて、縦 300 mm、横 300 mm、板厚 10 mm の鋼板 (SM490A) 上で、励磁コイル (巻数 50 turn) と検出コイル (巻数 300 turn) の位置関係を固定したまま動かして測定し、裏面亀裂の検出を試みた。裏面亀裂の寸法は横が 50 mm、縦が 1 mm、高さが 6 mm とした。励磁、検出部の仕様を Fig.1 に示す。鉄板上に 2 つの励磁コイルを配置し、それらの中央に検出コイルを配置した。励磁コイルには振幅 2 A の正弦波電流を印加し、このときに正弦波電流の周波数を 2 ~ 20 Hz の範囲で変化させ測定を行った。検出コイルでは、励磁電流と位相が同相および直交の電圧を取得し、それぞれ磁束密度  $B$  に変換して画像化した。計測範囲は鋼材の中心の 150 mm × 150 mm の範囲で  $x$  軸、 $y$  軸方向共に 5 mm 間隔の各地点で値を取得した。

## 実験結果

Fig.2 は、周波数 8 Hz で測定をした場合の  $B$  の虚部の値を図に示したものである。図中の黒線は裏面亀裂の位置を示す。図より、亀裂の位置において  $B$  の値が変化しており、本システムを用いた亀裂位置の特定が可能であると確認できた。

Fig.3 に亀裂上 ( $x = 75$  mm、 $y = 75$  mm) の位置における、亀裂により生じた磁束密度変化の周波数依存性を示す。また、実験と同様の条件での電磁界シミュレーションを、有限要素解析ソフト (JMAG) を用いて行い、実験結果との比較検討を行った。図より、計測値における磁束密度変化は周波数 10 Hz の場合に最大値をとり、それ以上の周波数においては、表皮効果の影響により周波数が大きくなるにつれ、亀裂からの信号が小さくなっていることが確認できた。そのため、本稿での条件下での亀裂検出を行う際は 10 Hz 程度の周波数での測定が望ましいと確認できた。また、シミュレーションで得られた結果においても、ピーク値が 8 Hz であり、実験結果ともほぼ一致することが確認できた。

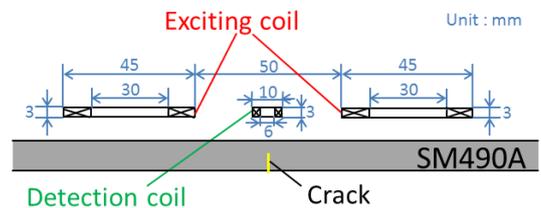


Fig.1. Specification of detection system

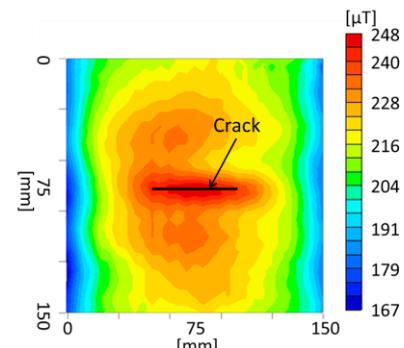


Fig.2. Magnetic flux density  
(imaginary part)

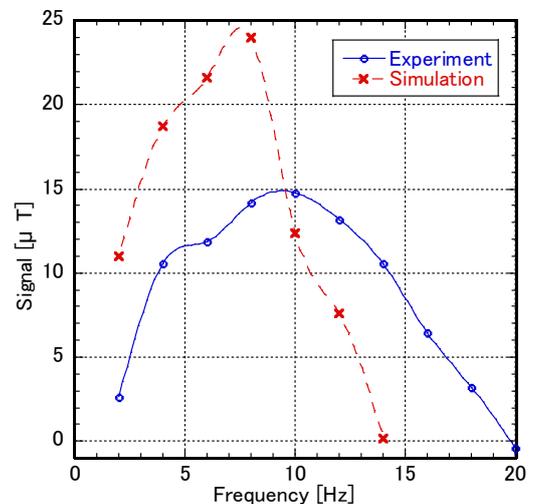


Fig.3. Frequency dependence  
of signal from crack

## 劣化炭素鋼の局所領域での物性評価

森井悠真、寺島顕一、高瀬つぎ子、山口克彦、内一哲哉<sup>\*</sup>、高木敏行<sup>\*</sup>  
(福島大、<sup>\*</sup>東北大)

Evaluation of physical properties in local area of deteriorated carbon steel material

Y. Morii, K. Terashima, T. Takase, K. Yamaguchi, T. Uchimoto<sup>\*</sup>, T. Takagi<sup>\*</sup>  
(Fukushima Univ. <sup>\*</sup>Tohoku Univ)

### はじめに

現在、構造材料の非破壊検査には電磁超音波探触子(EMAT)などの手法が用いられ、EMATによる炭素鋼の非破壊評価も行われている<sup>1)</sup>。しかし、これらの検査は試料のマクロな領域を測定し劣化を検出するもので、劣化についてのマイクロ領域におけるデータは少ない。そこで、本研究では、劣化診断とマイクロレベルにおける物性との関係を明らかにすることで劣化診断の信頼性を高めることを目的とする。

具体的には、配管などに用いられている炭素鋼の劣化度合いを EMAT で測定した試料に対して、収束イオンビーム加工装置(FIB)でマイクロオーダー程度の大きさに切り出し、磁気特性の測定および TEM 像の観察を行った。その結果をもとに、EMAT とマイクロ領域における物性の対応関係を確認した。

### 実験手法・結果

炭素鋼管 STPT370 の異なる部位より  $7.0 \times 7.0 \times 2.0$ [mm]サイズに切り出された二つの炭素鋼試料のうち、EMATにて、劣化が小さいとされた試料を sample 1, 劣化が大きいとされた試料を sample 2 とした。FIBにて  $10 \times 10 \times 0.1$ [ $\mu\text{m}$ ]程度の大きさに加工し、走査型透過電子顕微鏡(STEM)にて結晶粒界の構造の観察と電子線回折像の観察を行った。Fig1, Fig2 にそれぞれ sample1 と sample2 の TEM 像を示す。また、Fig3, Fig4 に点 A から点 D それぞれの電子線回折像を示す。

Fig3, Fig4 より点 A, C, D では、結晶粒の存在を示す回折点がみられ、点 B においては回折点がみられなかった。このことより sample2 は sample1 より深い領域に結晶粒が存在することが確認できた。これらの結果より、結晶粒の形成の違いが、EMAT における信号強度の差異に影響を与えていると考えられる。

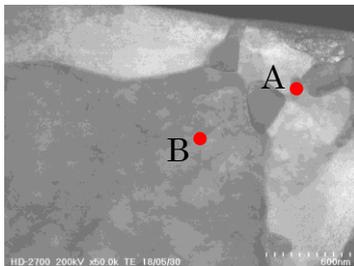


Fig.1 TEM image of sample1 ( $\times 50.0\text{k}$ ).

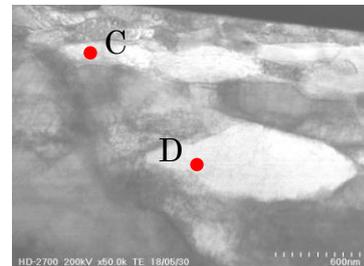


Fig.2 TEM image of sample2 ( $\times 50.0\text{k}$ ).

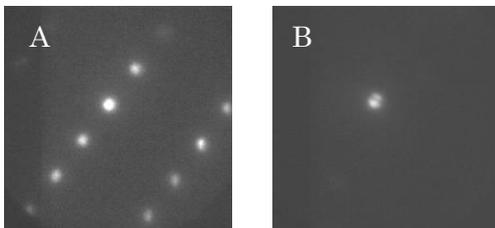


Fig.3 Electron diffraction image of point A and B in sample1.

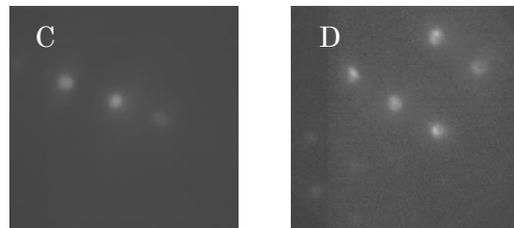


Fig.4 Electron diffraction image of point C and D in sample2.

### 参考文献

- 1) Ryoichi URAYAMA, Tetsuya UCHIMOTO, Toshiyuki TAKAGI, and Shigeru KANEMOTO : Quantitative Evaluation of Pipe Wall Thinning by Electromagnetic Acoustic Resonance, E-Journal of Advanced Maintenance \_2.(2010),25-33.