The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 動磁場応答に基づくコンクリート中の鋼材腐食の非破壊評価に関する基礎的研究 |
| Author(s) | 沈, 力 |
| Citation | 大阪大学, 2022, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/89627 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

# 動磁場応答に基づくコンクリート中の鋼材腐食の非破壊評価に関する基礎的研究

沈　力

2022 年 6 月

大阪大学大学院工学研究科

# 目次

第１章　序論 . . . . . 1

1.1　研究の背景 . . . . . 1

1.2　研究の目的 . . . . . 2

1.3　論文の構成 . . . . . 2

参考文献 . . . . . 3

第２章　コンクリート内部鋼材の腐食評価の研究現状と課題 . . . . . 5

2.1　コンクリート内部鋼材の腐食評価の現状 . . . . . 5

2.1.1　コンクリート内部鋼材の腐食 . . . . . 5

2.1.2　既往のコンクリート内部鋼材の腐食評価方法 . . . . . 6

2.2　本研究における検討課題 . . . . . 10

参考文献 . . . . . 10

第３章　渦電流の動磁場応答に基づく計測原理に関する基礎的検討 . . . . . 13

3.1　はじめに . . . . . 13

3.2　計測原理 . . . . . 13

3.3　計測システムの構成 . . . . . 15

3.3.1　励磁コイル . . . . . 15

3.3.2　GMR センサ . . . . . 17

3.3.3　計測信号 . . . . . 19

3.4　まとめ . . . . . 21

参考文献 . . . . . 21

第４章　鋼板表面の形状が動磁場応答に与える影響に関する実験的検討 . . . . . 22

4.1　はじめに . . . . . 22

4.1.1　実験概要 ..... 22
4.1.2　試験体 ..... 22
4.1.3　計測概要 ..... 24
4.2　動磁場応答の振幅値に着目した断面欠損の検出に関する実験的評価 ..... 25
4.2.1　断面欠損の長さ変化が電圧振幅値に及ぼす影響 ..... 25
4.2.2　断面欠損の幅変化が電圧振幅値に及ぼす影響 ..... 31
4.2.3　断面欠損の深さ変化が電圧振幅値に及ぼす影響 ..... 33
4.2.4　二つの断面欠損の間隔変化が電圧振幅値に及ぼす影響 ..... 35
4.3　動磁場応答の位相差に着目した断面欠損の検出に関する実験的評価 ..... 39
4.3.1　断面欠損の有無による位相差の変化 ..... 39
4.3.2　断面欠損の長さ変化が位相差に及ぼす影響 ..... 40
4.3.3　断面欠損の幅変化が位相差に及ぼす影響 ..... 42
4.3.4　断面欠損の深さ変化が位相差に及ぼす影響 ..... 43
4.3.5　二つの断面欠損の間隔変化が位相差に及ぼす影響 ..... 45
4.3.6　断面欠損と位相差変化率の関係 ..... 47
4.4　まとめ ..... 47
参考文献 ..... 48

**第５章　鋼板表面の形状が動磁場応答に与える影響に関する解析的検討 ..... 49**
5.1　はじめに ..... 49
5.2　有限要素解析概要 ..... 49
5.3　腐食欠損部における動磁場の振幅値に関する有限要素解析 ..... 52
5.3.1　断面欠損の有無による磁束密度振幅値の変化 ..... 52
5.3.2　断面欠損の長さ変化が磁束密度振幅値に及ぼす影響 ..... 53
5.3.3　断面欠損の幅変化が磁束密度振幅値に及ぼす影響 ..... 54
5.3.4　断面欠損の深さ変化が磁束密度振幅値に及ぼす影響 ..... 55

5.3.5　二つの断面欠損の間隔変化が磁束密度振幅値に及ぼす影響 ..... 56
5.4　腐食欠損部における動磁場の位相差に関する有限要素解析の検討 ..... 58
5.4.1　断面欠損の有無による位相差の変化 ..... 60
5.4.2　断面欠損の長さ変化が位相差に及ぼす影響 ..... 61
5.4.3　断面欠損の幅変化が位相差に及ぼす影響 ..... 62
5.4.4　断面欠損の深さ変化が位相差に及ぼす影響 ..... 63
5.4.5　二つの断面欠損の間隔変化が位相差に及ぼす影響 ..... 65
5.5　まとめ ..... 66
参考文献 ..... 67

**第６章　腐食生成物が動磁場応答に与える影響に関する検討 ..... 68**
6.1　はじめに ..... 68
6.2　電食試験概要と結果 ..... 68
6.2.1　電食供試体概要 ..... 68
6.2.2　電食試験の手順 ..... 69
6.2.3　腐食生成物の X 線回折の結果 ..... 70
6.3　GMR センサによる渦電流法を用いた計測結果 ..... 71
6.3.1　計測概要 ..... 71
6.3.2　渦電流法による計測結果 ..... 72
6.4　解析による渦電流計測結果の妥当性の検討 ..... 74
6.4.1　有限要素解析概要 ..... 74
6.4.2　有限要素解析結果 ..... 75
6.4.3　解析結果に関する考察 ..... 75
6.5 まとめ ..... 76
参考文献 ..... 77

第７章　腐食を模擬した鋼棒への適用評価 ..... 78
7.1　はじめに ..... 78
7.2　実験概要 ..... 78
7.2.1　試験体概要 ..... 78
7.2.2　計測概要 ..... 79
7.3　電圧振幅値による鋼棒表面の断面欠損検出に関する実験的評価 ..... 80
7.3.1　断面欠損の有無による電圧振幅値の変化 ..... 80
7.3.2　断面欠損の深さによる電圧振幅値の変化 ..... 81
7.3.3　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化 ..... 82
7.3.4　断面欠損のサイズによる電圧振幅値変化率 ..... 83
7.4　鋼棒の腐食欠損部における動磁場の振幅値に関する有限要素解析 ..... 84
7.4.1　有限要素解析概要 ..... 84
7.4.2　有限要素解析結果 ..... 85
7.5　まとめ ..... 86

第８章　コンクリート中の鋼材腐食損傷の可視化の検討 ..... 87
8.1　はじめに ..... 87
8.2　実験概要 ..... 87
8.3　動磁場応答の振幅値に着目した断面欠損の可視化評価 ..... 87
8.3.1　電圧振幅値に関する実験結果 ..... 87
8.3.2　電圧振幅値変化率に関する実験結果 ..... 90
8.4　動磁場応答の位相差に着目した断面欠損の可視化評価 ..... 92
8.4.1　位相差に関する実験結果 ..... 92
8.4.2　位相差変化率に関する実験結果 ..... 94
8.5　まとめ ..... 96
参考文献 ..... 97

第９章　結論 ..... 98
9.1　結論 ..... 98
9.2　今後の検討課題 ..... 99

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

日本の鉄道や高速道路などの社会基盤施設は，ほとんど鉄筋コンクリート構造物，鋼構造物，鋼・コンクリート複合構造物であり，長年にわたりそのストックが増大してきている。2023 年 3 月までには，日本の 39%の道路橋の寿命が 50 年以上となり，老朽化は今後 10 年間で加速度的に増加することが懸念されている [1)]。 そのため，インフラの安全性や耐久性を確保するために，適切な点検や維持管理の手段を早急に確立することが求められている。 コンクリート構造物の劣化の主な原因の一つは，鋼材の腐食である。鋼材の腐食は，構造物の安全性能に直接影響する。コンクリート内部の鋼材は，中性化や塩害などにより，コンクリートかぶりの下で腐食が発生して進展し，コンクリートのひび割れや剥離，鉄筋や鋼板の破断に至ることがある。例えば，**図-1.1.1(a)**に示すコンクリート橋の事例では, 主梁のコンクリートが剥離, 鉄筋が腐食して露出していた [2)]。また**図-1.1.1(b)**に示すトラス橋の事例では，トラス傾斜材の埋設部に腐食による鋼桁の破断があり [3)]，橋の安全性能に重大な影響を及ぼしていた。このため，コンクリート構造物の維持管理には，劣化が進展する早期の段階で鋼材腐食の評価を効率的かつ高精度に行える検査技術が不可欠であると考えられる。

(a) 朝丸橋の主桁の鉄筋腐食

(b) 木曽川大橋の斜材の破断

**図-1.1.1　コンクリート中の鋼材腐食の事例**

コンクリート中の鉄筋腐食の状態を把握するためには，コンクリートを除去して直接観察する方法が最も一般的である。 しかし，このような目視による方法では，コンクリート構造物にダメージを与える上に，除去したコンクリート部分の腐食状況しかわからないため，時間的にもコスト的にも大きい効果が望めない。しかも，目視で直接観察できる腐食損傷は，**図-1.1.1** のように非常に深刻な段階まで進行しており，構造物の維持管理にも支障をきたしている。

コンクリート内部の鋼材腐食の存在や腐食速度を評価する方法として，自然電位法や分極抵抗法などの電気化学的な方法も適用されている [4)]。しかし，これら二つの方法は，鉄筋をはつり出し電極を設置する必要があり，かぶりの含水率などの影響を受ける [5)]。また，コンクリート内部の鉄筋腐食の位置を正確に把握するのには適していない。金属の探傷の分野では，金属表面近傍の損傷位置や大きさを推定するために, 渦電流探傷法などの方法 [6)~8)]が用いられている。しかし測定結果は，検査装置と金属対象物間のリフトオフ距離が大きくなるほど信号が弱くなるため，リフトオフ距離は数 mm 程度が限界であり，かぶりが 30 mm 以上あるようなコンクリート構造物への適用は困難

であるという課題があった。

## 1.2 研究の目的

以上のような背景を踏まえ，本研究では，交流磁場と高感度磁気センサを用い，コンクリート中の鋼材腐食に伴い生成される腐食生成物，断面欠損における動磁場応答の変化に着目し，高感度かつ高精度に腐食状況を検出する非破壊評価手法を構築することを目的とする。具体的には，渦電流法の原理に基づき，コンクリート中の鋼板と鋼棒表面の断面欠損と腐食生成物における動磁場応答により腐食状況の可視化を行おうとしている。

## 1.3　論文の構成

本論文は全9章から構成されている。本論文の構成を**図-1.3.1**に示す。

第1章は序論であり，本研究の背景，目的，論文の構成を述べる。

第2章では，コンクリート内部鋼材の腐食評価に関わる研究の経緯と現状を明らかにする。また，本研究で用いる渦電流法による金属損傷の非破壊評価方法の研究の現状を説明する。その後，コンクリート表面で内部鋼材の腐食状況を非破壊評価するために，以上の研究の現状を踏まえて，研究課題について明らかにする。

第3章では，渦電流の動磁場応答に基づいて本研究で構築する計測システムの原理を説明する。また，計測システムの構成について明らかにするとともに，基本的な実験条件を決定する。

第4章では，第3章で構築した計測方法を用いて，切削加工により断面欠損を模擬した供試体を対象にコンクリートかぶりを想定したリフトオフ距離において計測した結果により，本研究の計測方法が鋼材表面の断面欠損の存在と位置を効果的に特定できることが明らかにする。また，得られた動磁界応答の電圧振幅値，電圧振幅値の変化率，位相差，位相差の変化率の結果を考察し，鋼材の断面欠損の形状変化が動的磁界応答に及ぼす影響を明らかにする。

第5章では，第4章で行った実験で用いたパラメータに基づいて，解析モデルを作成し，有限要素解析を行う。 磁束密度の最大振幅値と位相差の解析結果をそれぞれ実験結果と比較し，断面欠損の検出メカニズムを明らかにする。

第6章では，コンクリート中の鋼材腐食に伴う腐食生成物が，本研究の動磁場応答に与える影響について考察する。 鋼板表面を電食させ，腐食生成物残留又は除去の状況で計測した結果に基づき，本研究の計測方法は腐食生成物の有無を評価するのに有効であることを明らかにする。また，有限要素解析で腐食生成物の検出メカニズムを明らかにする。

第7章では，本研究の計測方法の適用範囲を広げるため，鋼棒の表面に切削加工を施し，腐食損傷を模擬した断面欠損の評価を実施する。その結果より，本計測方法が鋼棒表面の断面欠損の存在

と位置の評価にも有効であることを示し，その検出メカニズムを有限要素解析で考察する。

第8章では，第4章の試験体を二次元的に走査して，得られた電圧振幅値と位相差，およびその変化率に基づき腐食損傷部の可視化を行う。また，鋼材の局所的な腐食損傷をイメージングすることで断面欠損の存在，位置又は範囲を評価することが可能であることを示す。

第9章では，本研究の結論を総括するとともに，今後の研究課題を述べる。

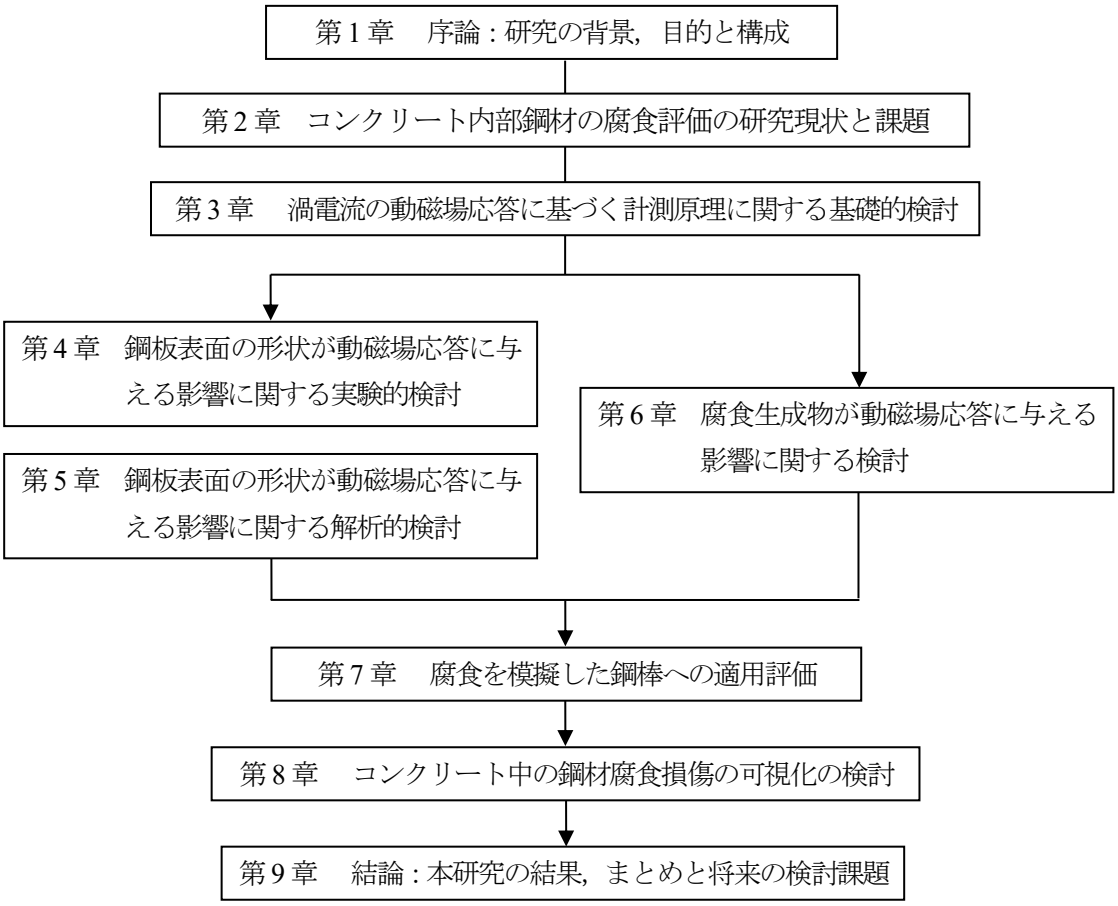



**図-1.3.1　研究の構成**

## 参考文献


1)　国土交通省：社会資本の老朽化の現状と将来予測，インフラメンテナンス情報，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html.

2)　国土交通省：コンクリート橋（上部構造）の損傷事例

3)　国土交通省：鋼橋（上部構造）の損傷事例

4)　日本非破壊検査協会：新コンクリートの非破壊試験，技報堂出版，2010年3月30日

5) 森濱和正：コンクリート構造物の点検における評価対象別の非破壊試験 ②鉄筋腐食評価の試験方法, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.641-647, 2015.07
6) Yasugi, T., Majima, Y., Sakai, K., Kiwa, T. and Tsukada, K. : Detection and Imaging of Internal Cracks by Tangential Magnetic Field Component Analysis using Low-Frequency Eddy Current Testing, 19th World Conference on Non Destructive Testing, pp.1-8, 2016.
7) Koyama, K., Hoshikawa, H. and Taniyama, N. : Investigation of Eddy Current Testing of Weld Zone by Uniform Eddy Current Probe, 15th World Conference on NDT, 2000, https://www.ndt.net/article/wcndt00/ papers/idn046/idn046.htm.
8) He, D., Wang, Z., Kusano, M., Kishimoto, S. and Watanab, M. : Evaluation of 3D-Printed titanium alloy using eddy current testing with high-sensitivity magnetic sensor, NDT E Int., Vol.102, pp.90-95, 2019.

# 第 2 章 コンクリート内部鋼材の腐食評価の研究現状と課題

## 2.1 コンクリート内部鋼材の腐食評価の現状

コンクリート中の鋼材腐食はコンクリート構造物の安全性と使用耐久性に直接影響を与えるため，腐食状況の評価を効率的、かつ高精度に行うことは社会基盤施設の維持管理にとって極めて重要である。本節では，コンクリート内部鋼材の腐食につきまず説明し，その後腐食評価に関する既往の研究についてその経緯と現状を明らかにする。

### 2.1.1 コンクリート内部鋼材の腐食

コンクリート中の鋼材の腐食は，材料と環境条件との相互作用の結果である。 腐食のメカニズムを図-2.1.1 に示す。コンクリート中の強アルカリ性環境（約 pH 13）では，鋼材の表面に厚さ数 nm の不働態皮膜が形成され，腐食から鋼材を保護している。しかし，コンクリートの塩害等により，塩化物イオンがコンクリート内部に侵入し不働態皮膜に接触すると不働態被膜が破壊され，鋼材と溶存酸素と水が酸化反応を起こし，腐食が始まる [1]。 腐食のアノード反応は$Fe \rightarrow Fe^{2+}+2e^{-}$，カソード反応は$O_2+2H_2O+4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$であり，最初に $Fe(OH)_2$ が生成され，その環境の酸性度またはアルカリ度によって，生成物が酸化，あるいは還元されて，最終的には α-FeOOH，β-FeOOH，γ-FeOOH（赤），$Fe_3O_4$（黒）が含まれる生成物が生成される [2]。この反応は体積膨張を伴い，コンクリートのひび割れや剥離が発生する。 腐食生成物の生成に伴い，鋼材の表面には Fe の減少による断面欠損が発生し，ひどい場合には鋼材の破断に至ることもありうる。 塩害による劣化過程を図-2.1.1[3] に示す。 図により，塩害による腐食が進むと構造物の劣化が加速され，部品材料の性能も加速度的に低下していく。 したがって，既存の社会基盤施設の維持管理を行うために，より迅速かつ効果的に構造物の腐食を評価し，それを基に維持管理計画を策定し，効果的に実施する方策が求められている。

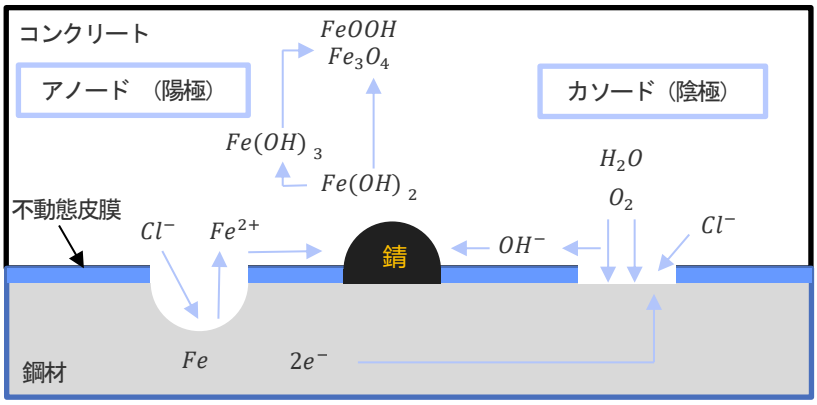



図-2.1.1 腐食のメカニズム

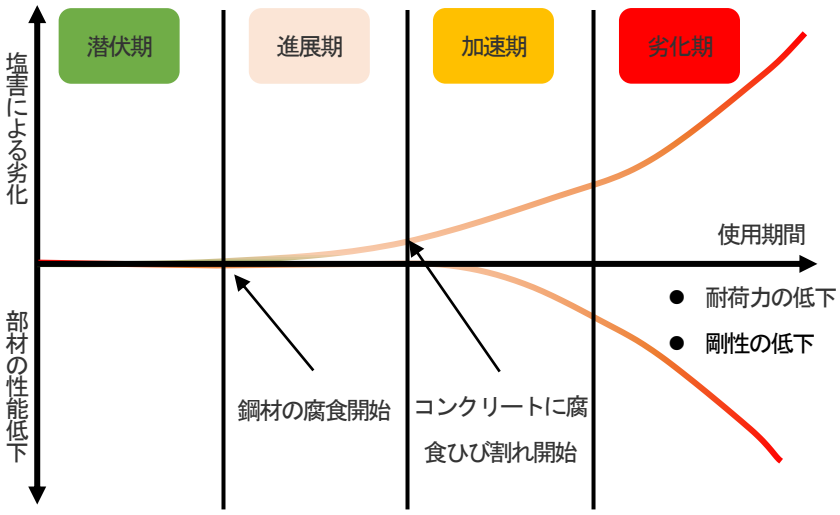



図-2.1.2　塩害による劣化進行過程

### 2.1.2 既往のコンクリート内部鋼材の腐食評価方法

#### (1) 自然電位法

コンクリート中の鉄筋腐食の評価方法として，現在唯一標準化されているのが自然電位法である。この評価基準は 1977 年に ASTM（米国材料試験協会） C876 が始めて作成し，日本で鉄筋腐食評価基準 JSCE-E601-2000 として標準化された [4]。自然電位法の測定方法を**図-2.1.3** に示す。金属が腐食すると電気化学反応が起こる。自然電位法は，腐食が進むとともに，アノードが多くの電子を放出し，腐食部の電位がマイナス側に変化することで，この電位を測定することによって鉄筋腐食の可能性を診断する。ただ，この計測には様々な影響因子があるため，電位を測定する際，コンクリートの温度，含水率などの記録と補正が必要である。測定した電位 E から**表-2.1.3** により [4]，鉄筋腐食の可能性を評価する。しかし，この方法を適用する時，電極を鉄筋に接続する必要があり，鉄筋が露出していない場合は，コンクリートが微破壊する必要がある。

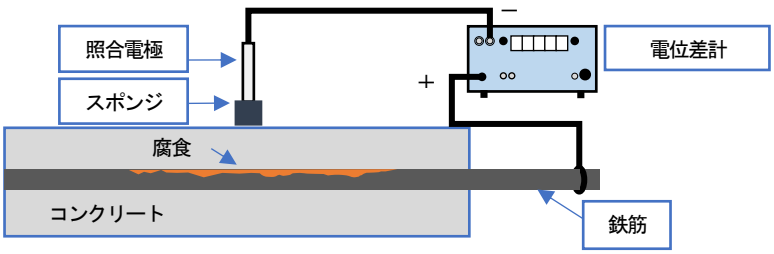



図-2.1.3　自然電位法

表-2.2.1　自然電位による腐食性評価（ASTM C876：1987）

| 自然電位（E）　（V vs CSE*） | 鉄筋腐食の可能性 |
|---|---|
| -0.20＜E | 90%以上の確率で腐食なし |
| -0.35＜E≦-0.20 | 腐食状態は不確定 |
| E≦-0.35 | 90%以上の確率で腐食あり |
| *銅-硫酸銅電極による自然電位 | |

(2) 分極抵抗法

分極抵抗法は，腐食の速度を定量的に測定できる方法である。腐食が発生する場合，電子の流動を伴い，この電流の大きさが腐食速度を表す指標となる。分極抵抗法の原理は，鉄筋に外部から微小な電位差$\Delta E$を印加し，微少な電流$\Delta I$が生じさせる．その際の電位差，腐食電流と分極抵抗の関係を式(1)，式(2)に示す[1)]。

$$\Delta E = \Delta I \cdot R_p \tag{1}$$

$$I_{corr} = K\Delta I/\Delta E = K/R_p \tag{2}$$

ここで，$\Delta E$：付与した電位差(V)，$\Delta I$：微小電流(A/m$^2$)，$R_p$：分極抵抗(Ω･m$^2$)，$I_{corr}$：腐食電流(A/m$^2$)，$K$：材料固有の係数(V)である。コンクリートの鋼材腐食に対しては0.026Vがよく用いられる[4)]。交流インピーダンス法では，周波数が異なる交流電圧を印加し，電気回路の特性を利用して腐食抵抗を算出し，腐食速度を評価する。現在，様々な分極抵抗法の提案があるが，図-2.1.4に分極抵抗法の一例を示す。この方法は自然電位法と同じく，鉄筋と接続する必要があり，コンクリートがある程度の微破壊をすることが避けられない。また，電気化学方法では電流と電位を測る必要があるため，鋼材表面又はコンクリート表面が絶縁されている場合は適用できない。

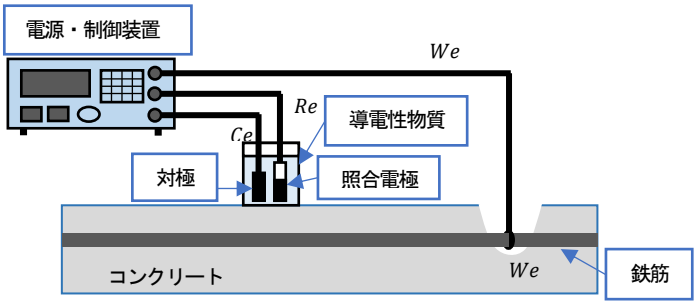



図-2.1.4　分極抵抗法の一例[5)]

### (3) 漏洩磁束法

漏洩磁束法は電磁気的方法の一つであり，コンクリートの骨材などに含まれる鉄鉱成分を除けば，コンクリートが磁場に影響を及ぼさない非磁性体であることを利用し，強磁性体である鉄筋の磁性変化を検査する手法である。**図-2.1.5** に磁性材料のヒステリシス曲線を示す。消磁状態から磁性体に作用する磁界 $H$ が大きくなると，飽和磁化 $M_s$ に達するまでに磁化 $M$ が増大する。一方，飽和磁化の状態から磁界を減らすと，磁界 $H=0$ でも残留磁化 $M_r$ が残る。鉄筋の破断，腐食などの異常状態はこの残留磁化に影響を与えるため，残留磁化の変化から鉄筋の状態を評価する[6]。

佐藤らは漏洩磁束法を用いて，かぶり 150 mm までの鉄筋が健全，腐食量 0.5%，腐食量 3%の 3 つの状態である場合，磁束密度のピーク差によって鉄筋腐食を識別できることを示した（**図-2.1.6** がその一例の結果を示す）[7]。また，戎谷らは，コンクリート中の鉄筋を部分電食し，リフトオフ距離 70 mm で計測する条件に基づいて解析した結果，磁束密度の変化量のピークは腐食範囲の長さ（最小 100 mm）に良い対応をすることを示したが，実験結果の磁束密度の変化量のピークが解析のような結果となることは示されなかった[8]。以上より，漏洩磁束法は大きなかぶりでも鉄筋の腐食の有無，腐食範囲を評価できる方法であるが，孔食などの小範囲の腐食に対しての検討は不足しており，鋼板など面的な残留磁化が不均一に分布している鋼材に対しての検討もまだ必要と考えられる。

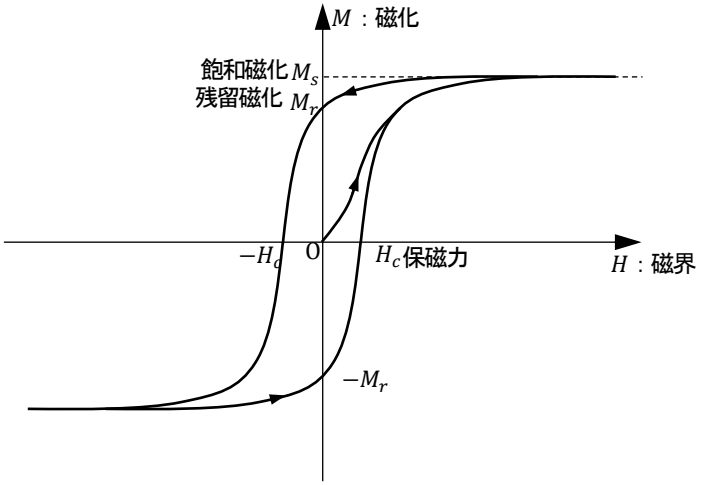



図-2.1.5　磁気ヒステリシス曲線

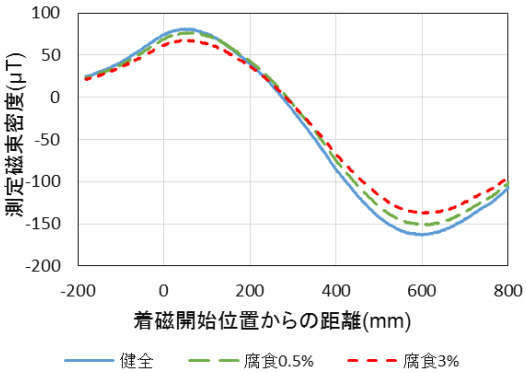



図-2.1.6　漏洩磁束法の実験結果の一例（かぶり 100 mm）

### (4) 渦電流法

渦電流は，変化する磁場が導電体に印加される時，電磁誘導の法則に基づいて磁束の変化を打ち消す方向に誘導起電力が発生し，導電体に渦のような電流を発生させる現象のことである。図-2.1.7に示す渦電流法は，動磁場を印加した試験対象の材質と表面状態によって渦電流の分布と大きさが変化し，それにより生じた派生磁場が変化することを利用し，鋼材周辺の磁場の変化を計測することにより対象の異常を検出する電磁気的方法である。

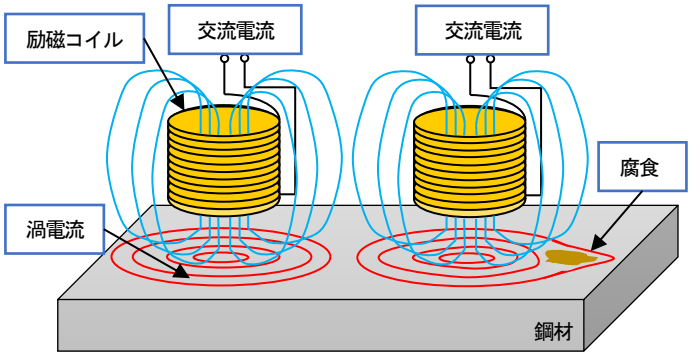



図-2.1.7　渦電流法を用いた腐食による渦電流の変化

渦電流法は，主に金属表面での目視が困難な傷や，金属内部の傷を検査するのに適している高感度，かつ高精度の電磁気的な非破壊検査手法である[9]。リフトオフ距離は，渦電流法に影響を及ぼす重要な要因の一つであることがいくつの論文で報告されている[10)~13)]。これまでの鋼板の表面損傷を検出する研究では，Chen らが最大 11 mm のリフトオフ距離（検出プローブ底面と鋼板表面の距離）で鋼板表面の損傷位置が把握できることを報告している[14]。また，Ricci らの研究により，巨大磁気抵抗効果（Giant Magnetoresistance : GMR）センサを用いて，アルミニウム合金下面の微小断面欠損がリフトオフ距離 3.5 mm までは検出可能であることが報告されている[15]。一方，He の論文では，ロックインアンプを集積した検査装置を用いて，腐食状況が異なる鉄筋に対してリフトオフ距離最大 50 mm で検出が可能との結果を示しているが，局部的な腐食位置の評価の可能性については言及されていない[16]。Lo らが渦電流による鉄筋ロケーターを用いてリフトオフ距離 65 mm で鉄筋の断面欠損の検出を試みたが，断面欠損の長さは約 12.7 mm，約 50%質量減少の場合のみの結果が報告されている[17]。また，Frankowski が E 型検出プローブを用いて鉄筋を検査し，鉄筋の直径の減少量に着目することにより腐食を検出できる可能性が示しているが，具体的な評価結果については報告されていない[18]．以上より，渦電流法に基づいてコンクリート中の鋼板と鉄筋の腐食の検出を行うことは原理的に可能ではあるものの，かぶり 30 mm 程度の場合に腐食位置を特定するためには，さらなる検討が必要であることが明らかになっている。

## 2.2　本研究における検討課題

2.1.1 により，鋼材が腐食すると，断面欠損や腐食生成物が発生する。 鋼材表面の断面欠損と腐食生成物はいずれも動磁場に影響を与える可能性があるため，本研究ではこれら 2 種類の腐食損傷が渦電流法に基づく動磁場応答に与える影響について個別に考察することにする。また，試験体の形状が異なる鋼板と鉄筋の 2 つの対象に対して個別に考察することとする。 既往の研究の調査に基づき，現状の検査手法の課題として以下の 3 点を挙げる。

(1) 30 mm のかぶり（リフトオフ距離 30 mm）における腐食損傷状況の評価

これまでの研究結果から，漏洩磁束法や渦電流に基づく方法は，リフトオフ距離が大きい場合においても鋼材腐食の存在を評価することができるが，腐食の位置を特定することはできないことが明らかになっている。一方，既存の渦電流法は，鋼材表面近傍における断面欠損の位置や範囲を正確に検出できるものの，リフトオフ距離の影響を強く受けるため，コンクリート内部鋼材の数 mm サイズの断面損傷をリフトオフ距離 30 mm で特定できる方法は今のところない。このため，数 mm サイズのコンクリート中の鋼材腐食の検出を，かぶり 30 mm に相当するリフトオフ距離 30 mm から実現することが現状の課題と考えられる。また，断面損傷が測定結果に与える影響を明らかにし，その検出メカニズムを確立することが本研究の課題と考えられる。

(2) 動磁場応答における腐食生成物の影響

熊英らの既往の研究より，腐食生成物においては $Fe_3O_4$ のみが高い透磁率を有し，磁場への影響が大きいことが報告されている [19]。しかしながら，その他の腐食生成物が動磁場に及ぼす影響については十分検討されていない。このため，本研究では，腐食生成物が動磁場に及ぼす影響について電食などにより腐食生成物を発生させ，実験的，解析的に動磁場応答における腐食生成物の影響を評価するものとする。

(3) 鉄筋腐食への適用評価

コンクリート中では鉄筋の腐食が最も多く発生する。 しかしながら，これまでの鉄筋腐食の検出についての研究は，腐食の有無を判断することが主体であった。 このため，本鉄筋表面の断面損傷の位置を評価する手法が存在しないことが課題となっている。このため，本研究では，鉄筋における腐食損傷を対象に断面欠損、腐食生成物が動磁場に及ぼす影響について評価し，本研究が鉄筋腐食の評価に適用できる方法として確立することを目標とする。

# 参考文献


1)　土井康太郎：金属材料研究分野から見たコンクリート中鋼材腐食に対する取り組み，コンクリート工学，Vol.59，No.5，pp.386-391，2021.

2)　永山勝：コンクリートの非破壊試験の理論と実際　①電気化学的手法（自然電位法・分極抵抗法）の理論と実際，コンクリート工学，Vol.51，No.2，pp.194-199，2013.

3)　コンクリート標準示方書，維持管理編，2007年制定.

4) 日本非破壊検査協会：新コンクリートの非破壊試験，技報堂出版，pp.286-289，2010年3月30日.
5) コンクリート委員会腐食防食小委員会報告：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，コンクリート技術シリーズ 26，p.138，1997.
6) 寺澤広基：コンクリート内部鉄筋破断の漏洩磁束法片面診断に関する研究，博士学位論文，京都大学，2014.
7) 佐藤大起，寺澤広基，鎌田敏郎：漏洩磁束法における鉄筋の残留磁化と鉄筋腐食の関係，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.18，pp.31-34，2018.10.
8) 戎谷大樹，山本貴士，高谷哲，高橋良和：漏洩磁束法を用いたコンクリート中の鋼材腐食量および防食範囲の推定，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.19，pp.391-396，2019.10
9) García-Martín, J., Gómez-Gil, J. and Vázquez-Sánchez, E. : Non-destructive techniques based on eddy current testing, Sensors, Vol.11, No.3, pp.2525-2565, 2011.
10) Yasugi, T., Majima, Y., Sakai, K., Kiwa, T. and Tsukada, K. : Detection and Imaging of Internal Cracks by Tangential Magnetic Field Component Analysis using Low-Frequency Eddy Current Testing, 19th World Conference on Non Destructive Testing, pp.1-8, 2016.
11) Koyama, K., Hoshikawa, H. and Taniyama, N. : Investigation of Eddy Current Testing of Weld Zone by Uniform Eddy Current Probe, 15th World Conference on NDT, 2000, https://www.ndt.net/article/wcndt00/ papers/idn046/idn046.htm.
12) He, D., Wang, Z., Kusano, M., Kishimoto, S. and Watanab, M. : Evaluation of 3D-Printed titanium alloy using eddy current testing with high-sensitivity magnetic sensor, NDT E Int., Vol.102, pp.90-95, 2019.
13) Pasadas, D., Ribeiro, A. L., Ramos, H. G. and Rocha, T. : 2D geometry characterization of cracks from ECT image analysis using planar coils and GMR-sensors, 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, pp.1-5, 2016.
14) Chen, K. et al.: Differential coupling double-layer coil for eddy current testing with high lift-off, IEEE Sensors Journal, Vol.21, No.16, pp.18146-18155, 2021.
15) Ricci, M. et al.: Evaluation of the lift-off robustness of eddy current imaging techniques, NDT and E International, Vol.85, pp.43-52, 2017.
16) He, D.: Corrosion Evaluation of Steel Rebar Using Electromagnetic Induction Method, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.45, pp.141-146, 2020.
17) Lo, C. C. H., Nakagawa, N.: Evaluation of eddy current and magnetic techniques for inspecting rebars in bridge barrier rails, AIP Conference Proceedings, Vol.1511, pp.1371-1377, 2013.
18) Frankowski, P. K.: Corrosion detection and measurement using eddy current method, 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop, pp.398-400, 2018.
19) 熊英，北垣亮馬，野口貴文 ：モルタル中の鉄筋表面における腐食生成物の透磁率の違いが電磁

誘導法鉄筋探査試験結果に及ぼす影響把握に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，pp.1855-1860，2013.

# 第３章 渦電流の動磁場応答に基づく計測原理に関する基礎的検討

## 3.1 はじめに

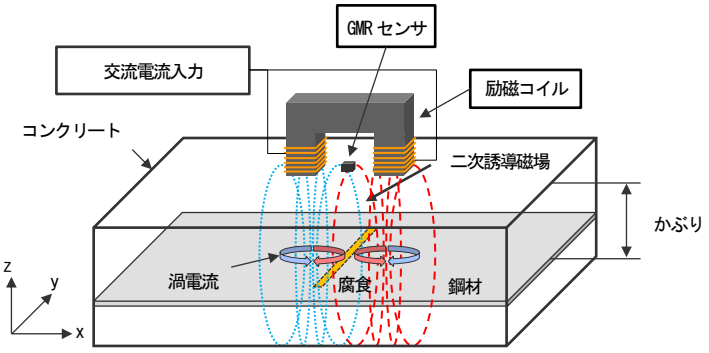
本章では，コンクリートかぶりを模擬したリフトオフ距離 30 mm で鋼材表面の腐食損傷を測るために，渦電流法の動磁場応答に基づく計測方法を検討した。本章では，本計測方法の計測原理，計測システムの構成と実験条件についての検討を行った。

## 3.2 計測原理

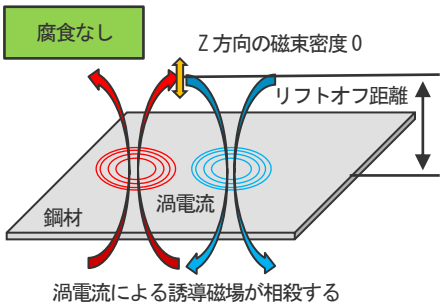
計測原理を**図-3.2.1** に示す。交流電源より正弦波交流電流を励磁コイルに通電し，交流磁場を励起する。励磁コイルの磁極端部の極性は逆であり，この磁場により 2 つの磁極下部にはそれぞれ逆方向の渦電流が誘起される。また，これらの渦電流により二次的な誘導磁場が発生する。GMR センサは励磁コイルの磁極面の磁極間の中央に設置し，鋼板に垂直な z 方向の磁場を計測する。

**図-3.2.1(b)** に示す腐食などの発生がない場合は，2 つの磁極面の中心位置で左右の渦電流による誘導磁場が相殺し，z 方向の磁場が発生しない。一方，**図-3.2.1(c)** に示す腐食による断面欠損などで，鋼板表面の渦電流のバランスが崩れると，センサ位置の z 方向の磁場が発生し，この位置に設置した磁気センサにより腐食の存在が検出される。

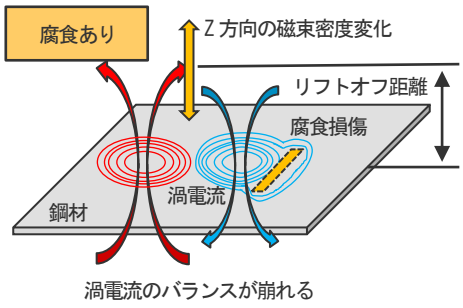
**図-3.2.1(d)** に GMR センサによる Bz 方向の磁場検出の原理を模式的に示している。励磁コイルの磁極間を結ぶ長手方向を x 軸方向に設置した場合，GMR センサの直下の鋼板には y 軸方向に渦電流が流れる。この渦電流による誘導磁場は GMR センサに対して x 軸方向の磁場を生成するが，鋼板に断面欠損がなく左右で対称な渦電流が分布する場合は，z 軸方向の磁場（Bz）が誘起されず，GMR センサの出力は非常に小さい信号となる。一方，断面欠損の存在で鋼板に誘起される渦電流が GMR センサの左右で異なった分布をする場合は，誘導磁場の向きが y 軸に対して傾斜し z 軸方向の成分が現れるようになるため，z 軸方向の磁場（Bz）が検出される。



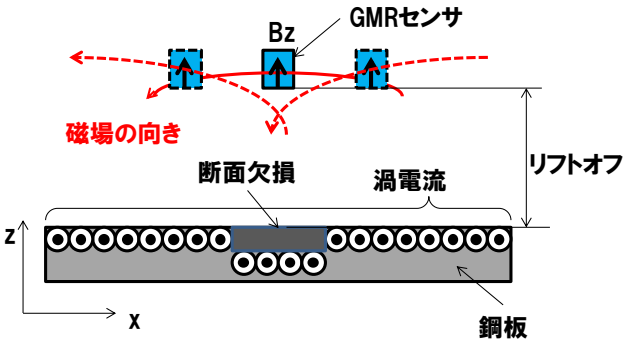

(a) 計測原理の概要




(b) 腐食なし




(c) 腐食あり




(d) GMR センサによる磁場の検出

図-3. 2. 1　計測原理

## 3.3 計測システムの構成

図-3.3.1 に計測システムの構成を示す。計測システムは，励磁コイル，GMR センサを一体として搭載する計測治具（以下は計測プローブと呼ぶ），およびこれらを位置制御する XYZ 制御装置と，シグナルジェネレータ（NF WF1946B），バイポーラ増幅器（NF HSA4051），前置増幅器（NF CA5360），ロックインアンプ（NF LI5645），およびディジタルオシロスコープ（YOKOGAWA DL350）から構成される。図-3.3.2 と図-3.3.3 に計測システムの写真を示す。

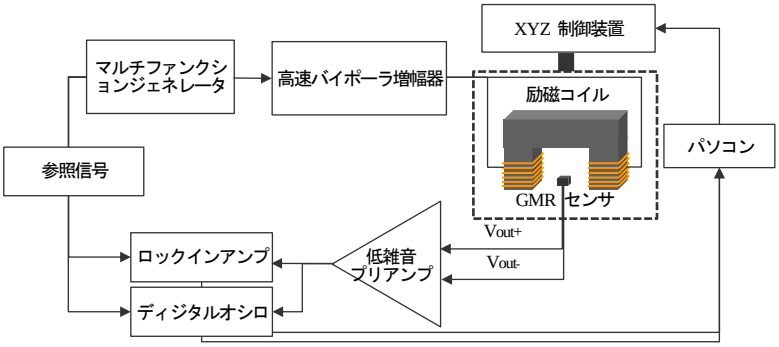



図-3.3.1　計測システムの構成

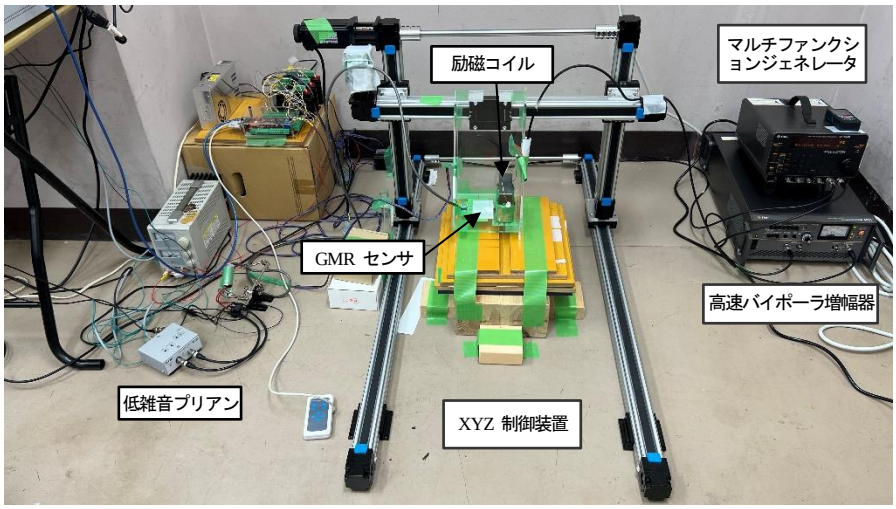



図-3.3.2　計測状況 1

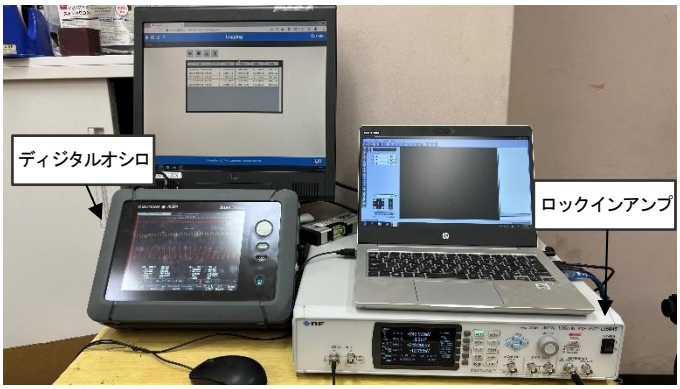
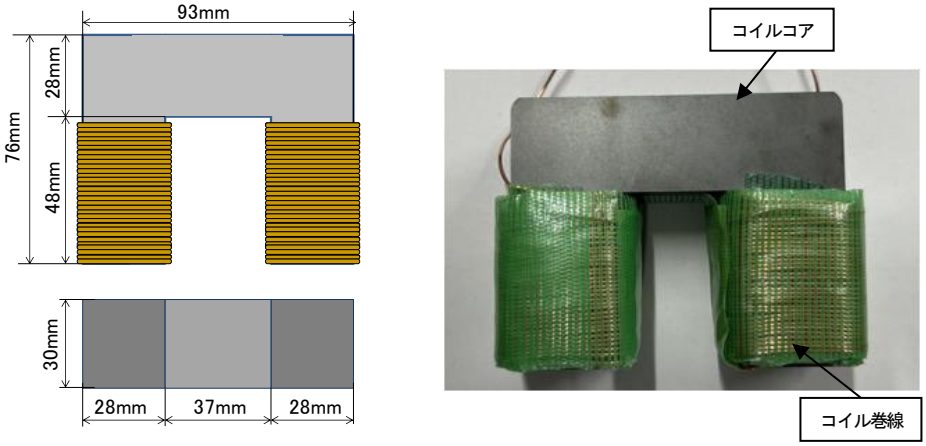



図-3.3.3　計測状況 2

### 3.3.1 励磁コイル

図-3.3.4 に励磁コイルの外形および外観を示す。表-3.3.1 に励磁コイルの諸元を示す。励磁コイルは実効透磁率（$\mu_e$）が 1900 であるコの字型のフェライトコアに導線を巻き製作した[1]。外形寸法は，93 mm × 76 mm × 30 mm，コイル断面は 30 mm × 28 mm とし，脚部の巻き線は $\varphi$1 mm の導線にて片端あたり 140 ターンとした。また，それぞれの磁極の巻き線の方向は，2 つの磁極端面の極性が逆になる向きとした。




(a) 外形　　(b) 外観

図-3.3.4　励磁コイルの概要

表-3.3.1　励磁コイルの諸元

| 励磁コイル | 諸元 |
|---|---|
| コイル寸法 | 93 mm × 76 mm ×30 mm |
| コイル断面 | 30 mm × 28 mm |
| コイル巻数（片端） | 140 ターン，$\varphi$1 mm |
| コア材料 | フェライトコア |
| 相対実効透磁率 | 1900 |

### 3.3.2 GMRセンサ

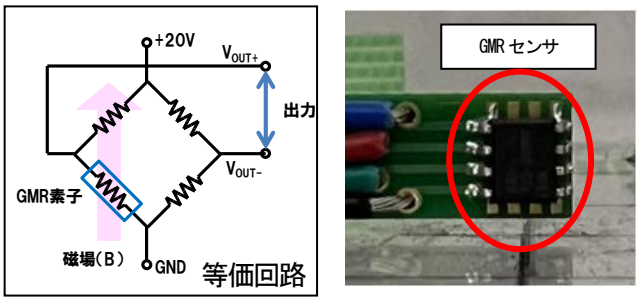
3.2 に示した計測方法の原理により，動磁場の微小な変化を計測するために，高感度磁気センサを導入することとした。表-3.3.2 に各種類の磁気センサ:超伝導量子干渉計（SQUID: Superconducting Quantum Interference Device）センサ，磁気インピーダンス（MI: Magneto-Impedance）効果センサ，フラックスゲートセンサ，Hall 効果センサ，磁気抵抗（MR: Magneto-Resistance）効果センサ，巨大磁気抵抗（GMR: Giant Magneto-Resistance）効果センサとトンネル型磁気抵抗（TMR: Tunnel Magneto-Resistance）効果センサの特徴を示す[2)3)]。

SQUID は感度が非常に高いが，低温で動作させる必要があり，一般的な現場測定には適用が難しい。フラックスゲート素子は測定可能な磁界周波数が数 kHz までであるため，本研究で対象とするより高い周波数の場合に適用できない。ホール素子と MR 素子の最小可能な検出磁界は約 0.5 Oe，GMR 素子は約 0.01 Oe，GMR 素子の感度は MR 素子の約 10 倍であり[4)]，微小な動磁場変化を検出する用途には，感度がより高い GMR センサの適用性が高いと考えた。一方，愛知製鋼の MI センサ（MI-CB-1DM）[4)]は GMR センサより感度が高いが，適用周波数は 10kHz までであり[5)]，本研究の適用範囲が 10kHz 以上の周波数を用いる可能性もあるため，本研究では周波数範囲がより大きい GMR センサを選択した。

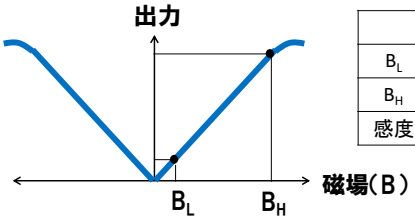
表-3.3.2　磁気センサの特徴比較[2)]

| 種類 | SQUID | MI 効果 | フラックスゲート | Hall 効果 | MR/GMR/TMR 効果 |
|---|---|---|---|---|---|
| 原理 | 磁気量子効果（ジョセフソン効果） | 磁化回転による透磁率変化 | 高透磁率磁性コアの飽和特性 | 電子移動受けるローレンツ力 | 磁気抵抗効果<br>スピンと伝導電子の相互作用 |
| 出力変化 | 電流、電圧 | インピーダンス | 交流起電力波形 | 起電力、抵抗 | 抵抗 |
| 材料 | 金属系超伝導体<br>酸化物超伝導体 | アモルファス磁性体<br>FeCoSiB, CoSiB, CoNbZr 等 | 軟磁性体+コイル<br>Fe-Ni-In, Fe-Hf-O, Co-Ta-Hf 等 | 半導体<br>InSb, InAs, GaAs, Si, AlGaAsSb 等 | 強磁性体<br>NiCo, NiFe<br>FeMn/NiFe/Cu/NiFe 等 |
| 製法 | 蒸着、スパッタ | スパッタ | 電着、スパッタ | 蒸着、MBE、エピ | 蒸着、スパッタ |
| 感度 | 超高 | 高 | 高 | 中 | 低～高 |
| 動作域<br>(A/m) | $10^{-7}$～$10^{-4}$ | $10^{-4}$～$10^{4}$ | $10^{-4}$～$10^{2}$ | $10^{0}$～$10^{6}$ | $10^{0}$～$10^{4}$ |
| 特徴および用途 | 量子化出力<br>極低温動作<br>医療用 | 高速応答<br>小型 | マイクロコイルで小型化 | 一般的用途<br>モータ位置制御<br>IC との結合 | 小型<br>ハードディスクヘッド用, MRAM メモリ用 |
| 磁界の周波数[3)] | 0～数百 kHz | 0～数 MHz | 0～数 kHz | 0～数百 kHz | 0～数百 kHz |

以上より，磁気センサとして微小磁場の変化に直線的な抵抗変化を示す巨大磁気抵抗効果センサ（GMR センサ：NVE AA002-2E）を適用した。図-3.3.5(a)に GMR センサの外観と等価回路を示す。GMR センサの感度は 1.5 Oe～10.5 Oe の範囲でリニアであり，外部より直流電圧を印加することで微小磁場による抵抗変化が電圧として出力される回路とした。GMR センサの特性を図-3.3.5(b)に示す。図により，二つ方向の磁場によるセンサの感度が同じ，出力電圧は常にプラスである。検出感度は 3～4.2mV/V-Oe であり，20 V 直流電圧が印加される場合，検出感度は 60～84 mV/Oe （600～840 mV/mT）である。ノイズを除去するため，GMR センサからの電圧信号は差動回路（図-3.3.6）に接続し，さらに低雑音プリアンプ（NF CA5360）により 100 倍に増幅してロックインアンプとディジタルオシロスコープに入力した。図-3.3.7 に GMR センサがコイルの 2 つの磁極端面の中央に設置して構成した検出プローブの写真を示す。また，磁場の検出方向は鋼材面に垂直な方向（Bz）とした。




(a) センサ外観と等価回路




| | 仕様 |
|---|---|
| $B_L$ | 1.5 Oe |
| $B_H$ | 10.5 Oe |
| 感度 | 3～4.2 mV/V-Oe |

(b) GMR センサの特性

図-3.3.5　GMR センサの概要

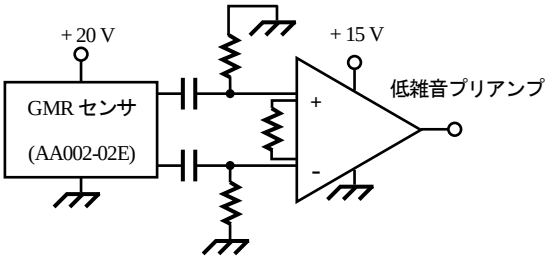



図-3.3.6　GMR センサの差動回路

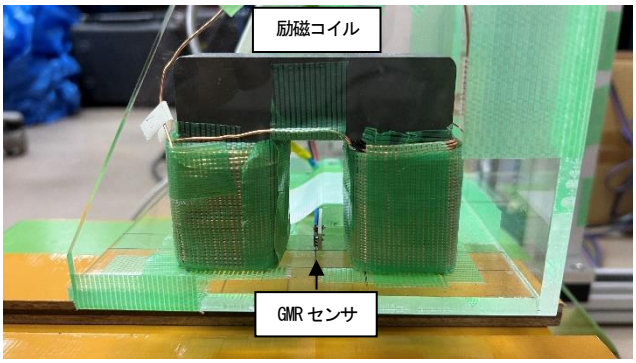



図-3.3.7　検出プローブ

### 3.3.3 実験条件

(1) 適用周波数についての検討

まず，本計測方法の周波数を決めるために，二次元有限要素解析を行った。解析モデルの概要を**図-3.3.8** に示す。二次元解析の分解能は 1 mm に設定した。フェライトコアのサイズは**図-3.3.4(a)** と同じとし，コイルの長さを 35 mm，厚みを 4 mm に設定した。解析対象の鋼板は，長さ 200 mm，厚み 2 mm に設定した。断面欠損を鋼板の中央に設置し，幅 3 mm，深さ 1 mm とした。励磁コイルと鋼板表面のリフトオフ距離は 30 mm にし，入力した正弦電流密度を 112 AT，周波数を 1 kHz～10 kHz に変化させて解析した。材料の物性値を**表-3.3.3** に示す。鋼板の材料は鉄を想定して比透磁率 5000 を設定した。励磁コイルを鋼板の中央（x = 0 mm）から 2 mm ずつ x = 12 mm 位置に達するまで移動させ，励磁コイル両磁極の中央位置の空気要素（GMR センサの位置）の y 方向（鋼板表面と垂直方向）の磁束密度の最大振幅値（By-max，正負値が等しい）を算出した。

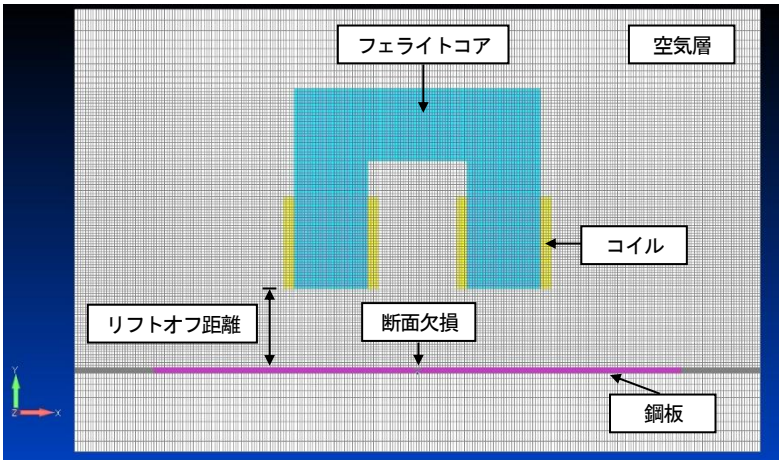



図-3.3.8　二次元有限要素解析の概要

表-3.3.3　材料の物性値

| 物性 | 比透磁率 ($\mu_r$) | 電気伝導率 ($\sigma$, S/m) |
|---|---|---|
| フェライトコア | 1500 | 0 |
| 鋼板 | 5000 | $1\times10^7$ |
| 銅線 | 1 | 0 |
| 空気 | 1 | 0 |

解析結果を図-3.3.9 示す。1 kHz から 10 kHz まで，磁束密度の振幅値は一旦大きくなってから減少し，全移動範囲において 4 kHz の場合最も大きいピークが表れた。そのため，実験の入力電流の周波数を 4 kHz に設定した。

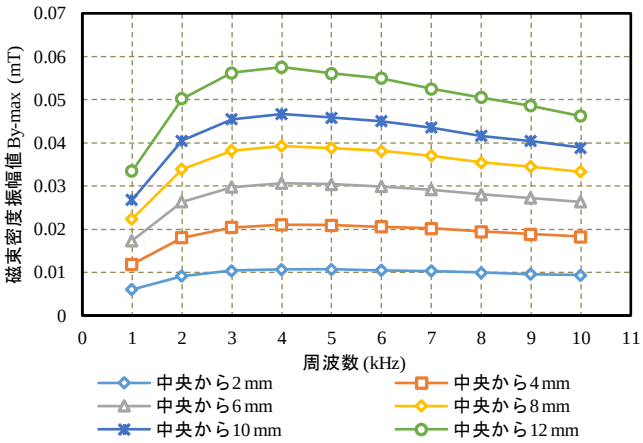



図-3.3.9　周波数変化による磁束密度の振幅値変化

(2) データ収集

シグナルジェネレータにより，解析で決定した周波数 4 kHz，振幅 10 Vp-p の正弦波信号を出力し，バイポーラ増幅器を介して 20 倍に増幅して励磁コイルに印加した。これにより励磁コイルに 35 V，145.7 mA の電流が流れ交流磁場が生成された。また，GMR センサの出力信号は差動回路で雑音を除去後，低雑音前置増幅器により 100 倍に増幅して，ロックインアンプと波形記録装置に入力した。また，シグナルジェネレータの参照信号は，ロックインアンプとディジタルオシロスコープに同期信号として入力した。

ロックインアンプの計測原理を図-3.3.10 に示す。ロックインアンプは，測定信号と参照信号の積から参照信号と同相成分（X）と直交成分（Y）を低域通過フィルタ（LPF）によって直流として抽出し，位相差 θ を算出するものである。本実験では参照信号の周波数は 4 kHz のため，出力信号の同相成分，直交成分を抽出し，位相差 θ を算出した。計測位置に対して，毎回の計測は位相差の値を 10 個記録し，平均値を算出して実験結果として記録した。

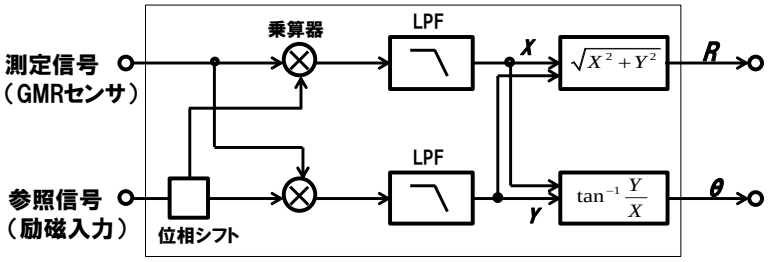



図-3.3.10　ロックインアンプの原理

電圧振幅値はディジタルオシロスコープ（DL350）を用いて記録した。GMR センサからの電圧信号交流部分を注目するため，入力カップリングは交流（AC）に設定した。参照信号の周波数は 4 kHz のため，6.4 kHz の低周波フィルタを用いてディジタルオシロスコープに波形を表示した。また，電圧振幅値を計算するため，波形パラメータの自動測定の機能を用いて，計測位置毎に，毎回 50 回計測し，平均値を算出して実験結果として記録した。

## 3.4 まとめ

本章では，渦電流の動磁場応答に基づくコンクリート中の鋼材腐食の計測方法の計測原理，計測システムの構成と実験条件を説明した。本研究は GMR センサを用いたが，TMR センサ [6]が MI センサと同じく GMR センサより感度が高いため，MI センサとともに代替素子になりうる。今後，検出プローブの精度を高めるために，MI センサ或は TMR センサで GMR センサを交換して性能改善できる可能性がある。第 4 章以降，本章の計測方法を用いた鋼材表面の断面欠損と腐食生成物が動磁場応答に与える影響についての実験，及び有限要素解析，腐食損傷の可視化の検討を行う。

# 参考文献


1) TDK Group Company : Ferrites and accessories U 93/76/30 with I 93/28/30 Cores, 2017. 5.
2) 例えば，權田俊一：薄膜作製応用ハンドブック，東京 ： エヌ・ティー・エス，p1063，2003. 4.
3) 毛利佳年雄：磁気センサ理工学（増補）―センサの原理から電子コンパス応用まで―，東京: コロナ社，pp.3-4，2016年1月18日.
4) 同上，p80.
5) AICHI STEEL: The product information of Type DM, https://www.aichi-steel.co.jp/ENGLISH/smart/mi/products/type-dm.html.
6) TDK Corporation: TMR センサ，https://product.tdk.com/ja/techlibrary/productoverview/tmr-angle-sensors.html.

# 第 4 章 鋼板表面の形状が動磁場応答に与える影響に関する実験的検討

## 4.1 はじめに

前章では，本研究の計測方法の原理を説明し，有限要素解析により適用周波数を決定した。本章では，本研究で提案した計測方法の実験的検証を行った。 GMR センサの実験データは，電圧振幅値と位相差のそれぞれを記録した。まず，電圧振幅値と電圧振幅値変化率を指標として実験結果を考察し，断面欠損の存在と位置を効果的に評価できることを明らかにするとともに，断面欠損の寸法変化が電圧振幅値とその変化率に与える影響を明らかにした。また，位相差の実験結果について検討し，位相差と位相差変化率を指標として，断面欠損の有無を評価することが有効であることを明らかにするとともに，断面欠損の寸法変化が位相差変化率に及ぼす影響を明らかにした。

### 4.1.1 実験概要

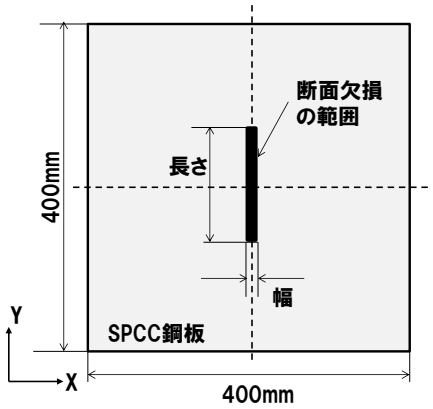
計測システムの構成は前章の**図-3. 3. 1** に示す通りである。計測システムは，励磁コイル，GMR センサを一体として搭載する計測治具，およびこれらを位置制御する XYZ 制御装置と，シグナルジェネレータ，バイポーラ増幅器，前置増幅器，ロックインアンプ，および波形記録装置から構成される。GMR センサからの検出信号は，ロックインアンプで位相差を記録するとともに，ディジタルオシロスコープで電圧振幅値を記録した。

### 4.1.2 試験体

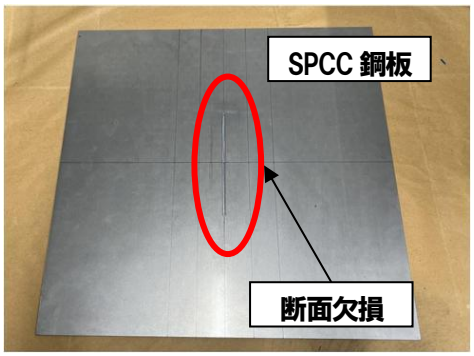
試験体は，400 mm × 400 mm × 2 mm の SPCC 鋼板を使用した。腐食による断面欠損を模擬するため，鋼材に切削加工を行った。試験体の断面欠損の範囲は鋼板の中心から x 軸に沿って上下方向に断面欠損範囲を設けた。（**図-4. 1. 1(a)**）。試験体の断面欠損の条件を**表-4. 1. 1** に示す。ここで，長さ-幅-深さを表す数値を組合せた表記法により，試験体を識別した。なお，「健全」は断面欠損のない健全な試験体を表している。断面欠損の長さは，135 mm，69 mm，33 mm，27 mm，21 mm とし，幅は 3 mm，9 mm，15 mm とした。断面欠損の深さは，0.6 mm，1 mm，1.4 mm とした。また，二つ断面欠損の間隔を 12 mm，18 mm，30 mm とし，これらの切削条件を組合せた実験条件を構成した。試験体（135-3-1）の外観を**図-4. 1. 1(b)** に示す。

表-4.1.1　試験体の断面欠損の条件

| 試験体 | 長さ（mm） | 幅（mm） | 深さ（mm） | 間隔（mm） |
|---|---|---|---|---|
| 135-3-0.6 | 135 | 3 | 0.6 | ― |
| 135-3-1 | 135 | 3 | 1 | ― |
| 135-3-1.4 | 135 | 3 | 1.4 | ― |
| 135-9-1 | 135 | 9 | 1 | ― |
| 135-15-1 | 135 | 15 | 1 | ― |
| 69-3-1 | 69 | 3 | 1 | ― |
| 33-3-1 | 33 | 3 | 1 | ― |
| 27-3-1 | 27 | 3 | 1 | ― |
| 21-3-1 | 21 | 3 | 1 | ― |
| 135-3-1-S12 | 135 | 3 | 1 | 12 |
| 135-3-1-S18 | 135 | 3 | 1 | 18 |
| 135-3-1-S30 | 135 | 3 | 1 | 30 |
| 健全 | ― | ― | ― | ― |




(a) 試験体外形



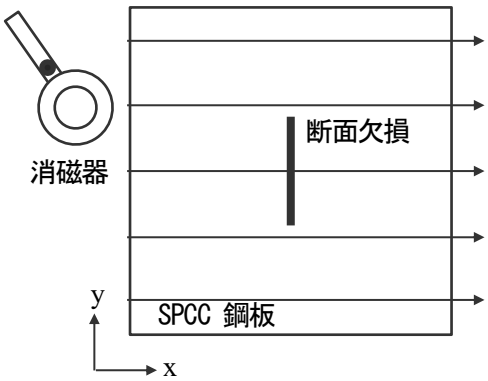

(b) 試験体外観

図-4.1.1　試験体の概要

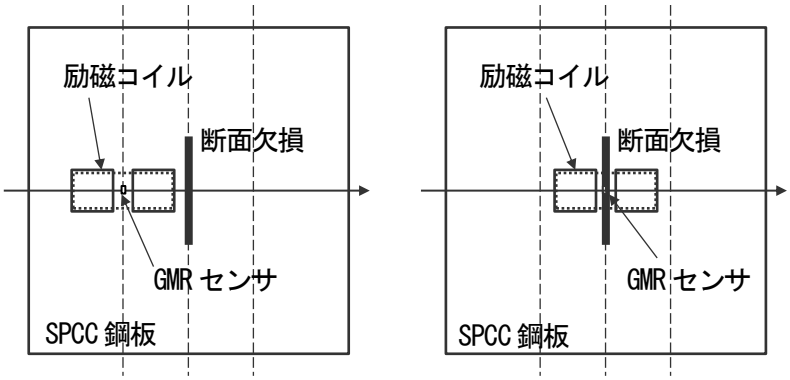
### 4.1.3 計測概要

計測に先立ち，鋼板自体の磁化の影響を除去するため，**図-4.1.2(a)**に示すように鋼板の断面欠損の長手方向に垂直（x 軸方向）に消磁器を 5 回移動させ消磁を行った。

試験体での計測は，3 軸方向に移動可能な XYZ 制御装置に励磁コイルと GMR センサを搭載し，鋼板に対するリフトオフ距離を 30 mm に設定した。次に，断面欠損の長手方向に垂直（x 軸方向）に -60 mm から +60 mm まで 3 mm ずつ移動させて，ディジタルオシロスコープとロックインアンプで電圧振幅値と位相差を記録した。計測線の配置を**図-4.1.2(b)**に示す。**図-4.1.2(b)**の左図は計測開始位置（-60 mm），右図は計測中間位置（0 mm）における励磁コイル，GMR センサの配置を示す。また，**図-4.1.3** に計測状況を示す。




(a) 鋼板の消磁




(b) 計測線の配置

**図-4.1.2　計測概要**

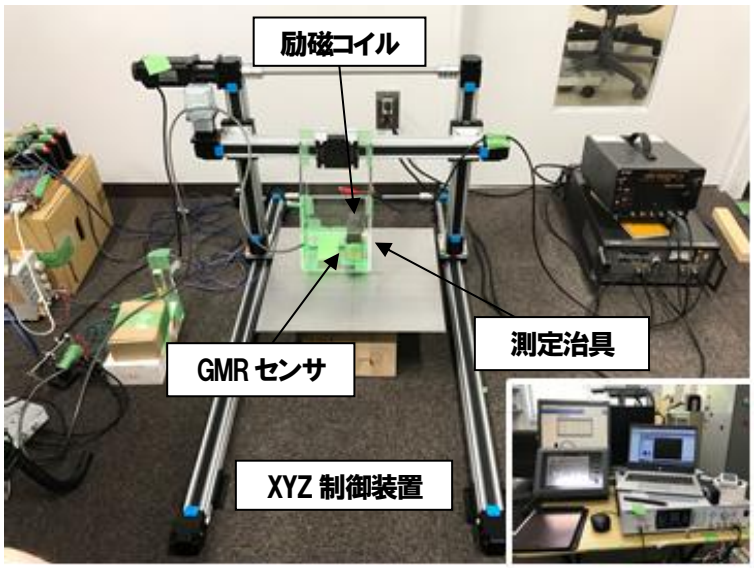



図-4.1.3　計測状況

## 4.2 動磁場応答の振幅値に着目した断面欠損の検出に関する実験的評価

まず，動磁場応答の振幅値に着目し，かぶりに相当するリフトオフ距離 30 mm から GMR センサを用いて計測し，鋼板の断面欠損が動磁場応答の振幅に与える影響について基礎的評価を行った。具体的には，健全な鋼板と，切削加工により断面欠損を模擬した鋼板を対象に動磁場応答の振幅値に着目し，断面欠損の長さ，幅，深さが GMR センサで検出する磁場の振幅に及ぼす影響を評価した。

### 4.2.1 断面欠損の長さ変化が電圧振幅値に及ぼす影響

腐食損傷を切削加工により模擬した断面欠損を有する鋼板に対して，XYZ 制御装置に検出プローブを設置し測定した。計測結果が開始位置の影響を受けないようにすることを確認するため，4.1.3 に示す計測手順後，すべての鋼板を 180°回転させて再度計測した。すべての図において，説明文の表記「135-3-1-1」は，断面欠損の寸法が長さ 135 mm×幅 3 mm×深さ 1 mm を方向 1（方向 2 とは鋼板を 180°回転させた状態）で測定したことを示す。表-4.2.1 に断面欠損のサイズに対応した実験結果の凡例を記す。図-4.2.1 は，断面欠損の長さ変化による電圧振幅値の変化と，健全の場合の電圧振幅値の変化を示すために，すべての電圧振幅値の結果を 1 つのグラフにまとめたものである。

図-4.2.1 に示す健全の場合の線形的な実験結果と比較すると，断面欠損が存在する場合の電圧振幅値の実験結果が S 字形状の変化をすることが明らかに見えることより，本計測方法は電圧振幅値の結果により，鋼板表面の断面欠損の存在を評価できることを分かった[1]。また，鋼板の中央から-12 mm ～ -18 mm，12 mm ～ 18 mm 離れた位置に正のピーク値と負のピーク値が対称に現れており，断面欠損が正負ピーク値の位置の間に存在することを評価可能であることが示唆された。

表-4.2.1　実験凡例の説明

| 実験凡例 | 長さ（mm） | 幅（mm） | 深さ（mm） | 測定方向 |
|---|---|---|---|---|
| 21-3-1-1 | 21 | 3 | 1 | 1 |
| 21-3-1-2 | 21 | 3 | 1 | 2 |
| 27-3-1-1 | 27 | 3 | 1 | 1 |
| 27-3-1-2 | 27 | 3 | 1 | 2 |
| 33-3-1-1 | 33 | 3 | 1 | 1 |
| 33-3-1-2 | 33 | 3 | 1 | 2 |
| 69-3-1-1 | 69 | 3 | 1 | 1 |
| 69-3-1-2 | 69 | 3 | 1 | 2 |
| 135-3-1-1 | 135 | 3 | 1 | 1 |
| 135-3-1-2 | 135 | 3 | 1 | 2 |
| 健全-1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 健全-2 | 0 | 0 | 0 | 2 |

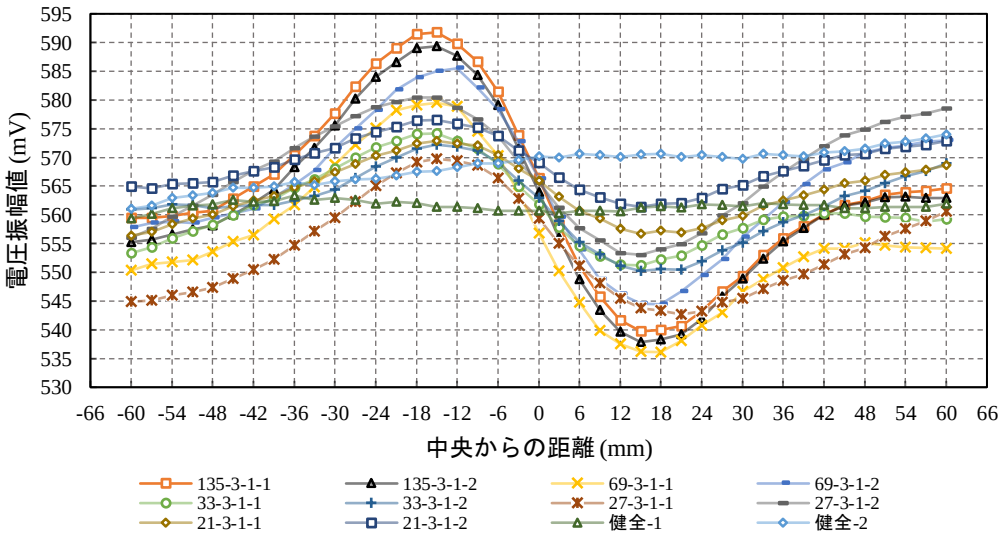



図-4.2.1　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化

次に，断面欠損の長さに対応した電圧振幅値の結果を図-4.2.2～図-4.2.7 にそれぞれ示す[1]。同じ断面欠損を往復して測定した結果，電圧振幅値の絶対値が若干ずれているが，曲線の形状はほぼ同じであり，正のピーク値と負のピーク値の位置は対応している。図-4.2.8 は，断面欠損の長さによる全条件の正負ピーク差をまとめたものである。図より，正負ピーク差もほぼ同じであることがわかった。以上の結果により，計測は断面欠損のどちら側から始めても近似的な結果が得られ，電圧振幅値のピーク差の値もほとんど影響を受けないことが分かった。 そのため，以降の計測は一方向からのみ行うこととした。

また，**図-4.2.8** により，断面欠損の長さが減少するとともに，電圧振幅値のピーク差は小さくなる傾向を示した。しかし，断面欠損の長さが 27 mm の場合，33 mm の場合よりも電圧振幅値のピーク差の値が大きくなった。この理由としては，参考文献 2)により鋼材の応力と透磁率が直線的な正相関の関係があることから，試験体の製造・加工時に大きな残留応力がかかり，透磁率が変化した可能性が考えられる。しかし，その具体的な理由については，今後の課題の一つとして検討する必要があると考えている。

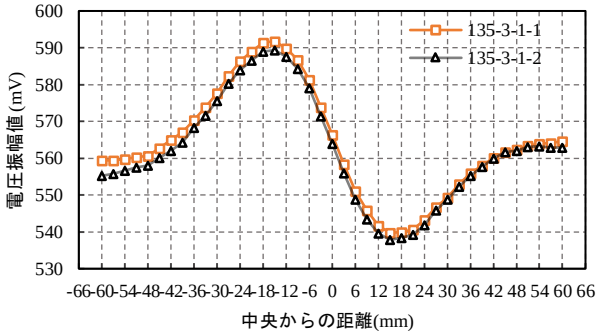



図-4.2.2　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化（試験体 135-3-1）

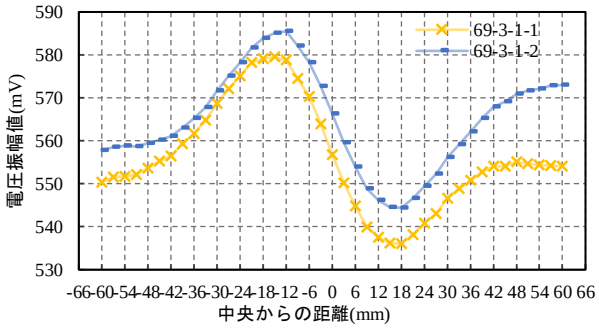



図-4.2.3　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化（試験体 69-3-1）

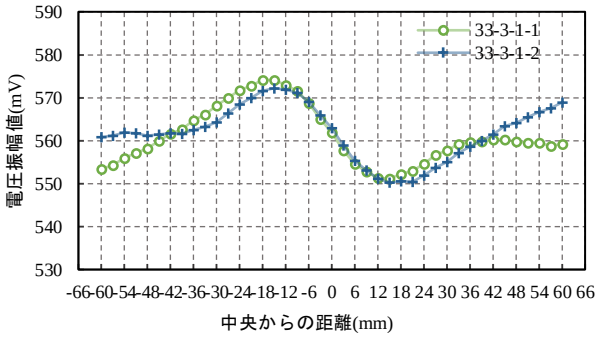



図-4.2.4　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化（試験体 33-3-1）

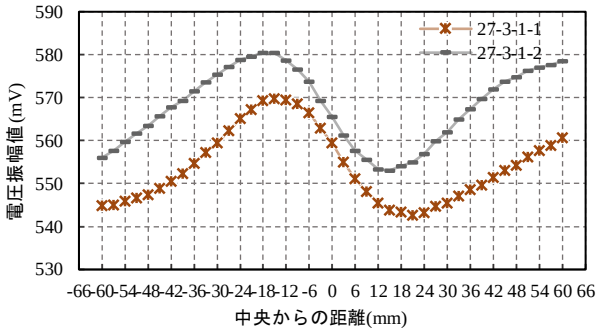



図-4.2.5　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化(試験体 27-3-1)

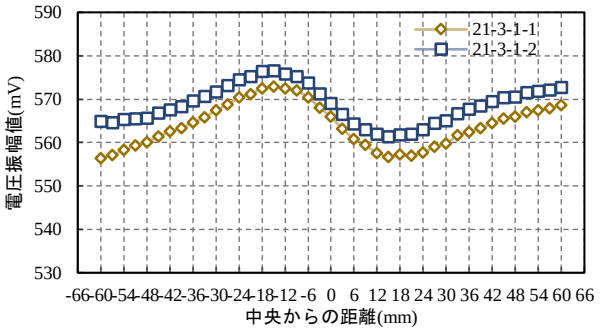



図-4.2.6　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化(試験体 21-3-1)

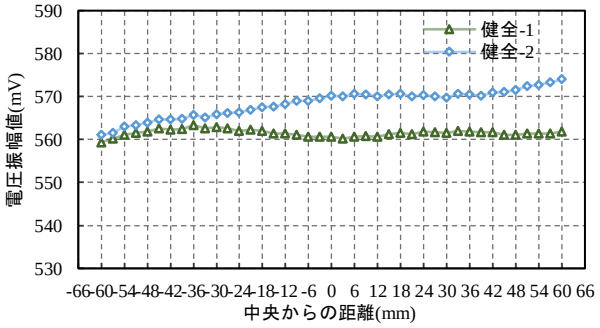



図-4.2.7　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化(試験体 健全)

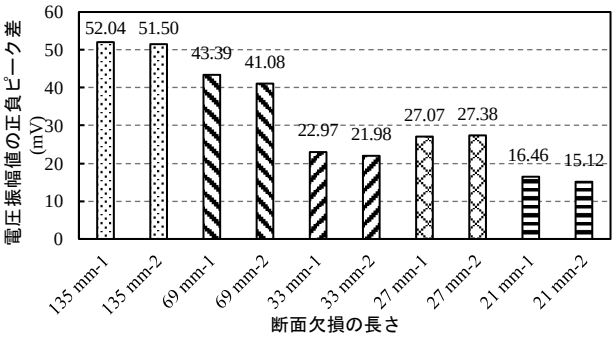



図-4.2.8　断面欠損の長さによる電圧振幅値の正負ピーク差の変化

断面欠損による実験結果の変化をより直接的に評価するために，区間数 4 の移動平均計算式(1)によって電圧振幅値の変化率を算出した。各測定において，電圧振幅値変化率 ($x_n$) は 40 個で，移動平均計算後の値 ($\bar{x}_n$) は 36 個であった。x 軸のオフセットは-1.5 mm で補正した [1]。**図-4.2.9** に断面欠損の長さ変化の場合と健全の場合の電圧振幅値変化率の全条件での結果を示す。鋼板健全の場合の電圧振幅値変化率の結果は， 0 に近くほぼ変化がない直線であった。一方，断面欠損がある場合の結果は，電圧振幅値変化率が断面欠損の存在位置で負のピークとなることが観察され，両側に正のピーク値も現れることが分かった。このため，電圧振幅値変化率の結果により，鋼材表面の断面欠損の存在と位置を評価できることが分かった [1]。

$$\bar{x}_n = \left(\frac{x_{n-2}+x_{n-1}+x_n+x_{n+1}}{4} + \frac{x_{n-1}+x_n+x_{n+1}+x_{n+2}}{4}\right)\Big/2 \quad (1)$$

ここで, n = 3~38

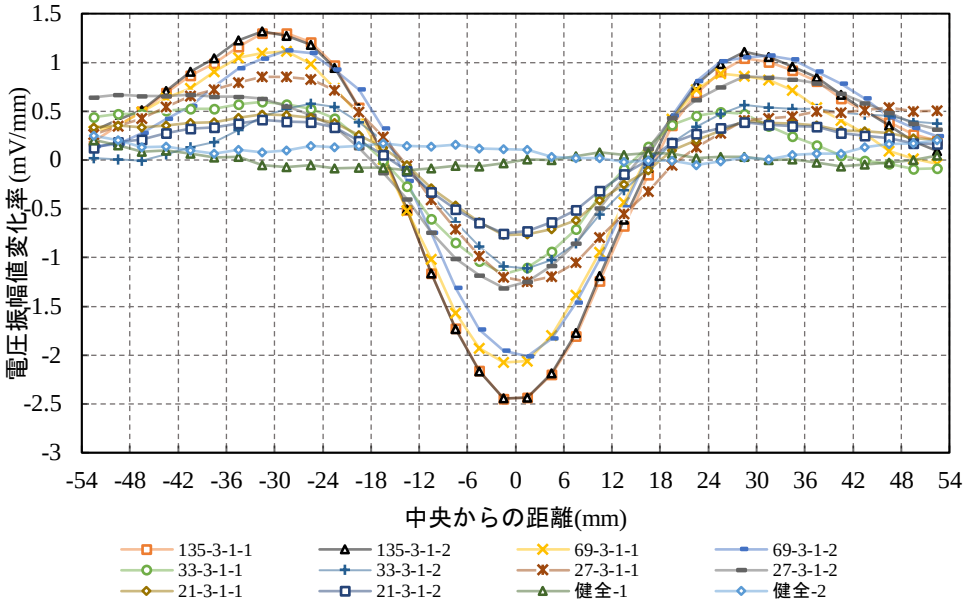



**図-4.2.9　断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の変化**

次に，断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の結果をそれぞれ**図-4.2.10～図-4.2.15** に示す。電圧振幅値変化率の結果は，電圧振幅値の結果のように往復計測でずれることがなかった（長さ 27 mm 以外）。また，**図-4.2.16** により，断面欠損の長さが 27 mm，又は 33 mm の場合の結果が異常であるが，断面欠損の長さが減少するとともに，電圧振幅値変化率の負のピーク値が大きくなる傾向を示した [1]。

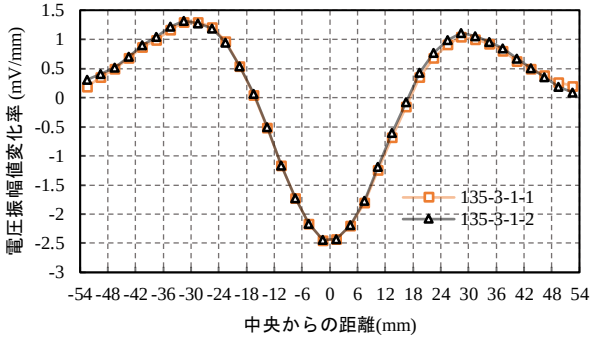



図-4.2.10　断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の変化(試験体 135-3-1)

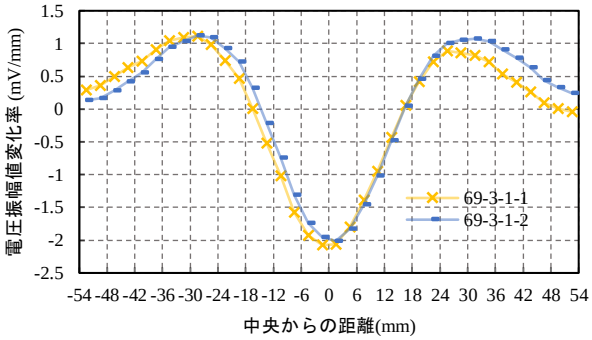



図-4.2.11　断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の変化(試験体 69-3-1)

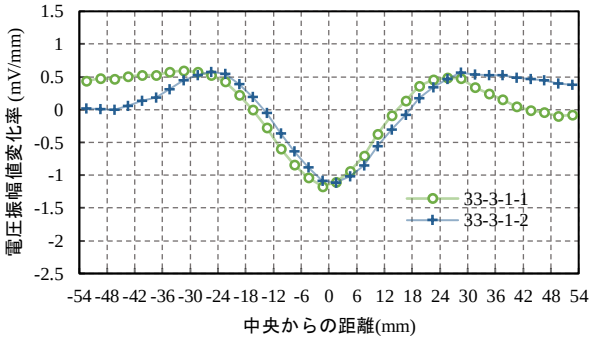



図-4.2.12　断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の変化(試験体 33-3-1)

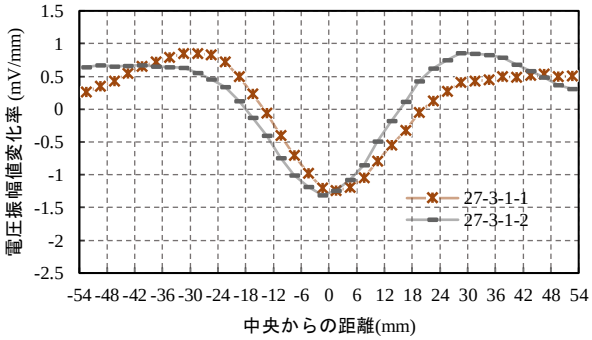



図-4.2.13　断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の変化(試験体 27-3-1)

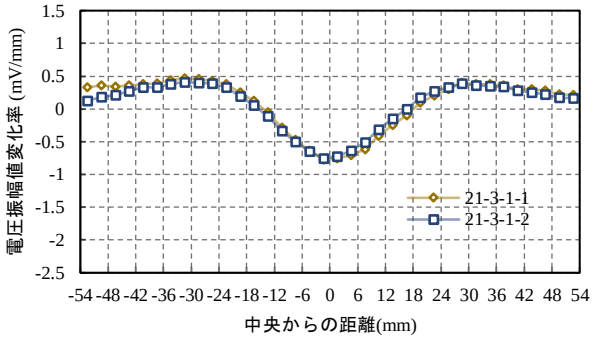



図-4. 2. 14　断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の変化(試験体 21-3-1)

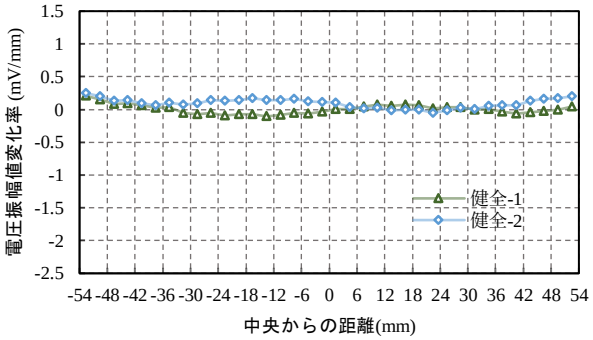



図-4. 2. 15　断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の変化(試験体 健全)

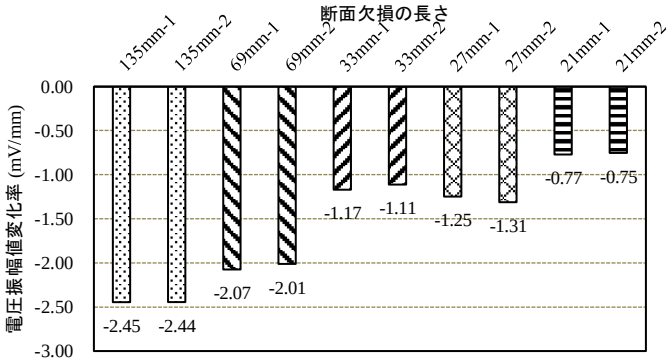



図-4. 2. 16　断面欠損の長さによる電圧振幅値変化率の負のピーク値の変化

### 4.2.2 断面欠損の幅変化が電圧振幅値に及ぼす影響

本節では，断面欠損の幅変化による GMR センサの電圧振幅値と電圧振幅値変化率の結果を検討する。本実験では往復計測しないため，実験結果の凡例は**表-4. 1. 1** に示す表記とした。幅変化の影響を検討するため，長さ 135 mm，深さ 1 mm，幅 3 mm，9 mm，15 mm の試験体を計測した。試験結果は 135-3-1, 135-9-1 と 135-15-1 で表記した。先ずは 135-9-1 と 135-15-1 の実験結果を**図-4. 2. 17**, **図-4. 2. 18** に示す。異なる幅の測定値はいずれも同様の S 字形状を示すが，正負ピーク値の位置は ±15 mm と±18 mm に現れ，大きな違いがなかった。このため，本実験の検出プローブは，15 mm 以下の幅変化をピークの位置で区別できないことがわかった。また，正負ピーク差の大きさには明らかなばらつきがあった。**図-4. 2. 19** は 135-3-1，135-9-1 と 135-15-1 の正負ピーク差をまとめて示し

たものである。これより，電圧振幅値の正負ピーク差は，断面欠損の幅が変化しても明確な傾向を示さないことがわかった。

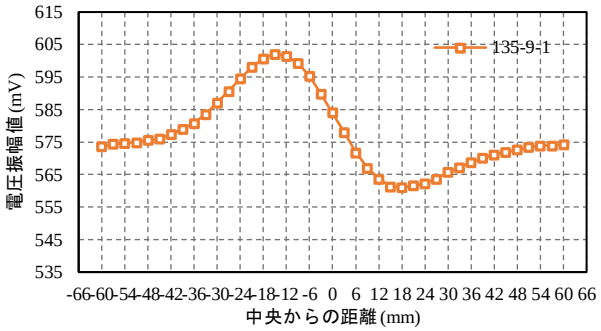



図-4. 2. 17　断面欠損の幅による電圧振幅値の変化（試験体 135-9-1）

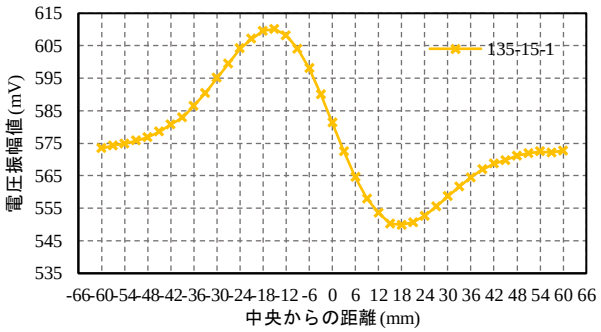



図-4. 2. 18　断面欠損の幅による電圧振幅値の変化（試験体 135-15-1）

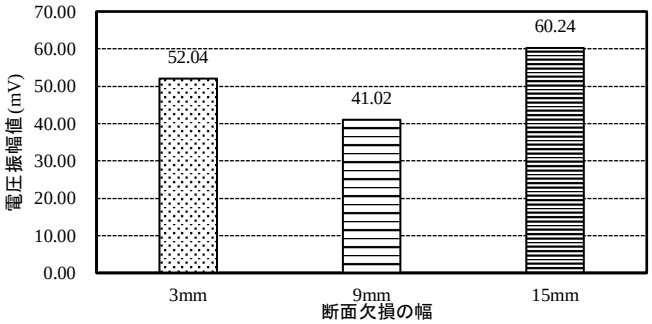



図-4. 2. 19　断面欠損の幅による電圧振幅値の正負ピーク差の変化

次に，断面欠損の幅変化による電圧振幅値変化率を図-4. 2. 20～図-4. 2. 21 に示す。幅 9 mm と 15 mm の場合，電圧振幅値変化率の負のピークの位置が断面欠損の存在場所を示す可能であることが分かった。図-4. 2. 22 は 135-3-1，135-9-1 と 135-15-1 の負のピーク値をまとめて示したものである。これより，電圧振幅値変化率の負のピーク値は，断面欠損の幅が変化しても明確な傾向を示さないことがわかった。

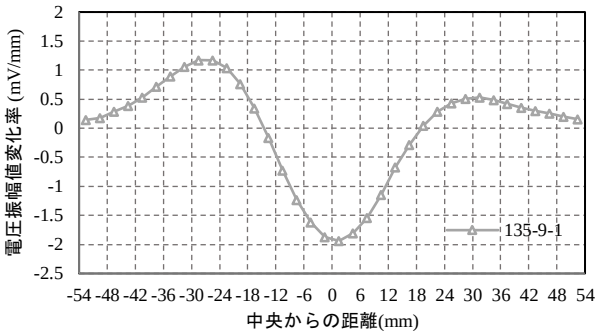



図-4. 2. 20　断面欠損の幅による電圧振幅値変化率の変化（試験体 135-9-1）

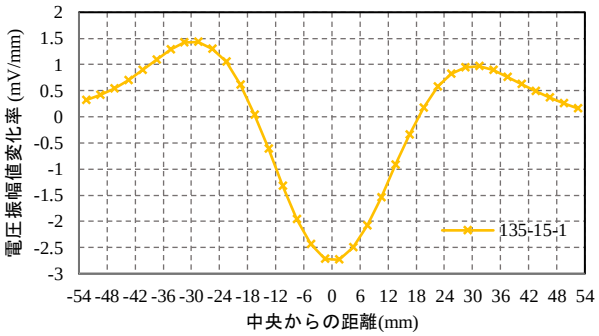



図-4. 2. 21　断面欠損の幅による電圧振幅値変化率の変化（試験体 135-15-1）

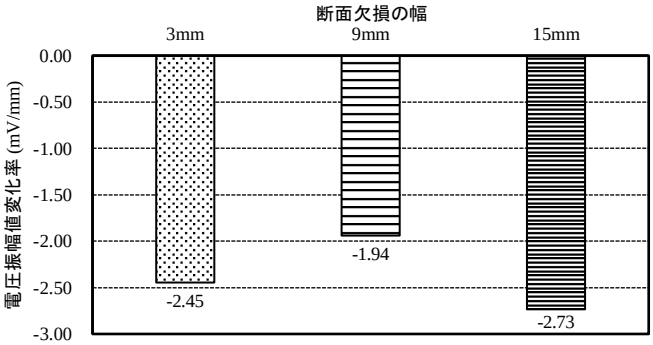



図-4. 2. 22　断面欠損の幅による電圧振幅値変化率の負のピーク値の変化

### 4.2.3 断面欠損の深さ変化が電圧振幅値に及ぼす影響

断面欠損の深さ変化の影響を検討するため，長さ 135 mm，幅 3 mm，深さ 0.6 mm，1 mm，1.4 mm の試験体を計測した。以降は 135-3-0.6，135-3-1 と 135-3-1.4 で表記する。まずは 135-3-0.6 と 135-3-1.4 の実験結果を図-4. 2. 23，図-4. 2. 24 に示す。異なる幅の測定値はいずれも同様な S 字形状を示したが，正負ピーク値の位置は±15 mm に現れ，大きな違いがなかった。また，正負ピーク差の大きさには明らかなばらつきがあった。図-4. 2. 25 は 135-3-0.6，135-3-1 と 135-3-1.4 の正負ピーク差をまとめて示したものである。電圧振幅値の正負ピーク差は，断面欠損の深さが大きくなるとともに，増大する傾向があることがわかった。

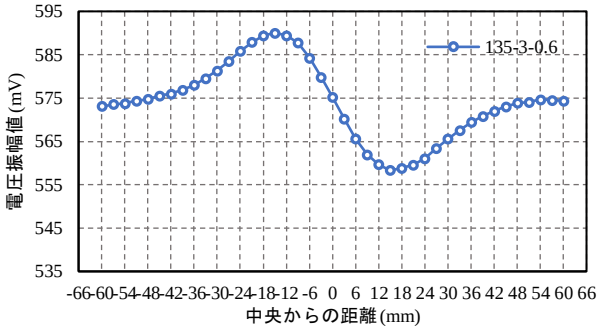



図-4.2.23　断面欠損の深さによる電圧振幅値の変化(試験体 135-3-0.6)

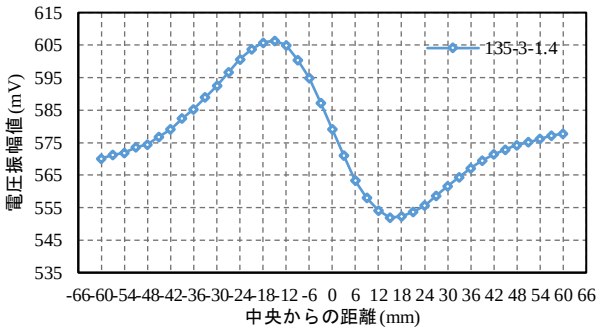



図-4.2.24　断面欠損の深さによる電圧振幅値の変化(試験体 135-3-1.4)

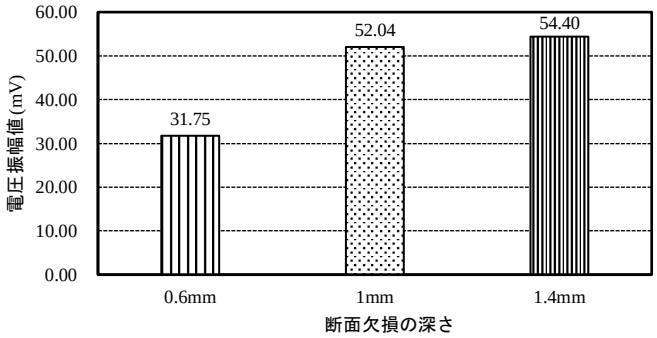



図-4.2.25　断面欠損の深さによる電圧振幅値の正負ピーク差の変化

次に，断面欠損の深さ変化による電圧振幅値変化率を図-4.2.26，図-4.2.27 に示す。深さ 0.6 mm と 1.4 mm の場合，電圧振幅値変化率の負のピークの位置が断面欠損の存在場所を示す可能性があることが分かった。図-4.2.28 は 135-3-0.6，135-3-1 と 135-3-1.4 の負のピーク値をまとめて示したものである。電圧振幅値変化率の負のピーク値は，断面欠損の深さの変化が大きくなると，減少する傾向を示すことがわかった。

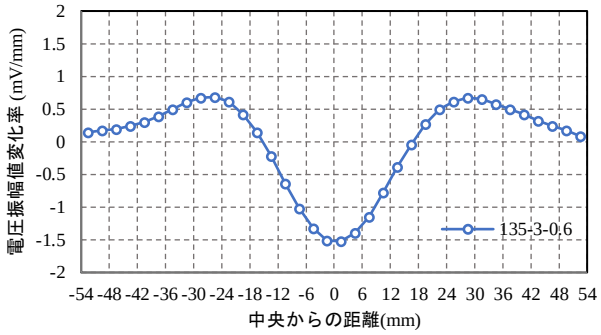



図-4.2.26　断面欠損の深さによる電圧振幅値変化率の変化(試験体 135-3-0.6)

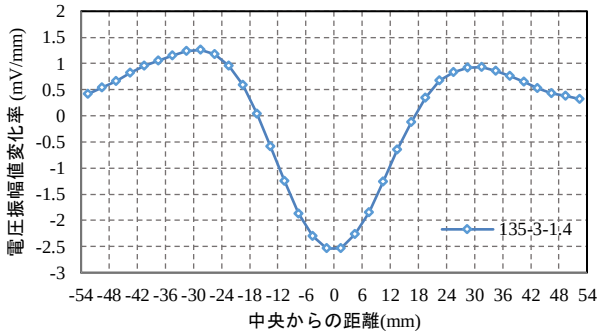



図-4.2.27　断面欠損の深さによる電圧振幅値変化率の変化(試験体 135-3-1.4)

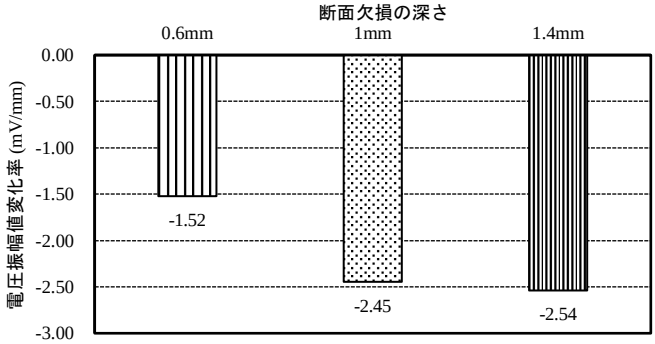



図-4.2.28　断面欠損の深さによる電圧振幅値変化率の負のピーク値の変化

### 4.2.4 二つの断面欠損の間隔変化が電圧振幅値に及ぼす影響

本研究の計測方法が複数の断面欠損を識別できることを検証するために，二つの断面欠損を持つ鋼板表面に対する計測実験を行い，二つの断面欠損間の距離の変化が動磁場応答に与える影響について検討した。二つの断面欠損間の距離は，それぞれの断面欠損の中心線間の距離である。二つの断面欠損のサイズはすべて長さ 135 mm，幅 3 mm，深さ 1 mm であり，間隔は 12 mm，18 mm，30 mm である（図-4.2.29 に示す）。

間隔 12 mm，18 mm，30 mm の試験体は 135-3-1-S12，135-3-1-S18 と 135-3-1-S30 で表記した。三つの試験体の実験結果を図-4.2.30～図-4.2.32 に示す。図-4.2.30 と図-4.2.31 により，間隔 12 mm と 18 mm の場合の電圧振幅値は，一つの断面欠損の場合と同様の S 字形状の結果が見られた。図-4.2.32 により，間隔 30 mm の場合，S 字形状と少し異なり，ピーク値間の電圧振幅値は緩やかにな

った。図-4.2.30～図-4.2.32 より，間隔 12 mm の正負ピークの位置は±18 mm であり，間隔 18 mm の正負ピークの位置は±21 mm，間隔 30 mm の正負ピークの位置は-27 mm と+30 mm になった。そのため，二つの断面欠損の間隔が大きくなるとともに，電圧振幅値のピークの位置が外側に移動する傾向を示すことがわかった。図-4.2.33 は 135-3-1-S12，135-3-1-S18 と 135-3-1-S30 の正負ピーク差をまとめて示したものである。電圧振幅値の正負ピーク差は，二つの断面欠損の間隔が大きくなるとともに，減少する傾向を示すことがわかった。

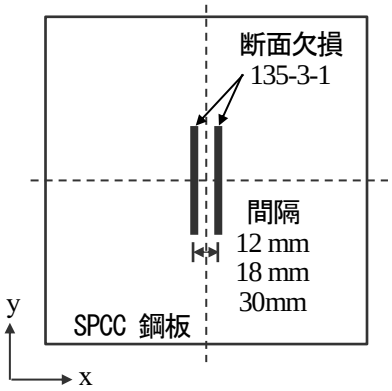



図-4.2.29　二つの断面欠損の間隔の変化

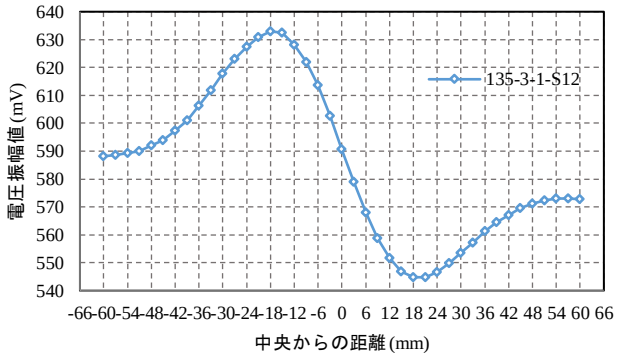



図-4.2.30　二つの断面欠損の間隔による電圧振幅値の変化(試験体 135-3-1-S12)

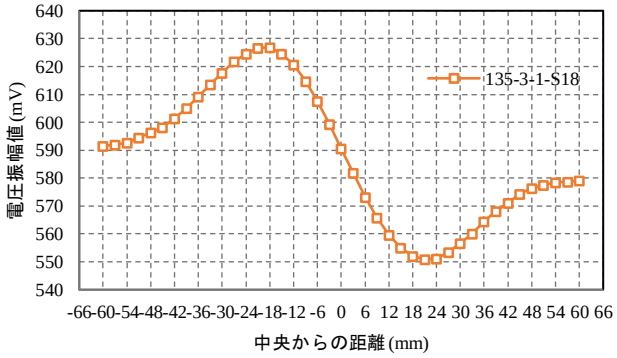



図-4.2.31　二つの断面欠損の間隔による電圧振幅値の変化(試験体 135-3-1-S18)

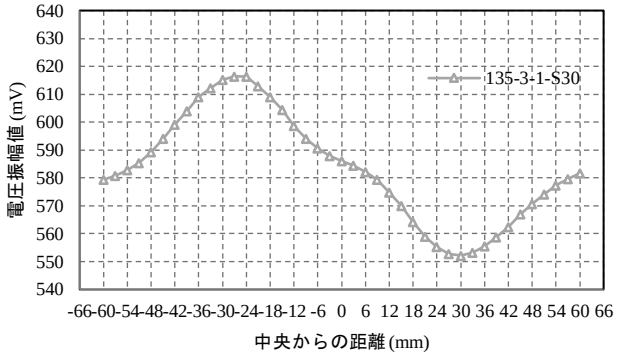



図-4.2.32　二つの断面欠損の間隔による電圧振幅値の変化(試験体 135-3-1-S30)

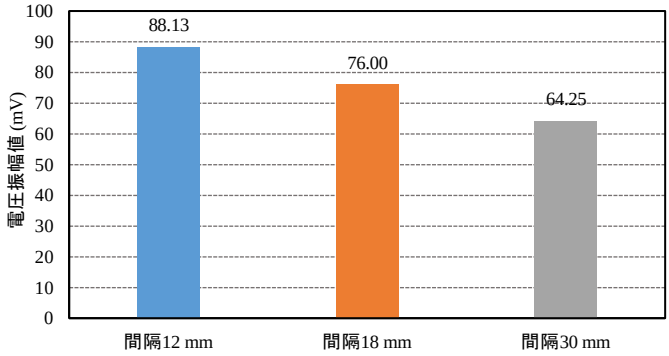



図-4.2.33　二つの断面欠損の間隔による電圧振幅値の正負ピーク差の変化

次に，二つの断面欠損の間隔変化による電圧振幅値変化率を図-4.2.34～図-4.2.36 に示す。図-4.2.34 と図-4.2.35 により，間隔 12 mm と 18 mm の場合の電圧振幅値変化率は，一つの断面欠損の場合と同様の形状の結果を示した。図-4.2.36 により，間隔 30 mm の場合，電圧振幅値変化率は一つの断面欠損と異なり，二つ負のピークが表れた。また，二つの負のピークの位置が二つの断面欠損の位置に対応することがわかった。このため，二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合，本研究の計測方法は，電圧振幅値変化率の結果により識別できることがわかった。図-4.2.37 は 135-3-1-S12，135-3-1-S18 と 135-3-1-S30 の負のピーク値をまとめて示したものである。電圧振幅値変化率の負のピーク値は，二つの断面欠損の間隔が大きくなると，小さくなる傾向を示すことがわかった。

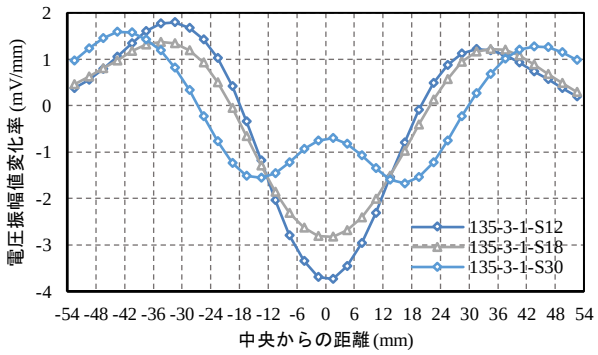



図-4.2.34　二つの断面欠損の間隔による電圧振幅値変化率の変化(試験体 135-3-1-S12)

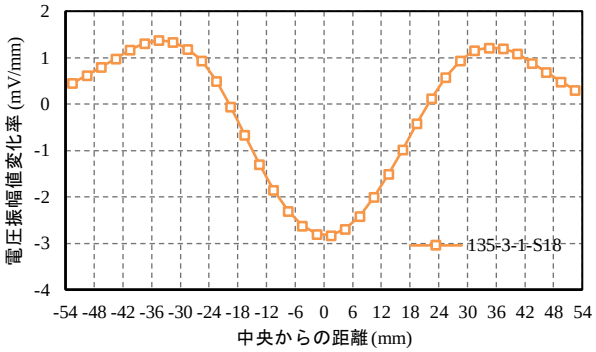



図-4.2.35　二つの断面欠損の間隔による電圧振幅値変化率の変化(試験体 135-3-1-S18)

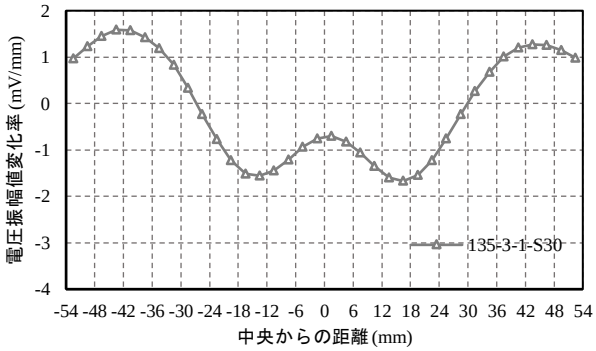



図-4.2.36　二つの断面欠損の間隔による電圧振幅値変化率の変化(試験体 135-3-1-S30)

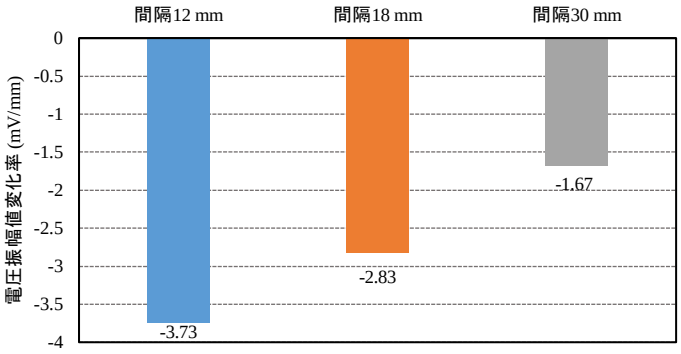



図-4.2.37　二つの断面欠損の間隔による電圧振幅値変化率の負のピーク値の変化

## 4.3 動磁場応答の位相差に着目した断面欠損の検出に関する実験的評価

本節は，鋼材腐食による断面欠損が交流磁場の位相に及ぼす影響に着目し，かぶりに相当するリフトオフ距離 30 mm から計測し，鋼板の断面欠損が動磁場応答の位相に与える影響について基礎的評価を行うことを目的とした。具体的には，健全な鋼板と，切削加工により断面欠損を模擬した鋼板を対象に，断面欠損の長さ，幅，深さと二つの断面欠損の間隔が GMR センサで検出する磁場の位相に及ぼす影響を評価した。

### 4.3.1 断面欠損の有無による位相差の変化

断面欠損の有無による位相差の変化を評価するため，①断面欠損がない場合（健全）と，②断面欠損が存在する場合（135-3-1）の計測を行った。**図-4. 3. 1** に，断面欠損の有無による位相差の変化を示す。図より，①断面欠損がない場合（健全）では，計測開始位置（-60 mm）から計測終了位置（+60 mm）までほぼ直線的な変化を示したが，位置における増減については明らかな変化が見られなかった。一方，②断面欠損が存在する場合（135-3-1）では S 字形状の変化を示し，断面欠損が存在する位置（0 mm）を中心にその両側で負のピークと正のピークが現れた。

いずれの場合においても，計測開始位置（-60 mm）と計測終了位置（+60 mm）の位相差の変化はほぼ等しく，周辺の磁場の影響も考えられたため，鋼板の位相差の変化率を算出することとした [3]。位相差の変化率は式(2)で算出した。また，変化率の算出時，差分演算で表れる結果のばらつきを抑えるため，スムージングを移動平均により行った。式(3)に採用した移動平均の定義を示す。

$$\Delta\theta_m = \frac{\theta_{m+1} - \theta_m}{x_{m+1} - x_m} \tag{2}$$

$$\Delta\theta_{ave.} = \left( \frac{\Delta\theta_{n-2} + \Delta\theta_{n-1} + \Delta\theta_n + \Delta\theta_{n+1}}{4} + \frac{\Delta\theta_{n-1} + \Delta\theta_n + \Delta\theta_{n+1} + \Delta\theta_{n+2}}{4} \right) \Big/ 2 \tag{3}$$

ここで，m = 1～40，n = 3～38 である。結果を**図-4. 3. 2** に示す。図より，①断面欠損が存在しない場合は，位相差変化率にほぼ変化が表れないが，②断面欠損が存在する場合は，断面欠損が存在する位置（0 mm）で正のピークが現れることがわかった [3]。

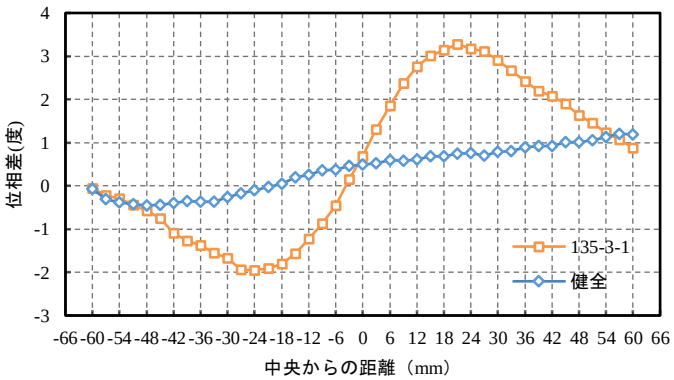



**図-4. 3. 1　断面欠損の有無による位相差の変化**

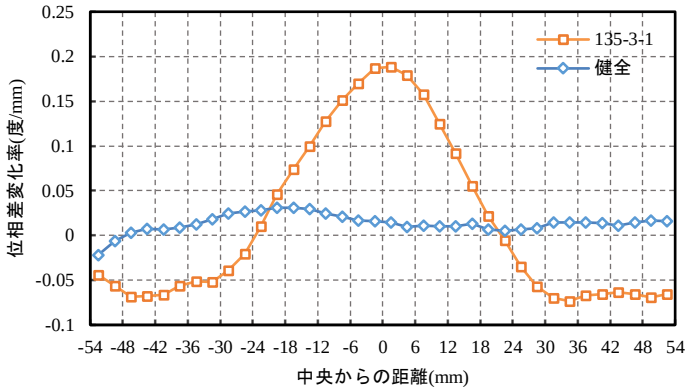



図-4.3.2　断面欠損の有無による位相差変化率の変化

### 4.3.2 断面欠損の長さ変化が位相差に及ぼす影響

断面欠損の長さによる位相差の変化を評価するため，断面欠損の長さが異なる条件の鋼板を対象に計測を行った。断面欠損の長さの条件としては，135 mm，69 mm，33 mm，27 mm，21 mm を対象とした。いずれも断面欠損の幅は 3 mm，深さは 1 mm とした。断面欠損の長さによる位相差の変化の結果を**図-4.3.3** に示す。図により，断面欠損がある場合の結果はすべて S 字形状になっているが，全体的に角度のオフセットが異なり，電圧振幅値のように明確な最大値と最小値が明らかに表れないため，断面欠損の位置を示す指標としては適切でないと考えられた [3]。そのため，位相差変化率のみを指標として，以下の断面欠損の形状変化が位相に及ぼす影響を評価した。

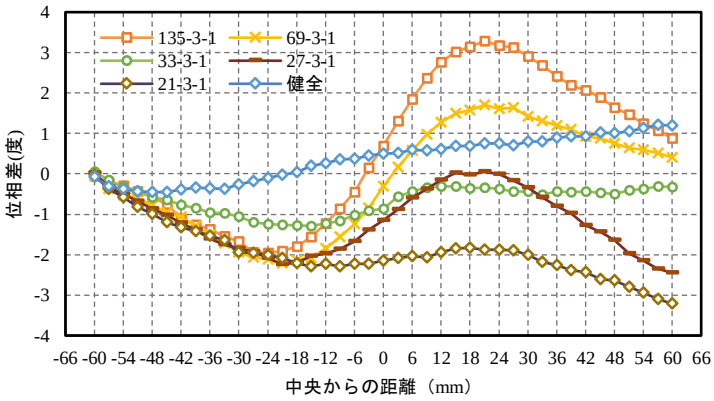



図-4.3.3　断面欠損の長さによる位相差の変化

**図-4.3.2**，**図-4.3.4～図-4.3.7** に，断面欠損の長さに対する位相差変化率を示す。図より，**図-4.3.2** と同様に，断面欠損の長さが異なるいずれの場合においても，断面欠損が存在する位置（0 mm）で正のピークが現れることがわかった。

**図-4.3.8** は，位相差変化率のピーク値と断面欠損の長さとの関係を示している。これより，断面欠損が 33 mm の場合（33-3-1）を除き，ピークの大きさは断面欠損の長さが大きいほど大きくなる傾向が確認された。

断面欠損の長さが 33 mm において位相差変化率が小さくなる原因については，試験体上の渦電流

の分布と断面欠損部の長さとの関係で，垂直方向の磁場が大きくなる条件があった可能性がある。このため，断面欠損部の長さが 33 mm の近傍においてより小さいピッチでの位相差変化率の変化を今後計測する必要があると考えられる。

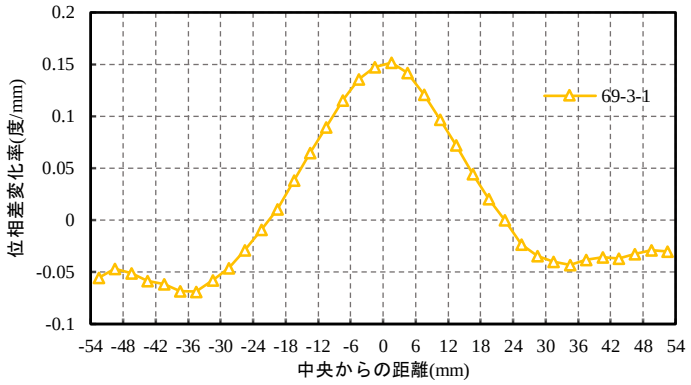



図-4.3.4　断面欠損の長さによる位相差変化率の変化（試験体 69-3-1）

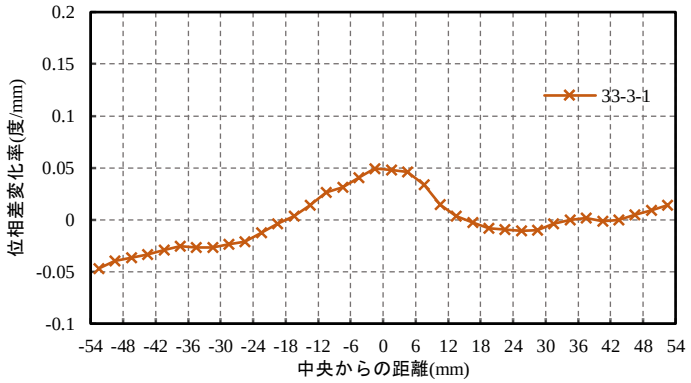



図-4.3.5　断面欠損の長さによる位相差変化率の変化（試験体 33-3-1）

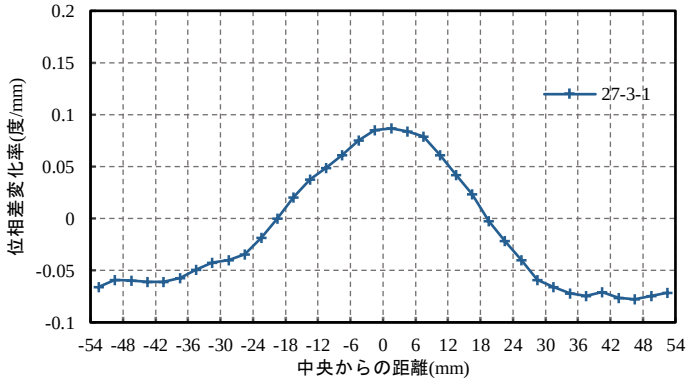



図-4.3.6　断面欠損の長さによる位相差変化率の変化（試験体 27-3-1）

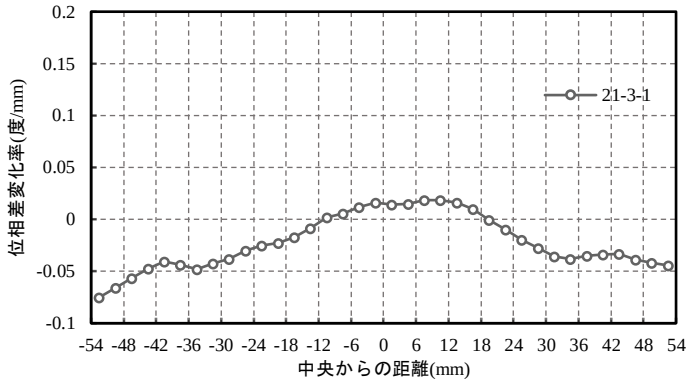



図-4.3.7　断面欠損の長さによる位相差変化率の変化(試験体 21-3-1)

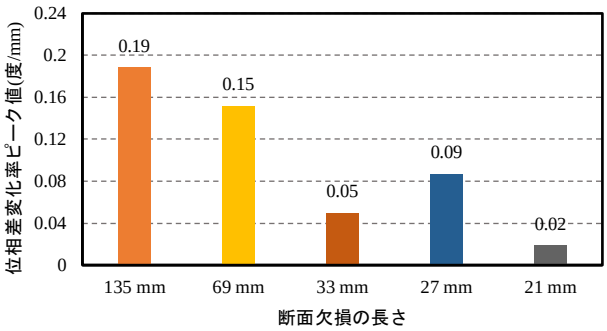



図-4.3.8　断面欠損の長さによる位相差変化率ピーク値の変化

### 4.3.3 断面欠損の幅変化が位相差に及ぼす影響

断面欠損の幅による位相差の変化を評価するため，断面欠損の幅が異なる条件の鋼板を対象に計測を行った。断面欠損の幅の条件としては，3 mm，9 mm，15 mm を対象とした。いずれも断面欠損の長さは 135 mm，深さは 1 mm とした。図-4.3.9 に，断面欠損の幅による位相差変化率を示す。図より，断面欠損の幅が異なるいずれの場合においても，断面欠損が存在する位置（0 mm）で正のピークが現れることがわかった。また，図-4.3.12 は，位相差変化率のピーク値と断面欠損の幅との関係を示している。これより，断面欠損の幅が大きいほど位相差変化率のピーク値が大きくなることがわかった[3)]。

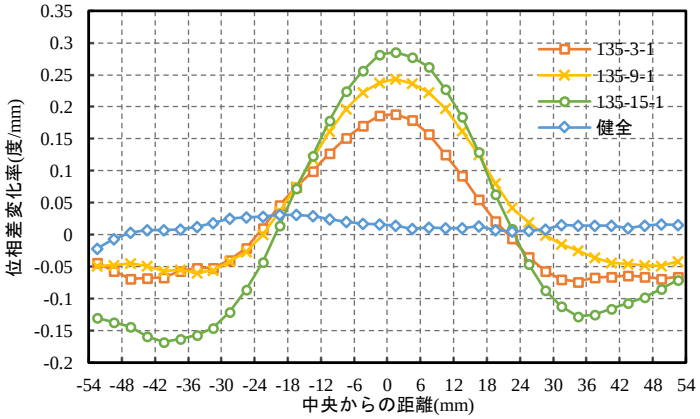



図-4.3.9　断面欠損の幅による位相差変化率の変化

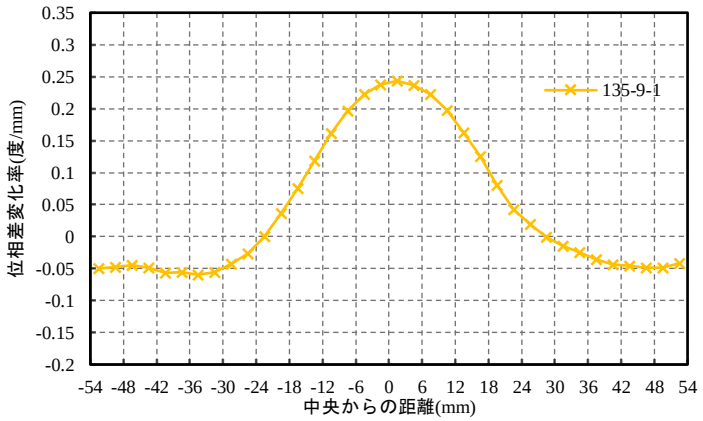



図-4.3.10　断面欠損の幅による位相差変化率の変化(試験体 135-9-1)

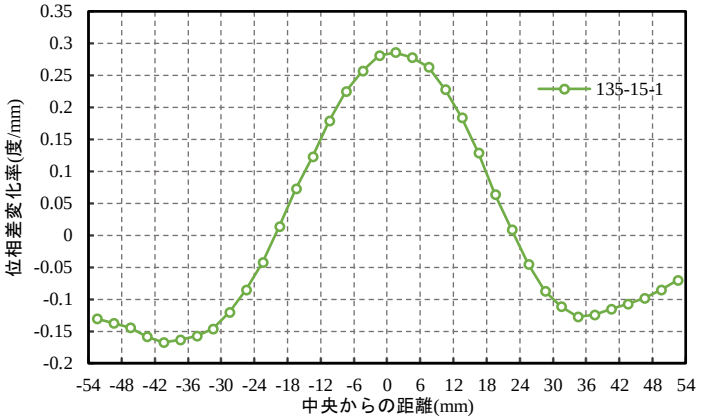



図-4.3.11　断面欠損の幅による位相差変化率の変化(試験体 135-15-1)

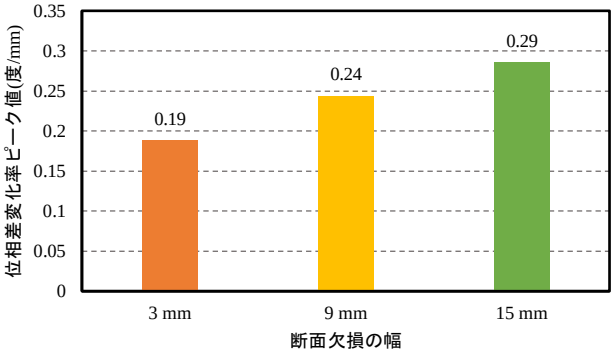



図-4.3.12　断面欠損の幅による位相差変化率ピーク値の変化

### 4.3.4 断面欠損の深さ変化が位相差に及ぼす影響

断面欠損の深さによる位相差の変化を評価するため，断面欠損の深さが異なる条件の鋼板を対象に計測を行った。断面欠損の深さの条件としては，0.6 mm，1 mm，1.4 mm を対象とした。いずれも断面欠損の長さは 135 mm，深さは 1 mm とした。**図-4.3.13** に，断面欠損の深さによる位相差変化率を示す。また，**図-4.3.16** は，位相差変化率のピーク値と断面欠損の深さとの関係を示している。これより，断面欠損の深さが大きいほど位相差変化率のピーク値が大きくなる傾向が確認された [3]。

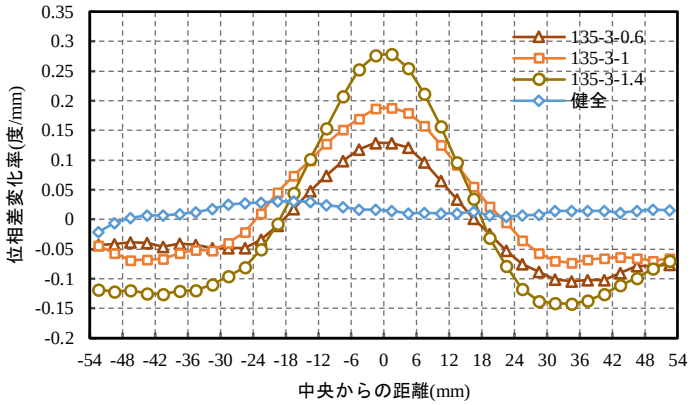



図-4.3.13　断面欠損の深さによる位相差変化率の変化

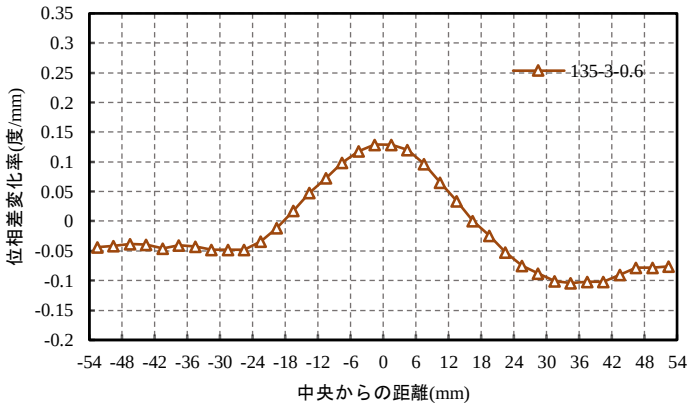



図-4.3.14　断面欠損の深さによる位相差変化率の変化(試験体 135-3-0.6)

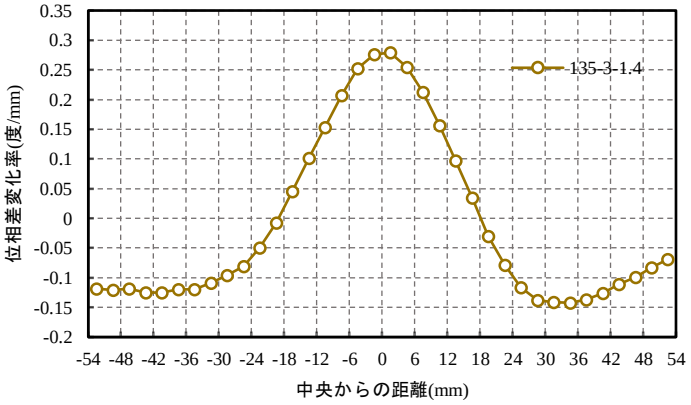



図-4.3.15　断面欠損の深さによる位相差変化率の変化(試験体 135-3-1.4)

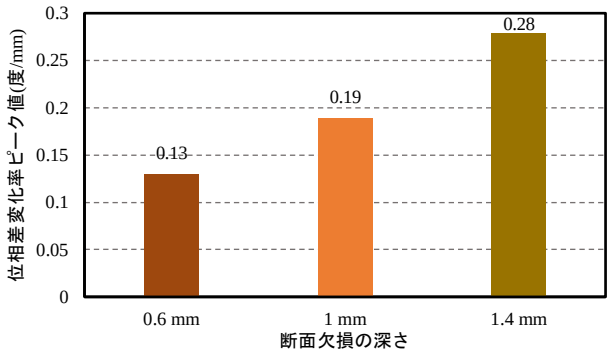



図-4.3.16　断面欠損の深さによる位相差変化率ピーク値の変化

### 4.3.5 二つの断面欠損の間隔変化が位相差に及ぼす影響

二つの断面欠損の間隔による位相差の変化を評価するため，断面欠損の間隔が異なる条件の鋼板を対象に計測を行った。断面欠損の間隔の条件としては，12 mm，18 mm，30 mm を対象とした。いずれも断面欠損の長さは 135 mm，幅 3 mm，深さは 1 mm とした。**図-4.3.17** に，断面欠損の間隔による位相差変化率を示す。間隔 12 mm と 18 mm の場合の位相差変化率の結果は，一つの断面欠損の結果と同様，0 mm の位置にピーク値が現れた。**図-4.3.17** により，間隔 30 mm の位相差変化率の結果では，正負 15 mm の位置で二つのピークはそれほど明らかに表れなかったが，値が変曲する傾向を示した。以上より，位相差変化率を指標とする分解能は電圧振幅値変化率より検出感度が低いことが示された。

また，**図-4.3.21** は，位相差変化率のピーク値と二つの断面欠損の間隔との関係を示している。これより，二つの断面欠損の間隔が大きいほど位相差変化率のピーク値が小さくなる傾向が確認された。

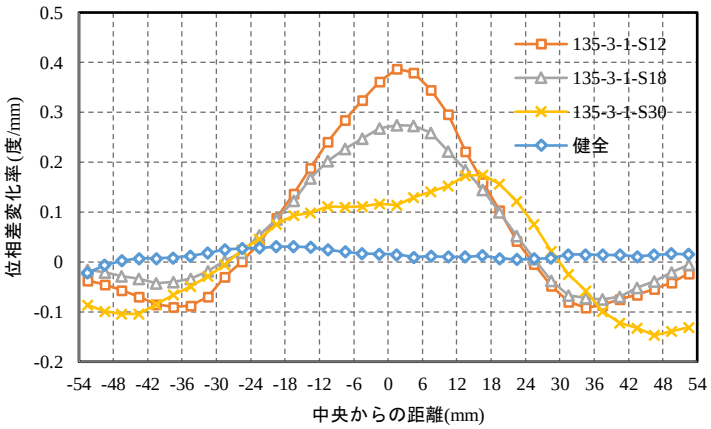



図-4.3.17　二つの断面欠損の間隔による位相差変化率の変化

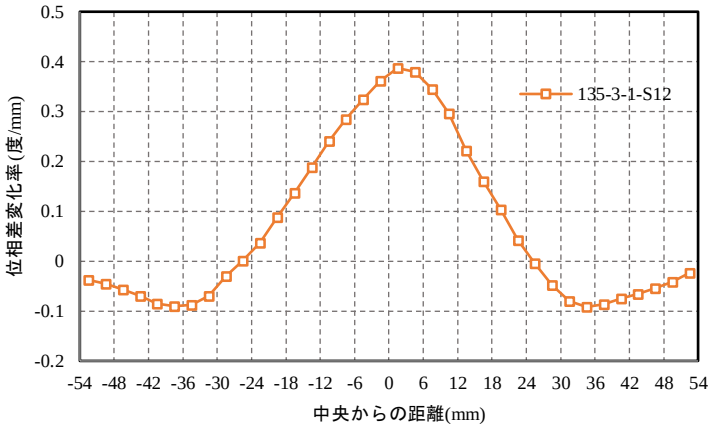



図-4.3.18　二つの断面欠損の間隔による位相差変化率の変化(試験体 135-3-1-S12)

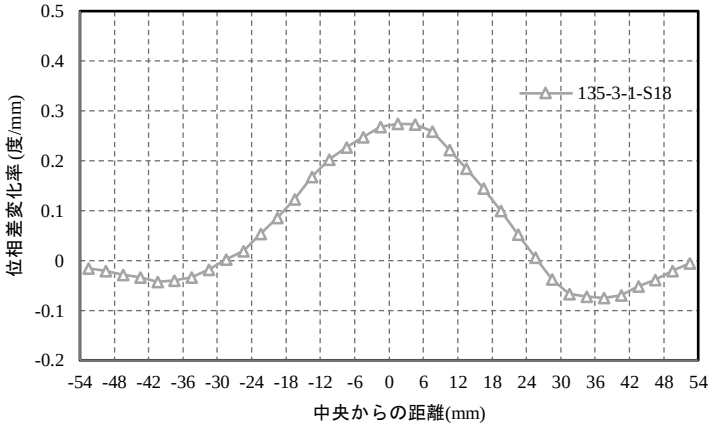



図-4.3.19　二つの断面欠損の間隔による位相差変化率の変化(試験体 135-3-1-S18)

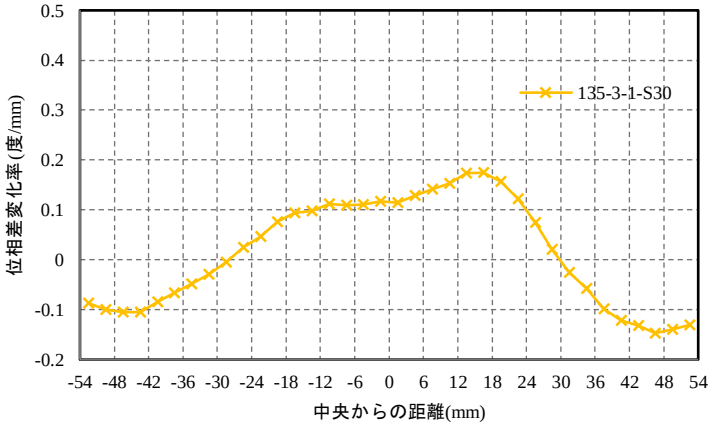



図-4.3.20　二つの断面欠損の間隔による位相差変化率の変化(試験体 135-3-1-S30)

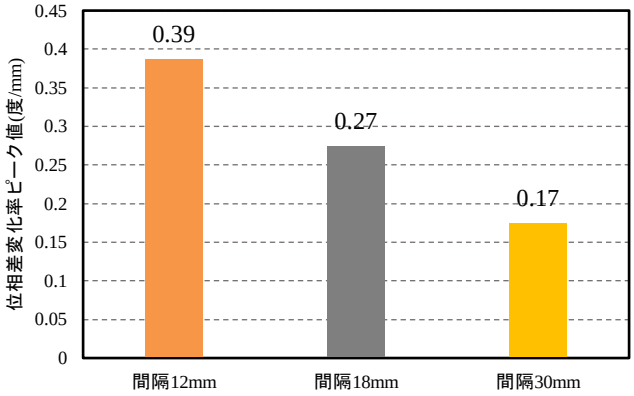



図-4.3.21　二つの断面欠損の間隔による位相差変化率ピーク値の変化

### 4.3.6 断面欠損と位相差変化率の関係

一つの断面欠損の長さ，幅，深さを変化させて位相差変化率との関係を評価した。以上の結果から，断面欠損の範囲が大きくなることにより位相差変化率が大きくなることが明らかになった。また，これらの断面欠損の範囲変化の中では，とりわけ深さの変化による位相変化率への影響が最も大きいことが示された。この理由としては，本実験における励磁コイルの配置が x 軸方向に沿っており，これに伴い鋼板上の渦電流が断面欠損の長手方向（y 軸方向）に流れるため，渦電流の通電領域が深さ方向の変化の影響を受けやすいことが考えられる。このため，断面欠損を中心にその両側で z 方向の磁場（$B_z$）の変化が大きくなり，深さの変化が大きく表れたと考えられる。

なおこれまでの検討により，断面欠損の長さ，幅，深さが位相差の変化，位相差変化率に与える影響を明らかにしたが，これらの区別を行う評価法については今後検討を進める必要がある。

## 4.4 まとめ

リフトオフ距離 30 mm の条件で，断面欠損により腐食を模擬した鋼板に対して交流磁場を印加し，GMR センサの電圧振幅値と位相差の計測を行った。断面欠損の長さ，幅，深さと，二つの断面欠損の間隔を変化させた場合の電圧振幅値と位相差への影響の基礎評価を行い，以下の結果を得た。

(1) 断面欠損が存在する場合，電圧振幅値に S 字形状の明らかな変化が生じ，正負ピークの間に断面欠損が存在する位置があることを示すことがわかった。

(2) 断面欠損が存在する場合，電圧振幅値変化率に明らかな変化が生じ，断面欠損の位置で電圧振幅値変化率が負のピークを示すことがわかった。

(3) 断面欠損の長さが 27 mm 又は 33 mm の場合を除き，断面欠損の長さが減少するとともに，電圧振幅値のピーク差は小さくなる傾向を示した。断面欠損の長さが減少するとともに，電圧振幅値変化率の負のピーク値は大きくなる傾向を示した。

(4) 断面欠損の幅変化においては，電圧振幅値のピーク差の変化と電圧振幅値変化率の負のピーク値の変化が明らかに表れなかった。

(5) 断面欠損の深さが大きくなると電圧振幅値のピーク差が増大し，電圧振幅値変化率の負のピーク値が小さくなる傾向を示した。

(6) 二つの断面欠損の間隔が大きくなるとともに，電圧振幅値の正負ピーク差が減少して，電圧振幅値変化率の負のピーク値が増大する傾向があることがわかった。また，二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合，電圧振幅値変化率の結果により識別できることが示された。

(7) 断面欠損が存在する場合，位相差に明らかな変化が生じ，断面欠損の位置で位相差変化率がピークを示すことがわかった。

(8) 断面欠損の長さが減少するとともに，位相差変化率のピーク値は小さくなる傾向を示した。

(9) 断面欠損の幅が増大するとともに，位相差変化率のピーク値は大きくなる傾向を示した。

(10) 断面欠損の深さが増大するとともに，位相差変化率のピーク値は大きくなる傾向を示した。

(11) 二つの断面欠損の間隔が大きくなるとともに，位相差変化率のピーク値が小さくなる傾向を示すことがわかった。また，二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合，位相差変化率の結果により識別できることが示されたが，位相差変化率を指標とする分解能は電圧振幅値変化率より検出感度が低いことが示された。

## 参考文献


1) Shen, L., Hattori, S., Terasawa, K. and Kamada, T. : A Basic Study on GMR Sensor-Based Eddy Current Nondestructive Testing Method for Corrosion Detection in Concrete Structures, Journal of The Society of Materials Science, Japan, Vol.71, No.9, 2022.9.

2) Vourna, P., Hristoforou, E., Ktena, A., Svec, P. and Mangiorou, E. : Dependence of Magnetic Permeability on Residual Stresses in Welded Steels, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.53, No.4, pp.1-4, 2017.

3) 服部晋一，沈力，寺澤広基，鎌田敏郎：交流磁場の位相に着目したコンクリート中の鋼材腐食の非破壊評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44, No.1, pp.1258-1263, 2022.7.

# 第 5 章 鋼板表面の形状が動磁場応答に与える影響に関する解析的検討

## 5.1 はじめに

前章では，コンクリートかぶりを模擬したリフトオフ距離 30 mm で鋼材表面の異なるサイズの断面欠陥を測定する本研究の検査方法の実験結果について検討した。GMR センサで得られた電圧振幅値，電圧振幅値変化率，位相差と位相差変化率の結果は，断面欠陥の有無や位置を評価する可能性があることが検証された。本章では，前章の実験結果のメカニズムについて，交流磁場の磁束密度の振幅と位相に着目して有限要素解析により検討する。

## 5.2 有限要素解析概要

本研究の有限要素解析は Photo-series ソフトウェアの Eddy モジュールと Eddyjω モジュールを用いて行った。解析モデルの概要を**図-5. 2. 1** に示す。励磁コイルの位置を移動する必要があるため，励磁コイルとその周辺の空気層を一つのモデルにし，外場モデルとして使用した。 鋼板とその周囲の空気層は，オブジェクトモデル（外場モデルを導入する主モデル）としてモデル化した。 解析モデルの要素数，計算時間，磁場分布を考慮し，収束が早くなるように，鋼板と励磁コイルを囲む空気層の寸法は，長さ 461 mm，幅 460 mm，高さ 167 mm とし，すべての面に対して対称境界条件を設定した。**図-5. 2. 2** に鋼板のサイズを示す。鋼板のサイズは実物と同じく 400 mm × 400 mm，厚み 2 mm で作成した。実験と同様に 3 mm 間隔で励磁コイルを移動してコイルの両脚の中央の空気要素（GMR センサの設置位置）の解析結果を得るために，鋼板平面の分解能は 3 mm に設定し，エッジの要素の 1 辺は 3.5 mm にした。空気層は鋼板モデルのメッシュに対応して分割した。モデル要素の材料の物性値を**表-5. 2. 1** に示す。解析の入力電流の正弦波周波数は実験と同じく 4 kHz とした。また，表皮層の深さ（表皮深さ）[1)]を式 (1) にて算出した。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \tag{1}$$

ここで，$\delta$ ：表皮深さ(m)，$f$ ：周波数 =4000 Hz，$\sigma$ ：電気伝導率 =$1.0\times10^{7}$ S/m，$\mu$ ：透磁率 =$8\pi\times10^{-4}$ H/m である。式(1)により，表皮深さは 0.056 mm であった。表皮効果の影響を解析モデルに反映し，解析の精度を確保するため，鋼板の厚み方向を 10 分割した。

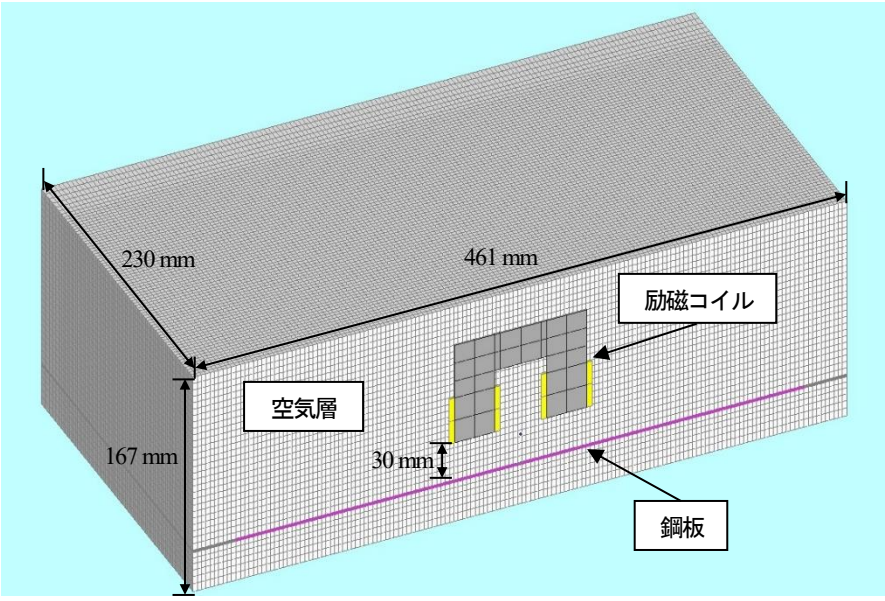



図-5.2.1　解析モデル概要（断面図）

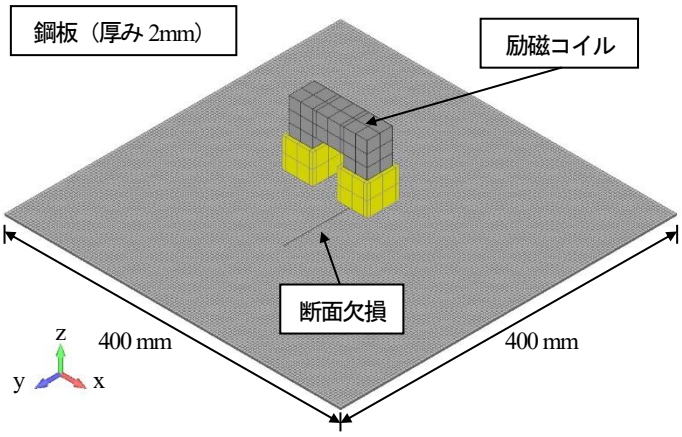


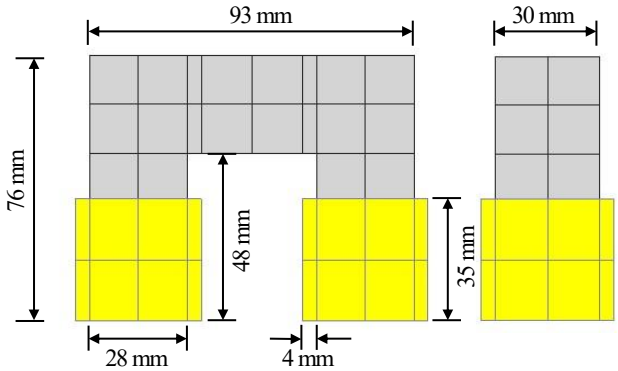

図-5.2.2　解析モデル概要（鋼板）

表-5.2.1　材料の物性値

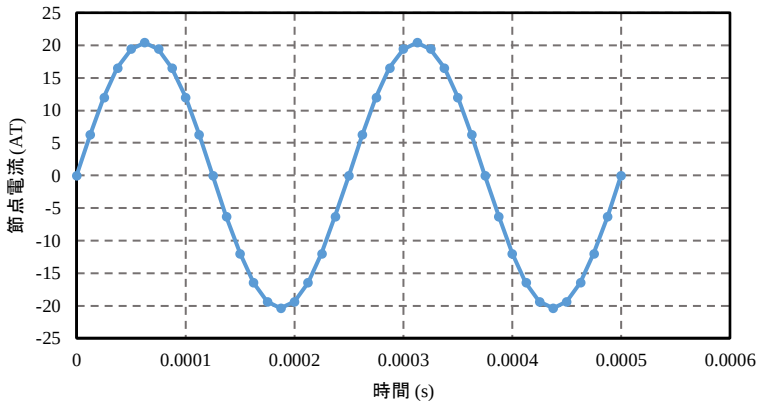
| 物性 | 相対透磁率 ($\mu_r$) | 電気伝導率 ($\sigma$, S/m) |
|---|---|---|
| フェライトコア | 1900 | 0 |
| SPCC 鋼板 | 2000* | $1\times10^7$ |
| 銅線 | 1 | 0 |
| 空気 | 1 | 0 |

* SPCC 鋼板の比透磁率は文献[2)]の表より推定した。

次に，励磁コイルのモデルの寸法を**図–5. 2. 3** に示す。磁心はフェライトコアを用いて，コイルの導線は銅線にし，コイルの厚みを 4 mm に設定した。コイルに入力する節点電流は 20.4 AT（0.1457 A×140 T）とし，正弦波の周波数は 4 kHz に設定した。磁束密度の振幅値の計算は Photo-series ソフトウェアの Eddy モジュールを用いて行った。入力した節点電流は**図–5. 2. 4** に示す。計算時間を減少するため，2 周期を 40 分割して計算した。磁束密度の位相差の計算は Photo-series ソフトウェアの Eddyjω モジュールを用いて，節点電流の周波数を直接設定した。解析モデルの凡例名と断面欠損のサイズは第 4 章と同様であるが，ここで**表–5. 2. 2** に再掲する。




**図–5. 2. 3　解析モデル概要（励磁コイル）**




**図–5. 2. 4　励磁コイルに入力した節点電流**

表-5.2.2　解析モデルの断面欠損の条件

| 試験体 | 長さ（mm） | 幅（mm） | 深さ（mm） | 間隔（mm） |
|---|---|---|---|---|
| 135-3-0.6 | 135 | 3 | 0.6 | ― |
| 135-3-1 | 135 | 3 | 1 | ― |
| 135-3-1.4 | 135 | 3 | 1.4 | ― |
| 135-9-1 | 135 | 9 | 1 | ― |
| 135-15-1 | 135 | 15 | 1 | ― |
| 69-3-1 | 69 | 3 | 1 | ― |
| 33-3-1 | 33 | 3 | 1 | ― |
| 27-3-1 | 27 | 3 | 1 | ― |
| 21-3-1 | 21 | 3 | 1 | ― |
| 135-3-1-S12 | 135 | 3 | 1 | 12 |
| 135-3-1-S18 | 135 | 3 | 1 | 18 |
| 135-3-1-S30 | 135 | 3 | 1 | 30 |
| 健全 | ― | ― | ― | ― |

## 5.3 腐食欠損部における動磁場の振幅値に関する有限要素解析

本節では，鋼板表面の断面欠損の有無と断面欠損の寸法が動磁場の振幅値に与える影響を有限要素解析で検討した。磁束密度の振幅値についての解析は Photo-series ソフトウェアの Eddy モジュールを用いて行った。

断面欠損は鋼板の中央に設置し，励磁コイルは x = 0 mm から x 軸の＋方向，および－方向に移動させるため，磁束密度の解析結果は x = 0 mm 位置の空気要素において対称とした。このため，励磁コイルを鋼板の中央（x = 0 mm）から 3 mm ずつ x = 30 mm 位置に達するまで移動させ，励磁コイル両磁極の中央位置の空気要素（GMR センサの位置）の z 方向（鋼板表面と垂直方向）の磁束密度の最大振幅値（Bz-max，正負値が等しい）を算出した。

### 5.3.1 断面欠損の有無による磁束密度振幅値の変化

断面欠損の有無による磁束密度の振幅値の変化を評価するため，①断面欠損がない場合（健全）と，②断面欠損が存在する場合（135-3-1）の解析を行った。**図-5.3.1** に，断面欠損の有無による磁束密度の振幅値の変化を示す。図より，①断面欠損がない場合（健全）では，鋼板中央（0 mm）から移動終了位置（+30 mm）まで直線的な変化を示したが，位置における増減については明らかな変化が見られなかった。一方，②断面欠損が存在する場合（135-3-1）では中央からの距離が大きくなると一旦大きくなってから減少し，18 mm の位置で最大値が現れた。この解析の結果は，試験体 135-3-1 の実験結果で正負ピーク値が±15～18 mm の位置で現れたことと符合している。

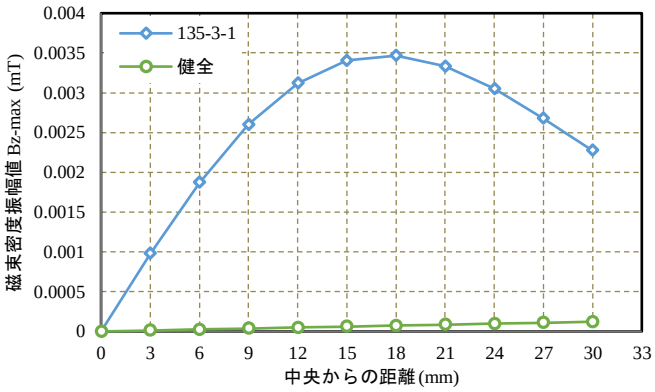



図-5.3.1　断面欠損の有無による磁束密度振幅値の変化

### 5.3.2 断面欠損の長さ変化が磁束密度振幅値に及ぼす影響

断面欠損の長さによる磁束密度振幅値の変化の有限要素解析を行うため，断面欠損の長さが異なる条件の鋼板モデルを対象に解析を行った。断面欠損の長さの条件としては，135 mm，69 mm，33 mm，27 mm，21 mm を対象とした。いずれも断面欠損の幅は 3 mm，深さは 1 mm とした。断面欠損の長さによる磁束密度振幅値の変化の結果を**図-5.3.2** に示す。図より，断面欠損がある場合の結果はすべて中央からの距離が大きくなると一旦大きくなってから減少し，15～18 mm の位置で最大値が現れた。この結果は x = 0 mm において対称となっているため，実験結果と同じく-15～-18 mm の位置でもピークが現れて，断面欠損の位置がピークの間にあることを評価できることが検証された[3)]。

**図-5.3.3** は，磁束密度振幅値のピーク値と断面欠損の長さとの関係を示している。これより，磁束密度振幅値のピーク値は断面欠損の長さが小さいほど減少する傾向が示され，**図-4.2.8** の実験結果と同じ変化傾向を確認できた[3)]。

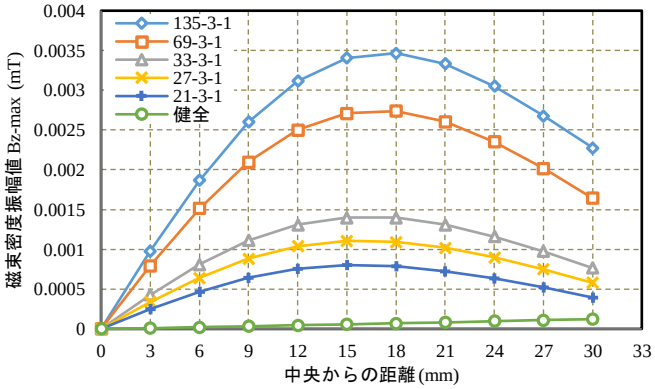



図-5.3.2　断面欠損の長さによる磁束密度振幅値の変化

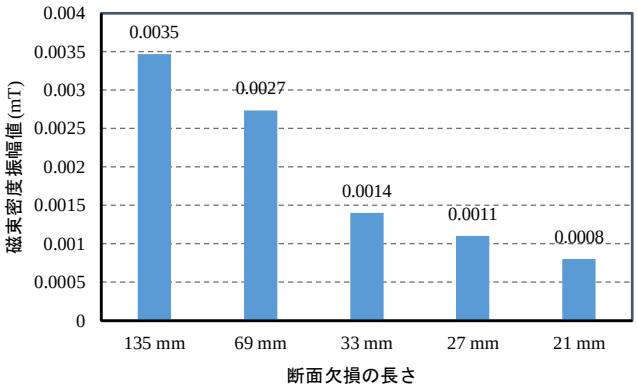



図-5.3.3　断面欠損の長さによる磁束密度振幅値のピーク値

### 5.3.3 断面欠損の幅変化が磁束密度振幅値に及ぼす影響

断面欠損の幅による磁束密度振幅値の変化を有限要素解析するため，断面欠損の長さが異なる条件の鋼板モデルを対象に解析を行った。断面欠損の幅の条件としては，3 mm，9 mm，15 mm を対象とした。いずれも断面欠損の長さは 135 mm，深さは 1 mm とした。断面欠損の幅による磁束密度振幅値の変化の結果を**図-5.3.4** に示す。図より，断面欠損がある場合の結果はすべて中央からの距離が大きくなると一旦大きくなってから減少し，18～21 mm の位置で最大値が現れた。特に幅 15 mm の場合，x = 18 mm と x = 21 mm の値は最大でほぼ同じであったが，幅変化の結果では，幅が大きくなるとともに磁束密度振幅値の最大値の位置と断面欠損の距離が増大する傾向を示した。一方，幅変化による実験結果はすべての条件で 15～18 mm の位置でピークが現れ，解析結果の傾向と一致していなかったことがわかった。

**図-5.3.5** は，磁束密度振幅値のピーク値と断面欠損の幅との関係を示している。これより，磁束密度振幅値のピーク値は断面欠損の幅が大きいほど減少する傾向が示されたが，**図-4.2.19** の実験結果は解析結果と同様な変化傾向を示さなかった。これについては，幅変化の解析結果に基づいて，幅 15 mm の場合の実験結果が正しく得られていないと考えられ，この影響の要因はまだ検討の必要があると考えている。

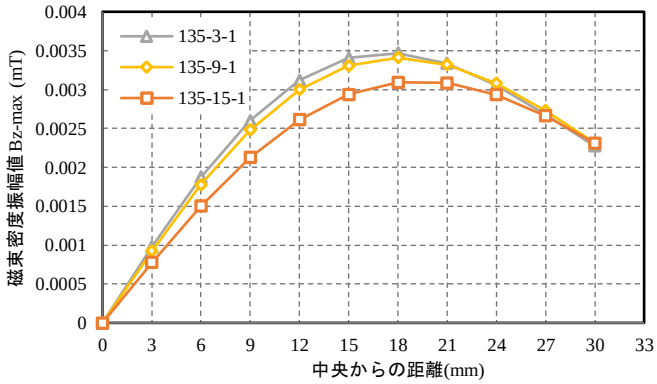



図-5.3.4　断面欠損の幅による磁束密度振幅値の変化

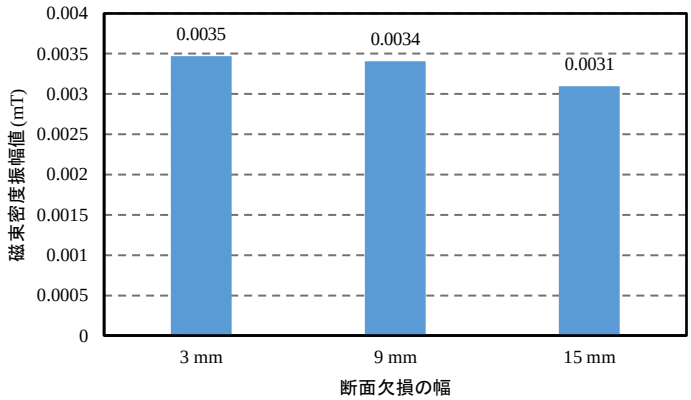



図-5.3.5　断面欠損の幅による磁束密度振幅値のピーク値

### 5.3.4 断面欠損の深さ変化が磁束密度振幅値に及ぼす影響

断面欠損の深さによる磁束密度振幅値の変化を有限要素解析するため，断面欠損の深さが異なる条件の鋼板モデルを対象に解析を行った。断面欠損の深さの条件としては，0.6 mm，1 mm，1.4 mm を対象とした。いずれも断面欠損の長さは 135 mm，幅は 3 mm とした。断面欠損の深さによる磁束密度振幅値の変化の結果を**図-5.3.6** に示す。図より，断面欠損がある場合の結果はすべて中央からの距離が大きくなると一旦大きくなってから減少し，18 mm の位置で最大値が現れた。深さ変化の実験結果はすべての条件で±15 mm の位置でピークが現れ，解析結果と同じく深さが変わっても，ピークの位置が変わらないことが確認された。

**図-5.3.7** は，磁束密度振幅値のピーク値と断面欠損の深さとの関係を示している。これより，磁束密度振幅値のピーク値は断面欠損の深さが大きいほど増大する傾向が示された。これより，**図-4.2.25** の実験結果は解析結果と同様な変化傾向を示すことが確認できた。

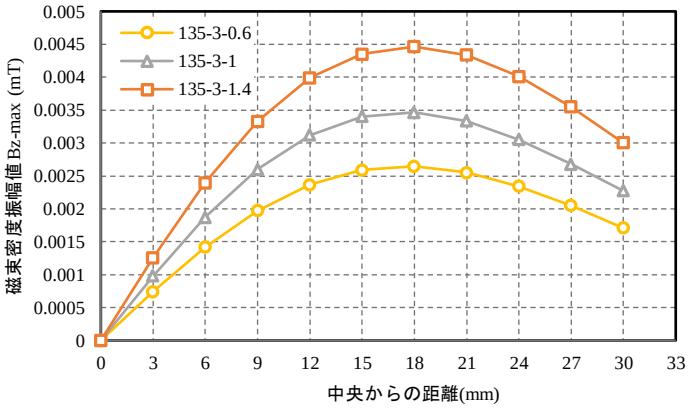



図-5.3.6　断面欠損の深さによる磁束密度振幅値の変化

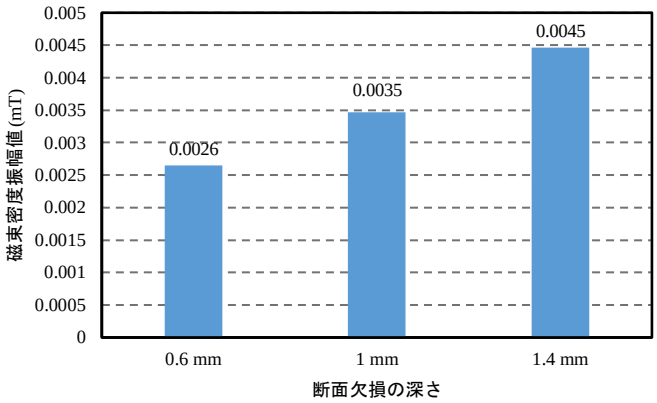



図-5.3.7　断面欠損の深さによる磁束密度振幅値のピーク値

### 5.3.5 二つの断面欠損の間隔変化が磁束密度振幅値に及ぼす影響

二つの断面欠損の間隔による磁束密度振幅値の変化を有限要素解析するため，断面欠損の間隔が異なる条件の鋼板モデルを対象に解析を行った。二つの断面欠損間の距離は断面欠損の中心線間の距離である。二つの断面欠損のサイズはすべての条件で長さ 135 mm，幅 3 mm，深さ 1 mm であり，間隔が 12 mm，18 mm，30 mm である。断面欠損の間隔による磁束密度振幅値の変化の結果を**図-5.3.8** に示す。図により，二つの断面欠損の間隔が 12 mm と 18 mm の場合の解析結果は中央からの距離が大きくなると一旦大きくなってから減少し，一つの断面欠損の場合の結果と同様であった。また，最大値はそれぞれ中央から 18 mm と 21 mm の位置で現れ，これも一つの断面欠損の場合の結果と同様であった。二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合は中央からの距離が大きくなるとともに緩やかに増大し，27～30 mm の位置で最大値が出て，実験結果と同じ変化を示した。以上より，実験結果と同じく，二つの断面欠損の間隔が大きくなるとともに，磁束密度振幅値のピークの位置が外側に移動する傾向が確認された。

**図-5.3.9** は，磁束密度振幅値のピーク値と二つの断面欠損の間隔との関係を示している。これより，磁束密度振幅値のピーク値は二つの断面欠損の間隔が大きいほど減少する傾向が示され，**図-4.2.33** の実験結果は解析結果と同様な変化傾向を示すことが確認された。

また，二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合の変化率を**図-5.3.8** に示す。二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合の磁束密度の振幅値変化率は x = 15 mm 付近にピークが表れ，**図-4.2.36** の実験結果と同じく断面欠損の位置に対応していることが確認された。

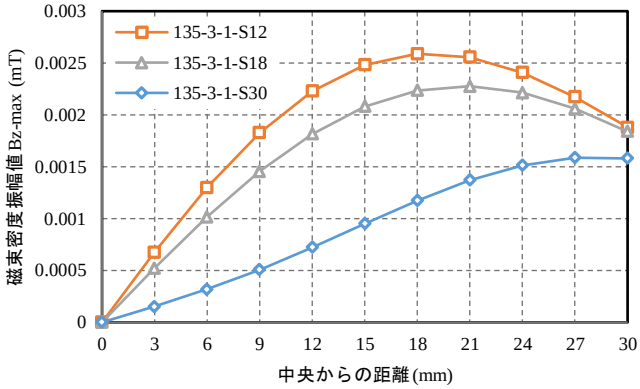



図-5.3.8　二つの断面欠損の間隔による磁束密度振幅値の変化

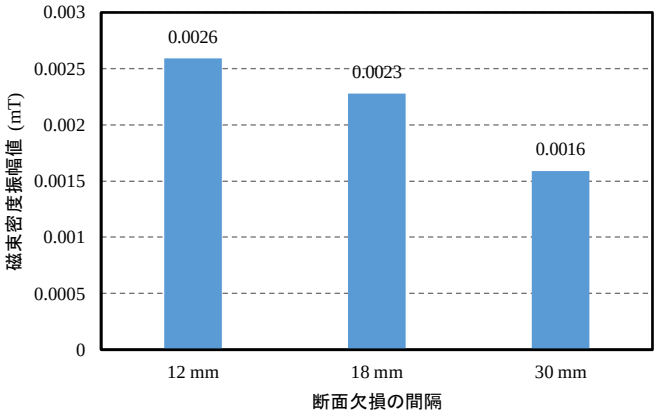



図-5.3.9　二つの断面欠損の間隔による磁束密度振幅値のピーク値

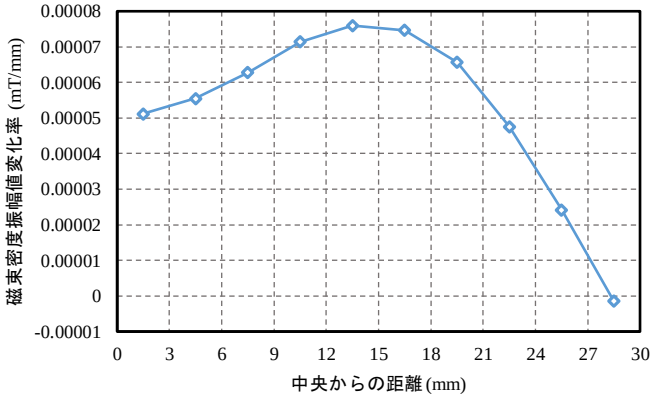



図-5.3.10　二つの断面欠損の間隔による磁束密度の振幅値変化率(135-3-1-S30)

## 5.4 腐食欠損部における動磁場の位相差に関する有限要素解析の検討

本節では，鋼板表面の断面欠損の有無と断面欠損の寸法が動磁場の位相差に与える影響を有限要素解析で検討した。磁束密度の位相差についての解析は Photo-series ソフトウェアの Eddyjω モジュールを用いて行った。Photo-series Eddyjω を用いた解析では，時間関数を入力することなく，周波数を直接設定し，要素の磁束密度に関するデータを計算した。ここで z 方向の位相差を計算するため，測定要素の z 方向の実部値 $\mathrm{Re}(\mathbf{A}_C(x, y, z)_z)$ と虚部値 $\mathrm{Im}(\mathbf{A}_C(x, y, z)_z)$ 抽出し，式(2)にて位相 $\theta_z$ を計算した [4]。

$$\tan(\theta_z) = -\frac{\mathrm{Im}(\mathbf{A}_C(x, y, z)_z)}{\mathrm{Re}(\mathbf{A}_C(x, y, z)_z)} \tag{2}$$

実験結果より，断面欠損位置における位相差の結果は全体的に角度のオフセットが異なるため，断面欠損の両側で解析を行った。断面欠損は鋼板の中央に設置し，励磁コイルは x = -30 mm から，鋼板の中央（x = 0 mm）を通過して 3 mm ずつ x = 30 mm 位置に達するまで移動させ，励磁コイル両磁極の中央位置の空気要素（GMR センサの位置）の z 方向（鋼板表面と垂直方向）の位相差を算出した。計測位置が励磁コイルの中央である場合の，断面欠損（135-3-1）による位相差変化の結果を**図–5. 4. 1** に示す。図より，断面欠損ありの場合，実験結果で得られた S 字形状の結果が解析で確認できなかった。この原因としては，実験において GMR センサを励磁コイルの中央に設置したが，厳密には GMR センサの位置は中央ではなく，中央の左右に微小な距離でずれていた可能性があると考えている。また，第 4 章の位相差変化率の試験結果を見ると，ピークの位置は x = 0 mm の右にあることが確認された。そのため，中央から右に 0.2 mm と中央から右 1 mm の位置の位相差変化を解析することとした。まず解析モデルの x = ±61.5 mm の範囲内の幅分解能 3 mm の要素を幅分解能 1 mm に変更し，モデルの x = ±30.5 mm の範囲内の幅分解能 1 mm の要素を幅分解能 0.2 mm に変更し，解析した。幅の分解能の変更状況を**図–5. 4. 2** に示す。

**図–5. 4. 3** に中央から右に 0.2 mm と中央から右 1 mm の位置の位相差の解析結果を示す。図により，断面欠損 135-3-1 の位相差の解析結果は実験結果と同様な S 字形状になっていることを確認した。また，**図–5. 4. 4** に中央から右に 0.2 mm と中央から右 1 mm の位置の位相差変化率の解析結果を示す。図により，断面欠損 135-3-1 の位相差変化率の解析結果は実験結果と同様な正のピークが表れたことを確認した。しかし，実験結果より，解析結果のピーク位置は右に 3 mm にずれていることをわかった。以上より，解解した結果と実験結果には若干の誤差があるものの，同じ傾向が得られたため，実験結果は GMR センサの位置がずれた状態で測定されたと考えられる。

また，中央から右に 0.2 mm と中央から右 1 mm の位置の位相差と位相差変化率の変化傾向が同じであるが，分解能 0.2 mm のモデルの要素数が 298 万程度で，分解能 1 mm のモデルの要素数が 146 万程度であるため，計算効率を考えて断面欠損の形状変化による位相差に関する有限要素解析は分解能 1 mm のモデルを用いて解析した。

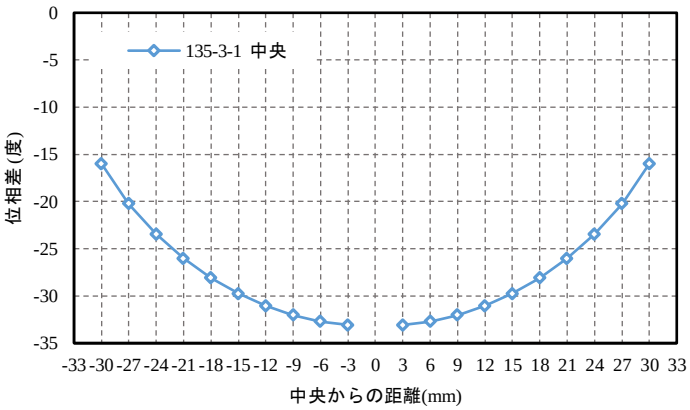
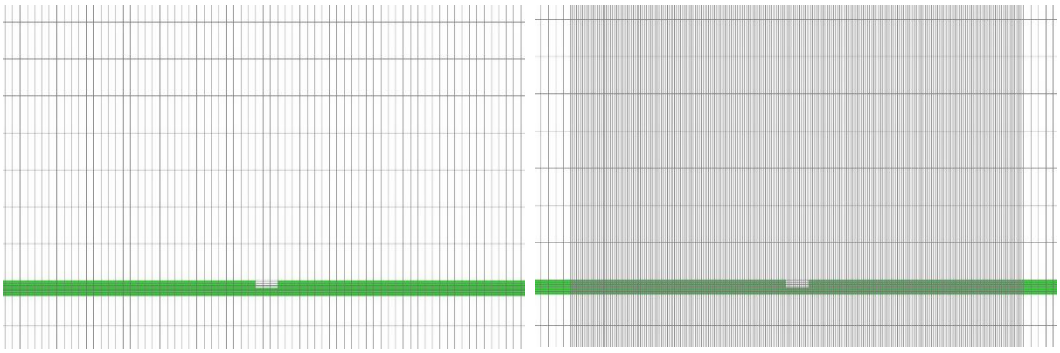



図-5.4.1　断面欠損（135-3-1）による位相差変化(励磁コイル中央の要素)



(a)幅の分解能 1 mm　　(b)幅の分解能 0.2 mm

図-5.4.2　解析モデルの要素幅の分解能変化

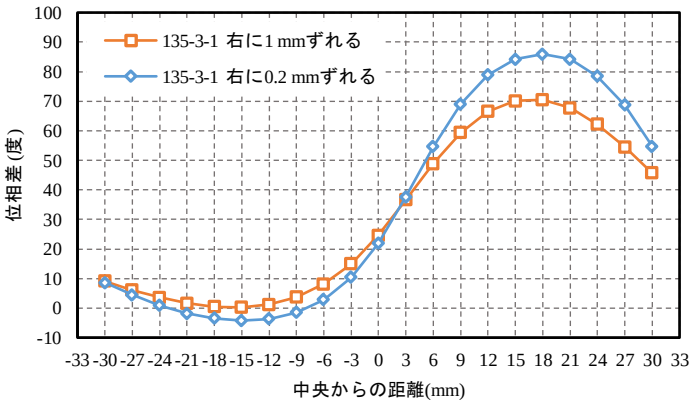



図-5.4.3　断面欠損（135-3-1）による位相差変化(励磁コイル中央からずらした要素)

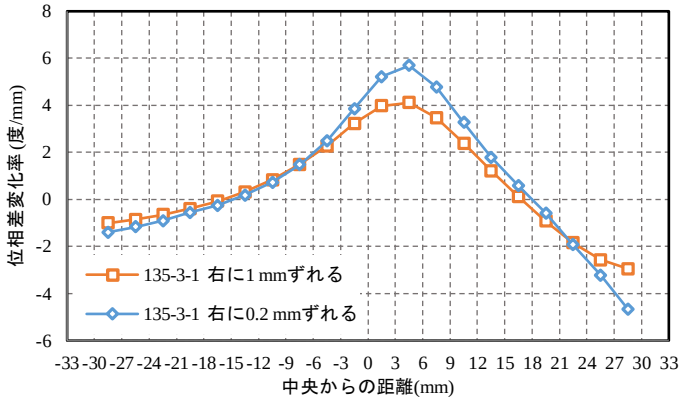



図-5.4.4　断面欠損（135-3-1）による位相差変化率(励磁コイル中央からずらした要素)

### 5.4.1 断面欠損の有無による位相差の変化

断面欠損の有無による位相差の変化を評価するため，①断面欠損がない場合（健全）と，②断面欠損が存在する場合（135-3-1）の解析を行った。**図-5.4.5** に，断面欠損の有無による位相差の変化を示す。図より，①断面欠損がない場合（健全）では，移動開始位置（-30 mm）から移動終了位置（+30 mm）まで直線的な変化を示した。②断面欠損が存在する場合（135-3-1）では S 字形状の変化を示し，断面欠損が存在する位置（0 mm）を中心にその両側で負のピークと正のピークが現れた。また**図-5.4.6** に，断面欠損の有無による位相差変化率の変化を示す。図より，①断面欠損が存在しない場合は，位相差変化率の変化が表れないが，②断面欠損が存在する場合は，断面欠損が存在する位置（0 mm）の右に正のピークが現れることがわかった。**図-4.3.1** と**図-4.3.2** の位相差の実験結果と比べて，この位相差の解析結果は試験体 135-3-1 の実験結果と同じ傾向を示すことを確認した。

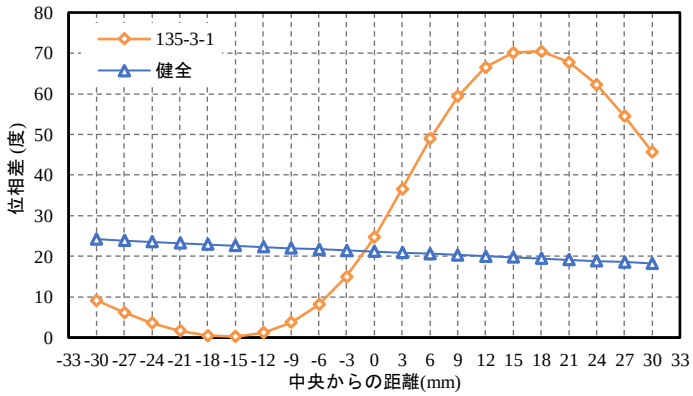



図-5.4.5　断面欠損の有無による位相差の変化

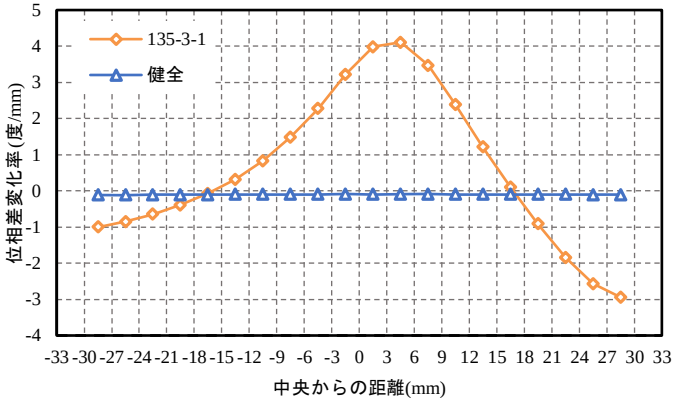



図-5.4.6　断面欠損の有無による位相差変化率の変化

### 5.4.2 断面欠損の長さ変化が位相差に及ぼす影響

断面欠損の長さによる位相差の変化を有限要素解析するため，断面欠損の長さが異なる条件の鋼板モデルを対象に解析を行った。断面欠損の長さの条件としては，135 mm，69 mm，33 mm，27 mm，21 mm を対象とした。いずれも断面欠損の幅は 3 mm，深さは 1 mm とした。断面欠損の長さによる位相差の変化の結果を**図-5.4.7** に示す。図により，実験結果と同様に，断面欠損がある場合の位相差の解析結果はすべて S 字形状になることを確認した。また，断面欠損の長さによる位相差変化率の変化の結果を**図-5.4.8** に示す。図より，実験結果と同様に，断面欠損がある場合の位相差変化率の解析結果はすべて正のピークが現れることを確認した。

**図-5.4.9** は，位相差変化率のピーク値と断面欠損の長さとの関係を示している。これより，位相差変化率のピーク値は断面欠損の長さが小さいほど減少する傾向が示され，**図-4.3.8** の実験結果と同様な変化傾向を示すことが確認できた。

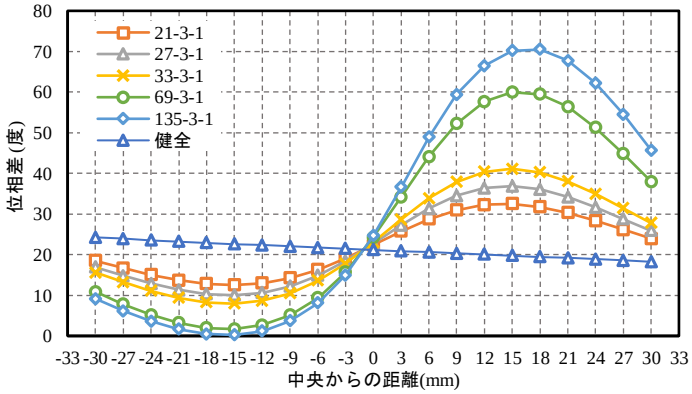



図-5.4.7　断面欠損の長さによる位相差の変化

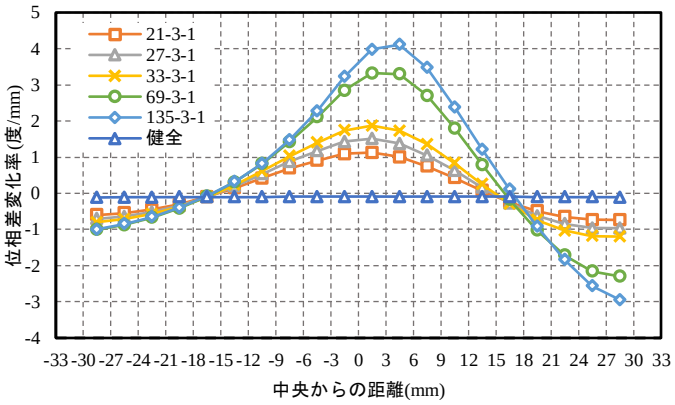



図-5.4.8　断面欠損の長さによる位相差変化率の変化

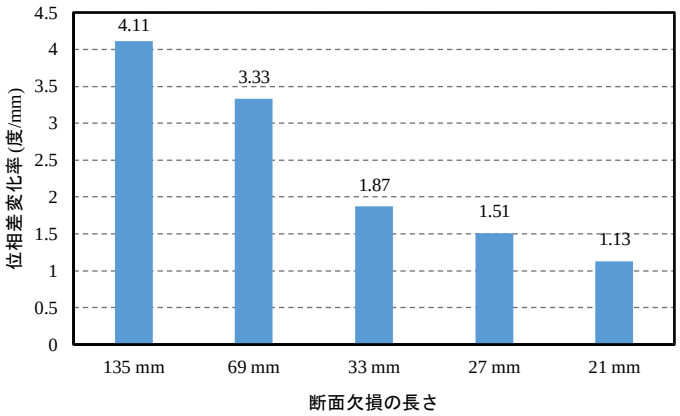



図-5.4.9　断面欠損の長さによる位相差変化率のピーク値

### 5.4.3 断面欠損の幅変化が位相差に及ぼす影響

断面欠損の幅による位相差の変化を有限要素解析するため，断面欠損の長さが異なる条件の鋼板モデルを対象に解析を行った。断面欠損の幅の条件としては，3 mm，9 mm，15 mm を対象とした。いずれも断面欠損の長さは 135 mm，深さは 1 mm とした。断面欠損の長さによる位相差の変化の結果を**図-5.4.10** に示す。図より，実験結果と同様に，断面欠損がある場合の位相差の解析結果はすべて S 字形状になることを確認した。また，断面欠損の幅による位相差変化率の変化の結果を**図-5.4.11** に示す。図より，実験結果と同様に，断面欠損がある場合の位相差変化率の解析結果はすべて正のピークが現れることを確認した。

**図-5.4.12** は，位相差変化率のピーク値と断面欠損の幅との関係を示している。これより，位相差変化率のピーク値は断面欠損の長さが小さいほど減少する傾向が示され，**図-4.3.12** の実験結果と逆の変化傾向を示した。断面欠損の幅変化による位相差変化率の解析結果と，実験結果の変化傾向が逆になった要因はまだ検討の必要がある。

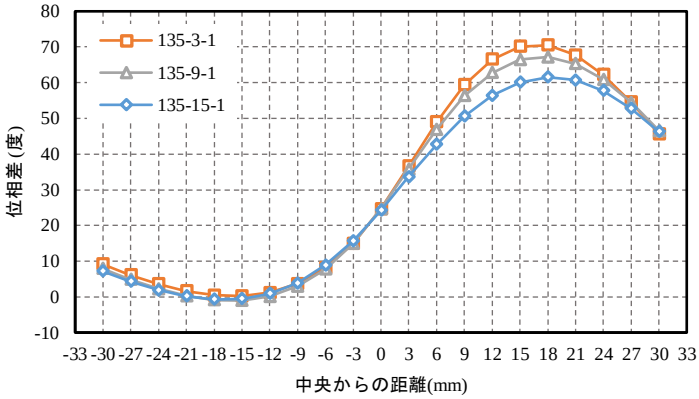



図-5. 4. 10　断面欠損の幅による位相差の変化

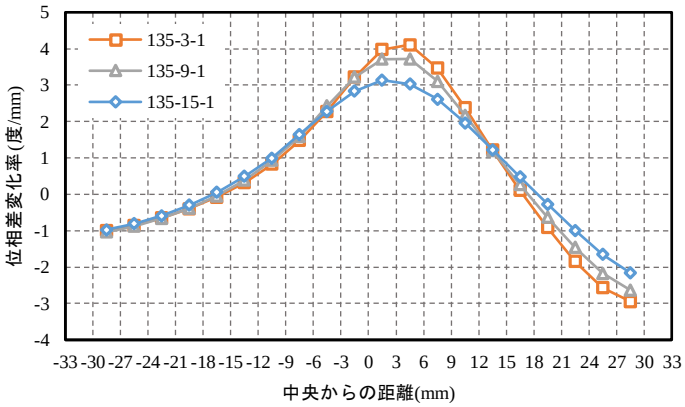



図-5. 4. 11　断面欠損の幅による位相差変化率の変化

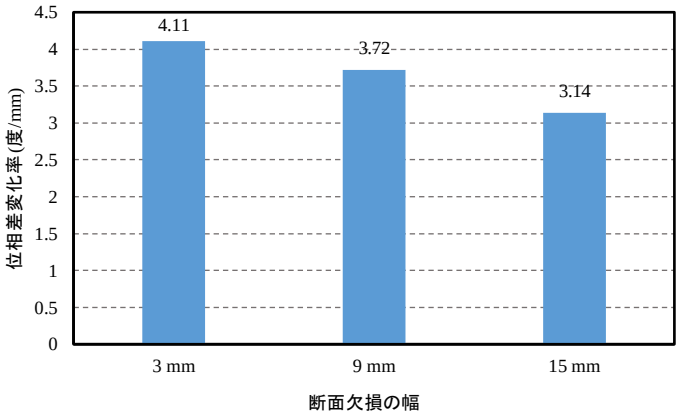



図-5. 4. 12　断面欠損の幅による位相差変化率のピーク値

### 5.4.4 断面欠損の深さ変化が位相差に及ぼす影響

断面欠損の深さによる位相差の変化を有限要素解析するため，断面欠損の深さが異なる条件の鋼板モデルを対象に解析を行った。断面欠損の深さの条件としては，0.6 mm，1 mm，1.4 mm を対象とした。いずれも断面欠損の長さは 135 mm，幅は 3 mm とした。断面欠損の深さによる位相差の変化の結果を**図-5. 4. 13** に示す。図より，実験結果と同様に，断面欠損がある場合の位相差の解析結果はすべて S 字形状になることを確認した。また，断面欠損の深さによる位相差変化率の変化の結

果を**図-5.4.14** に示す。図より，実験結果と同様に，断面欠損がある場合の位相差変化率の解析結果はすべて正のピークが現れることを確認した。

**図-5.4.15** は，位相差変化率のピーク値と断面欠損の深さとの関係を示している。これより，位相差変化率のピーク値は断面欠損の深さが大きいほど増大する傾向が示され，**図-4.3.16** の実験結果と同じ変化傾向を示すことが確認できた。

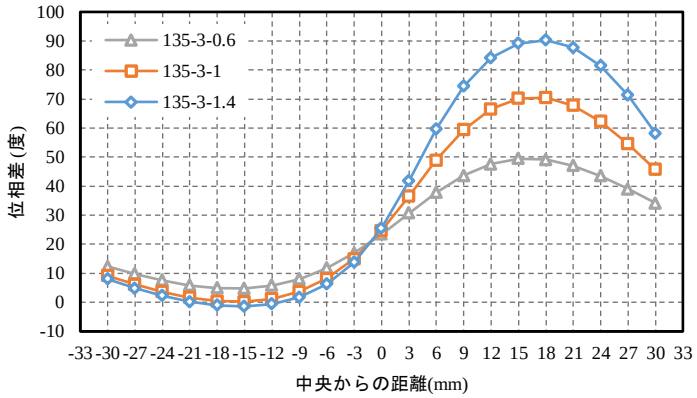



図-5.4.13　断面欠損の深さによる磁束密度振幅値の変化

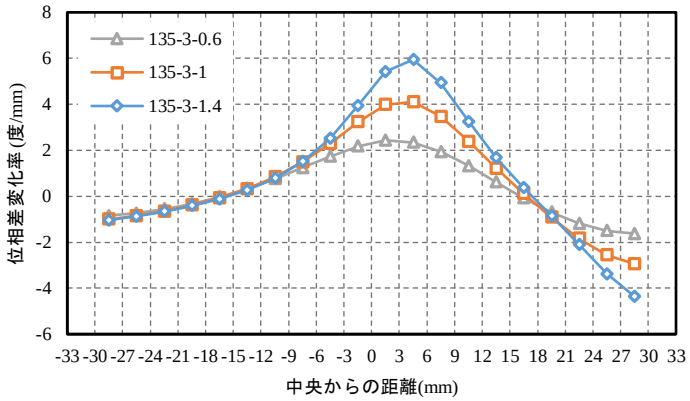



図-5.4.14　断面欠損の深さによる位相差変化率の変化

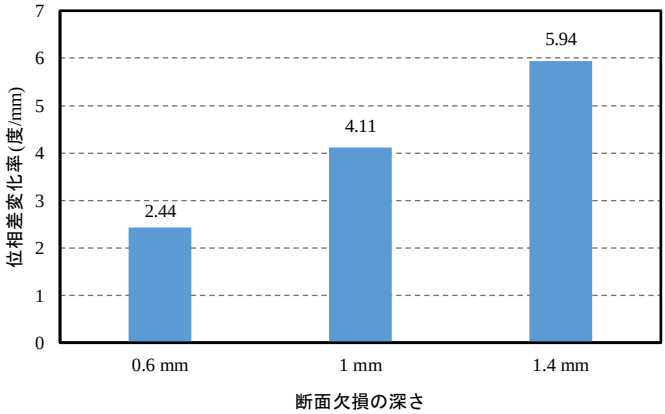



図-5.4.15　断面欠損の深さによる磁束密度振幅値のピーク値

### 5.4.5 二つの断面欠損の間隔変化が位相差に及ぼす影響

二つの断面欠損の間隔による位相差の変化を有限要素解析するため，断面欠損の間隔が異なる条件の鋼板モデルを対象に解析を行った。二つの断面欠損間の距離は断面欠損の中心線間の距離である。二つの断面欠損のサイズはすべての条件で長さ 135 mm，幅 3 mm，深さ 1 mm であり，間隔が 12 mm，18 mm，30 mm である。断面欠損の間隔による位相差の変化の結果を**図-5. 4. 16** に示す。図より，二つの断面欠損の間隔が 12 mm と 18 mm の場合は，一つの断面欠損がある場合の位相差の解析結果と同様 S 字形状になっていることを確認した。一方，二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合の解析結果は，間隔が 12 mm と 18 mm の場合と異なる形状になることも確認した。

また，断面欠損の深さによる位相差変化率の変化の結果を**図-5. 4. 17** に示す。図より，二つの断面欠損の間隔が 12 mm と 18 mm の場合の解析結果は実験結果と同様に，一つの断面欠損がある場合の位相差変化率の解析結果と同様，すべての条件で正のピークが現れることを確認した。二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合の解析結果は，実験結果と同じく二つピークが現れ，左のピークが明らかに見えないが，値が変曲する傾向を示すことを確認した。

**図-5. 4. 18** は，位相差変化率のピーク値と二つの断面欠損の間隔との関係を示している。これより，位相差変化率のピーク値は二つの断面欠損の間隔が大きいほど減少する傾向が示され，**図-4. 3. 21** の実験結果は解析結果と同様な変化傾向を示すことが確認できた。

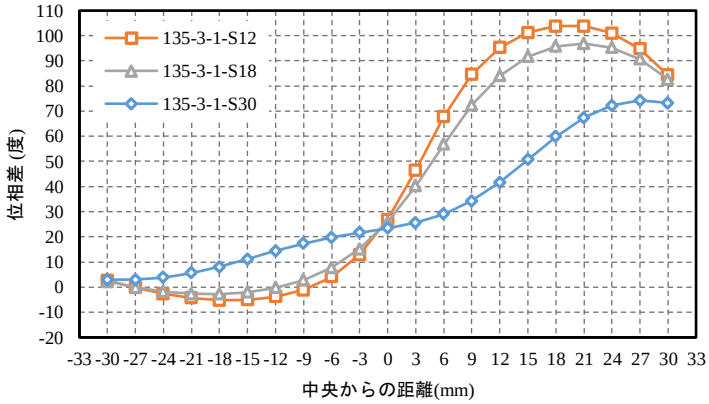



**図-5. 4. 16　二つの断面欠損の間隔による位相差の変化**

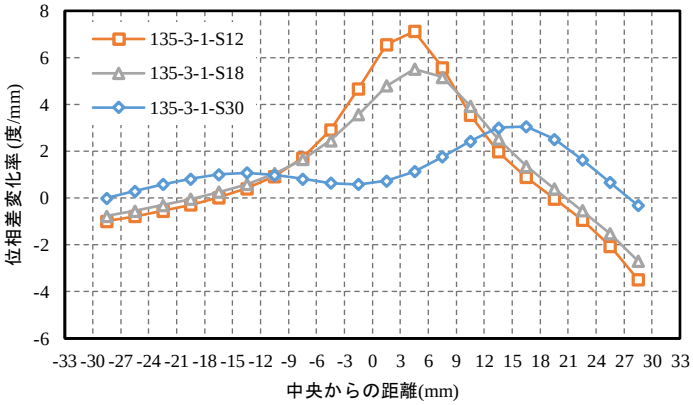



**図-5. 4. 17　二つの断面欠損の間隔による位相差変化率の変化**

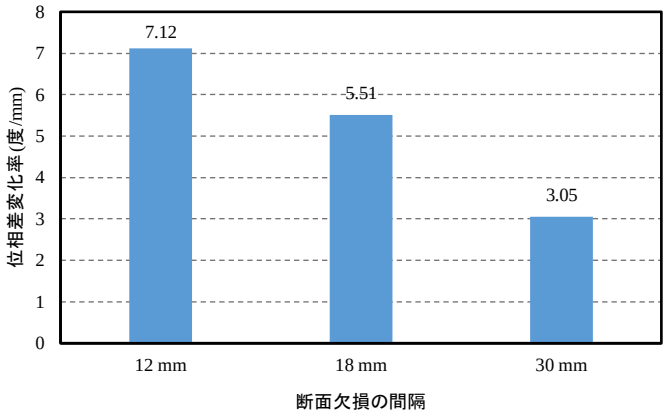



図-5. 4. 18　二つの断面欠損の間隔による位相差変化率のピーク値

## 5.5 まとめ

本章は本研究の計測方法の妥当性を評価するために，前章の実験条件に基づいて解析モデルを作成し，GMR センサの測定位置の磁束密度の振幅値と位相差に関する有限要素解析を行った結果，以下の結果を得た。

(1) 断面欠損が存在する場合，健全の場合と異なり，磁束密度振幅値にピークが表れ，ピーク位置と実験結果が同じ結果を示すことが確認された。

(2) 解析結果の磁束密度振幅値のピーク値は，断面欠損の長さが小さいほど減少する傾向が示され，実験結果と同じ変化傾向を確認した。

(3) 解析結果の磁束密度振幅値のピーク値は，断面欠損の幅が大きいほど減少する傾向が示されたが，実験結果は解析結果と同様な変化傾向を示さなかった。幅変化の解析結果に基づいて，幅 15 mm の場合の実験結果は正しく得られていない可能性があり，この影響の要因は今後検討する必要がある。

(4) 解析結果の磁束密度振幅値のピーク値は断面欠損の深さが大きいほど増大する傾向が示され，実験結果は解析結果と同様な変化傾向を示すことが確認された。

(5) 解析結果の磁束密度振幅値のピーク値は二つの断面欠損の間隔が大きいほど減少する傾向が示され，実験結果は解析結果と同様な変化傾向を示すことが確認された。また，二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合の解析結果の変化率は，x = 15 mm 付近にピークが表れ，実験結果と同じく断面欠損の位置に対応していることを確認した。

(6) 実験結果と同様に，断面欠損がある場合の位相差の解析結果はすべて S 字形状になること，および位相差変化率の解析結果はすべて正のピークが現れることを確認した。

(7) 解析結果の位相差変化率のピーク値は断面欠損の長さが小さいほど減少する傾向が示され，実験結果と同じ変化傾向を示すことが確認された。

(8) 解析結果の位相差変化率のピーク値は断面欠損の長さが小さいほど減少する傾向が示され，実験結果と逆の変化傾向を示した。この要因についてはまた検討の必要がある。

(9) 解析結果の位相差変化率のピーク値は断面欠損の深さが大きいほど増大する傾向が示され，実験結果と同じ変化傾向を示すことが確認された。

(10) 解析結果の位相差変化率のピーク値は二つの断面欠損の間隔が大きいほど減少する傾向が示され，実験結果は解析結果と同様な変化傾向を示すことが確認された。また，二つの断面欠損の間隔が 30 mm の場合の解析結果も実験結果と同じく，二つピークが現れ，左のピークが明らかに見えないが，値が変曲する傾向を示すことが確認された。

## 参考文献


1) 熊谷信昭：電磁気学基礎論，オーム社，pp.311-315，1987.

2) 小沼稔：磁性材料，工学図書，p.64，1996.4.

3) Shen, L., Hattori, S., Terasawa, K. and Kamada, T. : A Basic Study on GMR Sensor-Based Eddy Current Nondestructive Testing Method for Corrosion Detection in Concrete Structures, Journal of The Society of Materials Science, Japan, Vol.71, No.9, 2022.9.

4) 株式会社フォトン：PHOTO-Series EDDYjω ユーザーズマニュアル，2021年4月.

# 第 6 章 腐食生成物が動磁場応答に与える影響に関する検討

## 6.1 はじめに

本章では，GMR センサを用いた渦電流法を適用して，コンクリートのかぶりに相当するリフトオフ距離 30 mm で鋼材表面の局部腐食損傷を検出する手法の基礎評価を行うことを目的とした。具体的には，鋼板を対象とし，健全なもの，腐食生成物が残留したもの，さらに腐食生成物を除去したものに対して，腐食生成物が GMR センサで検出される磁場に及ぼす影響を検討することとした。また，振幅値変化率と位相差変化率に着目し，これらの結果から腐食生成物の存在を評価する方法を検討することとした。さらに，X 線回折試験により腐食生成物の成分を明らかにするとともに，実験的に得られた腐食生成物の残留状態に基づく有限要素解析を行い，GMR センサにより検出される磁場が腐食生成物の影響を受ける原因を明らかにすることとした。

## 6.2 電食試験概要と結果

熊英らの既往の研究より，腐食生成物においては $Fe_3O_4$ のみが高い透磁率を有し，磁場への影響が大きいことが報告されている [1]。この文献による腐食生成物の透磁率と導電率を**表-6.2.1** に示す。また高谷らの研究では，コンクリートに埋め込まれた鉄筋の電食試験における腐食生成物は主として α-FeOOH と $Fe_3O_4$ であり，曝露試験体や実構造物での腐食生成物より得られる β-FeOOH と γ-FeOOH は確認できなかったことが報告されている [2]。

これらより，本研究における電食試験でも，腐食生成物として，渦電流法での計測に影響を与える $Fe_3O_4$ が生成されることが想定された。一方，実構造物での腐食生成物 β-FeOOH，γ-FeOOH は，透磁率および導電率は極めて小さいため，渦電流法では，その影響は無視できるものと考えられる。

**表-6.2.1　腐食生成物の物性値**

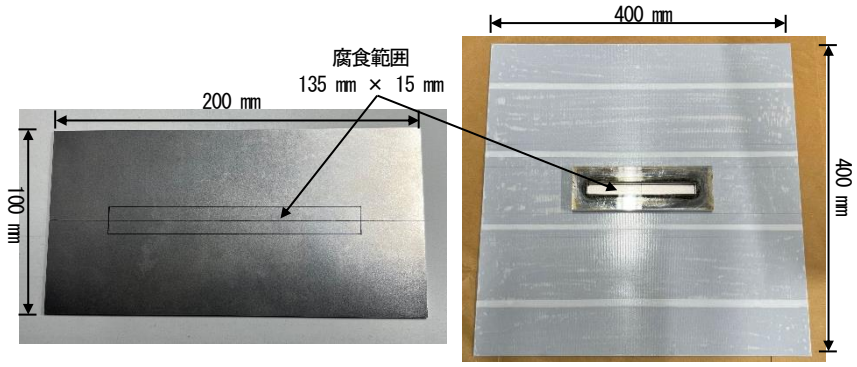
| 化合物 | 磁化率 (emu/mg) | 電気伝導率 (S/m) |
|---|---|---|
| α-FeOOH | $6.61\times10^{-8}$ [3] | $4\times10^{-7}$ [4] |
| β-FeOOH | $4.61\times10^{-8}$ [3] | $5\times10^{-7}$ [4] |
| γ-FeOOH | $4.36\times10^{-8}$ [3] | $6\times10^{-7}$ [4] |
| $Fe_3O_4$ | $2.44\times10^{-2}$ [3] | 80 [4] |
| 鉄（99.8%） | $5.05\times10^{-2}$ * | $1\times10^{7}$ |

*文献 [5] により比透磁率 5000 から計算した。

### 6.2.1 電食供試体概要

本実験では 400 mm × 400 mm × 2 mm の SPCC 鋼板（以下，鋼板（大））に加え，200 mm × 100 mm × 2 mm の鋼板（以下，鋼板（小））を供試体として用い，いずれに対しても同様の電食試験を

行った。鋼板の様子を図-6.2.1 に示す。また，計測と同じ時間条件で腐食生成物を収集して X 線回折試験を行った。




(a) 鋼板（小）　　(b) 鋼板（大）

図-6.2.1　電食供試体

### 6.2.2 電食試験の手順

本研究における電食試験での腐食損傷の範囲は 135 mm × 15 mm とし（図-6.2.1），腐食深さを 1 mm とした。既往の研究[6]を参考に，ファラデー電気分解法則により 1.5 A の電流で 10 時間 9 分間の通電を行うこととした，これによる質量減少量は 15.9 g である。腐食損傷の範囲以外で腐食が生じないように，防水テープでまず鋼板全体を覆い，その後，腐食範囲だけを露出させた。腐食生成物を残留させるため，135 mm×15 mm の範囲に深さ 15 mm のアクリル塩水槽を両面テープで貼り付け固定した。この塩水槽に，陰極として長さ 135 mm の銅板を 6 mm 挿入し，3%の塩水を注入した。また，鋼板を陽極とし，直流電源より 1.5 A の電流を継続通電した。

電食過程を図-6.2.2 に示す。試験体 2 体の通電を実施した後，腐食生成物を 50°C 40 時間乾燥させた。乾燥終了後 2 時間以内に鋼板（小）の腐食生成物を収集し粉末状にして X 線回折を行った。また，残留した腐食生成物を 60°C環境下において 10%クエン酸水素ニアンモニウムで除去した。その際の鋼板の質量減少量は 9.86g であった[7]。

同様に，乾燥終了 2 時間以内に腐食生成物残留状態の鋼板（大）を消磁後，GMR センサで計測し，電圧振幅値と位相差のデータを記録した。次に，上記と同様の方法で腐食生成物を全て除去して質量減少量（9.87g）を測定した後，再度消磁して腐食生成物除去後の鋼板（大）を計測し，データを記録した[7]。

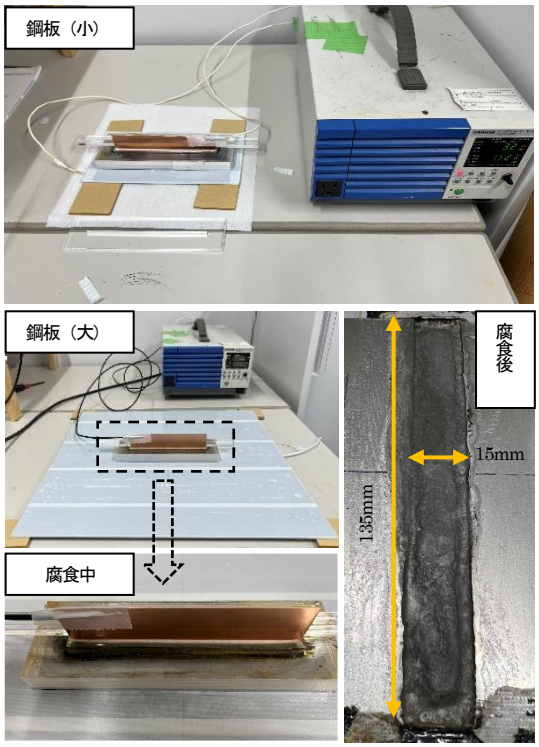



図-6.2.2　SPCC 鋼板の電食

### 6.2.3 腐食生成物のX線回折の結果

腐食生成物の X 線回折の結果を**図-6.2.3** に示す [7]。生成物の物質を同定するために ICDD (International Centre for Diffraction Data)の PDF (Powder Diffraction File) データを用いて比較した。参照したカードを**表-6.2.2**に示す。乾燥開始から一定の塩水残留を考慮して NaCl も比較して確認した。ピーク同定の結果，本研究の電食による腐食生成物は主に α-FeOOH と $Fe_3O_4$ であり，β-FeOOH と γ-FeOOH は確認されなかった。なお, 電食の過程で水槽溶液に対して pH 値を用いて計測した結果, pH 値は 11 であり，文献 2)に記載のアルカリ環境下で鉄の最終生成物 α-FeOOH と $Fe_3O_4$ とに一致した。

表-6.2.2　X 線回折カード番号（ICDD）

| 腐食生成物 | カード番号 |
|---|---|
| α-FeOOH | 01-075-5065 |
| β-FeOOH | 00-013-0157 |
| γ-FeOOH | 00-044-1415 |
| $Fe_3O_4$ | 01-087-2334 |
| NaCl | 00-005-0628 |

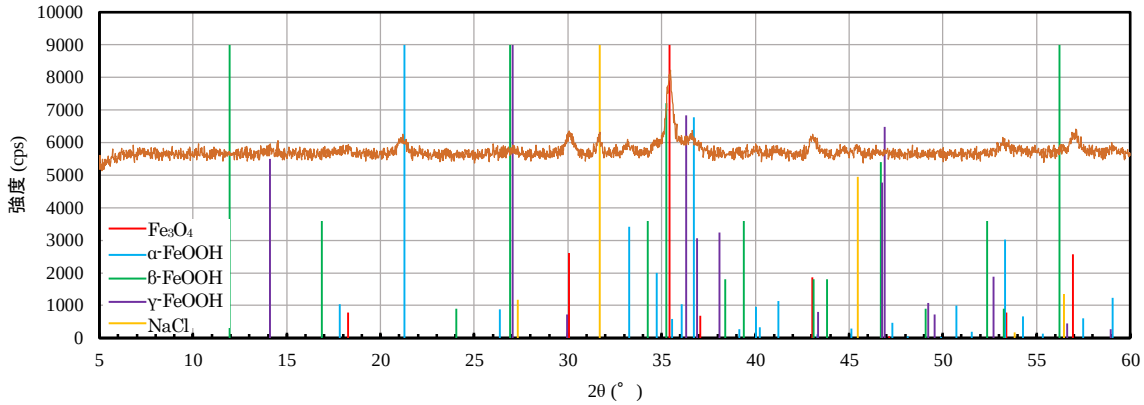


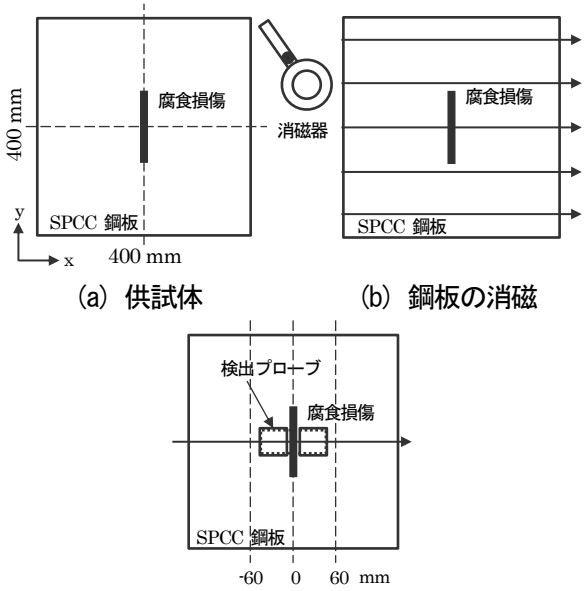

図-6.2.3　SPCC 鋼板の電食生成物の X 線回折結果

## 6.3 GMRセンサによる渦電流法を用いた計測結果

本計測では腐食された鋼板（大）と健全の鋼板を対象とし，健全なもの，腐食生成物が残留したもの，さらに腐食生成物を除去したものに対して，腐食生成物が GMR センサで検出される磁場に及ぼす影響を検討することとした。

### 6.3.1 計測概要

本実験で腐食を模擬する供試体は，寸法 400 mm × 400 mm × 2 mm の SPCC 鋼板で，1 枚を健全鋼板とし，もう 1 枚を局部腐食鋼板（図-6.3.1(a)）とした。また，電食により，鋼板の中心から y 軸に沿って上下方向に腐食損傷の範囲を設けた。鋼板自体の磁化の影響を除去するため，測定開始前に，図-6.3.1(b)に示すように鋼板の腐食損傷部の長手方向に垂直に消磁器を 5 回移動させ消磁を行った。




(a) 供試体　　(b) 鋼板の消磁

(c) 計測経路

図-6.3.1　計測概要

計測は，**図-6.3.1(c)**に示すように励磁コイルとセンサを装着した検出プローブを用い，鋼板のリフトオフ距離を 30 mm にて，腐食損傷の中軸線 -60 mm から +60 mm まで 3 mm ずつ移動させて行い，ロックインアンプとディジタルオシロスコープで位相差と電圧振幅値を記録した。

### 6.3.2 渦電流法による計測結果

本研究では①健全，②腐食生成物残留，③腐食生成物除去の鋼板につき，第 2 章の計測方法で実験を行った。

電圧振幅値の結果を**図-6.3.2** に示す。①健全の場合では，中央からの距離に対して，電圧振幅値に特に明らかな変化は見られなかった。一方，②腐食生成物残留と③腐食生成物除去の 2 つの条件での結果は S 字形状を示し，電圧振幅値の正のピークと負のピークは腐食損傷の両側に現れた。これより，電圧振幅値がこのような S 字形状となる場合は，正のピークと負のピークの間に腐食が存在する可能性があると考えられる。また，両者における正負のピーク差を**図-6.3.3** に示す。この図によれば，腐食生成物残留のピーク差が明らかに大きいことから，腐食生成物の存在が磁場に与える影響が確認できた [7]。さらに，腐食損傷の位置と磁場が変化する範囲との相対関係を視覚的に見やすくするため，電圧振幅値の変化率を計算し，移動平均処理を行った結果を**図-6.3.4** に示す。図より，健全の場合は全体にわたってフラットであるのに対して，腐食損傷の場合,電圧振幅値の変化率はいずれも損傷の中央部で凸の形状となり，損傷範囲と良い対応を示すことがわかった [7]。

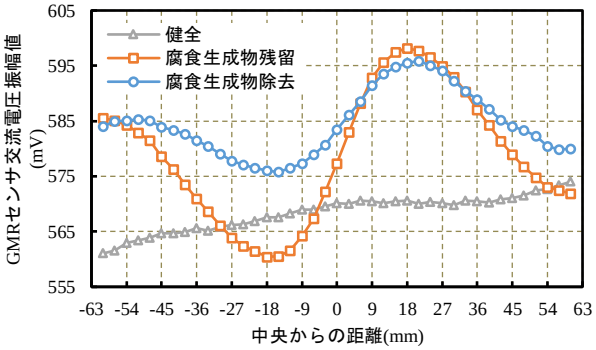



**図-6.3.2　電圧振幅値の結果**

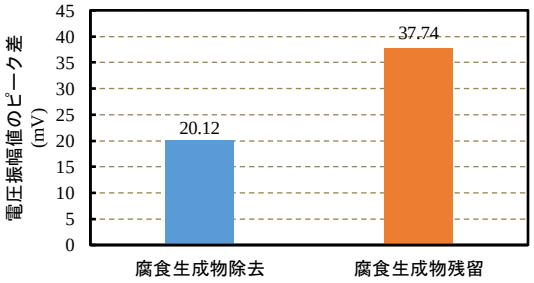



**図-6.3.3　電圧振幅値のピーク差**

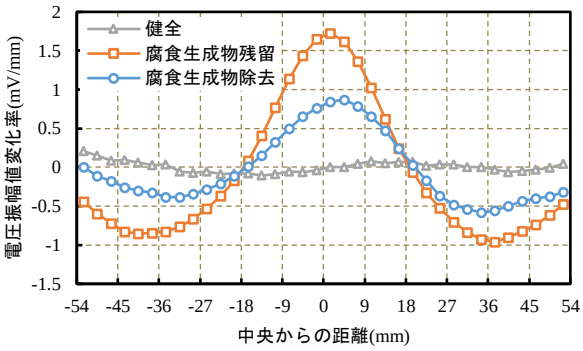



図-6.3.4　電圧振幅値変化率の結果

次に位相差の結果を図-6.3.5に示す。ここでは，計測開始時にロックインアンプの初期の位相差をゼロに設定して検出プローブを移動し計測した。①健全の場合，位相差は検出プローブの移動に伴って単調に減少した。②腐食生成物残留の場合，位相差は腐食損傷範囲において負のピークに続いて正のピークが現れた。一方，③腐食生成物除去の場合では，その傾向は逆であった。これらより，②および③の場合の位相差は，①の挙動とは明らかに異なっており，位相差に着目することで腐食損傷の有無を把握できる可能性が示唆された[7]。さらに，位相差の変化率の結果を図-6.3.6に示す。これによれば，①健全の位相差変化率には明らかな変化は見られないものの，②では腐食損傷中央部に正のピークが現れるとともに，その両側に負のピークが現れた。また，③では，その傾向が逆であった。これらから，位相差変化率を指標として用いることで，腐食損傷の発生が把握できるとともに，そのピークの位置から腐食損傷の範囲を推定することが可能と考えられる[7]。

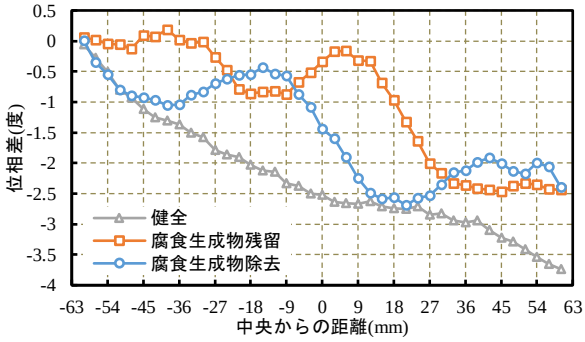



図-6.3.5　電圧振幅値変化率の結果

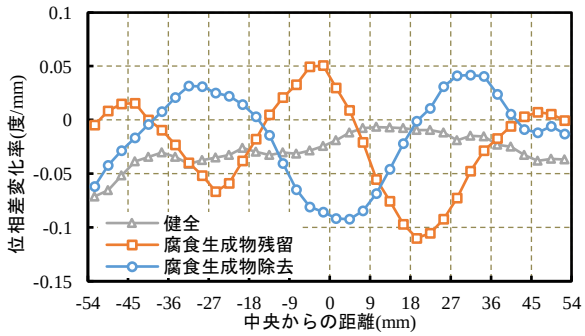



図-6.3.6　電圧振幅値変化率の結果

以上を踏まえ，電圧振幅値変化率および位相差変化率における正負のピークの出現状況と腐食生成物の有無との関係をまとめたものを**表-6.3.1** に示す。表に示す通り，腐食生成物が存在する場合は，腐食損傷位置で電圧振幅値変化率と位相差変化率のいずれもが正のピークを示す一方で，腐食生成物がない場合は，腐食損傷位置において電圧振幅値変化率では正のピーク，位相差変化率では負のピークが現れる。これらの関係に基づくことにより，腐食生成物の存在を推定できることが示唆された[7]。

**表-6.3.1　各評価指標と腐食生成物の有無との関係**

| 電圧振幅値変化率 | 位相差変化率 | 腐食生成物 |
|---|---|---|
| 正のピーク | 正のピーク | あり |
| 正のピーク | 負のピーク | なし |

## 6.4 解析による渦電流計測結果の妥当性の検討

### 6.4.1 有限要素解析概要

6.3 の実験結果の妥当性を評価するため，腐食生成物が存在する場合の電圧振幅値の変化について有限要素解析を行った。解析では汎用の有限要素解析ソフトウェア（Photo-series Eddy）を用いて，実験の条件と同じく①健全，②腐食生成物残留，③腐食生成物除去の三つの条件で実施した。励磁コイルと鋼板のサイズは供試体と同じサイズにてモデルを作成した。また，腐食による断面欠損の寸法は長さ 135 mm，幅 15 mm，深さ 1 mm とし，鋼板中央に設定した。コイルに入力する節点電流は 20.4 AT（0.1457 A×140 T）とし，正弦波の周波数は 4 kHz とした。実験では，乾燥後の腐食生成物は鋼板表面に高さ約 12 mm ほど堆積しており，これらを収集する際，生成物中に多くの空隙が認められた。また，X 線回折結果では生成物中に α-FeOOH と $Fe_3O_4$ が存在したが，α-FeOOH は導電率も磁化率も極めて小さいため，磁場に影響を与えないと考えられる。そこで，上記に基づき，②腐食生成物残留の場合のモデルとして，腐食生成物の断面を**図-6.4.1** に示すように設定した。図の黄色部分を $Fe_3O_4$，白色部分を空隙とし，鋼板表面上の縦方向の空隙層の厚みを 0.5 mm，1 mm，2mm とし，その断面 15 mm × 13 mm の範囲における腐食生成物の割合を 72.3%とした。一方，③腐食生成物除去のモデルでは，鋼板の上部は全て空気とした。

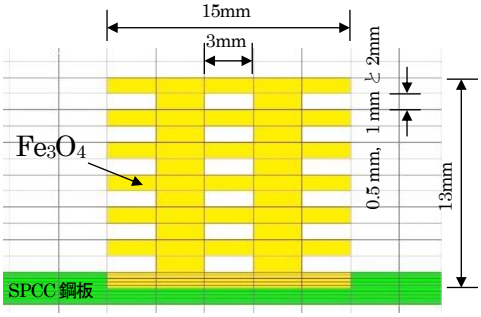



**図-6.4.1　腐食生成物の断面寸法**

解析に用いた物性値を**表-6.4.1** に示す。励磁コイルは腐食損傷の長軸方向と垂直に右方向へ 3 mm ずつ 30 mm 位置に達するまで移動させ，励磁コイル両磁極の中央位置の要素の y 方向（鋼板表面と垂直方向）の磁束密度の最大値（$B_{y\text{-}max}$，正負値が等しい）を算出した。

**表-6.4.1　有限要素解析の物性値**

| 物性 | 相対透磁率 ($\mu_r$) | 電気伝導率 ($\sigma$, S/m) |
|---|---|---|
| フェライトコア | 1900 | 0 |
| SPCC 鋼板 | 2000* | $1\times10^7$ |
| 銅線コイル | 1 | 0 |
| 空気 | 1 | 0 |
| $Fe_3O_4$ | 1586* | 80 |

* SPCC 鋼板の比透磁率は文献 [7]の表より推定した。$Fe_3O_4$の比透磁率は文献 [5]に基づき計算した。

## 6.4.2 有限要素解析結果

①健全，②腐食生成物残留，③腐食生成物除去の解析結果を**図-6.4.2** に示す。②の場合、空隙層の厚みが変化しても、$B_{y\text{-}max}$ 値の結果はほぼ同じであった。①健全の場合，$B_{y\text{-}max}$ 値は極めて小さく，中央からの距離にしたがってわずかに増大した。一方，②と③の場合，$B_{y\text{-}max}$ 値は一旦増大した後減少に転じた。それぞれ，移動距離 15 mm と 18 mm において最大となり，①の結果と明らかに異なる傾向を示した。これらより，解析の結果は実験結果と同じ変化傾向を示すことがわかった [7]。

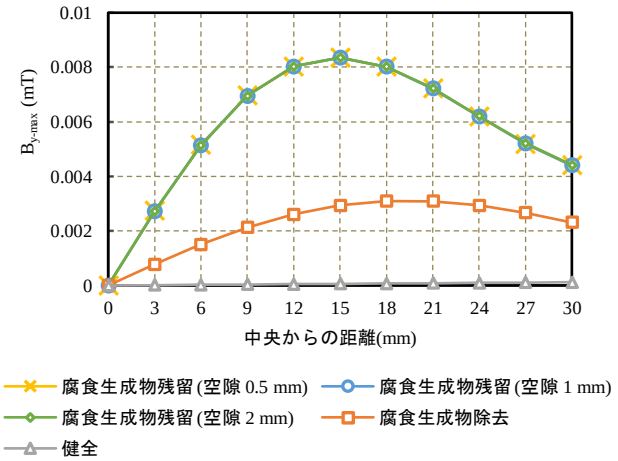



**図-6.4.2　磁束密度の最大値**

## 6.4.3 解析結果に関する考察

(1)　腐食生成物が鋼板表面の渦電流分布に及ぼす影響

ここでは，鋼板表面での渦電流による二次的な誘導磁場の分布がセンサの受信信号に及ぼす影響を把握することとした。励磁コイルの移動距離が 15 mm の場合について，②腐食生成物残留と③腐食性生物除去の場合の渦電流の分布状況を**図-6.4.3** に示す。両者を比較すると，②の場合，$Fe_3O_4$ の電気伝導率が小さいため断面欠損部には渦電流が形成されていないことがわかる。2 つの条件で

の渦電流の最大値の差はわずか3.5%程度ではあるが，③の条件における渦電流の分布状況はより均一であり，最大電流は断面欠損のエッジ部に生じている。一方，②の条件では，断面欠損の右側の広い領域において渦電流が分布している。そのため，励磁コイルとの両磁極間の二次的な渦電流磁場のアンバランスがより顕著に現れたと考えられる。

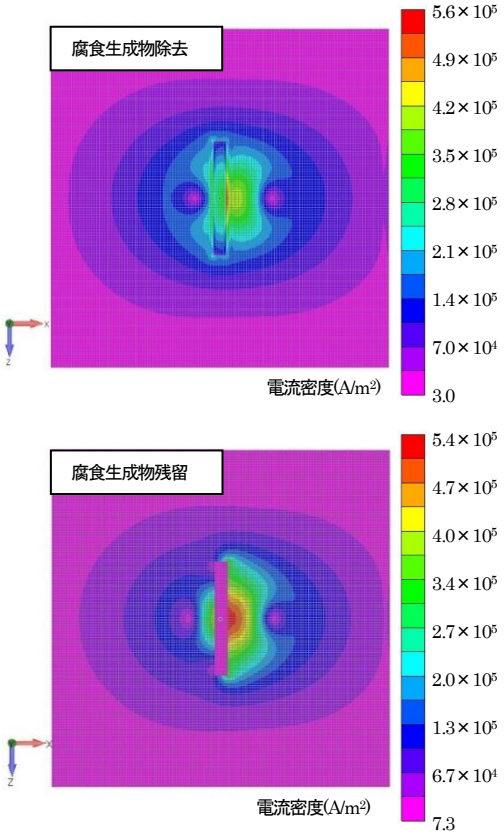



図-6.4.3　鋼板表面の渦電流分布

(2)　腐食生成物の磁化の影響

$Fe_3O_4$ の透磁率が大きいため，鋼板表面から約 12 mm の厚さで積層した腐食生成物の磁化が y 方向の磁束密度に影響に与えた可能性が考えられるため，今後検討を進めていく予定である。

## 6.5 まとめ

本研究では，リフトオフ距離 30 mm の条件で，電食により腐食を模擬した鋼板に対して，GMR センサを用いて渦電流計測を行った。①健全，②腐食生成物残留，③腐食生成物除去の鋼板を対象に基礎評価を行い，以下の結果を得た。

(1)　鋼板上を走査計測して得られる磁場の電圧振幅値と電圧振幅値変化率のピークの位置により，腐食損傷の検出と腐食位置の推定を行える可能性があることがわかった。

(2)　また，磁場の位相差変化率のピークの位置によっても腐食損傷の検出と腐食位置の推定を行える可能性があることを明らかにした。

(3)　磁場の電圧振幅値変化率と位相差変化率の結果を組み合わせることにより，腐食生成物の有無

を評価できる可能性が示唆された。

(4) 有限要素解析により，腐食生成物の存在が鋼板表面での渦電流の分布状況に影響を及ぼす可能性があることを明らかにした。

## 参考文献


1) 熊英，北垣亮馬，野口貴文 ：モルタル中の鉄筋表面における腐食生成物の透磁率の違いが電磁誘導法鉄筋探査試験結果に及ぼす影響把握に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，pp. 1855-1860，2013.

2) 高谷哲ほか：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造），Vol. 71，pp. 235-247，2015.

3) 片岡一郎，村中勉：酸化鉄およびオキシ水酸化鉄の 色，結晶子粒度および磁化率について，高知大学学 術研究報告（農学），Vol. 23，pp. 1-14，1975.

4) 井上勝成，滝 洋一朗，金子克美：FeOOH・$Fe_3O_4$集合系の電気伝導性と高次構造，防食技術，Vol. 33，pp. 446-453，1984.

5) Magnetic Units，https://ieeemagnetics.org/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=107（閲覧日：2021年12月3日）

6) 佐藤大起，寺澤広基，鎌田敏郎：漏洩磁束法における鉄筋の残留磁化と鉄筋腐食の関係，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集， Vol. 18，pp. 31-34，2018.

7) 沈力，服部晋一，寺澤広基，鎌田敏郎：鋼板の腐食損傷および腐食生成物がGMRセンサにより検出される磁場に与える影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44， No.1，pp.1264-1269，2022.7.

8) 小沼稔：磁性材料，工学図書，p.64，1996.4.

# 第 7 章 腐食を模擬した鋼棒への適用評価

## 7.1 はじめに

コンクリート構造物の検査においては，コンクリート中に埋設されている鉄筋の状態を目視で確認できないため，コンクリート表面で鉄筋の腐食状況を把握する非破壊検査手法を確立することが喫緊の課題となっている。本章では，GMR センサを用いた渦電流法を適用し，交流磁場の応答に着目することにより，コンクリートかぶりを考慮したリフトオフ距離 30 mm で鉄筋表面での局部的な腐食損傷を非破壊で検出する手法を検討した。具体的には，鋼棒を対象として，切削加工により腐食損傷による断面欠損を模擬し，断面欠損の長さ，および深さが GMR センサにより検出される磁場の電圧振幅値に及ぼす影響を評価した。また，検出原理のメカニズムを明らかにするため，有限要素解析を行った。

## 7.2 実験概要

本章の実験で用いた計測措置の計測原理は第 3 章で示したものと同じであるが，対象とする試験体が鋼棒であるため，**図-7.2.1** に示すように面積も減少し，対象面も平面から曲面になり，鋼板表面より渦電流が流れにくくなると考えられる。そのため，GMR センサの検出信号の電圧振幅値でより大きい正負のピーク差が得られるように，高速バイポーラ増幅器を使用し，第 3 章の実験条件の 20 倍から 40 倍に増幅して励磁コイルに十分な電圧を供給した。これにより，励磁コイルの電圧値を 70 V，交流電流は 291.4 mA とした。他の入力条件と信号記録手段は第 3 章と同じである。

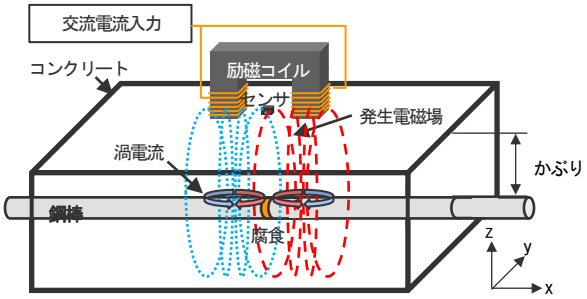



**図-7.2.1　計測原理**

### 7.2.1 試験体概要

本研究における試験体の外観を**図-7.2.2** に示す。鉄筋の節の影響を無視するために，長さ 400 mm，直径 25 mm の SGD400 の丸棒を適用し，鋼棒の中央に旋盤による外周切削加工を行うことで，腐食による断面欠損を模擬した。試験体の断面欠損の条件を**表-7.2.1** に示す。断面欠損の長さ-深さを表す数値を組合せた表記により，試験体を識別した。なお，「健全」は断面欠損なしの試験体を表している。

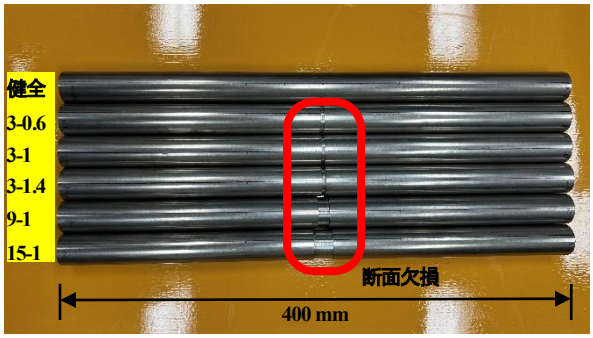



図-7.2.2　試験体の外観

表-7.2.1　試験体の断面欠損の条件

| 試験体 | 長さ（mm） | 深さ（mm） |
|---|---|---|
| 3-0.6 | 3 | 0.6 |
| 3-1 | 3 | 1 |
| 3-1.4 | 3 | 1.4 |
| 9-1 | 9 | 1 |
| 15-1 | 15 | 1 |
| 健全 | ― | ― |

### 7.2.2 計測概要

GMR センサの測定対象範囲が小さく，鋼棒自体の磁化が測定結果に影響を及ぼすため，測定直前に各鋼棒に対して消磁を行った。計測では，図-7.2.3 に示すように励磁コイルと GMR センサを搭載した XYZ 制御装置を用いて，検出プローブと鋼棒上表面のリフトオフ距離を 30 mm に設定した。次に，検出プローブを断面欠損に対して垂直（x 軸方向）に −60 mm から +60 mm まで 3 mm ずつ移動させて，ディジタルオシロスコープで電圧振幅値を記録した。計測状況を図-7.2.4 に示す。

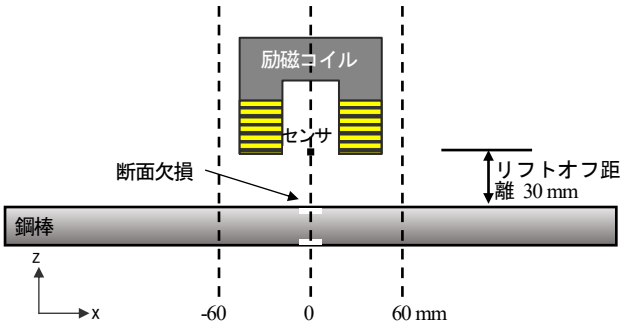



図-7.2.3　計測概要

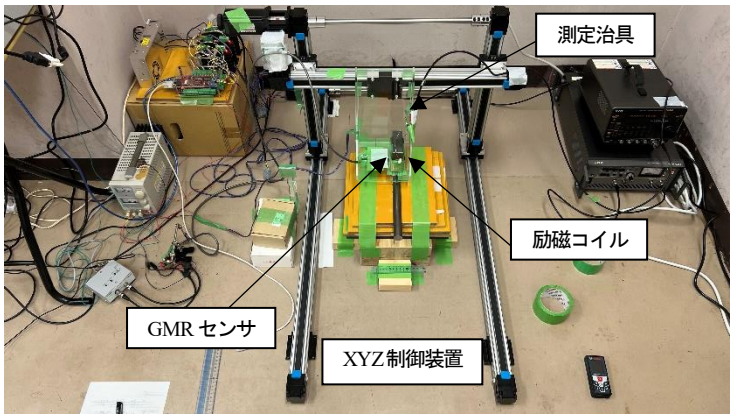



図-7.2.4　計測状況

## 7.3 電圧振幅値による鋼棒表面の断面欠損検出に関する実験的評価

### 7.3.1 断面欠損の有無による電圧振幅値の変化

断面欠損の有無による電圧振幅値の変化を評価するため，①健全の場合と，②断面欠損が存在する場合（試験体 3-1）の計測を行った。図-7.3.1 と図-7.3.2 に，断面欠損の有無による電圧振幅値の変化を示す。図より，①健全の場合，電圧振幅値は中央からの距離にしたがってほぼ直線的に減少する傾向を示した。一方，②断面欠損が存在する場合（試験体 3-1）の結果は S 字形状の変化を示し，電圧振幅値の正のピークと負のピークは断面欠損が存在する位置（0 mm）の両側の±18 mm の位置に現れた。これにより，計測の電圧振幅値結果が S 字形状となる場合，正負のピークの間に断面欠損が存在する可能性があることが示唆された。

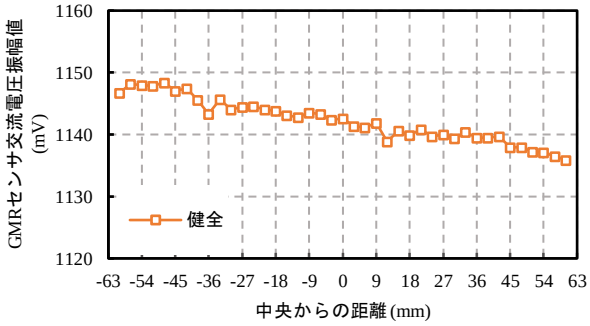



図-7.3.1　健全の場合の電圧振幅値の変化

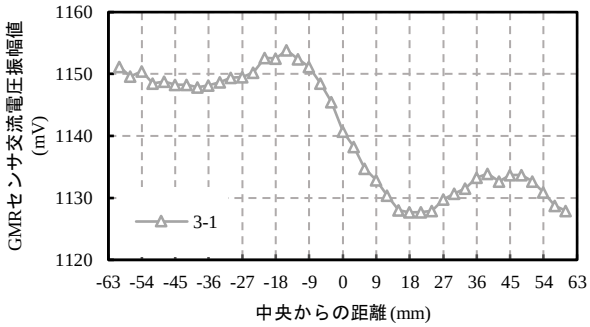



図-7.3.2　断面欠損による電圧振幅値の変化（試験体 3-1）

### 7.3.2 断面欠損の深さによる電圧振幅値の変化

図-7.3.3 と図-7.3.4 に断面欠損の長さ 3 mm，深さ 0.6 mm と 1.4 mm の場合の電圧振幅値の計測結果を示す。

図-7.3.2，図-7.3.3 と図-7.3.4 の結果より，断面欠損の深さが 0.6 mm から 1 mm，1.4 mm まで変化すると，S 字形状は全ての条件で現れたが，深さ 0.6 mm の場合の信号変化は他の 2 条件の場合より小さかった。信号変化の大きさを比較するため，断面欠損が存在する位置（0 mm）の両側のピーク差を図-7.3.5 に示す。この結果より，断面欠損の深さが大きくなるとともに，電圧振幅値のピーク差は増大することがわかった。

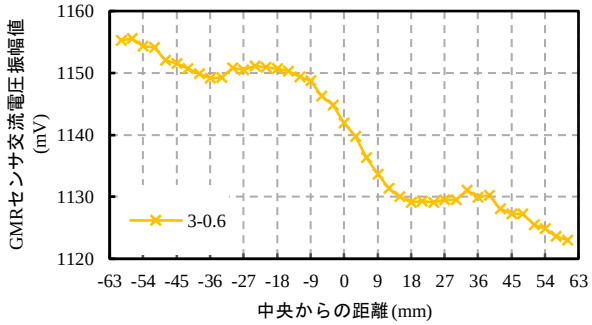



図-7.3.3　断面欠損の深さによる電圧振幅値の変化（試験体 3-0.6）

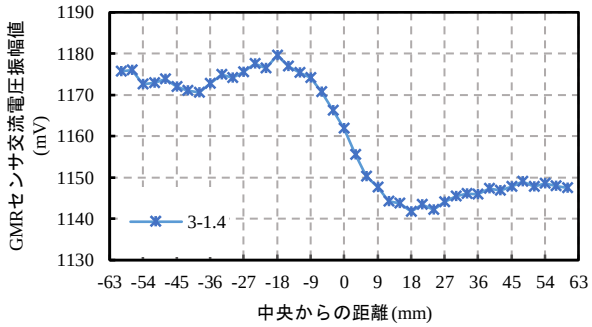



図-7.3.4　断面欠損の深さによる電圧振幅値の変化（試験体 3-1.4）

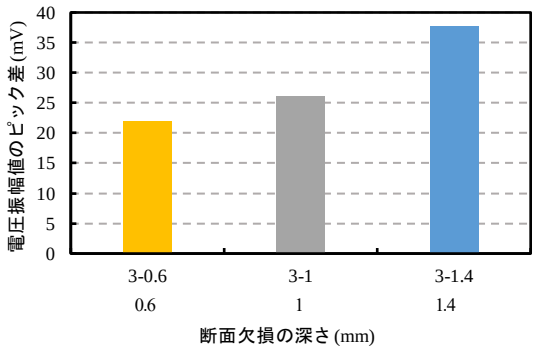



図-7.3.5　断面欠損の深さと電圧振幅値のピーク差

### 7.3.3 断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化

**図-7.3.6** と**図-7.3.7** に断面欠損の深さ 1 mm，長さ 9 mm と 15 mm の場合の電圧振幅値の結果を示す。

断面欠損の長さが変化すると S 字形状の傾向にも変化が現れたが，**図-7.3.7** に示す断面欠損長さ 15 mm の場合の正負ピークの位置は長さ 3 mm，9 mm の場合より中央からの距離が大きくなった。すなわち,断面欠損のエッジ位置は電圧振幅値のピークの位置に影響し,正負ピークの位置で断面欠損の範囲を評価できる可能性があることが示唆された。また，断面欠損の長さ変化による電圧振幅値のピーク差の変化を**図-7.3.8** に示す。図により，断面欠損の長さが増大すると，電圧振幅値のピーク差は大きくなることがわかった。

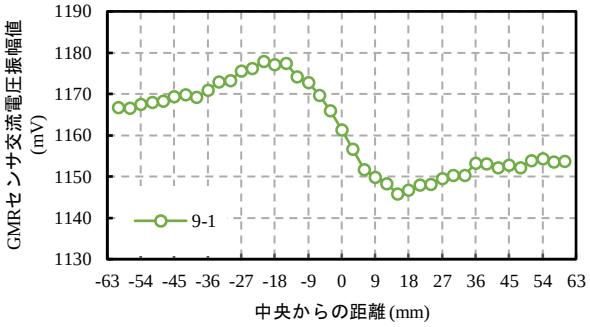



**図-7.3.6　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化（試験体 9-1）**

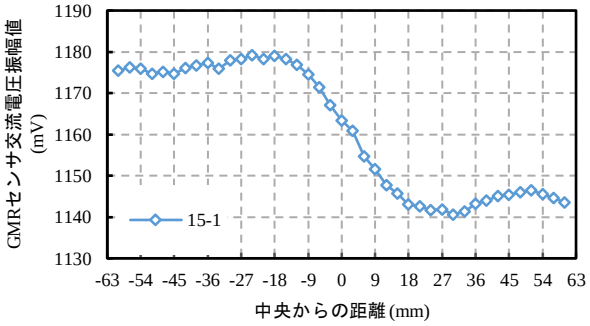



**図-7.3.7　断面欠損の長さによる電圧振幅値の変化（試験体 15-1）**

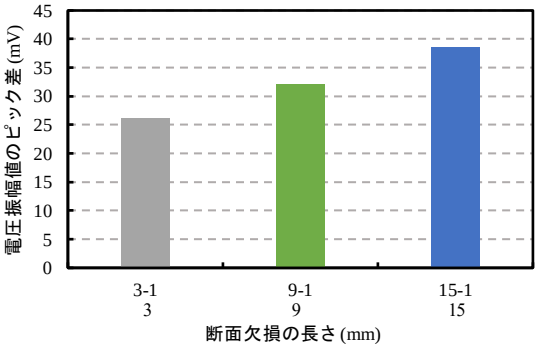



**図-7.3.8　断面欠損の長さと電圧振幅値のピーク差**

### 7.3.4 断面欠損のサイズによる電圧振幅値変化率

断面欠損のサイズが変化した場合，計測開始位置（-60 mm）と計測終了位置（+60 mm）の電圧振幅値の変化はほぼ同じで，断面欠損の周辺の変化が大きいことが観察された。このため，断面欠損の位置と磁場が変化する範囲との相対関係を見やすくするため，電圧振幅値の変化率を移動平均により算出することとした。断面欠損の深さ変化と長さ変化と電圧振幅値の変化率の関係を**図-7.3.9**と**図-7.3.10**に示す。

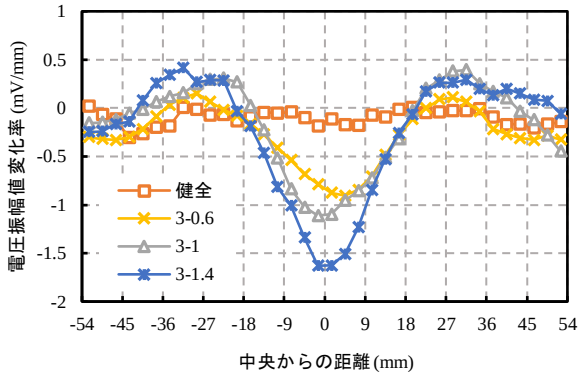



**図-7.3.9　断面欠損の深さと電圧振幅値変化率**

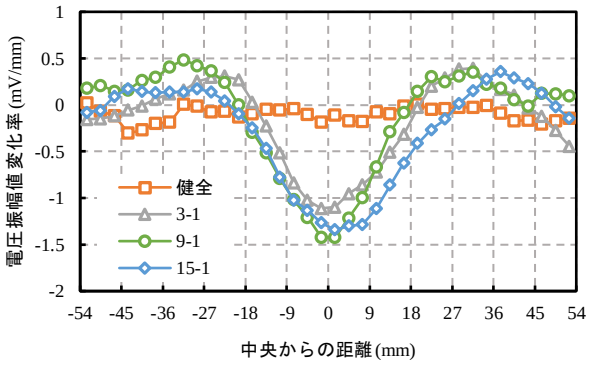



**図-7.3.10　断面欠損の長さと電圧振幅値変化率**

健全の場合，電圧振幅値の変化率は中央からの距離にかかわらず約 0 mV/mm で，ほぼ一定であった。一方，断面欠損ありの場合は，**図-7.3.9** と**図-7.3.10** より，断面欠損が存在する位置（x = 0mm）で負のピークが現れることがわかった。**図-7.3.11** と**図-7.3.12** は，断面欠損の深さと長さが変化した場合の電圧振幅値変化率のピーク値を示したものである。断面欠損深さが増大するとともに，電圧振幅値変化率のピーク値は小さくなることがわかった。一方，断面欠損長さの違いによる，電圧振幅値変化率のピーク値の差異は明確には確認できなかった。

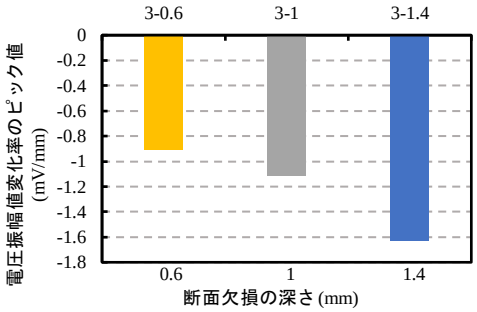



図-7. 3. 11　断面欠損深さと電圧振幅値変化率ピーク値

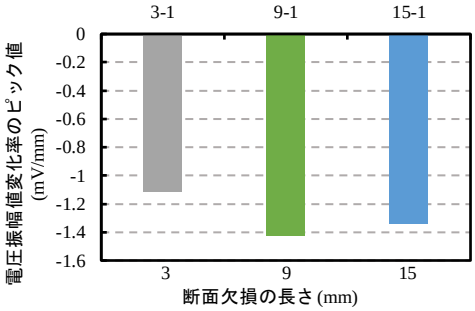



図-7. 3. 12　断面欠損長さと電圧振幅値変化率ピーク値

## 7.4 鋼棒の腐食欠損部における動磁場の振幅値に関する有限要素解析

### 7.4.1 有限要素解析概要

実験結果を踏まえた動磁場変化のメカニズムを検討するため，ソフトウェア Photo-series Eddyjωを適用して有限要素解析を行った。フェライトコア，コイル，鋼棒と断面欠損の寸法などの条件は，実験と同じである。入力した正弦波電流密度は周波数 4 kHz，最大振幅値 40.8 AT (0. 2914 A×140 T) とした。材料の物性を**表-7. 4. 1** に示す。

表-7. 4. 1　材料の物性値

| 物性 | 相対透磁率 ($\mu_r$) | 電気伝導率 (σ, S/m) |
|---|---|---|
| フェライトコア | 1900 | 0 |
| SGD400 鋼棒 | 2000 | $1\times10^7$ |
| 銅線 | 1 | 0 |
| 空気 | 1 | 0 |

断面欠損は鋼棒の中央に設定し，励磁コイルは 0 mm から x 軸の＋方向，および－方向に移動させるため，解析結果は励磁コイルの両磁極の中央位置の空気要素において対称とした。このため，励磁コイルを鋼棒の中央（x = 0 mm）から 3 mm ずつ x = 30 mm 位置に達するまで移動させ，励磁コイル両磁極の中央位置の要素の z 方向（鋼棒表面と垂直方向）の磁束密度の最大振幅値（$B_{z\text{-}max}$，正負値が等しい）を算出した。解析モデルを**図-7. 4. 1** に示す。

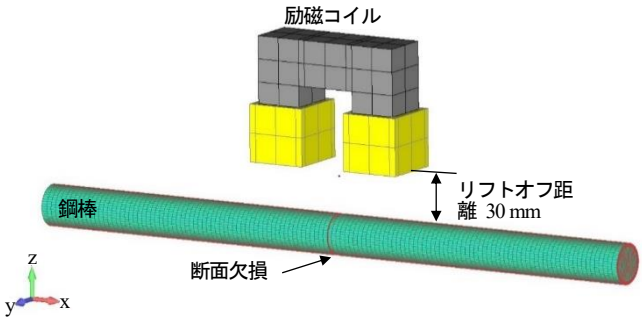



図-7.4.1　解析モデル

### 7.4.2 有限要素解析結果

断面欠損の深さ，および長さを変化させた場合のセンサ位置のｚ方向の磁束密度振幅値 $B_{z\text{-}max}$ の解析結果を図-7.4.2 と図-7.4.3 に示す。図-7.4.2 において，健全の場合は励磁コイル位置が鋼棒の中央（0 mm）から移動してもほぼ変化しないが，断面欠損ありの場合は，中央からの距離が大きくなると一旦大きくなってから減少し，いずれも 18 mm の位置で最大値が現れた。また，断面欠損の深さが増大するとともに，$B_{z\text{-}max}$ の最大値は大きくなり，図-7.3.5 の実験結果と同じ変化傾向を示すことが確認された。

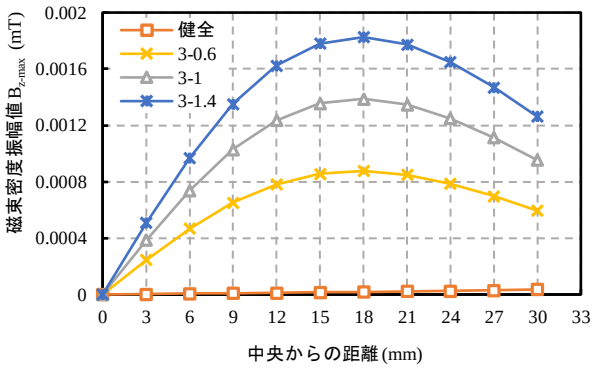



図-7.4.2　断面欠損の深さと磁束密度振幅値

図-7.4.3 の結果より，励磁コイル位置が鋼棒の中央（0 mm）から移動すると，センサ位置のｚ方向の磁束密度振幅値 $B_{z\text{-}max}$ は一旦大きくなってから減少する傾向が見られた。断面欠損長さ 3 mm と 9 mm の場合は 18 mm 位置で最大値が現れたが，断面欠損長さ 15 mm の場合は，鋼棒中央からさらに離れた 21 mm の位置で最大値が現れ，実験結果と同じ傾向を示した。一方，断面欠損の深さが増大するとともに，$B_{z\text{-}max}$ の最大値は小さくなり，図-7.3.8 の実験結果の変化と逆の傾向となった。解析結果と実験結果が異なる傾向を示した原因としては，本来鋼棒自体に残留磁化があると考えられたため，消磁後にホール効果磁気センサにより計測したところ，有効単位 0.1 mT の範囲内で，残留磁化が除去されていなかった可能性が確認された。このため，測定時のセンサ位置のｚ方向の磁場の大きさは残留磁化の影響を受けたと考えられる。今後，消磁後の残留磁化の大きさをより感度高い磁界測定装置で確認する必要がある。

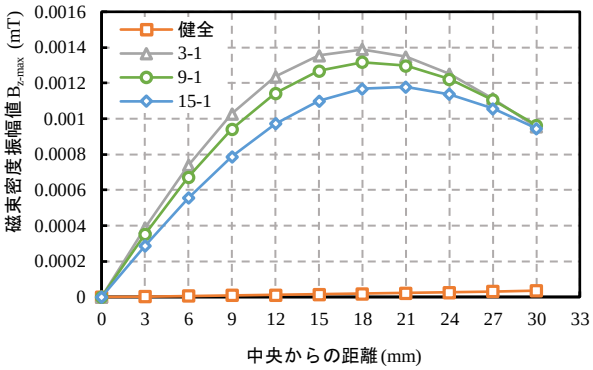



図-7.4.3　断面欠損の長さと磁束密度振幅値

## 7.5 まとめ

本章では，コンクリート中の鉄筋腐食を非破壊評価することを目的とし，GMR センサを用いた渦電流法を適用し，腐食損傷による断面欠損を模擬した鋼棒を対象に基礎的評価を行った。試験体の鋼棒表面に長さと深さが変化する断面欠損を切削加工し，コンクリートかぶりを考慮したリフトオフ距離 30 mm にて走査計測した。また，有限要素解析を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) 鋼棒表面に断面欠損が存在する場合，電圧振幅値に明らかな変化が生じ，断面欠損の位置の両側に正負のピークが現れた。これより，断面欠損の位置の評価の可能性が示唆された。

(2) 断面欠損が存在する場合，電圧振幅値変化率の変化が明確に表れ，断面欠損の位置で電圧振幅値変化率が負のピークを示すことがわかった。

(3) 断面欠損の深さが大きくなると，電圧振幅値のピーク差が大きくなるとともに，電圧振幅値変化率のピーク値が小さくなることが明らかになった。また，この傾向は解析結果と一致した。

(4) 断面欠損の長さが大きくなると，電圧振幅値のピーク差が大きくなるとともに，電圧振幅値変化率のピーク値が小さくなることが実験で確認された。これに関して解析結果と異なる傾向を示す原因については，さらに検討の必要がある。

(5) 以上より，電圧振幅値のピーク差と電圧振幅値変化率のピーク値から，鋼棒の断面欠損の有無，位置，および大きさが評価できる可能性があることが明らかになった。

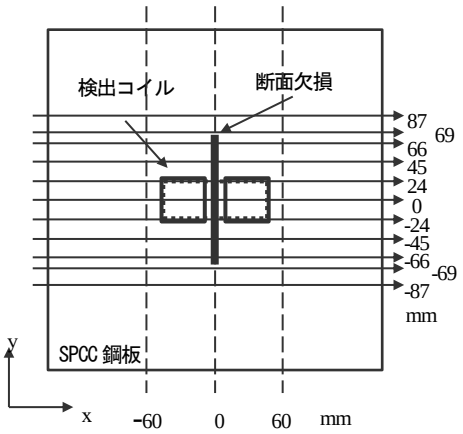
# 第 8 章 コンクリート中の鋼材腐食損傷の可視化の検討

## 8.1 はじめに

第 4 章と第 6 章の実験結果で，本研究の計測方法がコンクリートかぶりを模擬したリフトオフ距離 30 mm で鋼板表面の断面欠損と腐食による腐食生成物を検出可能であることを確認した。実構造物においては，コンクリート中の鋼板表面の腐食損傷が広範囲に分布している状況が想定されるため，鋼板表面の腐食損傷をイメージとして可視化し，視認性を高めることが重要である。このため，本章では，試験体表面における断面欠損の範囲を複数の計測線で二次元的に走査計測し，断面欠損の位置と範囲をイメージングすることを試みた。

## 8.2 実験概要

本章の実験で用いた計測装置は第 3 章で説明したものと同じである。試験体としては，断面欠損の条件が長さ 135 mm，幅 3 mm，深さ 1 mm の試験体（135-3-1）を対象とした。走査を行う計測線を図−8. 2. 1 に示す。検出プローブは y 方向に-87 mm, -69 mm, -66 mm, -45 mm, -24 mm, 0 mm, 24 mm, 45 mm, 66 mm, 69 mm，と 87 mm で 11 測線を計測した。計測は検出プローブを断面欠損の長手方向に垂直（x 軸方向）に −60 mm から +60 mm まで 3 mm ずつ移動させて，ロックインアンプと波形記録装置で位相差を記録した。




図−8. 2. 1　二次元走査計測

## 8.3 動磁場応答の振幅値に着目した断面欠損の可視化評価

### 8.3.1 電圧振幅値に関する実験結果

まずは， GMR センサの電圧振幅値について検討する。図−8. 3. 1 に 11 回の走査計測の電圧振幅値の結果をまとめて示す。

図より，y = 0 mm，y = ±24 mm，y = ±45 mm，y = ±66 mm，y = ±69 mm の場合の電圧振幅値の結果は S 字形状になっていることが確認された。y=±87 mm の場合，断面欠損の端部から 19.5 mm ま

での健全の位置で計測した電圧振幅値の結果はほぼ直接的な形状を示し，健全の鋼板の実験結果と同じ傾向が確認された。しかし，y = ±69 mm の場合，断面欠損の端部から 1.5 mm までの健全の位置で計測した結果が明確な S 字形状を示すため，y = ±87 mm の結果と比較し，断面欠損の端部は，その近傍の健全な鋼板表面の計測結果にも影響を与えることがわかった [1)]。

また，y = ±66 mm と y = ±69 mm の場合は，断面欠損の端部（y = ±67.5 mm）の信号を計測するため，電圧振幅値の結果はほぼ同様であり，本研究の計測方法では断面欠損の端部の位置を明らかに識別することができないことがわかった [1)]。

次に，11 測線の二次元走査計測の電圧振幅値の正負ピーク差を**図-8.3.2** に示す。図より，断面欠損の中央（y = 0 mm）の場合の電圧振幅値の正負ピーク差が最も大きかった。また，断面欠損の中央からの距離が遠くになるとともに，電圧振幅値の正負ピーク差が小さくなることが確認された。さらに，断面欠損の中央からの同じ距離の電圧振幅値の正負ピーク差はほぼ同じであることがわかった [1)]。

**図-8.3.3** に二次元走査計測の電圧振幅値の正負ピークの絶対値を示す。正負ピークの絶対値の正の振幅値は計測結果の最大振幅値と中央（y = 0 mm）の振幅値の差の絶対値であり，負の振幅値は計測結果の最小振幅値と中央（y = 0 mm）の振幅値の差の絶対値である。図により，ある程度の誤差があるが，正負ピークの絶対値は中央（y = 0 mm）に対称であることがわかった。誤差については，すべての結果が正の振幅値が負の振幅値より小さく，計測時の検出プローブの底面と鋼板の表面が完全に平行ではないことから，ある程度の角度が存在したことが原因であると考えられる [1)]。

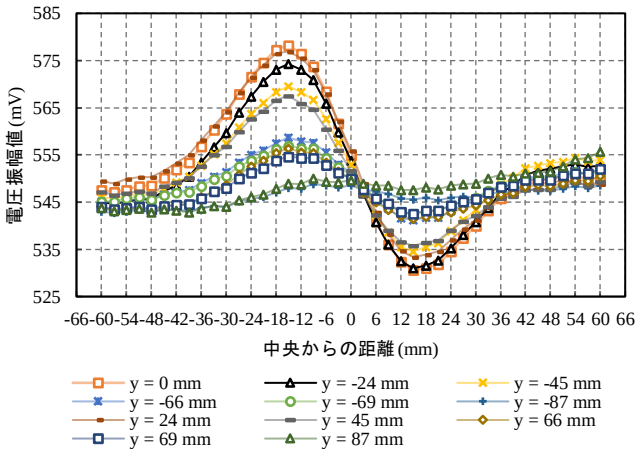



**図-8.3.1　二次元走査計測の電圧振幅値変化**

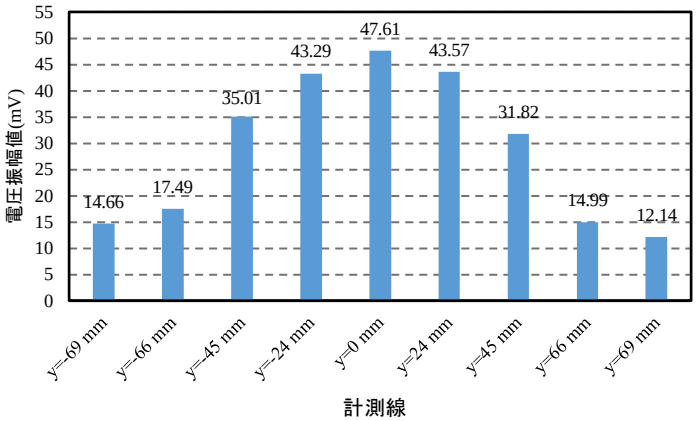



図-8.3.2　二次元走査計測の電圧振幅値の正負ピーク差

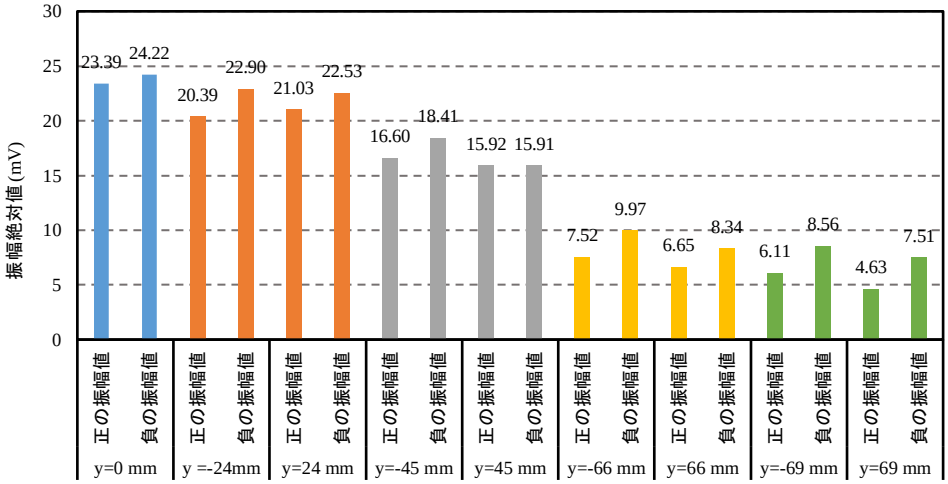



図-8.3.3　二次元走査計測の電圧振幅値の正負ピークの絶対値

さらに，計測で得られた各計測点の電圧振幅値を試験体の対応する位置にプロットした。**図-8.3.4** により，電圧振幅値が上向きに凸となる赤い領域と下向きに凹となる青い領域は，断面欠陥（黒い領域）の両側に対称に分布している。図より，色相の変化で断面欠損の存在，および位置が視認性高く表現されていることがわかった。**図-8.3.5** に電圧振幅値の 3D イメージング結果を示す。図より，断面欠損が存在する位置（x = 0 mm）の両側に凹凸が明らかに観察できるため，電圧振幅値の実験結果に基づき，コンクリートかぶりを模擬したリフトオフ距離 30 mm から鋼板表面の断面欠損の存在と分布を可視化することが可能であることが確認された [1]。

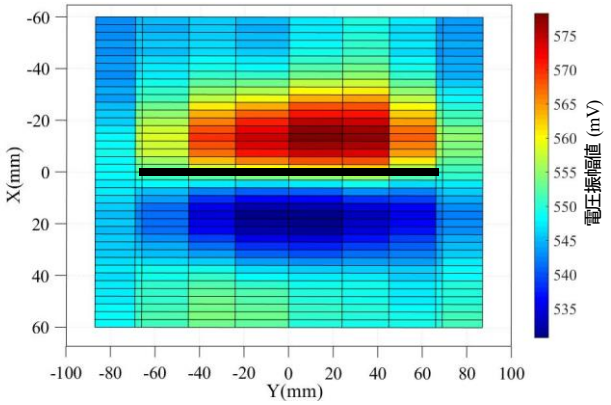



図-8.3.4　電圧振幅値のマッピング

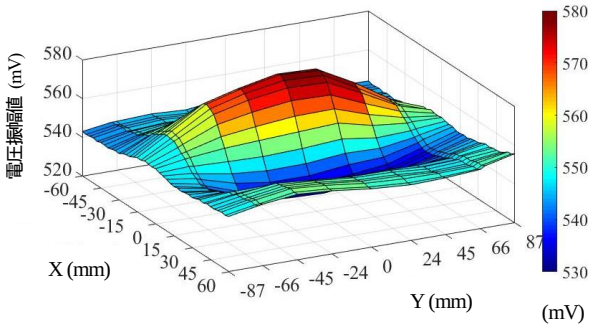



図-8.3.5　電圧振幅値の 3D イメージング

### 8.3.2 電圧振幅値変化率に関する実験結果

電圧振幅値の実験結果をより分かりやすく可視化するため， GMR センサの電圧振幅値変化率の結果に基づき検討した。**図-8.3.6** に 11 測線の走査計測の電圧振幅値変化率の結果を示す。

図より，y = 0 mm，y = ±24 mm，y = ±45 mm，y = ±66 mm，y = ±69 mm の場合の電圧振幅値変化率では断面欠損の位置（x = 0 mm）で負のピークが現れることを確認した。y = ±87 mm の場合，断面欠損の端部から 19.5 mm までの健全の位置で計測した電圧振幅値変化率の結果はほぼ直線的な形状を示し，健全の鋼板の実験結果と同じ傾向を示すことを確認した。しかし，y = ±69 mm の場合，断面欠損の端部から 1.5 mm までの健全の位置で計測した結果が明確な負のピークを示し，y = ±66 mm の場合の結果とほぼ同じため，電圧振幅値変化率の結果も断面欠損の端部の位置を識別できないことがわかった [1)]。

次に，11 測線の二次元走査計測の電圧振幅値変化率の負のピーク値を**図-8.3.7** に示す。図より，断面欠損の中央（y = 0 mm）の場合の電圧振幅値変化率の負のピーク値が最小であった。また，断面欠損の中央からの距離が遠くになるとともに，電圧振幅値変化率の負のピーク値が大きくなること，断面欠損の中央からの同じ距離の電圧振幅値変化率の負のピーク値はほぼ同じであることがわかった [1)]。

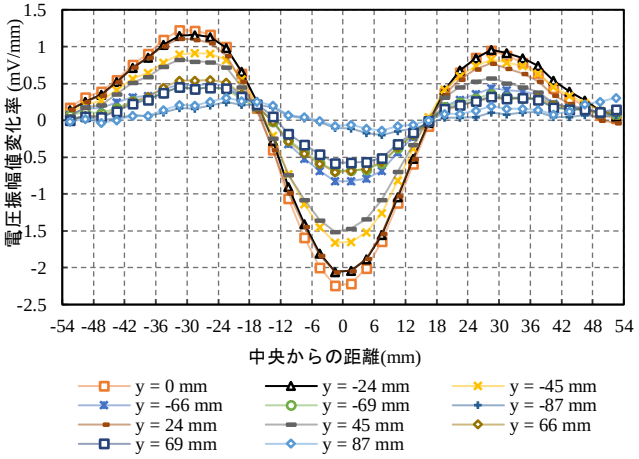



図-8.3.6　二次元走査計測の電圧振幅値変化率の変化

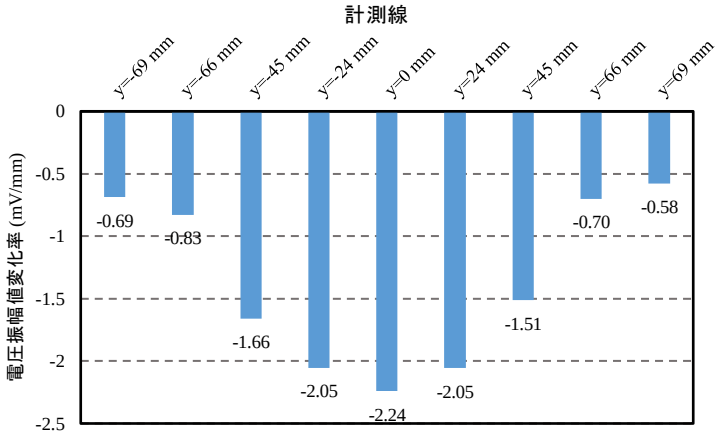



図-8.3.7　二次元走査計測の電圧振幅値変化率の負ピーク値

さらに，計測で得られた各計測点の電圧振幅値変化率を試験体の対応する位置にプロットした。**図-8.3.8** により，電圧振幅値変化率が下向きに凹となっている青い領域は，断面欠陥（黒い領域）の位置と良い対応していることがわかった。また，色相の変化で断面欠損の存在，および位置が視認性高く表現されていることがわかった。**図-8.3.9** に電圧振幅値変化率の 3D イメージング結果を示す。図より，断面欠損が存在する位置（x = 0 mm）に対応している凹部と両側の凸が明らかに観察できるため，電圧振幅値変化率の実験結果に基づき，コンクリートかぶりを模擬したリフトオフ距離 30 mm から鋼板表面の断面欠損の存在と分布を直感的に可視化することが可能であることが確認された [1)]。

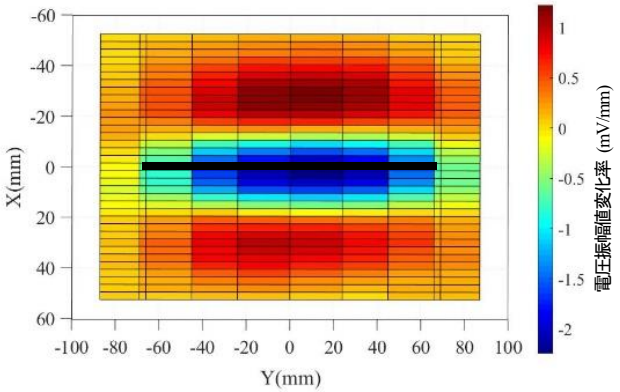



図-8.3.8　電圧振幅値変化率のマッピング

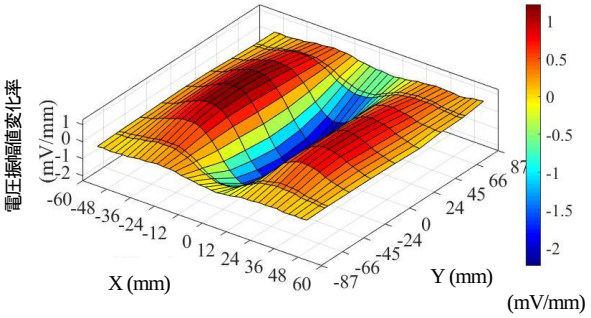



図-8.3.9　電圧振幅値変化率の 3D イメージング

## 8.4 動磁場応答の位相差に着目した断面欠損の可視化評価

### 8.4.1 位相差に関する実験結果

本節では，GMR センサの位相差の結果の可視化を検討する。図-8.4.1 に 11 測線の走査計測の電圧振幅値変化率の結果を示す。図より，断面欠損が存在する位置を計測した y = 0 mm，y = ±24 mm，y = ±45 mm，y = ±66 mm，y = ±69 mm の場合の位相差は S 字形状を示すことが確認された。y = ±87 mm の場合，断面欠損の端部から 19.5 mm までの健全の位置で計測した位相差の結果はほぼ直接的な形状を示し，健全鋼板の実験結果と同じ傾向が確認された。すべての位相差の結果では，計測開始の位置（x = -66 mm）の 0 度から変化し，異なる測線では，それぞれ異なる傾斜の変化を示している。しかし，位相差の結果からは断面欠損の位置を評価することが難しいと考えられた[2)]。

次に，計測で得られた各計測点の位相差を試験体の対応する位置にプロットした（図-8.4.2）。図より，位相差が負となる濃い青い領域とプラスとなる淡青色の領域の間は，断面欠陥（黒い領域）の位置に対応しているが，赤い領域の範囲が広いため，図-8.4.2 で断面欠損の位置を識別することは困難であった。図-8.4.3 に位相差の 3D イメージング結果を示す。図より，位相差の実験結果による計測方法では，リフトオフ距離 30 mm から鋼板表面の断面欠損の位置を可視化することができないことがわかった[2)]。しかし，この位相差の 3D イメージングの結果と電圧振幅値の 3D イメージ

ングの正負ピークがほぼ断面欠損に対称である結果を比べて見ると，位相差の結果は，現他の要因にも影響された可能性があることが考えられる。

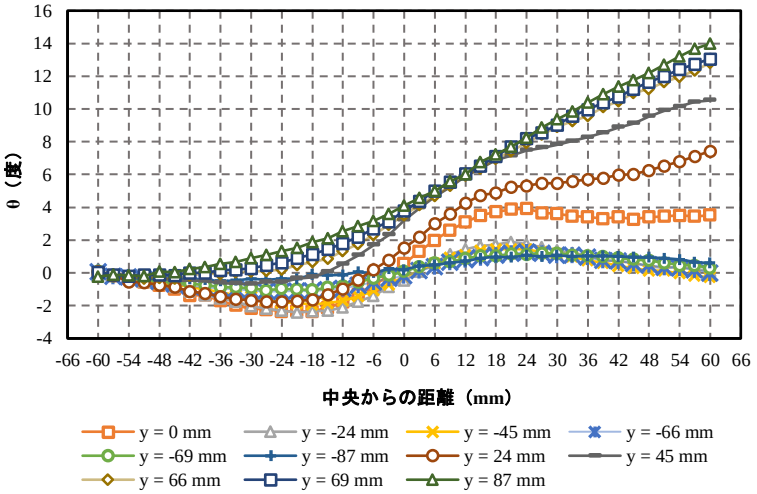



図-8.4.1　二次元走査計測の位相差変化

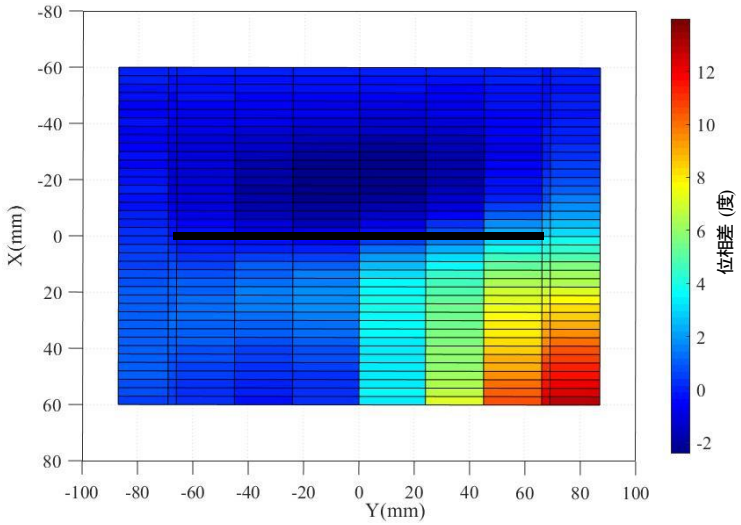



図-8.4.2　位相差のマッピング

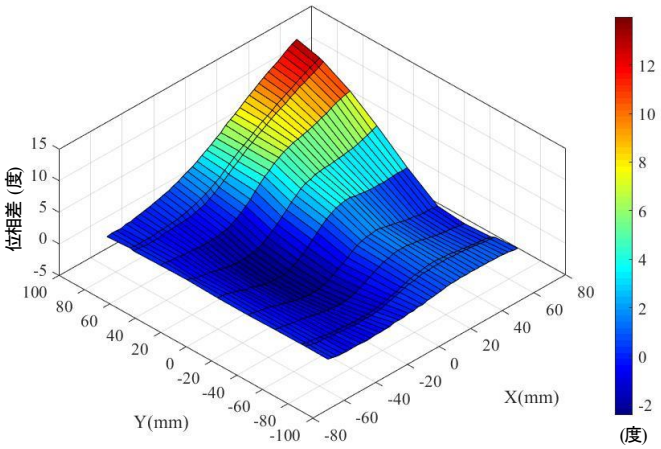



図-8.4.3　位相差の 3D イメージング

### 8.4.2 位相差変化率に関する実験結果

位相差の可視化では断面欠損の位置の評価が難しいと考えられたが，各測線の位相差の結果は S 字形状であるため，位相差の変化率で可視化を行うこととした。**図-8.4.4** に 11 測線の走査計測の位相差変化率の結果をまとめて示す。

図により，y = 0 mm，y = ±24 mm，y = ±45 mm，y = -66 mm，y = -69 mm の場合の位相差変化率の結果は断面欠損の位置（x = 0 mm）でピークが現れることを確認した。y = -87 mm の場合，断面欠損の端部から 19.5 mm までの健全の位置で計測した電圧振幅値変化率の結果はほぼ直接的な形状を示し，健全の鋼板の実験結果と同じ傾向を示すことを確認した。しかし，y = 66 mm，y = 69 mm と y = 87 mm の位相差の結果は x = 60 mm に近づいていくと他の結果より大きくなるため，位相差変化率の結果も x = -52.5 mm～52.5 mm で増大する傾向を示した。この結果は，電圧振幅値変化率の結果よりはピーク位置が不明確であるが，全測線の結果を見ると，断面欠損が x = 0 mm の位置にあることが評価できる [2)]。

次に，11 測線の電圧振幅値変化率の負のピーク値を**図-8.4.5** に示す。図より，断面欠損の中央からの距離が遠くになるとともに，位相差変化率のピーク値が小さくなる傾向が確認された。しかし，電圧振幅値変化率の結果が示したような，断面欠損の中央から同じ距離の位相差変化率のピーク値がほぼ同じである傾向は示さなかった [2)]。

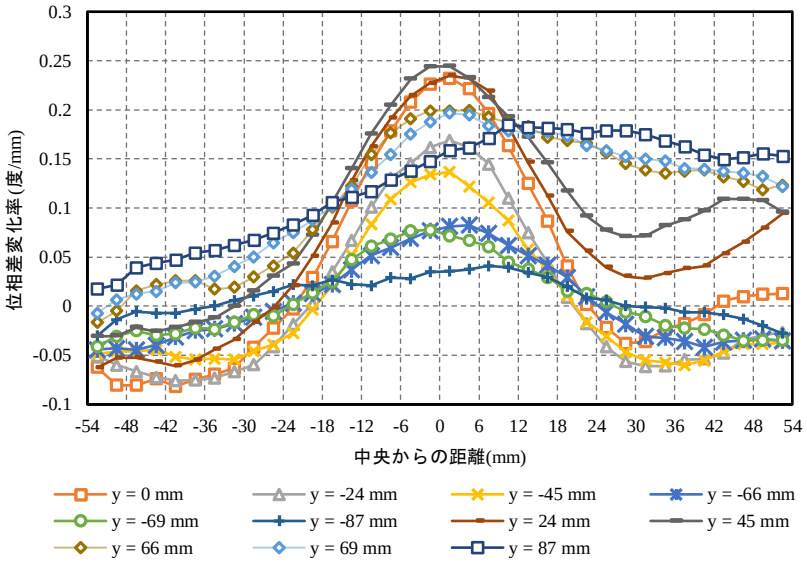



図-8.4.4　二次元走査計測の位相差変化率の変化

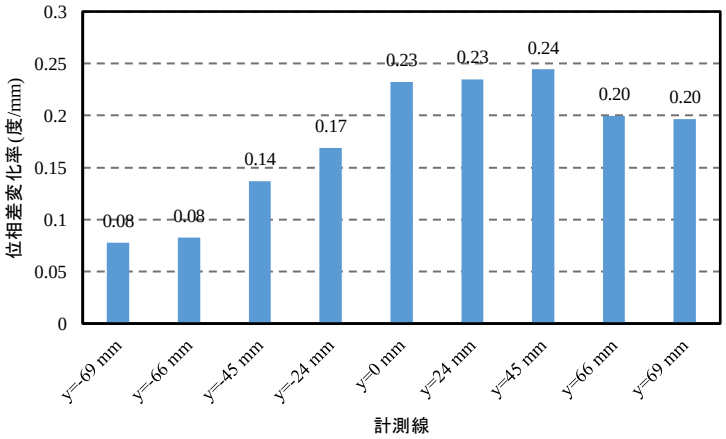



図-8.4.5　二次元走査計測の位相差変化率のピーク値

次に，計測で得られた各計測点の位相差変化率を試験体の対応する位置にプロットした（**図-8.4.6**）。図より，位相差変化率が凸になる赤い領域は，断面欠陥（黒い領域）の位置に良く対応していることがわかる。これより，色相の変化から断面欠損の存在，および位置が視認性高く表現されていることがわかった[2)]。**図-8.4.7** に電圧振幅値変化率の 3D イメージング結果を示す。図により，断面欠損が存在する位置（x = 0 mm）に対応している凸と両側の凹部が明らかに観察できるため，位相差変化率の実験結果を用いることで，リフトオフ距離 30 mm から鋼板表面の断面欠損の存在と分布を直感的に可視化することが可能であることが確認された[2)]。

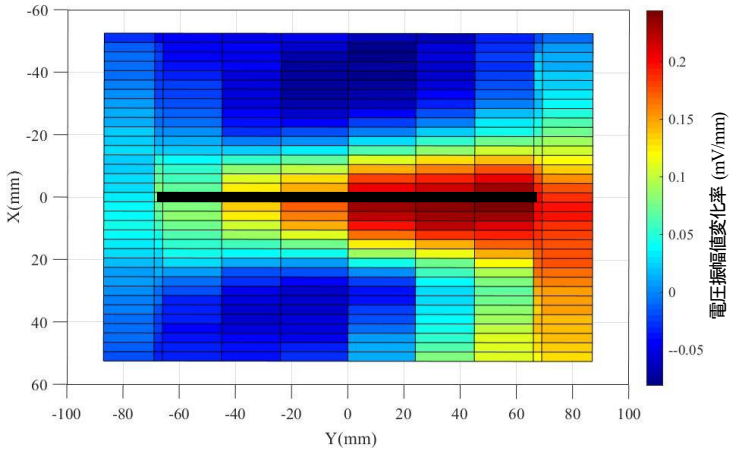



図-8.4.6　位相差変化率のマッピング

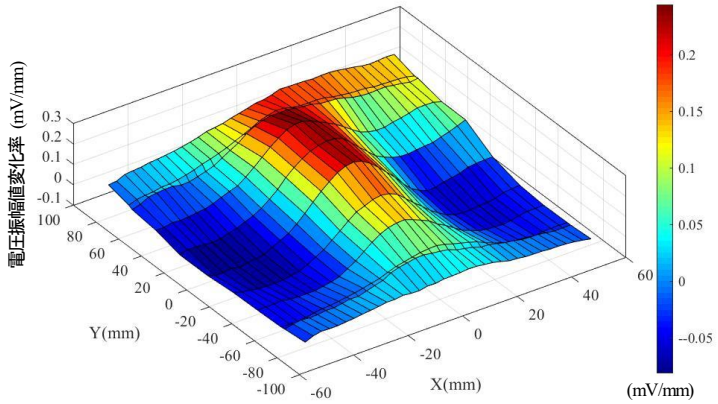



図-8.4.7　位相差変化率の 3D イメージング

## 8.5 まとめ

本章では，コンクリート中の鋼材腐食を可視化することを目的とし，GMR センサを用いた渦電流法を適用し，腐食損傷による断面欠損を模擬した鋼板を対象に走査計測を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) 試験体を走査計測した結果，電圧振幅値のマッピングと 3D イメージングは，鋼材の断面欠損の存在と分布の評価手段として有効であることが明らかになった。

(2) 電圧振幅値変化率のマッピングと 3D イメージングは，鋼材の断面欠損の分布を直感的に可視化することが可能であることが確認された。

(3) 位相差のマッピングと 3D イメージングでは，鋼板表面の断面欠損の位置が明瞭に視認できなかった。

(4) 位相差変化率のマッピングと 3D イメージングで鋼板表面の断面欠損の存在と分布を可視化可能であるが，電圧振幅値変化率の結果より分解能が低い結果となった。

## 参考文献


1) Shen, L., Hattori, S., Terasawa, K. and Kamada, T. : A Basic Study on GMR Sensor-Based Eddy Current Nondestructive Testing Method for Corrosion Detection in Concrete Structures, Journal of The Society of Materials Science, Japan, Vol.71, No.9, 2022.9.

2) 服部晋一，沈力，寺澤広基，鎌田敏郎：交流磁場の位相に着目したコンクリート中の鋼材腐食の非破壊評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44, No.1, pp.1258-1263, 2022.7.

# 第 9 章 結論

## 9.1 結論

本研究では，交流磁場と高感度磁気センサを用い，コンクリート中の鋼材腐食に伴い生成される腐食生成物，断面欠損における動磁場応答の変化に着目し，高感度かつ高精度に腐食状況を検出する非破壊評価手法を構築することを目的とした。渦電流法の原理に基づき，コンクリート中の鋼板と鋼棒表面の断面欠損と腐食生成物における動磁場応答により腐食状況の評価，可視化を行った結果，以下の結論を得た。本論文は 9 章から構成されており，各章で得られた結果を示す。

第1章は序論であり，本研究の背景，目的，論文の構成を述べた。

第2章では，コンクリート内部鋼材の腐食評価に関わる研究の経緯と現状を明らかにした。また，本研究で用いた渦電流法による金属損傷の非破壊評価方法の研究の現状を説明した。その後，コンクリート表面で内部鋼材の腐食状況を非破壊評価するために，以上の研究の現状を踏まえて，研究課題を明らかにした。

第3章では，渦電流の動磁場応答に基づいて本研究で適用する計測システムの原理を説明した。また，計測システムの構成について明らかにするとともに，基本的な実験条件を決定した。

第4章では，第3章で導入した計測方法を用いて，切削加工により断面欠損を模擬した供試体を対象に，コンクリートかぶりを想定したリフトオフ距離において計測した結果により，本研究の計測方法が鋼材表面の断面欠損の存在と位置を効果的に特定できることを明らかにした。また，得られた動磁界応答の電圧振幅値，電圧振幅値の変化率，位相差，位相差の変化率の結果を考察し，鋼材の断面欠損の形状変化が動的磁界応答に及ぼす影響を明らかにした。具体的には，断面欠損が存在する場合，断面欠損位置の近傍で電圧振幅値に正負ピークが現れ，断面欠損の存在，および位置が評価できることを明らかにした。

第5章では，第4章で行った実験で用いたパラメータに基づいて，解析モデルを作成し，有限要素解析を行った。 磁束密度の最大振幅値と位相差の解析結果をそれぞれ実験結果と比較し，断面欠損の検出メカニズムを解明した。具体的には，断面欠損が存在する場合，健全の場合と異なり，解析結果の磁束密度振幅値のピークが表れ，ピーク位置と実験結果が同じ傾向を示すことを確認した。

第6章では，コンクリート中の鋼材腐食に伴う腐食生成物が，本研究の動磁場応答に与える影響について考察した。 鋼板表面を電食させ，腐食生成物残留又は除去の状況で分けて計測したところ，本研究の計測方法は腐食生成物の有無を評価するのに有効であることがわかった．また，有限要素解析で腐食性生物の検出メカニズムを明らかにした。

第7章では，本研究の計測方法の適用範囲を広げるため，鋼棒表面に切削加工を施し，腐食損傷を模擬した断面欠損の評価を実施した。その結果，本計測方法が鋼棒表面の断面欠損の存在と位置の評価にも有効であり，鋼棒表面に断面欠損が存在する場合，断面欠損の位置の近傍に正負のピークが現れ，電圧振幅値の変化により断面欠損の存在，および位置の評価ができることがわかった。

第8章では，第4章の試験体を二次元的に走査して，得られた電圧振幅値と位相差，およびその変化率に基づき腐食損傷部の可視化を行った。その結果，鋼材の局所的な腐食損傷をイメージングして断面欠損の存在，位置又は範囲を評価することが可能であることが示された。

## 9.2 今後の検討課題

本研究における今後の検討課題は以下があげられる。

(1) 異なる条件の腐食生成物が動磁場応答に与える影響に関する検討

本研究では第6章で腐食生成物が動磁場応答に与える影響を検討したが，鋼板や棒鋼の表面にある断面欠損の形状変化が動磁場応答に与える影響について主として考察しており，諸条件下における腐食生成物の影響についてはさらに検討を加える必要がある。黒錆の$Fe_3O_4$が測定結果に影響を与えることが明らかであることから，腐食の程度（腐食量の変化）で腐食生成物の組成が異なる条件に対応した試験結果を補完すれば，本研究の計測方法による検出精度をより改善することができると考えられる。

(2) リフトオフ距離の増大に関する検討

本研究では比較的浅いかぶりを想定しリフトオフ距離30 mmでの検討を行ったが，実構造物では，かぶりの厚さが30 mmを超える場合もあり，本計測方法の有効リフトオフ距離をさらに大きくする必要があると考えられる。本研究で導入したGMRセンサは，かぶり30㎜を想定した本実験条件下ではセンサの測定範囲にまだ余裕があるため，理論的には，励磁コイルの交流電圧を高くすることにより磁場強度を上げ，より大きな渦電流とそれに伴う二次的な磁場を励起して，測定可能なリフトオフ距離を増大することが可能であると考えられる。しかしながら，電圧増幅器により電圧を大きくすると検出信号のS/N比が低下し，良好な結果が得られなかった。これより，リフトオフ距離を増大することは可能であるが，信号の安定性に関わる問題を解決する必要があると考えられる。このため，適用周波数の変更とともに，励磁コイルの形状，サイズ，磁気センサの感度向上，設置位置や設置数などによりS/N比が向上する条件を検討し，有効リフトオフ距離を増大する研究が今後も継続して必要と考えられる。

(3) 鋼棒又は鉄筋に対する評価性能の改善に関する検討

本研究では，鋼板の腐食損傷について検討し，電圧振幅値や位相差を指標として腐食の位置と範囲を評価できることを明らかにした。しかしながら，鋼棒の腐食損傷の評価に関しては，対象が小さく形状が曲面のため，本研究の実験条件においては，検出される磁場変化も鋼板の場合より小さくなり，位相差では評価できないことが判明した。一方，第5章の

位相差に関する有限要素解析の検討により，センサ位置を中心から偏心させると（例えば解析と同じく1 mm偏心），断面欠損がある場合，位相差により断面欠損の位置を評価でき，断面欠損の形状変化に対応して解析結果も変化することを確認した。したがって，今後センサの設置位置を調整することで，位相差の変化から腐食損傷の有無，腐食損傷の位置を評価できる条件を明確にすることが可能であると考えている。またこれに加えて，励磁コイルの励磁条件や，磁気センサの高感度化の改善についても検討することで，検出精度の向上を図ることが可能と考えられる。

# 謝辞

本研究は，大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻に入学した後，後期博士課程の学生として社会基盤設計学領域で 3 年間行った研究をまとめたものです。この間，多くの方々にお世話になり，ご指導をいただいたことに感謝申し上げます。

筆者の指導教員の教授鎌田敏郎先生には，3 年前に大阪大学の博士後期課程の学生として受け入れていただき，非破壊検査の分野で研究・勉強する機会を与えていただき，私の人生の転機となりました。ここに心より感謝申し上げます。この分野で新人の私は，鎌田先生から多くの関連書籍や資料をいただき，また学会やセミナーに参加する機会に恵まれ，インフラの維持管理に対する理解と知識を深めることができました。また，鎌田先生には，研究や発表について親身になって指導・激励していただき，研究の方向性を明確にするための多くのインスピレーションをいただきました。また，就職活動においても，個人的に面接練習を手伝っていただき，貴重な経験を積むことができ，おかげで良い就職先に就くことができました。鎌田先生のご指導のもとで勉強・研究した 3 年間は，とても充実しており，鎌田先生との交流から多くのことを学び，私自身も大きく成長することができました。心より感謝申し上げます。

大阪大学大学院教授乾徹先生や本研究室的准教授堤成一郎先生には，本学位論文の審査を快く引き受けていただき，貴重なコメントとご指摘をいただきました。心より感謝申し上げます。

本研究室の助教寺澤広基先生には，漏洩磁束法についての知識を教えていただき，研究室ゼミの時私の研究に対して多くの貴重なコメントとご指摘をいただきました。また，面白い漫画をお勧めいただき，素晴らしいストーリーに没頭でき，実に楽しかったです。心より感謝申し上げます。

本研究室の特別研究員服部晋一氏には，電磁気学についての知識をとても丁寧に教えていただき，おすすめの本を紹介いただき，いち早く研究を開始することができました。実験装置の使い方や電子回路の設計で困ったときは，氏に相談することで考え方が広がり，解決策を見出すことができました。また，氏には，発表のスライドや発表論文の日本語をいつも親切に教えていただいたので，自分が修正する過程で実用的な表現をたくさん学び，少しずつ日本語が上達しました。時々，氏からおいしいお菓子をいただき，夕方には一緒に糖分を補給し，楽しかったです。 色々なことを教えていただき，心より感謝申し上げます。

特任教授の永山勝先生には，腐食に関する知識を講義いただき，また，私自身の腐食実験を実施する際には，実験方針について数回のご相談の機会をいただき，貴重な助言をいただきました。深くお礼申し上げます。

本研究室の招聘研究員稲熊唯史氏，先輩の市川滋己氏，鈴木真氏，山下健太郎氏には，素晴らしい研究成果を披露していただくと同時に，現場での経験に基づいたさまざまな視点からの貴重なコメントやアドバイスもいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究室の元秘書横山里美氏には，RA の申請，出張申請等の手続きに丁寧に御対応頂き，深くお礼申し上げます。

一緒に研究室に入った卒業生の梅谷晃大氏，岡本匠平氏，樫山直生氏，南浦七海氏，加藤梨花氏，中尾優文氏，福本晃太氏には，日本に来たばかりで日本語がとても下手だった私にも嫌がらずに話しかけていただき，すぐに研究室に溶け込むことができました。 特に梅谷晃大氏，樫山直生氏，後

輩の江藤慶太氏には，嫌な顔ひとつせず数回のコンクリート供試体の打設を手伝っていただきました。深くお礼申し上げます。

本研究室の卒業生の蒋臣俊氏，葉栗氏，後輩の王斌傑氏には，日常一緒に鯨屋で昼食をとったり，時には一緒に外食や旅行をすることで，私の研究生活に色を添えていただきました。また，解析ソフトを始めて勉強した時には，色々と親切に教えていただきました。特に王斌傑氏とのディスカッションではいいアイデアをいただき，解析の改善も達成でき，勉強になりました。深くお礼申し上げます。

後輩である木村太郎氏，小間健右氏，湯川裕太氏，田中勇気氏，木原祥哉氏，滝井麻衣氏，本田圭佑氏，山本志緒莉氏，鶴田葵氏には，普段より楽しく気さくに話しかけてくださり，過ごしやすい雰囲気を作っていただきました。厚く御礼申し上げます。

上記以外にも本研究および研究生活の中で関わって下さりました全ての方々へ心から厚くお礼申し上げます。

最後に，仕事を辞めて留学する私を支え，理解してくれた家族や友人に感謝いたします。 特に，日本で就職するという大変なプレッシャーを受けて，半年で日本語学校を卒業し，大企業のイラストレーターへの応募に成功したなど，3 年半の留学生活を支え，伴走してくれた嫁の周云婷氏に心より感謝いたします。

大阪大学大学院　工学研究科
地球総合工学専攻
社会基盤工学コース
社会基盤設計学領域
沈力