

# 論文 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

熊 英<sup>\*1</sup>・北垣 亮馬<sup>\*2</sup>・野口 貴文<sup>\*3</sup>

**要旨：**渦電流を利用した電磁誘導法非破壊試験手法は、コンクリート中の鉄筋や金属配管などさまざまな金属探査・腐食・探傷試験に利用されているが、出力結果である誘導起電力の振幅、位相、及び周波数は、測定対象の電磁気物性に大きく依存することが知られている。コンクリート中の鉄筋探査においては、鉄筋の電磁気物性が均一であることを前提に評価手法が構築されており、腐食鉄筋のように電磁気物性が不均一になった場合には結果にばらつきが生じやすいことが指摘されている。本研究は、誘導起電力の変動因子として考えられる腐食生成物の電磁気物性の違いに着目し、鉄筋表面の腐食生成物の深さ方向ごとの比透磁率を測定し、これを用いた三次元電磁場解析と、モルタル中鉄筋に対する電磁誘導渦電流測定を行い、腐食生成物が誘導起電力の振幅、位相に及ぼす影響を検証した。

**キーワード：**渦電流, 腐食生成物, 比透磁率, 3次元電磁場解析

## 1. はじめに

コンクリート構造物を長く良好な状態に維持保全するには竣工後の定期的な調査・診断結果に基づく適切な修繕・補修が必要である。特に内部の鉄筋が腐食することでコンクリートのひび割れや剥落を生じるほか、鉄筋断面の欠損による構造物の耐力低下を招く恐れがあることから、簡便な非破壊の手法によって、内部鉄筋の状態を把握できることが望まれている。

一般に、渦電流を利用した電磁誘導法非破壊試験は、様々な金属探査・腐食・探傷に利用されており、コンクリート構造物においても、比較的簡便に非破壊でかぶり厚さを診断できることから、JASS 5においても定められている<sup>1)</sup>。しかし、鉄筋表面に発生する渦電流に関する電磁気学的なメカニズムが明らかにされていないため、この手法では、鉄筋の電磁気物性が均一であることを前提に、事前に図面などから得られる情報にもとづいて実際の鉄筋位置やかぶり厚さを評価するものとなっている。また、腐食鉄筋のように電磁気物性が不均一になった場合には、結果にばらつきが生じやすいため、その他の手法と組み合わせて診断する必要がある。

そこで、本研究は、誘導起電力の主たる変動因子である腐食生成物の比透磁率の違いに着目し、鉄筋表面の腐食生成物の深さ方向ごとの比透磁率を測定し、これを用いた三次元電磁場解析と、モルタル中にある鉄筋に対する電磁誘導渦電流測定の結果と比較し、腐食生成物が電磁誘導式非破壊試験で得られる誘導起電力の振幅、位相に及ぼす影響を検証した。

## 2. 実験 1—モルタル中の腐食鉄筋測定

### 2.1 測定機器及び試験体

モルタル中の鉄筋腐食状態を電磁誘導法によって推定するに当たり、利用した測定装置と試験体について説明する。

#### (1) 測定機器

測定機器として電磁誘導式金属探傷試験システム(図-1)を用いた。

使用したシステムでは、検知用センサプローブに、磁場出力コイルと検知用コイルの2種類のコイルが内蔵されている。まず、磁場出力コイルに交流電流を通電し1次磁界を発生させ試料に渦電流を発生させる。この渦電流から発生する2次磁界によって変化したセンサと試料間の磁界を、検知用コイルによって、交流電流の振幅及び位相の変化として測定し、同時に、基準用センサプローブで空気を測定し大気中に形成される様々な電磁場による検知用センサプローブへのノイズを低減することで試験体への測定によって得られた振幅及び位相変化のみを取り出すことができるようになっている。

#### (2) 鉄筋モルタル試験体

本実験では、コンクリートの代わりに W/C=30%、セメント:細骨材重量比=1:2のモルタルを使用し、電磁誘導法による鉄筋探査ではかぶり厚が大きくなると誘導起電力の振幅は小さくなることから本研究ではかぶり厚距離による誘導起電力の変化を極力排除するため中央部に鉄筋が貫通する孔を設け、同一のモルタル試験体に腐食程度の異なる鉄筋を挿入するようにした。なお、鉄

\*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻博士課程 工修 (学生会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻講師 工博 (正会員)

\*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻准教授 工博 (正会員)

筋とモルタル試験体の孔との間に生じる隙間には電磁気学上僅かな空気が存在するだけであり、測定に影響をほとんど及ぼさないと考える。また、鉄筋の腐食に伴い腐食生成物の一部が錆汁として鉄筋から周囲に遊離することが考えられ、錆汁が誘導起電力に及ぼす影響を把握するため、孔周りに三酸化二鉄（べんがら）をセメントペーストに 500mg 添加した厚さ 3mm の層を設けたものとそうでないものの 2 種類を一体ずつ作製した。なお、べんがら層はモルタル試験体作製の際、アルミパイプで孔周りに 3mm の隙間を設け、そこへべんがらを添加したセメントペーストを打設して成形した。モルタル試験体の形状を図-2 に、腐食鉄筋の水準を表-1 に示す。なお、腐食鉄筋はモルタル中で電触させたものを用い、腐食率は式 (1) による腐食量を基に算出した断面欠損率とした。

$$m = \frac{M \cdot i \cdot t}{z \cdot F} \quad (1)$$

m : 腐食量, M : 原子量 (鉄 55.8)

I : 電流量 (A)

t : 時間 (s)

z : 電荷数 (鉄 2)

F : ファラデー定数 (96500)

## 2.2 測定条件

測定には、図-3 に示すように、磁場出力コイルが 100 巻き、検知コイルが 400 巻きの構成をした検知用センサープローブを使用した。検知用プローブ直径と鉄筋の中心線が重なるようモルタル上に設置し、基準用プローブは検知用プローブから 1メートル離れた位置に設置し鉄製の網籠を被せた。センサープローブへの出力電圧を 600mV、印加周波数を 300Hz~10kHz とし、25°C の室内で検知プローブの誘導起電力をデジタルオシロスコープで計測し、得られた波形から誘導起電力の振幅及び空気に対する位相遅れを求めた。図-4 に誘導起電力の振幅及び位相遅れを例示する。試験水準は表-1 の腐食鉄筋をモルタル及び酸化鉄層付きモルタルに挿入した状態と鉄筋を挿入しない状態の計 14 水準とした。

## 2.3 測定結果

### (1) 酸化鉄層なしモルタル試験体

図-5、図-6 に腐食鉄筋をモルタル試験体に挿入して測定された誘導起電力の振幅及び位相を示す。

全周波数に渡って腐食率による振幅値に大きな差は見られない。一方、位相遅れは全腐食率において 2kHz にピーク値が現れている。2kHz 以降は全腐食率で位相遅れが減少しており、黒皮付き鉄筋と腐食率 0% の鉄筋、腐食率 2.23% と 6.40% の鉄筋、腐食率 4.45% と 8.20% の鉄筋がそれぞれ近い値を示した。

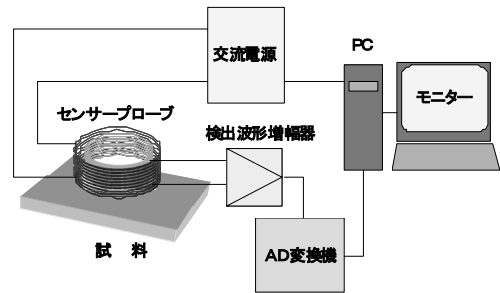


図-1 電磁誘導式金属探傷試験システム

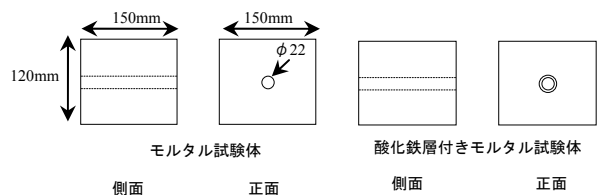


図-2 モルタル及び酸化鉄層付きモルタル試験

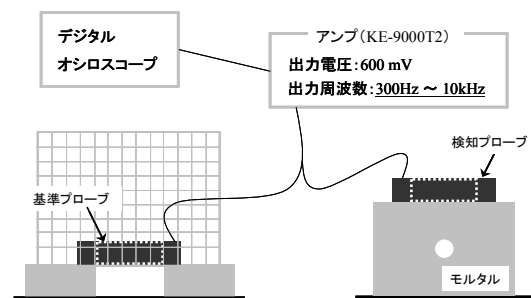


図-3 測定概要

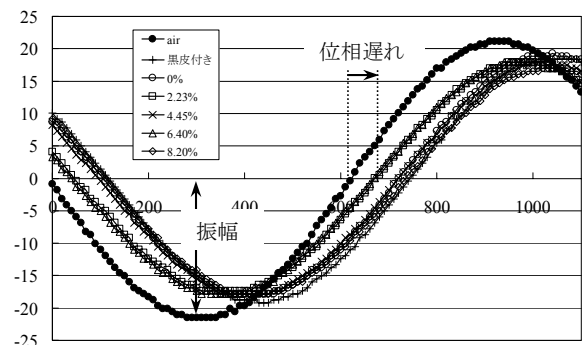


図-4 誘導起電力の振幅及び位相遅れ

表-1 鉄筋の腐食程度

No.	鉄筋表面状態	腐食率 (%)
空気		Air
0	黒皮付き	
1	黒皮無し	0%
2		2.23%
3		4.50%
4		6.40%
5		8.20%

(2) 酸化鉄層付きモルタル試験体

図-7, 図-8に腐食鉄筋を酸化鉄層付きモルタル試験体に挿入して測定された誘導起電力の振幅及び位相を示す。モルタル試験体と同様、全周波数に渡って腐食率による振幅値に大きな差は見られず、位相遅れは全腐食率において2kHzにピーク値が現れている。2kHz以降は全腐食率で位相遅れが減少しており、腐食率6.40%鉄筋の位相遅れの減少が最も大きい。

2.4 測定結果の考察・誘導起電力と腐食鉄筋の関係

電磁誘導法非破壊検査装置の一つである渦電流磁気センサシステムによりモルタル試験体及び酸化鉄層付きモルタル試験体内の腐食鉄筋に対して測定を行った結果、誘導起電力の振幅と腐食に大きな関連性は見られなかったが、位相遅れと腐食率にある程度の関連性があることが伺えた。一般に、電磁誘導によって発生する交流渦電流は式(2)で表現される<sup>2)</sup>。

また、コンクリートと鉄およびその腐食生成物の固有電気伝導率、磁化率の文献値(表-2)によると、コンクリートは磁化されないのに対し、鉄や腐食生成物は有意な磁化率と固有電気伝導率を持つ。JASS5に規定される鉄筋探手法では、誘導起電力の振幅の差異による鉄筋の有無を区別することができるが、本実験結果では、振幅と比べて位相遅れでの変化が大きく、渦電流による腐食検出にはより詳細な検討によって誘導起電力の振幅と位

$$J_x = J_0 \cdot e^{(-\sqrt{\pi\mu\sigma} \cdot x)} \tag{2}$$

ただし、 $J_x$  : 導体表面から距離  $x$  での渦電流密度

$J_0$  : 導体表面での渦電流密度

$x$  : 導体表面からの距離

$\mu$  : 導体の透磁率

$\sigma$  : 導体の導電率

$f$  : 交流磁界の周波数

相遅れの変化を整理する必要があると考える。

3. 実験2—鉄筋腐食生成物の磁気物性の把握

次に、鉄筋は腐食環境によって腐食生成物が異なることが報告されており<sup>5), 6)</sup>、渦電流を用いて鉄筋の腐食状態を推定するには、鉄筋腐食生成物の電磁気物性を把握する必要がある。実験2では腐食生成物の電磁気物性の内、磁気特性が渦電流に及ぼす影響を把握するため、腐食生成物の透磁率を算定するために必要な磁化率の測定を行った。3.1に概要を示す。

3.1 試料

φ20の丸鋼を厚さ2mmのディスク状に切り出した後、50mm角・厚さ1.5mmのアクリル板で挟んだ空間に水セメント比30%のセメントペーストを充填した(図-9)。

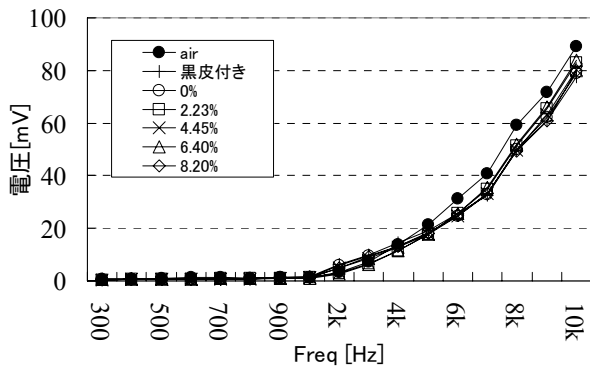


図-5 モルタル腐食鉄筋の誘導起電力・振幅

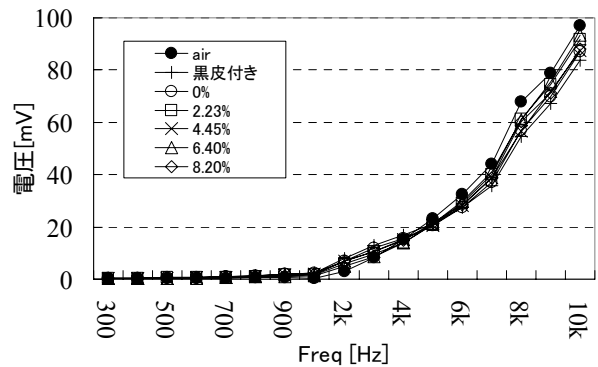


図-7 酸化鉄層モルタル腐食鉄筋の誘導起電力・振幅

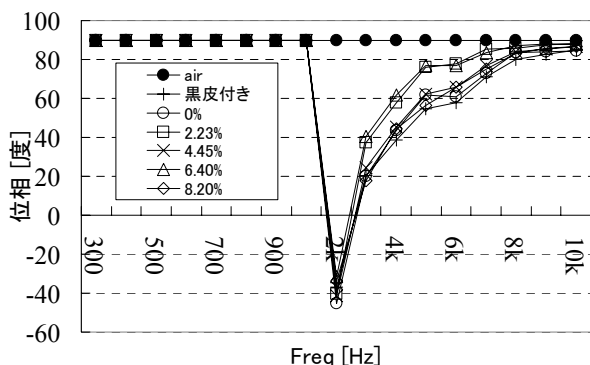


図-6 モルタル腐食鉄筋の誘導起電力・位相

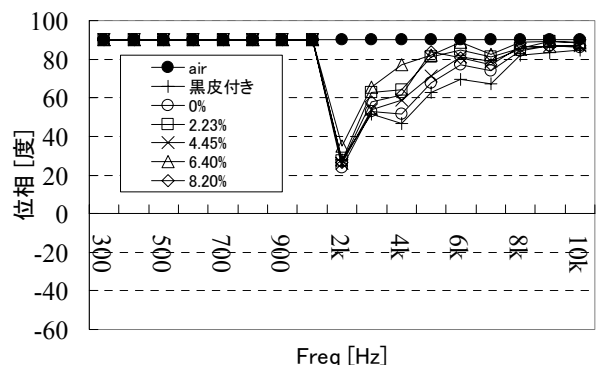


図-8 酸化鉄層モルタル腐食鉄筋の誘導起電力・位相

式 (1) より鉄筋断面の 3.0%が欠損する腐食量となる時間まで定電流発生装置により腐食電流を通電した後、鉄筋とセメントペーストに分離してから鉄筋を粘着テープ上で1回転させ、腐食生成物が採取できるまで最外側から順次採取した。また、下地鉄筋に近い部分はピンセットで削り取って試料とした(表-3)。なお、粘着テープによる試料は磁化測定装置が検知できる分量が確保できた3回転目までのものを測定した。

### 3.2 測定

測定には、SQUID 磁化測定装置を使用した。強度 100[Oe] (≒ 7958 [A/m]) の直流磁場にて、また、温度 120[K]から 320[K]までの磁化量を測定し、試料重量で割って磁化率とした。

### 3.3 測定結果

図-10 に測定結果を示す。低温ほど磁化率が大きくなった。また、全温度に渡り最外腐食部 (K4-1)、下地鉄筋近傍 (K4-6 以降)、2 スクロール目 (K4-2)、3 スクロール目 (K4-3) の順に磁化率が大きく、鉄筋の腐食生成物の磁気特性が不均一に分布していることが確認された。

### 3.4 測定結果の考察

腐食鉄筋から腐食生成物を採取して磁化率を測定した結果、腐食生成物の磁気物性が場所によって不均一であることが確認された。ここで、磁化率と透磁率の間には式 (2) の関係<sup>9)</sup>がある。

$$\mu = (1 + \chi)\mu_0 \quad (2)$$

ただし、 $\mu$  : 物質の透磁率  
 $\chi$  : 物質の磁化率  
 $\mu_0$  : 真空の透磁率

試料の採取位置を考えると、既往の研究<sup>7),10)</sup>において指摘されるコンクリート中の鉄筋腐食生成物と同様、本研究においても鉄筋の腐食生成物が位置や条件によって異なる電磁気物性をもって分布している可能性が考えられる。また、測定データの磁化率が、表-2 の文献値における磁化率のとりうる範囲に収まることから、概ね妥当な結果であると考えられ、今後はより精密に腐食生成物層の厚さを考慮した試料採取を行う必要がある。

## 4. 三次元電磁場解析

鉄筋周辺の腐食生成物の磁化率のばらつきが、電磁誘導法の非破壊試験結果に及ぼす影響を検証するために、三次元電磁場解析ソフトを用いて、表-2 の文献値及び実験 2 で作製された試験体の一部分を簡易に模擬し、得られる誘導起電力の振幅と位相について検証を行った。解析で用いた試験体とセンサプローブの 3 次元データを図-11 に示す。

表-2 腐食生成物の電磁気物性値 (文献値)

化合物	鉱物名	磁化率 <sup>3)</sup> (emu/mg)	固有電気伝導度 (ohm <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )
コンクリート			1.7×10 <sup>-5</sup> ~1.4×10 <sup>-3</sup> <sup>7)</sup>
鉄		0.22	5×10 <sup>6</sup> <sup>8)</sup>
α-FeOOH	ゲーサイト	6.61×10 <sup>-8</sup>	4×10 <sup>-7</sup> <sup>4)</sup>
β-FeOOH	アカガナイト	4.61×10 <sup>-8</sup>	5×10 <sup>-7</sup> <sup>4)</sup>
γ-FeOOH	レピドロサイト	4.36×10 <sup>-8</sup>	6×10 <sup>-7</sup> <sup>4)</sup>
α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ヘマタイト	1.34×10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-8</sup> 程度 <sup>5)</sup>
γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	マグヘマイト	1.11×10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-6</sup> 程度 <sup>5)</sup>
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	マグネタイト	2.44×10 <sup>-2</sup>	80 <sup>4)</sup>

表-3 磁化率測定試料

No.	採取位置	試料重量(mg)
K4-1	最外腐食部	1.0
K4-2	2 スクロール目	1.5
K4-3	3 スクロール目	1.2
K4-6 以降	下地鉄筋近傍	1.7

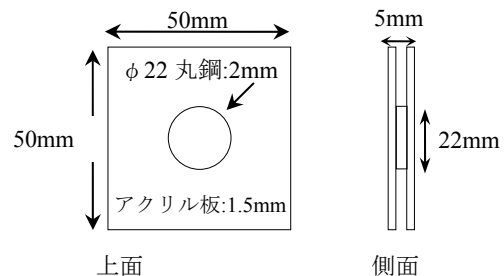


図-9 試験体の概要

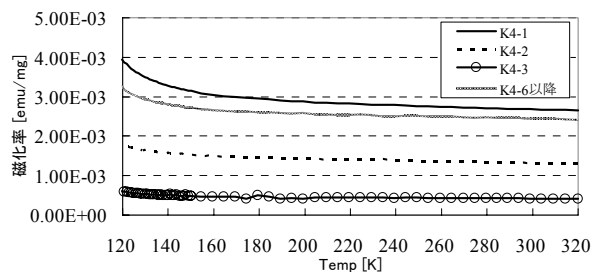


図-10 黒皮付き鉄筋の腐食生成物の磁化率

解析用鉄筋モデルは 6×12×8 のソリッドとし、センサプローブは 2.1 の(1)で述べた測定装置を模して、巻数 100 (巻)、電流量 100 (mA)、試験体とのリフトオフ距離を 1 とした。

### 4.1 文献値による解析及び結果

図-12 に解析モデルを示す。コンクリート中の鉄筋腐食生成物として既往の研究<sup>10)</sup>より α-FeOOH 及び Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の 2 種類とし、腐食生成物の構成比率が α-FeOOH:Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> = 10:0 及び 9:1 の場合に分けて解析を行った。解析周波数は 300Hz~10kHz とし、鉄筋及び腐食生成物の電磁気物性は表-2 の値を用いた。解析結果を図-14~17 に示す。なお、グラフ中の「その 0」は図-11 に示す腐食し

ていない鉄筋モデルの解析結果である。

$\alpha\text{-FeOOH} : \text{Fe}_3\text{O}_4 = 10 : 0$  の場合、腐食程度が進むほど誘導起電力の振幅が小さくなった (図-14)。一方、位相はその4が4kHz以降に減少しているが、腐食程度に差は見られない (図-15)。

$\alpha\text{-FeOOH} : \text{Fe}_3\text{O}_4 = 9 : 1$  の場合、腐食程度が大きいほど誘導起電力の振幅は大きくなり、その3、その4では腐食していない状態よりも大きな振幅値となった (図-16)。一方、位相は腐食程度が大きいほど、また、周波数が高いほど位相遅れが大きくなった (図-17)。

#### 4.2 実験2から得られた物性値による解析結果

図-13に解析モデルを示す。実験2での試料採取位置を基に、K4-1~K4-6以降の層を順次配置して腐食程度とし、腐食生成物の磁気特性は図-10から室温時の磁化率を、電気物性は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の値を0.1倍したものを用いた。図-18、図-19に解析結果を示す。腐食程度が大きいほど誘導起電力の振幅は大きくなり、その4では腐食していない状態よりも大きな振幅値となった (図-18)。一方、位相は腐食程度が大きいほど、また、周波数が高いほど位相遅れが大きくなった (図-19)。

#### 5. 結論

鉄筋腐食量の推定について誘導渦電流による実験及び三次元電磁場解析を行った結果、

(1) 実験1より腐食量が誘導起電力に及ぼす影響は振幅

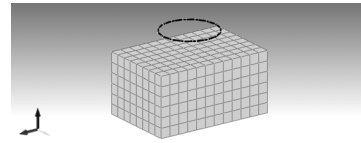


図-11 解析試験体及びセンサプローブの三次元データ

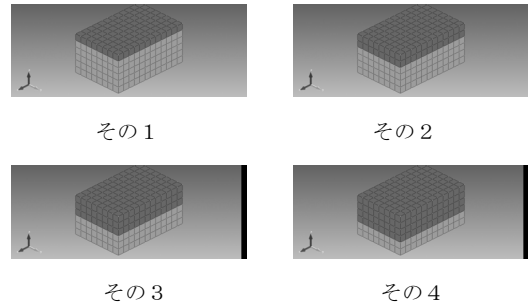


図-12 文献値による腐食鉄筋用解析モデル

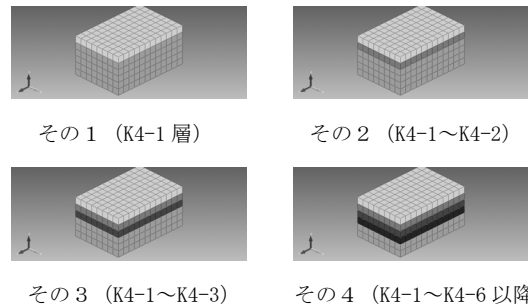


図-13 実験2に基づく腐食鉄筋モデル

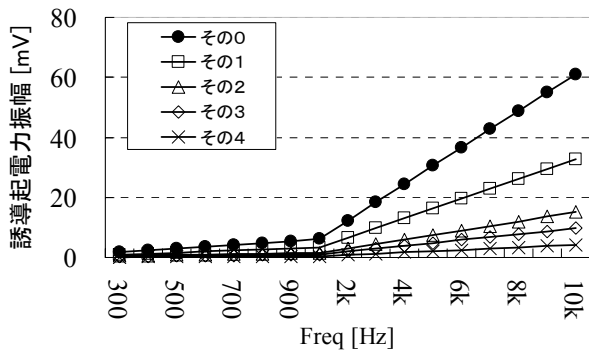


図-14  $\alpha\text{-FeOOH} : \text{Fe}_3\text{O}_4 = 10 : 0$  の誘導起電力・振幅

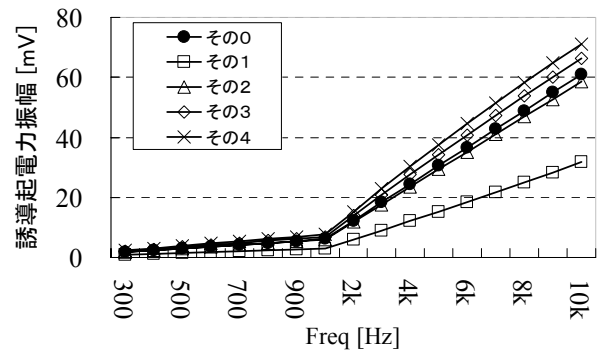


図-16  $\alpha\text{-FeOOH} : \text{Fe}_3\text{O}_4 = 9 : 1$  の誘導起電力・振幅

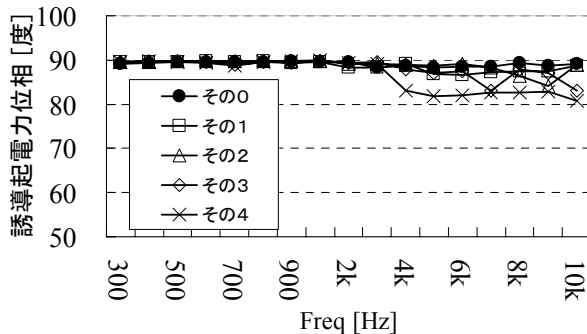


図-15  $\alpha\text{-FeOOH} : \text{Fe}_3\text{O}_4 = 10 : 0$  の誘導起電力・位相

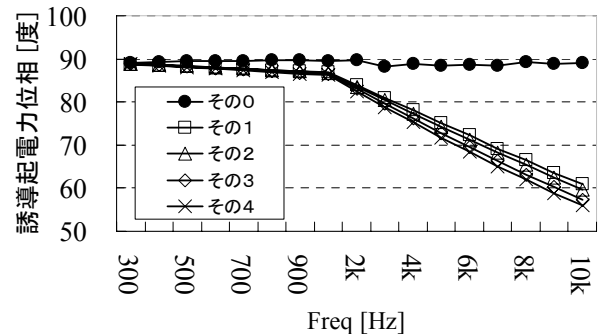


図-17  $\alpha\text{-FeOOH} : \text{Fe}_3\text{O}_4 = 9 : 1$  の誘導起電力・位相

で小さく、位相で大きく現れた。

- (2) 実験 2 より腐食が誘導起電力の振幅、位相に影響を及ぼす原因に、異なる磁気物性を持つ腐食生成物の分布が考えられる。
- (3) 文献値での解析において腐食生成物の種類で誘導起電力の挙動が異なる結果となった。
- (4) 実測値（実験 2）での解析において固有電気伝導率を文献値から援用したため正確な判断は出来ないが、電磁気物性が異なる 2 種類の腐食生成物で構成される場合、文献値による解析結果と同様の傾向が見られ、振幅における腐食程度の影響より位相における腐食程度の影響が大きくなる点で実試験体から得られた試験結果と類似する傾向を示している。

今後は精密な解析と腐食生成物の構成検討により、電磁誘導法において腐食程度、腐食量が評価できるための検討を行いたい。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、実験装置の試作にご協力を賜った偕成エンジニア社の皆様に、ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) JASS 5 T-608 : 2009 電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置の測定方法
- 2) 非破壊検査技術シリーズ 渦流探傷試験Ⅱ, 日本非破壊検査協会
- 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, 第 23 巻, 農学, 第 1 号
- 4) 井上勝成, 滝 洋一朗, 金子克美:  $\text{FeOOH} \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$  集合系の電気伝導性と高次構造, Boshoku Gijutu, 33, 446-453, 1984
- 5) 金子克美: 鉄酸化物の電気伝導性, 金属表面技術, Vol.37, No.2, 1986, p.46-54
- 6) 三澤俊平: 鉄鋼腐食科学の温故知新, Zairyo-to-Kankyo, 50, 538-545, 2001
- 7) 小林一輔, 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三: コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3 鉄筋腐食の診断, 森北出版株式会社
- 8) 小井戸純司: コンクリート中の鉄筋の電磁誘導式非破壊検査試験に用いる分割型マルチコイルの特性, 日本大学生産工学部研究報告 A, 第 41 巻, 第 1 号, 2008
- 9) 東京電気大学 編: 入門電磁気学, 東京電気大学出版局
- 10) 牛島栄, 鳥取誠一: 断面補修を施した塗装 RC 梁の塩水噴霧試験による防食効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, 1988, p.533-540

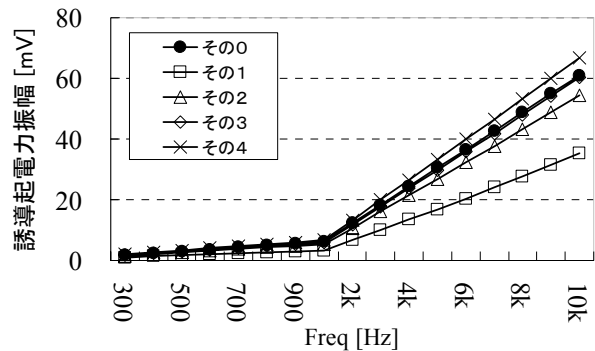


図-18 実験 2 に基づく誘導起電力・振幅

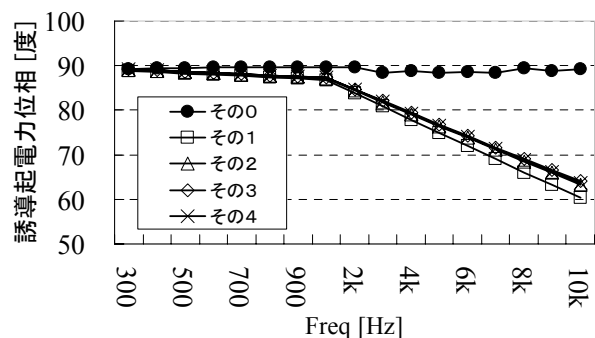


図-19 実験 2 に基づく誘導起電力・位相