

論文 コンクリート中鉄筋の交流測定における非線形応答電流の解析

橋本 永手*1・定本 真明*2・加藤 佳孝*3

要旨：電気化学インピーダンス法の解析に分極曲線を基にする電位-電流応答素子を組み込むことで、鉄筋の律速状態を測定結果から予測することができる可能性がある。この場合、測定系は非線形システムとなりインピーダンスは容易に定義できないことから、測定系を特徴づける解析原理が必要となる。本研究では、これらの解析原理の式展開を提案した。鉄筋を模したシミュレーション環境を構築し、提案した解析方法を適用したところ、応答電流のフーリエ係数が測定系の律速状態と関係する可能性が示された。また、モルタル試験体で上記解析を実施し、実測定でも本研究提案の解析が可能であることが示された。

キーワード：交流インピーダンス、高調波解析、鉄筋腐食、非破壊検査

1. はじめに

金属の腐食速度の測定方法のひとつに電気化学インピーダンス法がある。電気化学インピーダンス法は水溶液中の金属の表面状態を測定するために開発されたものであるが、コンクリートの細孔溶液を電解質水溶液とみなせば鉄筋の分極抵抗を測定する方法に応用できる¹⁻⁵⁾。筆者らも完全非破壊で鉄筋のインピーダンスを取得する電極セットアップを提案⁶⁾したり、現場での作業性を考慮したインピーダンス測定装置を開発したりするなど実用的な普及を目指して活動している。しかし、鉄筋の腐食状態の把握にインピーダンス測定を活用しようとする事例は、まだまだ少ないとの体感がある。その理由のひとつに、インピーダンスの測定結果の解析の難解さが挙げられる。特に測定系が電荷移動律速なのか、物質移動律速なのかによって解析の考え方は異なり、鉄筋の表面状態を予測し、フィッティングの回路を当てはめる必要があることは、特に解析難度を上げている。鉄筋の表面状態の測定を目的にしているにも関わらず、鉄筋の表面状態を予測して等価回路を設定しなければならないというのはジレンマである。それでも電気化学インピーダンス測定を活用しようという理由のひとつは、周波数スペクトルによって、各素子（コンクリート抵抗、電気二重層容量、分極抵抗など）をそれぞれ分離して算出可能な稀有な方法であるためと思われる。

鉄筋の表面状態を知る最も直接的な方法は分極曲線の測定である。分極曲線は、鉄筋の律速段階の状況も含めて表面状態を知ることができる。例えば、参考文献⁷⁾では電荷移動律速と物質移動律速の両方をまとめた分極曲線の式が示されている。この式では電荷移動律速の領域ではアノード方向の指数関数とカソード方向の指数関数の和で表され、物質移動律速の領域では電流密度が電

位に依存しない様子が表現されている。この例のように、分極曲線では鉄筋の表面状態を一般化した表現が可能であり、電気化学インピーダンスの回路素子の一部に分極曲線を組み込むことができれば両試験のメリットを引き出せる可能性がある。

電気化学インピーダンスに分極曲線を組み込むためには工夫が必要である。一般にインピーダンスを定義するためには線形性、因果性、時不変性を満たしていることが前提条件⁸⁾となるが、分極曲線は非線形素子であるため、一般的なインピーダンス解析とは異なる解析原理が必要となる⁹⁾。分極曲線を交流解析の回路素子に組み込んだ場合に、測定値と測定系の性質をどのように関連付ければよいかについては、測定行為の根本である制御工学の理屈に立ち返り検討する必要がある。そこで本研究では、制御工学の原理原則を出発点に、鉄筋の分極曲線を組み込んだ交流解析の原理を試案した。また、交流解析のシミュレーションを実施し、鉄筋の表面状態の変化が交流スペクトルに与える影響を検討した。また、モルタル試験体でもシミュレーションと同様の測定を実施した。

2. 分極量と応答電流の関係

測定系が「線形性」、「因果性」、「時不変性」を満たす事で2.1節に示す式展開が可能となり、測定系の性質をインピーダンスで表現できる。線形性を満たさない場合には、式展開が途中で止まり、インピーダンスが定義できなくなる。そのため、非線形性を持つ測定系はインピーダンスではなく応答電流を議論する必要がある。

2.1 線形性を満たす測定系でのインピーダンスの導出

一般的な電気化学インピーダンス法の測定系は、「線形性」、「因果性」、「時不変性」を満たす系であることを前

*1 東京理科大学 創域理工学部社会基盤工学科 講師 博士(工学) (正会員)

*2 クリアパルス株式会社 技術部

*3 東京理科大学 創域理工学部社会基盤工学科 教授 博士(工学) (正会員)

提に理論構築⁸⁾されている。ここでは、インピーダンスが測定系の性質に紐づけられたパラメータであることを説明する。ここで示す理論式は、分極曲線をインピーダンスに組み込むための理論を整理するために必要である。

印加電圧 $E(n)$ とシグナル電流 $I(n)$ が測定系の性質に関する関数 F で関連付けられているとする。ここに n は n 番目の測定サンプルであることを示す。 F が線形関数であるとは、 $E(n)$ と $I(n)$ が次の関係を満たすことを示す。

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n I(n) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n F[E(n)] = F \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n E(n) \right] \quad (1)$$

F が時不変であるとは、 $E(n)$ と $I(n)$ が次の関係を満たすことを示す。

$$I(n) = F[E(n)] \rightarrow I(n-k) = F[E(n-k)] \quad (2)$$

ここに、 k はある整数である。「線形性」、「時不変性」を満たす系である場合に、 F は上記二つの特性を満たす。今、 $E(n)$ をインパルス関数 $\delta(n)$ の線形結合で表せば次の通りである。

$$E(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} E(k)\delta(n-k) \quad (3)$$

ここに、インパルス関数 $\delta(n)$ は下記を満たす関数である。また、インパルス関数の F による写像をインパルス応答関数 $h(n)$ とする。

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, n = 0 \\ 0, n \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$h(n) = F[\delta(n)] \quad (5)$$

因果性とは、信号が入力される前に出力が現れることがないことを約束する性質であり、式で表せば次の通りである。

$$h(n) = 0 \quad n < 0 \quad (6)$$

測定系が「線形性」、「時不変性」を満たす系である場合には、 $E(n)$ と F を用いて $I(n)$ は次の通り表せる。

$$\begin{aligned} I(n) &= F[E(n)] = F \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} E(k)\delta(n-k) \right] \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} E(k)F[\delta(n-k)] \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} E(k)h(n-k) \end{aligned} \quad (7)$$

1つのインパルス関数が電流に与える影響が $N-1$ 個の有限長までの場合は、次の通り変形できる。なお、 $l = n - k$ と置き、 $l < 0$ の範囲は因果性によって $h(l)x(n-l) = 0$ となる。

$$I(n) = \sum_{l=0}^{N-1} h(l)E(n-l) \quad (8)$$

したがって、 $E(n)$ が入力され $I(n)$ が出力される F は h で特

徴付けられるものと言える。式(8)は畳み込み和の形である。畳み込みの定理を用いれば、畳み込み和 $I(n)$ を離散フーリエ変換したものの $Y(\omega)$ は、 $h(l)$ を離散フーリエ変換したものの $H(\omega)$ と $E(n-l)$ を離散フーリエ変換したものの $X(\omega)$ の積となる。

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= H(\omega)X(\omega) \\ Y(\omega) &\equiv \mathcal{F}(I) \\ X(\omega) &\equiv \mathcal{F}(E) \\ H(\omega) &\equiv \mathcal{F}(h) \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 $\mathcal{F}(x)$ は関数 x のフーリエ変換による写像である。また、 $H(\omega)$ の逆数がインピーダンス $Z(\omega)$ である。

$$Z(\omega) \equiv 1/H(\omega) \quad (10)$$

以上で、測定系が「線形性」、「因果性」、「時不変性」を満たす系である場合のインピーダンスの定義を導出できた。上記の式展開から理解できるように測定系が「線形性」を満たさない場合には、式(2)から式(7)に変形することができない。なお、ここまでの式展開は制御工学¹⁰⁾を基にした展開で、一般的にインピーダンスと称されるものに適用される考え方である。

2.2 非線形の測定系における応答電流

ここからの展開は、筆者が独自に構築した式であり、一般的に認められた考え方ではないことに留意されたい。前述のように非線形測定系では式(7)の形に展開することができないため、関数 $F(x)$ を展開して整理する必要がある。線形関数と区別するために、非線形関数を $G(x)$ とすると、 $G(x)$ はチェビシエフの多項式を用いて、次のように表現できる。

$$G(x) = \sum_{j=0}^{\infty} b_j T_j(x) \quad (11)$$

ここに、 b_j 、 $T_j(x)$ は下記の通りである。

$$b_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{G(x)T_0(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx \quad j = 0 \quad (12)$$

$$b_j = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{G(x)T_j(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx \quad j > 0 \quad (13)$$

$$T_{j+1}(x) = 2x \cdot T_j(x) - T_{j-1}(x) \quad (14)$$

$$T_0(x) = 1 \quad (15)$$

$$T_1(x) = x \quad (16)$$

$$T_2(x) = 2x^2 - 1 \quad (17)$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x \quad (18)$$

このように、非線形システムでは線形応答に非線形の項が重畳していることがわかる。式(11)を、式(7)と比較して、応答電流は次のように表現できる。

$$\begin{aligned}
I(n) &= G[E(n)] \\
&= G \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} E(k)\delta(n-k) \right] \\
&= G \left[\sum_{k=0}^{N-1} E(n-l)\delta(l) \right] \quad (19) \\
&= \sum_{j=0}^{\infty} b_j T_j \left(\sum_{k=0}^{N-1} E(n-l)\delta(l) \right)
\end{aligned}$$

展開の簡単のため、下式のように印加電圧を正弦波形に限定すると、

$$\sum_{l=0}^{N-1} E(n-l)\delta(l) = E_0 \cos(2\pi f_0 n) \quad (20)$$

式(19)は次の通り変形できる。

$$I(n) = \sum_{j=0}^{\infty} b_j T_j (E_0 \cos(2\pi f_0 n)) \quad (21)$$

以上の展開より、非線形関数 $G(x)$ は b_j で特徴づけられることがわかる。非線形測定系では、様々な周波数 f_0 、および E_0 に対応する b_j を測定することで、測定系の性質を把握することができる。式(21)の右辺を概観すれば、余弦波の基本周波数倍角に、対応する b_j を乗じた積となっており、フーリエ級数展開の式となっていることがわかる。したがって、 b_j は応答電流をフーリエ級数展開した際のフーリエ係数として求められることがわかる。

3. 鉄筋の分極曲線を組み込んだ交流解析

本章では鉄筋の分極曲線を回路素子に組み込んだ交流応答電流シミュレーションを実施し、鉄筋の分極曲線が b_j に与える影響を検討する。

3.1 鉄筋の分極曲線を組み込んだ回路モデル

本解析にはリアテクノロジー社が提供する無料の回路シミュレータである「LT-SPICE¹¹⁾」を用いる。LT-SPICEの回路図エディタ上に、図-1に示す回路を作成する。図中、R1はコンクリート抵抗、キャパシタC1は鉄筋表面の電気二重層を模擬しており、他の素子は鉄筋の分極曲線を表現するための素子である。特に、D1、D2、V1はカソード分極曲線を表現し、D3、D4、V2はアノード分極曲線を表現している。鉄筋の回路素子にダイオード(D1~D4)を用いたことに物理的な意味はなく、電圧に対して電流が指数的に増加する特性を表現するために採用した。各素子のパラメータは表-1の通りに設定した。なお、表に記載した各記号の意味はLT-SPICEの標準ライブラリ¹¹⁾に記述の通りである。このパラメータを設定することで、アノードターフェル勾配が50mV/decade¹²⁾、カソードのターフェル勾配が130mV/decade¹²⁾となる。ま

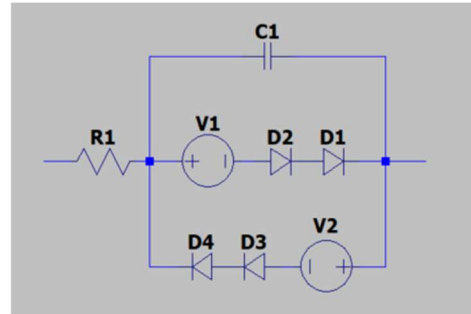


図-1 鉄筋の回路モデル

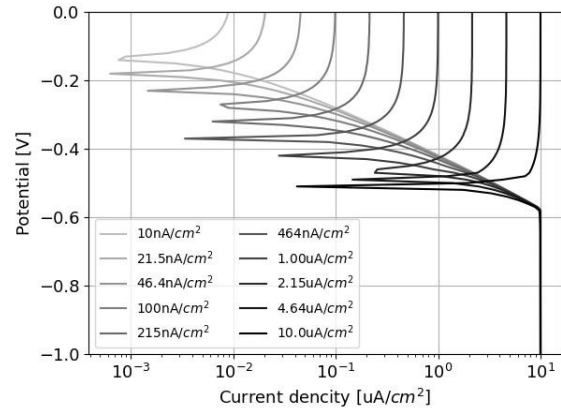


図-2 鉄筋の分極曲線（アノード律速を変化）

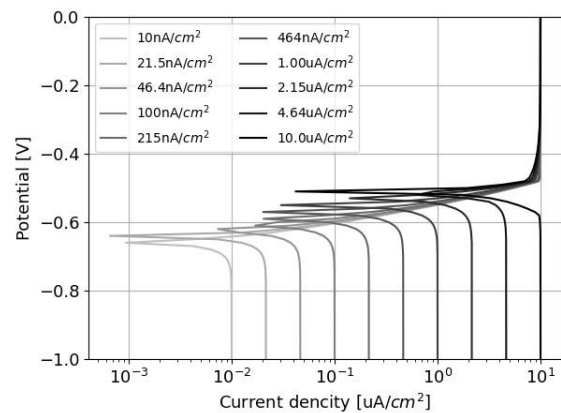


図-3 鉄筋の分極曲線（カソード律速を変化）

表-1 回路素子の各パラメータ

R1	R = 10k or 0
C1	C = 100u
D1	Is = 7*10 ⁻²¹ , N = 2.3
D2	Ron = 0, Roff = 100G, Vfwd = -0.8, epsilon = 0.03, Ilimit = {ilim_c}
D3	Is = 7*10 ⁻⁶⁸ , N = 0.84
D4	Ron = 0, Roff = 100G, Vfwd = -2, epsilon = 0.03, Ilimit = {ilim_a}
V1	-0.01475*log({ilim_c})-0.9
V2	-0.0295*log({ilim_a})-2

た、アノードおよびカソードの物質移動限界電流密度は $\{ilim_a\}$ および $\{ilim_c\}$ でコントロールできる。 $\{ilim_a\}$ および $\{ilim_c\}$ を $10\text{nA/cm}^2 \sim 10\text{uA/cm}^2$ で変化させた際の鉄筋の分極曲線が図-2, 3 である。図中の凡例はそれぞれの物質移動限界電流密度 $[\text{A/cm}^2]$ を表している。V1 および V2 も $\{ilim_a\}$ および $\{ilim_c\}$ に合わせて変化するように設定したことで、鉄筋の自然電位変化を表現した。図-2 はアノードの物質移動限界電流密度が変化することで、鉄筋の不動態被膜の状態が変化した際の分極曲線の変化が再現された。図-3 はカソードの物質移動限界電流密度が変化したことにより、鉄筋周囲の溶存酸素濃度の変化が再現された。このように作成した回路に対して、自然電位を振幅中心に振幅 $1 \sim 1000\text{mV}$ 、周波数 $100\text{Hz} \sim 0.01\text{Hz}$ の正弦波形を印加し、 b_j を算出した。

3.2 周波数 0.01Hz のシミュレーション結果

鉄筋の分極曲線による非線形効果は低周波数であるほど大きくなるため、 0.01Hz のシミュレーション結果について考察する。図-4～6 は 0.01Hz の印加周波数で印加電圧を $1, 10, 100, 1000\text{mV}$ としたスペクトルで、横軸は周波数、縦軸は b_j/b_1 である。図-4 は $\{ilim_a\}=10\text{uA/cm}^2$ 、 $\{ilim_c\}=10\text{uA/cm}^2$ で、不動態皮膜が未形成、もしくは破壊されており、鉄筋表面に酸素が十分に供給されている測定系を想定した水準である。図-5 は $\{ilim_a\}=0.01\text{uA/cm}^2$ 、 $\{ilim_c\}=10\text{uA/cm}^2$ で、不動態皮膜が形成しており、鉄筋表面に酸素が十分に供給されている測定系を想定した水準、図-6 は $\{ilim_a\}=10\text{uA/cm}^2$ 、 $\{ilim_c\}=0.01\text{uA/cm}^2$ で、不動態皮膜が未形成、もしくは破壊されているが、鉄筋表面に酸素が十分に供給されていない測定系を想定した水準である。

印加電圧が 10mV 以下の水準に着目すると、基本周波数以外のスペクトルは基本周波数と比較して $1/10$ 以上小さく、応答電流の振幅はほぼ正弦波形であることがわかる。印加電圧の振幅が小さい測定であれば、非線形であっても線形関数としてみなせることがわかる。これはテイラー展開を用いた一般的な式展開で証明できる⁷⁾。また、鉄筋に対する測定系は、系の抵抗のうち線形抵抗であるコンクリート抵抗が鉄筋表面の抵抗より大きい場合が多いため^{3,4,6)}、印加電圧のうちほとんどがコンクリート抵抗にかかり、鉄筋表面にかかる印加電圧が小さいことも理由の一端に挙げられる。電気化学インピーダンスを応用しようとする試みの核心のひとつはコンクリート抵抗をいかにキャンセルするかであり、今後の研究では印加電圧の周波数を変化させ、非線形測定系においてコンクリート抵抗をキャンセルする方策が求められる。

つぎに 100mV の電位振幅を印加した水準に着目する。 $\{ilim_a\}=10\text{uA/cm}^2$ を設定した 2 水準 (図-4, 図-6) では、

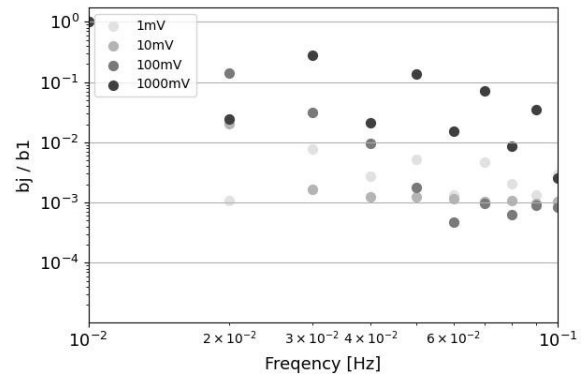


図-4 基本周波数 0.01Hz での b_j/b_1
 $\{ilim_a\}=10\text{uA/cm}^2$, $\{ilim_c\}=10\text{uA/cm}^2$

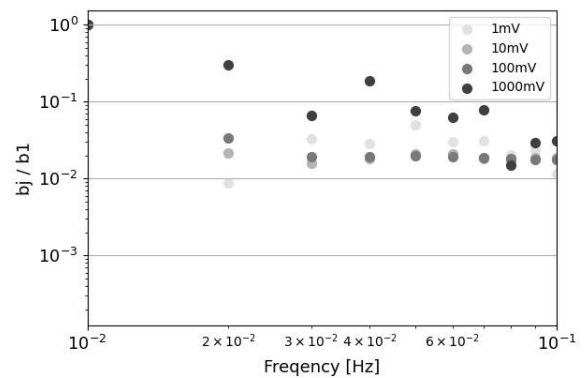


図-5 基本周波数 0.01Hz での b_j/b_1
 $\{ilim_a\}=0.01\text{uA/cm}^2$, $\{ilim_c\}=10\text{uA/cm}^2$

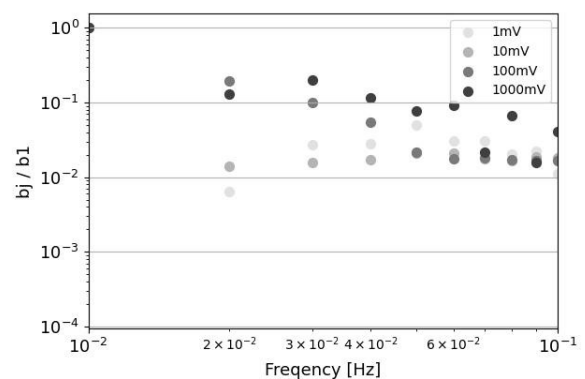


図-6 基本周波数 0.01Hz での b_j/b_1
 $\{ilim_a\}=10\text{uA/cm}^2$, $\{ilim_c\}=0.01\text{uA/cm}^2$

鉄筋の分極曲線の非線形効果が生じており、基本周波数の 2 倍高調波が出現している。このことから、鉄筋のアノードの律速が電荷移動律速となっている測定系では、そうでない系よりも、印加電圧の振幅が比較的小さい時にも 2 倍高調波の振幅強度が出現する可能性がある。

次に 1000mV の電位振幅を印加した水準に着目する。 1000mV と 100mV では、2 倍高調波以上の高調波の傾向が異なっている。 $\{ilim_a\}=10\text{uA/cm}^2$ 、 $\{ilim_c\}=10\text{uA/cm}^2$ では、2 倍高調波の振幅強度が他の倍角に比べて著しく小さくなった。 $\{ilim_a\}=10\text{uA/cm}^2$ 、 $\{ilim_c\}=0.01\text{uA/cm}^2$

の水準でも多少2倍高調波の振幅強度が他の倍角に比べて小さくなる傾向にあり、これらはアノードの律速が電荷移動律速となる場合の傾向の可能性がある。 $\{i_{lim_a}\}=0.01\mu\text{A}/\text{cm}^2$, $\{i_{lim_c}\}=10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の水準では3倍高調波の振幅強度が他の倍角に比べて小さくなる傾向が得られ、各高調波の振幅強度が分極曲線の形状を反映している可能性がある。そうであれば、今後の研究次第で測定結果と回路をフィッティングし、 $G(x)$ を推定できる可能性がある。

シミュレーションからも式(21)からも b_j は電圧振幅の設定値に影響を受けており、この設定値によって分極曲線のどの範囲をスキャンするかを制御できるはずである。これらの関係性は今後の研究で明らかにされる必要がある。本研究の成果の範囲をまとめると、①アノードの電荷移動律速となっている測定系では比較的低い印加電圧で2倍高調波が出現する可能性がある。②3倍高調波が出現するように電位振幅を印加した場合に、アノード電荷移動律速となっている測定系では2倍高調波の振幅強度が下がり、アノード物質移動律速となっている測定系では3倍高調波の振幅強度が下がる可能性がある。③各高調波を測定し回路とフィッティングすることで $G(x)$ が把握できる可能性がある。

4. モルタル試験体での検証

本節では、3章で得られた傾向がモルタル試験体で再現されることを確認する。

4.1 試験体概要

図-7はモルタル試験体の概要である。鉄試験片はφ20mmの磨き鉄筋にリード線を接続し、φ25mmのモールドで包埋した。樹脂硬化後、鉄試験面を#2000までのエメリー紙で研磨した。作製した鉄試験片をφ50mm×100mmの円柱モールドの底面に設置し、モルタルを打設した。モルタルは3日後に脱型し、かぶりが15mmとなるように切断、研磨した。モルタルの配合は、表-2に示す通りである。普通ポルトランドセメントを用いた試験体を OPC 試験体、スラグを80%置換した試験体を B80 試験体と呼称することにする。養生は14日間の水中養生の後、2日間85%RHで気中養生した。その後、エポキシ被覆を塗布し、24時間乾燥後に3日間の真空飽水処理を施した。

4.2 交流インピーダンス測定

測定にはクリアパルス社製 Dr.CORR を用いた。モルタル表面に対極、照合電極を設置し、それぞれ、ポテンシヨスタットの CE, RE 端子を接続し、鉄筋にはポテンシヨスタットの WE_V, WE_I 端子を接続した。対極は直径50mm、厚さ2mmのアルミニウム製である。照合電極は飽和銀塩化銀電極で、内部溶液は3.33MのNaClゲル

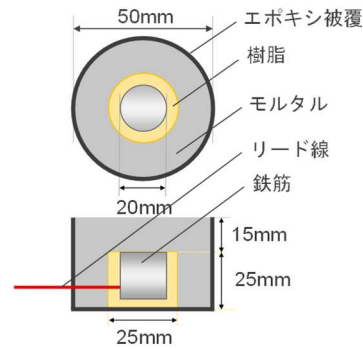


図-7 モルタル試験体の概要

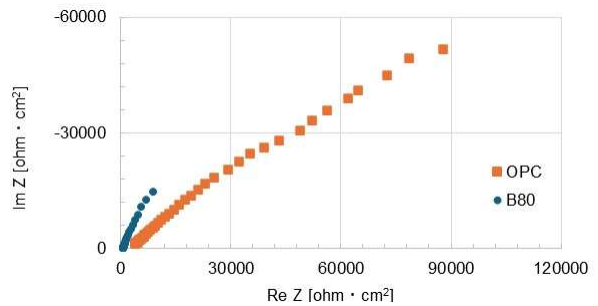


図-8 モルタル試験体のインピーダンス測定結果

表-2 モルタル配合表

W/B (%)	B置換率 (%)	S/B	単位量(kg/m3)				
			W	C	BS	S1	S2
45	80	2.3	270.9	120.4	481.6	969.2	415.40
	0		274.3	609.6	0	981.5	420.6

である。対極と照合電極は、クリアパルス社製の STRONGGELL でモルタルに接着した。なお、STRONGGELL は飽和酸化カルシウム水溶液をゲル化したイオン電導性緩衝剤である。測定制御は WE_V, RE 間の電位差振幅を制御し、WE_I, CE 間に流れるシグナル電流を計測した。電圧制御の分解能は 305.2μV, 電流測定の分解能は±7.63nAである。OPC 試験体には 150mV, B80 試験体には 40mV の電位振幅を印加した。この電位振幅に設定することによって、両モルタル試験体で印加周波数 0.01Hz における基本周波数の振幅強度が 1.1μA/cm² 程度となる。本来は鉄筋表面にかかる電位振幅を両モルタル試験体で同じにすることで精緻な比較が可能となるが、かぶりモルタルの抵抗が異なるために条件設定が難しい。可能な限り印加条件を揃えるために、本検討は上記の設定とした。

4.3 実験結果

図-8に OPC 試験体および B80 試験体のインピーダンスの測定結果を示す。また、OPC 試験体の自然電位は-138mV vs.SSE で、B80 試験体は-267mV vs.SSE である。OPC 試験体では不動態化によって、電位が貴化し、インピーダンスが低周波に行くにつれて大きくなっている。一方で、B80 試験体は電位が比較的卑で、インピーダン

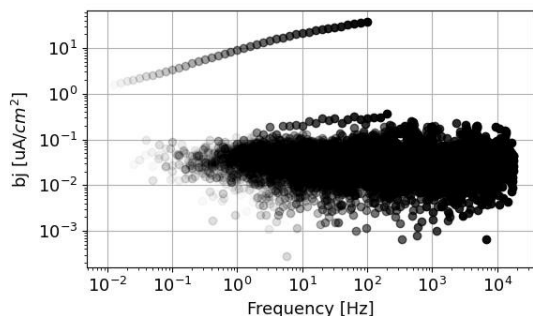


図-9 b_j の周波数特性(OPC 試験体)

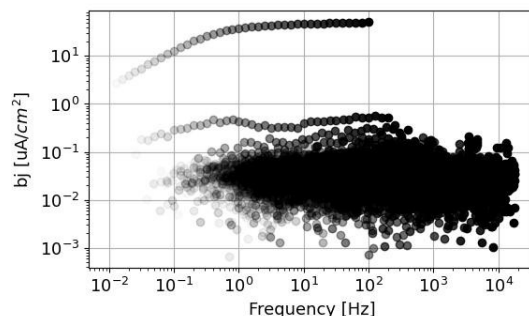


図-10 b_j の周波数特性(B80 試験体)

スも小さい。このような場合に、鉄筋の表面状態を予測するのに、不動態皮膜の有無や酸素濃度の状態などどのように考えるか判断が難しい。

図-9および図-10は、OPCおよびB80試験体の b_j を各測定周波数でプロットした結果である。OPC試験体の結果では周波数の増加に伴い上昇する1本線分が図中左上に出現し、右下にランダムなプロットが得られた。線分は各測定周波数の b_1 がプロットされたものである。右下のランダムプロットは環境ノイズによるものである。OPC試験体の測定では高調波は確認できなかった。B80試験体では、線分が2本出現した。上の線分は b_1 がプロットされたもので、下の線分は b_2 がプロットされたものである。したがって、OPC試験体よりもB80試験体は2倍高調波が出やすい傾向にある可能性があり、3章の結果を踏まえると、アノードが電荷移動律速となっている可能性があり、不動態皮膜が未発達である可能性が大きくなる。このように、高調波の出現を観察することで、鉄筋の腐食状態の推定に新たな角度でアプローチできる可能性が示された。

5. まとめ

本研究で得られた知見は下記の通りである。

- (1) 測定系が非線形である場合に、応答電流をフーリエ級数展開した際のフーリエ係数は測定系の特徴を表現することができる。
- (2) アノードの電荷移動律速となっている測定系ではそれ以外の場合と比較して低い印加電圧で高調波が出現する可能性がある。
- (3) 3倍高調波が出現するように電位振幅を印加した場合に、アノード電荷移動律速となっている測定系では2倍高調波の振幅強度が下がり、アノード物質移動律速となっている測定系では3倍高調波の振幅強度が下がる可能性がある。
- (4) 各高調波を測定し回路とフィッティングすることで $G(x)$ が把握できる可能性がある。
- (5) モルタル試験体に電位振幅を印加し、応答電流を解

析したところ、鉄筋の不動態皮膜の形成に関連する高調波スペクトルの差異が観測された可能性がある。

参考文献

- 1) C. Andrade, L. Soler, C. Alonso, X. R. Novoa, and M. Keddad, Corros. Sci., Vol.37, No.12, pp.2013-2023, 1995
- 2) R. Vedalakshmi, V. Saraswathy, H. W. Song, and N. Palaniswamy, Corros. Sci., Vol.51, No.6, pp.1299-1307, 2009
- 3) Y. Hoshi, T. Koike, T. Okamoto, H. Tokieda, I. Shitanda, M. Itagaki, and Y. Kato, J. Electrochem. Soc., 166, C3316, 2019
- 4) Y. Hoshi, C. Hasegawa, T. Okamoto, M. Soukura, H. Tokieda, I. Shitanda, M. Itagaki, and Y. Kato, Electrochemistry, Vol.87, No.1, pp.78-83, 2019
- 5) S. Feliu, J. A. Gonzalez, J. M. Miranda, and V. Feliu, Corros. Sci., Vol.47, NO.1, pp.217-238, 2005
- 6) N. Hashimoto, M. Tanaka, Y. Kaneko, Y. Kato and A. Hiram, J. app. Electrochem., Vol.53, No.9, pp.1895-1909, 2023
- 7) 春山史郎：表面技術者のための電気化学，丸善出版，2005
- 8) 板垣昌幸：電気化学インピーダンス法，丸善出版，2011
- 9) 門馬昭彦，沼田博雄，春山志郎：高調波測定による固体電解質電極反応のメカニズムの研究，Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.101, No.4, pp.410-415, 1993
- 10) 森政弘，小川鑛一：基礎制御工学，東京電機大学出版局，2001
- 11) ANAROG DEVICES 社 HP：
<https://www.analog.com/jp/index.html> (閲覧日：2025年1月8日)
- 12) 大谷俊介，小林浩之，若林徹，望月紀保，コンクリート工学年次論文集，vol.35, No.1, pp.1063-1068, 2013