

# 交流インピーダンス測定による鉄鋼面塗装材の劣化予測

久保田 浩<sup>\*1</sup>・高橋 愛枝<sup>\*1</sup>・光木 史朗<sup>\*2</sup>・木場 将雄<sup>\*3</sup>・山本 知弘<sup>\*3</sup>・中尾 正純<sup>\*4</sup>

*Keywords : steel painting materials, deterioration prediction, impedance, visual evaluation, accelerated corrosion test*

鉄鋼面塗装材、劣化予測、交流インピーダンス、目視評価、促進腐食試験

## 1. はじめに

鉄骨造建築物の構造部材の耐用年数については、表面に防食処理が施されていない部材の耐用年数と、塗膜の耐用年数の和により推定する方法<sup>1)</sup>があるが、これは劣化に係る幾つかの係数の組合せによるものである。また、目視による劣化度の評価では、定量的な診断が難しく、診断結果に専門家の判断が必要でかつ個人差が出やすい。より実態に即した推定を行うためには、実測に基づく評価手法が望まれる。

本報では、屋内の鉄鋼面塗装材の劣化予測のための実測に基づく評価手法として、交流インピーダンス測定を取り上げた。そして、各種塗装材による促進腐食試験を実施<sup>2)</sup>し、交流インピーダンス測定結果を用いて劣化予測を実施し、目視評価と比較した。さらに、現地調査を行い、交流インピーダンス測定の現場への適用性について検討した結果<sup>2)</sup>を報告する。

## 2. 促進腐食試験

### 2.1 供試材料および試験体

促進腐食試験を実施した塗装仕様を表-1に示す。屋内の鉄鋼面の使用例として、エポキシ樹脂塗料2仕様、フェノール樹脂塗料1仕様、弱溶剤系ポリウレタン樹脂塗料2仕様、合成樹脂調合ペイント3仕様の合計8仕様を選定した。

試験体は、 $150 \times 70 \times 0.8\text{mm}$  の一般用冷間圧延鋼板 (JIS G 3141 に規定されている SPCC-SB) を用い、溶剤拭きし、さびが発生している場合は研磨紙 P280 で除去した後、製造所の標準塗装仕様でエアレススプレー

表-1 塗装仕様

Table 1 Paint system

記号	塗料			膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	製造 所
	下塗り	中塗り	上塗り		
E1	エポキシ樹脂 塗料	—	エポキシ樹脂 塗料	175	a
E2	エポキシ樹脂 塗料	—	エポキシ樹脂 塗料	175	b
F1	エポキシ樹脂 塗料	—	フェノール変性エボ キシ樹脂塗料	175	c
U1	弱溶剤系変性エ ボキシ樹脂塗料	弱溶剤系ポリウ レタン樹脂塗料	弱溶剤系ポリウ レタン樹脂塗料	110	a
U2	変性エボキシ樹 脂塗料	弱溶剤系ポリウ レタン樹脂塗料	弱溶剤系ポリウ レタン樹脂塗料	110	d
S1	亜酸化鉛さび 止めペイント	合成樹脂調合 ペイント	合成樹脂調合 ペイント	125	a
S2	鉛丹さび止め ペイント	合成樹脂調合 ペイント	合成樹脂調合 ペイント	125	b
S3	ジナド <sup>®</sup> 鉛さび 止めペイント	合成樹脂調合 ペイント	合成樹脂調合 ペイント	90	a

で塗装した。塗装後7日間養生し、促進耐候性試験機 (キセノンランプ式) で60時間照射した試験片を試験体とした。試験体数は1仕様につき3体とした。

### 2.2 試験方法

複合サイクル試験機 (Q-Panel Lab Products 社製 Q-Fog) を用いて、サイクル腐食試験方法 (JIS K 5600-7-9) の附属書1に規定されている、塩水噴霧、湿潤、乾燥を繰り返すサイクルDで1445サイクルまで腐食試験を実施した。途中、35, 75, 115, 240, 360, 480, 720, 840, 960, 1080, 1200, 1320 サイクルで試験体を取り出し、水洗した後に劣化評価を実施した。

### 2.3 劣化評価

#### 2.3.1 交流インピーダンス測定

塗膜を電気的にみると、塗膜の表面と下地金属の間が抵抗成分 ( $R_x$ ) と容量成分 ( $C_x$ ) で並列に接続され

\*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

\*2 原子力本部原子力技術第一部

\*3 関西電力(株)

\*4 (株)環境総合テクノス

た回路で表すことができる。このときの合成した塗膜インピーダンスは式(1)で表すことができる。

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Rx} + j \times (2\pi \times f \times Cx)} \quad (1)$$

ここで、 $Z$ ：塗膜インピーダンス、 $Rx$ ：抵抗成分、 $j$ ：虚数、 $f$ ：周波数、 $Cx$ ：容量成分である。

塗膜インピーダンスの測定は、塗膜劣化診断システム（東芝ITコントロールシステム社製 TOMAC、写真-1）を用い、0.1Hzにおける膜厚補正インピーダンスを求めた。劣化の評価は、表-2に示すとおり、同システムの基準に従って行った。手順としては、電磁誘電式膜厚計（ケット科学研究所社製 LE-300）で塗膜厚を測定した後、電解液（3%食塩水に増粘剤を加えた溶液）に浸したスポンジをダミープローブにセットし、塗膜表面にダミープローブを設置して1時間後に、塗膜劣化診断システムで交流インピーダンス測定を実施した。測定は各試験体で上下2点ずつ測定し、6点の平均値を求めた。

### 2.3.2 目視評価

さび、膨れ、割れ、はがれについて目視観察による評価を実施した。この時、試験体の周辺10mm以内の塗膜は評価の対象外とし、さび汁による汚れも評価の対象外とした。評価は、(財)日本塗料検査協会「塗膜の評価基準2003」に従って6段階で評価した。

## 2.4 試験結果および考察

### 2.4.1 交流インピーダンス測定

インピーダンス測定結果を図-1に示す。S1は全体に膨れが発生し、S3はさびの面積が多くなったため、サイクルの途中で交流インピーダンスは測定不可となった。

インピーダンス測定結果を表-2に従い評価すると、S1とS3が測定可能であったサイクルまで注意レベルであり、その他の試験体はいずれも健全レベルであった。健全レベルの試験体もインピーダンス値は徐々に低下する傾向にある。

### 2.4.2 目視評価

目視評価結果を表-3に、最終サイクル後の状況を写真-2に示す。さびは全ての仕様で発生が認められており、1445サイクルでS3のさびは評価4と発生が著しく、他の試験体は評価1~2であった。膨れはU1、U2、S1、S2、S3で発生が認められた。U1、U2、S2の膨れは評価1であり、1~2箇所で認められた。S1、S3の膨れは評価4かつ大きさ5であり、発生が著しかった。割れはS1、S2、S3で発生が認められたが、い

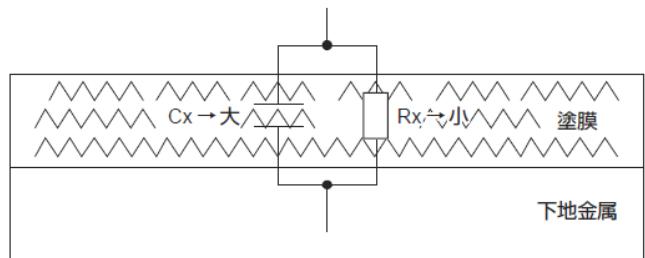


図-1 塗膜の等価回路  
Fig.1 Equivalent circuit of paint film



写真-1 塗膜劣化診断システム (TOMAC)  
Picture 1 Paint film degradation analysis system(TOMAC)

表-2 劣化の評価基準  
Table 2 Standard evaluation of degradation

劣化度	インピーダンス測定値 ( $\Omega \text{cm}$ )
健全レベル	$1.0 \times 10^{10}$ 超
注意レベル	$1.0 \times 10^9 \sim 1.0 \times 10^{10}$
劣化レベル	$1.0 \times 10^9$ 未満

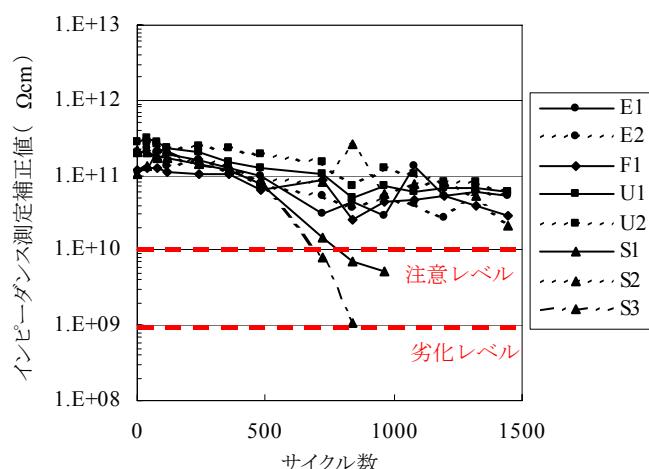


図-1 インピーダンス測定結果  
Fig.1 Test result of impedance

ずれも評価1である。はがれはU2, S1, S2, S3で発生が認められた。S3のはがれは評価4と著しく、他は一部の試験体(S2)で評価3はあるが、ほとんどが評価1~2であった。さび、膨れ、割れ、はがれの評価結果から、劣化が著しく進行しているのは、S1とS3であった。



写真-2 最終サイクル後の状況 (左:S1, 右:S3)  
Picture 2 Last condition of test piece

## 2.5まとめ

- 促進腐食試験結果のまとめを以下に示す。
- ① 交流インピーダンス測定結果から健全レベルと注意レベルが認められ、健全レベルでも値は徐々に低下する傾向にあり、S1とS3は注意レベルに達していることが確認された。
  - ② 目視評価結果から全ての仕様でさびが認められ、いくつかの仕様で膨れ、割れ、はがれが認められた。特に劣化が著しいのはS1とS3であった。

## 3. 塗膜の劣化予測

### 3.1 劣化予測手法

促進腐食試験で交流インピーダンス測定結果の単回帰分析より得た回帰式から、劣化レベルに達するサイクル数を求めた。

また、目視評価結果より、塗り替え時期のサイクル数を求めた。ここでは、施工が安価である3種Cケレンの素地調整で施工可能な程度の劣化を塗り替え時期と仮定した。3種Cケレンのさび面積は、日本道路協会「鋼道路橋塗装・防食便覧」では5%以下と記述されている。5%を「塗膜の評価基準2003」のさび面積に当てはめると評価4(3~20%)である。しかし、評価4だと20%までが許容されてしまうこと、評価後にすぐに塗り替えを実施しなければならなくなるため、

表-3 目視評価結果  
Table 3 Evaluation result of watching

記号	さび		膨れ		割れ		はがれ	
	発生サイクル数	最終サイクル評価	発生サイクル数	最終サイクル評価	発生サイクル数	最終サイクル評価	発生サイクル数	最終サイクル評価
E1	1	75	2	—	0	—	0	—
	2	35	2	—	0	—	0	—
	3	75	2	—	0	—	0	—
E2	1	75	2	—	0	—	0	—
	2	35	2	—	0	—	0	—
	3	75	2	—	0	—	0	—
F1	1	35	1	—	0	—	0	—
	2	75	2	—	0	—	0	—
	3	75	2	—	0	—	0	—
U1	1	75	2	1200	1(5)	—	0	—
	2	75	2	1080	1(5)	—	0	—
	3	35	2	960	1(5)	—	0	—
U2	1	35	2	1445	1(5)	—	0	—
	2	35	2	1445	1(3)	—	0	1080
	3	35	2	—	0	—	0	1080
S1	1	35	2	720	4(5)	720	A1	1200
	2	35	1	720	4(5)	720	A1	720
	3	35	1	840	4(5)	720	A1	1200
S2	1	75	1	—	0	—	0	—
	2	35	2	1080	1(5)	1200	A1	1080
	3	35	1	960	1(5)	1080	A1	1200
S3	1	35	4	360	3(5)	1320	A1	720
	2	35	4	360	3(5)	840	A1	480
	3	35	4	360	4(5)	840	A1	480

() 内は大きさ —は発生なし 評価5が最も状態が悪い

表-4 単回帰分析の結果および劣化予測結果  
Table 4 Result of single regression analysis and predict the degradation

記号	回帰式 $y=ax+b$	相関係数 $r$	劣化レベルに達したサイクル数 (塗り替え時期サイクル数)		
			交流インピーダンス	目視*評価	
E1	$y=-1.08 \times 10^{-8}x + 1.79 \times 10^{+11}$	-0.710	1654		—
E2	$y=-1.17 \times 10^{-8}x + 1.78 \times 10^{+11}$	-0.788	1507		—
F1	$y=-6.61 \times 10^{-7}x + 1.18 \times 10^{+11}$	-0.738	1774		—
U1	$y=-1.66 \times 10^{-8}x + 2.51 \times 10^{+11}$	-0.747	1508		—
U2	$y=-1.53 \times 10^{-8}x + 2.66 \times 10^{+11}$	-0.858	1734		—
S1	$y=-2.22 \times 10^{-8}x + 1.95 \times 10^{+11}$	-0.931	874	1 2 3	960 960 960
S2	$y=-9.86 \times 10^{-7}x + 1.88 \times 10^{+11}$	-0.650	1898		—
S3	$y=-2.13 \times 10^{-8}x + 1.82 \times 10^{+11}$	-0.717	854	1 2 3	840 1080 840

\* : -は1445サイクルでさびの発生がほとんどないことを示している

ここでは評価3(0.6~3%)を基準とすることとした。これより、さびは評価3を塗り替え時期と仮定した。膨れ、割れ、はがれも同様に評価3を塗り替え時期と仮定した。

以上のことから、目視評価結果のサイクル数を求め、交流インピーダンス測定結果より求めた回帰式から劣化レベルに達したサイクル数を計算した結果と比較検討した。

### 3.2 劣化予測結果

交流インピーダンス測定結果を単回帰分析した結果を表-4および図-2~3に、劣化レベルに達したサイクル数を表-4に示す。

S2以外は相関係数が絶対値で0.7以上であり、負の相関性が高いことが分かった。交流インピーダンス測定で劣化レベルに達したサイクル数と目視評価による塗り替え時期サイクル数を比較すると、劣化レベルまで達していたのはS1とS3しかないが、概ね整合していることが分かった。

したがって、経年での交流インピーダンス測定を実施することにより、塗膜の劣化時期を定量的に予測することは可能であると考える。

### 3.3 まとめ

交流インピーダンス測定結果から単回帰分析した結果の塗膜が劣化レベルに達したサイクル数と設定した目視評価による塗り替え時期サイクル数は概ね整合していた。

劣化予測結果から、交流インピーダンス測定を経時に実施することにより定量的な塗膜寿命の予測が可能であることが分かった。

## 4. 現地調査

### 4.1 調査箇所

築35年の発電所で現地調査を実施した。現地調査箇所を表-5に示す。調査は、平成20年6月に、発電所施設のうちA建屋5箇所およびB建屋5箇所の計10箇所について実施した。部位は柱、梁、ブレースとし、塗り替えありとなしの部分で実施した。

### 4.2 調査方法

#### 4.2.1 交流インピーダンス測定

促進腐食試験と同様に、塗膜劣化診断システムで、交流インピーダンス測定を実施した。測定は、1箇所につき3点の測定を実施した。

#### 4.2.2 目視評価

さび、膨れ、割れ、はがれについて目視評価した。

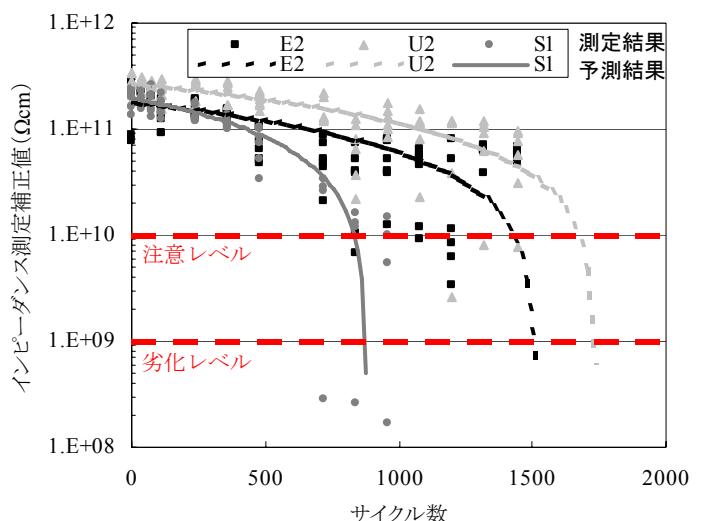


図-2 単回帰分析の結果（代表例）  
Fig.2 Result of single regression analysis

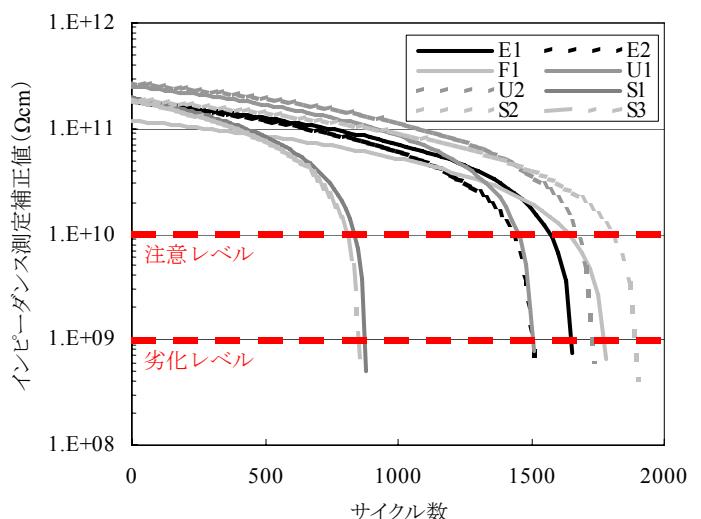


図-3 単回帰分析の結果（回帰式のみ）  
Fig.3 Result of single regression analysis

表-5 現地調査箇所  
Table 5 Place of field investigation

記号	構造物	部位	塗り替え
①	A 建屋	柱	あり
②	〃	柱	〃
③	〃	柱	〃
④	〃	梁	〃
⑤	〃	ブレース	なし
⑥	B 建屋	ブレース	〃
⑦	〃	ブレース	あり
⑧	〃	ブレース	なし
⑨	〃	柱	あり
⑩	〃	ブレース	なし

評価は、前報と同じく、(財)日本塗料検査協会「塗膜の評価基準2003」によるものとした。

#### 4.3 調査結果

##### 4.3.1 交流インピーダンス測定

交流インピーダンス測定結果を表-6に示す。

交流インピーダンス測定結果から、塗り替えありの部分はA建屋④を除いて全て健全レベルで、塗り替えなし部分は全て注意レベルと診断された。

##### 4.3.2 目視評価

目視評価の結果を表-7に示す。

目視評価結果から、塗膜は全般的には健全であった。微小なはがれが認められるが、ほとんどが物をぶつけたと考えられるはがれであった。微小なさびが認められる箇所はいずれも塗り替えが実施されていなかった。

#### 4.4 まとめ

調査結果から、実環境においても交流インピーダンス測定による劣化評価ができるところから、現場適用が可能であることが分かった。ただし、この劣化の評価は、塗膜劣化診断システムの基準に従ったものであるため、実態に即したものに改める必要がある。

### 5. おわりに

実環境における鉄鋼面塗装材の交流インピーダンス測定を経時的に実施することにより、塗膜の劣化時期について、より合理的な評価を行うことができると考える。

#### 謝辞

本研究は、関西電力（株）からの委託研究である発電所の塗装材料の劣化評価に関する研究の内、鉄骨構造物の塗装材の劣化評価手法の検討の一部をまとめたものである。関西電力（株）と環境総合テクノス（株）の関係各位に謝意を表します。

表-6 交流インピーダンスの結果

Table 6 Test result of impedance

調査箇所	インピーダンス測定補正平均値 (Ωcm)	劣化度
A 建屋	① 1.10E+11	健全レベル
	② 1.52E+11	健全レベル
	③ 1.17E+11	健全レベル
	④ 7.20E+09	注意レベル
	⑤ 1.00E+10	注意レベル
B 建屋	⑥ 4.14E+09	注意レベル
	⑦ 1.62E+11	健全レベル
	⑧ 2.52E+09	注意レベル
	⑨ 7.93E+10	健全レベル
	⑩ 2.43E+09	注意レベル

表-7 目視評価結果

Table 7 Estimation result of watching

調査箇所	目視				触診
	さび	膨れ	割れ	はがれ	
A 建屋	① 0	0	0	1	白亜化なし
	② 0	0	0	1	〃
	③ 0	0	0	2	〃
	④ 0	0	0	1	〃
	⑤ 1	0	0	2	〃
B 建屋	⑥ 1	0	0	1	触診不可
	⑦ 0	0	0	1	〃
	⑧ 0	0	0	1	〃
	⑨ 0	0	0	2	〃
	⑩ 0	0	0	1	〃

#### 参考文献

- 1) 建築物の耐久計画に関する考え方：日本建築学会
- 2) 山本知弘、木場将雄、中尾正純、久保田浩、高橋愛枝、光木史朗：交流インピーダンス測定による鉄鋼面塗装材の劣化予測 その1 促進腐食試験におけるインピーダンス測定結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 2010.9
- 3) 久保田浩、高橋愛枝、光木史朗、中尾正純、木場将雄、山本知弘：交流インピーダンス測定による鉄鋼面塗装材の劣化予測 その2 塗膜の劣化予測と現地調査結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 2010.9