

コロナ帯電電位測定による橋梁塗膜の劣化度評価

金田 翔*, 杉本 俊之^{*,1}, 最上 智史^{**}

(2025年3月3日受付; 2025年4月22日受理)

A Deterioration Inspection for a Bridge Paint by Corona Charging Potential Measurement

Sho KANETA*, Toshiyuki SUGIMOTO^{*,1} and Tomofumi MOGAMI^{**}

(Received March 3, 2025; Accepted April 22, 2025)

Maintenance of old steel bridges is significantly important for preventing collapse accident. A visual inspection of the deteriorated paint layer is one of the important check points for legal inspection. In order to characterize the quantitative deterioration degree, the insulative performance of the painted layer is measured by corona charging potential measurement. We developed a portable tester with a needle-cylinder corona charger and a surface voltmeter. The surface potentials of the 2 bridge paint were measured during and after corona charging. The magnitude of the surface potential was varied with the age of the paint. One dimensional equivalent circuit model is proposed to characterize the insulative performance as a function of ratio Q , the equivalent paint resistance R_0 divided by the Thevenin equivalent resistance R_0 of the tester. The analytical model shows the reduction of Q causes the reduction of the surface potential during and after charging. The measured surface potential data was agree with the predicted characteristics derived from the equivalent circuit model.

1. はじめに

高度経済成長期に建設された社会インフラは、現在、老朽化が問題になっており、例えば 2033 年には全国に約 73 万橋ある橋梁の約 63% が建設後 50 年以上経過する¹⁾。そのため、橋梁の長寿命化が求められており、メンテナンスは必要不可欠である。橋梁の塗膜は母材となる金属を酸化から防ぐ重要な役割を果たしている。その役割を果たすためには、単一層の塗膜では不十分な場合も多く、機能が異なる 3 ないし 4 層の塗膜を塗り重ねる必要がある^{2,3)}。劣化が進行している場合は塗替えを行う必要があるが、塗替えにも大きなコストがかかるため、母材の保護機能の有無を判断しながら適切なタイミングを計ることが望まれる。その判断材料の 1 つとして交流インピーダンス法⁴⁾や直流塗膜測定法⁵⁾など、塗膜の電気物性の変化から劣化度を評

価する手法が提案されている。しかしながら、これらの測定法は電極を塗膜の表面に接触させる必要があり、塗膜と電極との接触状態が測定精度に大きく影響する。そのため、このような測定手法は定着しておらず、目視による外観観察⁶⁾に頼らざるを得ない状況である。目視検査は主観的評価で個人差が生じるため、塗替えのタイミングは必ずしも適正な劣化度で行っているとは限らない。

筆者らは、劣化に伴う塗膜の絶縁性の低下に着目し、非接触でコロナ帯電電位を測定する方法について検討してきた⁷⁾。水性スプレーで塗装したサンプルをバリア放電⁸⁾で強制的に劣化させた場合、その注入エネルギーに応じて塗膜の絶縁性が低下することを示した⁹⁾。しかしながら、使用した塗料、膜厚、層数、測定環境などが実際の橋梁塗膜とは大きく異なっていたため、本測定法が野外の橋梁塗膜に適用できるかは不明であった。そこで、本研究ではポータブル型の測定装置を開発し、複数の橋梁において測定を行うことで塗膜の劣化とコロナ帯電電位の関係性を調査した。

2. 実験方法

2.1 塗膜の劣化

「塗膜の劣化」とは主成分であるポリマーが自然環境下で変質すること¹⁰⁾である。塗膜は顔料を含む樹脂同士が結合したものであるため、新しい塗膜の絶縁性は極めて高い。しかしながら、長い間、太陽光や降水、結露などの自然環境に曝され続けると、①退色・変色、②白亜化、③クラック、④剥離の順に劣化が進行していく。白亜化は分子間の

キーワード：塗装インフラ、塗膜劣化度診断、コロナ帯電電位、絶縁性評価、非接触測定

* 山形大学大学院 理工学研究科

(〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16)

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4-3-16, Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

** 春日電機株式会社

(〒212-0032 神奈川県川崎市幸区新川崎 2-4)

KASUGA DENKI, INC., 2-4, Shinkawasaki, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 212-0032, Japan

¹ toshi@yz.yamagata-u.ac.jp

DOI: <https://doi.org/10.34342/iesj.2025.49.6.194>

結合が切断され、表面の樹脂が小さな粉状に変化するため、白く見えるようになる現象であり¹¹⁾、表面をタオル等で払拭すると、タオルに樹脂の色が移るほど弱い結合状態となっている。劣化樹脂にはヒドロキシ基（-OH）やカルボキシ基（-COOH）などの親水基が導入されており、大気中の水分が吸収されやすくなる。このため、結合力だけでなく絶縁性も低下しているものと考えられる。劣化が塗膜の深層部まで進行し、水分や酸素が母材の金属に接触できるようになると、腐食電流が流れて錆が発生する¹²⁾。錆が発生する直前が塗替えの適切なタイミングとなるため、本研究では、コロナ帯電電位の測定によってこれが検知できるか検討した。また、コロナ帯電電位と塗膜の絶縁性との関係を示す一次元モデルを構築し、測定結果を考察した。なお、クラックや剥離は測定対象外とした。

2.2 コロナ帯電電位測定装置

Fig.1 に示すように、本装置は針電極からなるコロナ帯電装置と非接触型表面電位計で構成され、測定対象物の上部に所定の空気ギャップをあけて非接触状態で設置される。針電極に負の高電圧を印加して塗膜の表面をコロナ帯電しつつ、その帯電電位を表面電位計で測定する。橋梁の母材の金属は接地されているため、帯電した電荷は塗膜の絶縁性が低くなるほど接地へと逃げやすくなり、それに伴い帯電電位が小さくなると考えられる。また、コロナ帯電中の電位を測定した直後は印加電圧をゼロにし、塗膜の表面に残った電荷の拡散による表面電位の減衰も測定する。帯電中と帯電後の双方の電位を測定することで、塗膜の絶縁性を総合的に評価することを試みた。

2.3 劣化度測定方法

本研究では Fig.2 に示すポータブル型の測定装置を試作した。この装置は Fig.1 に示した構造の測定プローブと、これを操作する本体に分かれている。本体を肩から掛けて持ち、測定プローブを測定したい箇所に当てる。プローブの4本の脚を塗膜に接触させることで、コロナ帯電電極と塗膜との間に所定の空気ギャップ（2 mm）を確保でき、測定部は塗膜と非接触に測定を行うことが可能となる。

測定を開始してから、3秒後に針電極に高電圧を印加し、10秒間コロナ帯電している間の表面電位を測定し、その後、印加電圧をゼロにしてから20秒間の表面電位を測定した。測定した橋梁塗膜の多くは表面が劣化して白亜化していたため、まず、そのままの状態で白亜化した表層を含む塗膜の表面電位を測定した。次に、表面を乾いたタオルで払拭して樹脂の粉（白亜化した層）を拭き取り、残った塗膜の表面電位を測定した。

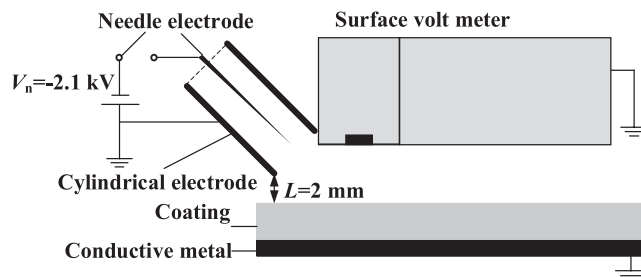


図1 概略図

Fig.1 Schematic overview.

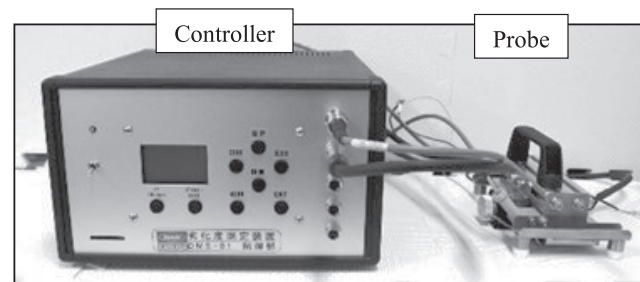


図2 ポータブル型装置

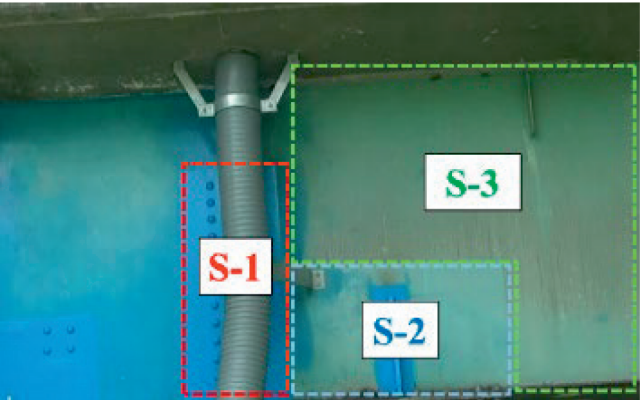
Fig.2 Portable tester.

3. 実験結果

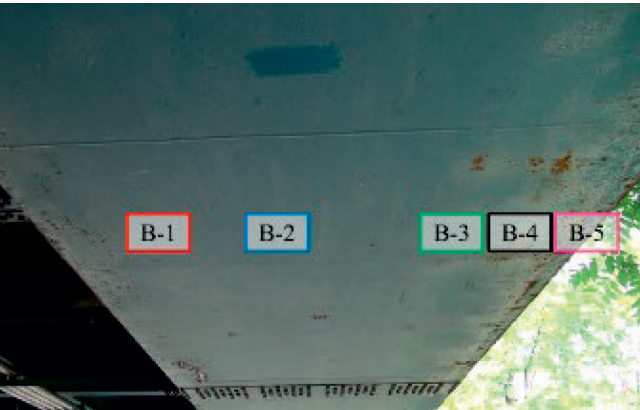
3.1 橋梁A（米沢市）

Fig.3 に示すような、竣工から40年経過した橋梁A（山形県米沢市）の主桁の側面と下面で測定を行った。Fig.3 (a) に示す側面はS-1～3の3箇所 で測定した。S-1は2020年に塗替えを行った部分、S-3は40年間塗替えを行っていない部分、S-2は塗替え時期は不明であるが、見た目ではS-1とS-3の間の劣化度合いである。Fig.3 (b) に示す下面はB-1～5の5箇所 で測定した。40年間塗替えが行われておらず、B-1では表面に錆は確認できないがB-5に近づく程、錆の割合が増えている。なお、測定スポットに錆はなかった。各箇所の膜厚はTable 1の通りになっており、塗替えを行ったS-1の膜厚は他と比べて300 μm以上厚くなっている。塗膜表面はS-1を除いて白亜化しており、特にS-3とB-1～B5では元の色が確認できないほど進行していた。

橋梁の側面を測定した結果を Fig.4 に示す。Fig.4 (a) に示すように、払拭前は帯電中の電位はどの箇所でも200 V程度になり、電位差は生じなかったが、帯電後は、S-1に比べてS-2とS-3の電位の減衰が大きくなった。これは、S-2とS-3では絶縁性が低くなることで、電荷が抜けやすくなっていることを示している。つまり、経過年数が長く、外観評価による劣化度が大きいほど、絶縁性が低くなっている。一方、表面を払拭した後では、Fig.4 (b) に示すようにS-2とS-3で帯電後の電位減衰が見られなくなり、S-1と同程度となった。つまり、S-2とS-3の塗膜は、塗膜の表層部位が塗膜の絶縁性を低下させていたと考えられ



(a) 側面
(a) side



(b) 下面
(b) bottom

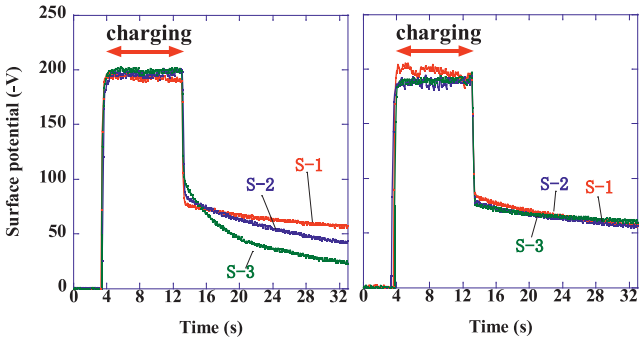
図3 橋梁 A の測定箇所
Fig.3 Measuring spot of the bridge-A.

表1 測定箇所の膜厚
Table 1 Film thickness of measurement spot.

Measurement spot	Side			Bottom
	S-1	S-2	S-3	B-1~B-5
Film thickness (μm)	580	230	200	180

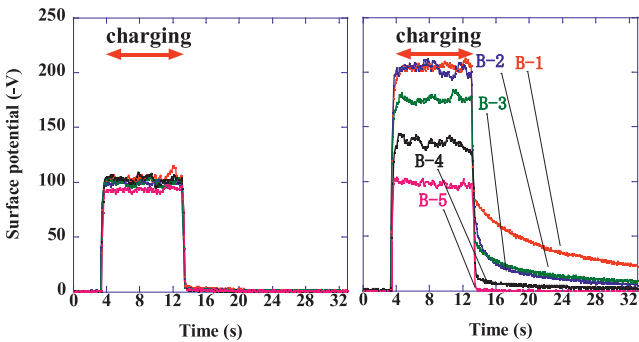
る。表面を払拭することで表層部位が除去され、下層部は絶縁性が高い状態であったことから、劣化は塗膜下層部まで進行していないことを示唆している。

橋梁の下面を測定した結果を Fig.5 に示す。表面を払拭する前は、Fig.5 (a) に示すように測定箇所 B-1～5 の全てで帯電中に 100 V、帯電後は 0 V になった。予備実験で金属などの導体を測定した時も同じ電位を示したことから、塗膜の絶縁性が完全に低下していることが分かった。接地した金属を測定しても 100 V の電位を示すのは、針電極に印加した電圧による電界の影響を受けているためと考えられる。白亜化した表面を払拭すると Fig.5 (b) に示すように、帯電時は B-1 と B-2 で電位が 200 V で飽和しており、B-5 に近づく程に低下した。帯電後の電位は B-2 よりも



(a) 払拭前
(a) Before wiping
(b) 払拭後
(b) After wiping

図4 橋梁 A 側面の表面電位
Fig.4 Surface potential at the side of the bridge A.



(a) 払拭前
(a) Before wiping
(b) 払拭後
(b) After wiping

図5 橋梁 A 下面の表面電位
Fig.5 Surface potential at the bottom of the bridge A.

B-1 方が高くなっているため、B-1 方が絶縁性が高いと考えられる。B-1 と B-2 の帯電中の電位が同じ原因については 4 章において考察する。

その他の箇所では、測定部周囲の錆の発生割合が大きくなるほど、表面電位が低くなっている傾向が見られる。つまり、錆が発生する程に劣化している塗膜では絶縁性が低下し、その変化を本測定法で検出できていることを示唆している。特に、B-5 では払拭しても払拭前と電位が変わらず、帯電しなかったため、塗膜が著しく劣化して母材保護の性能を保持していないことを示しており、直ちに塗替えが必要であると考えられる。また、B-4 は帯電後の電位が 0 V に近く、塗替えの検討が必要な状態であると考えられる。

3.2 瀬戸大橋

Fig.6 に示す瀬戸大橋は本州と四国を結ぶ世界最大の鉄道道路併用橋である。建設費は 1 兆 1,300 億円かかっているため、200 年以上の運用を目指しており、徹底した塗膜の維持管理が施されている^{13,14)}。膜厚はどれも約 500 μm と非常に厚く、過酷な環境でも劣化を予防する対策が施されている。2022 年時点で 34 年経過しているが橋梁 A とは



図6 瀬戸大橋
Fig.6 Great Seto Bridge.

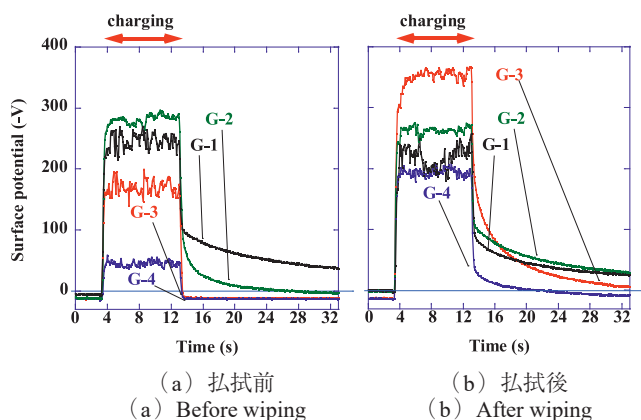


図7 瀬戸大橋の表面電位
Fig.7 Surface potential at the Great Seto Bridge.

見た目が異なり、錆はほとんど確認できない。現在、塗替え作業を行っているが、その全長の長さから全体を塗り替えるまで20年かかる。そのため、竣工当時の塗膜から塗替えた直後の塗膜まで存在している。この瀬戸大橋で経過年数が異なる箇所の橋梁塗膜を測定した。

Fig.7に示すG-1～4の4箇所で測定を行った。G-1は3週間前に塗替えが行われた箇所、G-2は2002年に塗替えた箇所、G-3は竣工時（1988年）の塗膜の見た目は異状が確認できない箇所、G-4はG-3の付近で小さい錆がみられた箇所の近傍である。

Fig.7 (a)に示すように払拭前の帯電中の電位はG-1、G-2に比べてG-3とG-4が大きく低下していることが分かる。帯電後はG-1の電位がG-2よりも高く、G-3とG-4ではどちらも0Vとなり、絶縁性が完全に低下していることが分かった。塗膜形成からの経過年数が増えるほど、絶縁性が低下していることが分かる。

払拭後の帯電中の電位はFig.7 (b)に示すようにG-3とG-4では大きく増加した。G-1とG-2ではどちらも帯電後の電位の減衰は緩やかで、絶縁性を維持していた。これは、払拭前は表面が劣化していたが、払拭により残った塗膜の

絶縁性は高いままであることを示している。G-3では印加電圧をゼロにした直後200V程度あった電位は大きく減衰して33秒時には約0Vになった。G-4では払拭後速やかに電位がほぼゼロまで減衰した。G-3とG-4では払拭しても帯電後の電位の減衰が大きく、経年劣化により塗膜の深層部まで劣化が進行している可能性がある。

4. 考察

Fig.5やFig.7のように帯電電位が変化する機構を把握するため、母材金属上の塗膜と測定プローブとの間でFig.8に示すはしご型一次元等価回路を考える。塗膜は表面抵抗と体積抵抗が分布定数回路の形で存在し、 $x=0$ の点でコロナ帯電し、 x 方向に電荷が移動することで、 x の大きさに依存して電位が変化すると考え、 $x=d$ で表面電位をプローブ側から測定しているものとする。単位長さあたりの塗膜表面層の表面方向の抵抗を $R_s(\Omega/m)$ 、厚み方向の抵抗を $R_p(\Omega/m)$ 、測定プローブと塗膜表面との間の空気部分の抵抗を $R_a(\Omega/m)$ とする。プローブと塗膜との間の距離は一定なので、 R_a は定数である。 x 方向に流れる電流を i 、電圧を v とすると i 、 v は x によって変化し、以下の式で表すことが出来る。

$$dv = -R_s dx \cdot i \quad (1)$$

$$di = -G_v dx \cdot v \quad (2)$$

ただし、 $G_v(S/m)$ は塗膜表面と接地との間の等価コンダクタンスであり、次式で与えられる。

$$G_v = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_a} \quad (3)$$

式(1)と式(2)より次式が導かれる。

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - R_s G_v v = 0 \quad (4)$$

$x=0$ のときの v を V_{x0} とすると、 v は次式で表せる。

$$v = V_{x0} e^{-\sqrt{R_s G_v} x} \quad (5)$$

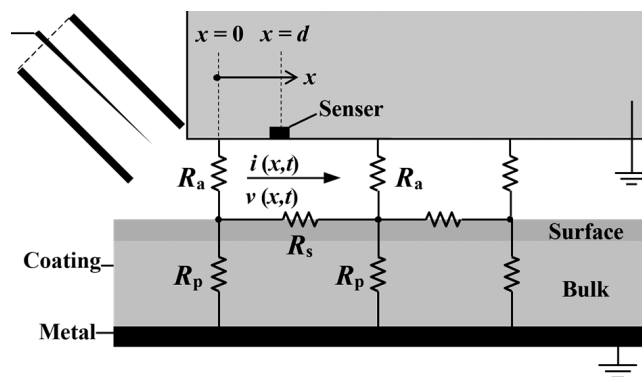


図8 はしご型回路モデル
Fig.8 Ladder type circuit model.

式(5)を式(1)に代入すると i は次式で表せる.

$$i = \sqrt{\frac{G_v}{R_s}} V_{x0} e^{-\sqrt{R_s G_v} x} \quad (6)$$

これより, $x = 0$ からみた塗膜の等価抵抗 $R_0(\Omega)$ は次式で与えられる.

$$R_0 = \frac{V}{i} = \sqrt{\frac{R_s}{G_v}} \quad (7)$$

帯電部の電位を推定するため, 針電極と塗膜表面との間のコロナ放電空間の等価抵抗を $R_n(\Omega)$, 円筒電極およびプローブと塗膜表面との間の等価抵抗を $R_c(\Omega)$ とすると, R_0 を含んだ帯電中の回路は Fig.9 で表され, そのテブナン等価回路は, 塗膜の等価抵抗 R_0 を負荷として Fig.10 (a) のようになる. このとき, 帯電中の塗膜表面の電位 e_1 は式(8)で表すことができる.

$$e_1 = \frac{R_0}{R_0 + R_c} V_e = \frac{1}{1 + \frac{R_c}{R_0}} V_e \quad (8)$$

ここで, 直列抵抗 R_c とテブナン等価電源 V_e は

$$R_c = \frac{R_c R_n}{R_c + R_n} \quad V_e = \frac{R_c}{R_n + R_c} V_n \quad (9)$$

で表される. 式(8)を変形し, R_c に対する R_0 の大きさとして抵抗比 Q を R_0/R_c で定義すると, テブナン等価電源 V_e で規格化された帯電中の電位 e_1^* は次式で与えられる.

$$e_1^* = \frac{e_1}{V_e} = \frac{1}{1 + 1/Q} \quad (10)$$

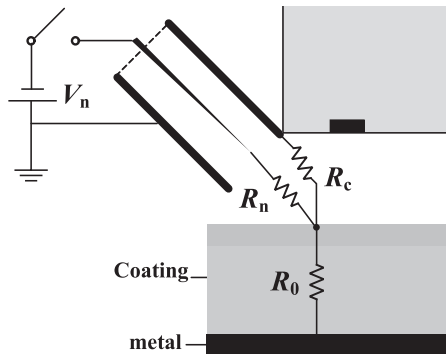


図9 プローブの等価回路
Fig.9 Equivalent circuit model for the paint probe.

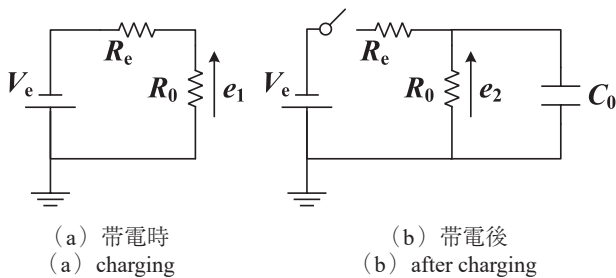


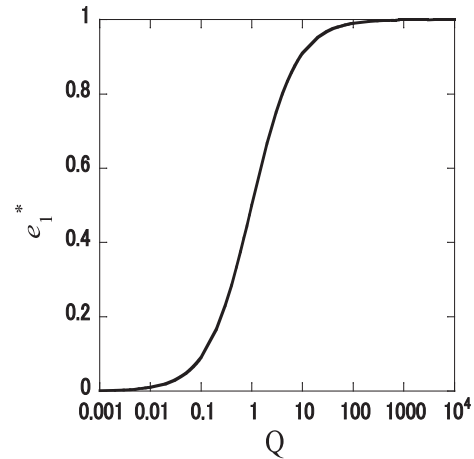
図10 テブナン等価回路モデル
Fig.10 Thevenin equivalent circuit model.

e_1^* と Q との関係を Fig.11 (a) に示す. 劣化により塗膜の R_s や R_c が変化すると Q が変化する (R_c は不変). e_1^* は Q が十分大きいときは1であるが Q が100 よりも小さくなると大きく低下しはじめ, Q が0.01 以下ではほぼゼロになることが分かる.

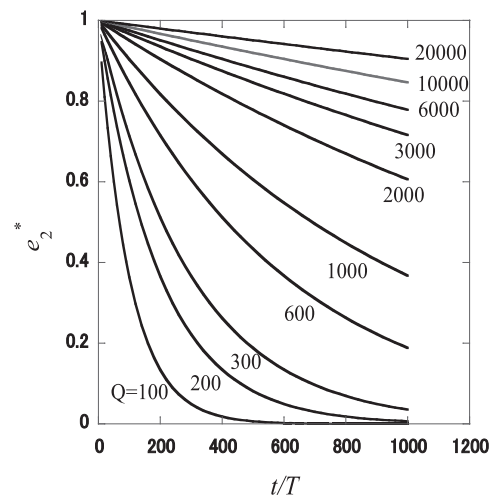
帯電後の電位変化は, 塗膜表面に蓄積した電荷の放電と捉えることができ, 塗膜の等価キャパシタンスを C_0 とすると, Fig.10(b)に示す回路でスイッチ S が切られた状態からの電位の時間変化を見ていることになる. これを e_2 とすると, 式(11)のように帯電直後の e_1 を初期値として時定数 $C_0 R_0$ で減衰すると考えられる.

$$e_2 = e_1 e^{-\frac{t}{C_0 R_0}} = \frac{V_e}{1 + \frac{R_c}{R_0}} e^{-\frac{t}{C_0 R_0}} \quad (11)$$

等価電源 V_e で規格化した e_2 を e_2^* として Q を再び導入すると, 式(12)が得られる.



(a) 帯電時
(a) Charging



(b) 帯電後
(b) after charging

図11 等価回路モデルの解析結果
Fig.11 Theoretical characteristics of equivalent model.

$$e_2^* = \frac{e_2}{V_c} = \frac{1}{1+1/Q} e^{-\frac{t}{C_0 R_0}} = \frac{1}{1+1/Q} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (12)$$

ただし、 T は $C_0 R_0$ で決まる時定数である。 Q が 100 よりも大きい範囲における e_2^* の時間変化を Fig.11 (b) に示す。 Q が 100 より大きくても、 Q の大きさに依存した帯電電位の減衰を観測することができる。このように、本測定法では Q が 100 を超える高絶縁塗膜では e_2 の減衰速さで絶縁性を確認し、 Q が 100 以下で e_2 が速やかにゼロになる低絶縁塗膜では e_1 の大きさを絶縁性を確認できることが分かった。

Fig.4 (a) および Fig.5 (b) において、帯電後の減衰に測定場所による差が見られるのに帯電中の電位が同じであるのは、 Q が大きいために e_1 が飽和しており、 e_2 によって絶縁性の違いが検出できていることを示している。また、Fig.4 (b) において e_2 にも差が見られなくなったのは、払拭により Q が増加して場所による絶縁性の違いが無くなったことを示している。Fig.5 や Fig.7 において払拭前の帯電中の表面電位が低下しているのは、塗膜表面の白亜化によって表面抵抗 R_s が十分小さくなることで Q が小さくなり、 e_2 がほぼゼロとなって、 e_1 が低下した状態であると解釈できる。表面を払拭した後の帯電中の表面電位が増加するのは、払拭によって R_s が大きく増加し、 Q が増加したためであることがわかる。なお、表面電位測定は針電極直下ではなく、 $x=d$ の位置で行っているため、式(5)からわかるように、 R_v があまり変化せず、 R_s のみが十分小さくなる場合には $x=0$ の電位と $x=d$ が同程度になることもありうる。Fig.7 (b) において G-3 の帯電時の電位が他よりも大きいのは、これが原因と考えられる。塗膜の劣化状況によっては、 R_v が変化せず、 R_s のみが変化する場合もあれば、 R_v と R_s の両方が変化する場合もありうるが、 Q の変化を捉えるだけでは区別できない。これを区別するためには、表面電位計を x 方向にもう一台追加し、表面電位の分布を測定することで評価する手法が考えられる。その手法については、今後の研究課題として取り組む予定である。

5. むすび

橋梁塗膜の劣化度を電気絶縁性の観点から数値化するため、ポータブル型のコロナ帯電電位測定装置を開発し、古い橋梁塗膜で実測した。また、測定系の一次元等価回路モデルを構築し、帯電電位の変化と塗膜の絶縁性低下との関係性を明らかにした。錆が発生している付近の塗膜や経過年数が長い塗膜は、絶縁性が低下することによって帯電中もしくは帯電後の電位が低下することが分かった。錆が発生する前に電位の低下を検知できるので、橋梁のライフサイクルコストの低減に貢献できる可能性がある。また、表

面をタオルで払拭する前後を比較することで、白亜化度合いを定量的に評価ができることが分かった。

今後は、測定データを増やすとともに、表面電位の測定点を増やして測定精度を向上させる方法について検討する。

謝辞

測定にあたり山形県 県土整備部、本州四国連絡高速道路株式会社の協力を得たことに謝意を表わす。なお、本研究の一部は 2021 年度 JST みちのくアカデミア発スタートアップ準備資金の支援を得たことを付す。

文献

- 1) 国土交通省：インフラメンテナンス情報
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html (2023-03-03)
- 2) 吉田豊彦：塗装の辞典，p. 34，朝倉書店（1980）
- 3) 本州四国連絡高速道路株式会社，株式会社ブリッジ・エンジニアリング：長大吊形式橋梁の建設・維持管理，p. 267，建設図書（2022）
- 4) 大藪権昭：塗料及び塗膜の電気的試験方法．色材協会誌，**47** [9]（1974）422
- 5) 小林弘明，山下勝也，林 直宏，片岡泰弘，興戸正純：各塗装鋼板の塗膜劣化現象とインピーダンス値との相関関係に関する研究．材料と環境，**64** [3]（2015）82
- 6) 森田さやか，増田清人，岩澤 昭，林 賢児：塗膜の劣化評価とカレントインタラプタ法を用いた判定技術．塗装工学，（2017）109
- 7) 磯 恭平，杉本俊之：コロナ帯電電位測定による樹脂塗膜の硬化度測定方法の開発．放電．プラズマ・パルスパワー合同研究会講演論文集，PPP-18-001，（2018）
- 8) 吉岡芳夫：大気圧バリア放電の応用．電気学会誌，**126**[12]（2006）798
- 9) 大友 涼，杉本俊之，野村信雄：プラズマ改質した背後接地付絶縁膜のコロナ帯電電位分布特性．第 44 回静電気学会全国大会講演論文集，p. 133，（2020）
- 10) 佐藤 京，西 弘明，岡田慎哉：塗膜表面の付着物が塗膜劣化に与える影響について．寒地土木研究所月報，**731**（2014）25
- 11) 河村達雄：がいし，p. 51，電気学会（1983）
- 12) 相澤 匡，森田さやか，岩瀬嘉之：塗膜下金属の劣化程度と電気化学的測定法の相関に関する研究．DNT コーティング技報，**11**（2011）19
- 13) 吉田 巖：瀬戸大橋と吊橋技術．日本工業教育協会誌，**36** [4]（1988）16
- 14) 楠原栄樹：供用後 25 年を経過した瀬戸大橋の維持管理．四国技報，**25**（2013）5