

〈技術資料〉

デジタル技術を活用した新たな耐食性評価装置の開発

Development of a New Corrosion Resistance Evaluation Apparatus by Using Digital Technology

石田 祐也*、設楽 恭弘*¹、三木 大輔*²

Abstract

Salt spray testing is often used to test the corrosion resistance of materials, but there are many issues to be solved. This paper presents the development of a system that combines several digital technologies to solve these issues. This system has been found to provide data that cannot be obtained with conventional testing apparatuses. That is, the time and place where the initial corrosion occurs and the speed at which the corrosion expands. It is suggested that this system can be used for the development of anti-corrosion materials such as paints.

キーワード：耐食性、塩水噴霧試験、デジタル技術、装置開発、自動化

Keywords : Corrosion resistance, Salt spray testing, Digital technology, Apparatus development, Automation

1. はじめに

金属はその優れた特長のために様々な用途、様々な場所で活用される。そのために金属材料が曝される環境も多岐に渡り、それらの影響によるダメージ、とりわけさびへの懸念が常に残る。さびは金属の酸化還元反応、いわゆる腐食により生じる生成物であるが、この発生により

上記の特長は損なわれ、外観も低下する。このさびに対抗するために数多くの金属材料の研究開発がされてきた。ステンレスやアルミニウム、ジュラルミン等は一般的に「さびにくい金属」と呼ばれるが、絶対にさびないわけではない。金属材料の“さびにくさ”の向上のために塗装等の表面処理が必要とされることは言うまでもない。このさびにくさの評価方法は複数存在し、中でも塩水噴霧試験は古くから実施されている。この試験を通じて雑貨から自動車や船舶まで、多彩な製品の開発が行われ多くの技術革新につながった。その一方で、この試験自体は技術的な変化、特にデジタル化の遅れが目立つ。

本稿では、塩水噴霧試験および試験機を概観し、上述の遅れを踏まえた課題を受け、筆者が開発に携わった新たな評価装置とその装置で得られるデータについて解説する。

2024年7月3日受付

*ISHIDA Yuya

地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター

*¹SHITARA Yasuhiro

板橋理化工業株式会社

*²MIKI Daisuke

千葉工業大学 情報科学部

2. 塩水噴霧試験とその課題

2.1 塩水噴霧試験とは

塩水噴霧試験は金属材料およびそれらに塗装やめっき等の皮膜を施した材料や製品の耐食性を評価する試験である。耐食性は材料の腐食に対する耐久性であり、その評価試験では多くの場合、人工的に作られた腐食を早める環境を用いる。学術的には多様な環境を構築し腐食を促進する。よく選ばれるものとして、試験体を腐食促進液に浸漬させる方法¹⁾や試験体上に腐食促進液を滴下する方法²⁾があるが、産業的には塩水噴霧試験機(図1)を用いた試験が選ばれることが多い。この試験では霧状にした塩水を充満させた槽内に試験体を静置し、腐食を促

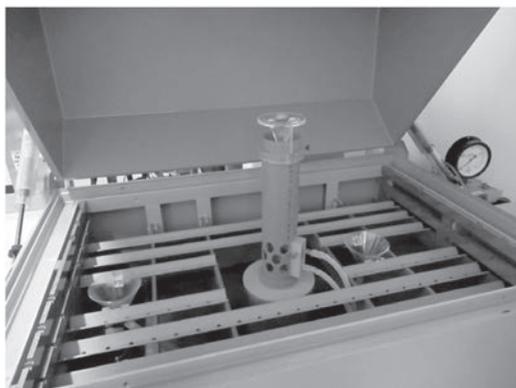


図1 塩水噴霧試験機

進させ、一定時間経過後の腐食状態を評価する。塩水噴霧試験から派生した試験に、塩水のpHを変化させたものや、高温低湿環境等を含めたサイクル試験もあるが、本稿では一定温度の槽内で中性の塩水噴霧を行うものを対象とする。

この試験を行う目的は新たな表面処理皮膜を開発する際の性能評価や、カタログ等を通じて顧客に性能を示すための品質証明等様々である。1914年に発表³⁾され、塩水の濃度等の見直しが行われつつ、戦時下を経て現在も実施されるこの試験は有用な試験として認知度も高い。この試験は国際標準であるISOや世界的に利用されるASTM、国家標準のJIS、ANSI、DINに加え、JASOやVDAといった業界や団体の規格、自動車や電子機器や船舶メーカーの社内規格等の規格に標準化されている。

2.2 塩水噴霧試験の需要と課題

試験および試験機への課題が生じるのは、現状のそれらが試験者の需要を満たしていないことが原因にある。ここでは課題に繋がる需要の例を挙げる。

需要の一つ目は試験結果の定量化である。2.1で示した各種規格では主として外観評価により腐食の程度を評価する。これは目視により行われ、さびの有無や外観変化への定性的な言及に留まることが多い。一方で、開発にフィードバックするためには定量的なデータが望ましいが現状ではその取得は難しい。また、塗装品の場合は試験体に予めクロスカットを行い、その部分から広がったさび等の幅の最大値を評価することがある。しかし、これもノギスやものさしを用いて目視で測定することが多く、分解能は1~0.1mm単位であり精度や個人差に懸念が残る。このほか、レイティングナンバー法も規格で定められているが、上述の懸念に大差はない。

二つ目の需要は途中観察の省力化/自動化である。省力化に対する需要は評価時より前、観察時から生じている。従来の塩水噴霧試験機は試験槽内を霧状の塩水で充満させるため(図

2)、試験機の内壁も液滴が付着する(図3)。このため、通常は試験槽外から試験体の観察はできず、観察の都度、試験者が噴霧を停止し、試験槽外に試験体を取り出し、必要に応じて試験体を水洗し、写真撮影をする必要がある。基本的にこれらの工程はすべて手作業で行われる。100時間ごとの観察を行う場合、観察を繰り返す過程でその実施時刻が変わり、いずれ夜間になり、試験者には大きな負担となる。これを避けるためにも自動での途中観察が必要となる。

三つ目の需要は試験体のさびの発生のタイミングや拡大の状況を詳細に知りたいということである。塩水噴霧試験を行う目的の一つにトラブルの原因究明がある。塗装品を納品した後ごく短時間でさびが生じてしまった等トラブルは多岐に渡る。その原因も①局所的に塗膜の薄い



図2 槽内に充満した塩水の霧



図3 槽壁面の付着液滴

部分があった、②ピンホール等の欠陥が生じていた、③付着性が弱い部分があった等、様々考えられる。このトラブルを塩水噴霧試験で再現検証する場合、いつ・どこからさびが生じたのか、どの程度の速度で進んだのか、塗装品の場合はさびとはがれはどちらが先に発生したか等の詳細を明らかにする必要がある。しかし、現状の塩水噴霧試験では上述の通り「一定時間後の腐食状態」を「目視評価」するしかできないため、詳細の究明は限度がある。

3. 腐食過程の可視化装置

3.1 腐食過程の可視化装置の開発

これらの需要に応えるため、板橋理化学工業株式会社との共同研究で腐食過程の可視化装置の開発に取り組んだ。装置開発の基本コンセプトは「試験結果の定量化」、「観察の省力化・自動化」、「腐食プロセスの解析」とし、5年以上の試行錯誤の末、2023年に完成した。

開発にあたり一番のネックとなったのが、いかにして試験中の試験体を撮影するかである。まず検討したのは学術的な検討でよく用いられている腐食促進液の断続滴下法であった。この方法は解放空間での撮影となるため撮影の自由度は高いが、従来の塩水噴霧試験とは腐食促進環境が大きく異なる。そのため過去の塩水噴霧試験のデータとの関連性の検討が困難であり、それらを重要視する産業的なニーズに応えるのが難しい。このことからこの方法は見送りとなった。

次に検討したのはカメラを槽内に設置する方法である。これは最もシンプルな方法といえるが、カメラ自体に高い耐食性が求められることは容易に想像できる。仮に耐食性に優れたカメラがあったとしても、カメラの前には濃密な塩水の霧が漂い、レンズにもその霧が付着するため鮮明な画像は得られない。

試験槽外から撮影する際にも槽内の塩水の霧を除去する必要がある。これには脱気等の方法が考えられるが、漂う霧を完全に除去できても槽壁面には液滴が付着しており鮮明な画像は期

待できない。壁面に付着した液滴の除去方法として例えばワイパーを使う方法が考えられる。脱気と合わせて用いれば槽内をある程度観察できる可能性がある。しかし、この方法でも①観察が終了し試験を再開した後に塩水の霧が十分広がるまでに時間がかかる、②装置自体も従来の試験機よりもかなり大掛かりなものになる、③試験体表面の液滴は除去できないため表面の腐食状態を鮮明に撮影できない可能性がある、といった難点がある。

以上の検討の結果、装置に求められるのは「腐食の促進には従来の試験方法と同様に塩水の霧を使い、試験槽内の霧、壁面と試験体上の液滴を同時に除去し、その除去に要する時間と試験再開までの時間が短く済む方法」であることを再確認した。ここで考えたのが従来の塩水噴霧試験を基本としつつ、観察時のみ試験槽に水を注水し試験体ごと浸漬してしまう方法である。この方法であればすべての霧・液滴は一度に除去することができ、さながら水族館の水槽の中を観察するように、槽内を鮮明に撮影することができる（図4）。

試験機は腐食促進部、可視化撮影部、画像解析部から構成される（図5）。腐食促進部は従来の塩水噴霧試験機と同様、JIS Z 2371に規定される中性塩水噴霧試験が可能な試験槽であるが、上述の注水・浸漬機構を有することや槽外からの撮影を実現するために壁面がアクリル製で透明であるといった特徴がある。可視化撮影部では注水により槽内が満水状態であるとセンサーで感知している間、試験体を照らす光源が点灯し、撮影を行う（図6）。画像解析部では解析ソフトを用いて、可視化撮影部で取得した画像データからさび部の色をHSV表色系に基づき定量値で取得する。このさびの色は一様ではなく、複数の画像中の複数個所から抽出するためある程度の範囲を持つ。本装置ではこの範囲をさび色定義範囲と呼ぶ。その後、指定した領域（関心領域）内の総画素数に対する、さび色定義範囲に含まれる画素数の比を「さび面積率」として算出する。



図4 注水による噴霧除去



図5 腐食過程の可視化装置と構成

以上のように、注水機構とセンサー、それに対応した自動の撮影機構、さらに画像解析といった今までの塩水噴霧試験法および試験機にあまり取り入れてこられなかったデジタル技術が多く活用されているのがこの装置の特徴である。



図6 撮影系（カメラと照明）

3.2 腐食過程の可視化装置の実用性評価

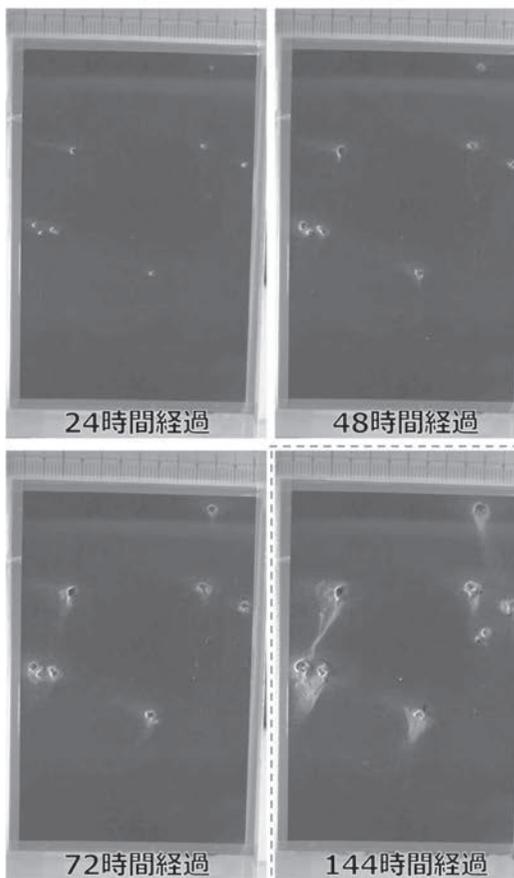
開発した装置が実用に堪えるものなのか、実際に使用して検討した結果を示す。

試験には2液硬化形アクリルウレタンクリア塗料を約 $4\mu\text{m}$ 塗装した銅板（ $100\times 67\times t 0.3\text{mm}$ ）を用いた。端部と裏面のマスキングを行い、アクリル板に貼り付け固定した。噴霧条件はJIS Z 2371（中性塩水噴霧試験）に準拠し、噴霧1時間中に一度、5分間の注水を行った。この5分間のうち、満水であった100秒間で撮影を行った。この断続的な注水・撮影を行う試験を72時間行い、その後、さらに72時間連続して塩水噴霧試験を行い計144時間経過後の撮影を行った。撮影された画像の赤さびを抽出した結果、赤さび定義範囲はHSV表色系のHが $0\sim 50$ および $340\sim 360$ 、Sが $25\sim 178$ 、Vが $70\sim 255$ に収まることが分かった。

撮影結果の画像を図7に示す。自動での撮影によるものだが、試験体もほぼ動かず、照明等の撮影条件も安定していたことが見て取れた。今回は膜厚が比較的薄く、表面に異物がある試験体を選択したため24時間ですでにさびの発生が認められた。一般的な品質の塗装品の場合も同様に撮影可能だが、十分な腐食が進むまでに数百時間から数千時間かかり長時間になることが予想できる。今回は1時間毎の観察としたが、1回あたりに取得されるデータは50~100MBほどであり、観察回数が増えると膨大な記



試験前（0時間）



24時間経過

48時間経過

72時間経過

144時間経過

図7 開発装置による撮影結果

憶容量が必要となる。適切な観察周期を選択することが重要といえる。

赤さびの抽出結果を図8に示す。144時間経過時点の元の画像（左）と比較して、抽出結果

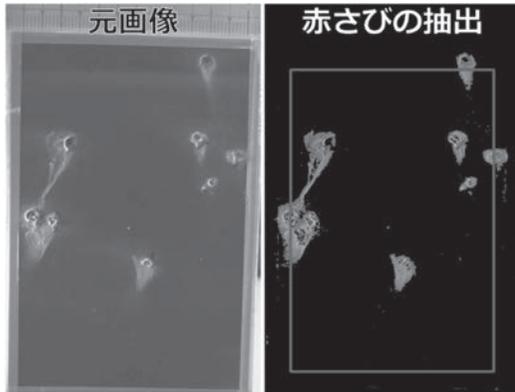


図8 さびの抽出

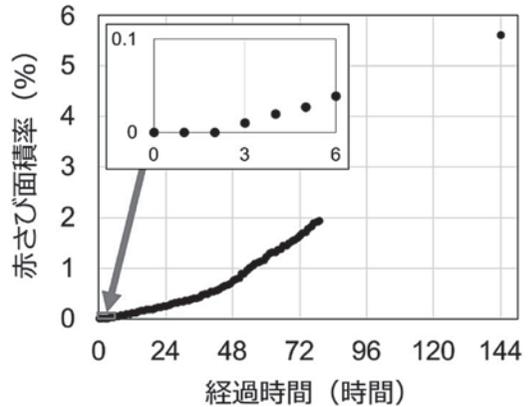


図9 さび面積率の推移

の画像は目視の判定にもよく対応した赤さびの抽出ができてることが見て取れる。クリア塗装ではない一般的なエナメル塗装品でも同様の結果は得られるが、赤系色の塗装品については、塗装色が赤さびの定義範囲に含まれてしまいこの方法では検出できないことがある。その場合は画像間の差分処理を予め行うことが有効である。これは試験前（0時間）の画像と試験後の画像とで、同じ座標の画素のRGB値の差分を取り、変化が生じた画素をもとにさびを検出する方法である。この方法は各画素の元々の色によらず、目視で判定できるようなさびであれば多くの場合抽出できる。

最後に、1時間ごとに撮影した画像を解析して得た赤さび面積率の推移を図9に示す。なお、今回の関心領域は図8右図の長方形の枠で示した試験体中心付近の領域（約55×84mm）とした。グラフから3時間経過後に初めて赤さびが検出され、そこを起点にさび面積の増加が始まったことがわかった。逐次定量化することで、従来の途中観察、すなわち図7に示した24時間隔や1週間間隔の観察よりもさらに細かな時間分解能で初期腐食時刻を明らかにすることができる。また、従来の途中観察では初めてさびを検出した段階でもすでにある程度さびが広がってしまっていて、どこから生じたか特定できないことがほとんどであった。開発した装置を用いて初期腐食時刻を特定し、そ

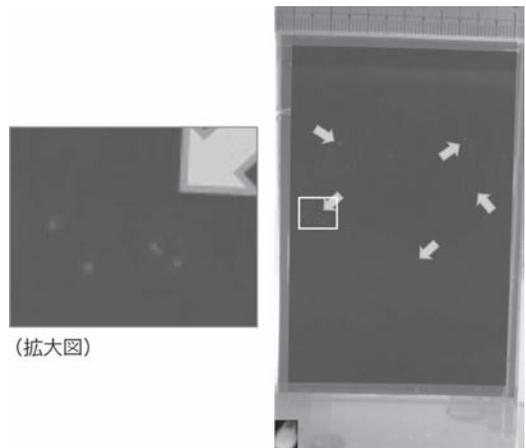


図10 初期腐食発生時点の試験体（3時間経過）

の画像を確認することで腐食の起点となった場所も明らかにできる（図10）。また、初期の腐食検出以降のグラフの傾きから腐食の進行速度を明らかにできる。

この装置で塗装品の腐食過程を評価することで、他にも様々なことを明確にできる。塗装品の初期腐食点を明らかにすることで、その起点は膜厚が薄かった、塗装欠陥があった等の弱点を特定するきっかけになる。これにより塗装品質の評価、例えば品質のばらつきを評価する一つの基準にもなる。また、この装置を用いれば腐食プロセスも評価項目に加えることができる。従来の評価方法は耐食性の相対比較をする場合、試験終了時の腐食状態（さび幅等）のみで優劣

を判定する。しかし、十分時間経過して一面に著しいさびが生じている場合、もしくは試験終了時点では比較対象と同程度の腐食状態である場合、優劣の比較ができないことがある。こうした場合でも初期の腐食発生までの時間や広がっていく速度を比較することが優劣の判断の材料となる。

3.3 今後の装置開発

この装置を利用した耐食性評価はまだ研究の途中である。例えば、観察のために行う注水がどの程度腐食進行に影響するか、従来の連続塩水噴霧試験の結果とはどのような関係性になるかは検証の最中である⁴⁾。これと並行して、更なる耐食性評価項目の充実、とりわけ塗装品に特化した評価・解析技術の開発も進めている。

例えば、2.2で述べたさび幅の自動測定を検討している。そもそも、さび幅を定義するためには、試験前に施すクロスカットの位置と、そこからもっとも離れた場所まで広がったさび位置を明らかにする必要がある。このさび位置を決める際にも個人差が生じ、この解消のために試験後の試験体を用いて画像解析を行う場合でも十分に腐食が進んでしまうと、クロスカットの位置を特定できない別の問題が生じる。本装置では試験体の移動がほとんどなく、腐食過程を逐次追跡できるために、初期のクロスカット位置をソフトウェア上で定めた後は、さび部を逐次解析しそこからさび幅を自動で測定してい

くことが可能になる。このほかにも、照明による陰影の検出を用いた、膨れ等の立体的な変化の評価や、機械学習を用いた腐食予測の実現に向け検討を重ねている。

4. おわりに

本稿では塩水噴霧試験および試験機についての現状と課題を述べた。その解決策の一例として、新たに開発した装置とその検討結果を示した。従来の装置では得られないデータも多く得られ、実用性の高さが示唆された。

古くからある「腐食とさび」の課題も、日々進化するデジタル技術を活用することで容易に解決できることがある。塗料をはじめとした種々の耐食性材料の研究・開発が躍進するためには、古くから用いられてきた評価手法を、改めて見直し、アップデートすることは重要であるといえる。

引用文献

- 1) 例えば、斉藤 嵩, 平賀 拓也, 千葉 誠, 柴田 豊, 高橋 英明: 材料と環境, **63**, 570-574 (2014)
- 2) 例えば、武藤 泉, 紀平 寛: 材料と環境, **44**, 505-512 (1995)
- 3) J. A. Capp: Proc. ASTM, **26**, 985-988 (1914)
- 4) 石田祐也 他: 第174回 日本金属学会 2024年春期大会 講演予稿集 Web No.14 (2024)