

製品寿命の腐食・防食

北海道大学客員教授

藤田 栄 Sakae Fujita

1. はじめに

世界人口は1950年25億人、2000年61億人、2023年80億4500万人と増加し、その間製品生産量も増大し大量消費時代は現在も続いている。製品の生産、流通、消費は経済活動を活性化し、世界の高度経済発展を支えてきた。その一方で地球資源は徐々に枯渇化し、国際間の資源獲得競争は年々激しさを増している。20世紀には、大量に生み出された製品の多くがその物理的寿命に達する前に廃棄されていた。このまま放置すると人類存亡の危機が来ることから、21世紀になり持続可能な社会システムの構築が世界的に強力に打ち出されてきた。人類が今後も安心・安全に生存するためには、限られた資源およびエネルギーを有効活用していく必要がある。構造材料の防食技術は、構造物の長寿命化を支える重要技術分野であり、資源採掘からリサイクル・廃棄までの腐食劣化現象を定量的に予想する腐食試験法と信頼性評価技術の開発が求められている。

ここでは、製品寿命の定義、耐久消費財の寿命、構造材料の寿命予測の実際を紹介し、今後の製品寿命と腐食・防食の技術開発の方向性について述べる。

2. 製品寿命

(1) 製品寿命の定義

表1は製品寿命の定義をまとめたものであ

る。Cooperら¹⁾は製品寿命の決定要因は、故障等による「絶対的陳腐化」と、「心理的陳腐化」「経済的陳腐化」「技術的陳腐化」の4種類に分類した。「絶対的陳腐化」は製品の物理的耐久性に起因するものであり、そのほかの3つは

「相対的陳腐化」であるとしている。小口も²⁾上記と同様の概念で製品寿命を「物理的寿命」「心理的寿命」「経済的寿命」「技術・機能的寿命」に分類している。物理的寿命は製品がその機能を物理的に発揮できなくなるまでの期間で、他の3つはそれぞれ消費者心理、経済、技術・機能の側面から製品価値が相対的陳腐化によって決定される寿命で「価値寿命」として分類できると報告している。製品寿命は製品が作られてから用をなさなくなるまでの期間を指すと言えるが、その始点と終点によってさまざまな異なる製品寿命を定義することができる²⁾。例えば、製造された製品が廃棄されるまでの寿命（総製品寿命）や、製造された製品を購入した第一保有者が製品を手放すまでの寿命（製品年齢）等、使用する目的によって寿命の定義は異なっている。

表1 製品寿命の定義^{1),2)}

寿命分類		内容
物理的寿命	絶対的陳腐化 (絶対的) Absolute obsolescence	製品がその機能を「物理的」に発揮できなくなるまでの使用期間
心理的寿命	心理的陳腐化 (相対的) Psychological obsolescence	美観的な劣化により心理的に魅力を感じない、または満足していない製品の使用期間
機能的寿命	技術的陳腐化 (相対的) Technical obsolescence	新製品と比較してその機能等が劣っていると感ずることで、保有者が製品に価値を見出さなくなる使用期間
経済的寿命	経済的陳腐化 (相対的) Economic obsolescence	経済的陳腐化は保有し続けることに経済的メリットがないと判断されるまでの使用期間

(2) 主要耐久消費財の寿命と買い替え理由

表2³⁾は、2020年度のわが国の主要耐久消費財の平均使用年数と買い替え理由を調査した結果である。買い替え前に使用していたものの平均使用年数をみると、最も長いものはルームエアコン（13.2年）、電気冷蔵庫（12.9年）、電気洗濯機（10.2年）、カラーテレビ（10.0年）であり、買い替え理由は物理的寿命の故障が多い。一方、平均使用年数が最も短い品目は、デジタルカメラ、携帯電話で、買い替え理由は上位品目への移行である。乗用車は、買い替え理由が故障と上位品目への移行とがほぼ同じである。この調査では、第一所有者を調査対象としているが、自動車の多くは中古車として使用されて廃棄される。図1は、2021年の乗用車の平均車齢と平均使用年数を示したものである。平均車齢とは自動車の初度登録から中古車として売るまでの第一所有者の保有期間の平均である。平均使用年数は自動車を初度登録してから廃車するまでの平均年数である（表2の平均使用年数とは定義が異なる）。この40年で乗用車の平均車齢、平均使用年数は約2倍に伸びていることが分かる。乗用車が廃棄される平均使用期間は、2021年でルームエアコンを超えている。乗用車の最終廃棄の理由について

では文献情報を見つけられなかったが、乗用車の廃棄時における故障の割合は表1の第一所有者の買い替え理由の故障（23.3%）より遥かに大きくなっていると推定される。

(3) 住宅の寿命

図2⁴⁾は、住宅寿命が無くなった（滅失）建物についてまとめた資料で、日本の住宅は、1990年代から大きな変化はなく平均使用年数は約30年であり、未だに1世代1住宅のサイクルで住宅建設が行われていることを示している。一方、米国は66.6年で2世代1住宅、イギリスは80.6年であり約3世代1住宅で住宅建設が行われている。住宅建設には膨大な資材、人件費が必要であり、ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点でも住宅の長寿命化は一つの大きな課題であり、住宅の長寿命化へ向けて住宅用材料や住宅構造に関わる認定制度の改革が進められている。

(4) 社会資本の寿命

図3⁵⁾は建設後50年以上経過する社会資本

表2 わが国の主要耐久消費財の買い替え状況（二人以上の住居）³⁾

品目	平均使用年数(年)	買 替 え 理 由 (%)				〈参考〉普及率(令和3年3月末現在)
		故障	上位品目への以降	住居の変更	その他	
ルームエアコン	13.2	65.3	13.1	5.8	15.8	92.2
電気冷蔵庫	12.9	55.1	18.5	6.2	20.2	—
電気洗濯機	10.2	75.4	9.1	3.8	11.8	—
カラーテレビ	10.0	61.9	28.1	3.9	6.1	96.2
乗用車(新車)	8.9	23.3	27.8	—	48.9	61.7
光ディスプレイ・レコーダー	8.7	68.2	21.9	2.0	7.9	74.2
ビデオカメラ	8.3	60.7	21.4	7.1	10.7	36.4
電気掃除機	7.2	61.2	24.1	3.4	11.3	—
パソコン	6.8	46.6	26.9	0.9	25.6	78.5
デジタルカメラ	6.2	37.7	39.6	1.9	20.8	59.4
携帯電話	4.3	36.5	33.8	0.1	29.7	95.8

図1 自動車の平均車齢と平均使用年数の推移

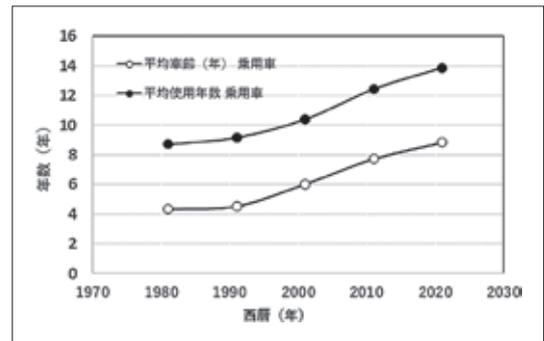
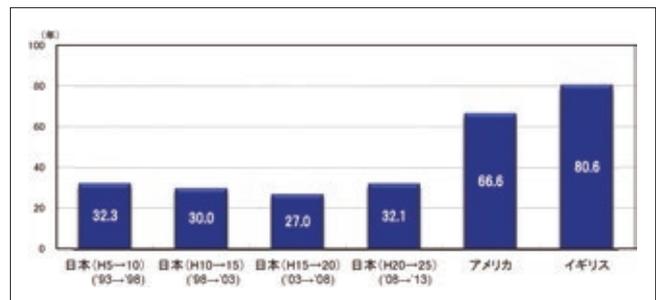


図2 滅失住宅の平均築後年数の国際比較⁴⁾



の割合を示したものである。高度成長期以降に整備された道路橋、トンネル等について、今後20年で建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなると予測されている。これら構造物はコンクリート構造物、鋼構造物からなり、腐食が劣化の主要因である。

3. 構造物材料の腐食寿命予測技術と腐食試験法の功罪

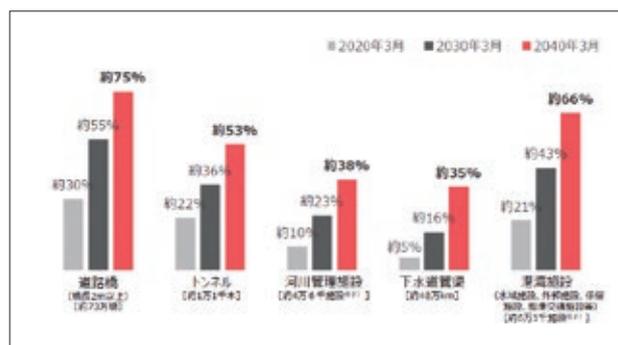
(1) 構造物材料の腐食寿命予測技術

腐食は材料と環境との化学反応であり、それらが直列、並列に絡み合って進行する複雑系の化学反応である。10年以上の長期使用の構造物、装置で起きている腐食の寿命をタイムマシンのように再現して総合的に予測することは非常に難しい。そのため多くの場合、実環境での暴露試験や実機での事故事例を解析して材料の選択を行うことが多い。それは確度の高い予測技術である。既存材料では過去のデータベースを活用してDX解析することにより寿命予測は可能である。しかし新しい材料を採用しようとするときには、この方法は適用しにくい。そのため何らかの腐食促進試験により材料の耐食性評価をして材料選択を行う必要がある。

(2) 腐食試験法の目的

腐食試験の使用目的は、品質管理（工場出荷検査、受入検査等）と材料評価（材料開発試験、材料施工性試験、腐食クレーム再現試験、腐食機構説明試験等）に大別される。高度成長期の大量消費時代には物理的寿命に達する前にほとんどの製品は廃棄されていたため、その時代には腐食試験は実環境を再現していなくても工業的な取引での品質管理試験としての位置づけで済んでいた。一方、材料評価として腐食試験を適用するときには、実環境との相関性が不可欠である。

図3 建設後50年以上経過する社会資本の割合⁵⁾



(3) 材料選定における腐食試験法の失敗例

品質管理として規格化された腐食試験をそのまま実環境の耐食性評価試験として使用したため、その結果その選定材料は使用環境でその耐食性を発揮しなかった事例が多い。そのため、腐食試験法による材料選定の失敗は、材料の製造メーカーとその材料を適用した会社ともに大きな経済的損失を受ける。

塩水噴霧試験（JIS Z 2371）は塗装や金属表面処理等の品質管理試験として広く使われてきた。しかし、1970年頃から、塩水噴霧試験法が大気環境での塗装耐食と金属腐食を再現していないことが明らかとなり⁶⁾、数多くの大気腐食試験法が開発された。図4に自動車分野における腐食試験法の変遷の一例を示した。その時代に採用された材料に合わせて、試験法が改定されてきた。それぞれの腐食試験法で選定された材料の耐食性優劣は必ずしも一致しなかったため、適用材料も紆余

図4 世界各国の自動車用腐食試験法の標準化の変遷

	1980	1990	2000	2010	2020 現在
米国		●1984: SAE/ACAP (プロジェクト)	●1998: SAE J2334(外観)	●2002: SAE J2334(穴あき)	
ドイツ	●1982: VDA-WT 621-415 (Daimler Chrysler Testing)				●2013: VDA-233-102 (DC-欧州共同)
北欧 (スウェーデン)			●1995: VICT 1027, 1449ACT, VICT1027, 1449ACT 2,	●2008:	
日本			●1991: JASO M 609:材料試験方法	●1992: JASO M 610:自動車部品	改訂中
備考	塗装鋼板	→	亜鉛めっき鋼板適用増大	→	鉄鋼、非鉄金属他 (マルチ構造)

曲折の変遷をたどった。我が国でも自動車用腐食試験法 JASO M 609、JASO M 610が制定されたが、この腐食試験法が実車腐食との再現性が低いことから、自動車メーカーでほとんど採用されていなかった。そのため、現在自動車メーカー、材料メーカー、防錆剤メーカーが共同で2024年4月の発行を目指して規格改定の活動を行っている。

4. 材料選定における腐食試験法適用の成功例

(1) 革新的新構造材料等研究開発プロジェクト⁷⁾

自動車車体の超軽量化を目的に、2013年に経済産業省の革新的新構造材料等研究開発プロジェクトは、新構造材料技術研究組合(以下、ISMA という)の設立の下で発足し、2年目から新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクト(以下、本プロジェクトと記す)として展開された。プロジェクト前半(2013年度~2017年度)で鋼材の高強度化とアルミ(合金)等の非鉄金属、熱可塑性炭素繊維強化プラスチック(CFRTP)等の革新的な新軽量材料の開発およびそれらの接合技術開発を実施して、プロジェクト後半(2018年度~2022年度)でマルチマテリアル構造車体の設計とマルチマテリアル技術の開発研究が行われた。車体のマルチマテリアル化において重要となる異種材料で発生するガルバニック腐食の解析・評価の開発研究はプロジェクト後半で実施された。「マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発」(2019年度~2022年度)^{8),9)}で、実環境腐食を再現し、我が国初となる共通腐食評価法を設計して材料表面、化成処理、接着剤等の技術開発や接合・加工技術を組み合わせた異種材料接合での最適な防食表面処理技術を提案するための研究開発が実施され

た。さらに、マルチマテリアル車体のガルバニック腐食を数値シミュレーションで再現し定量的に腐食を評価するために「マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食シミュレーション技術の開発」(2021年度~2022年度)^{8),10)}で我が国初となる自動車車体の腐食シミュレーション技術開発が実施された。

(2) マルチマテリアル構造車体のガルバニック腐食の実車走行試験

革新的新構造材料等研究開発プロジェクトでは、自動車車体固有のガルバニック腐食現象の把握を目的として、まず腐食環境が厳しい北欧融雪塩散布地域においてマルチマテリアル接合試験片を取り付けた実車走行腐食試験を行い、それに基づいて再現性の高い腐食試験法を開発した。実車走行試験は、スウェーデンストックホルムとヨーテボリ(北海側)との間を走行する貨物車のトレーラ下部にマルチマテリアル構造の板重ね構造のモデル試験片を設置して実施した。供試材料は高強度鋼板(980 MPa、以下 Fe と記す)、アルミニウム合金 Al6016(以下、Al と記す)、熱可塑性 CFRP(CFRTP、以下 CF と記す)である。

(3) 融雪塩散布地域を対象としたガルバニック腐食再現試験法の設計

2020年にスウェーデンストックホルムとヨーテボリとの間での走行試験での環境測定に基づいて、温度・湿度は絶対湿度で間欠的に NaCl と CaCl₂ の質量比が5:1の模擬融雪塩を試験片表面に付与するガルバニック腐食再現試験法を設計した^{8),9),11)}。

(4) ガルバニック腐食試験法の実車相関性

図5⁹⁾は実車走行試験と新ガルバニック腐食試験法とで得られた各種ガルバニック腐食試験片(板合わせ構造)の隙間内部に発生し

た腐食深さの最大値の相関を示した結果である。図中で各ガルバニック組み合わせ（○○/○○）で赤字が測定データ側を示している。図から明らかなように本試験法は北欧融雪塩散布地域での実車腐食の再現性が非常に高いことが分かる。

(5) マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食シミュレーション技術の開発研究^{8),10)}

本プロジェクトでは、ガルバニック腐食現象の数値シミュレーション技術を開発するため、「マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食シミュレーション技術の開発」（2021年度～2022年度）を産官学連携で実施した。研究期間が短かったために、開発対象はFe/Alのガルバニック対に限定されたが、実車と相関性の高いFe/Alの一部の部位でガルバニック腐食のシミュレーション技術と境界条件を見いだすことに成功した。

5. 終わりに

製品寿命の定義と腐食寿命予測技術失敗例と成功例を紹介した。腐食は複雑系の化学反応である。実験に使用した腐食試験条件の違いによって腐食機構が異なり、材料の優劣も大きく異なることが多い。腐食評価の基本は急がば回れである。まずは実環境での腐食現象とその腐食機構を調査、解析することから始めることが肝要である。筆者が関わったISMAプロジェクトでは、実車走行試験により腐食環境を明らかにして、それに基づいて実環境相関性の高い腐食試験法を開発したことは、実験室でのマルチマテリアル構造材料のガルバニック評価においてゆるぎない研究開発の軸となった。

近年、SDGs（持続可能な開発目標）が人類存続のために必須条件として社会的にも定

着するようになってきて、材料も無駄なく使い切る時代に入ってきた。近年のDXの進化は、腐食防食の分野でも既存材料の環境適合性評価の寿命予測を可能にするであろう。また、材料開発も、

実環境再現性の高い試験法による腐食機構と境界条件を取得して、近い将来、計算科学に基づいて新材料が開発される時代が来ることを期待する。

参考文献

- 1) Cooper T.: J. Consume. Policy, 27, 421-449, 2004.
- 2) 小口正弘：日本LCA学会誌, 14 (1), 64-69, 2018.
- 3) 内閣府経済社会総合研究所景気統計部：経済社会総合研究所景気, 消費者動向調査（令和3年3月実施調査結果）, p9, 2021.
- 4) 国土交通省：我が国の住宅ストックをめぐる状況について（補足資料）p40. <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001323215.pdf>（参照日：2023年9月19日）.
- 5) 国土交通省社会資本の老朽化対策情報ポータルサイト：社会資本の老朽化の現状, 2020. https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/roukyuukanogenjou.pdf（参照日：2023年9月19日）.
- 6) 黒川重男, 番展二, 大和康二, 市田敏郎：鉄と鋼, 72, 1111, 1986.
- 7) 岸輝雄監修, 新構造材料技術研究組合編著：革新構造材料とマルチマテリアル—上巻 技術概論, 株式会社オーム社, 2023.
- 8) 藤田栄, 前掲 革新構造材料とマルチマテリアル—上巻, p126
- 9) 小崎匠, 岸輝雄監修, 新構造材料技術研究組合編著：革新構造材料とマルチマテリアル—下巻 プロジェクト成果総覧, 株式会社オーム社, 208, 2023.
- 10) 片山英樹, 藤本慎司, 前掲 革新構造材料とマルチマテリアル—下巻, p 214
- 11) 小崎匠, 革新的構造材料研究開発2022年度成果報告会, T65, 2022.

ふじた●さかえ

1980年北海道大学工学部応用化学専攻修士課程修了。日本鋼管(株)入社、2000年大阪大学大学院工学研究科大学院学位取得、JFE スチール(株) スチール研究所表面処理研究部長、研究主席を経てJFE テクノリサーチ(株) シニアフェロー。2020年新構造材料技術研究組合プロジェクトマネージャー、2023年同プロジェクト解散に伴い退職。現在、北海道大学大学院工学院客員教授、ISO TC156(金属および合金の腐食)国内審議委員長等標準化に関わる各種委員会委員。

図5 最大腐食深さにおけるトレーラ走行試験とガルバニック腐食試験法との相関性⁹⁾

