

特別講演

□浅田賞受賞記念

腐食・防食技術の研究開発と普及

R & D and Diffusion of Corrosion Engineering

松島 巖
Iwao Matsushima

前橋工科大学 客員教授

1 緒言

腐食防食についての研究開発および知識、技術の普及は、鉄鋼製品を効果的に使用するうえで不可欠である。筆者は「腐食・防食技術の研究開発と普及」の功績に対し本会の浅田賞受賞の誉に浴したが、これを機会に受賞題目についての経験を振り返り、所見を述べてみたい。

2 腐食防食研究開発と普及の経緯

筆者がこの分野に入った1960年頃からの我が国の社会の動向と腐食防食研究開発の経緯をまとめると、表1¹⁾のようになる。

1960年代は高度経済成長が本格化した時期であり、建設、建築、化学などに向けた高張力鋼の開発が盛んであった。より薄い肉厚で所要の強度を達成するという高張力鋼の特性上、用途によっては耐食性が重要であり、耐候性鋼、耐海水鋼などの低合金耐食鋼の開発が進んだ²⁾。初期の耐候性鋼は主として建築物の外装に利用されたが、当時の厳しい大気汚染の影響を受けてさび層の安定化は必ずしもスムーズに進行せず、利用はあまり拡大しなかった。

高張力鋼の利用において、ある種の使用環境で腐食割れを生じることが問題となった。粗製プロパンガス貯蔵タンクの硫化物応力腐食割れや高力ボルトの遅れ破壊がその典型である。対策研究も進められたが、基本的には割れ感受性の低いより低強度の鋼材を用いるという後退を余儀なくされた。

1970年代、大気汚染対策が進められ、排煙脱硫装置、重油脱硫装置などで腐食が問題となる部位の材料的対策が研究された。1974年、米国に端を発し世界に広がった沸騰水型発電用原子炉のステンレス鋼配管の応力腐食割れの解明および対策の研究は、10余年の歳月にわたり世界的に大規模に行われた。

1973年の第1次石油ショックによって、低成長時代に入する。経済的負担低減のために防食は重要となり、腐食モニタリング、寿命予測などが研究され導入された。また、川砂の枯渇に伴って1965年頃から使用が増加した海砂の洗浄不良による鉄筋の腐食(塩害)が問題となり、細骨材中の塩分の許容濃度が研究され設定された³⁾。

1980年代は、防食技術の多様な進展があった時期である。石油ショックに対応して米国などで油田開発が盛んとなり、腐食性の高い深井戸が多かったことから鉄鋼会社では耐食性油井管の研究開発が重要テーマとなった。

低経済成長に伴って問題化した道路橋の塗替え費用負担の圧迫の対策として、無塗装耐候性鋼の利用が始まり、急速に増大して行った²⁾。これには、建築物への利用のために行われた構造要素の最適化研究⁴⁾が役立った。また耐候性鋼の適正な使用のため、環境大気中の飛来塩分量の許容値設定が必要となった。建設省土木研究所(当時)、鋼材倶楽部(当時)、日本橋梁建設協会の10年に及ぶ共同研究により、許容値は $0.05\text{mgNaCl/dm}^2/\text{day}$ と設定され、これを満足する離岸距離が地域別に規定された。

本四橋の建設に伴う防食塗装は1980年代に進んだが、100年の耐用年数に対応して塗替えを最低限とするため、20年近い試験や検討に基づいた重防食塗装系が採用された。重防食塗装系の採用は、本四橋以降の海上長大橋に定着することになる。

社会資本整備が早かった米国では1965年頃からの緊縮予算の結果メンテナンスが不十分となり、この時期になって『荒廃するアメリカ』⁵⁾を招いたが、我が国でも早くから整備が進んだ港湾設備の腐食などによる劣化がこの頃から顕著となり、防食強化のために、ポリエチレン被覆などの防食杭が開発され、採用された。

一方、北米などでの融雪塩散布による自動車の腐食に対する消費者保護のために、1980年頃から北米および欧州でい

表1 腐食防食研究開発の経緯

	社会動向	研究・開発
1960年代	- 高度経済成長（1955～1973） 社会資本整備 海洋開発 - 高張力鋼材の利用拡大と腐食割れ問題 - 大気汚染の激化	- 低合金耐食鋼の開発 耐候性鋼利用技術の開発 さび層の研究 陸防研全国大気暴露試験（1960～1966） 耐海水鋼の開発 耐硫酸露点腐食鋼の開発 - 高張力鋼材の腐食割れ研究、対策鋼開発 耐サワー油井用鋼管の開発 高力ボルト遅れ破壊の研究調査 LPG貯蔵タンク硫化物割れ対策 - 大気腐食激化への対応
1970年代	- 大気汚染対策 公害関係14法（1970） - ごみ焼却炉建設増加 - 沸騰水型原子炉応力腐食割れ（1974～） - 第1次石油ショック（1973）、低成長時代へ - 鉄筋コンクリート塩害（海砂）	- 公害防止機器の腐食対策 排煙脱硫装置用材料の選定 重油脱硫熱交用材料の開発 ポリチオン酸応力腐食割れの研究 SUS 321の改良 - ごみ焼却炉の腐食、熱交用材料の研究 - 沸騰水型原子炉応力腐食割れ対策 高温水応力腐食割れの研究 耐粒内割れステンレス鋼開発 割れ対策（溶接法の開発、原子炉運転の改善） - 防食管理の強化 腐食モニタリングの研究・実用 腐食損失調査（1976～77） 統計的手法、寿命予測の導入 - トータルライフエコノミー重視 - 鉄筋腐食の研究 塩分許容量の決定（1975～1978）
1980年代	- 諸外国における油田開発（深井戸→腐食性大） - 北米で自動車さびコード発布（1980） 融雪塩による腐食対策 - 埋設LP管、水道管の腐食・漏洩の問題化 - 道路橋塗装管理費増大 - コンクリート橋の塩害（1982） （海塩粒子） - 長大橋の建設、耐用100年時代へ 瀬戸大橋開通（1988） - 港湾設備老朽化問題 - 建築物の美観・耐久性重視	- 耐食性油井管の開発（1980～） 高合金鋼耐食特性の研究 - 自動車防錆強化（1980～） 自動車用防錆鋼板開発 自動車用塗料・塗装法の改良 - 基準・ガイドライン作成（1981～82） 防止対策の普及 - 裸耐候性鋼橋梁の建設増加（1980～） 利用技術の研究 適用可能地域の決定へ（1981～93） - 塩害対策の強化 施工法・診断技術・補修法の進歩 - 重防食塗装の採用 塗膜の点検・診断法研究 - 防食の強化 防食杭の開発（ポリエチレン被覆など） - ステンレス鋼、チタンの採用（屋根など） ステンレス鋼耐さび性改善 塗装ステンレス鋼開発 大気腐食の研究、ステンレス鋼暴露試験 - 住宅用防錆鋼材の性能向上
1990年代	- 地球環境保全、省エネルギー時代 - 海洋汚染防止の強化（原油タンカー二重船体化） - 酸性雨の問題化 - 森林資源保護 →スチールハウス	- 新エネルギー用耐食材料の研究開発 燃料電池用、深部地熱用、ごみ発電用材料 - 二重船体タンカーの塗装合理化 - 文化財の腐食対策 - 自動車塗膜の雨染み対策 - スチールハウス亜鉛めっき鋼材の耐食性実証 大気腐食モニタリング法の開発・普及

わゆるさびコードが発布され、自動車の耐さび性、耐穴あき性向上が急務となった。亜鉛めっき系の自動車用防錆鋼板および耐食性向上のための塗料・塗装方法が活発に開発され、採用された。

建築物においても、美観さと耐久性が重視されるようになり、住宅用防錆鋼板の性能向上、さびにくい外装用ステンレス鋼板や塗装ステンレス鋼板の開発が行われた。

1980年代の顕著な進歩の1つは、頻発した建物周辺の土壌埋設ユーティリティー配管の防食法の確立と普及である。

これについては3章で述べる。

1990年代には地球環境保護、省資源、省エネルギーが重視されるようになり、腐食防食技術の役割も大きくなる。燃料電池、ごみ発電、深部地熱などによるクリーンエネルギー用耐食材料の開発、海洋汚染防止の強化のための原油タンカー二重船体化に伴う塗装の合理化、深刻化した酸性雨による腐食の対策、森林保護のため木材に代わって亜鉛めっき軽量形鋼を使用するスチールハウスの耐食性実証などが課題となった。また、防食法自体の無公害性が重視され、塗装におけ

るVOC低減、重金属含有塗料の代替、けい砂を使うサンドブラストの回避、化成処理におけるクロムフリー化などが始まった。

筆者は、以上に述べた20世紀後半における腐食防食分野での研究開発とその普及の多くのものにかかわったが、これらの中から特に重要な10項目を選ぶと、表2⁶⁾のようである。

3 埋設配管の防食はいかに確立されたか⁷⁾

表2に挙げた10項目のうち、最も筆者の印象に残るのは、埋設ユーティリティー配管の防食の普及である。ガス、水道、LPガスなどを鉄筋コンクリート造の建物に供給する配管の埋設部が、数年以内に外面からの局所的な腐食によって貫通孔を生じ漏洩が起こる事例は、1980年代半ばまで極めて多かった。図1のように埋設配管は建屋貫通部で鉄筋に接触しやすい。コンクリート中の鉄筋はコンクリートの高いアルカリ性によって不動態化して高い電位を持つのにに対し、ほぼ中性の土壤に接する亜鉛めっき鋼管や塗覆装鋼管(傷部)の電位は低い。両者が接触していると電池が形成され、その電流が配管から土壤へ流出するのに伴って腐食が起こるのである。配管に接する土壤自体や土壤と配管の接触の不均一性のために電流が流出しやすい経路が局所化し、腐食も不均一で、孔状になりやすい。

対策は簡単であって、壁や基礎の貫通部で配管と鉄筋を絶縁し、配管が床上に立ち上がったところで、配管に絶縁継手を入れれば良い。絶縁継手が必要なのは、配管が屋内でボイラなど鉄筋と導通している構造物や、他の絶縁されていない配管などと接触すると、鉄筋と触れているのと同じ結果になるからである。腐食進行の速度は大きく、筆者の多数の調査結果では年間1mm程度の事例は多く、3mm/年という場合もあった。

他構造物との絶縁が不可欠なことは、埋設パイプラインの

世界では常識であったが、建物周辺の配管分野では当時は全く知られておらず、対策は採られていなかった。図2のように施工すればよいのである。これを提言しても、実施された例はほとんどなかった。知識の普及のために筆者が『防食技術』(腐食防食協会会誌、現在『材料と環境』)に投稿した「配管の土壤腐食」⁸⁾は広く読まれたが、防食工法の採用にはつながらなかった。

1982年正月、川崎市の建設後4年の小学校のLPガス供給設備で、推定600m³の漏洩を生じた。ボンベ置場から家庭科教室までの60mの埋設ガス配管(32A白管)のねじ継手部が不等沈下によって折損したことが直接の原因であったが、掘削調査時に深い孔食が多数生じていたことが国会レベルでの問題となった。これを契機として全国の学校、病院、公会堂など57,629戸についてLPガス埋設管の漏洩歴の調査を行った結果、995戸で事例があり、明らかに腐食によるものが約40%もあった。

高圧ガス保安協会では政府の要請により、対策委員会において図2を基本とする腐食対策の基準案を作成し、1982年10月、その案が「液化石油ガスの保安の確保及び取引の適正化に関する法律施行規則関係基準」⁹⁾として通産省(当時)から通達された。この案の作成過程において、筆者の多数の

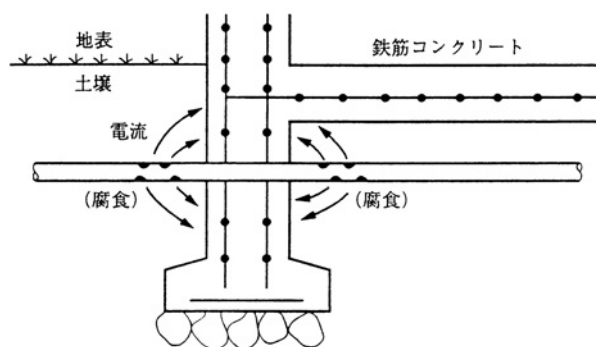
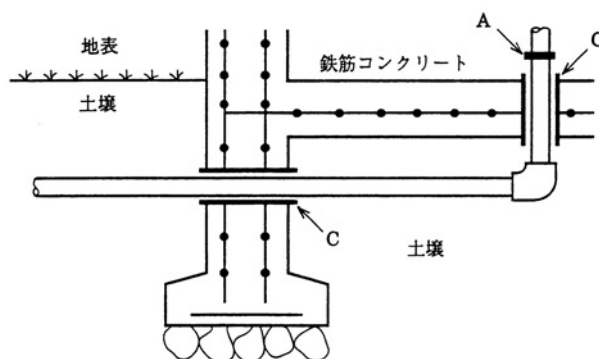


図1 埋設鋼管早期腐食孔貫通の原理



A: 軸方向絶縁 C: 周方向絶縁

図2 埋設鋼管腐食防止の原理

表2 腐食防食20世紀後半の10大出来事

- ① 高張力鋼プロパンガスタンクの硫化物応力腐食割れ発生と対策
- ② 高力ボルトの遅れ破壊発生と対策
- ③ 鉄筋コンクリートの塩害と対策
- ④ 沸騰水型発電用原子炉配管の応力腐食割れと対策
- ⑤ 腐食損失額の調査実施
- ⑥ 無塗装耐候性鋼の橋梁への利用
- ⑦ 橋梁への重防食塗装の採用
- ⑧ 埋設ユーティリティー配管防食工法の普及
- ⑨ 自動車・建材用表面処理鋼板の進歩
- ⑩ 建築構造としてのステンレス鋼の利用

事例調査結果は有力な基礎資料として役立った。各関係委員会の活動によって、都市ガス配管(1985年)¹⁰⁾や簡易ガス配管(1990)¹¹⁾について、腐食対策のガイドラインが作成された。給水管については早くからこの種の腐食が問題視され、1982年9月の鹿島建設・NKKによる埋設管防食マニュアル¹²⁾の刊行を最初として、建設各社で社内基準を作成している。

こうして1990年代になると、埋設管の腐食漏洩事故は激減した。この種の腐食は最も頻発した腐食の代表例であり、対策は簡単であるにもかかわらず1980年頃まではほとんど行われていなかったが、世間の注目を引いた事故を契機として対策が進められ、その広い普及に約10年を要した反面、他の腐食と違って対策がかなり徹底したという歴史を持っている。この歴史は、技術的にも社会的にも唆唆に富むものであり、今後の防食技術の発展に大いに参考にするべき内容を持っている。

4 20世紀後半の腐食防食研究開発の歴史に学ぶこと

4.1 機会は急にあり

腐食防食研究開発の歴史を振り返ると、重要な腐食対策に対する研究開発のニーズは突然現れる。沸騰水型発電用原子炉の高温水配管の応力腐食割れ、耐食性油井管、自動車用防錆鋼板などがその例である。腐食対策は試験やその有効性の実証に時間がかかるだけに、事前に将来予測を行い、基盤を構築しておくことが重要である。

4.2 歴史は繰り返す

耐候性鋼の利用は1960年代建築物で始まったが、あまり広がらないうちに一度は下火になった。しかし1980年代になって低経済成長時代の新たなニーズによって、橋梁への利用が盛んとなった。また、1990年代になると、海岸用耐候性鋼の開発のため、再び研究が活発となった。

F13Tクラスの高力ボルトは1960年代の遅れ破壊頻発の結果姿を消したが、最近になって改良製品が開発され、実証段階にある。

ごみ発電用ボイラ管の腐食、耐食材料の研究は1970年代に進められたが、高級材料を使用する情勢にはなかった。1990年代、クリーンエネルギー開発に向けて発電効率向上のためより高温でも腐食に耐える材料が求められ、対応されている。地熱発電用ケーシング材でも同様である。

大気腐食の研究は、1960年代、耐候性鋼の開発に関連して極めて活発であったが、その後下火になっていた。1980年代の後半から、建築外装用ステンレス鋼の開発、スチール

ハウス耐食性実証、海岸用耐候性鋼開発、酸性雨による腐食の研究などに関連して、基礎研究を含め、最も盛んな研究分野となっている。

4.3 防食技術の伝承の重要性

戦後の我が国は、高度経済成長期を中心として技術立国の基盤を確立した。ところが前世紀の終わり頃から、鉄道トンネル内のコンクリート片の落下、いわゆる臨界事故、宇宙ロケットの打上げ失敗、原発熱交換器管の疲労亀裂発生、原子炉緊急冷却装置の不具合、道路標識の折損・落下といった事故が問題となった。技術を確立した世代は、基準からはずれたときの恐さを知っていたが、世代が変わり、確立された技術しか知らない人々の問題のようである。誰かが言った「三代目の悲劇」である。

この対策には、技術の伝承をもっと徹底するしかない。技術の伝承はさらなる発展のために行うことに第一義があるが、マイナス面についての伝承も重要である。上に挙げた事故例には腐食が関係するものもある。腐食防食技術も、基本に還った技術の伝承が極めて重要である。

4.4 国際競争力の維持・向上

この半世紀の活動を通じて、我が国の防食技術は世界をリードするものになった。しかし、規格の整備が遅れ、最近では欧州主導型のISO規格に押されがちであり、JIS規格もISO規格の直輸入のものが増えている。

我が国の優秀な防食技術の維持発展、世界への普及のために、規格化をさらに進め、ISO規格制定において主導的地位を固める必要がある。

4.5 Old Boys Networkの推進

親しい専門家間で情報のgive and takeをやるのがold boys networkである。防食技術の対象は広く、1人の知識では対応できない。この半世紀の防食技術の発展は、このnetworkに負うところが大きい。Internetで情報洪水の中、良質で専門的な情報源としてold boys networkの役割は大きい。リストラによる防食技術者の数が減少する傾向は、その重要性をますます大きくしている。

引用文献

- 1) 松島 巖：材料と環境，48(1999)，54.
- 2) 松島 巖：低合金耐食鋼，地人書館，(1995)
- 3) JIS A 5308-78，86，96 レディーミクストコンクリート
- 4) 文献2) 参照
- 5) P.Choate and S.Walter：America in Ruins，(1981)；古賀一成訳：荒廃するアメリカ，開発問題研究所，

(1982)

6) 松島 巖：BOUNDARY, 16 (1999) 12, 3.

7) 松島 巖：埋設管の腐食事例，日本材料学会，第226回腐食防食部門委員会，(2002)

8) 松島 巖：防食技術，25 (1976)，563.

9) 液化石油ガスの保安の確保及び適正化に関する法律施

行規則関係基準，昭和57年10月1日，57立局第542号

10) 日本ガス協会：管内管腐食対策ガイドライン，(1985)

11) 日本簡易ガス協会，本支管腐食対策指針，(1990)

12) 鹿島建設，日本鋼管：地中埋設管防食マニュアル，(1982)

(2002年4月9日受付)