

耐候性鋼研究の推移と新耐候性鋼の開発

山本正弘

科学技術庁 金属材料技術研究所
構造材料特別研究員

Masahiro Yamamoto

小玉俊明

同上
特別研究官

Toshiaki Kodama

Transition of Research on Weathering Steels and Development of New Weathering Steels

1 はじめに

太古の地球に光合成を行う植物の先祖が現れ、酸素が作られはじめてから、地表面の環境では酸化物が熱力学的に安定になっている。鉄も当然この中に含まれる。余談にはなるが、我々が利用している鉄鉱石は、太古の植物による酸素発生の初期に海水中で沈殿した酸化鉄の地層を利用していると考えられている¹⁾。鉄鋼業は、その安定な酸化鉄を還元することにより鋼を製造し、そして元の安定な状態に戻ろうとする酸化反応(腐食反応)を防ぐ工夫を製品のひとつの特徴として販売することにより、生業をなしている。

金属の腐食を防ぐ方法として、①酸化物の層を表面に形成させる。②別の金属の腐食反応を利用する。③腐食反応を起こす物質を別の材料で遮断する。等が一般的に用いられている。①はステンレスやチタン等の不動態皮膜で防食する方法であり、②は亜鉛めっきに代表される犠牲防食作用を用いる方法、そして、③には塗装による防食法等がある。

①の酸化物の膜を形成させる方法の主である不動態皮膜による防食法では、10nm以下の皮膜形成がなされている

ために、肉眼的には金属光沢が維持されたまま防食されているように見え、またその皮膜形成時の金属の消耗量も極めて微量である。これに対して、肉眼で見える量の酸化物の膜(さび)を形成させることで腐食の進行を阻止しようとする鋼材が耐候性鋼であり、その時に形成するさび層は、安定さびと称されている。ただし、厳密な定義はなされておらず、最近では「工学的安定さび」という呼称も提案されている²⁾。

定義の問題はさておき、数%以下の合金元素を添加した比較的安価な低合金鋼で、塗装の塗り替え等のメンテナンスもしなくて済み、リサイクルする場合にも容易である耐候性鋼は、時代を先取りした鋼材であると言える。

2 耐候性鋼とは

耐候性鋼は、1933年に市販されたUSスチール社のコルテン鋼が引き金となり、国内の鉄鋼各社のライセンス取得や独自開発により作り出されたいくつかの鋼材の規格を標準化する作業を経て、現在では表1に示すJIS規格がまとめられている。ここで特徴的なことは、溶接構造を考慮しな

表1 耐候性鋼のJIS規格

名称	記号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	備考
高耐候性 圧延鋼材	SPA-H SPA-C	0.12 以下	0.25- 0.75	0.20- 0.50	0.070- 0.150	0.040 以下	0.25- 0.60	0.30- 1.25	0.65 以下	
溶接構造用 耐候性熱間 圧延鋼材	SMAxxxAW SMAxxxBW SMAxxxCW SMAxxxAP SMAxxxBP SMAxxxCP	0.18 以下	0.15- 0.65	1.40 以下	0.035 以下	0.035 以下	0.30- 0.50	0.45- 0.75	0.05- 0.30	xxx=400の場合 Mn1.25以下
		0.18 以下	0.55 以下	1.40 以下	0.035 以下	0.035 以下	0.20- 0.35	0.30- 0.55	—	xxx=400の場合 Mn1.25以下

※1: SPA-H,Cの違いはHが熱間圧延、Cが冷間圧延材。

※2: xxxは引張強さの規定、400、490、570がある。

※3: SMAxxxB,Cはシャルピー吸収エネルギーの規定がある。

※4: 最後のWは通常無塗装で、Pは塗装をして使用する。

※5: 溶接構造用鋼では耐候性に有効なMo、Nb、Ti、V、Zr等を添加して良い。

ただし、これらの元素の総量は0.15%を越えないものとする。

耐候性の優れたP添加耐候性鋼³⁾と、溶接構造用のPを添加しない鋼材が規定されていることと、溶接構造用鋼でも塗装して使用するための規格と、裸もしくはさび安定化処理をして使用するための規格が、それぞれ定められていることである⁴⁾。

分野外の方には分かりにくい区別であるが、裸使用とは、鋼材を切断・加工後にそのまま屋外に構造物として設置することであり、その後の安定さび発生を均一にするために通常ミルスケールの除去が行われる。この場合、初期のさびが雨や排水などの影響で礎石や周囲の構造物に流れ出し、赤く染まってしまう「流れさび」と呼ばれる問題が生じる。そこで、流れさびを防ぐ目的で、寿命の短い処理皮膜を表面に塗り、時間経過と共に皮膜がさびに代わることを狙った処理を行う場合がある。これをさび安定化処理と呼んでいる。この両者を併せて、塗装での使用と区別し無塗装使用と呼んでいる。

塗装使用は文字通り、加工後に数100 μ m厚の塗膜を塗り使用する方法である。塗膜はその材料性能に従った寿命が存在するので、塗膜の寿命に見合った期間毎に再塗装を繰り返しながら使用しなければならない。前述の無塗装使用では、腐食対策としてのメンテナンスは基本的には考えない。これは、さび安定化処理を行った場合でも同様である。

実際の使用例として、塗装使用では産業機械や貨物車両等がある。無塗装使用では橋梁や建築物などがある。ここでは例として、鉄道橋梁に裸使用された湯西川鉄道橋の写真を図1に示す⁵⁾。また、身近な建造物として、東京都夢の島の第5福竜丸展示館、北海道開拓100年記念塔、京都西本願寺等がある。機会があればその外観を観察されることをお勧めする。

3 耐候性鋼の市場

耐候性鋼の生産量は、年間約40～50万トン程度で、このうち国内使用量は約15万トン位で輸出割合が比較的高い。15万トンという数字は、構造用鋼全体の使用量ではそれほど多いものではないが、屋外の腐食にさらされる特殊な用途の鋼材であることを考えると、比較的堅調な推移を辿っている。

松島は、著書「低合金耐食鋼」の中で、各種低合金鋼の開発の歴史的経緯を詳細にまとめている⁶⁾。図2はその中で示されている耐候性鋼の使用内訳を示している図である^{6,7)}が、近年、橋梁への耐候性鋼使用の増加が著しいことが示されている。また、産業機械や鉄道車両は減少傾向にあり、建築用材料が増加していることもわかる。このことは、人目に付く景観的な要素を考慮して使用されている

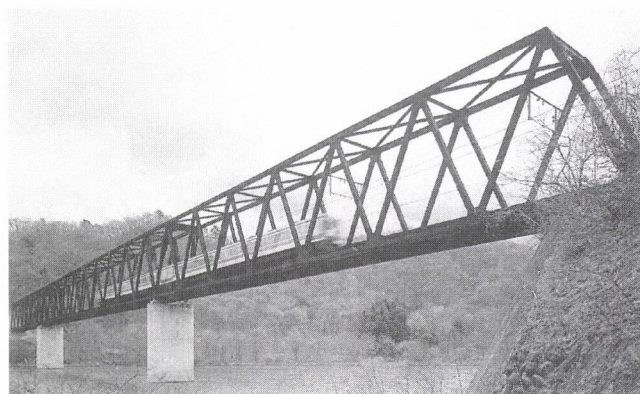


図1 耐候性鋼の裸使用例（湯西川鉄道橋）

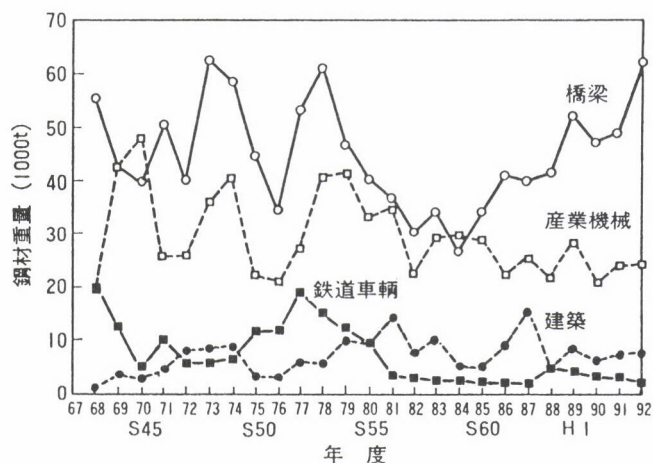


図2 耐候性鋼国内使用量内訳の推移（受注ベース）

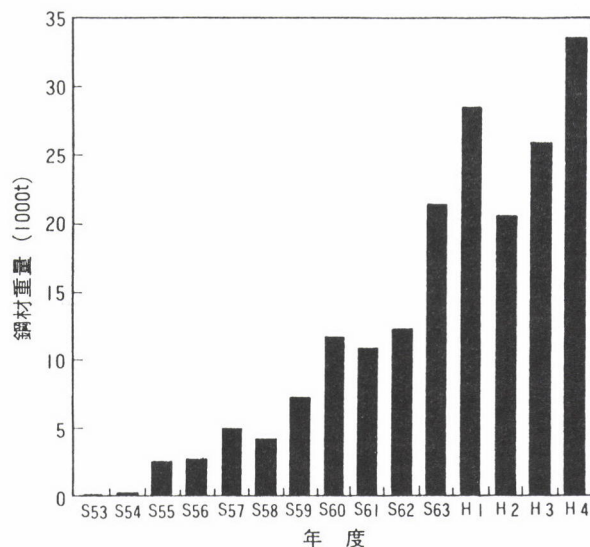


図3 無塗装耐候性鋼橋梁（裸使用）の実績（受注ベース）

ケースが増加していることを表している。

橋梁への利用が増加していることは、景観に加えメンテナンスコストが削減できることがあげられる。西川は、橋

梁のライフサイクルコストの試算を行い、耐食性の優れる鋼材を適用することが長期間では橋梁のトータルコストを下げられることを示し、ミニマムメンテナンス橋梁を提案している⁸⁾。これと対応するように、裸使用の橋梁は図3に示すように、近年急激に増加傾向にある。

しかしながら、平成5年に建設省土木研究所を中心とした共同暴露試験の結果⁹⁾が報告され、海浜部の海から飛来する塩分量の多い地域での耐候性鋼の裸使用は、剥離しやすいさびが形成し、耐食性が確保できない問題点が指摘され、現在はその増加も足踏み状態にある。

4 耐候性鋼導入期の研究成果

耐候性鋼の特徴は、図4に示すように、普通鋼に比べ、長期にわたる腐食量が少ないこと¹⁰⁾、腐食量の増加、すなわち腐食速度がほとんど零に近づくことにある。その理由として、耐候性鋼の表面に形成されるさび皮膜が保護性を持つものと考えられ、初期の耐候性鋼研究においては、このさび皮膜の構造解析が中心に進められた。

岡田らは、耐候性鋼上に形成されたさび皮膜の偏光顕微鏡の解析を行った。その結果、図5に示すように、さび層が偏光層(上層)と消光層(下層)の2層で構成されていること、並びに下層のさび層はX線回折では非晶質的な構造をしていることを示した。そして、カソード還元法の結果と合わせ、この層がX線的に非晶質なスピネル層であると結論づけた¹¹⁾。さらに、EPMA(電子線プローブ微小分析法)による解析で、下層にはCr、Cu、Pの濃化を認め、これらの元素の濃化がX線的に非晶質なスピネル層の形成に関与

していると考えた。

増子らは、暴露した耐候性鋼のさびと人工的に合成したさびの比表面積をBET法により測定し、耐候性鋼のさびやCuの添加した人工さびの方がさび粒子の比表面積が増加することを示した^{12,13)}。当時この結果は、耐候性鋼のさびの方が物質遮断能力を持たないことを示すのではないかと考えられた。しかしながら、同グループはBET測定結果の詳細な解析を行い、さび粒子同士のすき間に相当する平均細孔体積を求めた。その結果、暴露した耐候性鋼のさびやCu添加により作製した人工さびの方が、純Fe試験片に形成するさびに比べ、平均細孔体積が減少していることを示した¹⁴⁾。前述した岡田らの結果と合わせて考えると、耐候性鋼の添加元素の影響によりさびコロイド粒子が微細化し、X線的には非晶質的になり、かつ、それらの粒子のすき間が小さくなることが推定される。この考え方は、その後の新たな研究結果が報告された現在に到っても、基本的には変わっていない。

この時期、電気化学的な手法による耐候性鋼のさび層の解析結果も数多く報告された。西本らは、耐候性鋼上に数日から100日間暴露し、そのカソード分極挙動を中性の溶存酸素を含む溶液と過酸化水素を含む溶液で測定した¹⁵⁾。その結果、過酸化水素は溶存酸素と同様な働きをし、その拡散速度は、さび層の形成に伴い減少することを示した。松島らは、5ヶ月から1年間暴露した耐候性鋼の分極曲線を測定し、暴露後の試験材では、大きなカソード電流が得られることを示した。そしてこれがさび層の還元によるものであると推定した¹⁶⁾。岡田らは、5年間暴露した耐候性鋼の分極曲線、並びに定電位カソード還元を行い、さびの付い

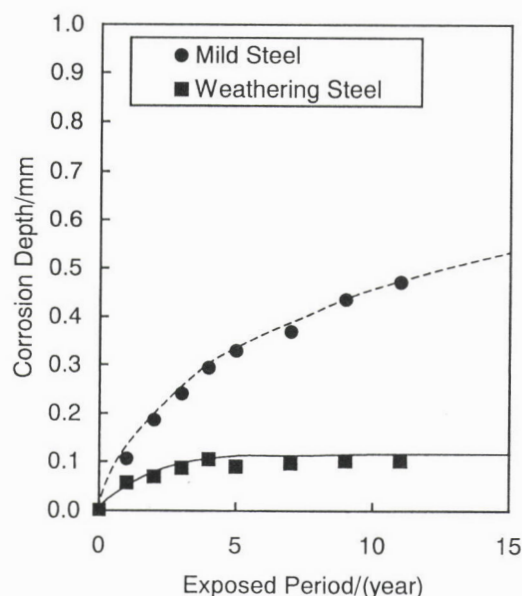


図4 耐候性鋼と普通鋼の暴露試験結果(工業地帯)

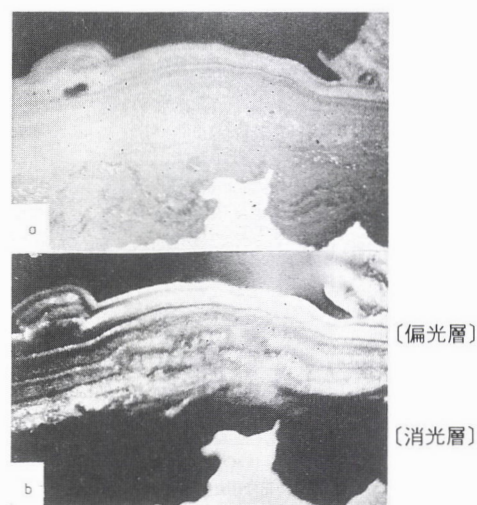


図5 暴露した耐候性鋼さび層の断面の光学顕微鏡写真
a) 反射像、b) 偏光像x450

た耐候性鋼のカソード分極反応に溶存酸素が影響を与えず、還元反応はオキシ水酸化鉄(FeOOH)からマグネタイト(Fe_3O_4)への変化であること、並びに暴露期間が長くなると耐候性鋼でアノード・カソード両分極曲線が大きく分極することを示した¹⁷⁾。Suzukiらは、暴露試験後のさびを剥ぎ取り、それを電極とし、そのカソード分極過程でのさびの構造変化をX線回折法で解析した。その結果、図6に示すように α - FeOOH は、カソード分極により変化しないが、 γ - FeOOH は減少し、その代わりに Fe_3O_4 が増加していくことを示した¹⁸⁾。しかしながら、この結果にはX線的に非晶質なさび層の寄与が含まれておらず、実際には γ - FeOOH と非晶質さび層の一部が還元され、 Fe_3O_4 に変化するものと考えられるが、 α - FeOOH がカソード分極により変化しないことは重要な知見である。

Shibataらは回転電極を用い、人工海水中でさびの形成過程をカソード分極曲線で解析した¹⁹⁾。彼らは、さび形成に伴う反応抵抗の増加が、単純な2%Cr鋼や0.6%Cu鋼に比較し、耐候性鋼(0.55Cr-0.45Ni-0.4Cu-0.12P)において大きいことを示した。轟らは、暴露後の耐候性鋼さび層のEPMAによる解析で、さび層/地鉄界面にS元素が濃化し、それが普通鋼に比較して多いことを示した²⁰⁾。このことに着目し、界面での腐食を濃厚硫酸溶液中での反応と仮定し、電気化学的な解析を行っている²¹⁾。その結果、耐候性鋼は濃厚硫酸溶液中で不動態皮膜が安定であり、塩素イオンの添加によっても劣化しにくいことを示した。

硫酸イオンの挙動に関しては、Matsushimaらが放射化された硫酸溶液中に暴露後の耐候性鋼試験片を浸漬し、オートラジオグラフィーにより硫酸塩の取り込みを解析している²²⁾。オートラジオグラフィーでは硫酸イオンが取り込まれた部位がスポット状に撮影される。彼らは、これがアノードスポットであると考え、暴露後の耐候性鋼ではアノードスポットが少なく、これが耐食性の向上に影響を与えるものと考えた。

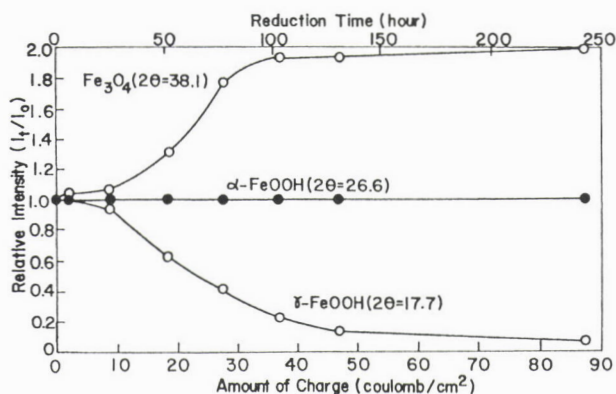


図6 カソード還元によるさび層のX線回折強度の変化

また、耐候性鋼の長期の腐食量を統計的に予測しようとする試みも行われた。堀川らは、全国7カ所で5年間行った各種鋼材の暴露試験結果の多変量解析を行い、腐食量と環境因子や時間との関係を経験式として求めた²³⁾。中村らは、特に環境因子に着目し、多変量解析を行った結果、耐候性鋼の腐食に対し、初期には亜硫酸ガスの効果が大きく、逆に長期になると海塩粒子の影響が大きいことを示した²⁴⁾。この結果は、興味深いことではあるが、山本ら¹⁰⁾や松島⁶⁾が指摘しているように、大気環境中の亜硫酸ガス濃度が変化したことも一因として考えられる。

耐候性鋼の導入期に、これら一連の研究発表が活発になされた後、耐候性鋼の研究は一時期文献ベースで表に現れなくなる。

5 耐候性鋼長期使用後の研究成果

耐候性鋼の使用から約20年近く経て、暴露試験の結果も長期間のものが得られ、また、解析機器も新しい手法が取り入れられ、耐候性鋼の研究も違った形でのとらえ方がなされてきた。Kihiraらは、19年間暴露したP添加耐候性鋼のさび層をCMA(コンピュータを活用したEPMA)により解析し、Pの濃化がさびの外層と内層の界面部で観察されることを示した²⁵⁾。また、同時にレーザーラマン分光法で、この界面のPの存在状態が FePO_4 であることを示した。レーザーラマン分光法は、さびの解析には有効な手段で、X線回折法では同定できない程度の微細結晶でも同定が可能である²⁶⁾。特に顕微鏡と組み合わせた顕微ラマン分光法では、さび層の微少領域の解析が可能である。

三沢らは26年経過後の耐候性鋼暴露材を顕微ラマン分光法により解析し、岡田ら¹⁶⁾が示した内層の偏光顕微鏡での消光層が主として α - FeOOH により構成されることを示した²⁷⁾。ところで、結晶学的な考え方では、光学顕微鏡の偏光子を用いた観察により、等軸晶または非晶質が消光層として確認される。鉄のさびでは、 Fe_3O_4 、非晶質さび層が消光層に相当し、 α - FeOOH 、 γ - FeOOH が偏光層に相当する。そこで、三沢らが示した α - FeOOH は消光層にあることにより、非晶質に近い微細結晶であると理解できる。

また、山下らはさび層の時間経過に着目し、初期には非晶質のさび層の存在を認め、それが、長期間経つと α - FeOOH に変化していくことを示した。この変化の過程で鋼材中のCr,Cuが影響を与え、長期間経過後の下層さび中にCrが濃化していることより、Crがこの変化に対し、重要な役割を果たしていると結論づけている²⁸⁾。すでに述べたように α - FeOOH は還元されにくい安定なさび組成であり、非晶質さび層や γ - FeOOH が長期間の経過で、より安定

な α -FeOOHに変化することは新たに見つけられた重要な知見である。ただし、最終構造が α -FeOOHであっても、その中間段階の非晶質さび層の役割は、耐候性鋼の腐食過程で極めて重要である。また、最終状態のさび層を初期から表面に形成させることで、耐食性が向上すると考えるのも短絡的である。これらのことは、今後の検討課題として残されている。

電気化学的な解析手法も新しい観点が取り入れられた。Itoらは、耐候性鋼のさび層を交流インピーダンス法で解析し、その結果よりさび層のイオン透過抵抗という新しい指標を示した²⁹⁾。耐候性鋼のイオン透過抵抗と腐食速度には相関関係があり、イオン透過抵抗を測定することで、耐候性鋼さび層の安定度評価が可能であることを示した。そして、実際の構造物に対して測定できるポータブルな装置を作製し、数多くの測定結果から、その評価基準を提案している³⁰⁾。

交流インピーダンス法を用いた腐食現象のその場測定も行われている。西方らは、鋼材の試験片を対にして埋め込んだ特製の電極を用いて、大気腐食現象のモニタリング法を開発し^{31,32)}、実際の屋外環境への適用について検討した³³⁾。また、元田らは、試験片とAg対極を楕形状の電極対として構成するACM(Atmospheric Corrosion Monitor)と名付けたセンサーを用いて、鋼材の腐食速度や環境の腐食性を評価する方法を検討した³⁴⁾。彼らはこのセンサーを用いて、腐食の最大因子である海塩粒子量のその場測定が可能であること、並びに鉄の腐食速度が推定できることを示している³⁵⁾。

従来型の電気化学測定法とは異なり、非接触で金属の腐食電位を測定できる方法としてStratmannはKelvinプローブを提案し³⁶⁾、これを用いて薄い水膜下における鋼材の大気腐食現象解析に適用した³⁷⁾。このKelvin法を用いて低合金鋼の大気腐食についても、検討がなされている^{38,39)}。この中で、山下らは100 μ m程度の水膜が表面にある場合、普通鋼の腐食電位が水膜厚さの減少に伴い貴の方向に変化することを示しているのに対し³⁸⁾、宇佐見らは逆に卑な方向に変化する³⁹⁾としているのが興味深い。両者において、用いている試験液も違い、また、測定している現象が過渡的なものであるため、このような差異が見られるのであろう。Kelvinプローブを用いると大気腐食の素反応の解析も可能である。野田らは普通鋼の上に人工海水を噴霧し、さび発生が起こった場所と健全部で電位が異なること、そしてそれが時間的に変化し、不活性になる過程を解析している⁴⁰⁾。

いずれにしても、薄い水膜下での腐食現象の研究は始まったばかりであり、今後の詳細解析が待たれる。その意味では升田が測定結果を示しているKFM(Kelvin Force

Microscope)も、今後有益なツールになるであろう⁴¹⁾。

6 従来耐候性鋼に対する考え方の変化

これまで述べてきた耐候性鋼の研究内容は、耐候性鋼の耐食性が普通鋼に比べ優れており、その機構解析を主として行ってきたものである。しかしながら、耐候性鋼が必ずしも優れた耐食性を示さない場合があることも指摘され⁴²⁾、とりわけ飛来海塩粒子量が多いところでは腐食量が多くなる傾向があると報告されている^{9,43)}。

しかしながら、海塩が腐食に大きく作用しているのであれば、海岸近くの無塗装耐候性鋼橋梁は全て劣化しているはずであるが、そうでないという報告もある。齊藤らは瀬戸内海の海上橋梁で耐候性鋼を裸使用した橋梁の解析を行って、その腐食量やさびの状況が良好であることを報告している⁴⁴⁾。彼らはこの橋梁のさび中の塩分量を測定し、海上橋梁でありながら、比較的少なかったことが腐食量の少ない理由と説明している。

山本らは、過去の耐候性鋼の暴露試験結果をデータベース化し、そのデータを解析した結果、飛来海塩粒子量の低い場合には、耐候性鋼の腐食速度は海塩粒子量にほとんど依存せず、海塩粒子量が多い場合にその傾向が認められることを示している^{10,45)}。また、宇佐見らは、構造物の暴露試験材を解析した。図7に模式的に示した通常のフランジ加工材(A)と雨水が溜まるのを防ぐために下フランジを5%傾斜させた試験体(B)で、(B)材のフランジ裏側面(C)で浮きさび状の腐食状況が認められ、直感的には逆になるような結果を報告している⁴⁶⁾。これらのことは、耐候性鋼の腐食現象が単に海塩粒子が飛来することで影響を受けるのではなく、その付着や洗い流し、そして、海塩の蓄積により生じる結露等を考慮する必要があること、並びに海塩粒子が付着し、さび層が劣化していく過程を詳細に解析する重要性を示唆している。

宇佐見らは、23年間暴露していわゆる「安定さび」になっていると考えられる試験片を塩水噴霧試験や塩水散布し暴露する試験を行い、さび層の構造が大きく変化してくるこ

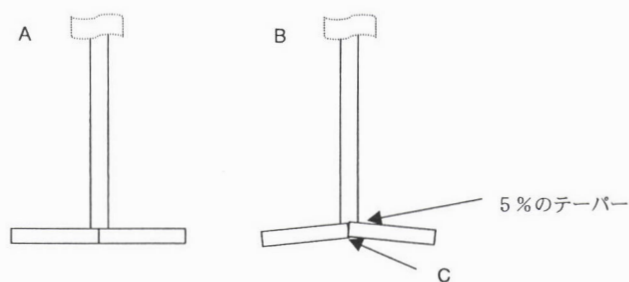


図7 暴露構造物試験体の模式図（発表者の許可を得て作成）

とを示した⁴⁷⁾。片山らは、約35年間暴露した耐候性鋼の各種塩溶液中での劣化挙動を解析している⁴⁸⁾。また、山本らは橋梁の内桁を模擬した覆い付きの暴露試験を行い、海塩の蓄積に伴い、鋼材の腐食が著しく加速されることを示した⁴⁹⁾。図8には覆い付き暴露試験架台の模式図、図9には覆い付き暴露架台と通常架台での普通鋼の腐食速度と海塩粒子量の関係を示す。図9中の腐食速度の差は、飛来海塩粒子量が増加するに伴い大きくなる。彼らは覆い付き暴露架台では、降雨による表面の洗い流しが起こらないために、海塩が蓄積し、激しい腐食環境になっているためであると報告している。

西村らは、塩化物を滴下・乾燥・水洗を繰り返すことで、

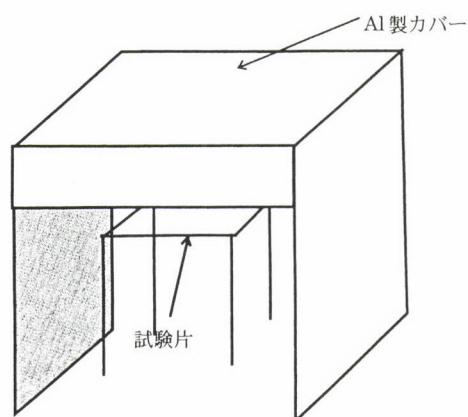


図8 覆い付き暴露試験架台の模式図

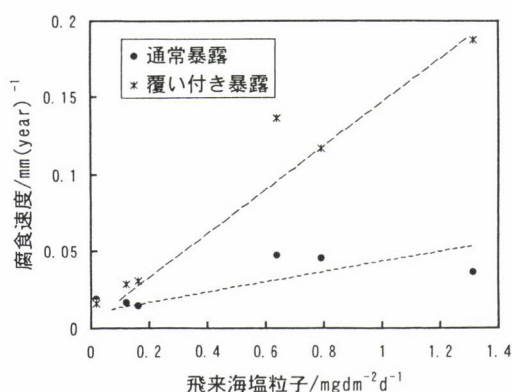


図9 通常暴露試験と覆い付き暴露試験による腐食速度の違い

さび形成反応における塩化物の影響を解析し、さび形成にカチオンの影響が少ないこと、塩化物はさび形成時に触媒的に作用していることを示している⁵⁰⁾。

これらの研究は、耐候性鋼の適用限界を明確にする為に極めて重要であり、気象因子や構造因子との関連を含めて、今後より詳細に検討していく必要がある。そして、海からの距離だけで耐候性鋼を裸使用して良い悪いの判断をするのではなく、利用技術やメンテナンス技術を含めた耐候性鋼の利用指針につなげていくべきである。

7 新耐候性鋼の開発動向

前述したように海塩が蓄積する環境での従来耐候性鋼の裸使用には問題がある。そのために、新たな耐候性鋼材の開発が2つの考え方で進められている。

1つは、さび安定化処理に代わる新しい皮膜形成を行い解決しようとする考え方である。幸らは、耐候性鋼の安定さびがCr含有の α -FeOOHを主体としているところに着眼し、 $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ を添加したブチラル樹脂を塗布する方法を開発し、これにより海浜部での耐食性向上を狙った⁵¹⁻⁵³⁾。

また、同様のさび安定化処理の改良処理では、伊藤らがリン酸添加のブチラル樹脂による表面処理で長期間の耐食性が確保できることを報告している^{54,55)}。さらに、金子らは、カチオン・アニオン複合型塗膜による耐食性の向上を報告している⁵⁶⁾。これらさび安定化処理の改良については、塩素イオンの遮断効果はそれぞれ期待できるものの、その量との関係は今後の検討を要する。

もう1つのアプローチは、鋼材成分を変えて海浜部での耐食性を向上させようとするものである。山本らは、Ca-Ni添加の耐候性鋼を開発したことを報告している⁵⁷⁾。宇佐見らは3%Ni系の鋼材を開発し、その各種性能に関して報告している^{58,59)}。また、田中らは、Ni-Mo-P系の鋼材を開発し、飛来塩分の高い環境での耐食性に関して報告している⁶⁰⁾。さらに中山らは、Cu-Ni-高Ti鋼が海浜部での塗装耐食性に優れることを報告している^{61,62)}。

ここで述べた新規耐候性鋼の開発状況をまとめたものを表2に示す。表に整理した内容からすると、Niが海浜部で

表2 新耐候性鋼開発動向

代表報告者	カテゴリー	Cu	Cr	Ni	P	その他の添加物	参考文献
幸 他	皮膜系	—	硫酸クロム	—	—	ブチラル樹脂	51,52,53
伊藤 他	皮膜系	—	—	—	リン酸	ブチラル樹脂	54,55
金子 他	皮膜系	—	—	—	—	カチオン・アニオン複合樹脂	56
山本 他	合金添加	○	—	○	○	微量Ca	57
宇佐見 他	合金添加	○	—	◎	—	—	58,59
田中 他	合金添加	—	—	○	○	Mo	60
中山 他	合金添加	○	—	○	—	Ti	61,62

※記号の意味、—；添加せず、◎；かなり多く添加、○；JIS 耐候性鋼レベル+ α 添加

の耐食性を向上させることは、多くの報告において一致している。Crに関しては、意見が分かれており、意識的に無添加にする報告と効果を強調する報告が混在している。Pの添加に関しても効果があることは認識されているが、低温脆性と溶接性の懸念から敬遠されているようである。いずれにしても、新耐候性鋼はまだ暴露期間も短く、その指導原理も確立されていないため、今後の研究の進捗が待たれるところである。加えて、鋼材成分の改良だけでなく、新しい製造法との組み合わせで検討されていく必要があると考える。

8 おわりに

耐候性鋼の過去から最近までの研究をできるだけ全体像を掴んでいただこうと考え、まとめてみた。その結果、早口で説明した感じがあり、個別の研究内容の詳細に立ち入れなかったことを反省している。その代わりと言っては申し訳ないが、引用文献は手に入りやすいものを中心に並べてみたので、興味のある方はそちらを参考にいただきたい。

研究の内容をこのように羅列してみても、耐候性鋼の研究が、未だに死体解剖的な手法で進められていることに問題があると感じる。短期間や長期間の暴露試験後のさび層を解析し、その結果から類推した腐食機構の議論は十分に行われているが、大気腐食が進行中の現象を、その場で観察している結果が比較的少ない。大気腐食現象のその場解析手法が未だ確立されていないこともあるが、これまでの研究アプローチにも問題がある。著者の属する金属材料技術研究所、フロンティア構造材料研究センターでは、特にこの点に着目し、耐候性鋼のさび形成過程の解析、腐食反応のその場観察手法の確立、そして、屋外で環境因子や腐食速度の高精度なモニタリングのできる暴露試験場の設置等により、大気腐食機構の解明と海浜部で耐食性の優れた鋼材開発を進めている。これらの結果も含め、それぞれの機関における今後の研究の進捗が期待される。

ところで、耐候性鋼がすばらしい材料であることは、敢えて言うまでもないが、そのすばらしさや問題点が、専門家の中でのみ認知されていることにも疑問を感じている。一つには、専門家以外に分かりにくい言葉を使い過ぎているためではなかろうか。「安定さび」や「裸使用と無塗装使用」の違い、「塗装とさび安定化処理」の違いなど、専門外の人にも分かりやすく説明していく必要があると感じる。また、耐候性鋼のメリット・デメリットも一般の方に分かりやすく説明するのが、製造者や研究者としての義務であると感じる。西川が指摘しているように⁸⁾、「最終的なユー

ザーにも見える形でメリットを示す。」ことは非常に重要なことと感じる。人づての話だが、田園地帯で耐候性鋼の調査をしていた研究者が地元の人から、「この当りは田舎の村だから、橋にペンキを塗るお金も出ないので、さびたままほっておくのですね。」と言われたそうである。塗装をしないことが如何に有効な腐食対策であるのかを一般の人に説明するのは難しいが、その努力は惜しんではいけないと感じる。

鉄鋼材料の研究者が鋼材を与えるだけの時代は終わってきているのではないか。発注者や利用者にとっての考え方を十分に汲み上げる形で新鋼材の開発を進めていくことが、この分野の研究者に望まれていると強く感じている。

参考文献

- 1) 竹内 均, 都城秋穂: 地球の歴史, 日本放送出版協会, (1965)
- 2) 紀平 寛, 伊藤陽一, 宇佐見明, 富田幸男: 材料と環境98講演集, (1998), 61.
- 3) JIS G 3125 高耐候性圧延鋼材
- 4) JIS G 3114 溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材
- 5) 新日本製鐵カタログCORTENより許可を得て転載
- 6) 松島 巖: 低合金耐食鋼, 地人書館, (1995)
- 7) 鉄鋼統計委員会編: 鉄鋼需要の分析, 日本鉄鋼連盟, (1969~1993)
- 8) 西川和廣: 橋梁分野における材料利用技術課題, 日本鉄鋼協会 第159, 160回西山記念技術講座テキスト, (1996), 233.
- 9) 建設省土木研究所, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX), (1993)
- 10) 山本正弘, 加藤忠一, 増田一広: 第43回腐食防食討論会講演集, (1996), 405.
- 11) 岡田英彌, 細井祐三, 湯川憲一, 内藤浩光: 鉄と鋼, 55, (1969), 355.
- 12) 増子 昇, 久松敬弘: 防蝕技術, 17 (1968), 465.
- 13) 増子 昇, 久松敬弘: 防蝕技術, 17 (1968), 539.
- 14) 鈴木一郎, 増子 昇, 久松敬弘: 防蝕技術, 19 (1968), 79.
- 15) 西本昭彦, 能登谷武紀, 石川達雄, 緑川林造: 防蝕技術, 17 (1968), 389.
- 16) 松島 巖, 上野忠之: 防蝕技術, 17 (1968), 458.
- 17) 岡田英彌, 細井祐三, 内藤浩光: 鉄と鋼, 56 (1970), 277.
- 18) I. Suzuki, Y. Hisamatsu and N. masuko: J. Electrochem. Soc., 127 (1980), 2210.

- 19) T. Shibata, G. Okamoto, A. Murao and T. Tsuchida : Trans. ISIJ, 9 (1969), 239.
- 20) 轟 理一, 門 智 : 日本金属学会誌, 33 (1969), 806.
- 21) 轟 理一, 門 智 : 日本金属学会誌, 33 (1969), 815.
- 22) I. Matsushima and T. Ueno : Corrosion Science, 11 (1971), 129.
- 23) 堀川一男, 瀧口周一郎, 石津善雄, 金指元計 : 防蝕技術, 16 (1967), 153.
- 24) 中村元治, 佐藤明久, 山田 昭, 足立孝義, 北山 実 : 金属表面技術, 33 (1982), 77.
- 25) H. Kihira, S. Ito and T. Murata : Corrosion Science, 31 (1990), 383.
- 26) 大塚俊明, 板谷布美恵, 荒木賢治, 佐藤教男 : 腐食防食'89講演集, (1989), 133.
- 27) 三沢俊平, 山下正人, 松田恭司, 幸 英昭, 長野博夫 : 鉄と鋼, 79 (1993), 69.
- 28) 山下正人, 幸 英昭, 長野博夫, 三沢俊平 : 材料と環境, 43 (1994), 26.
- 29) S. Ito, H. Kihira and T. Murata : ASTM STP 965 (1988), 366.
- 30) H. Kihira, S. Ito and T. Murata : Corrosion, 45 (1989), 347.
- 31) 西方 篤, 熊谷草平, 水流 徹 : 材料と環境, 43 (1994), 82.
- 32) 西方 篤, 高橋岳彦, 侯 保英, 水流 徹 : 材料と環境, 43 (1994), 188.
- 33) 山田昭彦, 西方 篤, 水流 徹, 宇佐見明, 富田幸男, 後藤正徳 : 第44回材料と環境討論会講演集, (1997), 157.
- 34) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原正, 兒島洋一, 辻川茂男, 押川 渡, 糸村昌祐, 福島敏郎, 出雲茂人 : 材料と環境, 43 (1994), 550.
- 35) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原 正, 辻川茂男 : 材料と環境, 47 (1994), 651.
- 36) M. Stratmann : Corrosion Science, 27 (1987), 869.
- 37) M. Stratmann and H. Streckel : Corrosion science, 30 (1990), 681.
- 38) 山下正人, 土井教史, 長野博夫 : 材料と環境, 47 (1998), 384.
- 39) 宇佐見明, 井上尚志, 田辺康児 : 材料と環境, 47 (1998), 406.
- 40) 野田和彦, 米沢賢吾, 水流 徹 : 第42回腐食防食討論会講演集, (1995), 201.
- 41) 升田博之 : 材料と環境'98講演集, (1998), 25.
- 42) A. Raman : ASTM STP 965, (1988), 16.
- 43) 村田清満, 田中 誠, 加藤博之, 川井 治 : 鉄道総研報告, 9 (1995) 4, 43.
- 44) 齊藤良算, 加納 勇 : 防錆管理, (1991) 6, 193.
- 45) M. Yamamoto, C. Kato, N. Nogami and A. Matsuo-ka : ASTM STP 1311, (1997), 211.
- 46) 宇佐見明, 富田幸男, 楠 隆, 田辺康児, 市川篤志 : 材料とプロセス, 10 (1997), 1238.
- 47) 宇佐見明, 田辺康児, 井上尚志, 増田一広 : 腐食防食'92講演集, (1992), 107.
- 48) 片山英樹, 田原 晃, 山本正弘, 小玉俊明 : 第45回材料と環境討論会, (1998), 401.
- 49) 山本正弘, 山口伸一, 紀平 寛, 宇佐見明, 田辺康児, 増田一広, 井上尚志, 溝口 茂, 都築岳史 : 材料とプロセス, 9 (1996), 1289.
- 50) 西村俊弥, 片山英樹, 小玉俊明 : 材料と環境'98講演集, (1998), 57.
- 51) 幸 英昭, 岸川浩史, 長野博夫, 中村 厚, 原 修一, 山下正人 : 材料とプロセス, 10 (1997), 1240.
- 52) 岸川浩史, 幸 英昭, 橋本 保, 原 修一, 神田 三, 山下正人 : 材料とプロセス, 10 (1997), 1241.
- 53) 幸 英昭, 岸川浩史, 原 修一, 神谷光昭, 山下正人 : 材料と環境'98講演集, (1998), 51.
- 54) 伊藤陽一, 山口伸一, 増田一広, 加藤忠一 : 材料と環境'98講演集, (1998), 63.
- 55) 山口伸一, 伊藤陽一, 増田一広, 加藤忠一 : 材料とプロセス, 8 (1995), 1603.
- 56) 金子雅仁, 宮田志朗, 藤田 栄, 安原充樹 : 材料とプロセス, 11 (1998), 1111.
- 57) 山本正弘, 紀平 寛, 宇佐見明, 田辺康児, 増田一広, 都築岳史 : 鉄と鋼, 84 (1998), 194.
- 58) 宇佐見明, 富田幸男, 紀平 寛, 都築岳史, 田辺康児 : 材料と環境'98講演集, (1998), 65.
- 59) 田辺康児, 宇佐見明, 紀平 寛, 富田幸男 : 土木学会第53回年次学術講演会要旨集, 第I部門, (1998), 100.
- 60) 田中賢逸, 清水義明, 西村俊弥 : 材料と環境'98講演集, (1998), 67.
- 61) 中山武典, 湯瀬文雄, 菅 俊明, 堺 雅彦, 大江憲一 : 材料とプロセス, 11 (1998), 454.
- 62) 中山武典, 湯瀬文雄, 石川達雄, 山下浩昭, 安川あけみ, 神鳥和彦, 大木継秋 : 材料とプロセス, 11 (1998), 1110.

(1998年11月30日受付)