



解 説

研究会成果報告 - 37

腐食劣化解析に基づく鋼構造物維持の最適化研究会の成果

Achievement in Research Project of Optimization of Maintenance of Steel Structures based on Corrosion Degradation Analysis

坂入正敏

Masatoshi Sakairi

北海道大学

大学院工学研究院

准教授

1 緒言

公益社団法人腐食防食学会を中心に我が国の腐食対策費（腐食コスト）の調査が、1977年と1999年、2015年の3回実施された。その結果、社会基盤である道路や橋梁や産業を適切に維持するための腐食コストは、GNI（国民総所得）のほぼ1%であり、2015年の試算によるとGNIの1.2%程度の約6兆円である¹⁾。腐食による劣化を防止することは、いかに経済規模が大きいかわかる。一方、腐食コストを調査した3つの期間における日本の経済状況は、1977年は成長期、1997年は変換期、2015年頃は成熟期に相当する。報告書によると、初期のコストを中心に積算するUhlig方式では、GNIに対する割合は減少していたが、維持管理コストも積算対象になるHoar方式では、GNIに対する割合は増加して

いた。このことは、社会基盤の高経年化や人材確保が困難になることで、維持コストが増加傾向にあることを示唆している。安全・安心な社会を維持するためには、腐食により機能劣化した鋼構造物の適切な維持管理が切望されている。

ここで、大型の構造物の腐食環境は、部位や使用期間で大きく異なるため、同じ構造物でも腐食による劣化状況は空間的、時間的に一様ではない。従来の方法は、構造体として維持管理時期を予測しているため、修繕時期は腐食による劣化が激しい部分によって決まってしまう。前述したように大型構造物では、部位毎の腐食速度が異なるため、部位毎に腐食状況が予測可能になれば、維持管理を適切に実施出来ることになる。Fig.1に腐食予測の精度による維持管理期間の変化を模式的に示す。このように、適切な維持管理、補修をすることで腐食による劣化と維持管理コストが抑えられ、大型構

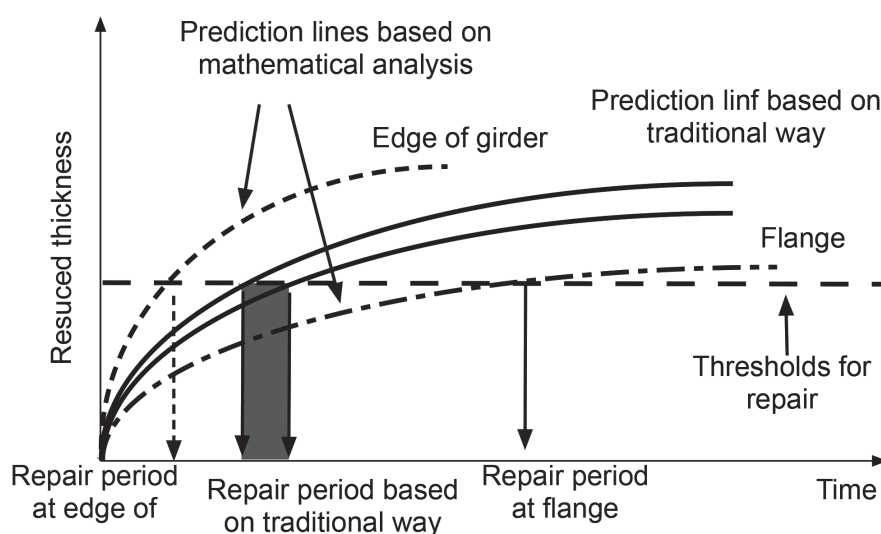


Fig.1 Repair period based on prediction way.

造物の長寿命化につながることになる。

以上のような部位ごとの寿命を適切に予測するためには、様々な環境における鋼材の腐食基礎データの蓄積と環境のマルチセンシングによる腐食性の把握、それらを基に腐食速度を予測する数理解析法の構築が、構造物の適切な維持管理のためには不可欠である。このような理由から、一般社団法人日本鉄鋼協会社会インフラ鋼材技術検討部会（旧建設用鋼材利用検討 WG）とサステナブルシステム部会の下、2018年度から2021年度に「腐食劣化解析に基づく鋼構造物維持の最適化」研究会として活動してきた。本研究会では、腐食寿命予測手法の基盤構築にむけて腐食メカニズムを明らかにするために、次の3点を目標とした。

- 1) 鋼構造物として鋼橋を対象に、桁端部のような腐食環境の厳しい部位の腐食環境データを取得する。
- 2) 実際の腐食環境を模擬した環境下での鉄鋼材料の電気化学特性および腐食特性データのデータベース化を計る。
- 3) 腐食環境データと電気化学特性・腐食特性データをベースとして腐食速度（寿命）を予測する数理解析法の基盤を構築する。実際の活動は、Fig.2に示すように腐食環境のマルチセンシンググループと腐食特性の電気化学的解明グループ、腐食現象の数理解析グループの3つ分かれて相互に情報を共有しながら研究を遂行した。研究会の研究以外の活動としては、秋季講演大会の討論会を1回とシンポジウムを3回、幹事会を3回、全体会を6回、研究会を2回実施している。コロナ禍のため、最後の1年は対面での活動が殆ど出来なかったが、ほぼ予定通りの研究活動を実施出来た。ここでは、本研究会

の活動により得られた研究結果の概略を紹介する。なお、本研究会の成果の一部は、鉄と鋼誌、107巻、12号（2021）の特集号「インフラ構造物の経年劣化に対する維持管理の最適化に向けて」として公表されている。より詳細な内容に興味がありましたらこの特集号をご覧ください。

② 腐食環境のマルチセンシンググループの研究成果

このグループにおいて、実環境やその模擬環境において現在実用化されている様々なセンシング技術を活用して、腐食現象の数理解析のための腐食環境データの取得と大気腐食挙動の調査が行われた。

各種大気腐食センサによる腐食モニタリングに関する研究では、大気腐食環境を適切に把握するための腐食モニタリング技術を調査するため、3種類のセンサ（ACMセンサと同心リング型交流インピーダンスセンサ、電気抵抗式腐食速度センサ）を用いて亜熱帯地域の実環境もしくは模擬橋梁においてモニタリングを実施した。全てのセンサにおいて、腐食環境の変化に対応した応答が観測でき、市販センサの有効性を確認した。特に、電気抵抗式腐食速度センサについては、同時に曝露試験した鋼板の腐食減量と電気抵抗値から換算で求めた腐食減量の結果とほぼ一致した。このことから、最も有効なセンサであることが明らかとなった。

氷結下温度サイクルにおける鉄表面のカップリング電流および電位分布の可視化に関する研究では、積雪寒冷地におけ

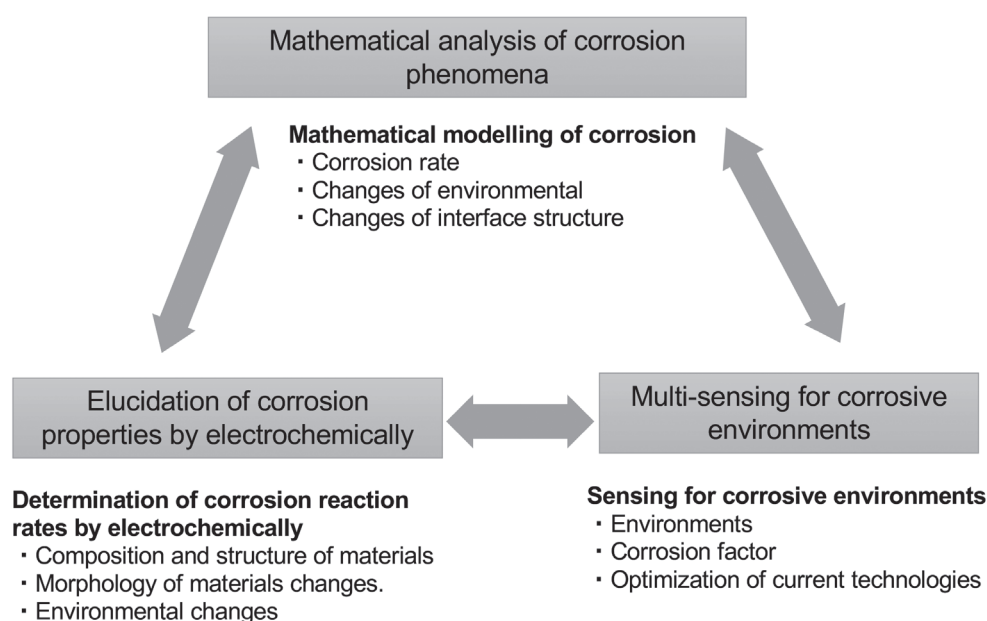


Fig.2 Research structure of research project of optimization of maintenance of steel structures based on corrosion degradation analysis.

る腐食挙動を調査するために作製したマルチタイプの鉄電極を用いて、氷の下におけるカップリング電流マップを計測した (Fig.3)。氷点以下においても 60 RH% 以上にいて結露 (氷結) にともない金属電極でイオン電流が流れた。水で覆われていない金属のイオン電流は、氷点以上の場合と同様に相対湿度に依存する大気腐食型であることが分かった。氷に被覆された金属上では、純水より排除された塩水溶液層形成によりイオン電流が流れ、温度に対する正の依存性を示す水溶液型腐食挙動であった。この理由として、氷中で純氷結晶の成長にともない氷相から排除された塩イオンが濃縮された液相を形成することによって考えられた。NaCl 水溶液より形成された氷ドロップレット下では、氷の周辺部がアノード、内側がカソードを分担する傾向にあることが明らかとなった。

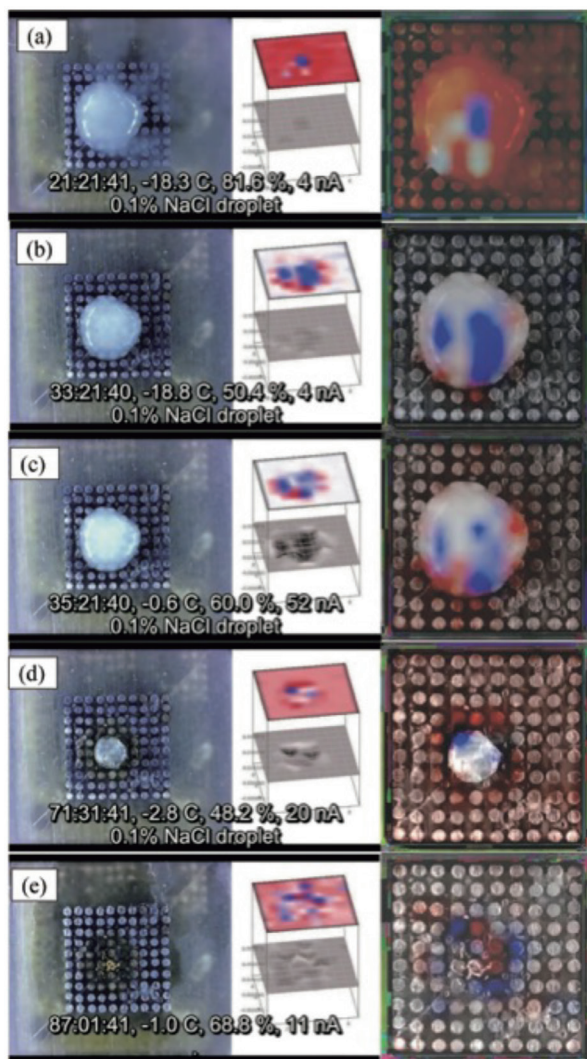


Fig.3 Typical video images, *i*CP maps, and merged image of them (in color) after freezing at $T \approx -20^{\circ}\text{C}$ (a), at $T \approx -20^{\circ}\text{C}$ after 5 cycle (b), at $T \approx 0^{\circ}\text{C}$ after 5 cycle (c), at $T \approx 0^{\circ}\text{C}$ after 13 cycle (d), and at $T \approx 0^{\circ}\text{C}$ after disappearance of ice droplet (e). (Online version in color.)²⁾ (Fig. 6 in T. Kishioka and K. Azumi: Tetsu-to-Hagane, 107 (2021), 1057-1065) (Online version in color.)

氷下の鉄電極は、氷に覆われていない鉄電極に対して卑側の電位を示した。さらに、氷下で水素発生によると思われる気泡発生が観察された。

炭素鋼の大気腐食挙動に及ぼす降雨の影響に関する研究では、炭素鋼の大気腐食挙動におよぼす降雨の影響を調査するため、降雨模擬条件組み込んだ複合サイクル腐食試験により炭素鋼の腐食速度を炭素鋼製同心円型腐食センサを用いて連続的に測定した。降雨過程直後に腐食速度は急激に上昇し、腐食初期において降雨時間が短くなると腐食速度は高くなった。腐食生成物が形成すると、降雨後の腐食速度は降雨時間に関係なくほとんど同じであることが明らかとなった。腐食に及ぼす降雨の影響について、塩の洗い流しによる腐食抑制効果と水の供給による腐食促進効果ともに確認された。しかし、この研究における腐食試験条件下において、腐食を促進する効果がより顕著であることが示された。

鋼桁橋における構造部位別の付着塩分とさび厚に着目した腐食特性評価に関する研究を実施した。この研究では、複合環境作用下にある鋼桁橋の構造部位別の腐食環境評価を目的として、亜熱帯環境下の鋼I型暴露桁の内外面を対象に、降雨による塩の洗い流し効果の違いである雨がかりの有無、ウェブ面と下フランジ面での飛来塩分量、付着塩分量、さび厚について詳細に調査した。雨がかり無しでは塩分が多く付着し、雨がかり有りでは降雨による洗浄、風速と日射による乾燥の影響を受けて付着率が低いことを明らかにした。1年曝露において、内陸部では雨がかり有りの部位は雨がかり無しより厚いさびを形成する傾向が見られた。沿岸部での雨がかり無し水平面天向は、さび厚が本来内陸部にて1年で腐食する速度を上回り雨がかり有りとならば雨がかり無しのさび厚の関係が逆転した。この理由として冬季の付着塩分量の多さにより起因すると考えられた。

凍結防止剤散布地域での塩分飛来量と鋼材腐食に関する研究では、凍結防止剤散布地域の橋梁について、凍結防止剤の散布量と桁部への飛来量、鋼材の腐食量の関係を調査した。測定する橋梁を、凍結防止剤散布される平地部に建設された9橋梁および山間部の4橋梁とした。なお、この研究で対象にした平地部に建設された橋梁は全て上下線の並列橋の高低差のない橋梁あり、山間部の4橋梁は高低差のある並列橋および地山に接近した橋梁、トンネル出入口に接続した橋梁、高低差のない並列橋であった。全橋梁に共通の傾向として、ウェブ下部に比べて下フランジ上面の飛来量は多く、板厚減少量も多かった。さらに、並列橋では、その位置関係により腐食挙動が異なること、凍結防止剤の飛来量と腐食量との関係は飛来塩分量と腐食量との関係とほぼ同じであることが明らかとなった。今回の研究から、海からの飛来塩分環境での耐候性鋼橋の適用目安は、凍結防止剤の飛散する環境にも適

用可能であることを示唆する結果が得られた。

3 腐食特性の電気化学的 解明グループの研究成果

乾湿繰返し環境中における各種鋼材の大気腐食速度に及ぼす相対湿度 (RH) の影響に関する研究では、3種類の鉄鋼材料 (Fe, SBHS500鋼, SMA490AW鋼) から切り出した試験片の中心部に $MgCl_2$ 水溶液を滴下した後、相対湿度を制御した大気と乾燥大気を繰り返し接触させて 5000ks 以上の湿潤累積時間で腐食させた。乾燥後の試料の表面状態、試料の質量、腐食部の面積・体積を観測することによって大気腐食挙動に及ぼす RH と鋼種の影響を検討し、以下の知見を得た (Fig.4)。

1) Fe板に対して RH を変化させた場合、RH75% では腐食面積が変化せず、一定の速度で質量が増加する領域 (i)、腐食面積と質量が急激に増加する領域 (ii)、腐食面積の質量の増加速度が減少する領域 (iii) に分類される経時変化が得られた。RH43% では領域 (i) のみが、RH33% では領域 (i) および (ii) が得られた。RH75% における質量増加速度の順番は領域 (ii) > 領域 (i) > 領域 (iii) であり、領域 (i) においては $RH75\% > RH43\% \approx RH33\%$ であった。

2) RH を 75% に固定して鋼材の種類を変化させた場合、全ての鋼材で領域 (i) (ii) (iii) が得られ、その質量増加速度は領域 (ii) > 領域 (i) > 領域 (iii) の順に高くなり、領域 (i) における質量増加速度は $SBHS500\text{鋼} \gg SMA490AW\text{鋼} > Fe$ に高くなった。

NaCl 溶液乾湿繰返し環境における Fe および鋼材 (SM490Y および SMA490AW) の腐食挙動と腐食形態より求めた腐食速度に関する研究では、海浜地域かつ日照部における大気腐食を模擬するため、ペルチェ素子を用いた温度一定の試料台装置上に置かれた試料に間欠的に一定量の液滴を滴下し、乾湿繰返し環境における純鉄および鉄鋼材料の大気腐食挙動を追跡した。その結果、以下知見を得た。

1) Fe および SM490Y, SMA490AW に 0.02 M NaCl 水溶液で滴下乾湿繰返し試験を行うと、滴下中心部と比較して滴下端部で激しい腐食が進行した。サイクル数の増大に従って滴下部全体が、赤褐色の腐食生成物に覆われた。

2) 乾湿繰返し試験 150 回後の試料における滴下端部の最大腐食減肉厚さは、中心部に比べて厚かった。中心部における最大腐食減肉厚さは、 $Fe < SM490Y < SMA490AW$ の順に厚くなり、端部においては $Fe \gg SM490Y = SMA490AW$ の順に厚くなった。

3) 乾湿繰返し試験 150 回後の試料体積減少は、滴下中心部においては、端部に比べて無視できるほど小さい一方で、

液滴端部における体積減少は、サイクル数とともに増大する。しかし、全ての試料において 100 回以後で定常となり、その値は純鉄 > SMA490AW > SM490Y の順であった。

発錆鋼板表面に形成した水膜内の溶存酸素濃度測定に関する研究では、さび層を有する鋼上に形成した水膜内で溶存酸素濃度測定と電気化学測定を同時に実施した。このことで、大気腐食挙動に及ぼす溶存酸素の影響および水膜の乾燥過程における腐食挙動の変化を検討した。その結果、以下の知見を得た。

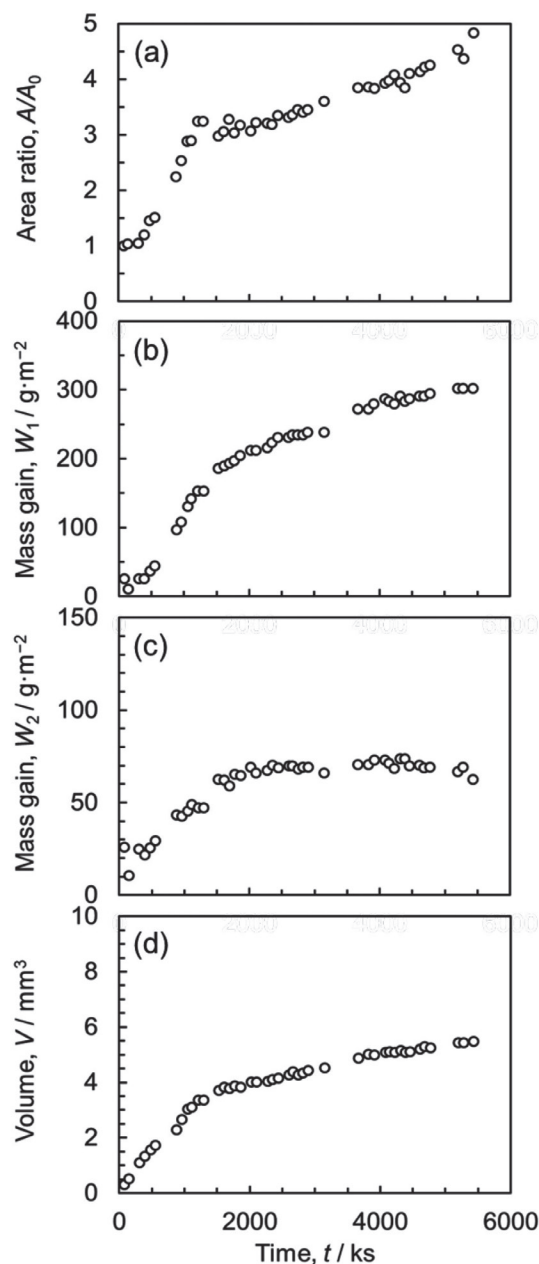


Fig.4 Changes in (a) an area ratio (A/A_0), (b) a mass gain (W_1), (c) a mass gain (W_2) and (d) a volume (V) of the corroded part of the Fe specimen during the wet/dry cyclic corrosion test. Wet condition : RH75%³⁾. (Fig. 3 in T. Haruna, M. Nakai, and Y. Hirohata : Tetsu-to-Hagané, 107 (2021) 1036-1046)

1) 色素応答型溶存酸素濃度計を用いて、炭素鋼表面およびさび層表面に形成した水膜内の酸素消費をモニタリングすることに成功した。

2) さび層が形成した炭素鋼では、研磨まま鋼板と比較して水膜内の溶存酸素濃度と水膜内の自然電位ともに高かった。また、乾湿繰り返しサイクル数が多いほど貴な電位を示した。

3) さび層が形成した炭素鋼上の水膜内の異なる高さで溶存酸素濃度を測定することで、酸素還元速度に及ぼすさび層成分の影響の評価に成功した。

炭素鋼SM490Yの大気腐食に及ぼす金属カチオンの影響に関する研究では、異なる金属カチオンを含む模擬淡水 ($[Cl^-] = 10\text{mM}$) における炭素鋼の腐食挙動を、浸漬試験と各種電気化学測定、走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) とX線光電子分光装置による観察および分析により実施した。また、金属カチオンの硬さX、から導かれる Otani ら⁴⁾ が提案した腐食抑制因子Y、に基づき腐食抑制機構を検討した。模擬淡水における炭素鋼SM490Yの腐食挙動は金属カチオンによって変化し、浸漬後の表面形態も変化し、本研究で用いた3種類の模擬淡水において、 Zn^{2+} が存在する溶液中の炭素鋼SM490Yの腐食速度は最も小さかった。また、 Zn^{2+} を含む溶液に浸漬試験した試料表面でのみ溶液由来の Zn^{2+} が検出されたことから、 Zn^{2+} は炭素鋼の不動態皮膜と保護層を形成して、塩化物イオンの攻撃を防ぎ、炭素鋼の腐食速度を低下させる腐食抑制機構を提案した。

4 腐食現象の数理解析グループの研究成果

炭素鋼の孔食発生におけるCaS介在物の役割に関する研究では、炭素鋼の孔食発生挙動を数理モデル化する糸口を見出すため、橋梁用高性能鋼SBHS500の孔食発生挙動をpHおよび塩化物イオン濃度を系統的に変化させた溶液中でマクロスケールおよびマイクロスケールの試験面を用いた電気化学計測と浸漬試験により調査した。塩化物イオンを含むホウ酸塩緩衝液中でのSBHS500鋼の孔食挙動をマクロスケールおよびマイクロスケールの分極、浸漬試験、光学顕微鏡および走査電子顕微鏡により調査した。その結果、SBHS500鋼には、Caを主成分とする硫化物 (CaS) とCaおよびAlの酸化物が隣り合った形態の非金属介在物が存在することが明らかとなった。10m M NaClを含むホウ酸塩緩衝液 (pH8.0) に25℃で24時間浸漬したところ、鋼の母相は腐食されないが、CaS介在物が部分的に溶出するとを明らかにした。また、SBHS500鋼を乾湿腐食試験を実施した後においては、孔食が発生し、ピット中央付近からカルシウムと硫黄が検出

されたこと、さらにマイクロスケール分極測定の結果から、孔食発生部位はCaS介在物であることを明らかにした。また、10mM NaClを含むホウ酸塩緩衝液中では、マイクロスケール電極を使った脱不動態化pHの測定において、CaS介在物を含む領域ではpH6.0であったが、CaS介在物を含む領域ではpH6.8~6.6であることを明らかにした。以上から、SBHS500鋼のCaS介在物は、介在物周囲の鋼母相の脱不動態化を誘発する可能性が示唆された。

環境因子を考慮した炭素鋼の大気腐食モデリングとシミュレーションに関する研究では、鉄鋼の大気腐食に及ぼす環境要因の影響を明らかにするために、相対湿度および降雨を考慮した新しい大気腐食低減予測モデルを開発した。Fig.5に開発したモデルを用いて、宮古島市、銚子市、つくば市における2002年1月1日から1年間の大気腐食シミュレーションを行った結果を示す。図より、銚子市と宮古島市における曝露1年後の腐食減量のシミュレーション結果は、実測データを良く再現できている。しかし、つくば市における曝露1年後および3地点における曝露半年後の腐食減量のシミュレーション結果は、実測データと比べて大きい値となっている。この結果から、シミュレーション精度を向上するためには、各地点ごとに適切な腐食抑制係数を設定すること、および温度効果の導入が必要であることが明らかとなった。また、シミュレーションによって、実験で得ている相対湿度と水膜厚さの関係とすべての地点における付着海塩量を再現できたが、吸着海塩量の再現には、降雨の考慮が重要であることが示唆された。

NaClナノ粒子の付着した炭素鋼表面の発錆過程のその場観察に関する研究では、1 μm 以下のNaClナノ粒子を付着させた炭素鋼表面の大気腐食を顕微ラマン分光法により室温・相対湿度制御下でその場観察した。その結果、平均粒子径1 μm 以下のNaCl微粒子が付着した鋼は、非晶質オキシ水酸化鉄として発錆し、発錆時間は相対湿度の低下に従って指数関数的に長くなった。また、発錆時間は乾燥処理により高湿度では長時間化したが、低湿度では短時間化する傾向であった。乾燥処理による発錆時間の違いは、NaCl微粒子の溶解によって形成する水溶液滴内のFe (II) イオンの拡散が影響することが示唆された。

すきま内部に配置した316Lステンレス鋼上における酸素還元反応速度の検討に関する研究では、鋼板どうしの接合部における鋼の大気腐食挙動を評価するために、すきま内における溶存酸素還元反応とすきま形状の影響について電気化学測定と数値シミュレーション (FEMシミュレーション) による検討を行った。その結果、すきま内における316Lステンレス鋼のカソード分極曲線は、すきま外部で測定された分極曲線と同様に、酸素の還元反応の電流変化とその拡散限界電

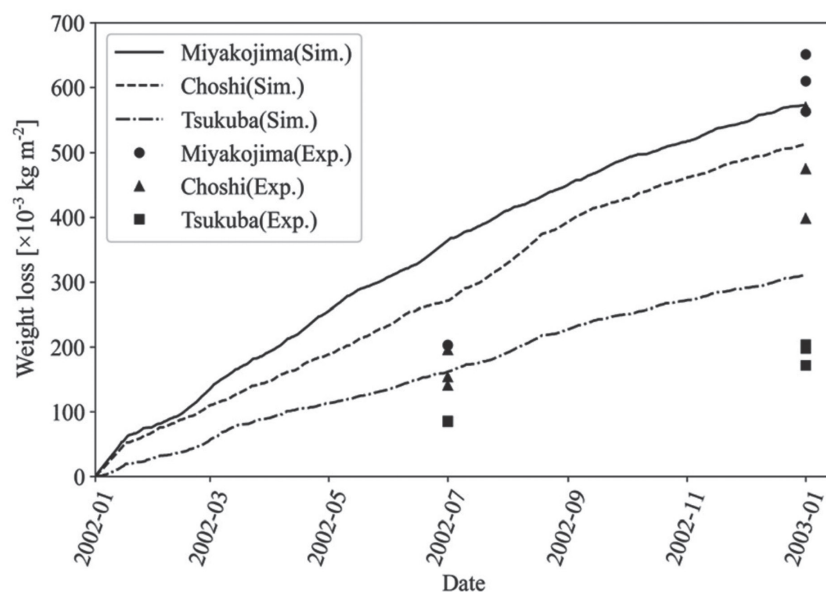


Fig.5 Weight loss of carbon steel under open test condition. Solid line, dash line and dash-dot line represent simulation data at Miyakojima, Choshi and Tsukuba, respectively. Closed circle, closed triangle and closed square represent experimental data at Miyakojima, Choshi and Tsukuba, respectively⁵⁾. (Fig. 5 in T. Igarashi, A. Komatsu, C. Kato, and M. Sakairi : Tetsu-to-Hagané, 107 (2021) 998-1003)

流域が確認された。また、すきま内における溶存酸素還元の影響は、すきま距離の減少に伴って減少し、電極直径の減少に伴い拡散限界電流は増加した。すきま内部における溶存酸素還元反応におよぼすすきま形状の影響は、鋼板表面における酸素勾配からFEMシミュレーションした結果とその傾向はほぼ一致したが、数値には乖離があった。このことから、パラメータや自然対流層の考慮などの改善が必要であることが明らかとなった。

5 結言

ここでは、「腐食劣化解析に基づく鋼構造物維持の最適化」研究会の活動で得られた成果の一部を紹介した。研究会の当初目標であった、電気化学特性・腐食特性のデータベース化には至らなかったが、一般社団法人日本鉄鋼協会の研究会I「インフラ劣化診断のためのデータサイエンス」が発足し、この研究を継続して実施している。

前述したように、高経年化した社会基盤の数が増えている、温室効果ガスの放出削減や人口が減少している状況にお

いて、本研究会のテーマはますます重要になると予想される。新設だけでなく、維持管理にも着目した研究や腐食の研究に興味を持って頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) 腐食コスト調査委員会：材料と環境, 69 (2020), 283. <https://doi.org/10.3323/jcorr.69.283>
- 2) 西岡樹希, 安住和久：鉄と鋼, 107 (2021), 1057. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2021-059>
- 3) 春名匠, 中井美紗季, 廣畑洋平：鉄と鋼, 107 (2021), 1036. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2021-062>
- 4) K. Otani and M. Sakairi : Corros. Sci, 111 (2016), 302. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.020>
- 5) 五十嵐誉廣, 小松篤史, 加藤千明, 坂入正敏：鉄と鋼, 107 (2021), 998. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-110>

(2022年5月26日受付)