

シンポジウム

鋼構造物の適切な維持管理に向けて

資 料

2025 年 9 月 18 日（木）13:25～16:30

（一社）日本鉄鋼協会

サステナブルシステム部会
高経年化した鋼構造物の維持管理 フォーラム

プログラム

日時：2025 年 9 月 18 日（木）13:25～16:30

場所：第 190 回秋季講演大会 会場 5（北海道大学 札幌キャンパス）

13:25-13:30 開会の挨拶 「高経年化した鋼構造物の維持管理」フォーラム座長
北海道大学 坂入正敏

13:30-13:55

表面のハイパースペクトル解析による大気環境下での炭素鋼の腐食リスク予測
物材機 構片山英樹，法政大 吉田優人，明石孝也

13:55-14:20

花粉センサーを応用した海塩粒子測定技術の現状と展望
JAEA 大谷恭平，五十嵐誉廣

14:20-14:45

ACM センサによる大気腐食状況の評価
東京海洋大学 篠原 正

14:45-15:00 休憩

15:00-15:25

寒冷地高濃度塩分環境を想定した鉄鋼大気腐食の定量的検討
北大総合化学院 野村耕作 古川沙姫，
北大院工 岩井愛，北野翔，幅崎浩樹，伏見公志

15:25-15:50

乾湿繰り返し環境中における各種鉄鋼材料の腐食予測
関西大学 廣畑洋平，前川翔平，春名 匠

15:50-15:15

積雪寒冷地模を模擬した溶液環境における鋼の電気化学挙動
北大院工 坂入正敏，山本琢真，Shen Tong

16:15～16:30 総合討議

16:30 閉会の挨拶

表面のハイパースペクトル解析による 大気環境下での炭素鋼の腐食予測の可能性

Possibility of Hyperspectral Surface Analysis for Predicting Corrosion Resistance of Carbon Steels in Atmospheric Environment

物材機構 片山英樹
法政大 吉田優人, 明石孝也

1. はじめに

インフラ構造物の維持管理では、近年、メンテナンスコストの低減や安全性の向上の観点から、損傷が発生してから対応する「事後保全型」から、重大な損傷を未然に防ぐ「予防保全型」への転換¹⁾が強く求められており、その実現には、腐食の進行状況を簡便かつ定量的に把握できる診断技術の確立が不可欠である。

現在、インフラ構造物の腐食劣化診断は、診断者の経験や主観に依存した近接目視が主流であるが、近年では、より客観的で定量的な評価手法として光学技術を用いた診断法が提案されている。しかしながら、これらの手法の多くは、外観から腐食の有無や形態、範囲を判断するにとどまり、腐食リスクの将来的な予測までは困難である。

本研究では、診断技術の高度化を目指し、物質の特性や状態を可視化できるハイパースペクトルカメラに着目し、そのスペクトル解析によって大気環境下における炭素鋼の腐食予測の可能性について検討した。

2. 実験方法

標準試料として 4 種類の既知の鉄系腐食生成物(α -FeOOH, β -FeOOH, γ -FeOOH, Fe_3O_4)、ハイパースペクトル解析の有用性を検証するための試料として屋外環境で暴露試験を行った炭素鋼(170 x 70 x 5t (mm))を用いた。暴露試験は、日本ウェザリングテストセンター銚子試験場および宮古島試験場で直接暴露および遮蔽暴露環境で最長 2.5 年間行った。

ハイパースペクトル測定には、測定波長: 350~1100nm, 波長分解能: 5nm のハイパースペクトルカメラを用いた。ハイパースペクトルカメラは架台に鉛直下向きに設置し、光拡散ボックス内にセットした試料に対し、3 方向から光を照射して試料の中心域を撮影した。白板を被写体として撮影した結果を光源データ、計測対象物を撮影した結果を分光データとして、反射率は分光データを光源データで除算することにより得た。ハイパースペクトル解析については、SAM(Spectral Angle Mapper)解析を用いた。SAM 解析は比較用教師スペクトルとハイパースペクトルデータの各画素の計測スペクトルとのスペクトル間の角度を類似度として、スペクトル間の角度から物質の分類を行う解析方法であり、物理的解釈が容易であること、測定波長数が多いハイパースペクトルデータに対しても計算負荷が小さいことから、ハイパースペクトルデータの解析で広く用いられている。

3. 結果と考察

既知の鉄系腐食生成物に対してハイパースペクトル測定を実施した結果、各腐食生成物に固有の反射スペクトルが確認された。具体的には、 α -FeOOH では 580 nm 付近と 760 nm 付近、 β -FeOOH では 740 nm 付近、 γ -FeOOH では 600 nm 付近と 790 nm 付近において、それぞれ反射率の高い特徴的なスペクトルが観測された。一方、 Fe_3O_4 に関しては、明確な反射スペクトルは確認されなかった。これらの結果から、ハイパースペクトル解析により、4 種類の鉄系腐食生成物を識別できる可能性が示された。

さらに、銚子試験場および宮古島試験場において実施した直接暴露および遮蔽暴露試験片についてハイパースペクトル測定を行った。それぞれの試験片に対し SAM 解析を適用した結果、両試験場において、直接暴露試験片では表面に γ -FeOOH の存在量が多く、一方、遮蔽暴露試験片では主に Fe_3O_4 が表面に検出されることがわかった。また、4 種類の鉄系腐食生成物の表面存在割合と腐食変化量との相関を調べた結果、特に α -FeOOH および β -FeOOH において有意な相関が確認された。

参考文献

- 1) 国土交通省資料, 予防保全型のインフラ老朽化対策の推進(2020 年 11 月 10 日)

花粉センサーを応用した海塩粒子測定技術の現状と展望

JAEA 大谷恭平, 五十嵐誉廣

1. はじめに

大気腐食速度の予測において、飛来海塩量は重要なパラメータの一つである。しかし、JIS 規定のドライガーゼ法は 1 か月単位の測定で時間分解能が低く、精度向上が求められている。著者らはリアルタイム測定手法として、市販の花粉センサーに着目した。花粉センサーは、粒子の球形度に応じた偏光度 P と、粒径に応じた散乱強度 I を測定できる。海塩粒子は球形度が高いため、鉱物粒子などと識別可能と考えた。

本研究では、ドライガーゼ法と花粉センサーによる 1 年間の同時測定を実施し、両者の相関を統計的に解析することで、鉱物粒子や花粉を除外し、海塩粒子を識別できる層別条件の抽出を試みた。

2. 実験方法

花粉センサーによる測定：茨城県沿岸部の百葉箱（海岸から約 900 m）に、神栄テクノロジー社製の花粉センサー PS2 を設置し、標準ソフトウェアを用いて 7 日間の粒子測定を実施した。測定期間は 2024 年 4 月から 2025 年 3 月までで、計 33 回行った。得られた粒子データは、偏光度 P と散乱強度 I に基づき、(a)全データ、(b) $0.6 < P < 0.9$ かつ $I < 0.2$ （微小球形粒子）に層別し、それぞれの粒子数を算出した。

ドライガーゼ法による測定：JIS Z 2382 に準拠し、測定期間を 7 日間に設定して海塩粒子を捕集した。ドライガーゼは花粉センサーと同じ百葉箱内に設置し、すべての測定を花粉センサーと同時に実施した。捕集後は、イオン交換水で塩分を浸出し、吸光光度計（photoLab 7100 VIS）で分析。飛来塩分量は JIS に基づき、 $\text{mg dm}^{-2} \text{d}^{-1}$ (mdd) 単位で算出した。

3. 結果

Fig. 1 に、異なる層別条件で算出した花粉センサーの 7 日間あたりのカウント数と、ドライガーゼ法による飛来海塩量の関係を示す。Fig. 1(a)は全カウント数との比較であり、相関係数は 0.61 とやや低い。これは全カウントには鉱物粒子や花粉などが含まれるためと考えられる。一方、Fig. 1(b)では球形粒子のカウント数と飛来塩分量に強い相関が見られ、相関係数は 0.92 となった。これは、球形粒子に層別することで鉱物粒子や花粉を除外し、主に海塩粒子のみを測定できたためと考えられる。

以上より、適切な層別条件を設定すれば、花粉センサーの測定値とドライガーゼ法による飛来塩分量の間に強い相関が得られ、花粉センサーによる飛来海塩の測定が可能であると考えられる。今後は、他地点での測定データとの比較によって茨城県沿岸部以外での適用可能性を検討するとともに、ACM センサーとの同時測定により得られたデータから付着塩分量との相関を解析する。

Takahiro Igarashi (Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirakata, Tokai-mura, Ibaraki, 319-1195)

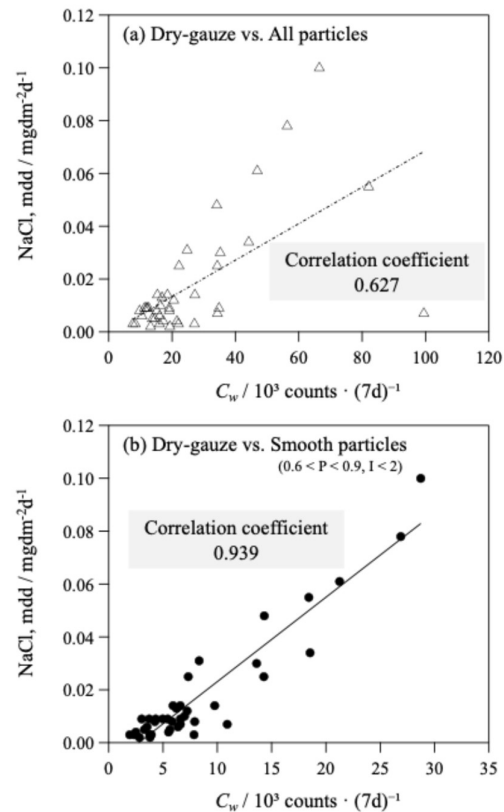


Fig. 1 Relationship between dry gauze data and pollen sensor data.

ACMセンサによる大気腐食状況の評価

Evaluation of Atmospheric Corrosion Conditions Using ACM Sensors

東京海洋大学 篠原 正

1. はじめに

ACM(Atmospheric Corrosion Monitor)センサ¹⁾の出力を降雨、化学結露および乾燥だけでなく、物理結露-夜露、朝露、霧、遷移期間(降雨の影響が残っている期間)-に分類し、各々の期間における腐食状況を検討した。

2. 降雨期間における腐食挙動

化学結露条件下における炭素鋼の腐食速度(CR)と ACM センサ出力(Q: 日平均電気量)との関係は

$$\log CR [\text{mm/y}] = 0.378 \log Q [\text{C/day}] - 0.636 \quad (1)$$

与えられる¹⁾。

人工降雨装置によって調べられた、炭素鋼の腐食速度(CR)と ACM センサ出力(I)との関係²⁾を図1に示す。ここで、 $I[\mu\text{A}]$ を平均センサ出力、 $T_d = 86400\text{s}$ を1日あたりの時間とすると、式(1)は

$$\log CR [\text{mm/y}] = 0.378 \log (10^{-6} I \cdot T_d) - 0.636 = 0.378 \log I [\mu\text{A}] - 1.038 \quad (2)$$

与えられる。式(2)におけるCRとIの関係は図1にも示され、 $I < 10\mu\text{A}$ の領域におけるプロットとよく一致している。これは、 $I < 10\mu\text{A}$ の場合、化学結露条件用の式(2)を用いて化学結露条件下および降雨条件下におけるCR値を推定できることを意味する。

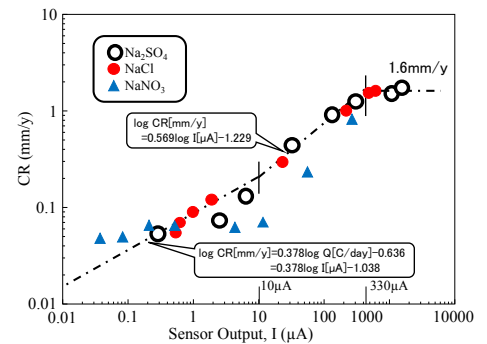


Fig.1 Relationship between CR and I under rain condition.

3. 物理結露を考慮した腐食量の推定

鈴木ら³⁾および篠原ら⁴⁾は物理結露条件下での炭素鋼の腐食挙動を調査した(図2)。その関係は、

$$\begin{aligned} \log CR [\text{mm/y}] &= 0.378 \log Q - 1.271 \\ &= 0.378 \log I [\mu\text{A}] - 1.660 \quad (3) \end{aligned}$$

で表され、同じQ値あるいはI値においてCRが化学結露条件よりも小さくなる。

山中湖におけるACMセンサ出力データを用いて、物理結露を考慮しない場合(式(2)のみ採用)と考慮した場合(式(2)および(3))について、各時刻の腐食速度を算出し、それらを積算して腐食量を求め、実測値と表1中で比較した。物理結露を考慮しない場合(Estimated-1)には、推定値が実測値よりもかなり大きくなることもあったが、物理結露を考慮した場合(Estimated-2)には、推定値は測定値とよく一致を示した。

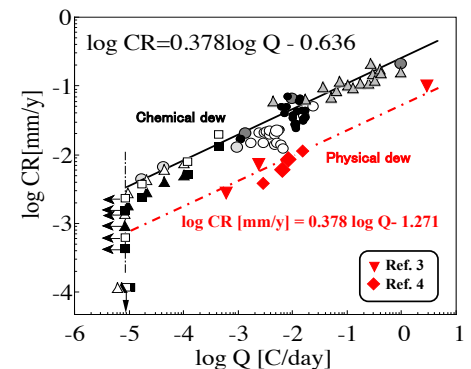


Fig.2 Relationship between CR and Q under conditions of chemical and physical dews.

文献

- 1) 篠原 正: 材料と環境, **73**, 85(2024).
- 2) Dara To, T. Shinohara, O. Umezawa: ECS Transactions, **75** (29), 1 (2017).
- 3) 鈴木智康, 小野孝也, 高橋 賢, 野田和彦: 材料と環境, **68**, 112(2019).
- 4) 篠原 正, 龍岡照久, 坂入正敏, 大津直史: 材料と環境 2024, p.254(2024)

Tadashi Shinohara (Tokyo University of Marine Science and Technology, 1-3-1 Todoroki-cho, Inage-ku, Chiba 263-0021)

Table2 Results of exposure tests at Yamanakako.

Start	End	Measured (μm)	Estimated-1 (μm)	Estimated-2 (μm)
2004/3/8	2004/4/2	0.51	1.29	0.45
2004/4/2	2004/5/13	3.08	3.21	-
2004/5/13	2004/6/10	1.84	1.86	-
2004/7/5	2004/8/5	1.55	3.45	1.88
2004/8/5	2004/9/6	3.71	3.84	-

寒冷地高濃度塩分環境を想定した鉄鋼大気腐食の定量的検討

Quantitative study of atmospheric corrosion of steel in low temperature and high salinity conditions

¹北海道大学 大学院総合化学院, ²北海道大学 大学院工学研究院

野村耕作¹, 古川沙姫¹, 岩井愛², 北野翔², 幅崎浩樹², 伏見公志²

1. はじめに

低温における鉄鋼材料の腐食速度は一般的に高温のそれよりも小さいが、冬季の日平均気温が 0°C 以下になる寒冷地、特に日本海側の海岸地区や融雪剤を散布する幹線道路沿いにおける大気腐食速度は夏季よりも大きくなることが指摘されている[1]。このような寒冷地特有の大気腐食現象を定量的に説明するためには、低温濃厚塩水溶液の化学物性および鉄鋼/水溶液界面の物理化学特性を把握することが重要と考えられるが、それらデータは十分に整備されているとは言えない。

本発表では、特に 0°C 以下における NaCl 水溶液中の溶存酸素 (DO) の濃度および拡散係数、および鉄/NaCl 水溶液の界面エネルギーなどを精査し、これら化学物性および物理化学物性が鉄の大気腐食速度に及ぼす影響を説明することを目的とした。

2. 実験方法

温度-15-25°C に保持した 1-5 mol dm⁻³ NaCl 水溶液中、試料極として純度 99.9%の鉄板、対極として白金板および参照極としてルギン管を接続した Ag/AgCl/sat. KCl@室温からなる三電極式電気化学セルを構築し、電位走査速度 0.2 mV s⁻¹ にて鉄の動電位分極を行った。また、開回路電位より-0.25 V で鉄の定電位分極を行い、Cottrell 式を用いて DO 拡散係数を求めた。表面上に 1.0 mm³ の NaCl 水溶液液滴を複数形成した鉄試料を環境試験機内に 1 時間保持し、腐食生成物除去前後の重量変化から大気腐食速度を算出した。NaCl 水溶液中の DO 濃度は Winkler 法[2]により測定した。一方、鉄/NaCl 水溶液の界面エネルギーを毛管上昇法[3]により測定した NaCl 水溶液の液体表面エネルギーおよび鉄板上に形成した NaCl 水溶液液滴の接触角から導出した。

3. 結果および考察

NaCl 水溶液浸漬状態にある鉄の腐食電流は温度の低下により減少する傾向にあった。一方、NaCl 水溶液液滴形成時の鉄の大気腐食速度は温度の低下により増加した。Winkler 法により求めた NaCl 水溶液中の DO 濃度は温度の低下により増加する一方、鉄の定電位分極から導出した DO 拡散係数は温度の低下とともに低下した。これら DO データから算出した DO 還元電流は浸漬状態にある鉄の腐食電流と比例関係にあり、NaCl 水溶液中の鉄の腐食速度は主に DO 還元反応により決定することが確認された。毛管上昇法を用いて測定した NaCl 水溶液の液体表面エネルギーは温度の低下により増加した。また、NaCl 水溶液液滴の接触角は温度の低下により低下した。これらから得られた鉄/NaCl 水溶液の界面エネルギーはさらに温度の低下により減少する傾向にあった。比較的低い塩濃度においても温度の低下により接触面積の大きな薄い液滴が形成されるため、DO 還元反応が顕在化し液滴形成下における大気腐食速度は増加したと言える。

4. 参考文献

[1] 面田真孝, 水野大輔, 石川信行, 藤田栄, 第 65 回材料と環境討論会, A-307 (2018). [2] L. W. Winkler, *Ber. Dtsch. Ges.*, **21** (1888) 2843-2854. [3] T. Young, *Philos. Trans. R. Soc.*, **95** (1805) 65-87.

Kosaku Nomura (Graduate School of Chemical Sciences and Engineering, Hokkaido Univ., N13 W8, Kita-ku, Sapporo, JAPAN, 060-8628)

乾湿繰り返し環境中における各種鉄鋼材料の腐食予測 Corrosion Prediction of Various Steels in Repeatedly Wet-Dry Environment

関西大学 化学生命工学部 廣畑洋平, (院)前川翔平, 春名 匠

1. はじめに

鉄鋼材料を大気環境下で使用すると、大気腐食が進行する。海塩粒子などが金属表面に付着すると、海塩粒子の潮解作用のために乾湿繰り返しによる液膜の生成や乾燥が起こり、腐食反応を促進させる。

本研究では、鋼材上に生成したさび層の成長挙動と環境因子の関係性を検討するために、相対湿度(RH)を制御した大気腐食環境下においてさび層を形成した鋼材を設置し、乾湿繰り返し試験を実施することにより、重量変化から腐食挙動を定量的に評価した。また、重量変化を累積湿潤時間と RH で表した腐食予測式の構築を試みた。

2. 実験方法

純 Fe, 炭素鋼 SM490Y, 炭素鋼 SBHS500, 耐候性鋼 SMA490AW を 20 mm×20 mm に加工し、片面に 0.0205 kmol・m⁻³ の MgCl₂ 水溶液を滴下し、MgCl₂ を 6.25 g m⁻² 付着させたものを試験片として用いた。

Fig. 1 に乾燥湿潤環境試験に用いた実験装置を示す。試験片を RH 0%の大気に接触させる乾燥試験と所定の RH に制御した大気に接触させる湿潤試験を 10.8 ks 毎に繰り返す試験を行った。4 cycle 毎の乾燥時における試験片の重量を測定し、初期重量との差を試験片の表面積で除することにより、単位面積あたりの重量増加量を算出した。

3. 結果および考察

湿潤試験の RH を 76%に設定した乾湿繰り返し試験における各種鋼材試験片の重量増加量 ΔW と累積湿潤時間 t_{wet} の関係を Fig. 2 に示す。試験中の重量増加量は、純 Fe<SBHS500<SM490Y<SMA490AW の順になった。純 Fe の重量増加量が最小であったのは、大気環境下において、純 Fe は安定なさび層を形成し、欠陥が少ないことに起因している。一方 SMA490AW は、耐候性の向上に効果のある元素を含有しているが、短期間の測定ではさび層の保護性が十分に作用しないため重量増加量が最も大きくなったと考えられる¹⁾。重量増加量 ΔW (g・m⁻²)と累積湿潤時間 t_{wet} (ks)から、一般的に用いられている腐食予測式 $\Delta W = A t_{wet}^n$ を算出した。A は $t_{wet} = 1$ ks における腐食増加量、n は腐食速度の減衰指数である。その結果得られた各鋼材の腐食予測式を次に示す。

純 Fe	$\Delta W = 3.29 t_{wet}^{0.422}$
SBHS500	$\Delta W = 3.17 t_{wet}^{0.464}$
SM490Y	$\Delta W = 1.51 t_{wet}^{0.605}$
SMA490Y	$\Delta W = 2.28 t_{wet}^{0.551}$

参考文献

1) H. Katayama, K. Noda, M. Yamamoto and T. Kodama: Zairyo-to-Kankyo, 49(2000), 684-689.

Youhei Hirohata(Kansai University 3-3-35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 565-8680)

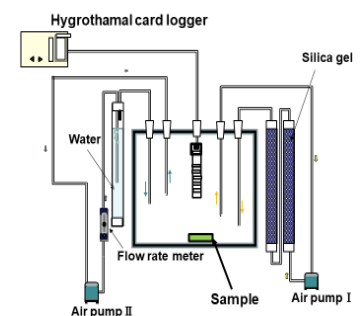


Fig. 1 Schematic drawing of system for wet and dry test.

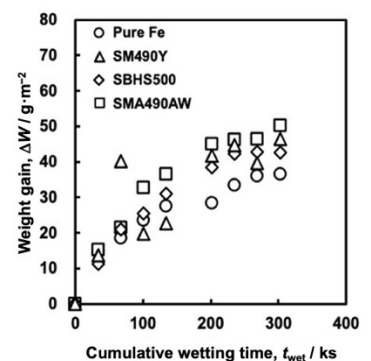


Fig. 2 Dependence of weight gain of specimens on cumulative wetting time in wet(RH76%)-dry test.

積雪寒冷地模を模擬した溶液環境における鋼の電気化学挙動

Electrochemical behavior of steels in model cold and snowy regions

北大院工 坂入正敏, 山本琢真, Shen Tong

1. はじめに

融雪剤（塩）により冬季に凍結を防止しているため、北海道内を走行する自動車などの腐食は厳しく、同じ使用期間でも融雪剤を使用していない地域より腐食している。そのため、走行後に温水で洗浄するなどの防食対策がとられている。さらに、道路橋のみならずその附帯設備も融雪剤により激しく腐食するため、融雪剤による腐食をどのように防ぐかは緊急の課題となっている。

以上のような理由から、融雪剤の影響を除くと、積雪・寒冷地の冬季に鋼の腐食を考慮する必要はないと考えられてきた。しかし、北海道の日本海側において融雪剤の影響がないにも関わらず、構造物が腐食することが知られている。面田らは¹⁾、冬季に電気抵抗式のセンサーを北海道内の日本海側に曝露することで腐食速度を調査し、冬季の速度は沖縄と近いと報告した。衣笠ら²⁾は、札幌市内にある建物の屋上において、積雪の状態による鋼の腐食への影響を調査した。その結果、雪の下で腐食が進行し、その速度は沖縄と近いことを報告し、その理由を積雪寒雪の下においても外部からの熱で温められた金属板上で、融雪により形成した水膜を通じて酸素が供給されるためであることを示した。しかし、北海道の冬季の外気温は氷点下であるため、水膜を形成する温度にならないと予想される。安住ら³⁾は、耐候性構造物の温度と湿度センサーを 15 カ所に設置し、構造物の方向や高さによる温度や湿度変化を計測した。その結果、外気温が氷点下でも、太陽光により鋼直下の温度は数十度になることを報告している。西尾からは、マルチ電極を用いてカップリング電流と電位分布を計測し、氷点下においてもカップリング電流が計測できることを報告した。このことは、氷点下においても電極と氷との界面に薄い水膜が存在していることを意味している。しかし、低温環境における電気化学データは不足しているため、氷点下付近の温度領域において電気化学測定を行った。

2. 実験方法

試料として SiC 耐水研磨紙を用いて研磨した SPCC 鋼板を使用した。研磨した試料は各測定前に、高純度水中およびエタノール中でそれぞれ 300 s 超音波洗浄を行った。比較のために 6000 系アルミニウム合金も使用した。

溶液には、Cl⁻濃度を 0.6 M に調整した市販の人工海水を脱気せずに使用した。溶液温度は、恒温水槽により 268 K から 293 K の範囲で制御した。

電気化学測定は、各実験前に 60 min 浸漬電位を計測したのち、動電位分極測定と電気化学インピーダンス(EIS)測定を行った。動電位分極測定は、浸漬電位からアノード方向とカソード方向に 20 mV/min の走査速度で行った。EIS 測定は、浸漬電位において電位振幅 10 mV、周波数範囲 1 mHz~100 kHz で行った。

3. 結果

浸漬電位は温度の低下に従って貴側に変化した。浸漬電位よりカソード方向に分極すると、酸素の拡散が律速である電流密度の平坦部（酸素の拡散限界電流）が測定された。SPCC の酸素の拡散限界電流密度は、アルミニウム合金より 1 桁程度大きかった。この電流密度は、材料に関わらず温度に依存しなかった。浸漬電位よりアノード方向に分極すると急激に電流は増加した。一方、EIS 測定の結果から、溶液抵抗に対応する高周波のインピーダンスは温度によりほぼ変化しないが、炭素鋼の溶解反応速度に対応する低周波のインピーダンス(電荷移動抵抗)は温度の上昇に伴い減少した。

参考文献

- 1) 面田真孝, 水野大輔, 石川信行, 藤田栄, 第 65 回材料と環境討論会講演要旨, A307 (2018).
- 2) 衣笠潤一郎, 坂入正敏, 材料と環境, 72, 1 (2023).
- 3) 安住和久, 坂入正敏, 伏見公志, 佐藤京, 三上健, 三浦正純, 鉄と鋼, 110, 1203 (2024).
- 4) 西岡樹希, 安住和久, 鉄と鋼, 107, 1057 (2021).

シンポジウム「鋼構造物の適切な維持管理に向けて」配布資料

非売品

発行日 2025 年 9 月 18 日

編集 一般社団法人 日本鉄鋼協会

学会部門

サステナブルシステム部会

高経年化した鋼構造物の維持管理フォーラム

発行者 一般社団法人 日本鉄鋼協会 業務執行理事・専務理事 小澤純夫

発行所一般社団法人 日本鉄鋼協会

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10 鉄鋼会館 5 階

著作権者の許可なく、転載およびコピーを禁じます。