

中性子を使った腐食鋼板の塗膜下腐食中の水の観察



竹谷 篤
Taketani Atsushi
(理化学研究所)



若林 泰生
Wakabayashi Yasuo
(理化学研究所)



大竹 淑恵
Otake Yoshie
(理化学研究所)



池田裕二郎
Ikeda Yujiro
(理化学研究所・
J-PARCセンター)



中山 武典
Nakayama Takenori
(神戸製鋼所)

1 はじめに

鉄は大量生産が可能で、安価で高強度であることから、インフラ構造物だけではなく、輸送機械やプラントなど、社会のあらゆるところで広く使われている材料である。しかし、腐食しやすいことが弱点である。大気中での腐食は、鉄と水との電気化学反応で生成される。このための対策として、水を鉄に接触させないために、表面を塗装することが最も広く行われている方法である。日本国内だけでこの防食のための塗装費用として年間約2兆円のコストがかかっている¹⁾。このコストを低減させるためには、さびの成長の決定因子である水の挙動を腐食中で観察し、腐食のメカニズムを解明することが必要であると考え、我々理研グループは神戸製鋼所と共同研究を行い、鉄での透過力が高く、かつ軽元素特に水素に対する検出感度の高い中性子線に着目し、理研小型中性子源 (RANS)^{2,4)} を用いて、塗装鋼板の塗膜下腐食中の水の定量化観察法を開発し、普通鋼と合金鋼の差異について調べた^{5,7)}。更に J-PARC での大強度中性子線を用いて、詳細な水の挙動を観察してきた。本稿では中性子透過画像法を用いた水の観察原理、実際の実験方法について解説して、塗膜下腐食中の水の動きの詳細観察について述べる。

2 水が見える原理

中性子は電荷を持たないために、X線や電子線に

比べて物質に対する透過力が格段に高く、また H, B, Li といった軽元素に対し感度が高い。そのため実際に使われている状態に近い厚い試料中 (今回の実験では鉄厚さ 6 mm) での水の分布を透過観察することに中性子透過法は最適な手法であると考えられる。

中性子の透過という観点からは、含水したサンプルは乾燥したサンプルに水を加えたものなので、これらの透過画像の差分をとることで、水のみが得ることができる。乾燥サンプルの中性子に対する吸収長とその厚さを L_a, t_a として、入射中性子強度を I_a^0 とすると、透過中性子強度は

$$I_a = I_a^0 \cdot \exp(-t_a/L_a) \quad (1)$$

となる。また水の吸収長と厚さを L_w, t_w とすると、含水サンプルに対しては、入射中性子強度を I_{a+w}^0 とすると、透過強度は

$$I_{a+w} = I_{a+w}^0 \cdot \exp(-t_a/L_a - t_w/L_w) \quad (2)$$

となる。式 (2) を式 (1) で除算して水の厚さ t_w について解くと、

$$t_w = L_w \cdot [\text{Log}(I_a/I_{a+w}) + \text{Log}(I_{a+w}^0/I_a^0)] \quad (3)$$

が得られる。

式 (3) の大括弧内の項は、透過画像のデータから求める。水の吸収長 L_w は実験的又は、実験条件からくるモデルを盛り込んだ放射線輸送計算シミュレーション⁸⁾ から求めることができる。

3 実験

今回の実験では塗装鋼板に傷をつけ、塩水噴霧と

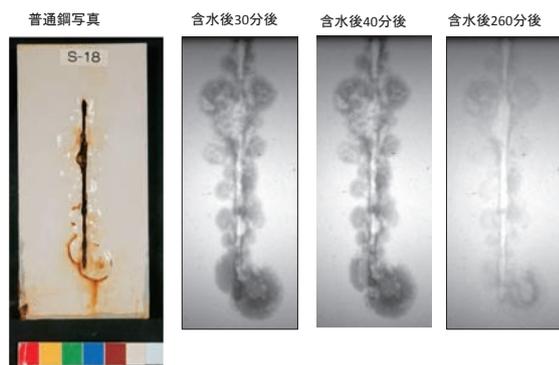


図1 塗膜下腐食させた普通鋼写真と乾燥過程での中性子透過像

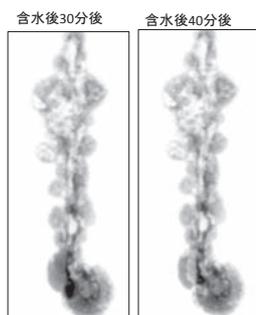


図2 普通鋼の乾燥過程での水の分布

乾燥を繰り返して、腐食を人工的に成長させたサンプルを用意した。このサンプルを飽和するまで水に浸し、引き揚げたのち、空气中で乾燥させながら、中性子の透過イメージを15秒ごとに撮像した。含水以外の前処理は行っていない。

4 観察

図1に腐食させた普通鋼（JIS-SM400相当）の写真と、含水状態から乾燥状態への中性子透過画像を示す。これらの画像は高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究機構が共同で運営するJ-PARCのパルス中性子源にあるビームラインで撮像したものである。画像の濃淡は透過した中性子数を示していて、明るい部分ほど多い。含水後30分、40分後を比べると、一見変化が捉えにくい。260分後になるとこの時間前後の画像では変化はなくなり、乾燥したと考えられ、見えているコントラストは腐食生成物（鉄さび） FeOOH のHの分布を示している。

これらの透過画像を式(3)を用いて、260分後の乾燥状態との差異をとり、処理することで、図2で示される鮮明な水のみ分布を得る。濃い部分ほ

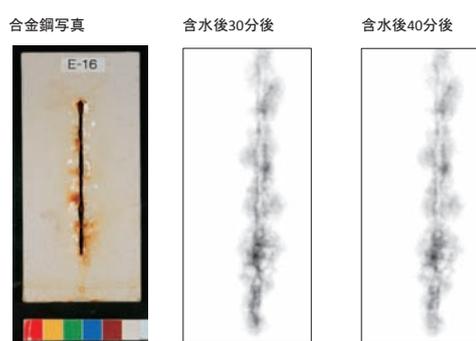


図3 塗膜下腐食させた合金鋼写真と乾燥過程での水の分布

ど水が多い。30分後と40分後では差異が明確にわかる。特に図の下部の広がった腐食膨れ部では、一様に水が減っているだけではなく、部分的に、水の減少具合が異なっていることが分かる。これらの部分的な減少は15秒程度の短い時間で起こっているものの観察されている。

図3に腐食させた合金鋼（0.8Cu-0.4Ni-0.05Ti重量%）のサンプル写真と、乾燥過程での水分分布を示す。

普通鋼と合金鋼中の塗膜下腐食中での水の動きを定量的に比較・解析することが可能となった。これまでのデータから普通鋼では合金鋼に比べ水を保持している時間が長いことが分かり、それが耐食性に効いているものと示唆される。更に解析を進めることで腐食のメカニズムにせまることができデータを得られるものと期待している。

本研究は、文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」“ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化”課題（代表 大竹淑恵）、日本鉄鋼協会1型研究会並びに研究会Iによって実施されました。サポートいただいている関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 腐食コスト調査委員会：我が国の腐食コスト，材料と環境，**50**, 490（2001）
- 2) 広田克也，他，*Isotope News*, **717**, 36（2014）
- 3) 大竹淑恵，色材と界面制御，**88**, 424（2015）
- 4) Y. Otake, et al., *J Disaster Res.*, **12**, 585（2017）
- 5) 大竹淑恵，他，*Isotope News*, **722**, 8（2014）
- 6) 山田雅子，他，鉄と鋼，**10**, 429（2014）
- 7) A. Taketani, et al., *ISIJ Int.*, **57**, 155（2017）
- 8) S. Agostinelli, et al., *Nucl. Instrum. Methods A*, **506**, No.3, 250（2003）