高磁場中における鉄板の腐食模様

Corrosion Pattern of a Steel Plate in a High Magnetic Field

佐藤 昭

湘南工科大学電気工学科, 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25 (〒251)

A. Sato

Shonan Institute of Technology, 1-1-25 Nishikaigan, Tsujido, Fujisawa 251

We report our observations of the corrosion pattern of a steel plate in the presence of a static magnetic field with a field gradient. The steel plate was positioned vertically in a chamber filled with purified water, and the magnetic field was applied normal to the center of the plate. It was found that the pattern of corrosion was due to both the thermal effect of the water and the magnetic field. When the magnetic field was absent, the corrosion pattern was due to the thermal convection of the water: when the temperature of water was higher than that of the central part of the plate, a corrosion pattern with a pair of vortices appeared in the lower part of the plate; otherwise, it appeared in the upper part. When the magnetic field was applied while keeping the water temperature uniform, a corrosion pattern with a pair of vortices appeared bilaterally in the center of the plate. This was the first experiment to visualize the behavior of oxygen molecules dissolved in water.

Key words: corrosion pattern, gradient magnetic field, dissolved oxygen, vortex, convection

1. はじめに

近年強磁場による水面の形状変化, いわゆるモーゼ効果¹⁾, 水中の溶存酸素濃度の磁場依存性²⁾, 水の電気伝導度の磁場依存性³⁾などの研究が精力的になされている. 水にかかわる事柄への磁場の影響についての幾多の研究の中に水中における鉄の腐食への磁場効果の研究がある. 鉄の腐食はその表面における鉄と酸素分子の化学反応である. 酸素分子は常磁性であるから, この反応が磁場によって促進されることが期待される.

従来の数少ない鉄の腐食への磁場効果の研究はいずれも磁束密度 1 T 以下の比較的弱い, しかも一様の磁場におけるこれらの鉄の化学反応や錆量の磁場依存性⁴⁾に関するものである. 著者の知る限り, 磁場勾配を含む磁場環境における腐食模様の問題は研究されていない.

この論文において我々は磁場勾配がある磁場中における水中の鉄板の動的な腐食を包含した腐食模様の観察を報告する. この模様は多少複雑である. 磁場を取り去ると, 鉄板上に腐食の対流模様⁵⁾が観察された. 次に, 水の熱的な影響を除去すると, 鉄板上に一對の渦模様が出現することを観察した.

この研究は水中の溶存酸素の磁場中における挙動を腐食模様を通じて初めて可視化したものである. さらに, このことは腐食模様が鉄の特定部分への腐食の偏りを物語っている.

2. 高磁場中の水中における腐食実験

腐食実験に用いた磁場発生装置は直流励磁型の電磁石であり, 磁極間隔 10 mm で最大磁束密度 1.25 T, 磁極直径 50 mm の磁極間隔可変型である. Fig. 1 は精製水を満たしたアクリル容器の厚さ方向中央部に鉄板を固定し, 磁極間に鉄板を容器とともに挟んだ電磁石および磁極付近の磁界分布特性を示す. この磁界分布は磁極中心から半径 20 mm 付近までは一定の磁束密度 1.25 T であるが, その外郭付近から急激に磁束密度が減少し, 外郭付近の勾配磁場と磁場の積は $50 \text{ T}^2/\text{m}$ になる. また, 磁場は鉄板面に垂直に加わり, 鉄板面に沿った方向を重力方向とした.

鉄板は, 厚さ 1 mm 縦横の長さ 180 mm の圧延鋼板 SS400 (SS41) であり, 電磁石の磁気力による鉄板の曲がりを防ぐため

Fig. 1 Experimental set-up for observing the corrosion pattern and distribution of the magnetic field along the surface of a magnetic pole of an electromagnet.

45 mm

Fig. 2 Complicated corrosion pattern due to both the magnetic field and the thermal convection of the water.

鉄板の端と中央部をごく小さいアクリル片を用いて固定し、同時にアクリル容器も磁極を直接容器に接触させるため中央部を円形にくり貫いた木枠で固定した。また、腐食実験の前には鉄板の表面を紙ヤスリで一様に削り油膜を落とした後、精製水で共洗いをし腐食実験をした。

3. 水の熱対流と磁場で生ずる腐食模様の分離

3.1 高磁場中の腐食模様

当初容器内の水の温度を一定に制御していない状態で Fig. 1 のように直接電磁石の磁極間に鉄板を挟み磁束密度 1.2 T, 精製水の電導率 $\sigma=0.52 \mu\text{S}/\text{cm}$ で 6 時間の腐食実験をした。その結果、鉄板には Fig. 2 のような渦模様のある複雑な腐食模様 (図中の黒い部分が腐食箇所) が現れ、実験をした季節によって渦模様が磁極位置の上部または下部に現れることが観測された。このことは実験室内の冷暖房による室温の影響を受けた容器内の水温と、水冷により温度上昇を抑えられた電磁石の鉄製磁極部分の外気温に近い温度との差が季節によって逆転することによって生じたことによるものと考えられる。

したがって、後に電磁石の磁極部分の温度 θ_1 と容器内の水の温度 θ_2 との間に微少な温度差 $\Delta T=(\theta_1-\theta_2)$ があることが分かり、その温度差によって生ずる水の熱対流と磁場による腐食模様が Fig. 2 には同時に現れていたことが分かった。

3.2 模擬装置による水の熱対流のみの腐食模様

この錆の渦模様が鉄板の上部または下部に現れた原因は実験を実施した季節によって温度差 ΔT が逆転したことによる水の熱対流の影響と考えた。そこで Fig. 3 のように実験容器の両側中央部に磁極部分を模擬した円形容器を接着し、一定温度の水 θ_1 を恒温水槽を通して循環させ実験容器内の水の温度 θ_2 との温度差を生ずる模擬実験装置を試作し、錆の渦模様の観察を試みた。

その結果、Fig. 4 のように鋼板 SS400 による 6 時間の腐食

Fig. 3 Experimental instrument for observing the corrosion pattern due to water convection only.

(a)

(b)

Fig. 4 Corrosion patterns due to water convection when (a) $\Delta T > 0$ ($\theta_1=30^\circ\text{C}$, $\theta_2=26^\circ\text{C}$) and (b) $\Delta T < 0$ ($\theta_1=15^\circ\text{C}$, $\theta_2=20^\circ\text{C}$).

実験で一対の渦模様が $\Delta T > 0$ の場合 (精製水: $\sigma=0.52 \mu\text{S}/\text{cm}$) には鉄板上部に現れ、 $\Delta T < 0$ の場合 ($\sigma=0.90 \mu\text{S}/\text{cm}$) は下部に現れることが確認された。そこで水の熱対流の影響が Fig.

2の腐食模様には含まれていることが明らかになった。この現象は次のように理解できる。 $\Delta T > 0$ (< 0) の場合、磁極近傍で暖められた (冷やされた) 水が浮力によって鉛直上方 (下方) に移動する。これは水の熱対流である。溶存酸素と鉄との反応速度が対流速度に比べて十分早いことを仮定すれば、この熱対流に沿って腐食模様が観察されることになる。溶存酸素と鉄との反応はミクロのスケールの出来事であるから、この仮定は合理的である。

3.3 水の熱対流の影響を取り除いた鉄板の腐食模様

Fig. 5 はアクリル容器の両外側全体に一定温度の水を循環させ、容器中の水の温度を一樣かつ一定にして熱対流の影響を取り除く構造にした容器である。この容器内の水中において同時に8か所の測定点で温度センサを用いて30分おきに3時間の温度測定をした結果、Fig. 6 のように容器内の水温が設定した循環水の温度 25°C に一致し、一樣かつ一定になることが確認された。次に、無磁場で容器内の精製水 ($\sigma = 0.90 \mu\text{s}/\text{cm}$) の水温を 25°C 一樣かつ一定として鉄板 SS400 の腐食実験を6時

Fig. 5 Chamber with its temperature controlled by circulating water kept at a uniform temperature.

Fig. 6 Temperature changes of water in the chamber. (The temperature was measured at eight positions in the chamber.)

間行った。その結果、Fig. 7 のように腐食模様の現れない一樣な腐食が得られ、水の熱対流の影響が取り除かれたことを腐食実験でも再確認された。

4. 磁場だけによる鉄板の腐食模様

このように水の熱対流と磁場 (磁気力) の影響による二つの重なった腐食模様を分離すれば磁場のみによる腐食模様を実験的に得ることができる。Fig. 8 は磁極部分の磁束密度 B を 1.2 T 、精製水の電導率 σ を $0.91 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、容器内の水温を 25°C 一定にした状態で鉄板 SS400 の腐食実験を6時間行った腐食模様である。Fig. 9 の温度特性はこの実験での Fig. 5 の容器内4隅の測定点で30分ごとに6時間温度測定したもので容器内が 25°C 一樣かつ一定に制御されていることが分かる。この腐食模様は勾配磁場中の磁気力の影響による溶存酸素の挙動が錆で描いたものであり、容器の上部から溶存酸素が溶け込み吸引される様子が錆で確認できる。磁場環境では溶存酸素を動かす設定が水の熱対流とは異なる。水の熱対流の渦位置と異なって、磁極の左右両横の位置に一对の錆の渦模様が現れた。溶存酸素に対する勾配磁場による力は磁極の中心に向かっていてもかわらず、このような渦模様が現象することは次のように理解される⁶⁾。容器上部から溶け込んだ酸素分子は水分子より分子量が大きいために重力の作用を受けて沈降する。この酸素分子は常磁性であるから磁極の外郭部の磁気力によって磁極に吸引され、磁極部の酸素分子濃度は上昇する。この結果、酸素分子は拡散して、磁極部から離れる。拡散された酸素分子は再び重力の作用を受けて沈降する。この過程が繰り返されて、磁極の左右の両横に酸素分子の渦の対が形成される。したがって、勾配磁場による対流、すなわち磁気対流が腐食模様を通して可視化された、ということができる。このような勾配磁場による対流現象を錆で見た例を知らない。

Fig. 7 Corrosion pattern of a steel plate in water at a constant temperature ($B = 0 \text{ T}$, $\theta = 25^{\circ}\text{C}$).

Fig. 8 Corrosion pattern of steel plate in a magnetic field of 1.2 T at a constant temperature of 25°C.

5. ま と め

この磁場勾配のある磁場環境での腐食実験により、水中の鉄板に一對の渦のある腐食模様が観察され、その腐食模様を通して磁気力による溶存酸素の動きが可視化された。

また、水の熱対流を除いた磁場だけの腐食環境での溶存酸素による一對の渦の発生とその位置が水の熱対流の渦の位置と異なることが今回新たに見いだされた。さらに強い磁場環境下では腐食の発生位置および強弱に対して磁気力の影響を顕著に受けることが実験的に確認できた。このことは超電導磁石などによる強磁場が機器などに利用された場合、磁場分布の腐食への影響を無視することはできないことを示唆する。

さらに今後溶存酸素の動きの腐食による可視化とともに強磁場による水面の形状変化（モーゼ効果）の水の熱対流への影響および溶存酸素の磁気力による渦模様の位置に対しても腐食模

Fig. 9 Temperature changes of water in the chamber. (The temperature was measured at four positions in the chamber.)

様を通して明らかにすることは重要である。

謝 辞 本研究の遂行に貴重なご助言ならびにご協力を頂きました湘南工科大学、佐々田友平教授ならびに住友重機械工業（株）総合技術研究所の桜庭順二氏、石塚正之氏に深く感謝申し上げます。なお、日頃実験にご協力頂いた卒業生の国峰敏之君、村田和信君に感謝します。

文 献

- 1) 上野照剛, 岩坂正和: 日本応用磁気学会誌, **19**, 609 (1995).
- 2) S. Ueno and K. Harada: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-18**, 1704 (1982).
- 3) 上野照剛, 古川 剛, 岩坂正和: 日本応用磁気学会誌, **19**, 613 (1995).
- 4) S. Meguro, B. Ise, and Y. Sato: *Mem. Tohoku Inst. Tech., Ser. I*, No. 12, 41 (1992).
- 5) S. Chandrasekhar: *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, p. 9 (Dover, New York, 1981).
- 6) 佐々田友平: 私信.

1996年10月11日受理, 1997年1月16日採録