

強磁場下における鉄の腐食模様

佐 藤 昭

湘南工科大学電気工学科 ☎ 251-8511 神奈川県藤沢市辻堂西海岸 1-1-25

(1999 年 4 月 30 日受理)

Corrosion Pattern of a Steel Surface in a Strong Magnetic Field

Akira SATO

Shonan Institute of Technology

1-1-25 Nishikaigan, Tsujido, Fujisawa, Kanagawa 251-8511

(Received April 30, 1999)

In recent years high temperature superconducting materials and the refrigerating machine technology have advanced so extensively, that the helium free superconducting magnet can provide strong magnetic fields of about 10 T easily. Magnetic substances in a strong magnetic field is expected to produce a high gradient magnetic field near their surfaces. A study has been made on the magnetic field effect on the behavior of oxygen and water near a steel surface submerged in water in strong magnetic field. We have found differences in corrosion of the steel surface along the gradient magnetic field, and the shape change of water surface has been observed. Further, the relation between the corrosion pattern and magnetic field gradient has been made clear from the analysis of the magnetic field distribution around the steel.

1. は じ め に

超電導磁石は核磁気共鳴現象を利用した NMR-CT (診断装置) や MRI (医用画像診断装置) 等にすでに実用化されているが、さらに高速磁気浮上鉄道や超電導発電機等電気機器にも使用範囲を拡大しつつある。近年、冷凍機技術や高温超電導材料が著しく進歩し、取り扱いの便利なヘリウムフリー冷凍機直冷式超電導磁石¹⁾が開発された。その結果、比較的広い磁場空間で 10 T 程度の強磁場が容易に利用できるようになった。したがって、強磁場下では常磁性物質である酸素や反磁性物質である水に対して無視できない程の力が働き、実験的にもその磁場効果を容易に確認できるようになった。そこで非磁性物質に近いこのような磁気物質に対する新たな物理現象や電気化学反応等の化学現象の発見が期待されている。強磁場下の酸素や水自身にかかわる磁場効果の研究は生体磁気^{2, 3)}や磁気科学の分野⁴⁻⁷⁾で精力的に行われ、さらに、強磁場下の電気化学反応に対する磁場効果⁸⁻¹⁰⁾

についても興味ある研究がなされている。

一方、強磁場下に磁性体である鉄が存在した場合、鉄自らが高勾配磁場を生み出す。我々は超電導磁石の発生する強磁場下に置かれた鉄表面に溶存酸素の磁場効果にかかわる鉄腐食の偏りや鉄板上に腐食模様で描かれた磁気的対流模様^{11, 12)}および水面の形状変化¹³⁻¹⁵⁾が生ずることを見出した。ここでは一様な強磁場下における水中の鉄製円柱、鉄球、鉄製円錐柱の表面に現れる集中した腐食の偏りや規則性のある腐食模様の観察を報告し、この集中した腐食の偏りが鉄周囲の磁場強度や磁場勾配に関わることにについて述べる。

2. 実 験 方 法

腐食実験に用いた強磁場発生装置は冷凍機直冷式の縦型および横型超電導磁石である。縦型超電導磁石のボア一寸法は直径 16.5 cm、長さ 42.8 cm で、横型が直径 18.0 cm、長さ 55.0 cm であり、最大磁場強度 6 T の磁場発生が可能である。最大磁場強度 4 T の縦型超電導磁石のボア一寸法は直径 8.4 cm、長さ 26.6 cm であった。Fig. 1 は腐食させる鉄材を各容器中に納め、それらを 6 個積み

E-mail: satoa@elec.shonan-it.ac.jp

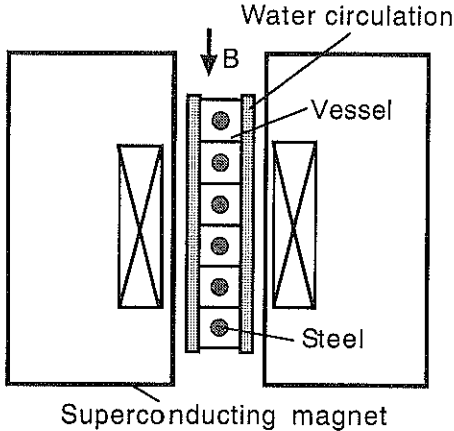


Fig. 1 Experimental set-up for observing the corrosion pattern in the superconducting magnet.

重ねて縦型超電導磁石のボア中心軸部分に配置したものである。腐食させる鉄は精製水を満たした直径 50 mm、高さ 30 mm の円筒アクリル容器の中央部に磁気力で動かないようにアクリル棒で固定した。腐食実験ではボア中央位置の最大磁束密度を 5 T または 3 T に設定して、Fig. 2 に示される超電導磁石の発生する磁界をボア中の各鉄材に 6 時間印加した。なお、各鉄材に加わる磁場強度は鉄材の位置によって異なるが、印加磁場は上下の鉄材の影響も少なくほぼ一様磁場となる。また、容器内の熱対流の影響を取り除くために、アクリル容器の周囲に一定温度の水を循環させて、容器内の水温を常に一定に保った。腐食実験の前に鉄材は洗剤等を用いて超音波洗浄し、鉄表面の油膜を落とし、精製水で十分共洗いをした。実験に用いた鉄の形状は 3 種類で、その寸法は、鉄製円柱、鉄球、鉄製円錐柱の各直径が 15 mm、鉄製円柱の長さは 40 mm、鉄製円錐柱の円柱と円錐部分の高さは共に 20 mm である。その鉄材料には高炭素クロム軸受鋼材 SUJ-2 を用いた。

3. 一様強磁場下の鉄付近における勾配磁場

3.1 水と溶存酸素に対する勾配磁場効果

一様強磁場下の水中に強磁性体である鉄が存在した場合、鉄の表面付近においては、透磁率の差異によって磁場分布は不均一となり、磁場勾配が生じる。一般に勾配磁場下では、磁化された磁気粒子は磁場勾配による磁気力によって重心位置に対する移動力を受ける。水中の鉄に一樣な強磁場を印加した腐食実験において、常磁性物質の溶存酸素は磁場強度の増加する鉄表面付近で勾配磁気力を受けて鉄表面方向へ吸引される。また、磁場強度の減少する鉄表面付近では鉄表面から遠ざかる方向へ勾

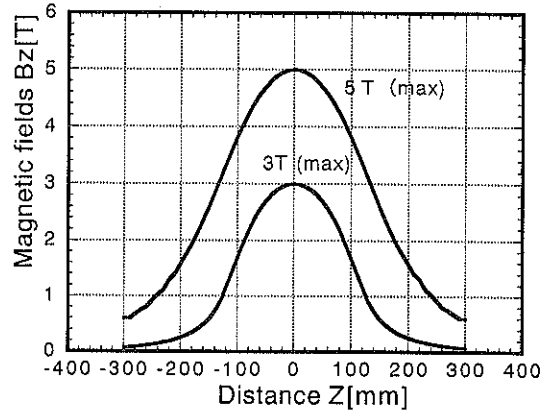


Fig. 2 Distribution of the magnetic field along the bore axis of superconducting magnet.

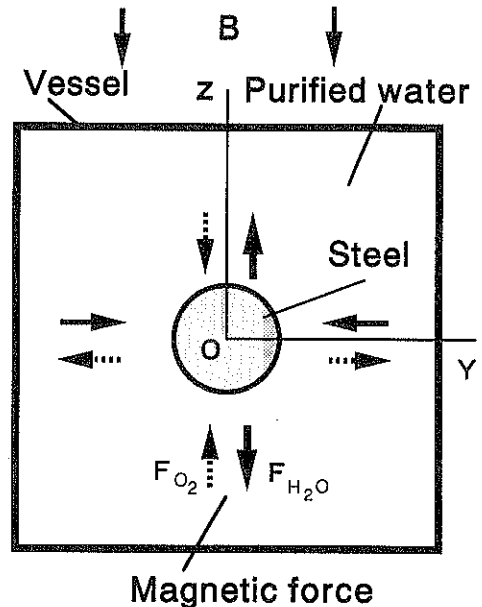


Fig. 3 Magnetic force near the steel cylinder in a vessel under a uniform magnetic fields.

配磁気力を受ける。

一方、反磁性物質である水には溶存酸素とは逆方向の勾配磁気力が作用することになる。しかしながら、水は溶存酸素を含む混合流体であるため、2つの磁性物質の各磁場効果が合成された形で磁場効果を受ける。磁場方向の鉄表面では溶存酸素が腐食で消化されると共に磁場勾配によりさらに溶存酸素が供給され、逆に磁場方向に垂直な鉄表面付近では溶存酸素の希薄な状態となり、この付近では鉄腐食が進行しないことになる。したがって、鉄の腐食実験において腐食の偏りが期待される。Fig. 3

は容器中の鉄材の位置とその近傍で溶存酸素と水に働く磁気力方向を示したものである。当初、我々は水道水を満たした各アクリル円筒容器の中央部に真横に固定した鉄釘に対して縦型超電導磁石を用いて重力方向に24時間の間、最大3 Tの静磁場を印加し、磁場強度に対する錆量の腐食実験を行っていた。この実験を通して加えた磁場が強い程、常に鉄釘の上下表面部分に多くの孔食のある帯状腐食が観察され、鉄釘の側面部分は無磁場状態の腐食と同様に腐食の発生が少ないことがわかった。

3.2 鉄付近の磁場分布の解析

これらの集中した腐食模様に着目し、集中した腐食部分と腐食しない部分における鉄表面付近の磁場勾配を有限要素法による磁場分布の解析によって検討した。鉄製円柱、鉄球および鉄製円錐柱付近の磁場分布の解析はその解析範囲を一辺が10 cmの立方体内とし、媒質を空気として磁束密度3 Tおよび5 Tの一樣磁場を加えた場合について行った。なお、鉄製円柱はFig. 1のように一樣磁場印加方向(Z軸方向)に対して中央位置に水平(真横)に配置した。この有限要素法による軸対称3次元静磁場解析にはアンソフト社のMaxwell 3Dを用い、鉄製円柱、鉄球および鉄製円錐柱に対する各要素数は最適自動要素機能により14028, 6824, 11105であった。これらの鉄材料としては炭素含有量約1%の炭素鋼である高炭素クロム軸受鋼材 SUJ-2を用いたため、この解析には炭素含有量1%の炭素鋼の磁化特性(飽和磁束密度1.4 T)を用いて解析を行った。

鉄材(SUJ-2)の比透磁率 μ_s は $\mu_s \gg 1$ であるために、水平に固定した鉄製円柱の上下部分に磁束は収束する。したがって、鉄製円柱付近の磁場分布の解析を行った結果、その上下の鉄表面における磁束密度は印加した磁束密度5 Tに対して6.6 Tに増大し、鉄製円柱の側面部分においては逆に3.5 Tに減少した。なお、鉄球の上下の鉄表面付近では磁束密度が鉄製円柱より高く6.8 Tに増加し、側面部分では4.0 Tに減少した。Fig. 4はこれを示す空気中における磁束密度の等高線図であり、鉄球の場合も同様な等高線図を示した。Fig. 5は鉄製円柱および鉄球の表面位置から垂直方向Bzおよび水平方向Byの磁束密度特性であり、印加磁場5 Tと3 Tではほぼ比例した特性になった。また、磁場勾配は上下の鉄表面から5 mmの間で鉄製円柱の場合180~200 T/m、鉄球の場合で220~260 T/mの高い磁場勾配があることがわかる。この磁場勾配から鉄材の上下部分においては、常磁性物質に対しては外から鉄表面の頂点に向かって勾配磁気力が生じ、側面部分においては、逆に鉄表面の頂点から外に向かって勾配磁気力が生じることがわかる。即ち、鉄と空気の透磁率の差によって、鉄の上下部分と左右側

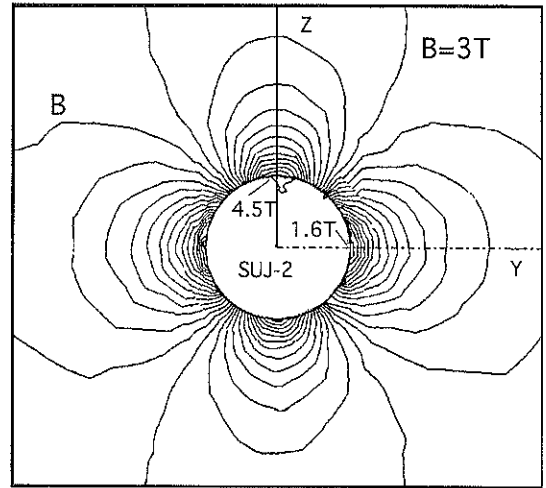


Fig. 4 Contour line map of magnetic flux density near the steel cylinder surface (Applied magnetic field: 3 T).

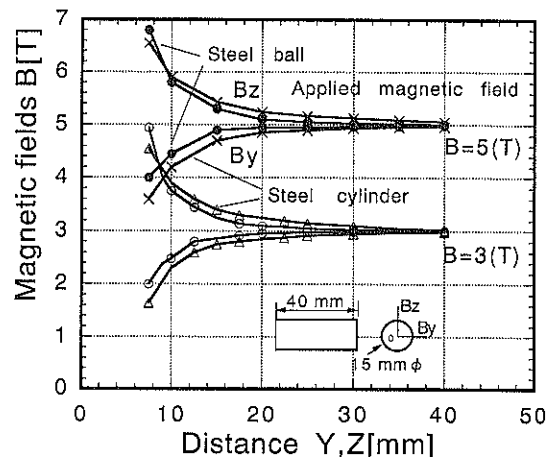


Fig. 5 Magnetic flux density for the direction of the vertical and horizontal axes from the surface of a steel cylinder.

面とでは、逆の勾配磁場が発生する。Fig. 6は鉄製円錐柱付近における磁束密度Bの等高線図であり、Fig. 7は鉄製円錐柱の表面位置から垂直方向および水平方向の磁束密度特性であり、上部先端部分では先端から5 mmの間で280 T/mの高磁場勾配になっている。

4. 強磁場下の水中における鉄の腐食模様

一樣な強磁場下の水中における鉄材は磁場方向の鉄表面とこれに垂直な側面の間では磁気力方向が反転する。この影響の現れた腐食模様を実験的に得ることができた。この腐食実験は容器内の精製水の電導率 σ を0.37~

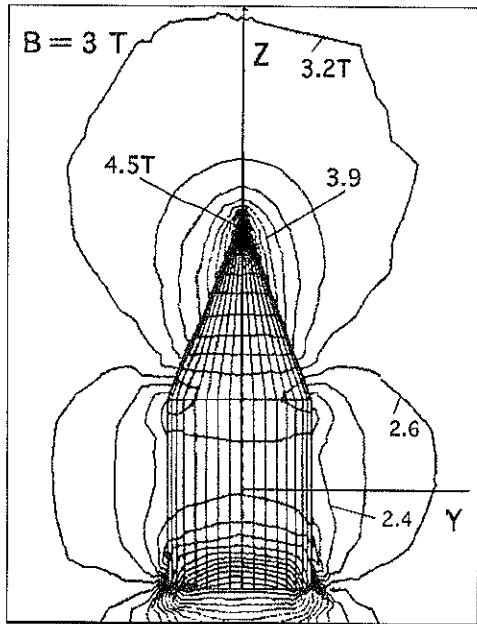


Fig. 6 Contour line map of magnetic flux density near the right circular cone (Applied magnetic field: 3 T).

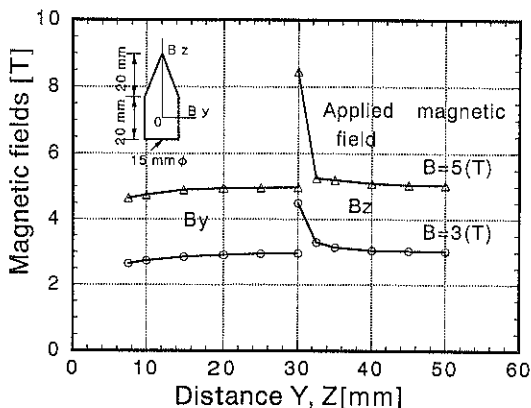


Fig. 7 Magnetic flux density for the direction of the vertical and horizontal axes from the surface of a right circular cone.

0.82 $\mu\text{S}/\text{cm}$, その水温 θ を 25°C 一定にした状態で 6 時間行った。つぎに腐食模様の黒色部分は腐食箇所を示し、左右両端の島状の白色部分は鉄製円柱を固定した痕跡である。Fig. 8 (a) は横型超電導磁石のボア中で磁束密度 5 T の位置における鉄製円柱の側面（印加磁場方向）の腐食模様であり、帯状腐食の境界が明瞭でその中に穴腐食が尾を引いて点状に存在している。Fig. 8 (b) は縦型超電導磁石の磁束密度 3 T での上面の腐食模様で黒色を含む

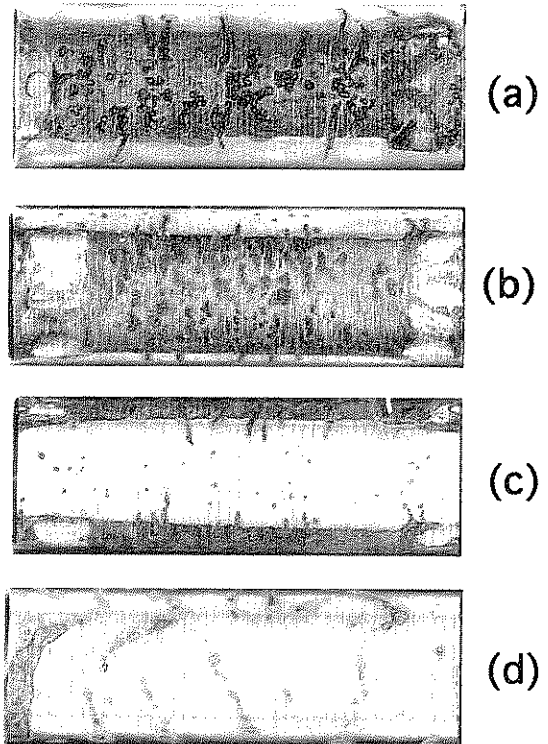


Fig. 8 Corrosion patterns of steel cylinder of (a) lateral surface (horizontal magnet, $B = 5 \text{ T}$, $\theta = 25^\circ\text{C}$), (b) upper surface (vertical magnet, $B = 3 \text{ T}$, $\theta = 25^\circ\text{C}$), (c) lateral surface ($B = 3 \text{ T}$, $\theta = 25^\circ\text{C}$) and (d) any surface ($B = 0 \text{ T}$, $\theta = 25^\circ\text{C}$).

帯状腐食の中に穴腐食が点状に存在している。(c) は鉄柱の側面の腐食模様であり、上下部分は帯状腐食を示し、中央部の帯状部分では無磁場状態より腐食が進行していない。横型と縦型超電導磁石に対する重力の影響は腐食模様では見られなかった。(d) は無磁場状態の腐食模様であり腐食箇所が不規則に点状に存在している。この模様から、上下面の腐食は Z 軸の左右両側 $\pm 45^\circ$ の範囲内で帯状に生じた。また、鉄製円柱の上下部分では酸素の溶解が促進され、さらに溶存酸素が供給される。

一方、側面部分では溶存酸素の供給が減少するため、無磁場状態の場合より腐食は進んでいないことがわかる。集中した腐食模様は一樣磁場が 1 T 以下の弱磁場でも観察され、磁場の磁場強度と共に、その勾配が腐食の偏りによって本質的であることを意味する。Fig. 9 (a), (b) は磁場強度 4 T における鉄球の腐食模様であり、溶存酸素が増加する鉄球の両表面部分で勾配磁気力に沿って 2~3 重の錆色の異なる円形帯状腐食の模様や円形の赤錆模様を得られ、側面部分は腐食しなかった。したが

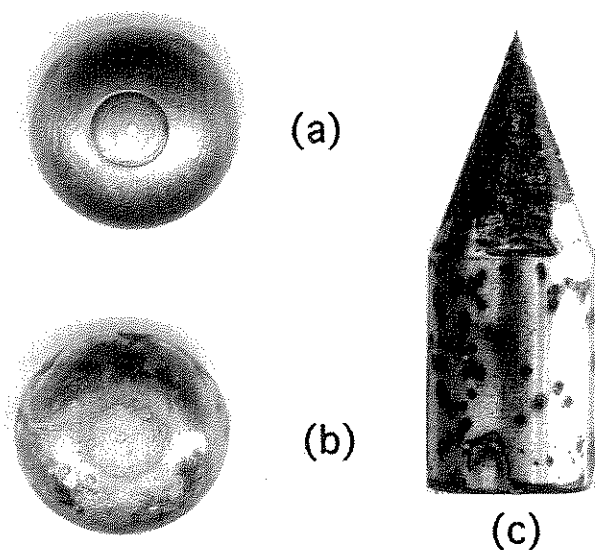


Fig. 9 Corrosion patterns of (a), (b) steel ball ($B = 4$ T, $\theta = 25^\circ\text{C}$) and (c) a right circular cone ($B = 3$ T, $\theta = 25^\circ\text{C}$).

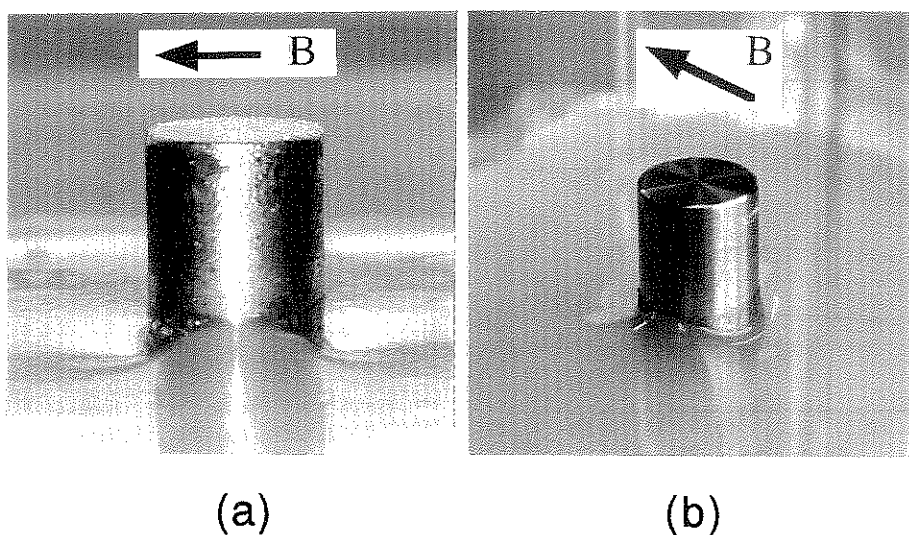


Fig. 10 Surface profile of water near the steel cylinder under a strong magnetic field ($B = 5$ T).

って、長時間このような磁場すなわち勾配磁場を印加した場合、鉄の一部が集中して腐食することが考えられる。このことは鉄球付近の磁場解析から、印加磁場方向の鉄球表面の磁場強度とその勾配が円形状部分で高く、溶存酸素を増加させ、側面には逆勾配が生じることに起因する。Fig. 9 (c) は磁場強度 3 T における鉄製円錐柱の腐食模様であり、円柱部分における側面の磁場勾配は少なく、腐食は少ない。しかしながら、円錐の先端から 2 mm

の間では 600 T/m 程の高勾配であるために、円錐部分は集中して腐食している。このことから鉄材における傷のある箇所では磁場勾配が高くなり、比較的弱い磁場でも腐食の進行が早まることを示唆している。

また、横型超電導磁石のボア中央部に鉄製円柱を水中で垂直に立てて反磁性物質である水の水面形状変化すなわち、モーゼ効果を観察した。Fig. 10 (a), (b) は印加磁場強度 5 T に対する鉄円柱付近の水面形状変化を寒

天で固めて観察したものである。印加磁場方向の鉄表面付近で水面が減少し、それに垂直な方向で上昇することから水への勾配磁場効果が確認できた。

5. ま と め

一様な強磁場下で水中の鉄を腐食させた場合、鉄表面の腐食の進行が腐食する部分と腐食しない部分に分離されて現れることを腐食模様を通して観察した。このことは強磁場下の鉄表面付近では特に磁場強度の増加と減少に伴って互いに逆の磁場勾配を生ずることに起因する。この強力な勾配磁気力によって腐食の激しい部分には溶解速度の増加によって溶存酸素が供給され、腐食の進行しない部分では逆勾配によって溶存酸素の供給が減少するものと理解される。したがって、鉄の腐食模様に関する研究は、強磁場中における鉄の防食への指針即ち、鉄の腐食部分は磁場分布の解析によってあらかじめその場所を特定することが可能であり、その部分に防食処理を施す、という指針を与える。

謝 辞

貴重な議論および実験にご協力を頂いた湘南工科大学萩原宏康教授、住友重機械工業(株)総合技術研究所桜庭順二主任研究員、石塚正之研究員に深く感謝する。(文献の頁; 1~10); 4 ページ, 11~15); 5 ページ)

文 献

- 1) 浦田昌身: 電気学会誌 **114**, 12 (1994).
- 2) S. Ueno and K. Harada: IEEE Trans. Magn. **MAG-18**, 1704 (1982).
- 3) 上野照剛, 岩坂正和, 古川 剛: 日本応用磁気学会誌 **20**, 705 (1996).
- 4) S. Ueno and K. Harada: IEEE Trans. Magn. **MAG-23**, 2752 (1987).
- 5) S. Ueno, M. Iwasaka, H. Eguchi and T. Kitajima: IEEE Trans. Magn. **29**, 3264 (1993).
- 6) N.I. Wakayama: IEEE Trans. Magn. **31**, 897 (1995).
- 7) 若山信子: 日本金属学会誌 **61**, 1272 (1997).
- 8) A. Katsuki, S. Watanabe, R. Tokunaga and Y. Tanimoto: Chem. Lett. 219 (1996).
- 9) K. Shinohara and R. Aogaki: J. Chem. Soc. Chem. Lett. 1223 (1998).
- 10) K. Shinohara and R. Aogaki: J. Chem. Soc. Chem. Lett. 1239 (1998).
- 11) 佐藤 昭: 日本応用磁気学会誌 **21**, 753 (1997).
- 12) 佐藤 昭, 桜庭順二, 石塚正之: 日本応用磁気学会誌 **22**, 837 (1998).
- 13) S. Ueno and M. Iwasaka: IEEE Trans. Magn. **30**, 4698 (1994).
- 14) 上野照剛, 岩坂正和: 日本応用磁気学会誌 **19**, 609 (1995).
- 15) 中川 準, 廣田憲之, 北澤宏一, 横井裕之, 加藤隆二, 角館洋三, 藤原修三: 日本応用磁気学会誌 **21**, 761 (1997).