

磁性塗布線を用いた近接効果に起因する交流抵抗の低減

Reduction of AC Resistance Caused by Proximity Effect Using Magnetocoated Wire

鳥島健太^{a)}・山本達也^{a)}・卜穎剛^{a)}・水野勉^{a)†}・本田祐樹^{b)}^{a)}信州大学工学部, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)^{b)}日立金属株式会社, 茨城県日立市川尻町 4-10-1 (〒319-1411)K. Torishima^{a)}, T. Yamamoto^{a)}, Y. Bu^{a)}, T. Mizuno^{a)†}, and Y. Honda^{b)}^{a)} Faculty of Engineering, Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano-city, Nagano 380-8553, Japan^{b)} Hitachi Metals, Ltd., 4-10-1 Kawajiri-cho, Hitachi-city, Ibaraki 319-1411, Japan

Miniaturization and high efficiency of electronic device is required. The elements such as inductors and capacitors used in electronic equipment, are working to miniaturization and high efficiency by higher frequency. Along with the higher frequency of the driving frequency, AC resistance increases due to iron loss and copper loss. So, the authors have developed Magnetocoated wire (MCW) that has a magnetic layer around the copper wire to reduce the AC resistance. MCW reduces AC resistance because a magnetic layer leads a magnetic flux. As a result AC resistance in coil using MCW was reduced 32.1% in 1 MHz, 24.7% in 100 kHz, 20 % in 10 kHz.

Key words: magnetitocoated wire, magnetic path control technology, copper wire, AC resistance, proximity effect

1. まえがき

現在, パソコンなどの電子機器の小形化, 軽量化および高効率化が求められている。電子機器に用いられている変圧器やコイル, コンデンサなどの素子は高周波で駆動させることで小形化, 軽量化が図られている¹⁾。

高周波化に伴い, 銅線の抵抗は表皮効果に起因する抵抗および近接効果に起因する抵抗の2つの要素によって増加する²⁾⁻³⁾。表皮効果は高周波の電流が銅線に流れる際に電流密度が銅線の表面に偏るため, 抵抗が増加する。そこで, 表皮効果に起因する抵抗を低減するために細い銅線を撚り合わせたリッツ線が用いられる⁴⁾。しかし, リッツ線では, 近接した導体から発生する交流磁界が導体に作用し, 近接効果と呼ばれる交流抵抗が表れる²⁾⁻³⁾。

近接効果に起因する抵抗を低減させるためには, 磁性めっき線が用いられる⁵⁾。磁性めっき線は銅線の外周に鉄薄膜を有している。しかし, 磁性めっき線は鉄薄膜が導体となるために高周波帯において表皮効果を助長する欠点がある⁶⁾。また, 磁性めっき線は湿式めっき法を用いて製造されているため, 製造速度が数 cm/分と遅く生産性が悪い。

そこで, 筆者らは交流抵抗を低減するために磁性塗布線 (Magnetocoated wire 以下, MCW)を開発している。MCWは銅線 (Copper wire 以下, COW)の外周に鱗片状の磁性粉末を塗布した磁性層を有している。磁性層は銅に比べて透磁率が高いために磁性層に交流磁界が誘導される。また, 磁性塗布線は製造速度が速いために磁性めっき線と比較して生産性に優れている。

従来の磁性塗布線の製作方法はスプレー法を採用していたが,

既存の線材の製造工程には組み込めないため, 製造速度の改善が望まれている⁷⁾。そこで筆者らは, 銅線の絶縁被膜の塗布工程において磁性材料を塗布することで, 磁性塗布線の製造速度の大幅な改善を行った。

本論文では, 上記製作方法を用いた磁性塗布線の構造と磁気特性について述べる。また, 磁性塗布線を用いたコイルの抵抗・周波数特性を測定した結果について述べる。

本論文では, 以下の事項について述べる。

- (1) 磁性塗布線の構造と磁気特性
- (2) コイルの抵抗・周波数特性
- (3) コイル抵抗の電流依存特性

2. 磁性塗布線の構造と磁気特性

2.1 磁性塗布線の構造

Fig. 1にCOWとMCWの構造を示した。Fig. 1(a)に示したように, COWは導体径 1.45 mmの銅(Cu)線の外周に厚さ 18 μm の絶縁層が設けられている。Fig. 1(b)に磁性層の厚さ $d_t = 6 \mu\text{m}$ のMCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$)の構造を示した。MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$)は導体径 1.45 mmの銅(Cu)線の外周に厚さ 6 μm の磁性層と厚さ 14 μm の絶縁層を設けている。ナノ結晶軟磁性材料の粉末とポリイミドを混合した磁性コンポジット材をCOWに3回塗布したあと, ポリイミドを5回塗布することで製造した。Fig. 1(c)に, 磁性層の厚さ $d_t = 19 \mu\text{m}$ のMCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$)の構造を示した。MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$)は導体径 1.45 mmの銅(Cu)線の外周に厚さ 19 μm の磁性層と厚さ 25 μm の絶縁層を設けている。磁性コンポジット材をCOWに6回塗布したあと, ポリイミドを10回塗布することで製作した。MCWは日立金属(株)で製作した。

連絡先: 水野勉[†], 〒380-8553 長野市若里 4-17-1
信州大学工学部電気電子工学科西棟 水野・卜研究室,
E-mail:mizunot@shinshu-u.ac.jp

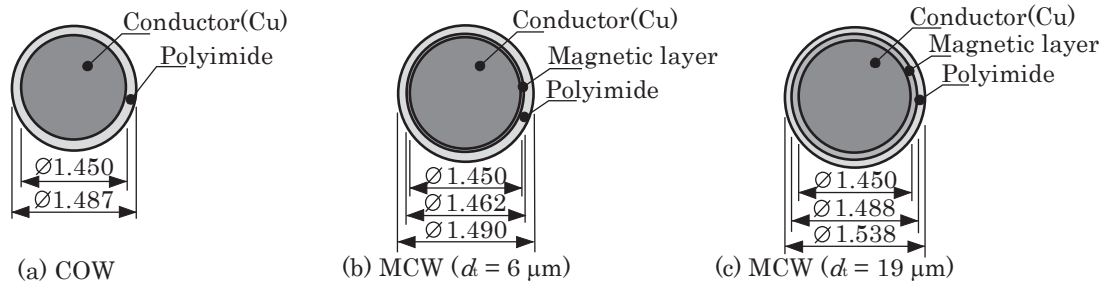


Fig. 1 Structure of wires. (unit: mm)

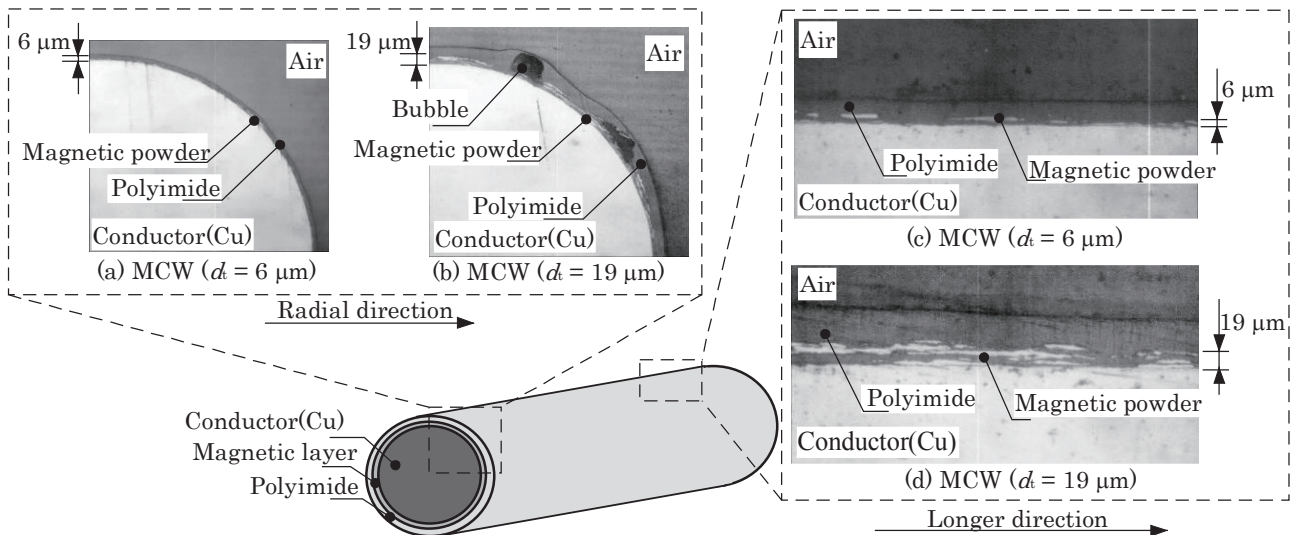
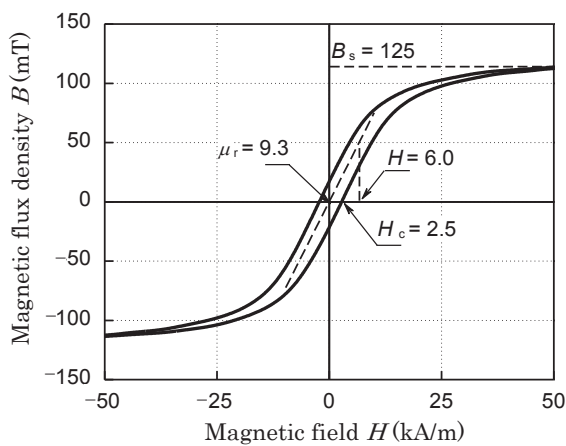
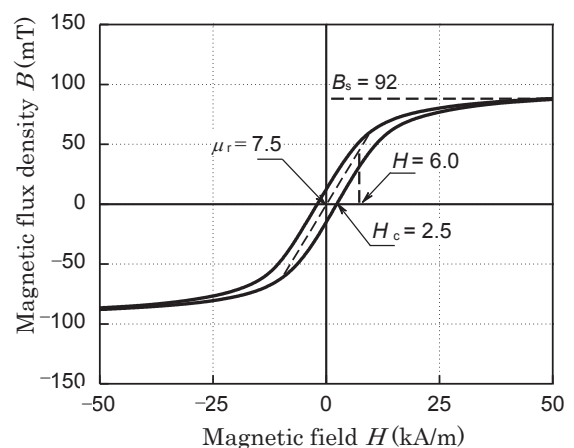


Fig. 2 Distributed situation of the magnetic powder of magnetocoated wire.



(a) MCW ($d = 6 \mu\text{m}$)



(b) MCW ($d = 19 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Flux density vs. magnetic field loop of magnetocoated wire.

Fig. 2 に MCW の磁性粉末の分散状況を示した。銅線の外周に磁性層と絶縁層を設けており、磁性層には磁性粉末がまばらに分布している。ポリイミド層内に気泡が入っている部分もある。Fig. 2(a) と Fig. 2(b) を比較すると、MCW ($d = 19 \mu\text{m}$) の方が MCW ($d = 6 \mu\text{m}$) よりも磁性粉末の分布がまばらであり、また気泡の混入も確認できる。これは、

磁性コンポジット材の塗布回数が多くなると、磁性粉末の均一な積層が困難になり、同時に気泡が混入しやすくなることに起因する。

2.2 磁性塗布線の B - H 特性

Fig. 3(a) に MCW ($d = 6 \mu\text{m}$) の長手方向の B - H ループを示した。 B - H ループの測定には VSM (試料振動型磁力計)

を用いた. Fig. 2 に示したように, 磁性粉はまばらに分布しているが, 磁性層の厚さが一定で密に分布しており反磁界は発生しないものと仮定した. MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$)の飽和磁束密度 B_s は 125 mT であり, 原点付近での比透磁率 μ_r は 9.3 , 保磁力 H_c は 2.5 kA/m であった. Fig.3(b)に MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の長手方向の B - H ループを示した. MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の飽和磁束密度 B_s は 92 mT であり, 原点付近での比透磁率 μ_r は 7.5 , 保磁力 H_c は 2.5 kA/m であった. MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$)の飽和磁束密度 B_s および比透磁率 μ_r は MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$)より低下している. これは, MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$)の方が MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$)よりも磁性層を厚く塗布しているため, 気泡が混入していることが原因である.

磁性層に使用したナノ結晶軟磁性材料の薄帯状態での飽和磁束密度は 1.23 T , 比透磁率は $3,000$ から $7,000$, 保磁力は 0.6 から 2.5 A/m の範囲にある. しかし, ナノ結晶軟磁性材料粉末がまばらに分布しているために磁性塗布線の飽和磁束密度 125 mT , 比透磁率 μ_r は 9.3 と低下したと考えられる. また, ナノ結晶軟磁性材料は薄帯を砕くことで粉末状に加工している. そのため, 残留応力の影響で保磁力が 2.5 kA/m と増加した.

3. コイルの抵抗-周波数特性

3.1 コイルの構造

Fig. 4 にコイルの構造図を示した. 広い周波数範囲での効果を確認するために巻線 $N = 9, 69, 144$ の計 3 つのコイルを製作した. COW と MCW とでは素線間距離が最大 3.4% 異なるが, これによる近接効果に起因する抵抗の変化は極めて小さい. また同図中に, コイルの自己共振周波数

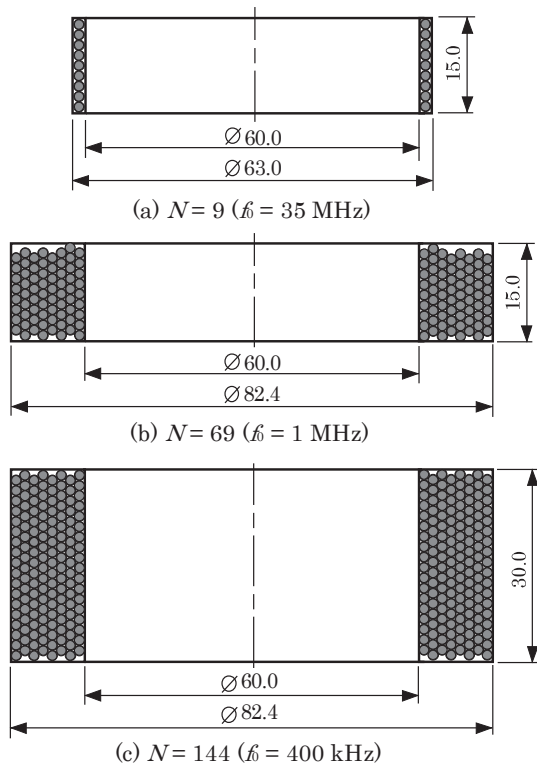


Fig. 4 Structure of coils. (unit: mm)

を記載した. コイルの自己共振周波数 ℓ の影響が十分小さい $1/10$ 以下の周波数範囲で測定を行った. したがって, $N = 9, 69, 144$ のコイルではそれぞれ $1 \text{ MHz}, 100 \text{ kHz}, 10 \text{ kHz}$ 以下の周波数範囲におけるコイルのインピーダンス特性を測定した.

3.2 コイルの抵抗-周波数特性

コイルのインピーダンス特性はインピーダンスアナライザを用いて測定した. このとき, 測定電流は 4 mA 以下であった.

Fig.5(a)に 9 回巻コイルの抵抗-周波数特性を示した. 周波数 1 MHz における COW, MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$), MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$)の抵抗値は, それぞれ $311 \text{ m}\Omega, 253 \text{ m}\Omega, 211 \text{ m}\Omega$ となった. COW の抵抗値と比較して, MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$)と MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$)の抵抗値は, それぞれ $18.6\%, 32.1\%$ 低減した.

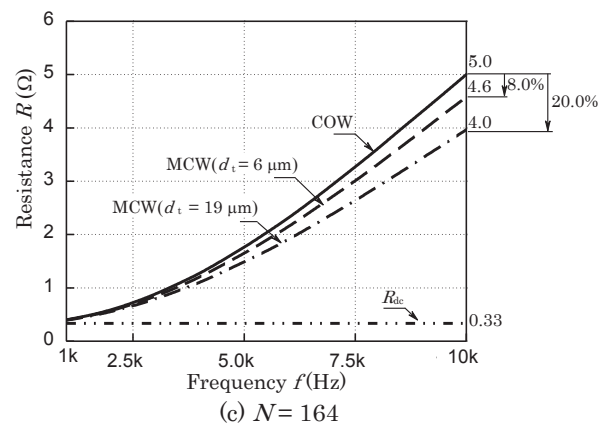
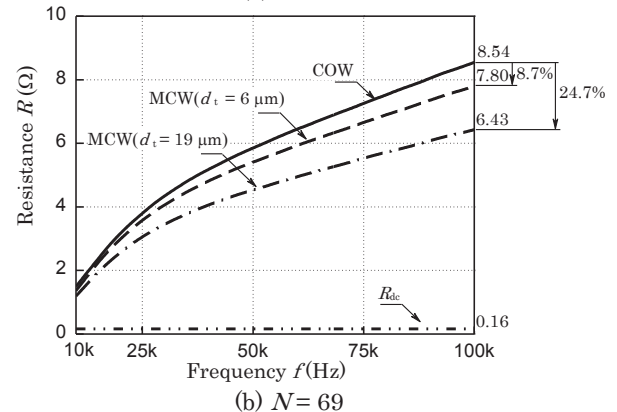
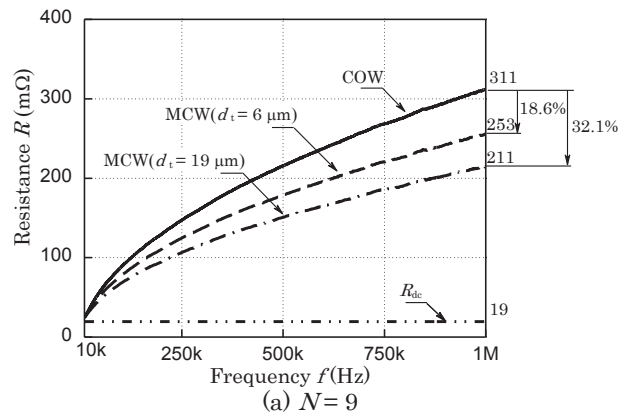


Fig. 5 Resistance vs. Frequency characteristics of coils.

Fig.5(b) に 69 回巻コイルの抵抗-周波数特性を示した。周波数 100 kHz における COW, MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$), MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の抵抗値は、それぞれ 8.54 Ω , 7.80 Ω , 6.43 Ω となった。COW の抵抗値と比較して MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$), MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の抵抗値は、それぞれ 8.7%, 24.7% 低減した。

Fig.5(c) に 144 回巻コイルの抵抗-周波数特性を示した。周波数 10 kHz における COW, MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$), MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の抵抗値は、それぞれ 5.0 Ω , 4.6 Ω , 4.0 Ω となった。COW の抵抗値と比較して、MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$) と MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の抵抗値は、それぞれ 8.0 %, 20.0 % 低減した。上述の抵抗値の低減は磁性塗布線の近接効果の抑制に起因する。

Fig.5 において、 $\mu_r = 9.3$ の MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$) よりも、 $\mu_r = 7.5$ の MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の抵抗低減効果の方が大きかった。これは、MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の方が磁性材料の体積が大きいため、より近接効果が抑制されることに起因する。また、磁性塗布線は 10 kHz から 1 MHz の幅広い周波数範囲において交流抵抗が低減した。

4. コイル抵抗の電流依存性

電気機器における定格電流密度は 3 A/mm² 程度である⁸⁾。Fig.3 に示したように、磁性塗布線の飽和磁束密度は 100 mT 程度と小さい。そこで、磁性塗布線の磁気飽和を確認するためにコイルの抵抗の電流依存性を測定した。

Fig.6 に周波数 $f = 20 \text{ kHz}$, コイル表面温度 $T = 50^\circ\text{C}$ のときの 69 回巻コイルの抵抗-電流特性を示した。コイルに電流を流し、温度上昇する過程で $T = 50^\circ\text{C}$ のときのインピーダンス特性を示した。測定にはサーモショット、インピーダンスアナライザ、および周波数特性分析器を用いた。

$I = 8 \text{ A}$ における COW, MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$), MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の抵抗値は、それぞれ 3.19 Ω , 3.04 Ω , 2.76 Ω

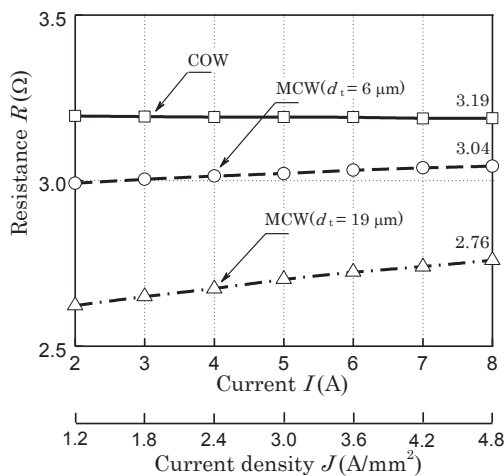


Fig. 6 Resistance vs. Current characteristics of coils. ($N = 69$, $f = 20 \text{ kHz}$, $T = 50^\circ\text{C}$)

となり、COW の抵抗と比較して、MCW はそれぞれ 4.7%, 13.5 % 低減した。電流が大きくなるにしたがって MCW の抵抗は増加した。これは、MCW の磁性層が磁気飽和して、交流磁界を誘導できなくなったことや、ナノ結晶軟磁性材料の鉄損が増加したことに起因する。

5. あとがき

本論文で述べたことは以下の事項である。

(1) 磁性塗布線の構造と磁気特性

MCW ($d_t = 6 \mu\text{m}$) の飽和磁束密度 B_s は 125 mT であり、比透磁率 μ_r は 9.3, 保磁力 H_c は 2.5 kA/m であった。MCW ($d_t = 19 \mu\text{m}$) の飽和磁束密度 B_s は 92 mT であり、比透磁率 μ_r は 7.5, 保磁力 H_c は 2.5 kA/m であった。

(2) コイルの抵抗-周波数特性

1 MHz, 100 kHz, 10 kHz において MCW の抵抗は COW の抵抗値と比較してそれぞれ最大 32.1 %, 24.7 %, 20.0 % 低減した。これは磁性塗布線の近接効果の抑制に起因している。MCW は幅広い周波数範囲で交流抵抗を低減する。

(3) コイル抵抗の電流依存特性

69 回巻コイル, $I = 8 \text{ A}$, $f = 20 \text{ kHz}$ のとき MCW の抵抗は COW の抵抗と比較して最大 13.5 % 低減した。しかし、MCW は電流が大きくなるにしたがって抵抗が増加した。これは MCW の磁性層が磁気飽和して、交流磁界を誘導できなくなったことや、ナノ結晶軟磁性材料の鉄損が増加したことに起因する。

今後は先行技術である磁性めっき線との電氣的、および磁氣的特性の比較検討を行う。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)スーパークラスタープログラムコアクラスター京都地域の支援を受け実施したものである。

References

- 1) K. Harada: Switchingudengen Handobukku (in Japanese), p. 1 (Nikkankogyo Shimbunsha, Tokyo, 2000).
- 2) T. Mizubo, S. Enoki, T. Hayashi, T. Asahina and H. Shinagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **Vol. 43, No.2**, p. 543 (2007).
- 3) J.D. Lavers, V. Bolborici: *IEEE Trans. Magn.*, **Vol. 35, No.5**, p. 3541 (1999).
- 4) Y. Hoshino: Koiru wo Tsukau Hito no Tame no Ohanashi (in Japanese), p. 16 (CQ Shuppan, Japan, 2000).
- 5) T. Mizuno, S. Enoki, T. Asahina, T. Suzuki, M. Noda and H. Shinagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **Vol.43, No.6**, p. 2654 (2007).
- 6) T. Mizuno, T. Suzuki, T. Asahina, M. Noda, S. Enoki, H. Shinagawa, S. Uehara and H. Kitazawa: *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, **Vol.127, No.10**, p. 661 (2014).
- 7) Y. Konno, T. Yamamoto, Y. Chai, T. Dobashi, Y. Bu, T. Mizuno: *IEEE Trans. Magn.*, **Vol.53, No.11**, 8401707 (2017).
- 8) Y. Teramae: LLC Kyoshin ni yoru Teizatsuon Surimu Dengen Gendaisekkeiho (in Japanese), p.108 (CQ Shuppan, Tokyo, 2014).

2018年9月28日受理, 2018年11月5日再受理, 2018年11月19日採録