Pr-Fe-Co-W-B 系交換スプリング磁石の磁気特性

正 員 山元 洋* 学生員 齋木 正親**

Magnetic Properties of Pr-Fe-Co-W-B System Exchange Spring Magnets

Hiroshi Yamamoto*, Member, Masachika Saiki**, Student Member

The melt-spun ribbons of Pr-Fe-Co-W-B system alloys were prepared by single roller rapid-quenching method. The effects of composition, wheel velocity and heat-treatment on the magnetic properties were investigated. The $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ ribbon prepared at a wheel velocity of 15.0 m/s were crystallized by heat-treatment, and the optimum heat-treatment condition was found to be at 600 °C for 3 min, then the value of $(BH)_{\max}$ was 148.5 kJ/m³. The temperature coefficients of J_r and H_{cJ} for the ribbons crystallized from the amorphous $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy were $\alpha(J_r) = -0.03 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ (reversible) and $\alpha(H_{cJ}) = -0.45 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ (irreversible), respectively. The value of $(BH)_{\max}$ for the compression molding $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ isotropic bonded magnet prepared by using the ribbons annealed at 600 °C for 3 min is 86.00 kJ/m³ and the density is 6.16 Mg/m³.

キーワード : Pr-Fe-Co-W-B 系合金, 急冷薄帯, 交換スプリング磁石, 磁気特性, ボンド磁石

Keywords : Pr-Fe-Co-W-B system alloys, melt-spun ribbons, exchange spring magnet, magnetic properties, bonded magnet

1. 緒 言

硬質磁性材料中に鉄のような軟質磁性材料をいれたナノコンポジットを構成すると、両者の間に交換結合がある場合には単一の硬質磁性材料のように振る舞う。このような交換結合磁石は、減磁曲線で磁化が外部磁界に対して可逆的にスプリングバックする特異な挙動を示すことから交換スプリング磁石と呼ばれている。

これら交換スプリング磁石における、Nd-Fe-Co-B 合金に添加物を加えることにより、1.0 T 以上の高い残留磁束密度が得られるという報告がある^{(1)~(4)}。また、Nd を Pr で置換すると、 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型結晶相の異方性磁界が高いために、保磁力が大きくなることが予想される。そして、著者らの一人は以前に Sm-Fe 系の窒化合物作製時に、Sm-Fe 合金に W を添加すると微細組織になることを報告している⁽⁵⁾。

そこで本実験では Pr-Fe-Co-W-B 系急冷薄帯において、高性能な $\alpha\text{-Fe/Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系交換スプリング磁石を作製することを目的に、Pr 量、B 量を変化させ、さらに Fe の一部を W で置換し、ロール周速度（急冷速度）、熱処理などの諸条件が薄帯磁石の磁氣的、物理的特性にどのような影響

を与えるかについて、詳細に実験検討した。また、これら薄帯試料の粉末を用いてボンド磁石を作製し、それらの諸特性についても詳細に検討をした。

2. 実験方法

実験に用いた原材料は、Pr, Fe, Co の金属、Fe-W 合金 (W:77.73 wt%) と、メタロイドの B である。急冷薄帯作製に用いた試料は、組成式を $\text{Pr}_y\text{Fe}_{92-x-y-z}\text{Co}_8\text{W}_x\text{B}_z$ とし、Pr 量 $y = 8 \sim 10 \text{ at\%}$, W 量 $x = 0 \sim 0.5 \text{ at\%}$, B 量 $z = 5 \sim 10 \text{ at\%}$ と変化させたものである。上記の母合金は、真空吸い上げ法により作製した。急冷薄帯は高純度 Ar ガス雰囲気においてロール周速度を 12.5~17.5 m/s と変化させて片ロール液体急冷法により作製した。熱処理は高純度 Ar ガス雰囲気中で温度を 550~650 °C、キープ時間を 3 min 一定として、昇温時間を 1~10 min と変化させて行った。急冷薄帯の組織は、TEM により観察した。薄帯試料の磁気特性、温度特性は全て 4.8 MA/m のパルス着磁を行った後に、VSM（振動試料型磁力計）を用いて測定した。薄帯の結晶構造は粉末 X 線回折法により調べた。またほぼ非晶質試料の結晶化温度は、DTA（示差熱分析計）を用いて測定した。次にこれらの薄帯試料を 150 μm 以下に粉砕して、エポキシ樹脂 2.5 wt% を混合攪拌し、980 MPa の圧力で圧縮成形した後、150 °C × 1 h のキュア処理を行いボンド磁石を作製した。ボンド磁石の磁気特性は、4.8 MA/m のパルス着磁後、高感度自記磁束計を用いて測定した。

* 明治大学

〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1

Meiji University

1-1-1, Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571

** 明治大学 大学院

〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1

Graduate School, Meiji University

1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571

3. 実験結果並びに検討

図1は $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成において、ロール周速度を 15.0 m/s で作製した急冷薄帯試料の DTA 曲線を示したものである。なお DTA の昇温速度は 20 °C/min で行った。図より、 α -Fe 型結晶相への結晶化に対応した発熱ピークは 442 °C、 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型結晶相の結晶化開始温度は 490 °C、結晶化に対応した発熱ピークは 583 °C であった。この結果から急冷薄帯の熱処理温度は 550 °C 以上で行った。

次に本研究の主目的である W 添加について検討した。図2は $\text{Pr}_9\text{Fe}_{77-x}\text{Co}_8\text{W}_xB_6$ 組成急冷薄帯試料において、W 量 $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ at% と変化させたときの磁気特性を示したものである。作製条件は、ロール周速度 15.0 m/s、熱処理条件 600 °C × 3 min、昇温時間 5 min 一定とした。

(なおこの作製条件は、以下における Pr 量変化、B 量変化の実験でも同様である。) 図から知られるように、残留磁化 J_r は W 量の増加とともに減少するという傾向にあり、磁気

図1 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の DTA 曲線
Fig. 1. DTA curve for melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbon.

図2 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{77-x}\text{Co}_8\text{W}_xB_6$ 合金急冷薄帯の磁気特性
Fig. 2. Magnetic properties of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{77-x}\text{Co}_8\text{W}_xB_6$ alloy ribbons.

分極の保磁力(固有保磁力) H_{cj} は W 量の増加とともに増加し、磁束密度の保磁力 H_{cb} 、最大エネルギー積 $(BH)_{max}$ は $x = 0.3$ at% の時最大値をとり、以後減少するという傾向になった。これは、0.5 at% の組成では H_{cb} が減少していることから、減磁曲線の角形比が低下したことが原因であると考えられる。

次に各組成の結晶構造を調べるために、これら薄帯試料の X 線回折を行った(図3)。図から分かるように、どの組成の急冷薄帯試料においても、 α -Fe 型結晶相と $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型結晶相の回折線が明瞭に現れ、複合組織であることが分かった。

以上の磁気特性と X 線回折図形の解析の結果より、最適 W 量 $x = 0.3$ at% として以後実験検討を行った。

図4は $\text{Pr}_y\text{Fe}_{85.7-y}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成急冷薄帯試料において、Pr 量 $y = 8, 9, 10$ at% と変化させたときの磁気特性を示したものである。図から分かるように、 J_r は Pr 量の増加とともに減少し、 H_{cj} 、 H_{cb} は Pr 量の増加とともに増加する傾向にあり、 $(BH)_{max}$ は $y = 9$ at% のときに最大値をとり、その後減少した。この結果より、最適 Pr 量 $y = 9$ at% として以後実験検討を行った。

図5は $\text{Pr}_9\text{Fe}_{82.7-z}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_z$ 組成急冷薄帯試料において、B 量 $z = 5, 6, 8, 10$ at% と変化させたときの磁気特性を示したものである。図から知られるように、 J_r は B 量の増加とともに減少し、 H_{cj} 、 H_{cb} は $z = 6$ at% のときに最大となりその後減少する傾向にあった。 $(BH)_{max}$ は $z = 6$ at% のときに最大値となった。この結果より、最適 B 量 $z = 6$ at% であることが分かった。

以上の結果より、最適組成は $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成であることが分かったので、次にこの組成においてロール周

図3 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{77-x}\text{Co}_8\text{W}_xB_6$ 合金急冷薄帯の X 線回折図形
Fig. 3. X-ray diffraction patterns of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{77-x}\text{Co}_8\text{W}_xB_6$ alloy ribbons.

図4 $\text{Pr}_y\text{Fe}_{85.7-y}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の磁気特性
Fig. 4. Magnetic properties of melt-spun $\text{Pr}_y\text{Fe}_{85.7-y}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbons.

図6 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の磁気特性に及ぼすロール周速度の影響
Fig. 6. Effect of wheel velocity on magnetic properties of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbons.

図5 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{82.7-z}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_z$ 合金急冷薄帯の磁気特性
Fig. 5. Magnetic properties of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{82.7-z}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_z$ alloy ribbons.

図7 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の磁気特性に及ぼす熱処理温度の影響
Fig. 7. Effect annealing temperature on magnetic properties of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbons.

速度を 12.5～17.5 m/s と変化させ、磁気特性に及ぼす影響について調べた (図 6)。なお熱処理条件は、600 °C × 3 min、600 °C までの昇温時間 5 min 一定とした。この図から、 H_{cJ} 、 H_{cB} 、 J_r 、 $(BH)_{\max}$ のすべての値においてロール周速度 15.0 m/s のときに最大値となった。この結果より、最適ロール周速度は 15.0 m/s であることが知られた。

次に、熱処理条件を変化させて実験検討を行った。図 7 は $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成急冷薄帯試料において、熱処理温度を 550～650 °C と変化させたときの磁気特性を示したものである。なお作製条件は、ロール周速度 15.0 m/s、熱処理時間 3 min、昇温時間 5 min 一定とした。図から分かるように、 H_{cJ} は 625 °C で最大となりその後減少し、 H_{cB} 、 J_r 、

$(BH)_{\max}$ は 600 °C で最大となりその後減少した。図 8 はこのときの X 線回折図形を示したものである。この図より、As-melt-spun では、 α -Fe 型の結晶がでているもののほぼ非晶質となっている。また、各熱処理温度において、 α -Fe 型結晶相と $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型結晶相の回折線が明瞭に現れ、複合組織であることが分かった。

以上の磁気特性と X 線回折図形の解析の結果より、この試料の最適熱処理温度は 600 °C であることが分かった。

続いて、熱処理昇温時間を変化させて実験検討を行った。

図 8 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の熱処理温度別 X 線回折図形

Fig. 8. X-ray diffraction patterns of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbons as a function of annealing temperature.

図 9 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の磁気特性に及ぼす熱処理昇温時間の影響

Fig. 9. Effect of heating time on magnetic properties of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbons.

図 9 は $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成急冷薄帯試料において、熱処理昇温時間を 1~10 min と変化させたときの磁気特性を示したものである。なお作製条件は、ロール周速度 15.0 m/s、熱処理条件 600 °C×3 min 一定とした。図から分かるように、 H_{cj} 、 H_{cb} 、 J_r 、 $(BH)_{max}$ すべての値において 5 min で最大値となった。以上の結果より、最適熱処理条件は

図 10 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の減磁曲線およびリコイルループ

Fig. 10. Demagnetization curves and recoil loop of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbon.

$\text{Pr}_9\text{Fe}_{77}\text{Co}_8\text{B}_6$ $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$
Annealing condition : 600 °C×3 min
Heating time : 5 min ($V_s = 15.0$ m/s)

図 11 急冷薄帯の TEM 写真

Fig. 11. TEM photographs of melt-spun alloy ribbons.

600 °C×3 min、熱処理昇温時間 5 min ということが知られた。

図 10 は前述した最適作製条件で作製された $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成急冷薄帯試料の減磁曲線におけるスプリングバック及び磁気特性を示したものである。この時の磁気特性は、 $J_r = 1.08$ T、 $H_{cj} = 513.0$ kA/m、 $H_{cb} = 445.0$ kA/m、 $(BH)_{max} = 148.5$ kJ/m³、角形比 $H_k/H_{cj} \times 100 = 35.2$ %であった。またスプリングバック率として保磁力付近から磁界を戻したときに残留磁化が約 42 %回復することが知られた。このことより、本組成急冷薄帯試料は交換スプリング磁石であることが確認された。

図 11 は、 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{77}\text{Co}_8\text{B}_6$ 組成と $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成の急冷後の試料に、熱処理条件 600 °C×3 min、熱処理昇温

図 12 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の J_r , H_{cj} の温度特性

Fig. 12. Temperature dependence of J_r and H_{cj} in melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbon.

時間 5 min を施した後の TEM 写真である。この写真より、両試料ともほとんどが結晶粒子で構成されており、 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{77}\text{Co}_8\text{B}_6$ 組成の結晶の平均粒径は約 30 nm、 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成の結晶の平均粒径は約 23 nm であり、W 添加によって結晶が約 7 nm 小さくなったことが分かった。このことにより W 添加が若干ではあるが微細結晶形成に寄与して、粒子間相互作用を強くしているために、先に述べた磁気特性が向上しているものと考えられる。また、電子回折写真より両試料とも等方性であることが確認された。

次に温度特性について実験検討を行った。図 12 は前述の急冷薄帯試料の残留磁化 J_r と保磁力 H_{cj} において、温度を 25~125 °C まで変化させたときの温度特性を示したものである。図から分かるように、 J_r , H_{cj} は温度の上昇とともに減少する傾向にあり、 J_r は温度を 125 °C から戻したとき、温度に対して直線的には変化しなかった。 J_r の温度係数は $\alpha(J_r)_{ave} = -0.03 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ 、 H_{cj} の温度係数は直線外挿で求めると、 $\alpha(H_{cj}) = -0.45 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ となり、 J_r の温度係数は $\text{Nd}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 組成の温度係数と比べて、半分の値という良好な値であった。

図 13 は最適作製条件で作製された急冷薄帯試料の磁化 σ - T 曲線を示したものである。試料は 4.8 MA/m でパルス着磁した後、印加磁界を 160 kA/m として測定した。図より、 α -Fe 型結晶相と $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型結晶相を含んでいることが分かり、 α -Fe 型結晶相のキュリー温度は 700 °C 以上であることから、 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型結晶相のキュリー温度は 409 °C であることが分かった。またこの図よりそれぞれの結晶相の大まかな割合は α -Fe 型結晶相 40 %、 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型結晶相 60 % であることが知られた。

図 14 は最適作製条件で作製された急冷薄帯試料を用いて

図 13 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金急冷薄帯の磁化の温度依存性

Fig. 13. Temperature dependence of magnetization of melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbon.

図 14 $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ 合金等方性ボンド磁石の減磁曲線およびスプリングバック

Fig. 14. Demagnetization curves and recoil loop for a bonded magnet prepared by melt-spun $\text{Pr}_9\text{Fe}_{76.7}\text{Co}_8\text{W}_{0.3}\text{B}_6$ alloy ribbon.

作製した等方性圧縮成形ボンド磁石の減磁曲線におけるスプリングバックを示したものである。その磁気特性の値はそれぞれ $J_r = 0.84 \text{ T}$, $H_{cj} = 497.5 \text{ kA/m}$, $H_{cb} = 368.6 \text{ kA/m}$, $(BH)_{max} = 86.0 \text{ kJ/m}^3$, $H_k/H_{cj} \times 100 = 27.9 \%$, Recoil ratio = 41 % であった。また密度は、 6.16 Mg/m^3 であった。

4. 結 言

以上の結果をまとめると次のようである。

(1) 本実験で得られた最適作製条件は、 $\text{Pr}_y\text{Fe}_{92-x-y-z}\text{Co}_8\text{W}_x\text{B}_z$ 組成急冷薄帯において $y = 9 \text{ at\%}$, $x = 0.3 \text{ at\%}$, $z = 6 \text{ at\%}$ の時であり、ロール周速度 15.0 m/s、熱処理温度 600 °C、熱処理昇温時間 5 min の時に最高の磁気特性が得られた。

この時の値は $J_r = 1.08$ T, $H_{cJ} = 513.0$ kA/m, $H_{cB} = 445.0$ kA/m, $(BH)_{max} = 148.5$ kJ/m³, 保磁力付近からの Recoil ratio = 42 %であった。

(2) 最適条件で作製された薄帯試料の温度係数は, J_r の可逆温度係数 $\alpha(J_r) = -0.03$ %/°C, H_{cJ} の温度係数を直線外挿より求めると $\alpha(H_{cJ}) = -0.45$ %/°Cであった。また, 保磁力付近より磁界を 0 に戻した時, 残留磁化 J_r が 42 %回復する事が知られ, 本組成急冷薄帯は硬質磁性相である Pr₂Fe₁₄B と軟質磁性相である α -Fe が交換結合している交換スプリング磁石であることが知られた。また, TEM 観察の結果より平均粒径は約 23 nm であることが分かり, W 添加により約 23 %粒径が小さくなったことが知られた。

(3) 最適条件で作製された急冷薄帯試料のキュリー温度は約 409 °Cであり, Pr₂Fe₁₄B 型結晶相, α -Fe 型結晶相を含んでいることが知られ, それぞれの大まかな割合は Pr₂Fe₁₄B 型結晶相 60 %, α -Fe 型結晶相 40 %であった。

(4) 最適条件で作製された試料を用いて作製したボンド磁石の磁気特性は $J_r = 0.84$ T, $H_{cJ} = 497.5$ kA/m, $H_{cB} = 368.6$ kA/m, $(BH)_{max} = 86.0$ kJ/m³であり, この時の密度は 6.16 Mg/m³であった。

(平成 14 年 11 月 11 日受付, 平成 15 年 1 月 31 日再受付)

文 献

- (1) H. Yamamoto, S. Koumo, and K. Kawamata : "Effect of Pr Substitution on the Magnetic Properties of Nd-Fe-Co-Cu-Nb-B System Exchange Spring Magnets", Proc. of the 16th Int. Workshop on RE Magnets and Their Application, 14, pp.585-590, Sendai, Japan (2000)
- (2) H. Yamamoto, M. Nagakura, T. Katsuno, and T. Yamaguchi : "Effect of Annealing Treatment on Magnetic Properties of Melt-Spun Nd-Fe-Co-B-V Ribbons", *J.Magn.Soc.Jpn.*, Vol.14, No.2, pp.185-188 (1990) (in Japanese)
山元 洋・永倉 充・勝野 徹・山口岳人 : 「Nd-Fe-Co-B-V 系急冷薄帯の磁気特性に及ぼす熱処理の影響」, 応用磁気学誌, **14**, No.2, pp.185-188 (1990)
- (3) H. Yamamoto, K. Kawamata, M. Hamano, and M. Yamasaki : "Magnetic Properties of Nd-Fe-Co-V-Nb-B System Exchange Spring Magnets", *J.Magn.Soc.Jpn.*, Vol.24, No.4-2, pp.415-418 (2000) (in Japanese)
山元 洋・川又健二・浜野正昭・山崎 実 : 「Nd-Fe-Co-V-Nb-B 系交換スプリング磁石の磁気特性」, 応用磁気学誌, **24**, No.4-2, pp.415-418 (2000)
- (4) Z. Chen, Y. Zhang, Y. Ding, G. C.Hadjiapanayis, Q. Chen, and B. Ma : "Studies on magnetic properties and microstructure of melt-spun nanocomposite R₈(Fe,Co,Nb)₈₆B₆(R=Nd, Pr) magnets", *J.Magn.Mat.*, Vol.195, pp.420-425 (1999)

- (5) H. Yamamoto and Y. Tsukada : "Magnetic Properties of TbCu₇-Type Sm-Fe-Co-W System Nitriding Compounds", *JSPM*, Vol.49, pp.151-156 (2002) (in Japanese)
山元 洋・塚田祐二郎 : 「TbCu₇ 型 Sm-Fe-Co-W 系窒化化合物磁石の磁気特性」, 粉体および粉末冶金誌, **49**, pp.151-156 (2002)
- (6) D. Goll and H. Kronmüller : "Nanocrystalline PrFeB -Based Permanent Magnets with enhanced remanence", Proc. of the 15th Int. Workshop on RE Magnets and Their Application, pp.189-194, Dresden, Germany (1998)
- (7) H. A. Davies, J. I. Betancourt R., and C. L. Harland : "Nanophase Pr and Nd/Pr-Based Rare Earth -Iron-Boron Alloys." Proc. of the 16th Int. Workshop on RE Magnets and Their Application, 14, pp.485-490, Sendai, Japan (2000)
- (8) D. Goll, I. Kleinschroth, and H. Kronmüller : "High Performance Nanocrystalline PrFeB-Based Bonded Magnets", Proc. of the 16th Int. Workshop on RE Magnets and Their Application, 14, pp.641-646, Sendai, Japan (2000)
- (9) S. Hirose, H. Kanekiyo, and M. Uehara : "High coercivity iron-rich rare-earth permanent magnet material based on (Fe, Co)₃B-Nd-M (M=Al, Si, Cu, Ga, Ag, Au)", *J.Appl.Phys.*, Vol.73, pp.6448-6553 (1993)
- (10) H. Yamamoto and M. Shiozawa : "Magnetic Properties of Melt-spun Nd-Fe-Co-V-B System Exchange Spring Magnets and their Bonded Magnets", Proc. of 10th Int. Workshop on RE Magnets and Their Application, pp.307-312, Dresden, Germany (1998)

山 元 洋

(正員) 1941 年 3 月 23 日生まれ。1969 年 3 月明治大学院工学研究科博士課程終了。以後, 同大学工学部電気工学科 (改組により, 現在は理工学部電気電子工学科) 助手, 講師, 助教授を経て, 81 年 4 月同教授, 現在に至る。工学博士。この間, 84 年 3 月~9 月アイオワ州立大学電気工学科客員教授。主として, 磁性材料に関する研究に従事。95 年粉体粉末冶金協会研究功績賞受賞。96 年電気学会技術報告賞受賞。IEEE, 日本応用磁気学会, 日本金属学会, 粉体粉末冶金協会会員。

齋 木 正 親

(学正員) 1978 年 10 月 14 日生まれ。2001 年 3 月明治大学理工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月同大学理工学研究科電気工学専攻博士前期課程入学, 現在に至る。