

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01754

研究課題名（和文）高アスペクト型強磁性金属多層ナノワイヤー配列素子の作製とそのCPP-GMR特性

研究課題名（英文）CPP-GMR of Ferromagnetic Multilayered Nanowire Arrays with Large Aspect Ratio

研究代表者

大貝 猛 (OHGAI, Takeshi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60253481

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：陽極酸化時の極間電圧を制御することにより、様々な細孔径（35 nm～130 nm）を有するアルミナ製テンプレートの開発に成功した。Co/Cu多層ナノワイヤーの積層構造を維持するためには、50 nm～95 nm程度の細孔径が適切であることが判明した。Co/Cu多層ナノワイヤーの直径が35 nmであるとき、保磁力と角形比はそれぞれ1.24 kOeおよび0.93まで達した。明瞭な積層界面が形成された直径50 nm～95 nmのCo/Cu多層ナノワイヤーは10%を超えるGMR値を示した。細孔径が70 nmテンプレートをを用いた場合に23.4%のGMR値を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、情報・通信技術の急速な発展に伴って、HDDなどの情報蓄積デバイスの需要は益々高まっている。これらのデバイスの小型化に伴い、面記録密度の向上が図られている。ゆえに、狭い範囲の磁場を高感度で検出できる磁気ヘッドとして応用可能なセンサ材料の開発が求められている。特に、GMR素子はAMR素子と比較すると比較的大きな磁気抵抗効果を示し、さらには電析法など的高温・高真空環境を必要としない低コストなアプローチを用いて作製が可能であるために注目を集めている。本研究では、細孔径が70 nmテンプレートをを用いて、パルス電解法によりCo/Cu多層ナノワイヤーを作製し、最大で23.4%のGMR値を達成した。

研究成果の概要（英文）：Thick anodically synthesized aluminum oxide (AAO) films, with a nanochannel diameter that ranged from 35 nm to 130 nm, were fabricated by controlling the cell voltage during the anodization process. Multilayered nanowires with alternate Co and Cu layers were produced in the AAO nanochannels by applying the rectangular pulsed potential electrodeposition technique using an acidic aqueous solution containing Co²⁺ and Cu²⁺ ions. The Co/Cu multilayered structure was clearly observed in the nanowire diameter that ranged from 50 nm to 95 nm. The multilayered nanowires were spontaneously magnetized in the axial direction. The coercivity, H_c, and squareness, Mr/Ms, increased up to 1.24 kOe and 0.93, respectively, with the diameter decreasing to 35 nm. The maximum GMR value reached was 23.4% at room temperature in the Co/Cu multilayered nanowires that had a diameter of 70 nm.

研究分野：材料工学

キーワード：陽極酸化 ナノチャネル ナノワイヤー コバルト 銅 多層 パルス電解 巨大磁気抵抗効果

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、情報伝達手段は「文字」や「音声」を利用した低速低密度伝達型から「画像」や「動画」等の高速高密度伝達型へと移行しており、世界で生み出される情報量は、年率約40%で増大している。したがって、情報記録装置の需要は近年益々増大しているが、その主なストレージ装置は依然としてHDDである。HDDがストレージ装置の主役として生き残ってきたのは、過去40年以上にわたる記録密度の向上により、他のストレージ装置に対して優位性を保ってきたからに他ならない。1997年以降、GMRヘッドの登場により、年率100%で記録密度は向上し、2007年の垂直磁気記録の実用化により、その成長は年率50%で向上している。しかしながら、現行のGMRヘッドやTMRヘッドでは、500 Gb/in² (ギガビット)まで記録密度が向上すると微弱な媒体磁界を検知することが困難になってくると予測されている。従来の磁気ヘッド材料は、薄膜状の2次元構造体であるが、これを細線状の1次元構造体へと変更出来れば、数十Tb/in² (テラビット)クラスの超高記録密度システムの構築が可能になると理論的に予測されている。

2. 研究の目的

細線状の1次元構造体である強磁性金属多層ナノワイヤー配列素子の合成用テンプレート材料としては、ナノ細孔がランダムに配列している市販の濾過膜用ポリカーボネート製メンブレンフィルターが利用可能である。しかしながら、電子部品としての実装プロセスを考慮した場合、200 μm付近までの加熱処理工程による品質の劣化が避けられない。一方、研究代表者は、最近、アルミニウムの陽極酸化と酸化皮膜の逆電解剥離を短時間で連続して行う新規プロセスにより、直径D: 50 nm、長さL: 50 μmの超高アスペクト比形状 (アスペクト比L/D = 1000) のハニカム配列型ナノ細孔を有するアルミナ製メンブレンフィルターの高速度製技術を開発している【*J. Solid. State. Electrochem.* 20, 1665 (2016)】。そこで本研究では、5年間の研究期間内で、上述の新しいタイプの超高アスペクト比形状のハニカム配列型ナノ細孔をテンプレート材料として、水溶液からのパルス電析法により強磁性層 (Co: 10 nm) と反磁性層 (Cu: 10 nm) とを交互積層し、積層界面垂直通電型の CPP-GMR 特性を有する超高アスペクト比形状型強磁性/反磁性金属多層ナノワイヤー配列素子の作製を目指す。

3. 研究の方法

アルミニウム棒 (直径: 10 mm、純度: 99%) の断面を物理的・電気化学的に研磨後、得られた平滑な断面を 0.3 M (COOH)₂ 水溶液または H₂SO₄ 中で陽極酸化した。陽極酸化時の極間電圧は、110 V, 90 V, 70 V, 50 V, 20 V とした。陽極酸化処理によって、アルミニウム棒断面にはアルミナ層が生成した。アルミナ層とアルミニウム棒の境界であるバリア層をアノードエッチングによって除去することでアルミナ膜 (AAO テンプレート) を剥離した。得られた AAO テンプレートはナノチャネル構造を有していた。アノードエッチングを行う際には、陽極酸化の極間電圧よりも 5 ~ 15 V 高い電圧が印加された。また、電解液としては、C₂H₅OH (99.5 wt%) と HClO₄ (60 wt%) を体積比 1:1 で混合した溶液が用いられた。テンプレートの一部はバリア層の残存などを原因として、穴の貫通性が不十分であった。そこで本研究では、一部のテンプレートは、アルミ棒から剥離した後に H₃PO₄ 水溶液 (8.1 wt%) 中で静置し、化学的エッチングを施した。次に、電析時の電氣的接触を確保するために、スパッタ法を用いて AAO テンプレートの片面を金 (約 100 nm ~ 200 nm) で覆った。さらに、磁気抵抗測定のためにテンプレートのもう片面に、細孔を覆わない程度 (約 15 nm ~ 20 nm) に金を堆積させた。その後、銀ペースト (ドータイト) および絶縁テープを用いて、AAO テンプレートを銅チップおよび銅板に取り付けることで陰極を作製した。本実験では、Co/Cu 多層ナノワイヤーの電析のために、0.5 M Co(SO₃NH₂)₂·4H₂O, 0.005 M CuSO₄·5H₂O および 0.4 M H₃BO₃ を含む電解浴を用いた。電解浴の pH は 4 に調整され、浴温は 40 °C とした。また、電析時には、陽極と参照電極として、それぞれ金線と飽和銀・塩化銀電極が用いた。パルス電析時の陰極電位は、電解浴の分極曲線に基づいて決定した。Cu 層および Co (リッチ) 層の電析のための陰極電位として、それぞれ -0.40 V および -0.90 V ~ -1.05 V vs. Ag/AgCl が選択された。AAO テンプレートの構造 (細孔径) は電解放出形走査型電子顕微鏡 (FE-SEM, JSM-7500FA, JEOL Ltd., Tokyo Japan) を用いて観察した。また、Co/Cu 多層ナノワイヤーの積層構造は透過型電子顕微鏡 (TEM, JEM-2010-HT, JEOL Ltd., Tokyo, Japan) を用いて調査した。加えて、ナノワイヤーの結晶配向性は X 線回折装置 (XRD, Miniflex 600-DX, Rigaku Corp., Tokyo, Japan) を用いて解析した。GMR 特性および磁気特性は振動試料型磁力計 (VSM, TM-VSM1014-CRO, Tamakawa Corp., Sendai, Japan) を用いて評価した。

4. 研究成果

アルミニウム棒断面の陽極酸化によって作製された AAO ナノチャンネルテンプレートの研磨面、断面および剥離面の SEM 像を図 1 に示す。(a), (b), (c), (d), (e) は、陽極酸化時の極間電圧をそれぞれ 110 V, 90 V, 70 V, 50 V, 20 V として作製した。アルミニウム棒から剥離すると、一部のテンプレートは残存したバリア層によって細孔が塞がれており、貫通性が不十分であった。そこで、本実験ではリン酸水溶液 (8.1 wt%) 中に AAO テンプレートを静置し、穏やかな化学的エッチング処理を施した。結果として、図 1 に示すように、バリア層が除去され、細孔の貫通性の高い AAO テンプレートを得られた。各ナノチャンネルはスルーホール型の理想的な柱形状を有していることが確認された。テンプレートのナノチャンネルの平均細孔径は、約 130 nm (110 V), 95 nm (90 V), 70 nm (70 V), 50 nm (50 V) and 35 nm (20 V) であった。また、テンプレートの膜厚は、 $60 \pm 13 \mu\text{m}$ 程度であった。テンプレートのナノチャンネルのアスペクト比は、極間電圧 110 V で作製されたテンプレートでは 450 程度であったが、20 V で合成されたものでは 1000 を超越した。

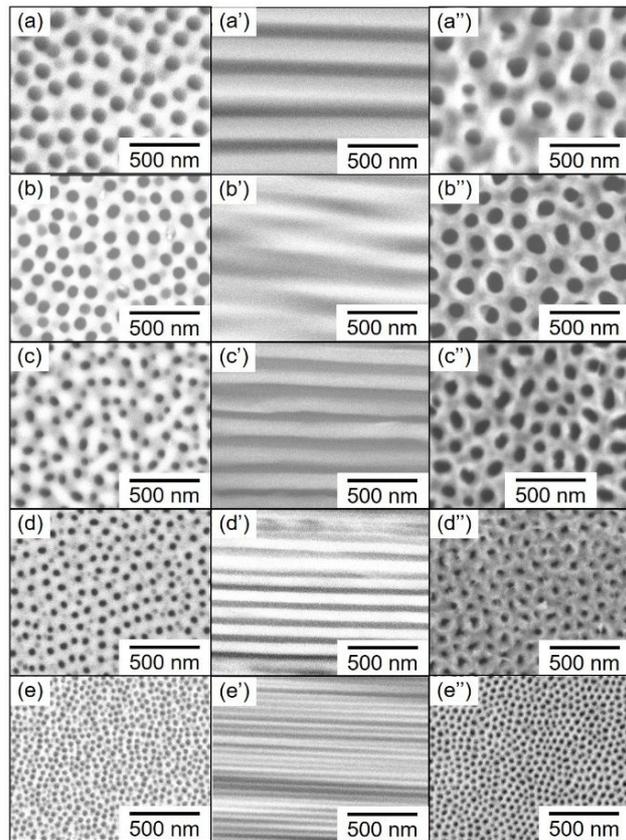


図 1. AAO ナノチャンネルテンプレートの研磨面、断面および剥離面の SEM 像

電解浴は、0.5 M $\text{Co}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.005 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ および 0.4 M H_3BO_3 を含有する水溶液であり、浴温は 40 に維持した。まず、パルス電析時の陰極電位を決定するために、電析に用いる電解浴のサイクリックボルタンメトリー (CV) を測定した。図 2 は、CV 曲線を基に作成された分極曲線を示す。測定に際しては、陰極と陽極にそれぞれ銅箔と金線が使用した。また、参照電極として飽和銀・塩化銀電極を選択した。陰極電位を卑な側にシフト (青線) していくと、0.1 V ~ 0 V vs. Ag/AgCl の電位領域で陰極電流密度が大きく増加した。本研究の実験条件では、以下に示すネルンスト式(1)によると Cu/Cu^{2+} の平衡電位 $E_{\text{Cu}}^{\text{eq}}$ は約 0.069 V vs. Ag/AgCl であると見積もられた。

$$E^{\text{eq}} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M^{n+}]}{[M^0]} \quad (1)$$

ただし、 Cu/Cu^{2+} の標準電位 $E_{\text{Cu}}^0 = 0.140 \text{ V vs. Ag/AgCl}$, $R = 8.3 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, $T = 313 \text{ K}$, $n = 2$, $F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$, $[M^{n+}]/[M^0] = 0.005$ として計算した。この計算に基づくと、Cu の析出に伴って陰極電流密度が増加したと考えられる。また、陰極電位を 0 V vs. Ag/AgCl よりも卑な領域にシフトさせると、電流密度の増加は落ちつく。一般に、水溶液中の金属イオンが還元される過程は、(1)物質移動 (電極付近まで金属イオンが泳動し、基板に吸着する) (2)電荷移動 (吸着イオンが電子を受け取って金属原子となる) に大別される。ゆえに、金属イオンの還元反応の律速段階が電荷移動過程から、物質移動過程に切り替わったため、電流密度の増加が落ち着いたと考えられる。一方で、陰極電位 -0.80 V vs. Ag/AgCl 付近で、再び電流値が大きく増加し始めた。Co/Co²⁺ の平衡電位 $E_{\text{Co}}^{\text{eq}}$ を見積もると、およそ -0.483 V vs. Ag/AgCl である。ただし、標準電位 $E_{\text{Co}}^0 = -0.474 \text{ V vs. Ag/AgCl}$, $[M^{n+}]/[M^0] = 0.5$ として計算した。Bockris らの報告に基づくと、鉄族金属 (Fe, Co, Ni) の電析においては、金属イオンの還元は多段階の反応である。そのため、鉄族金属の電析においては、大きな陰極過電圧が伴うことが知られている。すなわち、水素の発生に伴うプロトン濃度の低下により電極付近では局所的に pH が増加しており、鉄族金属イオンはヒドロキシニウムイオン $\text{M}(\text{OH})^+$ (M=Fe, Co, Ni) を形成して電極に吸着する。その後、ヒドロキシニウムイオンは電子を受け取って還元されて金属原子となり、金属結晶を形成する。ゆえに、分極曲線 (図 2)

においては、Co の析出に伴って、陰極電位-0.80 V vs. Ag/AgCl 付近で、電流密度が増加したと考えられる。その後、陰極電位を貴な側にシフト(緑線)していくと、陰極電位-0.1 V vs. Ag/AgCl 付近でアノード電流が流れ始めることが確認された(赤線)。これは、陰極電位を Co/Co^{2+} の平衡電位 $E_{\text{Co}}^{\text{eq}}$ よりも貴にシフトしたことに伴って、金属 Co の再溶解が起こったためであると考えられる。本研究では、パルス電析時の陰極電位として、-0.90 V ~ -1.05 V vs. Ag/AgCl (Co リッチ層) および -0.40 V vs. Ag/AgCl (Cu) が選択された。

本研究では、Co/Cu 多層ナノワイヤーの積層構造を観察するために、電析後の AAO テンプレートのアルミナ部分を 5 N の水酸化ナトリウムを用いることで溶解させた。図 3 は、ナノチャネルの細孔径が (a)130 nm, (b) 95 nm, (c) 70 nm, (d) 50 nm および(e) 35 nm であるテンプレートを用いて作製された Co/Cu 多層ナノワイヤーの典型的な TEM 像である。TEM 像によれば、Co/Cu 多層ナノワイヤーの直径は、テンプレートの細孔径と同程度であった。また、ナノワイヤーの直径が 50 nm ~ 95 nm である場合には、比較的明瞭な Co/Cu の積層構造が確認された。一方で、細孔径が 130 nm と 35 nm である場合には明瞭な積層構造は観察されなかった。これらの結果から、テンプレートの細孔径は Co/Cu の積層構造に影響を及ぼすと考えられる。ナノチャネルの長さが細孔径よりも十分に大きい場合には、(細孔長さを固定した状態で) 細孔径を減少させると拡散係数は急激に減少する。ゆえに、細孔径が 35 nm である場合には、明瞭な Co/Cu 積層構造が形成しなかったと考えられる。一方で、細孔径が増加(100 nm 以上)した場合には、層直径の増加により欠陥が生じ、積層形成が妨げられた可能性がある。さらには、電子線の透過率が低下するために、積層構造の観察が困難になったと思われる。

図 4 (左列) は、Co/Cu 多層ナノワイヤー電析後の AAO テンプレートの磁気ヒステリシス曲線を示す。磁気測定は、室温下で行われた。また、積層界面に対して垂直方向(実線)と面内方向(点線)に外部磁場が印加された。それぞれのテンプレートを用いて作製されたサンプルに関して、界面に関して垂直方向と面内方向の磁気特性を比較した。その結果、界面に対して垂直方向に外部磁場を印加した場合に、より大きな保磁力および角形比を示した。

強磁性金属から構成される(非磁性層を含まない)ナノワイヤーは、ワイヤー軸方向に沿って容易磁化することが知られている。これは、円柱形状の強磁性金属の場合、ワイヤー軸に対して平行方向に反磁界係数

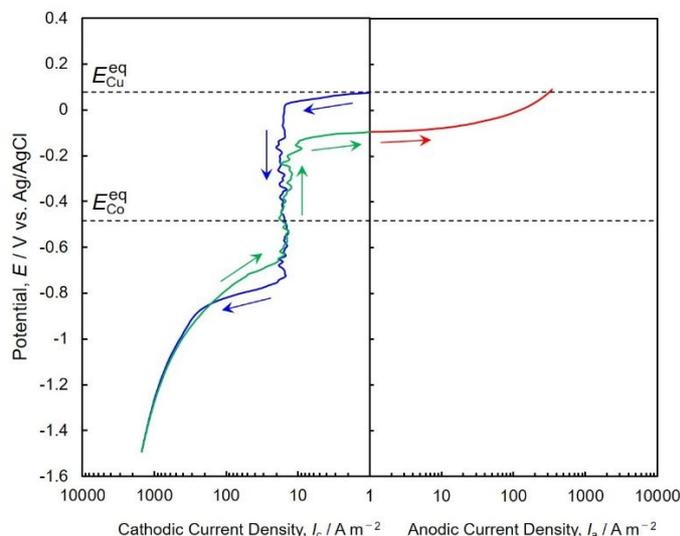


図 2. Cu^{2+} イオンおよび Co^{2+} イオンを含有する水溶液からの金属電析における CV 曲線

図 3 は、ナノチャネルの細孔径が (a)130 nm, (b) 95 nm, (c) 70 nm, (d) 50 nm および(e) 35 nm であるテンプレートを用いて作製された Co/Cu 多層ナノワイヤーの典型的な TEM 像である。TEM 像によれば、Co/Cu 多層ナノワイヤーの直径は、テンプレートの細孔径と同程度であった。また、ナノワイヤーの直径が 50 nm ~ 95 nm である場合には、比較的明瞭な Co/Cu の積層構造が確認された。一方で、細孔径が 130 nm と 35 nm である場合には明瞭な積層構造は観察されなかった。これらの結果から、テンプレートの細孔径は Co/Cu の積層構造に影響を及ぼすと考えられる。ナノチャネルの長さが細孔径よりも十分に大きい場合には、(細孔長さを固定した状態で) 細孔径を減少させると拡散係数は急激に減少する。ゆえに、細孔径が 35 nm である場合には、明瞭な Co/Cu 積層構造が形成しなかったと考えられる。一方で、細孔径が増加(100 nm 以上)した場合には、層直径の増加により欠陥が生じ、積層形成が妨げられた可能性がある。さらには、電子線の透過率が低下するために、積層構造の観察が困難になったと思われる。

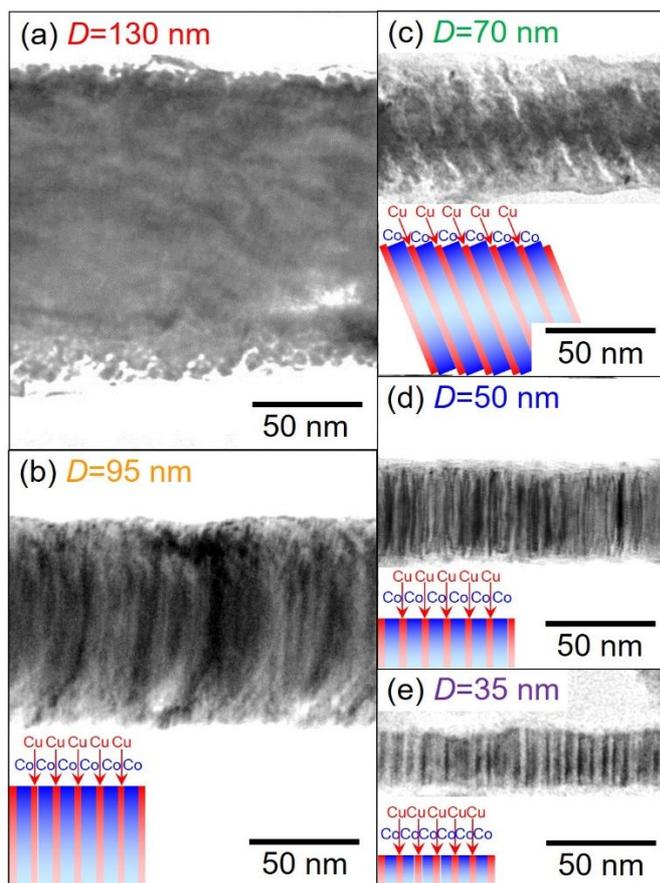


図 3. 細孔径の異なるテンプレートから合成された電析 Co/Cu 多層ナノワイヤーの TEM 像

が小さくなるという理論的予測と一致する。一方で、本研究では、強磁性層 (Co 層) 間に非磁性層 (Cu 層) が挿入された。非磁性層の厚みが減少 (Cu 層: 15 nm) すると、ワイヤー軸方向に容易磁化した。すなわち、非磁性層が薄い場合には、強磁性層間の双極子相互作用がナノワイヤーの磁氣的挙動を支配した。言い換えれば、非磁性層を含まない強磁性金属ナノワイヤーと同様の磁気異方性を有する。本研究では、図 4 (a), (b) に示すように、Co/Cu 多層ナノワイヤーの積層界面に対して垂直方向に磁場を印加した場合、ナノワイヤーの直径が減少するにつれて、保磁力と角形比は増加した。これは、細孔径 (ナノワイヤーの直径) の減少により、多磁区構造から単磁区構造へのシフトが生じたことに由来する。本研究では、細孔径 35 nm の AAO テンプレートを用いた場合に、保磁力と角形比はそれぞれ 1.24 kOe および 0.93 を達成した。

図 4 (右列) は、各細孔径のテンプレートを用いて作製された Co/Cu 多層ナノワイヤーの GMR 特性を示す。GMR 特性は室温で評価され、積層界面に対して垂直方向 (実線) と面内方向 (点線) に外部磁場が印加された。GMR 値は以下の式(2)を用いて算出された。

$$GMR(\%) = \frac{R_0 - R_H}{R_H} \times 100(\%) \quad (2)$$

ここで、 R_0 は外部磁場を印加する前の電気抵抗値、 R_H は磁場印加後の電気抵抗値を表す。

図 4 において、サンプル(a)は 130 nm の細孔径を有するテンプレートを用いて、陰極電位を -0.98 V (0.1 s) - 0.40V (1 s) vs. Ag/AgCl としして作製された。このサンプルの GMR 値は 6.5% であった。Co 層の電析時の陰極電位を -0.98 V よりも卑または貴な側にシフトさせると GMR 値は低下した。サンプル(b)は 95 nm の細孔径を有するテンプレートを用いて、陰極電位を -1.02 V (0.1 s) - 0.40V (1 s) vs. Ag/AgCl としして作製され、19.8% の GMR 値を有した。サンプル(c)は 70 nm の細孔径を有するテンプレートを用いて、陰極電位を -0.95 V (0.1 s) - 0.40V (1 s) vs. Ag/AgCl としして作製され、23.4% の GMR 値を有した。サンプル(d)は 50 nm の細孔径を有するテンプレートを用いて、陰極電位を -0.95 V (0.1 s) - 0.40V (1 s) vs. Ag/AgCl としして作製され、14.5% の GMR 値を有した。サンプル(e)は 35 nm の細孔径を有するテンプレートを用いて、陰極電位を -0.90 V (0.1 s) - 0.40V (1 s) vs. Ag/AgCl としして作製され、6.1% の GMR 値を有した。GMR 値はナノワイヤーの直径の増大に伴って増加し、直径 70 nm 付近で GMR 値は 20% を超越した。しかしながら、ナノワイヤーの直径が 95 nm よりも大きくなると GMR 値は低下した。図 3 に示したように、直径 50 nm ~ 95 nm の Co/Cu 多層ナノワイヤーでは、比較的明瞭な積層構造が観察された。GMR 効果は、外部磁場による非磁性層間の強磁性層の磁化の向きの変化が、伝導電子の移動 (散乱) に影響を及ぼすことによって発現する (スピバルブ効果) したがって、明瞭な Co と Cu 間に明瞭な積層界面が形成されたサンプルにおいては、GMR 値が増加したと考えられる。また、直径 50 nm のナノワイヤーでは、XRD プロファイルに基づく、Co-Cu 合金の生成により一部の積層界面の形成が阻害されたために、直径が 70 nm のものと比較すると、GMR 値が低下したと考察した。一方で、直径 95 nm 以上のナノワイヤーでは、層径の増加に伴って多磁区構造となり、GMR 値が低下したと思われる。

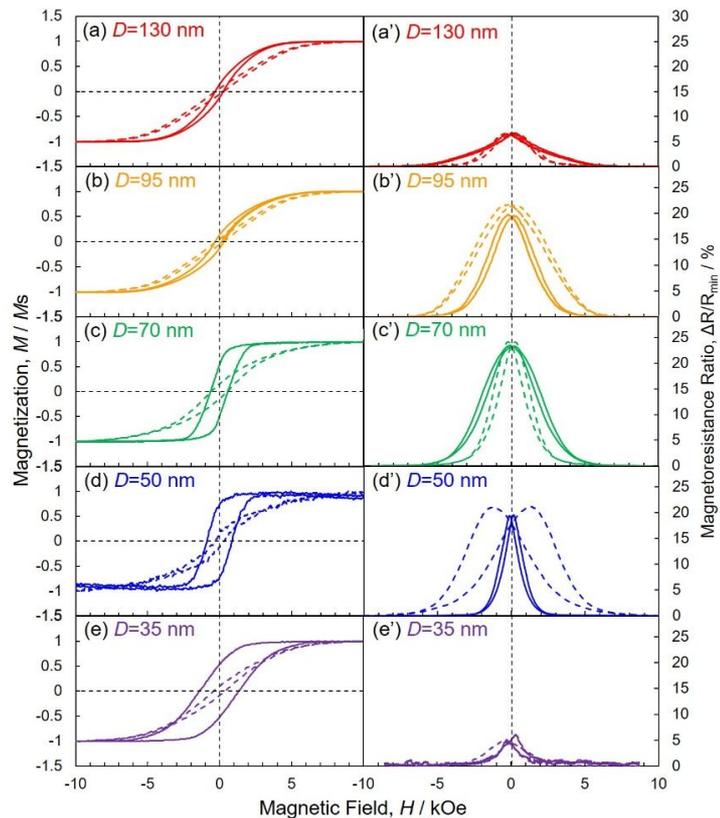


図 4. 細孔径の異なるテンプレートから合成された電析 Co/Cu 多層ナノワイヤーの磁化曲線および磁気抵抗曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Ohta Jun, Ohgai Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Post-Annealing Effects on the Structure and Semiconductor Performance of Nanocrystalline ZnTe Thin Films Electrodeposited from an Aqueous Solution Containing Citric Acid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 10632 ~ 10632
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app112210632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Saeki Ryusei, Ohgai Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Nanocrystalline structure and microhardness of cobalt-chromium alloys electrochemically synthesized using a metal hydroxide coprecipitation technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 026515 ~ 026515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1591/ac5275	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ide Tomomi, Hayashida Masamitsu, Ohgai Takeshi	4. 巻 32
2. 論文標題 Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in Co/Cu multilayered nanocylinders electrodeposited into anodized aluminum oxide nanochannels with ultra-large aspect ratio	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science: Materials in Electronics	6. 最初と最後の頁 10089 ~ 10100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10854-021-05667-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saeki Ryusei, Mizoguchi Saeko, Kamimura Himeyo, Hayashida Masamitsu, Ohgai Takeshi	4. 巻 529
2. 論文標題 CPP-GMR performance of electrodeposited metallic multilayered nanowires with a wide range of aspect ratios	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 167849 ~ 167849
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2021.167849	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mizoguchi Saeko, Hayashida Masamitsu, Ohgai Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Determination of Cobalt Spin-Diffusion Length in Co/Cu Multilayered Heterojunction Nanocylinders Based on Valet-Fert Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 218 ~ 218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano11010218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Saeki Ryusei, Ohgai Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Perpendicular magnetization performance of hcp-cobalt nanocylinder array films electrodeposited from an aqueous solution containing cobalt (II)-citrate complexes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research and Technology	6. 最初と最後の頁 8029 ~ 8040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmrt.2020.05.032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 C. Neetzel, H. Kamimura, M. Hayashida, T. Ohgai	4. 巻 15
2. 論文標題 Uniaxial Magnetization Reversal Process in Electrodeposited High-density Iron Nanowire Arrays with Ultra-large Aspect Ratio	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Results in Physics	6. 最初と最後の頁 102653
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rinp.2019.102653	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Saeki, T. Ohgai	4. 巻 15
2. 論文標題 Determination of Cathode Current Efficiency for Electrodeposition of Ferromagnetic Cobalt Nanowire Arrays in Nanochannels with Extremely Large Aspect Ratio	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Results in Physics	6. 最初と最後の頁 102658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rinp.2019.102658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Kamimura, M. Hayashida, T. Ohgai	4. 巻 10
2. 論文標題 CPP-GMR Performance of Electrochemically Synthesized Co/Cu Multilayered Nanowire Arrays with Extremely Large Aspect Ratio	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano10010005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryusei Saeki and Takeshi Ohgai	4. 巻 8
2. 論文標題 Effect of Growth Rate on the Crystal Orientation and Magnetization Performance of Cobalt Nanocrystal Arrays Electrodeposited from Aqueous Solution	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano8080566	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryusei Saeki and Takeshi Ohgai	4. 巻 11
2. 論文標題 Determination of Activation Overpotential during the Nucleation of Hcp-Cobalt Nanowires Synthesized by Potentio-Static Electrochemical Reduction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 2355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma11122355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryusei Saeki and Takeshi Ohgai	4. 巻 9
2. 論文標題 Determination of Crystal Growth Geometry Factors and Nucleation Site Densities of Electrodeposited Ferromagnetic Cobalt Nanowire Arrays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst9030142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda Tomoyuki, Saeki Ryusei, Hayashida Masamitsu, Ohgai Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Microhardness and heat-resistance performance of ferromagnetic cobalt-molybdenum nanocrystals electrodeposited from an aqueous solution containing citric acid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 046502 ~ 046502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1591/ac60e3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Saeki Ryusei, Yakita Taisei, Ohgai Takeshi	4. 巻 18
2. 論文標題 Magnetization and microhardness of iron-chromium alloy films electrodeposited from an aqueous solution containing N, N-dimethylformamide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research and Technology	6. 最初と最後の頁 2735 ~ 2744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmrt.2022.03.183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagao Kenta, Hayashida Masamitsu, Ohgai Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Effect of Ni addition on CPP-GMR response in electrodeposited Co-Ni/Cu multilayered nanocylinders with an ultra-large aspect ratio	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 075007 ~ 075007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1591/ac80a2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Saeki Ryusei, Doi Tomomi, Hayashida Masamitsu, Ohgai Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Microhardness and tensile strength of electrochemically synthesized nickel-cobalt binary alloy sheets exfoliated from a dumbbell-shaped titanium cathode	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 046504 ~ 046504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1591/acc7e2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計36件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ryusei Saeki, Takeshi Ohgai
2. 発表標題 Perpendicular Magnetization Performance of hcp-Cobalt Nanowire Arrays Electrodeposited from Co ²⁺ Citrate Complex Ions
3. 学会等名 INTERFINISH 2020 (20th World Congress) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 溝口沙恵子, 上村姫代, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 超高アスペクト比を有する電析Co/Cu多層ナノワイヤー配列素子の界面垂直通電型巨大磁気抵抗効果
3. 学会等名 表面技術協会第144回講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大貝猛
2. 発表標題 パルス電解法による強磁性金属多層ナノワイヤー配列素子の作製
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会九州支部秋季講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田知之, 大貝猛
2. 発表標題 電鍍剥離法により作製されたNi-Mo合金厚膜の機械的特性評価
3. 学会等名 応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 矢北大征, 大貝猛
2. 発表標題 DMF浴から電析された鉄-クロム系ステンレス合金の化学状態とその微小硬度特性
3. 学会等名 応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 大貝猛
2. 発表標題 グリシン錯体浴から電析された強磁性Co-Cr基アモルファス合金の作製とそのピッカース硬度特性
3. 学会等名 表面技術協会第145回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉野颯土, 佐伯龍聖, 大貝猛
2. 発表標題 非水溶媒浴を利用したCo-Cr系アモルファス合金膜の室温電解合成とその磁気特性
3. 学会等名 2020年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斧澤一成, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 タングステンを含むコバルト基アモルファス合金膜の室温電解合成
3. 学会等名 2020年度日本顕微鏡学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田知之, 斧澤一成, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 モリブデンを含有したコバルト基アモルファス超合金膜の室温電解合成
3. 学会等名 2020年度日本顕微鏡学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 溝口沙恵子, 上村姫代, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 電析Co/Cu多層ナノワイヤーの交互積層状態とそのCPP-GMR特性
3. 学会等名 2020年度日本顕微鏡学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 大貝猛
2. 発表標題 クエン酸錯体浴からの垂直磁化型コバルトナノシリンドラー配列素子の室温電解合成 ~Pourbaix Diagramによる計算と水溶液分光科学的アプローチ~
3. 学会等名 2020年度資源・素材学会九州支部春季例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 大貝猛
2. 発表標題 Pangarov理論に基づいた電析金属の結晶配向性遷移電位の決定
3. 学会等名 2019年度資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上村姫代, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 水溶液電解法による人工超格子型Co/Cu多層ナノワイヤー配列構造体の創製
3. 学会等名 2019年度資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 大貝猛
2. 発表標題 Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov理論に基づいた電析金属の結晶成長幾何学因子の決定
3. 学会等名 2019年度資源・素材学会九州支部春季例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝口沙恵子, 上村姫代, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 界面垂直磁化型Co/Cu多層ナノワイヤー配列素子の2軸スピバルブ効果
3. 学会等名 金属学会・鉄鋼協会・軽金属学会九州支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田森祐稀, 佐伯龍聖, 大貝猛
2. 発表標題 電位制御型パルス電解法による超高アスペクト比型コバルトナノワイヤー配列構造体の創製
3. 学会等名 金属学会・鉄鋼協会・軽金属学会九州支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 大貝猛
2. 発表標題 超高アスペクト比型ナノ細孔中への強磁性金属電析におけるFaraday効率の最適化
3. 学会等名 応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝口沙恵子、上村姫代、林田将充、大貝猛
2. 発表標題 電析ナノワイヤー配列構造体を利用した金属系磁気抵抗効果素子の作製と物性評価
3. 学会等名 応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田森祐稀、佐伯龍聖、大貝猛
2. 発表標題 電位制御型パルス電解法による膜面垂直磁化型強磁性金属ナノワイヤー集積膜の創製
3. 学会等名 応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 森村隆夫, 大貝 猛
2. 発表標題 高アスペクト比型Coナノワイヤー配列集積膜の電析とその垂直磁化特性
3. 学会等名 資源・素材学会九州支部春季例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上村 姫代, 林田 将充, 大貝 猛
2. 発表標題 スルーホール型ナノ細孔内に電析されたCo/Cu多層ナノワイヤーのCPP-GMR特性
3. 学会等名 資源・素材学会九州支部春季例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐伯 龍聖, 森村 隆夫, 大貝 猛
2. 発表標題 (002)優先配向型hcp-Coナノワイヤー配列集積膜の垂直磁化特性
3. 学会等名 金属学会・鉄鋼協会・軽金属学会九州支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上村 姫代, 林田 将充, 大貝 猛
2. 発表標題 電析Co/Cu多層ナノワイヤーの積層界面垂直通電型巨大磁気抵抗特性
3. 学会等名 金属学会・鉄鋼協会・軽金属学会九州支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐伯 龍聖, 森村 隆夫, 大貝 猛
2. 発表標題 Pangarov理論に基づいた電析Coナノワイヤー配列構造体の結晶配向性遷移電位の決定
3. 学会等名 表面技術協会第138回講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上村 姫代, 林田 将充, 大貝 猛
2. 発表標題 スルーホール型ナノ細孔中に電析されたCo/Cu多層ナノワイヤー配列素子のCPP-GMR特性
3. 学会等名 表面技術協会第138回講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹下 航太郎, 佐伯 龍聖, 大貝 猛
2. 発表標題 可溶性陽極に低炭素鋼を用いて電解析出された超微細組織を有するFe-Ni合金薄板の引張強度特性
3. 学会等名 資源・素材学会九州支部春季例会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯 龍聖, 土井 朋美, 大貝 猛
2. 発表標題 室温電解合成された超微結晶組織を有するNi-Co耐熱合金薄板の引張強度特性
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宍 佑夢, 佐伯 龍聖, 林田 将充, 大貝 猛
2. 発表標題 超高アスペクト比型ニッケルナノワイヤーの室温電解合成とその一軸磁気異方性
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河上怜奈, 佐伯龍聖, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 高電流密度電鍍・剥離法により作製された純銅製電子部品の機械的特性評価
3. 学会等名 応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鶴田諒, 佐伯龍聖, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 電鍍剥離法により作製された Ni-Mo合金薄板の機械的特性に及ぼす熱処理の影響
3. 学会等名 応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大貝猛
2. 発表標題 電析法による金属多層ナノワイヤーの作製とその磁気抵抗効果測定
3. 学会等名 2022年関西表面技術シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹下航太郎, 佐伯龍聖, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 可溶性アノードに鉄スクラップ材を利用して電解析出された鉄基 2 相合金薄板の機械的特性
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬淵史彰, 佐伯龍聖, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 塩化物系水溶液から電析されたニッケル薄板の機械的特性評価
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田凌輔, 佐伯龍聖, 大貝猛
2. 発表標題 電鍍・剥離法によるダンベル型引張試験片の作製とその機械的特性評価
3. 学会等名 表面技術協会第146回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宍佑夢, 佐伯龍聖, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 超高アスペクト比型ニッケルナノワイヤーの室温電解合成とその一軸磁気異方性
3. 学会等名 表面技術協会第146回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯龍聖, 土井朋美, 林田将充, 大貝猛
2. 発表標題 電鍍・剥離法により作製された超微結晶組織を有する固溶強化型Ni-Co合金薄板の引張強度特性
3. 学会等名 表面技術協会第147回講演大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

長崎大学工学部・工学研究科 材料組織物性学研究室 発表論文リスト
<http://www.cms.nagasaki-u.ac.jp/lab/soshiki/articles.html>
長崎大学工学部・工学研究科 材料組織物性学研究室 受賞者リスト
<http://www.cms.nagasaki-u.ac.jp/lab/soshiki/awards.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------