98　磁気研磨法の医用材料（ステント）への展開

吉原　佐知雄

【目的】現代の金属製品の使用範囲は幅広く、加工しやすさ、強度といった観点から様々な用途において重要な役割を担っている。このような金属製品において、表面仕上げ工程は、表面の欠陥を低減かつ排除し、耐食性と疲労寿命を向上させたデバイスを生産するために重要な工程である。製造工程では、酸化皮膜などの瑕疵を生じることがあり、最終工程である研磨により除去される。表面処理の業界標準の研磨法は電解研磨である。電解研磨では、鋭利な部分ほど電流密度は高くなり、研磨前の粗さや欠陥の影響を受ける。また、工作物が複雑形状である場合、電流密度が不均一になるという難点もある。そこで、研磨工程に磁気研磨法の適用を検討した。磁気研磨では、機械的研磨であるが、磁性砥粒という小さな粒子を用いるため、高精度な精密加工を可能とし、複雑形状にも適用可能と考えた。現在、金属製品の仕上げ工程には平滑性向上、耐食性付与のため電解研磨が用いられる。しかし、電解研磨では、酸化被膜の除去工程が必要であること、電解液の条件調節が煩雑であるという問題点がある。そこで本研究では、磁気研磨で医用目的の金属材料を仕上げることができないか検討した。本研究では、医用材料（ステント）への展開として、チタンニッケル製ワイヤーの製造工程で生じる酸化被膜を磁気研磨による除去や表面平滑化を試みた。

【方法】磁性砥粒には Fe-Al_2O_3からなる粒子 KMX-80（東洋研磨工業）を用いた。研磨液には水とヤシ脂肪酸ジエタノールアミドを 1 : 1 で混合したものを用いた。研磨に用いた試料は線径 0.75 mm、直径 6 mm、長さ 17 mm のコイル状である。Ni-Ti の形状記憶合金であり、引き延ばしても、50℃まで昇温すると元の形状に戻る性質がある。このため、磁気研磨の際に試料を引き延ばし内面となる部分を研磨し、元の形状に戻すということが可能である。以下に磁気研磨装置を用いた研磨と、既存の装置を元に磁気研磨装置の改良を試みた研磨について記す。研磨後の工程として、研磨液、砥粒除去のため水洗、エアブローを行った。表面観察には、走査型電子顕微鏡（SEM）、元素分析にエネルギー分散型 X 線分光法（EDX）、表面形態や粗さ評価に原子間力顕微鏡（AFM）を用いた。磁気研磨装置（A）を用いた研磨：試料を 17 cm まで引き延ばし、中央に穴が開いたステンレスステージ上に設置、マスキングテープで固定した。ステージを磁気研磨装置に設置し、磁極に研磨液を塗布した KMX-80 砥粒を保持、磁極を近づけ回転させることで研磨を行った。磁気研磨装置（B）を用いた研磨：同様に試料を 17 cm まで引き延ばした。伸ばした試料は、アルミ製の留め具を用いて両端をモーター（オリエンタルモーター製、AZM14AK）に接続した。モーターは、モーター間の距離が可変なステージ（MiSUMi 製、PCKUED14-370-A-U-DPR-SCW）に設置された。磁極に研磨液を塗布した KMX-80 砥粒を保持、磁極を近づけた。

【結果】研磨前の試料には、一方向に並んだ筋が確認された。研磨後の試料では、どちらの方法でも筋が取り除かれ、研磨前に比べて平滑らしい表面が得られた。磁気研磨装置（A）の方法で研磨した試料では縦筋模様が残っている箇所が存在しており、磁気研磨による加工力が偏在していることが示されている。磁気研磨装置（A）では、磁極が上下方向にしか存在しなかったため、側面が磨けていない様子が見られたが、改良した装置（B）では、試料を回転させることで全体の研磨が可能となり酸素含有量の減少にも繋がった。AFM 測定結果を下表に示す。改良後の装置（B）の研磨の場合、試料の回転が研磨の駆動力になるため、磁極間中心の磁束密度が磁極付近に比べて弱くなるという影響が軽減され均一に磨けるため、Ra 値が他の試料に対して小さいと考えられる。

研磨前と研磨後の AFM 測定結果

	研磨前	研磨後（A）	研磨後（B）
Ra[nm]	201	244	86.3

Ra：平均粗さ、研磨後

（A）：装置 A を用いた場合、研磨後

（B）：装置 B を用いた場合

98. 磁気研磨法の医用材料（ステント）への展開

吉原　佐知雄

宇都宮大学 大学院地域創生科学研究科

Key words：磁気研磨，ステント，Ni-Ti 合金，磁性砥粒

緒　言

現代の金属製品の使用範囲は幅広く、加工しやすさ、強度といった観点から様々な用途において重要な役割を担っている。このような金属製品において、表面仕上げ工程は、表面の欠陥を低減かつ排除し、耐食性と疲労寿命を向上させたデバイスを生産するために重要な工程である［1］。

製造工程では、酸化皮膜などの瑕疵を生じることがあり、最終工程である研磨により除去される。表面処理の業界標準の研磨法は電解研磨である。電解研磨では、鋭利な部分ほど電流密度は高くなり、研磨前の粗さや欠陥の影響を受ける。また、工作物が複雑形状である場合、電流密度が不均一になるという難点もある［2］。

我々はすでに、王冠状の形状記憶合金よりなる工作物の磁気研磨について報告した［3］。本報告ではコイル状の形状記憶合金の研磨工程に磁気研磨法の適用を検討した。磁気研磨では、機械的研磨であるが、磁性砥粒という小さな粒子を用いるため、高精度な精密加工を可能とし［4］、複雑形状にも適用可能と考えた［4～7］。

方　法

コイル状形状：試料は非磁性体であり、線径 0.75 mm、直径 6 mm、長さ 17 mm の円柱刑状である．形状記憶合金であり、引き延ばしても、50℃まで昇温すると元の形状に戻る性質がある。このため、磁気研磨の際に試料を引き延ばし内面となる部分を研磨し、元の形状に戻すということが可能である。試料を 17 cm まで引き延ばした。伸ばした試料は、アルミ製の留め具を用いて両端をモーター（オリエンタルモーター製、AZM14AK）に接続した。モーターは、モーター間の距離が可変なステージ（MiSUMi 製、PCKUED14-370-A-U-DPR-SCW）に設置された。模式図を図 1 に示す。磁性砥粒には Fe-Al_2O_3からなる粒子 KMX-80（東洋研磨材工業）を用いた。また、研磨液は水とヤシ脂肪酸ジエタノールアミドを 1：1 で混合した。磁極に研磨液を塗布した KMX-80 砥粒を保持、磁極を近づけた。実験条件として、試料のみを回転させたもの、試料と磁極を回転させたものの 2 種類を行った。実験条件を表 1 に示す。試料と接続したモーターは片方のみ回転させ、上下方向の磁極に関しては、互いに逆方向になるように回転させた。

試料の表面観察には走査電子顕微鏡（SEM、日立製作所製 S-4500）、元素分析にはエネルギー分散型 X 線分析（EDX；堀場製作所製、EMAX-5770）、表面粗さの評価には原子間力顕微鏡（AFM；島津製作所製、SPM-9500）を用いた。

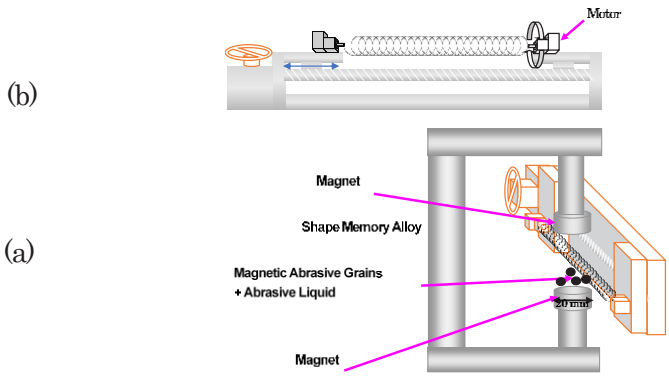


図 1. 磁気研磨装置の模式図

(b) は (a) のパーツを矢印方向から見た拡大図

表 1. 磁気研磨条件

Condition 1	
Rotation Speed (Specimen)	1000 rpm
Rotation Speed (Magnet)	-
Specimen Length	17 cm
Distance between Magnet and Specimen	2 mm
Polishing Period	30 min
Amount of Magnetic Abrasive Grains	2 g
Amount of Abrasive Liquid	1 mL
Abrasive Liquid	Diethanolamide+Water (1:1)
Magnetic Abrasive Grains	KMX-80
Condition 2	
Rotation Speed (Specimen)	6 rpm
Rotation Speed (Magnet)	1000 rpm
Specimen Length	17 cm
Distance between Magnet and Specimen	2 mm
Polishing Period	30 min
Amount of Magnetic Abrasive Grains	2 g
Amount of Abrasive Liquid	1 mL
Abrasive Liquid	Diethanolamide+Water (1:1)
Magnetic Abrasive Grains	KMX-80

Condition 1：試料回転、Condition 2：試料と磁極回転。

結果および考察

コイル状形状：SEM 像を図 2 に示す。研磨後では、研磨前にあった縦筋模様が消失していることが確認できる。また、研磨前と比べて平滑な表面を有しており、表面形状も曲面が維持されている。試料のみを回転させたものと、試料と磁極を回転させたものでは同様の表面を有していた。表面を高倍率で観察すると、研磨前に見られなかった欠陥が生じており、表面から脱落した部位がある。これは、無理な力がワークにかかっている、もしくは、加工時の熱による無理な膨張、残留応力などが考えられる。EDX 測定結果を図 3 に示す。EDX 分析の結果から、研磨前に比べ、試料のみ回転では酸素含有量が低下した。試料と磁極を回転させた条件では、小さい酸素含有量の低下であった。このことから、何れの条件でも酸化被膜が研磨により除去されていると考えられる。酸素除去能力に差異がある理由として、磁極間距離が考えられる。試料と磁極を回転する条件では、磁極間の距離が近すぎる。よって、磁石同士の引力により、磁極のモーターを回転させることができず、距離を遠ざけざるを得ない。このため、砥粒密度と磁束密度が大きくなる試料のみ回転での条件で、砥粒との衝突回数が多くなり研磨能力が大きくなると考えられる。それぞれの条件の AFM から得られたパラメーターを表 2 に示す。AFM 測定結果から、どちらの条件での研磨でも、算術平均粗さ Ra の大幅な改善が見られた。AFM 像からは、砥粒によるものと思われる小さい凹凸から成る切削後が見られたが、研磨前と比べて、滑らかな表面を有していた。試料を高速回転させる条件では、試料の回転が研磨の駆動力になるため、磁極間中心の磁束密度が磁極付近に比べて弱くなるという影響が軽減され均一に磨けるため、Ra 値が他の試料に対して小さいと考えられる。

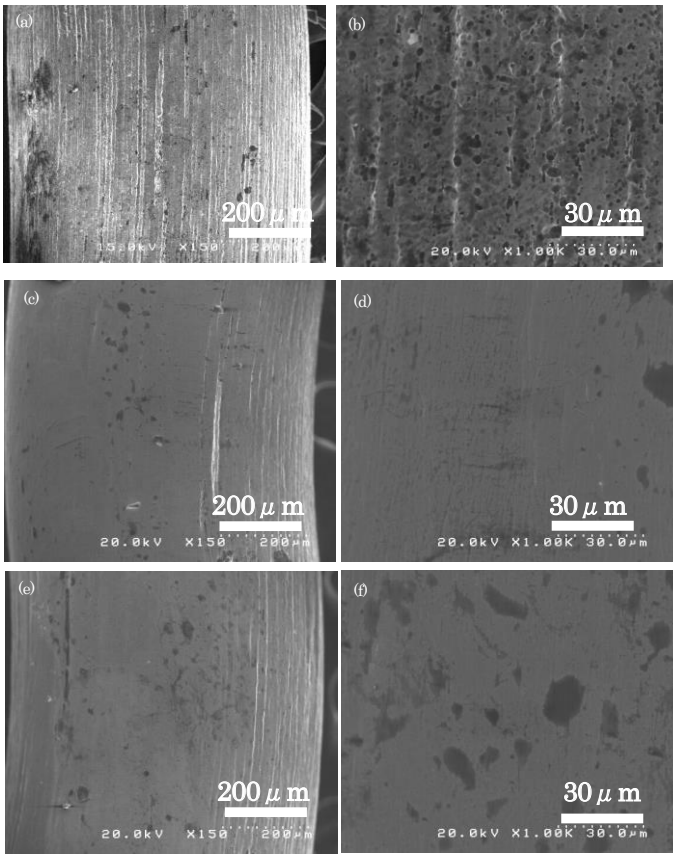


図 2. SEM 画像

(a)、(b) 研磨前の SEM 画像。

(c)、(d) 試料回転させた場合の磁気研磨後の SEM 画像。

(e)、(f) 磁石と磁極回転させた場合の磁気研磨後の SEM 画像。

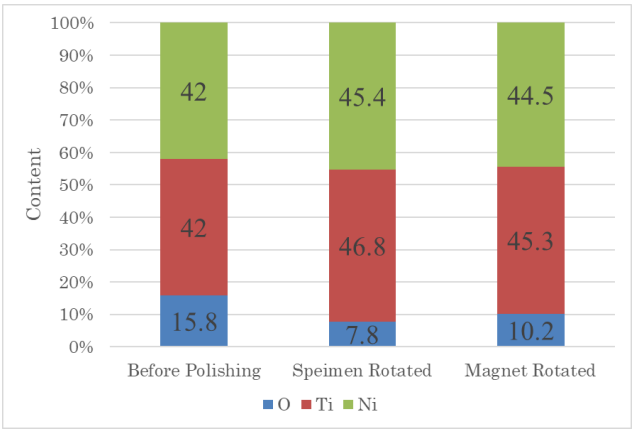


図 3. 研磨前後の試料に対する EDX 測定による元素組成結果の比較
Before Polishing：研磨前、Specimen Rotated：試料回転、Magnet Rotated：試料と磁極回転。青：酸素、赤：チタン、緑：ニッケル。

表 2. 研磨前後の AFM による粗さ評価

	Before	Specimen Rotated	Magnet Rotated
Ra [nm]	64.63	88.41	105.8
Ry [μm]	0.720	0.837	0.951
Rz [μm]	0.303	0.368	0.463
Rms [nm]	85.4	107	141.9
Rp [nm]	247.9	359.2	425.0
Rv [μm]	0.472	0.478	0.526
Surface Area [μm^2]	921.5	927.8	915.8

Ra：平均粗さ、Ry：最大粗さ、Rz：10 点平均粗さ、Rms：根二乗平均粗さ
Rp：最大山高さ、Rv：最大谷深さ及び Surface Area：実表面積。

結　論

Ni-Ti 製金属製品の仕上げ工程において、磁気研磨法を適用することで複雑形状でも酸化膜除去が可能であることを確認した。しかし、十分に酸化膜の除去ができていない箇所もあり今後、改善する予定である。

文　献

1) 塙隆夫、ステント用金属材料; 人工臓器, 35(1), 193-196 (2006) DOI https://doi.org/10.11392/jsao1972.35.193
2) 田島榮、電解研磨の研究（第 1 報）9 種の金属の電解研磨; 電氣化學, 12, 221-226 (1944) DOIhttps://doi.org/10.5796/denka.12.221
3) 与世田泰斗 中澤育子 吉原 佐知雄、複雑形状工作物の磁気研磨による表面仕上げに関する研究、表面技術, 72(1), 57－58（2021）DOIhttps://doi.org/10.4139/sfj.72.57

4) 中尾　修、磁気研磨の原理と最新応用; 表面技術, 57（11）, 764-767 (2006) DOIhttps://doi.org/10.4139/sfj.57.76
5) 宮崎修一、形状記憶合金の基礎研究と材料開発； Materia, 53(5), 197-208 (2014) DOIhttps://doi.org/10.2320/materia.53.197
6) 夏目勝之, 進村武男, 山口ひとみ、磁気研磨加工における研磨抵抗と砥粒軌跡の観察; 砥粒加工学会誌, 49(4), 213-218 (2005) DOI https://doi.org/10.11420/jsat.49.213
7) 森敏彦, 広田健治, 千田進幸, 川嶋義人、磁気研磨機構に関する力学的考察; 日本機械学会論文集（C編）, 68(671), 2157-2162 (2002-7) DOIhttps://doi.org/10.1299/kikaic.68.2157