球芯振り ELID 研削による 金属製人工股関節ライナーの鏡面加工*

水谷正義** 小谷拓嗣*** 成瀬哲也† 小茂鳥 潤†† 片平和俊**
大森 整** 住谷健二††† 和佐宗樹††† 藤田正弘††† 長谷川 正†††

Mirror Surface Finishing of Hemispherical Inside Surface by Newly Developed ELID Grinding System

Masayoshi MIZUTANI, Hiroshi KOTANI, Tetsuya NARUSE, Jun KOMOTORI, Kazutoshi KATAHIRA, Hitoshi OHMORI
Kenji SUMIYA, Motoki WASA, Masahiro FUJITA and Tadashi HASEGAWA

In this study, in order to apply electrolytic in-process dressing (ELID) grinding for surface finishing process of the sliding parts of metal on metal (MOM) artificial hip joints, a new grinding system to grind the inside surface of a hemispherical cup was developed. In this system, the workpiece was pressurized against the centre of the ball shaped grinding wheel with an oscillating pressure pin during the processing. The shape and the radius of the ball shaped grinding wheel were adjusted by using different size abrasive grains. Hemispherical cup-shaped samples of Cobalt-Chromium (Co-Cr) alloy were ground by this grinding system and their surface smoothness was improved. In addition, the roundness of the specimens was the same as or superior to that of the commercially available sliding parts. This result suggests that this grinding system is applicable as a surface finishing process of the sliding parts of MOM artificial hip joints.

Key words: ELID grinding, biomaterial, Co-Cr alloy, artificial hip joint, metal on metal (MOM)

1. 緒 言

高齢者の慢性関節疾患をはじめとした関節障害の治療には、最近人工関節置換術が広く利用されている。その中でも人工股関節の置換術はその症例数も多く、年々増加の一途をたどっている。人工股関節を長期間安全に使用するためには、寛骨臼側に固定されるライナーと大腿骨側の骨頭との間の摺動特性が極めて重要である。現在、人工股関節の摺動面には、金属製の骨頭と超高分子量ポリエチレン (UHMWPE) 製のライナーを組み合わせた Metal on polyethylene (MOP) 型人工股関節が広く実用化されている。しかしこの組み合わせの場合、UHMWPE 製のライナーが優先的に摩耗し、体内に大量の摩耗粉が蓄積される可能性が指摘されており、長期間の使用を目指した場合には問題点が残されている^{1)~3)}。

人工股関節のさらなる耐久性の向上と信頼性確保のための方策として、骨頭とライナーのいずれも Co-Cr 合金で作製した、いわゆる Metal on metal (MOM) 人工股関節の利用が注目をされている^{4)~5)}。この場合、摺動面では理想的な流体膜潤滑が期待できるため、長期間安定的に低摩擦、低摩耗を実現できる可能性がある⁶⁾。ただし現時点では、難削材である Co-Cr 合金に対して、理想的な流体膜潤滑を可能とするクリアランス精度を達成することは困難とされている。また長期間使用時における金属イオンの溶出も懸念されており、この点も解決すべき課題として残されている。

著者らはこれらの問題点を解決し、体内で長期間安定的に使用可能な MOM 人工股関節を作製することを目的として、金属製のライナーおよび骨頭表面の高精度加工と、金属イオンの溶出を抑制する表面改質を同時に実現することが可能な技術の開発を行うこととした。

具体的には、球芯振りによる加工方式に、ELID 研削技術を援用した加工方法を開発する。球芯振りによる加工方式は、レンズなどの光学部品の加工に広く実用されており、凹・凸球面を低コストで効率的に作製するのに適している。これに ELID 研削による表面改質効果^{7)~11)}を加えることにより、加工と同時に被加工物の耐食性、耐摩耗性を向上させ、金属イオンの溶出を抑制することが可能であると考えられている。

本研究はその第一段階であり、過半球（半球以上の球面）形状を有する金属製人工股関節ライナーを、簡便なプロセスで効率的に研削を行うプロセスを構築し、それにより研削を施した試験片の形状評価を行った。

2. 球芯振り ELID 研削システムの構築

本研究では、オスカー式研磨法を参考として、金属製人工股関節ライナーの鏡面研削を行うための新たな研削システムを構築した。オスカー式研磨法は、図 1 の模式図に示すように、曲面の研磨皿にカンザシを介して試験片を押し付け、ワークを研磨皿の直径方向に円弧揺動させながら研磨を行う手法である。この手法では、研磨皿の形状をワークに正確に転写することが可能となる^{12) 13)}。さらに、同様の原理で球芯振り方式により加工を行うことにより、過半球形状の作製も可能となる。ただしこの方法は、通常、遊離砥粒による研磨で利用されるものであり、固定砥粒による砥石を用いた場合には目詰まりなどの問題が懸念される。

* 原稿受付 平成 23 年 3 月 31 日

** 正 会 員 理化学研究所 (埼玉県和光市広沢 2-1)

*** 学生会員 慶應義塾大学大学院 (横浜市港北区日吉 3-14-1)

† 正 会 員 テクノアカデミー郡山職業能力開発短期大学校 (福島県郡山市上野山 5 番地)

†† 正 会 員 慶應義塾大学 (横浜市港北区日吉 3-14-1)

††† 瑞穂医科工業株式会社 (文京区本郷 3-30-13)

Fig. 1 Schematic illustration of Oscar polishing

Fig. 2 A newly developed grinding system

(a) Oscillation angle around 0°

(b) Oscillation angle around 0°

Fig. 3 View of the machining process

そのため、研削に利用された例は著者らの調べた範囲では見当たらない。本研究では、前述の球芯振り方式の加工と ELID 研削法を組み合わせることにより、遊離砥粒による研磨と同等以上の鏡面加工と表面改質の効果を同時に達成可能なシステムの構築を試みた。

図 2 および図 3 に構築したシステムの模式図と、同システムによる加工の様子を示す。このシステムは、揺動テー

Fig. 4 Schematic illustration of workpiece holder (vice)

Fig. 5 Schematic illustration of electrolytic reaction between grinding wheel and electrode

ブル (1)、回転軸 (2)、球状砥石 (3)、ワークホルダ (4)、カンザシ (5) から構成されており、回転、揺動を行う球状砥石の中心に対し、カンザシを用いて試験片を加圧することにより定圧方式の加工ができる。

また、本研究では ELID 法を導入するため、ワークホルダに電極を設置した。図 4、5 にそれぞれ作製したワークホルダの模式図とそれによる砥石の電解機構を示す。図 4 に示すように、ワークをホルダに入れ込み、リング形状に加工された電極で固定する。その際、ワークと電極は絶縁されている。砥石の電解ドレッシングは、図 5 に示すように、ワークホルダに設置された電極と砥石の間に設けられた間隙において行われる。これにより、ELID 研削の特長であるインプロセスドレッシングが可能となり、砥石の目詰まりを防ぎ、高効率かつ高精度での加工が可能となる。また同時に、ELID 研削による表面改質の効果も付与することができる。

3. 加工方法

本研究で構築した球芯振り ELID 研削システムでは、前述の通り、加工の際に球状砥石の形状がワークに転写されるため、球状砥石の寸法精度がとくに重要となる。そこで、図 6 に示すフローチャートに従い、高い寸法精度を有する球状砥石の作製と、それによる金属製人工股関節ライナーの鏡面加工を試みた。具体的には、ステップ 1 では、球状砥石の寸法調整、形状調整（ツルーイング）を行うための鋳鉄製定盤の作製を行った。ステップ 2 では、作製した定盤を用いて球状砥石のツルーイングを行った。これらの手

順を繰り返すことにより、球状砥石の寸法と形状を調整した後、ライナーの研削加工を行った。以下、ステップ 1, 2 について詳しく説明する。

ステップ 1: ツルーイング用 鋳鉄制定盤の作製

ステップ 1 としてツルーイング用の鋳鉄制定盤の作製を行った。図 7 に定盤の寸法および形状を示す。鋳鉄は適当な硬さを有することに加え、表面に存在する鑄造欠陥が遊離砥粒を把持する役割を担うため、ツルーイングの際に定盤の形状変化や、遊離砥粒の飛散を抑制できる。図 8 に作製した定盤の外観を示す。なおツルーイング中、遊離砥粒を定盤内に残留しやすくさせるため、定盤の内表面には図中に示すような溝を作製した。

次に、先端部に SR18mm の曲率を有するシャンク (図 9) を作製し、前述した定盤の形状補正を行った。なお、先端部には直径の寸法差 $\pm 10\mu\text{m}$ 以内、真球度 $4\mu\text{m}$ 以内、ロットの直径の相互差 $8\mu\text{m}$ 以内の寸法精度を有する $\phi 36.0\text{mm}$ SUJ2 鋼球を用いた。

Fig. 6 Flowchart illustration the grinding process

Fig. 7 Shape of the surface plate

Fig. 8 View of the surface plate for truing of grinding wheel

Fig. 9 View of the steel ball for truing of surface plate

作製したシャンクを用いた定盤の形状補正の様子を図 10 に示す。同図(a)は加工の様子、(b)は定盤と鋼球との間での加工部位を拡大した様子を模式的に示している。同図に示す通り、定盤の形状補正は、揺動、回転を行う鋼球の中心に対し、カンザシを用いて定盤を加圧し、遊離砥粒とともに摺り合わせることで行った (球芯振り研磨)。形状補正の工程中、定盤と鋼球の間には常に遊離砥粒が存在する (図 10 (b))。SUJ2 鋼球は鋳鉄制定盤よりも高い硬さを有するため、この工程において研磨による除去加工は定盤に対して優先的に行なわれる。そのため、形状補正後の定盤の曲率半径 R_t は、鋼球の半径 R_b と遊離砥粒の粒径の和になる。

ステップ 2: 球状砥石のツルーイング

ステップ 1 で作製した定盤により球状砥石をツルーイングする様子を図 11 に示す。同図(a)は加工の様子、(b)は球状砥石と定盤との間での加工部位を拡大した様子を模式的に示している。なお、砥石には ELID 研削に対応するメタルボンド (銅レジンボンド) 砥石を用いた。砥石のツルーイングも、定盤の形状補正を行った場合 (図 10) と同様、遊離砥粒を利用することにより行った。この場合、砥石のボンド材である銅レジンも鋳鉄製の定盤に比べて軟質であるため、研磨による除去加工は球状砥石に対して優先的に行なわれる。その結果、ツルーイング後の球状砥石の半径 R_g は、定盤の曲率半径 R_t から遊離砥粒の粒径を除いたものになる。

以上述べた方法により、遊離砥粒を用いたツルーイングを行った結果を図 12 に示す。同図は、SiC#320 (ステップ 1)

Fig. 10 Schematic illustration of the making concave spherical surface plate

と SiC#1500 (ステップ 2) の遊離砥粒を用いて繰返しツル—イングを行い、その際の砥石径の変化を測定した結果である。同図より、これらのステップを 3 回繰返すことにより、本研究で目標とした形状 ($SR=18.05\text{mm}$) を有する球状砥石が作製できていることがわかる。

4. 球芯振り ELID 研削システムによる金属製人工股関節ライナーの加工

前章までで構築した研削システムを用いて、金属製人工股関節ライナーの研削加工を行った。その際、被加工材としては ASTM F1537 に規定される高炭素 Co-Cr-Mo 合金を用いた。同材を切削により凹半球面形状に粗加工した後、表 1 に示す条件で ELID 研削を行った。図 13 に加工前後における試験片の外観を示す。同図より球芯振り ELID 研削を施した試験片は、全面が鏡面状になっていることがわかる。

次に、同システムにより加工したライナーの形状精度の測定を行った。具体的には、試験片内部の縁から 3mm, 6mm, 9mm の円周上において、それぞれ 8 点の座標を計測し、それに頂点の 1 点を加えた 25 点における座標の計測結果から試験片の真球度を求めた。また、縁から 3mm 内側の円周において真円度の測定も行った。図 14 にその結果を示す。同

Fig. 11 Schematic illustration of the shape and radius adjustment of the ball shaped grinding wheel

Fig. 12 Decreasing behaviour of the radius of the grinder during the radius adjustment process

図より、切削仕上げのみの試験片と比較して、研削後の試験片では真球度および真円度ともに著しく向上していることがわかる。また、本研究で構築した研削システムを用いて加工した試験片は、市販の人工股関節摺動部と比較した場合でもその値は同程度、あるいはそれ以上の高い真球度および真円度を有することがわかる。このことは、本研究で開発した研削システムは、寸法・形状精度の観点では十分な能力を有することを示すものである。

球芯振り ELID 研削により仕上げ加工を施した試験片の表面性状について調べるため、3 次元構造解析顕微鏡による粗さ測定および、3 次元表面形状の観察を行った。その際、凹球面形状では粗さ測定、表面観察が困難であることから、測定は切断した試験片を用いて行った。

図 15 に表面粗さの測定結果を示す。同図より、球芯振り ELID 研削により仕上げ加工を施した試験片の表面粗さの値は $Ra=5\text{nm}$ 以下となっており、同図中に破線で示した市販

Table 1 ELID grinding condition

Grinding wheel	Metal resin bonded diamond wheel: #2000
Electrical condition	Open voltage (E_0): 90V Electrolytic current (A_0): 5A ($3.47 \times 10^4 \text{A/m}^2$)
Grinding condition	wheel rotation speed: 1500rpm (2.83m/s)
Oscillating angle	$0^\circ \sim 55^\circ$ (initial angle 27.5°)
Processing pressure	0.08MPa

Fig. 13 Appearance of the ELID ground surface

Fig. 14 Evaluation of the sphericity and roundness

Fig. 15 Result of surface roughness measurement

の人工股関節摺動部の表面粗さの値 ($R_a=10\text{nm}$) と比較しても低い値を示していることがわかる。このことは、本研究で構築したシステムにより、寸法精度の向上のみならず、鏡面加工も可能であることを示すものである。

また、図 16 に、3 次元表面形状の観察結果を示す。同図より、試験片に存在する研削痕は一定の方向を有さず、異方性が無いことがわかる。これは、球芯振り研削の最終工程において、試験片の研削が全表面で均一に行われたことを示すものである。

最後に、これまでの結果に基づき、提案した研削手法の特徴をまとめる。まず、本研究で構築した研削システムは、加工初期には、ワークと砥石の形状の異なる領域が優先的に除去され、形状精度を向上させることが可能となる。また、加工の最終工程では、ワークと砥石の形状が一致し、試験片全体が均一に加工されることにより鏡面加工が可能となる。

以上のことから、本研究で開発した研削システムは、金属製人工股関節ライナーの仕上げ加工法として十分な能力を有するものと考えらる。このことは、ELID 研削を人工股関節摺動部の仕上げ加工に適用できる可能性を示すものである。

5. 結 言

本研究では、ELID 研削を MOM 人工股関節摺動部の仕上げ加工に適用するため、金属製人工股関節ライナーの加工を可能とする新たな研削システムの構築を試みた。また、このシステムを用いて凹球面の加工を行い、その真球度、真円度の測定および加工面の観察を行うことにより加工プロセスの妥当性について検討、考察を加えた。以下に得られた知見を示す。

- (1) 球芯振り方式を採用した新たな ELID 研削システムを構築し、Co-Cr 合金製試験片の加工を行った結果、過半球形状を有するライナーの鏡面加工が可能であることを示した。また、このシステムにより仕上げ加工を施した試験片は、市販の人工股関節ライナーと比較して優れた真球度および真円度を有することを示した。
- (2) 構築したシステムを用いて仕上げ加工を施した試験片の表面粗さ R_a は 5nm 以下であり、市販の人工股関節ソケットと比較しても同等以下の表面粗さを達成可

Fig. 16 Dimensional surface profile of ELID ground sample

能であることが明らかとなった。また、試験片の表面観察を行った結果、被加工面の研削痕は等方的な様相を呈しており、砥石と試験片の形状が一致することにより加工面全体を均一に加工することが可能になることが明らかとなった。

謝 辞

本研究の一部は、平成 21 年度 ものづくり中小企業製品開発等支援補助金（試作開発等支援事業）の支援を受けて実施された。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) D. Najjar, A. Behnamghader, A. Iost, H. Migaud: Influence of a Foreign Body on the Wear of Metallic Femoral Heads and Polyethylene Acetabular Cups of Total Hip Prostheses, *Journal of Materials Science*, **35**, 18, (2000), 4583.
- 2) C. H. Chang, H. W. Fang, Y. C. Ho, H. T. Huang: Chondrocyte Acting as Phagocyte to Internalize Polyethylene Wear Particles and Leads to the Elevations of Osteoarthritis Associated NO and PGE2, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, **369**, 3, (2008), 884.
- 3) D. Granchi, I. Amato, L. Battistelli, G. Ciapetti, S. Pagani, S. Avnet, N. Baldini, A. Giunti: Molecular Basis of Osteoclastogenesis Induced by Osteoblasts Exposed to Wear Particles, *Biomaterials*, **26**, 5, (2005) 231.
- 4) A. C. August, C. H. Aldam, P. B. Pynsent: The McKee-Farrar Arthroplasty-a Long-Term Study, *The Journal of Bone and Joints Surgery*, **68 B**, 4, (1986), 520.
- 5) M. Semlitsch, H. G. Willert: Clinical Wear Behaviour of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Cups Paired with Metal and Ceramic Ball Heads in Comparison to Metal-on-Metal Pairings of Hip Joint, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering-Part H-Journal of Engineering in Medicine*, **211**, (1997), 73.
- 6) 村上輝夫: 人工関節の潤滑性維持のためのトライボロジー技術, *トライボロジスト*, **37**, 4, (1991), 274.
- 7) 水谷正義, 小茂島潤, 片平和俊, 渡邊裕, 大森整: 金属系生体材料 (Ti-6Al-4V 合金) の腐食特性に及ぼす ELID 研削の効果, *精密工学会誌*, **69**, 12, (2003), 1744.
- 8) H. Ohmori, K. Katahira, J. Komotori, M. Mizutani, F. Machama, and M. Iwaki: Investigation of Substrate Finishing Conditions to Improve Adhesive Strength of DLC Films, *Annals of the CIRP*, **54**, 1, (2005), 511.
- 9) H. Ohmori, K. Katahira, Y. Akinou, J. Komotori, and M. Mizutani: Investigation on Grinding Characteristics and Surface-Modifying Effects of Biocompatible Co-Cr Alloy, *Annals of the CIRP*, **55**, 1, (2006), 597.
- 10) M. Mizutani, K. Katahira, J. Komotori, and H. Ohmori: Control of surface modified layer on metallic biomaterials by an advanced ELID grinding system (EG-X), *International Journal of Modern Physics B*, **20**, 25-27, (2006), 3605.
- 11) M. Mizutani, J. Komotori, K. Katahira, and H. Ohmori: Development of a new integrated machining system ~Improvement of surface characteristics on metallic biomaterials with a new electrical grinding system~, *Journal of Machine Engineering*, **7**, 1, (2007), 15.
- 12) 黒澤洋: 新提案の研磨工具による精密工學部品の研磨法第 2 報 -深紫外線用 CaF₂ 単結晶球面レンズの研磨-, *砥粒加工学会誌*, **49**, 5, (2005), 239.
- 13) 村上敏貴, 進村武男: CVD-SiC 金型の湿式メカノケミカル研磨法に関する基礎研究, *砥粒加工学会誌*, **50**, 9, (2006), 531.