C204 Micro Slurry-jet Erosionにより処理した人工関節表面性状が 摩耗粉形態に与える影響

Effect of surface profile processed by micro slurry-jet erosion
on morphological aspect of wear particles.

学 ○桑畑佳月 (熊本大) 学 西真生 (熊本大) 学 近浦裕斗 (熊本大)
正 中島雄太 (熊本大) 正 中西義孝 (熊本大)

Katsuki KUWAHATA, 2-39-1 Chuouku Kurokami, Kumamoto University, Kumamoto
Naoki NISHI, Kumamoto University
Hiroto CHIKAURA, Kumamoto University
Yuta NAKASHIMA, Kumamoto University
Yoshitaka NAKANISHI, Kumamoto University

Key words: Micro Slurry-jet Erosion, Surfaces Profile, UHMWPE, Wear Particle, Artificial Joint

1. はじめに

人工関節の軸受材料である超高分子量ポリエチレン (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: UHMWPE) の摩耗粉は骨融解などの原因となっており、人工関節の耐用年数に影響を与えている。これは白血球の一つであるマクロファージが摩耗粉を貪食し、炎症系のサイトカインを放出するからである。

著者らは、このような背景を鑑み、相手面材料に利用されている Co-Cr-Mo 合金上にさまざまな表面性状を施すことで摩耗粉の総量減少と、摩耗粉サイズの肥大化を実現させる摺動面加工技術を提案してきた。この技術により顕著な成果が得られた反面、長時間の加工時間や低い加工再現性などの改善すべき点も明らかになってきた。

本実験ではこれらの改善点を克服すべく、新しい表面加工法である Micro Slurry-jet Erosion (以下、MSE と略す) を提案する。本方法により処理した表面性状が UHMWPE 摩耗粉形態に与える影響について報告する。

2. 研究方法

2. 1. Co-Cr-Mo 合金の表面

図 1 に UHMWPE の相手面となる Co-Cr-Mo 合金の表面性状を示す。表面計測には非接触 3 次元表面形状・粗さ測定機 (New View 7000, Zygo 社製) を用いた。図 2 に MSE の原理を、表 1 に MSE による表面加工条件を示す。MSE は加工対象材料表面に水と多角アルミナ粒子 (平均粒径 1.2 μm) を混合したスラリーを噴射する方法である。噴射は精密に制御され投射部にエロージョン摩擦を発生させるものである。これによりナノメートルサイズの加工を実現することができ、高い再現性の精密な加工が可能となった。

MSE による加工の前処理として、一般的な人工関節に使われている鏡面仕上げ ($R_a=10\sim20\text{ nm}$) を行った。本報告では、この表面を G-1 とした。表 1 のように投射部の送り速度、送り量を制御し、M-1~M-4 の面を創製した。ただし、M-3 においては多角アルミナ粒子の投射により材料表面にクレータ周辺状のエッジ痕が発現することを予想し、これを除去する目的から Nano-Diamond (株式会社日本化薬、平均粒径 2-5 nm) によるラッピング加工を追加した。

Table 1 Operating condition for micro slurry-jet erosion.

Surface name	Feed speed, v mm/s	Feed pitch, f mm/s	additional processing
M-1	1.0	0.5	—
M-2	2.0	0.5	—
M-3	1.0	0.5	Nano-Diamond
M-4	0.5	1.0	—

Fig. 1 Surface profiles of Co-Cr-Mo alloy disc.

Fig. 2 Schematic illustration of micro slurry-jet erosion.

2. 2. Pin-on-disc 試験

試験装置の概略を図 3 に示す。直径 12.0 mm の UHMWPE に図 1 の表面性状を持つ Co-Cr-Mo 合金を接触させ、多方向すべりの pin-on-disc 試験をおこなった。総滑り距離は 15.0 km とした。潤滑液として 25.0 vol% 牛血清水溶液に防腐剤としてアジ化ナトリウムを 0.3 wt% 添加したものを使用した。試験後、摩耗粉の観察を行い、各摩耗粉において長軸方向 (L_l)、短軸方向 (L_s) を測定し、アスペクト比 ($= (L_l) / (L_s)$) を算出した。また、長軸方向 (L_l) を基準とした摩耗粉サイズの度数分布を算出した。

Fig. 3 Schematic illustration of pin-on-disc tester.

3. 結果と考察

UHMWPE の総摩耗量を図 4 に示す。一般的な人工関節面 (G-1) よりも MSE で処理した面 (M-1, M-2, M-4) の方が総摩耗量の抑制に寄与する傾向が観察された。MSE で処理した面で UHMWPE と直接接する可能性がある凸領域の表面粗さは、G-1 のおよそ 1/10 ($R_a=1-2$ nm) となっている。これが UHMWPE の切削摩耗を抑制する作用を促したと考えられる。

Fig. 4 Wear of UHMWPE, bar graphs show mean value.

摩耗粉サイズの度数分布を図 5 に、アスペクト比を図 6 に示す。摩耗粉のアスペクト比は MSE 処理の影響を受けないが、摩耗粉サイズは影響を受けることが判明した。MSE 処理を行うことにより、マクロファージの食食作用が顕著となる $1\mu\text{m}$ 以下のサイズ^{2,3)}が少なくなり、 $5\mu\text{m}$ 以上の摩耗粉が発生しやすいことが明らかとなった。

一般的に、摩擦面間が境界潤滑または混合潤滑にある場合、摩擦面の表面粗さは小さいほうが総摩耗量は小さくなる。これは前述のとおり、切削性の摩耗が抑制されるからである。しかるに、この場合、摩耗粉のサイズはより小さくなることが予想されるが、本実験結果は逆の摩耗粉肥大化を生み出している。著者らはこのメカニズムに、Co-Cr-Mo 合金表面への UHMWPE の移着膜効果に関与していると考えている。境界・混合潤滑下においては摩擦面間に介在できる潤滑液は限られている。摩擦過程において介在潤滑液は排除され、超平滑化された面に付与された凹みに停留することになると考えられる。つまり、摩擦面間は擬似的な無潤滑状態となり、UHMWPE の移着膜効果により、総摩耗量の抑制が実現されると考えられる。このままの状態が継続すれば、摩耗粉は小さくなるが、凹みに停留した潤滑液が移着膜と Co-Cr-Mo 合金の界面に関与し、移着膜の剥離を行うと考えている。剥離された移着膜は周辺の摩耗粉を取り込み、肥大化し、摩擦系外に排出され、肥大化した摩耗粉となると予想している。

付与する凹みの深さには最適値がある。例えば、M-3 (図 4) は G-1 よりも総摩耗量が大きくなくなっている。M-3 は M-1 の表面に Nano-Diamond によるラッピング加工を追加したものであり、MSE により付与された凹みの深さが相対的に小さくなっていると考えられる。つまり、凹みの深さが十分でなく、摩擦面間を無潤滑状態にすることができない場合、(UHMWPE の移着膜効果が発現しない場合)、凹みは単なる表面粗さの増大となると考えられる。

4. 結言

人工関節表面性状を創製する方法として Micro Slurry-jet Erosion を提案した。MSE により処理した人工関節表面性状は摩耗粉形態に影響を与え、UHMWPE の総摩耗量の抑制や摩耗粉の肥大化などが期待できると判断できた。

最後に、本研究の一部は科学研究費／基盤研究 (B) (25289024) の支援を受け、実施した事を付記する。

Fig. 5 Distributions as a function of particle size for wear debris. 150 particles in each condition.

Fig. 6 Distributions as a function of aspect ratio for wear debris. 150 particles in each condition.

参考文献

- 1) 中西義孝, 日垣秀彦, 三浦裕正, 水田博志, 岩本幸英: 人工関節の表面研磨法が摩耗粉形態とサイトカイン産生に与える影響: 臨床バイオメカニクス, 34, 11-18, 2013.
- 2) J. Bridget Matthews, Alfred A. Besong, et al.: Evaluation of the Response of Primary Human Peripheral Blood Mononuclear Phagocytes to Challenge with In Vitro Generated Clinically Relevant UHMWPE Particles of Known Size and Dose. 301-030, 2000.
- 3) J. L. Tipper, E. Ingham et al.: Quantitative analysis of polyethylene wear debris, wear rate and head damage in retrieved Charnley hip prostheses: JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE: MATERIALS IN MEDICINE 11: 118-120, 2000.