

人工関節用Co-Cr-Mo合金の切削特性

金枝 敏明・西 隆之*・衣川 耕平**

岡山理科大学工学部機械システム工学科

* 株式会社ツバキエマソン

** 岡山理科大学大学院工学研究科機械システム工学専攻

(2008年9月29日受付、2008年11月7日受理)

1. はじめに

現在、重度の関節リウマチや変形性関節症の患者に対し、患部の骨を人工物に置き換える人工関節置換術が施されている。人工関節の手術は年間約8万例あるが、そのうちの8割が股関節の置換術である。人工股関節の材料として図1に示すように、骨頭やステム部にはCo-Cr-Mo合金、カップ部には超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)が耐摩耗性、生体親和性が高いという理由からよく用いられている¹⁾。しかし人工股関節の寿命は平均で約15年程度と永久的に使用できるものではなく、再置換手術を余儀なくされる場合がある。この再置換手術による患者の負担軽減のために人工股関節の高寿命化が求められている。

人工股関節の寿命を決定する要因の一つに、カップの摩耗が挙げられる。耐摩耗性を向上するために骨頭部分のCo-Cr-Mo合金の真球度を上げることが有効であると考えられている。そこで超精密旋盤を用いて、従来人の手で磨かれていた工程を超精密切削に置き換え、Co-Cr-Mo合金の真球度ならびに加工能率を向上させる試みが行われている²⁾。

Co-Cr-Mo合金は元来、航空宇宙用材料として開発された超耐熱合金である。ステンレス鋼より耐久性に優れ、しかも十分な強度を兼ね備えていることから人工関節や製造床として用いられている^{3), 4)}。

しかしCo-Cr-Mo合金の切削に関する研究はほとんど行われておらず、切削特性や切削機構についても明らかになっていない。そこで本研究では、Co-Cr-Mo合金の加工面性状に関わる切削特性について調査した。

2. 実験装置及び方法

2-1 実験装置

実験装置は図2に示すNC二次元精密切削実験装置を使用する。被削材には、実際に人工股関節に使用されているASTM F-75規格に基づき铸造されたCo-Cr-Mo合金を、板状(80×35×2)に加工して使用した。

表1にCo-Cr-Mo合金の機械的特性を示す。工具材料は耐摩耗性と強度に優れ、鋳鉄・非鉄金属などの切削に適した超硬合金K10である。すくい角は大きいほど切削抵抗は小さくなるが、その反面、今回のような硬度が高い材料を切削する場合、チップングなど工具の欠損が生じやすくなるという問題がある。したがって、すくい角は0°、逃げ角は金属切削で

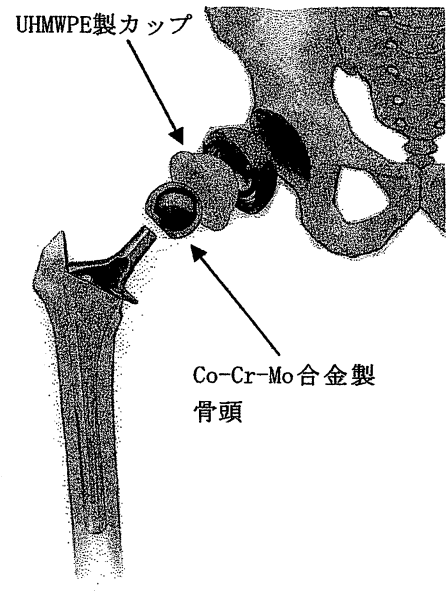
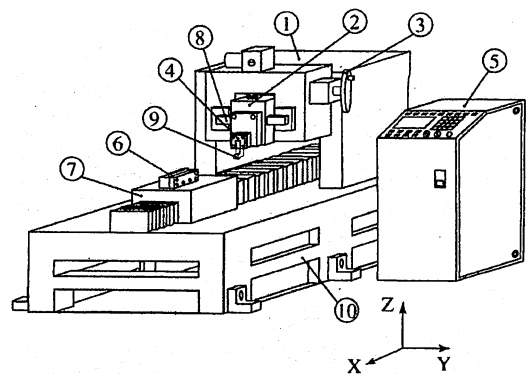


図1 人工関節モデル



- ① Column
- ② Z axis slide
- ③ Y axis feed handle
- ④ Tool holder
- ⑤ Control panel
- ⑥ Work
- ⑦ X axis table
- ⑧ Z axis clamp
- ⑨ Tool
- ⑩ Base

図2 NC二次元精密切削実験装置

表1 Co-Cr-Mo合金の機械的性質

Tensile strength MPa	Yield strength MPa	Elongation %	Thermal conductivity W/m·K
655	450	8	15

良好な仕上げ面が得られる 7° とする。

工具はダイヤモンド砥石の#200と#270で粗仕上げした後、#800で仕上げ研削を施し、オリンパス光学工業(株)製の反射型ノマルスキー微分干渉顕微鏡(型式:BHM)を用い、工具刃先が十分鋭利であることを確認して使用する。このような過程を経た工具の刃先丸味半径 ρ は $\rho=2\sim 3\mu\text{m}$ で、炭化タングステンの粒径に近いことが確認されている。実験に使用した工具は、特に大きい刃こぼれや刃先稜全体にわたる摩耗がない限り再度使用する。

2-2 実験方法

切削抵抗は被削材の機械的性質(延性、破断ひずみ、加工硬化率等)、工具形状、切削条件(切削速度、切込み)だけでなく前加工面の加工変質層の厚さが大きく影響するということが軟質金属切削で判明している⁵⁾。難削材であるCo-Cr-Mo合金でも何らかの傾向が出る可能性があるため、まず前加工面の加工変質層を制御するための前加工を行った後に、本実験を行う。

前加工の手順として、切込み $50\mu\text{m}$ で十数回程度切削を行う。切削抵抗が安定し、加工変質層の状態が一様になったら、切込み量を40, 30, 20, $10\mu\text{m}$ と減らしていき、それぞれの切込みで十数回以上切削を行い、一旦加工変質層を十分に薄くする。その後、最終前加工切込み $t_L=10, 20, 30, 50, 70, 100\mu\text{m}$ を選択して切削する。このように最終前加工を変化させるのは、最終前加工によって切削抵抗が大きく変化するためである。なおこの際の切削速度は $V=25.7\text{m/min}$ である。実験では切削速度 $V=5.3, 25.7, 50.0\text{m/min}$ 、本実験切込み $t_1=10, 20, 30, 50, 70, 100\mu\text{m}$ で切削を行う。以後最終前加工切込み、本実験切込みをそれぞれ t_L, t_1 と表す。

なお、切削油剤には不水溶性非塩素系切削油JIS K2241(新日本石油製ユニカットテラミ AM15)を使用する。切削抵抗の測定には既報⁵⁾と同様に水晶製の圧電型切削動力計を用いて行った。

表2に切削条件をまとめて示す。

表2 切削条件

Work material	Co-Cr-Mo alloy (ASTEM F75)	
Work piece thickness mm	2	
Tool material	Cemented carbide K10	
Tool geometry	Rake angle α°	0
	Relief angle ϵ°	7
Cutting form	Orthogonal cutting	
Cutting speed V m/min	5.3, 25.7, 50.0	
Depth of cut t_1 μm	10, 20, 30, 50, 70, 100	
Depth of cut at last pre-cutting t_L μm	10, 20, 30, 50, 70, 100	
Cutting oil	JIS K 2241	

3. 実験結果ならびに考察

3-1 前加工面の硬度分布

図3に実験で得られた前加工面の硬度分布を示す。グラフより、母材硬度が約 450Hv であることがわかる。 $t_L=50\mu\text{m}$ の場合加工表面の硬度は 634Hv と最も高くなり、 $t_L=10\mu\text{m}$ の場合 494Hv ともっとも低くなる。 $t_L=70, 100\mu\text{m}$ では、 $t_L=50\mu\text{m}$ より大きいにもかかわらず硬度は $563\text{Hv}, 566\text{Hv}$ とそれよりも低い。これは、 t_L が増加したことによって工具逃げ面のパニシ量が増加し、加工表面が軟化したためと考えられる⁶⁾。加工面から $20\mu\text{m}$ の深さでは $t_L=100\mu\text{m}$ の方が $t_L=50\mu\text{m}$ より硬度が高い。加工変質層深さは $t_L=10\mu\text{m}$ の場合 $30\mu\text{m}$ になり、その他の条件では $50\mu\text{m}$ となっている。 t_L の影響が、AlやCuなどの軟質金属と少し異なる形で加工硬度分布に現れたことがわかる。

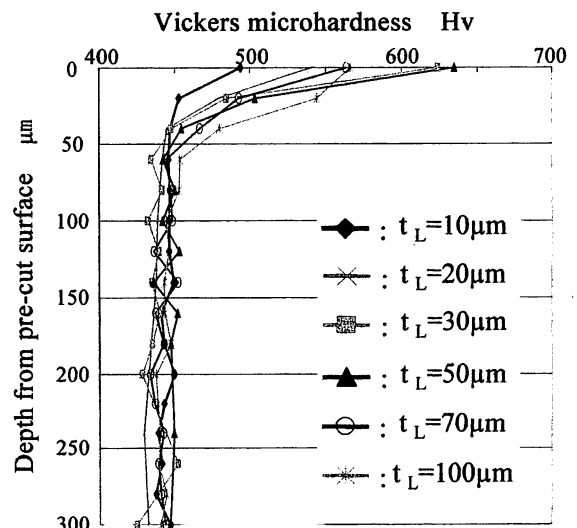


図3 前加工面下のビッカース硬さ

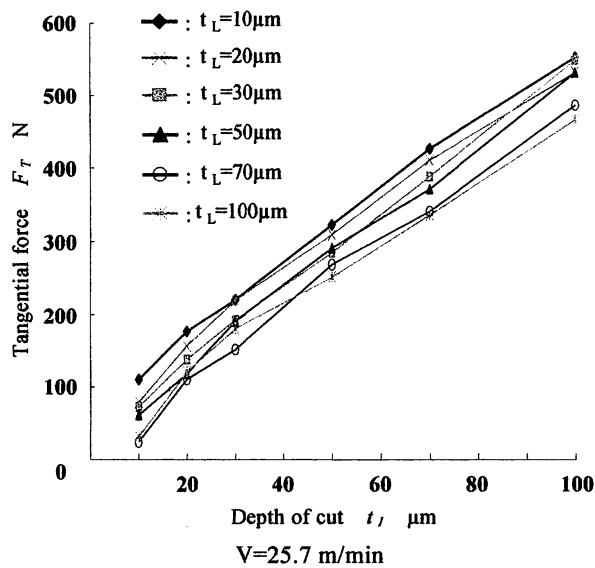


図4 切込みの主成分力に及ぼす影響

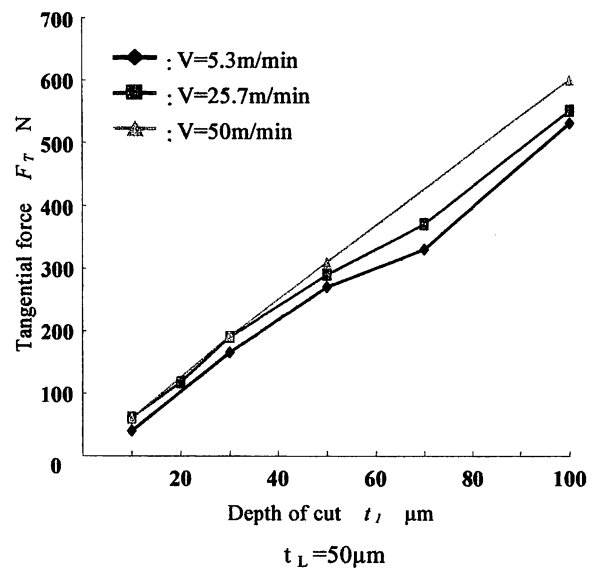


図5 切削速度の主成分力に及ぼす影響

3-2 切削抵抗

図4に切削速度 $V=25.7\text{ m/min}$ での t_L , t_1 を変化させた場合の主成分 F_T のグラフを示す。 t_1 が増加すると主成分力も増加する。 $t_1=100\mu\text{m}$ の場合、 $t_L=10\mu\text{m}$ では 550 N であるのに対し、 $t_L=100\mu\text{m}$ では 465 N と、約 100 N 減少している。このように同じ t_1 であれば、 t_L が増加するほど切削主成分力 F_T は減少している。この傾向は純Al, Cuなどの軟質金属の場合と同様である。切削速度 $V=5.3\text{ m/min}$, 50.0 m/min での t_L , t_1 を変化させた場合の主成分 F_T も同様の傾向が得られた。

図5に $t_L=50\mu\text{m}$ での切削速度を変化させた場合の切削主成分力 F_T を示す。同じ t_1 で切削を行った場合でも、切削速度が上昇するにつれて切削主成分力 F_T も上昇する傾向がある。同図からわかるように同じ $t_1=100\mu\text{m}$ で切削した場合、切削速度 $V=5.3$, 25.7 , 50.0 m/min と増加するほど切削主成分力 F_T も 530 , 550 , 600 N と増加している。これは、切削温度、ひずみ速度、変形領域の相殺性より説明できる。通常切削速度が上昇すると切削熱も上昇するが、Co-Cr-Mo合金は、この切削速度領域では切削熱の上昇は大幅でなく、ひずみ速度の上昇による変形応力の増大が効いたものと考えられる⁷⁾。

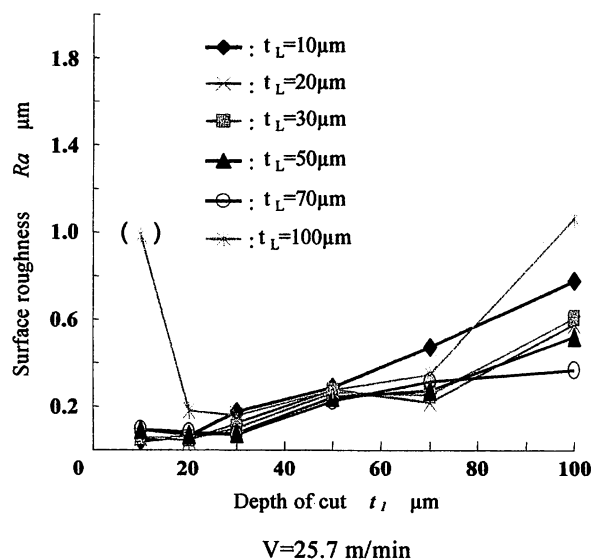


図6 切込みの表面粗さに及ぼす影響

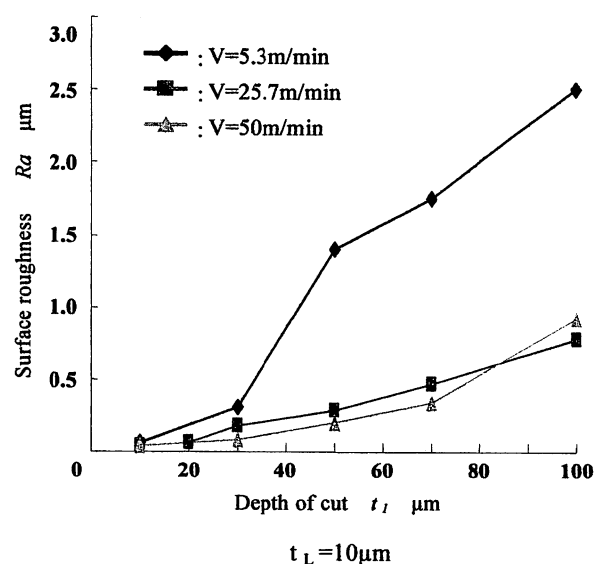


図7 切削速度の表面粗さに及ぼす影響

3-3 加工面粗さ

図6に切削速度 $V=25.7\text{m/min}$ での t_L 、 t_1 を変化させた場合の加工面平均粗さ R_a のグラフを示す。図からわかるように $t_L=10\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\mu\text{m}$ の場合 $R_a=0.064\mu\text{m}$ と最も小さい。また、 $t_L=20\mu\text{m}$ 、 $t_1=30\mu\text{m}$ ではそれほど大きな粗さの上昇は見られないが、 $t_1 \geq 50\mu\text{m}$ になると R_a の比較的大きな増大が見られる。さらに一部の条件を除いて同じ t_1 であれば t_L が増加するほど R_a の値は減少していることがわかる。同図中の $t_L=100\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\mu\text{m}$ は、本実験の際前加工面の粗さが大きく、所定の切込み t_1 で実質的に切削できていないため()をつけて表す。

図7に $t_L=10\mu\text{m}$ での切削速度の影響について示す。 $t_1=100\mu\text{m}$ 、 $V=50.0\text{m/min}$ の場合を除き、 $V=5.3$ 、 25.7 、 50m/min と上昇するに従い、 R_a は減少することがわかった。これは t_L 、 t_1 の条件に全体的に当てはまる。また、 $V=5.3\text{m/min}$ 、 $t_1=30\mu\text{m}$ 以上の切込みでは R_a が急に増大している。今回行った実験の範囲では、 $V=50\text{m/min}$ 、 $t_L=10\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\mu\text{m}$ の場合、 $R_a=0.0342\mu\text{m}$ という最も小さい値が得られた。これは切削速度上昇に伴う変形領域の狭小化が効いたものと考えられる。

3-4 切りくず観察

図8に $V=25.7\text{m/min}$ 、 $t_L=10\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\mu\text{m}$ と $t_1=100\mu\text{m}$ での切りくず写真を示す。同図左は切りくずラメラを上から、同図中央は側面から見た写真で、同図右は中央の拡大写真である。図からわかるように $t_1=10\mu\text{m}$ では、切りくずの表面は典型的なラメラを呈す流れ形をしており、良好な切りくず生成状態となっていることがうかがえる。それに対し、 $t_1=100\mu\text{m}$ では切りくずは鋸歯状をしており、 $t_1=10\mu\text{m}$ と違い切りくず流出方向と直角に、規則正しくセグメントを生成している。

切削条件による切りくず形態の分類を図9に示す。同図a) $V=5.3\text{m/min}$ の場合、流れ形切りくずは $t_L=10 \sim 30\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\mu\text{m}$ のみにあらわれる。その他の条件では鋸歯状切りくずを発生している。同図b) $V=25.7\text{m/min}$ では、流れ形切りくずは $t_1=10\mu\text{m}$ だけでなく、 $t_1=20\mu\text{m}$ の一部の条件($t_L=10 \sim 20\mu\text{m}$)で発生しており、それ以外の条件では鋸歯状切りくずを発生する。同図c) $V=50.0\text{m/min}$ になると、 $t_1=30\mu\text{m}$ ($t_L=10 \sim 20\mu\text{m}$)でも流れ形切りくずを発生している。これより、 $V=5.3$ 、 25.7 、 50.0m/min と切削速度が増加するにつれて、流れ形切りくずの発生する条件が $t_1=10 \rightarrow 30\mu\text{m}$ と増加していることがわかる。これは、速度が増加することによる変形領域の狭小化が刃先への応力集中の度合いを増加させ、刃先の転写性を向上させたことに原因があると考えられる。

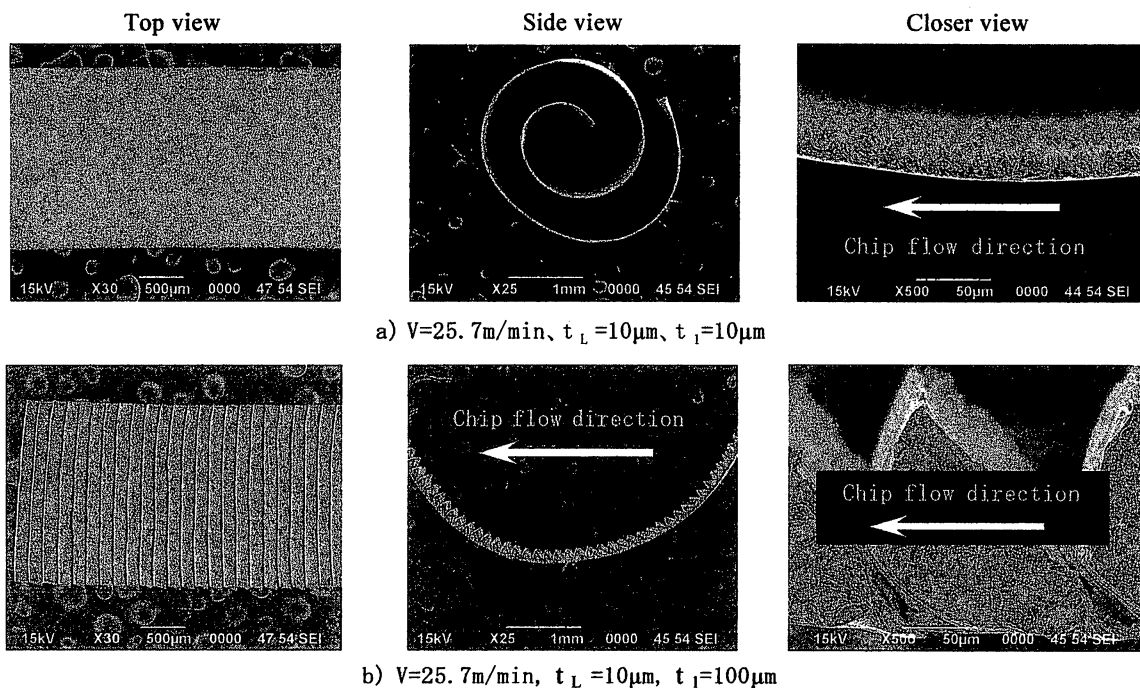


図8 切りくず観察

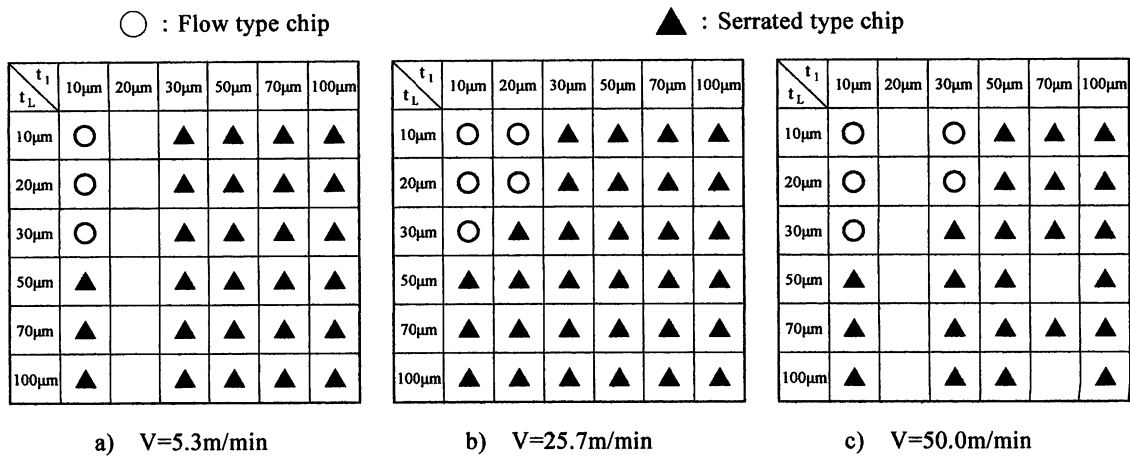


図9 切りくず形態の分類

4. 結 言

- (1) 前加工面の硬度分布は $t_L=50\mu\text{m}$ で最大となり、加工変質層深さは t_L の大小にかかわらず $50\mu\text{m}$ となり、軟質金属と同様にそれらが切削抵抗に大きく影響する。
- (2) 同一の切込み t_1 であれば t_L が増大すると軟質金属切削と同じように切削主分力は低減する。
- (3) 加工面の平均粗さ Ra は $t_1=10\sim 30\mu\text{m}$ ではあまり差は見られなかったが、 $t_1 \geq 50\mu\text{m}$ では t_L が増加するほど Ra が低減する。
- (4) 切りくず形態には流れ形と鋸歯状の2形態があり、前者は $V=5.3\text{m/min}$ で $t_L=10\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\sim 30\mu\text{m}$ 、 $V=25.7\text{m/min}$ で $t_L=10\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\sim 30\mu\text{m}$ 、および $t_L=20\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\sim 20\mu\text{m}$ 、 $V=50.0\text{m/min}$ で $t_L=10\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\sim 30\mu\text{m}$ 、および $t_L=30\mu\text{m}$ 、 $t_1=10\sim 20\mu\text{m}$ で発生し、その他の条件では後者が発生する。
- (5) 切りくず形態が流れ形の場合 Ra は小さく、鋸歯状の場合は大きい。

参考文献

- 1) 岡正典, 室田景久, 白井康正, 桜井実: 人工関節・バイオマテリアル, メディカルビュー社(1990)20.
- 2) H. Yoden, et al: New finishing process of Co-Cr-Mo alloy head for artificial hip joints-Using ultra-precision cutting and large area electron beam machining, Proceedings of the 7th inter-national conference european society of for precision engineering and nanotechnology(2007)pp308-310.
- 3) 佐久間健人, 相澤龍彦, 北田正弘: マテリアルの事典, 朝倉書店(2001)591.
- 4) ASM: Metals Handbook, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials(1991)pp446-452.
- 5) 金枝敏明, 河坂博文, 軟質金属切削における塗布効果(第1報) -発生条件ならびに塗布剤の境界潤滑特性の影響-, 精密工学会誌, 61(1995)pp702-706.
- 6) 金枝敏明, 久保田知宏: 純Al切削加工表面軟化の要因究明, 2001年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2001)198.
- 7) 白井英治: 切削・研削加工学 上 - 切削加工 -, 共立出版株式会社(1971)41.

Cutting characteristics of Co-Cr-Mo alloy for artificial joint

Toshiaki KANEEDA, Takanori NISHI* and Kohei KINUGAWA**

*Department of Mechanical Systems Engineering,
Faculty of Engineering, Okayama University of Science,
1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan*

** Tsubaki Emerson Co.*

1-1 Koutarikuresumi, Nagaokakyou-city, Kyouto 617-0833, Japan

*** Graduate School of Engineering,*

*Okayama University of Science,
1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan*

(Received September 29, 2008; accepted November 7, 2008)

Artificial joints have been increasingly used in treatment of physically disabled people who have severely damaged joints. In the artificial joint, ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) has been usually employed as a buffer because of its very low friction coefficient, high wear resistance and high impact strength. However as it is normally coupled with a material as stainless steel, Ti alloy, Co-Cr-Mo alloy or ceramic, it often suffers disproportionate wear, because of its lower strength and hardness. Sliding surfaces of artificial hip joints consist of a head and cup combination in most cases. To extend the operating life, form accuracy and surface roughness of the head should be improved at the same time. Finish polishing process by hand operation was usually done. However, the attempt to replace skilful hand polishing operation with ultra-precision cutting process was carried out to improve geometrical deviation from sphere of Co-Cr-Mo alloy head. Co-Cr-Mo alloy is one of the typical difficult-to-cut materials. It was developed for aerospace industry as a kind of super alloy. This alloy was employed for artificial joints and artificial tooth due to its high strength and endurance which is more excellent than stainless steel. However, any researches dealing with Co-Cr-Mo alloy cutting could be found. The cutting characteristic and chip formation mechanism have never been determined yet. Therefore, the cutting characteristics have been investigated in this paper.

The experiment results indicated that tangential forces decrease with increasing depth of cut in the last pre-cutting t_L (called hereafter as t_L) in the case of same depth of cut t_1 (called hereafter as t_1): tangential forces increase with increasing cutting speed in the same t_L and t_1 and the smallest surface roughness $Ra=0.0342\mu\text{m}$ was obtained in the case of $t_L=10\mu\text{m}$, $t_1=10\mu\text{m}$, at the cutting speed $V=50.0\text{m/min}$.

Keywords: Co-Cr-Mo alloy; machined surface; orthogonal cutting; chip formation; artificial joint.