

B03 微小加工特性に基づく骨切除デバイスに関する研究

A Bone-cutting device based on the micro-processing characteristics

○学 渡部亨尚(東京大学) 正 杉田直彦(東京大学)

正 光石 衛(東京大学) 佐野裕((株)東鋼)

寺島誠人((株)東鋼)

Michihisa WATANABE, the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo

Naohiko SUGITA, the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo

Mamoru MITSUISHI, the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo

Yuu SANO, TOKO Co.,Ltd., 5-27-10, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo

Makoto TERASHIMA, TOKO Co.,Ltd., 5-27-10, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo

High cutting efficiency, high accuracy, and low cutting temperature are important during the machining of bone. However, there is no tool to satisfy all these requirements simultaneously. Therefore, a bone cutting tool was proposed in this paper. Especially a milling tool was designed, because it was easy to achieve high efficiency. The proposed tool has two kinds of cutting edges. One of the edges has slightly shorter diameter, and realizes rough machining. The other edge finishes the surface with small depth of cut. Thus it would be possible to perform rough and fine processes at a time with the proposed tool. Some experiments were conducted, and the cutting performances were evaluated under the following three points: efficiency, accuracy and temperature.

Key Words : Cutting tool, Bone cutting, Cutting temperature, Endmill, Crack-type chip

1. 研究背景

人工関節置換術において、骨切除の精度は医師の手技技量に左右される。この精度は、使用されるボーンソーの位置決め精度や工具のたわみなどに起因する。骨切除においては、その加工能率・加工精度・低温度切削が重要であるが、特に切削温度においては、50℃以上で骨細胞が壊死してしまうため、一般的な金属加工とは制約が異なる。近年、ボーンソーに代わり回転工具による骨切除が増加し、その切削特性に関する研究が行われている。従来のエンドミルにおいて、その加工能率を上げるためには、送り速度を高く、切込みを増やす必要がある。しかし、この切削条件下で骨切除を行う場合、仕上げ面を超えてのき裂進展及び切削抵抗の増大により、高精度の加工が困難となる。

そこで、本研究では、高能率・高精度・低温度を同時に満たす加工法および加工工具の開発を目的とする。具体的には、まず、骨の切削特性に着目し、その特性に合わせた回転工具を製作する。さらに、その工具の加工特性を検討し、最適な工具形状を明確にする。

2. 微視的にみた骨切削特性

骨の微小切削特性を確認するために、牛大腿骨を試料として2次元切削実験を行った。結果を Fig.1 に示す。ここでは、数 μm から 100 μm 程度の微小な切込み領域を対象としている。切込みが 10~70 μm の範囲では、流れ型及びせん断型切りくずを排出する切削状態となる。さらに、切込みが 100 μm 程度に達すると、き裂型切りくずが排出され、脆性的な切削形態となることがわかった。本研究では、この微小切削特性の結果に基づき、工具切れ刃の切削量を決定する。



Fig.1 Depth of cut vs Cutting mode Relationship
(a)10 μm , (b)50 μm , (c)100 μm

3. 切除工具の提案

3.1 骨切除工具の要求機能

1章で記述した通り、骨切除における要求機能は、高能率・高精度・低温度切削である。現状の加工方式では、これらの要求を同時に満たすことはできない。これは、各要求を満たす切削形態が異なることが原因である。各条件下での切削形態は、高精度加工では延性モード、高能率加工では脆性モード、低温度加工では脆性モードである。そこで、本研究で提案する骨切除用工具には、単一工程に2つの加工モードを実現可能という要求機能を設定した。

3.2 提案する回転工具案(設計解)

本研究では、応用範囲の広さや、高能率・高精度化が見込める回転工具を対象に骨切除用工具の開発を行う。提案する回転工具は、単一工程で荒加工と仕上げ加工を実現する必要がある。荒加工時にき裂型の切削を行うとともに、残領域に対して微小切り込みによる仕上げ加工を行う加工方法を提案する。提案する工具は、切れ刃径の異なる2枚の刃がそれぞれ荒加工と仕上げに対応する。荒加工は脆性モード、仕上げ加工は延性モードを利用する。これらの加工モードは、各刃の切削量によって決定される。そのため、この2つの異なる加工モードを発生させるために、通常は一定であるエンドミル各刃の切削量を変化させなければならない。この考えに基づき、本研究では、特殊な多刃構造を提案する。具体的には、エンドミル1刃を2枚の刃に分け、各刃の半径に微小な差をつける。また、この2枚の刃は円周方向にある程度の角度をつけ配置される。Fig.2に骨切削用回転工具の加工プロセスを示す。

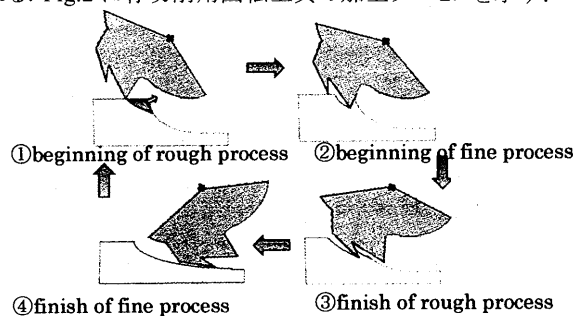


Fig.2 Cutting Process

3.3 工具パラメータの決定

提案する工具では、小径(r_1)の刃で荒加工、大径(r_2)の刃で仕上げ加工を行う。つまり、小径の刃では、1 刃送り量が大きく、大径の刃では、1 刃送り量が小さくなるように設定する。以下に各刃の1刃送り量を与える式を示す。半径方向切込みを d 、刃数 Z 、刃間隔の角度を θ 、各刃の1 刃送り量の和を f とすると、小径刃の1刃送り量 f_1 と大径刃の1刃送り量 f_2 は、以下のよう

$$f_1 = \sqrt{r_1^2 - d^2} - \sqrt{r_2^2 - d^2} + \frac{(360 - Z\theta)f}{360}$$

$$f_2 = f - f_1$$

ここで、切削量に関わる工具パラメータは、小径、大径、大径と小径の間隔であることがわかる。この切削量については目標とする加工条件と2章で示した切削特性から設定し、その設定値から工具パラメータを決定した。また、2次元切削の切込み深さとエンドミル切削における切取厚さを対応させて切削量を決定した。この際、荒加工による面粗さが仕上げ面に影響しないという条件も考慮した。また、刃間隔 θ は、切りくず排出性を考慮し30°に設定した。さらに工具の切削性に影響する各刃のすくい角及び逃げ角は、実際に切削実験を行い、その結果から決定した。製作した工具をFig.3に示す。

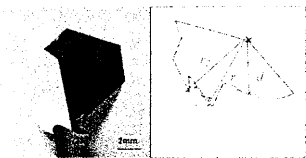


Fig.3 Proposed Cutting Endmill

4. パラメータ(すくい角・逃げ角)評価実験

4.1 実験方法及び実験条件

エンドミル工具のすくい角・逃げ角が及ぼす切削性の評価を目的として、通常エンドミル工具を用いて切削実験を行った。実験系をFig.4に示す。また、試料は牛大腿骨の皮質骨を用い、含水状態でオステオンに対して周方向の切削を行った。

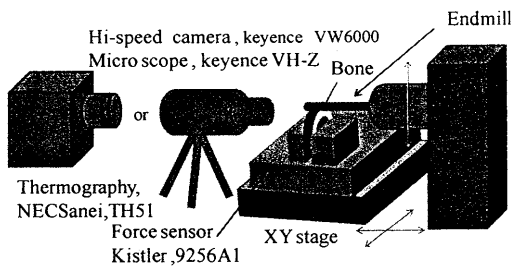


Fig.4 Experimental Setup

4.2 実験結果及び考察

実験結果として、Fig.5(a)に逃げ角評価実験結果、Fig.5(b)にすくい角評価実験結果をそれぞれ示す。この結果から、大きな正のすくい角、逃げ角が切削抵抗低下に対して有効であることがわかる。そのため、提案する工具のすくい角、逃げ角は、切削温度及び、切削抵抗を考慮し、可能な限り大きな値に設

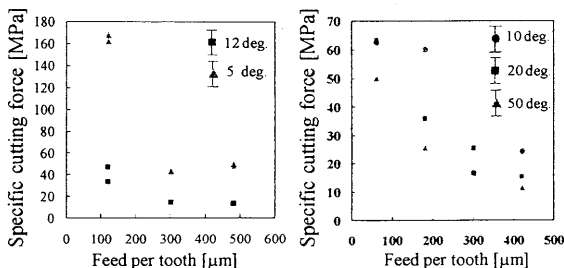


Fig.5(a) Clearance angle vs Cutting force relationship(left)

Fig.5(b) Rake angle vs Cutting force relationship(right)

定すべきである。また、骨強度が金属強度と比較して大幅に低い値をとるため、通常エンドミルよりも大きな角度で設計できるものとする。

5. 設計工具の評価実験

5.1 実験方法及び条件

提案した工具の有効性を確認するため、通常エンドミルとの比較実験を行った。切削実験は、前記Fig.4と同じ実験系で行った。工具の加工特性は、切削抵抗・切削温度・仕上げ面粗さ・切削挙動の点から評価した。実験条件をTable1に示す。

Table 1 Cutting condition

工具	材質	SKH51
	すくい角(ϕ_1, ϕ_2)	50 deg.
	仕上げ刃半径、荒刃半径	5.0, 4.95 mm
切れ刃挟角		30 deg.
切削条件	ダウンカット	
	送り速度	30~270 mm/min
	切削速度	15.7 mm/min
	軸方向切込み	3mm
	半径方向切込み	1 mm
撮影条件	倍率	x 25
	フレームレイト	2000 fps

5.2 実験結果

実験結果として、Fig.6(a)に切削抵抗の最大値の比較結果、Fig.6(b)に比切削抵抗の比較結果を示す。

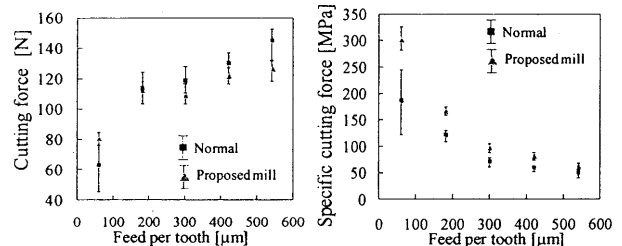


Fig.6(a) Cutting force (peak value) vs Feed per tooth relationship

Fig.6(b) Specific cutting force vs Feed per tooth relationship

6. 考察

実験結果の考察は、骨切除工具の要求である切削能率(切削抵抗)・切削温度・切削精度に分けて行った。

【切削抵抗】切削抵抗の最大値は、通常工具よりも提案した工具の方が小さい値を示した。高能率加工時の骨の固定が困難なこと及び骨の剛性の低さを考慮すると、高能率加工時に有効な工具といえる。また、比切削抵抗は、提案工具の2枚の刃の和と通常工具の1枚の刃の抵抗値を比較したが、通常工具の方が低い値を示した。

【切削温度】提案した工具と通常工具において切削温度は、ほぼ同じ温度であった。提案工具の切削抵抗が低下したことから切削温度の低下が予想されるが、これは提案工具の仕上げ加工時に、荒加工時の発生熱が残留していることが主な要因と考えられる。

【仕上げ面粗さ】加工精度について、仕上げ面粗さによる評価を行った。実験では、骨の組織依存性が大きく、安定的なデータが得られなかった。そのため、今後は切削部位や切削方向など骨組織の影響を考慮した実験が必要であると考えられる。

7. 結論

本研究では、骨用工具を開発し、その評価実験を行った。その結果、提案工具において切削抵抗のピーク値を通常工具よりも低下させることができた。

今後は、最適な骨切除工具の開発を目指し、以下3点を行う。

- ・提案工具の改良(切りくず排出性・切れ刃挟角の調整)
- ・荒加工と仕上げ加工の評価(切削形態の詳細検討)
- ・他の加工方式(応用可能工具の設計指針提案・比較)