骨のマイクロ切削における切り屑生成に伴う異方組織の影響*

大谷 忠^{*1}, 中井 毅 尚^{*2}, 高井 祥 伍^{*2}
森 隆 治^{*3}, 内尾 祐 司^{*3}Effect of Anisotropic Tissue on Chip Formation
in Micro Cutting of Compact BoneTadashi OHTANI^{*4}, Takahisa NAKAI, Shogo TAKAI,
Ryuji MORI and Yuji UCHIO^{**} School of Education, Ibaraki University,
2-1-1 Bunkyo, Mito-shi, Ibaraki, 310-8512 Japan

The orthogonal cutting test of compact bovine bone was conducted, and the fracture behavior in micro cutting with chip formation was investigated by considering the effect on the anisotropic tissue. The result showed that the effect of anisotropic tissue was observed in formation of the continuous chip and the interrupted chip with the uncontinuous cutting surface. The chip formation was also similar to mechanics of that in cutting of the other anisotropic material such as wood. Therefore, the shape of chip formation in the compact bone was categorized by types of flow, crack, shear and tear as classified in cutting wood. The effect of anisotropic tissue in shape of the chip formation was observed from some fracture types with crack propagation. From these results, the fracture behavior in micro cutting of compact bone was suggested that the crack of type I might be progressed straightly along the osteon tissue in compact bone, another crack of type II might be curved on the outskirts of the osteon tissue, and the other crack of type III might be progressed severely in lamella of osteon tissue.

Key Words: Cutting, Compact Bone, Anisotropy, Fracture, Chip Formation, Crack Propagation

1. 緒 言

骨は外周を緻密な骨組織が囲み、内部は多孔質な構造からなるサンドイッチ構造を有する¹⁾。緻密な骨は、ラメラ層によるオステオンの組織が円筒軸方向に異方性を有するだけでなく、ラメラ層の微細な組織にも異方性を有する²⁾。このような高次構造からなる異方組織は、木材のような細胞壁から構成される組織と類似しており³⁾、生物材料特有の組織構造と見なすことができる。

また、骨材は組織の再生を促す細胞が働き、自発的に蘇生できるリモデリングの作用を有する⁴⁾。骨材がもつリモデリングの作用を利用して、我々骨部品創製グループでは、治療用の骨スクリューを作製する試みを進めてきた⁵⁾。本試みによって、骨の剥がれた部分や骨折した部分を骨スクリューによって固定することができる。さらに、スクリューを固定した後、スクリュー自身のリモデリングの作用を利用して、周辺の骨と同化し、組織の再生を促すことができるため、再手術の必要がなくなる等の利点がある。一方では、骨スクリューの創製に伴い、スクリューに用いられる緻密な皮質骨部分の加工特性やスクリューを体内に挿入した後の治癒効果の働きが問題となってきた⁶⁾。

骨材の加工に関する研究においては、人工関節を体内に挿入する上で、挿入される部分の骨材を適切に機械加工するための研究が行われている⁷⁻⁹⁾。本研究に関しては、1970年代から、人骨や動物骨の機械加工による切削抵抗等を測定したデータが報告されている。最近では、切り込み深さが100 μm 以下におけるより精密な切削条件のデータが報告されている⁹⁾。これらの研究において、皮質骨部分の切削特性は、脆性的なき裂による切り屑生成が特徴的であることが指摘されている。このような緻密な組織から成る皮質骨における精密切削においては、異方組織が破壊に及ぼす影響は大きく、骨部品のような加工精度が要求される場面においては特に重要になる。ところが、骨材の精密な切削における異方組織の影響について、破壊挙動を定量的に解析し、評価した報告は少ない。

そこで、本研究では骨材の微視的な組織の影響を考慮した2次元切削試験を行い、骨のマイクロ切削にお

* 原稿受付 2008年5月22日。

^{*1} 正員、茨城大学教育学部(☎ 310-8512 水戸市文京2-1-1)。^{*2} 島根大学総合理工学部(☎ 690-8504 松江市西川津町1060)。^{*3} 島根大学医学部。

E-mail: t-ohitani@mx.ibaraki.ac.jp

ける破壊を伴う切り屑生成の挙動を定量的に明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2・1 供試材 供試材には牛脛骨における皮質骨部分を用い、その平均密度は 1.96g/cm^3 、含水率は 11.0% であった。図 1 は本実験に用いた牛脛骨の特徴的な断面における顕微鏡組織写真を示す。骨組織は、図 1(a) のように、円筒軸方向 (A) にハバース管の周りをオステオンが取り囲み、複数の円筒から構成される断面組織 (以下では軸垂直断面と表記する) を有する。また、図 1(b) のように、オステオンが半径方向 (R) に一方方向に配列した断面 (以下半径断面) や、図 1(c) のように、半径断面に垂直な円周方向 (C) の断面 (以下円周断面) によって、それぞれ独特の組織を有する。なお、本実験に用いた牛脛骨におけるオステオンの円筒直径は、平均径が $257\mu\text{m}$ であった。そこで、骨の切削特性において、異方組織の影響を詳細に調べるため、図 1(a)-(c) における特徴的な断面を考慮して、切削試験片を作製した。

図 2 は本切削試験に用いた骨材の部分と試験片の形状を示す。図 2(a) のように、切削試験片は牛脛骨中央部から、軸方向に対して、一直線上に①～⑥の試験片を抽出した。試験片は切削幅が 2mm で、断面の形状が $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ の形状とした。これらの試験片は、図 2(b) のように、円周断面および半径断面を A 方向に沿って切削する試験片①および②、円周断面および半径断面を A 方向に直角に切削する試験片③および④、軸垂直断面を R 方向および C 方向に平行に切削する試験片⑤および⑥を用いた。

Fig.1 Optical micrographs of the compact bovine bone used in this experiment.

Fig.2 The sample test specimen used for this experiment.

2・2 切削試験 本実験における切削試験は、切り屑生成に伴う破壊挙動を観察するため、工具前方への平面応力状態を想定して二次元切削試験を行った。図 3 は本実験に用いた二次元切削試験装置を示す。本装置は、切削抵抗が測定できる動力計に試験片を固定し、自動送り可能な X-Z 軸テーブルを X 軸方向に移動させて切削した。表 1 は本実験における切削試験の条件を示す。切削工具には SKH 材を用い、工具形状はすくい角が 0° 、逃げ角が 10° 、刃先の曲率先端半径が $2\mu\text{m}$ の条件とした。切削速度は 9mm/min の条件とし、工具切れ刃の切り込み深さは $t=5\sim 100\mu\text{m}$ の範囲とした。切削試験は①～⑥の各試験片に対して、それぞれ 10 回行い、試験片を固定した動力計により、主分力 F_H および背分力 F_V を測定した。

切削時の破壊の状態を観察するため、図 3 に示すように、工具進行方向の側面から CCD カメラを用いて切削画像を撮影した。切削時における骨組織の破壊の挙動を詳細に観察するため、試験片をアクリジンオレンジで染色した。得られた画像から観察された切削時のき裂の進展は、画像解析ソフト (Quick Grain Standard) を用いて解析した。画像の解析では、き裂の開始点から生じた直線的な初期き裂の距離をき裂進展距離 r とした。また、切削方向に対して上向きおよび下向き方向に発生したき裂の角度を求め、その絶対値をき裂進展角度 ϕ と定義して破壊の状態を解析した。

Fig.3 Schematic illustration of testing machine for orthogonal micro-cutting.

Table1 Orthogonal cutting condition set for this experiment.

Material cut	Tibia
Tool material	SKH
Rake angle	0°
Clearance angle	10°
Cutting speed	9 mm/min
Depth of cut	5, 10, 20, 50, 70, 100 μ m

3. 結果および考察

3・1 切り屑生成に伴う切削抵抗の変化 図4は円周断面を軸方向に沿って切削した試験片①において、切削時の主分力 F_H を求めた結果である。 F_H の値は切り始め初期に急激に増加し、その後切削距離 L の増加に伴い、一定の範囲内において値が変動している。このような切削抵抗の変動は、①～⑥のすべての試験片において認められ、切り込み深さや切削方向によって、初期の切削抵抗の大きさやその後の変動幅が異なることがわかった。そこで、切り屑生成に伴う切削抵抗の変動が、切削時の破壊の挙動と関連しているものと推定し、図4に示すように、切削抵抗の最大と最小の平均値を静的な主分力 $(F_H)_s$ とし、最大および最小値の変動幅を動的な主分力 $(F_H)_d$ と定義して、切削抵抗を詳細に解析した。

図5は①～⑥の試験片を用いて切削試験を行い、その時の静的な主分力 $(F_H)_s$ と切り込み深さ t との関係について求めた結果である。いずれの試験片においても、 $(F_H)_s$ の値は t が大きくなるに従って増加している。その増加の傾向は、軸方向に平行や直角に切削する試験片①～④の場合に比べて、垂直に切削する試験片⑤および⑥の場合に著しい。このような軸方向に垂直な切削において、切削抵抗が大きく

Fig.4 Analysis method of cutting resistance measured in this experiment.

Fig.5 Relationship between the static component $(F_H)_s$ in parallel to cutting direction and the depth of cut t .

なる傾向は、杉田らによって報告されている豚皮質骨の切削抵抗の結果とも一致しており⁹⁾、本実験で用いた牛脛骨においても異方組織の影響が現れることが推察できる。

図6は動的な主分力 $(F_H)_d$ と切り込み深さ t との関係について求めた結果である。切削時の動的な抵抗の値は、 t が大きくなるに伴い $(F_H)_d$ の値は指数関数的に増加している。この増加の傾向は、試験片⑤や⑥のように、軸方向に垂直に切削する条件で著しく、軸方向に平行に切削する試験片①～④の場合には小さい。

以上の切削抵抗における静的および動的挙動の解析結果から、切削方向によっては、切り込み深さの大きいほど、動的な変動が著しい不安定な切削が生じることがわかる。なお、この不安定な挙動は背分力に比べて、主分力において顕著に認められた。このことから、切削抵抗に現れる不

安定挙動は、切り屑の生成に伴い、工具前方に発生する破壊挙動と密接に関連している可能性がある。

Fig.6 Relationship between the dynamic component $(F_H)_D$ in parallel to cutting direction and the depth of cut t .

3・2 切り屑生成における破壊挙動 図 7(a)-(f)は①～⑥の試験片を切削したときの切り屑の状態について観察した結果を示す。これらの画像は、1mmの距離で切削したときの切り込み深さが $t=100\mu\text{m}$ の条件における切り屑の状態である。図 7(a)および(b)のように、骨材を軸方向に沿って、円周断面 (試験片①) および半径断面 (試験片②) に切削した場合には、ともにカール状に生成した流れ型の切り屑が観察できる。また、切削時における工具先端付近では、刃先前方へのき裂の進展が認められる。図 7(c)および(d)のように、円周断面 (試験片③) および半径断面 (試験片④) を軸方向に直角に切削した場合には、鋸歯状の連続的な切り屑の様子が観察できる。ところが、軸垂直断面を半径方向 (試験片⑤) および円周方向 (試験片⑥) に切削した図 7(e)および(f)においては、工具前方では連続的な切り屑が発生せず、工具進行後の加工面は不連続なおうとつが観察できる。すなわち、軸方向に平行や直角に切削する場合には、連続的な切り屑が発生するのに対して、軸方向に垂直に切削する場合には、切り込み深さが大きいほど、切削時の抵抗に不安定な挙動が現れるとともに、不連続な加工面が形成されることがわかる。

図 8 は異なる切り込み深さの条件において、同様に、切削時の画像を観察し、切り屑の形態を分類した結果を示す。図 8 の結果においては、き裂の異方性によって、切り屑の形態が異なることがわかる。そこで、生物材料や異方性の観点から、骨材と類似性を有する木材との比較から、切り屑の形態について議論する。発生する切り屑の形態には、図 8(a)のように、き裂が工具切れ刃の先端や前方の組織に発生するとともに、切り屑が連続的に生成される流れ型切

Fig.7 Process of chip formation in the depth of cut with $t=100\mu\text{m}$.

Fig.8 Fracture type of chip formation and the definition in length and angle of crack propagation.

屑が生じる。このようなき裂を伴う流れ型の切り屑の形態は、木材を細胞が配列する方向に沿って切削した場合に生じる「先害れ」と呼ばれる開き破壊の現象と類似している¹⁰⁾。また、図 8(b)のように、湾曲したき裂が刃先前方に進行し、不連続な切り屑が発生するき裂型切り屑や、図 8(c)のように、切り屑が鋸歯状にせん断すべりを起こし、連続

的に生成されるせん断型切り屑が発生する。図 8(b)のようなき裂の伝播は、木材の細胞が垂直する円周方向から切削した場合、切削方向の斜め前方に発生する「裏割れ」と呼ばれる破壊現象と類似しており、図 8(c)は細胞が切削方向に対して上向きに傾斜して配列している場合に生じるせん断型切り屑と類似する¹⁰⁾。さらに、図 8(d)のように、切り屑が母材からむしり取られるむしれ型切り屑が生成される。このような切削は、木材を細胞の配列方向と垂直に切削する場合に生じる過酷な破壊現象を伴うき裂の発生と類似している¹⁰⁾。

以上の結果から、皮質骨の切削は、木材のような生物系の異方性材料における切り屑の生成機構と類似しており、流れ型やき裂型、せん断型、むしれ型のような切り屑の形態に分類できる。

3・3 破壊挙動における異方組織の影響 骨材の切り屑の発生形態と異方組織との関係について詳細に分析するため、図 8(a)-(d)のような解析方法に従って、き裂が進展する距離 r や角度 ϕ を定量的に評価した。

図 9 は①～⑥の試験片における切削時のき裂進展距離 r と切り込み深さ t との関係について求めた結果である。これらの結果は、1mm の距離切削した時におけるき裂進展長さ r を測定し、10 回の測定結果の平均値とその標準偏差を求めた結果である。試験片を軸方向に平行や垂直に切削した場合には、 $t=20\mu\text{m}$ 以上においてき裂が観察され、軸方向に直角に切削した場合には $t=10\mu\text{m}$ 以上からき裂の進展が認められる。また、①～⑥のいずれ試験片においても、 r の値は t が大きくなるに従って増加しており、切削方向によってその大きさは異なる。すなわち、骨材の破壊の進展は、工具の切り込み量と比例し、その破壊の大きさは切削方向に配列する骨材の組織によって異なることがわかる。

そこで、骨材の異方組織とき裂進展の方向との関係について詳細に調べるため、X および Y 軸からなる平面応力状態のき裂成分に分解し、き裂長さ r_x および r_y との関係に整理した結果を図 10 に示す。図中のデータは、図 9 の結果で得られた各切り込み深さにおけるき裂長さの平均値を r_x および r_y の成分に分解した結果である。各試験片の r_x および r_y の比は、切り込み深さに依存せず、個々の試験片において同一直線上にあり、き裂の進展方向に固有の伝播挙動が認められる。また、試験片①および②のように、骨材を軸方向に沿って切削した場合には、 r_x 成分の値が大きく、試験片③および④では r_y 成分の大きさが増加し、試験片⑤および⑥ではその傾向が著しい。すなわち、切削時に発生するき裂は、規則的な方向性をもっていることがわかる。

そこで、図 11 はき裂進展角度 ϕ と切り込み深さ t

Fig.9 Relationship between the length of crack propagation r and the depth of cut t .

Fig.10 Relationship between the X axis component r_x and the Y axis component r_y in length of crack propagation.

Fig.11 Relationship between the angle of crack propagation ϕ and the depth of cut t .

Fig.12 Morphology of crack propagation in cutting of bone.

との関係について求めた結果である。これらの ϕ の値は、試験片①および②のように、軸方向に沿って切削する場合には、いずれの切り込み深さにおいても ϕ の値は 10° 以下の範囲である。また、軸方向に直角に切削する試験片③および④においては、 $\phi=30^\circ$ 前後の値であり、軸方向に垂直に切削する試験片⑤および⑥においては、 ϕ の値は $60^\circ \sim 80^\circ$ の範囲である。すなわち、き裂が進展する方向は異方組織の影響によって、大きく分けて、タイプⅠ～Ⅲに分類できる。

以上の結果から、皮質骨の切削におけるタイプⅠ～Ⅲのき裂が進展する方向を考慮して、図12(a)-(c)に示すモデルによって、異方組織の破壊挙動を考察する。図12(a)のように、軸方向に切削する場合には、流れ型の切り屑が形成されるとともに、オステオンのラメラ層に沿って、き裂が進展するタイプⅠの破壊挙動によって説明できる。また、図12(b)のように、軸方向に直角に切削する場合には、複数のラメラ層から形成されるオステオンの円筒外周に沿って、き裂が湾曲して発生し、き裂型やせん断型の切り屑が生成されるタイプⅡの破壊挙動が支配的になる。さらに、図12(c)のように、軸方向に垂直に切削する場合には、切削方向に垂直に配列したオステオンのラメラ層間に過酷なき裂を発生させながら、むしろ型の切り屑を発生させるタイプⅢの破壊挙動によって説明することできる。

以上のような破壊挙動は、骨材の切削加工における基礎的な知見を与えるものである。このような破壊挙動の分類は、最適な骨部品作製の基礎資料になる。また、異方組織の破壊に伴い、形成される加工面の性状は、骨部品の精度や母材との癒合に影響を及ぼす。今

後の課題は、骨部品の最適加工条件の検討や加工面の性状との関係について、さらなる知見が望まれる。

4. 結 語

骨材の微視的組織の影響を考慮した2次元切削試験を行い、破壊を伴う切り屑生成の挙動について検討し、以下の結果が得られた。

- (1) 骨材の切削には、連続的な切り屑が発生する場合や断続的な切り屑が発生し、不連続な加工面が形成される異方組織の影響が現れた。
- (2) 皮質骨の切り屑生成の挙動を観察した結果、骨材は木材のような生物材料におけるいくつかの切り屑生成の機構と類似しており、流れ型やき裂型、せん断型、むしろ型のような切り屑の形態に分類できた。
- (3) 骨材は異方組織の影響によって、骨組織に沿って直線的なき裂が進展するタイプⅠの破壊挙動やき裂が湾曲して発生するタイプⅡの破壊挙動、組織間に過酷なき裂を発生させるタイプⅢの破壊挙動に分類できた。

文 献

- (1) Gibson, J, Ashby F, Cellular solids, (1997), pp.429-432, Cambridge University Press.
- (2) Bullough, PG., Vigorita's Orthopaedic Pathology, (1997), 1-36, London, Mosby-Wolfe.
- (3) The Japan Wood Research Society, Wood based material physics(in Japanese), (2007), pp.2-3, Buneido Press.
- (4) Curry, D., Bones Structure and Mechanics, (2002), p.15, Princeton University Press.
- (5) Project promote organization in Shimane University, Annual report of 2007 year for cooperative project in field of medical, engennering and agriculture(in Japanese), (2008), pp.79-90, Shimane University.
- (6) Ohtani T., Nakai T., Kawasaki Y., Mori R., Uchio Y., Cell Migratory Characterization in Micro-Processing Surface of Bone material for Surgery Healing Control, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.75, No.749(2009), pp.191-196.
- (7) Wiggins K., Malkin S., Orthogonal Maching of bone, Transaction of the ASME, Vol.100(1978), pp.122-130.
- (8) Itoh S., Ito Y., Shikita T., Basic study on Bone Cutting Forces for developing Surgical Instrument, Bulletin of JSME, Vol.26, No.222(1983), pp.2295-2301.
- (9) Sugita N., Mitsuichi M., Difference of Cutting Phenomena due to Material and Hydrious Property of Bone, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.73, No.3 (2007), pp.377-382.
- (10) Banshoya K., Okumura S., Hattori N., Murase Y., Cutting process(in Japanese), (2007), pp.22-29, Kaisei Press.