

機関番号：12601  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760081  
 研究課題名（和文）：亀裂制御型骨切除システムの研究  
 研究課題名（英文）：A Cutting System for Bone Based on Crack Propagation Control  
 研究代表者  
 杉田 直彦（SUGITA NAOHIKO）  
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
 研究者番号：73072406

研究成果の概要（和文）：人工関節置換術において、切除される骨の切削抵抗による力学的負担と切削熱による熱的損傷を軽減し、切除精度と切除効率の高い加工法を実現するためには、骨再生効果を最大にするような生体組織の加工を実現する必要がある。そこで、本研究では、切除熱と切除負荷に着目し、(1)骨切除における骨組織と破壊挙動、切除温度の関係、(2)低エネルギー切除を実現するナノ切除法と工具の開発、(3)提案手法による仕上げ面性状の検討を当該研究期間に行った。

研究成果の概要（英文）：The goal is to develop a machining process for biomaterials that is effective in promoting bone regeneration in arthroplasty. Machining temperature, mechanical stress, and form are critical parameters in the successful regeneration of living tissues such as bone. The following investigations were conducted under the theme: (1) investigation of the influence of cutting temperature and force during the machining process on bone regeneration, (2) development of a low power nanoscale machining process and tools, and (3) investigation of the finished surface by the proposed method.

交付決定額

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2008 年度 | 1,900,000 | 570,000 | 2,470,000 |
| 2009 年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 総計      | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野

分野 工学  
 分科 機械工学  
 細目 生産工学・加工学  
 細目表キーワード 生産システム  
 細目表以外のキーワード 生体組織加工

1. 研究開始当初の背景・目的

骨切除を伴う整形外科領域の手術では、加工損傷や切除精度は術後成績に大きな影響を与えるとされる。そのために、切削工具

による骨組織の摩滅や切りくず生成に伴う塑性変形で発生する切削熱による骨細胞の壊死のような熱的損傷を避けねばならない。その一方で、骨切除にかけることができる手術時間は

限られているため、高能率な骨の機械加工も要求される。現在は骨を切除する工具はソーナーが主流であるが、その場合、加工時の発熱による骨組織の壊死や切除面の形状精度の劣化などが指摘され、それを補完した新しい加工法の開発が望まれる。

皮質骨の切削では、切り込み厚さが小さいとき ( $20\ \mu\text{m}$  以下) には、大きな比切削抵抗をともなって準連続型の切りくず形態を示すが、切り込み厚さが大きくなると、切りくずは脆性き裂を伴った破壊により生成され、単位除去量あたりの切削抵抗は却って小さくなる傾向にある。そこで本研究はこのことに着目し、制御された脆性き裂を任意に発生させて切削抵抗を減少することによって、加工エネルギーを軽減し切削温度と加工負荷による組織の損傷を回避しようと試みる。これに加えて、脆性き裂による加工面粗さの劣化を避けるための新しいき裂制御方法も考案した。

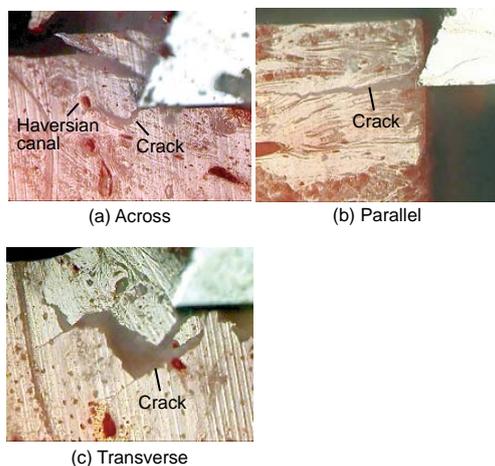


図 1： 切削方向によるき裂進展。

## 2. 研究方法

### (1) 骨切除におけるき裂進展制御

脆性破壊だけでき裂型切りくずを生成すると、流れ型切りくずやせん断型切りくずを生成する切削に比べて比切削抵抗が低くなることが分かった。これは切削に要するエネルギーが低いことを意味しているため、被削材の内部発熱は比切削抵抗の高い場合よりも低くなると推測される。そこで、意図的にき裂を発生させる切削について検討するために、力を与えた時の亀裂進展挙動を観察実験から検討した。図 1 において(a)は接線方向、(b)は平行方向、(c)は横断方向に力を加えたときのき裂の動的観察結果である。

本実験によって、力とき裂長さの間に相関関係が見られるが、骨組織に関連した切削方位によってはその進展方向は大きくばらついた。これはき裂の進展方向は工具が衝突する場所の骨の組織構造に左右されるのが原

因と考えられる。特に、力を  $5\ \text{N}$  以下にすれば、どの方位の切削においても亀裂の長さを  $50\ \mu\text{m}$  以下に抑えることが可能であった。この結果は、一度に長い亀裂を発生させるのではなく、短いき裂を順々に発生させることで、き裂を発生させながらその長さと方向を制御した加工を行うことが可能であることを示唆している。そして短い亀裂ならば仕上げ面精度を低下しにくいことも推察できる。しかしながら、刃先の斜め下方へき裂が進展しやすいことによる仕上げ面粗さの劣化に配慮しなければならない。そこでこのようなき裂の特性を考慮したき裂制御型加工法を次の節で提案する。

### (2) き裂進展制御型骨切除法の提案

皮質骨は脆性的な材料であるために大きな切込において顕著な脆性き裂を発生する。しかもその脆性き裂は断熱的に発生することが予想されることから、発生する脆性き裂の大きさや方向を制御することによって温度上昇を軽減する除去加工が可能だと考えている。高能率切除を行うためには大きな切込みの切削を行わねばならず、その場合には、脆性き裂の発生に大きな力が必要となる。しかも、必要なレベル以上の加工精度を維持するためにはき裂を仕上げ面より下で発生しない制御が望ましい。通常の切削では、正のすくい角をもつ工具を用いると刃先近傍の引張応力によってき裂は刃先斜め下方方向に進展しやすい。そこでこの問題を回避しながら脆性的き裂の大きさと進行方向を制御するために、き裂制御型加工法を提案する。

図 2 に提案する手法の概念図を示す。まず、工具送り方向に工具を進め、被削物に切り込みをいれる (図 a)。工具に機械的衝撃を加えて斜め上方方向にき裂を生成し (図 b)、き裂で囲まれた部分を切りくずとして排出する (図 c)。次工具を斜め下方方向に戻し (図 d) 工具を再び前に進めて仕上げ面を切込みなしで微細切削して仕上げる (図 e)。そしてこの加工サイクルを繰り返して骨除去を完了する。この加工法における工具の動きはフライス加工におけるカッターブレードの運動とよく似ており、例えば、エンドミルカッターのサイドブレードを利用したミリン

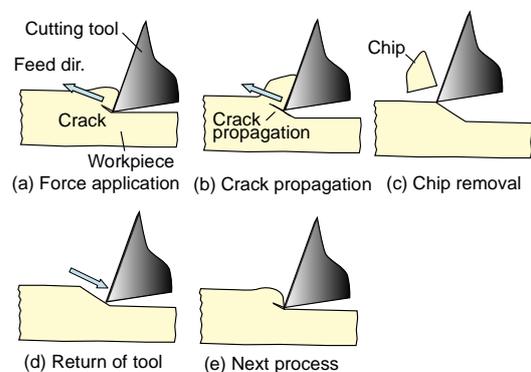


図 2： 提案手法。

グで実現可能であることが推測される。

### 3. 研究成果

#### (1) 切除挙動

提案した手法を用いて牛皮質骨を Across direction に加工した時の切削挙動を図 3 に示す。この時の実験条件は工具すくい角  $20^\circ$ 、工具進行角  $15^\circ$ 、工具送り速度  $3 \text{ mm/sec}$ 、切込み深さ  $100 \mu\text{m}$  である。まず、工作物に適切な切り込みを与える (a)。仕上げ面に対して斜め上方に工具進行方向をとりながらき裂を発生させる (b)。この操作により、き裂の進展に伴い囲まれた領域が切りくずとして排出される (c)。この時、切除対象領域のうち多くの部分が切除される。最後に工具を仕上げ面と平行に進めることで残領域を削り、仕上げ面を生成する (d)。大部分が(c)にて排出されているため、このス

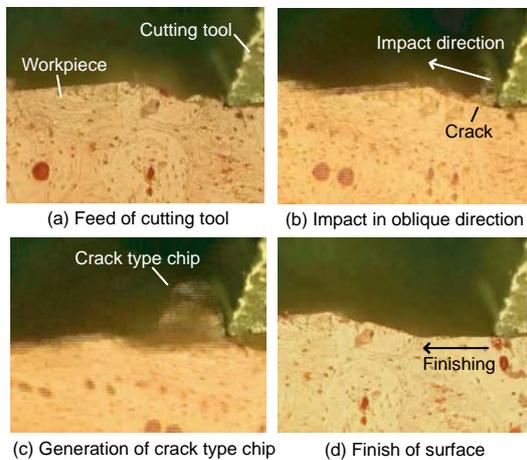


図 3：提案手法による骨切除。(すくい角  $20^\circ$ 、工具進行角  $15^\circ$ 、切込み  $100 \mu\text{m}$ )

トップの切込みは非常に小さなものとなるため、仕上げ面精度の向上が期待される。

#### (2) 工具進行角によるき裂進展の相違

工具進行角を  $75^\circ$  とした場合を図 4 に示す。図 3 の場合と同様に適切な切り込みを与えた後 (図 a)、工具進行方向に衝撃力を与え、き裂を発生させる (図 b, c)。そして、残った領域を小さな切込みで仕上げる (図 d)。この方向に加工を行う場合、実質のすくい角は負となり、き裂の発生方向が図 3 の場合とは異なる。そこで、有限要素法を用いてき裂の出現についても検討した。

#### (3) 切削方向の違いによる切除挙動の違い

き裂型切りくずの形状、大きさにおいて各切削方向の違いが見受けられる。接線方向と軸方向では、斜め下方向にき裂が発生した後に層板に沿うようにき裂が進展する。そのため、接線方向では丸型の切りくずが、軸方向では大きな切りくずが生成される。横断方向では、オステオンを横断するような形でき裂

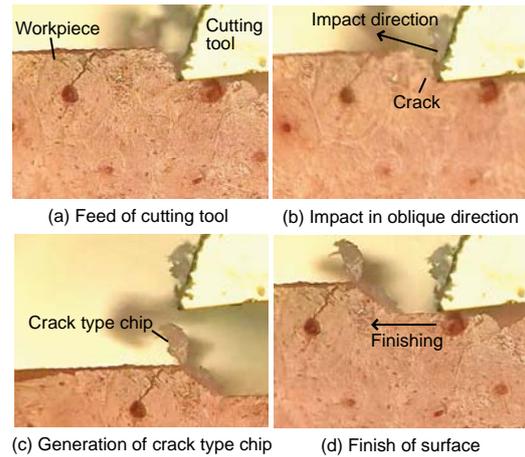


図 4：提案手法による骨切除。(すくい角  $20^\circ$ 、工具進行角  $75^\circ$ 、切込み  $100 \mu\text{m}$ )

が進展するため、比較的大きい切りくずが生成される。工具進行角が  $75^\circ$  の場合、組織方向の違いは接線方向と軸方向では工具進行角  $15^\circ$  の場合と同様の切りくず形態であった。しかしながら、横断方向では斜め切削角  $15^\circ$  以外ではき裂型切りくずを生じなかった。

#### (4) 切削抵抗および仕上げ面精度

図 5 は工具進行角と切削抵抗の関係を示す。工具すくい角は  $20^\circ$  で一定である。工具進行角が  $15^\circ$  の場合では引張応力によるき裂型切りくずが支配的であり、大規模なブロック型切りくずを生じることから除去量あたりの切削抵抗は小さい。一方、工具進行角が  $45^\circ$  を越え、実質のすくい角が負となると応力場が圧縮になり、き裂が最大せん断応力方向に発生する。このとき、切削抵抗は大きくなる。この結果より、同じ工具すくい角でも、圧縮応力場を利用してき裂型切りくずを生成するよりも、引張応力場を利用したほうが切削抵抗を低く出来ることがわかる。一方、加工後の仕上げ面粗さによれば、

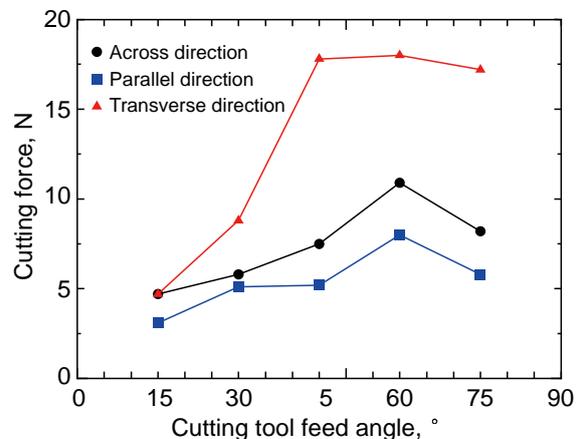


図 5：工具進行角と切削抵抗の関係

工具進行角による有意な差は認められないが、どの条件においても最大高さ粗さが 10  $\mu\text{m}$  程度であり、骨の機械加工における要求精度を満たしている。これは、き裂の発生形態に関わらない。

最後に、最大表面粗さを切削方法で比較したものを図 6 に示す。提案する加工方法において工具進行角が 15° および 75° の場合には、表面粗さが約 10  $\mu\text{m}$  以下となり、加工条件が同条件であれば加工精度を向上させることが可能であることが分かる。特に、工具進行角が 75° の場合はそのばらつきも小さい。ただし、切削抵抗に関しては前述のよ

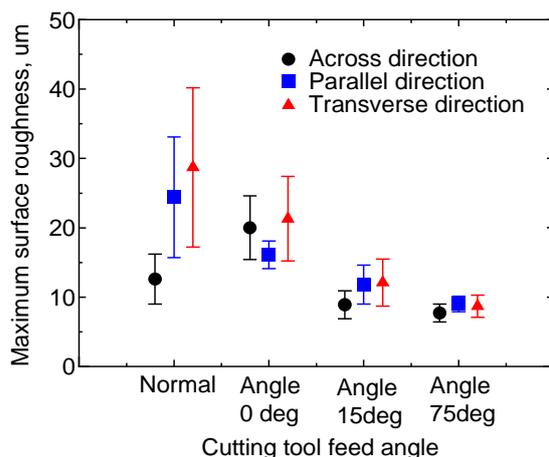


図 6：切削方法による最大面粗さの相違

うに工具進行角を 15° にとった方が小さくなる。

#### 4. おわりに

提案する加工方法は、骨切除の高効率化を図りながら、切削温度と加工負荷の低減による低侵襲化治療を実現することを目的とする。このことによりこれまでの骨切除加工の欠点を補うとともに、ボーンソーやエンドミルに代わる次世代の骨切除工具を提案できると考えている。この加工法の主な利点は、き裂を利用することにより必要な加工エネルギーを低減することと、工具の送り方向を適当に選択することで発生したき裂が仕上げ面に及ぼす影響を小さくすること、および、仕上げ加工の実切込みが小さくなることで仕上げ面の粗さ精度が向上できることである。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 11 件)

- ① 杉田直彦, 中島義和, 光石衛, 整形外科用骨切除装置における動的制御型加工法の提案, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 44(4), 2008, 377-383.
- ② Sugita,N., Osa, T., Mitsuishi,M.,

Analysis and Estimation of Cutting-Temperature Distribution during End Milling in Relation to Orthopedic Surgery, Medical Engineering & Physics, 査読有, 31, 2009, 101-107.

- ③ 杉田直彦, 源馬文章, 長隆之, 中島義和, 加藤丈晴, 光石衛, 多軸医用加工機のための工具経路決定法, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 74(743), 2008, 1907-1910
- ④ 杉田直彦, 光石衛, 皮質骨の 2 次元切削におけるオステオンの破壊挙動, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 査読有, 29, 2008, 175-179.
- ⑤ 杉田直彦, 源馬文章, 長隆之, 中島義和, 森雅彦, 新家秀規, 光石衛, 医用ミリング・ロボットの加工精度向上に関する研究, システム制御情報学会誌, 査読有, 22(2), 2009, 66-73.
- ⑥ Sugita,N., Nakano,T., Osa,T., Nakajima,Y., Fujiwara,K., Abe,N., Ozaki,T., Suzuki,M. and Mitsuishi,M., Cutting Tool Protects for Soft Tissues in Bone-Milling Machining, International Journal of Automation Technology, 査読有, 3(2), 2009, 185-192.
- ⑦ Sugita,N., Nakano,T., Nakajima,Y., Fujiwara,K., Abe,N., Ozaki,T., Suzuki,M., Mitsuishi,M., Tool Path Generator for Bone Machining in Minimally Invasive Orthopedic Surgery, IEEE Transactions on Mechatronics, 査読有, 2010, in press.
- ⑧ Sugita,N., Mitsuishi,M., Specifications for machining the bovine cortical bone in relation to its microstructure, Journal of Biomechanics, 査読有, Vol.42, 2009, 2826-2829.
- ⑨ Nakano,T., Sugita,N., Kato,T., Fujiwara,K., Abe, N., Ozaki,T., Suzuki,M., Mitsuishi,M., Interference free tool path generation in multi-axis milling machine for orthopedic surgery, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.3, No.6, 2009.
- ⑩ Sugita,N., Nakano,T., Nakajima,Y., Fujiwara,K., Abe,N., Ozaki,T., Suzuki,M. and Mitsuishi,M., Dynamic Controlled Milling Process for Bone Machining, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.209, No.17, 2009, 5777-5784.
- ⑪ Sugita,N., Osa,T., Aoki,R. and Mitsuishi,M., A New Cutting Method for Bone Based on Its Crack Propagation Characteristics, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 査読有, Vol.58, No.1, 2009, 113-118.

〔学会発表〕(計 12 件)

- ① Sugita,N., Osa,T., Nakajima,Y. and Mitsuishi,M., Deformation Analysis and Active Compensation of Surgical Milling Robot Based on System Error Evaluation, IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA'08), 2008.5.19, Pasadena, USA.
- ② Sugita,N., Genma,F., Osa,T., Nakajima,Y., Mitsuishi,M., Mori,M., Saraie,H., Performance Improvement of a Medical Milling Robot, ASME International Symposium on Flexible Automation (ISFA2008), 2008.6.23, Atlanta, USA.
- ③ Sugita,N, Osa,T., Nakajima,Y. and Mitsuishi,M., Optimization of Toolpath Generation in Medical CAM for a Machine Tool for Orthopedic Surgery, The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2008.5.26, Tokyo, Japan.
- ④ Osa,T., Sugita,N., Mitsuishi,M., Fujiwara,K., Abe,N., Ozaki,T. and Suzuki,M., Approach to Protect Soft Tissues in Robotic Assisted Surgery, Computer Assisted Radiology and Surgery 22nd International Congress and Exhibition, 2008.6.25, Barcelona, Spain.
- ⑤ Sugita,N., Osa,T., Nakajima,Y., and Mitsuishi,M., A Cutting Tool System to Protect Surrounding Tissues in Robotic Assisted Surgery, International Conference on Manufacturing and Automation, 2008.9.24, Kobe, Japan.
- ⑥ Sugita, N., Osa,T., Mitsuishi, M., Dynamic Analysis of Osteon Fracturing and Crack Propagation for a New Bone Cutting Device, 9th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 2009.6.2, San Sebastian, Spain.
- ⑦ Sugita,N., Nakano,T., Nakajima,Y., Fujiwara,K., Abe,N., Ozaki,T., Suzuki,M. and Mitsuishi,M., An intra-operative simulator for incision position and size in minimally invasive arthroplasty, Computer Assisted Radiology and Surgery 23rd International Congress and Exhibition, 2009.6.23, Berlin, Germany.
- ⑧ 長隆之, 杉田直彦, 中島義和, 藤原一夫, 阿部信寛, 尾崎敏文, 鈴木昌彦, 光石衛, 最小侵襲手術における軟部組織保護を目的とした工具開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 2008.6.5, 長野.
- ⑨ Nakano,T., Sugita,N., Nakajima,Y., Kato,T., Fujiwara,K., Abe,N., Ozaki,T., Suzuki,M., and Mitsuishi,M., Tool Path Generation to Protect Soft Tissue with Multi-axis Milling Machine, The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2009.12.2, Osaka.
- ⑩ Sugita,N., Nakano,T., Nakajima,Y., Fujiwara,K., Abe,N., Ozaki,T., Suzuki,M., Nakashima,Y., Kuramoto,K., Inoue,T. and Mitsuishi,M., An intra-operative simulator for incision position and size in minimally invasive arthroplasty, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2009.6.24, Berlin.
- ⑪ Sugita, N., Osa,T., Mitsuishi, M., Dynamic Analysis of Osteon Fracturing and Crack Propagation for a New Bone Cutting Device, Proceedings of the euspen International Conference, 2009.6.2, San Sebastian.
- ⑫ 藤原一夫, 阿部信寛, 西田圭一郎, 尾崎敏文, 鈴木昌彦, 斉藤季, 杉田直彦, 中島義和, 光石衛, 井上貴之, 藏本孝一, 中島義雄, 低侵襲型人工膝関節置換術支援ロボットの精度評価, 第18回日本コンピュータ外科学会大会, 2009.11.21, 東京.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

杉田 直彦 (SUGITA NAOHIKO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号 : 73072406

### (2)研究分担者

なし