

エアタービンによる低侵襲骨切りデバイスの基礎研究

Study for the less invasive bone cutting device with an air turbine

○ 藤澤亮介¹ 青木寛訓¹ 山下紘正¹ 正宗賢¹ 中島勸² 土肥健純¹
¹東大情報理工 ²東大医

Ryosuke Fujisawa¹ Hironori Aoki¹ Hiromasa Yamashita¹ Ken Masamune¹
 Susumu Nakajima² Takeyoshi Dohi¹

¹Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo

²Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, the University of Tokyo

Key Words: Minimally invasive surgery, Osteotomy, Air turbine

1. 背景

軟骨無形成症による低身長、脚長不等、四肢短縮等の患者に対して仮骨延長法と呼ばれる手術が一般に行われている。これは創外固定器で両端を固定した骨を人為的に切断し、骨が本来持つ再生力を引き出すことで骨の延長を可能にする外科的治療である。創外固定器によって張力をかけ続けることで筋や血管等周辺の軟組織も骨と同様に増大するため、腕や脚の延長が可能となる。骨を覆っている繊維状の膜である骨膜や骨内部の軟組織である骨髄は骨の成長に大きな役割を持っている⁽¹⁾。そこで、骨の切断を行う際には骨膜や骨髄の温存、さらには骨周辺の筋や血管等の軟組織に対して低侵襲であることが理想とされるが、現状では熟練した医師が骨のみとハンマーを用いて狭い視野で切断を行っており、骨周辺の軟組織を温存しつつ骨の切断を行うことは非常に困難である⁽²⁾。そこで、より低侵襲で、容易に骨の切断を可能にするデバイスの開発が求められる。

2. 目的

本研究では、骨延長手術において、低侵襲かつ効率のよい骨の切断を可能にするデバイスの開発を目的とする。

具体的には、

- I. 脛骨、大腿骨等ある程度の太さと皮質骨の厚さをもつ長管骨の切断が容易に行える切断方法を検討する。
 - II. 皮膚や筋等を大きく切り開かず骨の切削が行え、かつ骨髄や骨膜をなるべく温存しながら骨の切断を行える機構を考案する。本研究では特に、骨膜の温存に焦点を絞る。
 - III. 骨の切削実験を行い、切削効率、切削力、切断面の温度上昇を評価する。
- 以上の三点を目的とする。

3. 方法

本デバイスの要求仕様としては、

- 1) 大腿骨程度の太さの骨を短時間で切断できること
 - 2) 筋や血管、骨膜の温存が可能な機構であること
 - 3) 切削の際に生じる発生熱を抑制し、熱変性が生じる 47℃程度まで骨の温度を上昇させないこと⁽³⁾
- 以上の三点があげられる。

骨の切削を行う手段として、電動鋸、電動回転刃、超音波メス、集束超音波、Er:YAG レーザなどが研究されている。電動鋸は切削能力に優れる⁽⁴⁾が、骨膜や骨周辺の軟組織への侵襲は大きくなる。超音波メスは硬組織のみを選択的に切削できるため低侵襲の手術が可能である⁽²⁾。しかし、切削能力が低く骨の切断に時間がかかりすぎてしまうという問題点がある。集束超音波は皮膚や筋を切開することなく

体内の骨のみを切除できる可能性があるが、切削能力が低く、現段階では骨の切除は極めて困難である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。Er:YAG レーザは低侵襲で骨の切削を行えるものの⁽⁷⁾⁽⁸⁾、切削能力が不十分であり効率よい骨の切断には向かない。そこで、本研究では骨内部に導入可能な小型の電動回転刃による切削を提案する。電動回転刃の駆動にはマイクロモータ方式とエアタービン方式が考えられるが、小型化可能な後者を用いる。

具体的な切削方法については、エアタービンの先端にダイヤモンドバーを取り付け高速回転させることで、回転軸と水平方向と垂直方向の二方向への切削能力を得る。この特徴を利用して、Fig.1 に示すように骨を内部から切削する。骨の一点から穴をあけてデバイスを挿入し、骨の内部で回転部分の上下・回転運動を行うことで、骨膜や骨周辺の軟組織に対して低侵襲な骨の切断が可能になる。

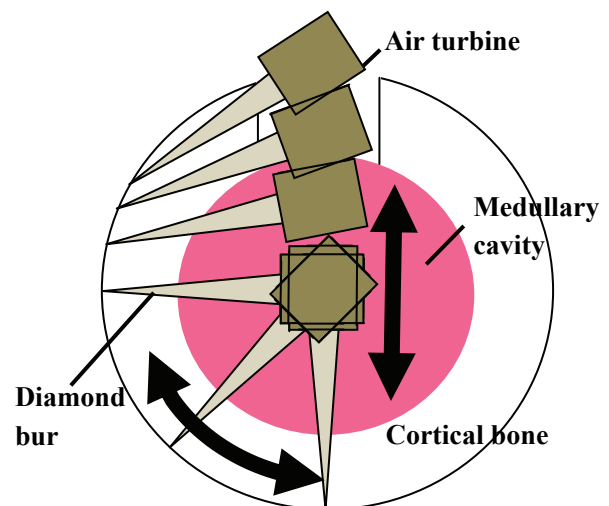


Fig.1 Method of cutting

そこで、本研究では先端の切削部分のプロトタイプを製作し、エアタービンによる骨の切削特性を評価する。製作した骨切りデバイスを Fig.2 に示す。デバイス内部には、外径 8.9 mm のエアタービン(NTF-MU03, Nakanishi)が組み込まれている。切削部は、ダイヤモンドバー(直径 1.6 mm, 刃長 11 mm, N4, Komet)を用いた。また、本システムの構成図を Fig.3 に示す。

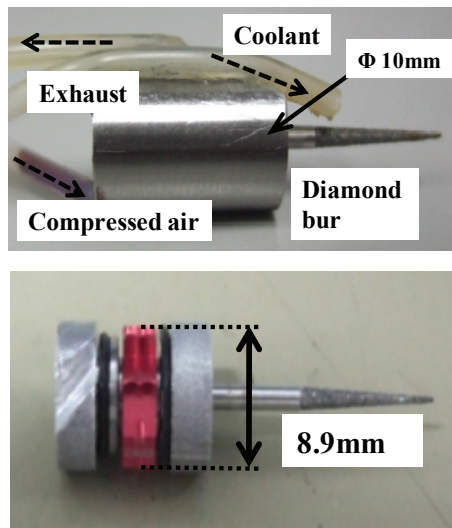


Fig.2 Developed air turbine device. Top) : overview of device
Bottom) : air turbine inside the device

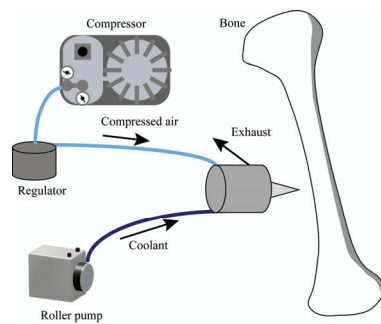


Fig.3 System configuration

4. 評価実験

4-1 エアタービンデバイスの性能評価

エアタービンの性能評価には一般に回転数とトルクの値が用いられる⁽⁹⁾。空圧駆動による回転数とトルクの値を測定したところ、0.5 MPa 時に無負荷時の回転数が 3.5 ± 0.2 [$\times 10^5$ rpm], 最大トルク 2.56 ± 0.29 [$\times 10^{-4}$ Nm] となった。同一回転数時に約 8×10^{-4} [Nm] のトルクを発生する歯科用エアタービンと比較して、本エアタービンはトルク効率が 32% という結果になった。

4-2 切削力の評価

骨の切削時に生じる切削力を測定した。ここでは、切削力を Fig.4 の F_T と定義する。力学センサの真上に骨を固定し、その後、真上から垂直にバーを押しあてていき、骨の切削を行っている時のセンサの F_Z の値を測定することで、 F_T の値が得られる。皮質骨を切削する際の切削力は 0.45 ± 0.07 [N] であった。一方で骨膜は容易に切離されず、1.6[N] 程度の力を加えてもダイヤモンドバーで骨膜が切離されることはなかった。

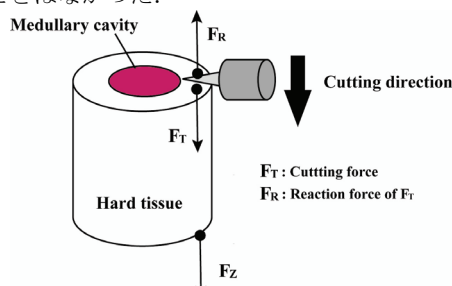


Fig.4 Definition of cutting force

4-3 切削効率の評価

ダイヤモンドバーを用いて直径 25 mm、皮質骨の厚さ 6 mm のブタの大腿骨の切断実験を行ったところ、8 分程度で切断を完了した。切断面を Fig.5 に示す。切削速度は平均して 1.1 [mm^2/sec] であった。

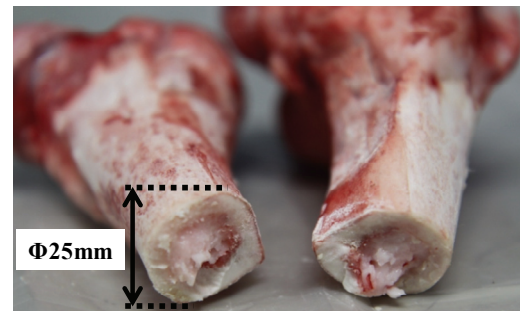


Fig.5 Cutting surface of the femur

4-4 温度上昇の評価

サーモグラフィで骨の表面温度を測定しながら切削実験を行った。冷却水を灌流させずに切削を行った場合と灌流させながら切削を行った場合の温度分布を Fig.6 に示す。無冷却の場合は切断面の最高温度が 57.9°C まで上昇していたが、冷却水を灌流させた場合、切削部位の温度は最大でも 40°C 程度までに抑えられた。

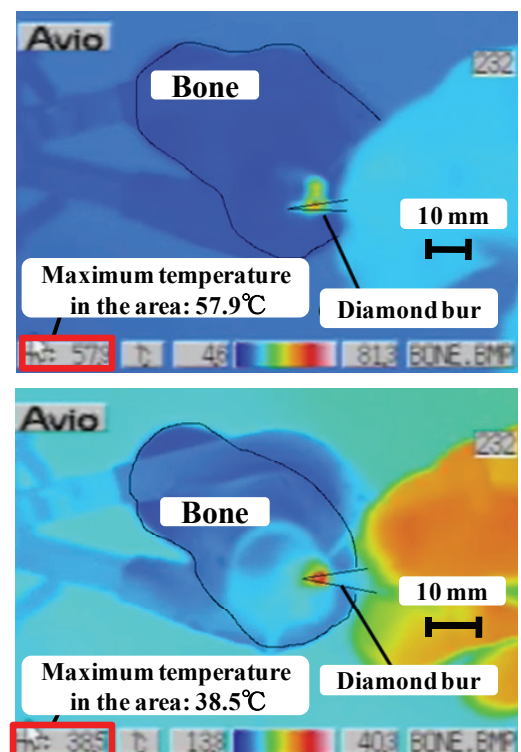


Fig.6 Temperature rise of the cutting surface
Top) : without cooling Bottom) : with cooling

5. 考察

本エアタービンの最大トルクは、無負荷回転数 35 [$\times 10^4$ rpm] の場合において、従来の歯科用エアタービンの約 32% であった。これは、ロータとパイプの間の空気漏れや圧縮空気の管内損失が原因と考えられる。しかし、空気圧を高くして回転数を上げるにより、骨の切断に十分な出力を得ることは可能である。また、実際にブタ大腿骨の切断を行い、およそ 8 分で切断が可能であった。従来のデバイスでは 30 分以上要していることを考慮すると、本デバ

イスを用いれば従来デバイスに比べて短時間で効率のよい骨の切削が行えると考えられる。深部の切削の際には摩擦が増大し、バーの回転が停止する現象が幾度か生じたものの、バーを骨に押しつける力を小さくすれば切削時の摩擦を軽減することができるため、回転停止の回避は可能である。切削力の評価からは、本デバイスを用いれば骨膜は容易には切離されることが示された。また、本デバイスで骨の切削を行う際には多量の熱が発生するものの、冷却水を灌流することで臨床上問題ない範囲に骨の温度上昇を抑えられることも確認できた。

今後はデバイスの小型化を行い、骨を内側から切削する機構を実装する。さらに、骨髓の温存方法について検討する。

6. 結論

エアタービンを用いた新たな骨切りデバイスを開発し、骨の切削性能を評価した。温度上昇を臨床上安全な範囲に抑えつつ、従来のデバイスよりも短時間で骨の切断が可能であった。さらに、本デバイスで骨膜や骨周辺の軟組織を温存しつつ硬組織のみを選択的に切削できる可能性が示された。

参考文献

- (1) 立川勝司, 仮骨延長法についての実験的研究-特に年齢因子と骨膜, 骨髓の役割に関して-, 広大医誌 40(5), pp.389-403, 1992.
- (2) 石井洋馬, 原幸司, 小林英津子, 矢作直樹, 土肥健純, 辻隆之, 稲田紘, 佐久間一郎, 超音波メスを用いた骨切断デバイスの切断制御に関する研究, 第 11 回日本コンピュータ外科学会大会 合同論文集, pp.133-134, 2002.
- (3) Eriksson R.A., Albrektsson T., The effect of Heat on bone regeneration, Journal of Oral & Maxillofacial Surgery 42(1984), pp.705-711.
- (4) 鄭常賢, 小林英津子, 矢野英雄, 佐久間一郎, 振動型骨切デバイスを用いた寛骨臼回転骨切り支援システム, 第 14 回日本コンピュータ外科学会誌, vol.7, no.3, pp.317-318, 2005.
- (5) Satoshi Ishida, Nobuhiko Hata, Takashi Azuma, Shinichiro Umemura, Takeyoshi Dohi, Non-invasive osteotomy using focused ultrasound, Second Joint EMBS-BMES Conference 2002, pp.368, 2002, Houston, Texas, USA.
- (6) 鵜飼勇至, 松宮潔, 波多伸彦, 東隆, 梅村晋一郎, 土肥健純, 体外衝撃波骨切除用デバイスの切除効果の向上に関する研究, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会/第 14 回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集, pp.67-68, 2004.
- (7) 金大永, 松宮潔, 波多伸彦, 矢野英雄, 土肥健純, 寛骨臼回転骨切り術のための Er:YAG レーザ骨切りマニピュレータの開発, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会/第 14 回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集, pp.63-64, 2004.
- (8) 石田悟史, 波多伸彦, 三好克実, 季林紅, 前田隆秀, 土肥健純, 寛骨臼回転骨切り術支援ツールとしての Er:YAG レーザの適用, 第 10 回日本コンピュータ外科学会大会抄録集, pp.103-104, 2001.
- (9) 宮入裕夫, 永井正洋, 福田秀昭, 村松篤良, 歯科用エアタービンハンドピースの性能に関する研究(Ⅲ)エアタービンハンドピースのトルクの測定, 歯科理工学雑誌 vol21, no.53, pp.41-47, 1980.