

論文の内容の要旨

論文題目 Er : YAG laser Bone Cutting Device for Application of
Precise Osteotomy
【Er : YAG レーザを用いた整形外科用精密骨切り装置の開発】

氏 名 金 大永

1. 序論

医療分野におけるレーザー応用は、生体組織の切除・凝固・発熱などの作業が可能で、角膜切除、結石の破壊、肥大前立腺の治療などにも応用され成功している。レーザーの臨床応用のための研究で特に注目を浴びているのは骨切りへの応用である。レーザー骨切りは精度良く、複雑な切り方が可能で、その骨表面での反力が小さいながら滑りがないという優れた点を持っている。しかしながらレーザー骨切りはその低い切削能力と切削時の熱による炭化作用などによって再生が困難になり、整形外科での臨床応用は試されていない。本研究では、最も水への吸収率の高い Er:YAG レーザ（波長 $2.94\mu\text{m}$ 、パルス波、1-20Hz、パルス幅 $200\mu\text{sec}$ ）を用いて整形外科のためのマニピュレータを製作し、評価する。特に、熱による損傷を無くすために水による冷却を用いてその影響を測定し、熱損傷なしでの骨切り効率を最大化する。また、その条件を用いて低い切削効率を活かした適応とレーザー骨切りに相応しい機構を用いた整形外科用マニピュレータを提案する。

2. 予備実験

予備実験では、冷却水の影響、レーザービームの移動速度による影響、および周波数の影響を測定し、熱損傷を伴わない骨切りの最も効率の高いパラメータを求めた。Er:YAG レーザは、骨に含まれる水分を蒸発させ、その力でマイクロ爆発を起こしながら (ablation) 骨切りを行なう。しかし、熱損傷防止のための用いる水は、Er:YAG レーザエネルギーの吸収率が高く、そのエネルギー吸収のレベルを測定する必要がある。本研究では 0.75mm から 2.0mm まで、水の高さを持つガラス張りの実験装置を製作し、ガラスだけを通した際のエネルギーと中に水を通したときのエネルギーの差を測定した。その結果、 1.0mm の水層で約 $200\text{W}/\text{cm}^2$ のパワー密度のレーザーは 60%程透過する事を確認した。手術の現場では血液な

どによる影響があるため、血液による影響も測定した。血液での透過率は同じパワー密度で水での透過率を上回る 80%ほどであることを確認した。

レーザービームの移動を製作した 4 自由度の実験用マニピュレータにより行い、切削用の材料はブタの肩甲骨（測定密度 1.73g/cm^3 ）を用いて、 1.0mm/sec から 3mm/sec まで変更させながら移動速度の最適化を図った。同じパワー密度を維持するためにはレーザー照射部のファイバー先端と骨表面との距離を一定に保つ必要がある。本研究では手術現場の厳しい環境を考慮し、外乱に強い接触式センサを用いた。レーザービームの移動速度はレーザーに照射される部分がどれほど重複しているかを表現し、その数が 9 のとき、その切除効率は $0.52\text{cm}^2/\text{sec}$ であった。周波数による影響を測定した結果、 10Hz 以上では切除効率は殆ど変化がなかった。しかし、移動させながら骨を切ることを考えると同じエネルギーなら 20Hz の方が単位時間あたりにより多くの骨が切除可能と思われた。

3. Er:YAG レーザを用いた寛骨臼回転骨切り術マニピュレータの開発

寛骨臼回転骨切り術（Rotational Acetabular Osteotomy : RAO）は、変形性股関節症の治療法として股関節機能を温存したまま生体力学的に安定な形態に関節を修復する。人工股関節を用いるのとは異なり、唯一解剖学的にも力学的にも正常に近い関節を形成できるため大変優れている。しかし、その切り方も精度が要求されるため、熟練した技術が要求され、多数の切開口から切削道具を挿入して行うため、大きい切開により侵襲もかなり大きくなる。十分な精度と低侵襲的な手術を目的に、本研究では水への吸収率が高い Er:YAG レーザでの骨切りを採用した。レーザーを用いる骨切りは、切除時の反動が少なく、任意の部位を的確に切離することができ、複雑な形でも精度良く切ることができる。また、進入部が小さく、低侵襲で患者への負担が少ない。しかし、股関節の周りには筋肉や靭帯などがあるため、骨との間に作業空間を安全に確保する必要がある。また、精度を良くするためには骨とレーザー照射部との間隙を保ち、レーザー照射部と骨の表面までの距離も維持する必要がある。そこで本研究では、より高い精度を持つ骨切りとして、Er:YAG レーザを用いた寛骨臼回転骨切り術用マニピュレータの開発を行なう。切削時の反力が少ないことからマニピュレータは腸骨にマウントし、応力が集中する腸骨の端部分を約 90 度の円弧を書きながら硬い皮質骨だけ切除することを目的とした。製作したマニピュレータの評価としては、円弧状に切る切除部の曲率半径、切除効率、温度の上昇を測定する。

製作したマニピュレータは、剥離部とレーザー照射部から構成される。マニピュレータは、パッシブホルダに固定され、骨にマウントした状態で駆動される。剥離部は骨とマニピュレータの位置を固定するためのマウント機構と剥離機構から構成され、レーザー照射部は円く切るための円弧状切除機構、および照射部と骨との距離を保つ間隔維持機構から構成される。

剥離部：マウント機構は上下振動防止の 4 本のピンと、滑り止めの 4 本のピンで行なう。剥離機構はマウント機構の上に固定される。リンク機構により剥離用のブレードが前進し、

ストッパによって上下運動を始め、筋肉などを骨から剥離し、レーザー照射のための作業空間を確保する。

レーザー照射部：円弧状切除機構は、4節リンクにより一定の曲率（曲率半径 30mm）で切除することが容易である。間隔維持機構は、骨切りの際、血液や骨の欠片等の劣悪な環境下でも動作可能な接触式である。プローブ先端部にかかる力を力センサに伝達し、その値によりプローブを上下させて間隔を維持する。先端の高さは 8mm まで可能である。

評価実験：評価用には平らな表面を持つブタの肩甲骨を用いた。密度は 1.73 g/cm^3 （測定値）、表面を曲率半径 30mm でレーザー照射部の速度を調節しながらマニピュレータを駆動した。骨の炭化作用を防ぐために使用した冷却水は 17°C 、流量 $3 - 5 \text{ ml/min}$ とし、照射の際、サーモグラフィで骨の温度上昇をリアルタイムで測定した。

実験結果：曲率半径は $30.0 \pm 0.3 \text{ mm}$ であった。ある一点に対して重複照射される回数をパラメータとして、深さ、幅の切除量を計測した。幅は 1.5 mm で深さ 1.75 mm の溝が約 15 分で作成可能なことを確認した。サーモグラフィによる温度測定の結果、レーザー照射口直下の水面温度は最高 41.7°C で、5 秒以下であった。また、高温の範囲はレーザー照射口直下から半径約 5 mm であった。

4. 考察

冷却水を使用しても、レーザーは水を蒸発させて出来た空間を通してエネルギーの殆どを透過させた。レーザーパルスの一大部分の $32 \mu \text{ sec}$ はその蒸発に使い、その残りのエネルギーは透過されることになる。計算により 200 W/cm^2 のパワー密度で作られる空間は約 1.3 mm の高さを持つことによって、骨表面とレーザー照射の先端部との間隔が計算可能である。移動させながら骨切りを行なった際に $208 \mu \text{ mg/J}$ の切除効率は、冷却水なしでの切除率と比べ、ほぼ同じでありながら熱による損傷は認められなかった。熱による損傷は目視可能な炭化作用で確認すると同時に、その温度の変化でも再確認した。文献により作成した公式により、例えば骨表面の温度が冷却水なしで 76°C が続いても 5 秒以内の露出時間では骨に対してその悪影響がないと推測される。

レーザーによる正確な骨切りを十分生かすために、マニピュレータによるレーザー骨切りを試した。その応用例として、従来の方法では侵襲的で複雑な寛骨臼回転骨切り術を目標とした。狭い作業空間での骨切りが可能で、更に骨にマニピュレータをマウントすることによってレーザー骨切りの可能性を確認した。応用の方法と対象によっては、レーザーでの整形外科における応用の可能性がき極めて高い。

5. 結論

レーザー骨切りはその精度は良いものの、切除の後、熱による組織への損傷が残る。その切除効率が悪く臨床応用には切除時間が長いなどの問題があった。しかし本研究では冷却水を用いて熱による損傷を無くしながら、マニピュレータによりレーザービームの移動速度

や骨との間隔を一定に維持することにより、冷却水なしでの条件とほぼ同じ切除効率を実現した。

その応用として、寛骨臼回転骨切り術に適用可能なマニピュレータを製作した。腸骨にマニピュレータを固定して筋肉などを骨から剥離し、切削精度の必要な部分のみをレーザーで切除することにより、レーザー骨切りの臨床応用への可能性を示した。剥離機構で作業空間を確保すれば、±0.3mm とより精度の良い骨切りが可能であった。骨に損傷を与えるほどの温度の上昇は見られず、骨の炭化も認められず、熱損傷に対する安全性を確認した。今後はより低侵襲の手術が可能になるように、更なる小型化が必要であり、レーザー照射部が曲がる機構の研究や、効果的な冷却方法も研究すべきである。