エキシマレーザーの骨穿孔特性の向上

岡田和之, 土井建治, 久保宇市

近畿大学理工学部

Enhancement of Bone Incision by Excimer Laser

Kazuyuki OKADA, Kenji DOI and Uichi KUBO

Faculty of Science & Technology, Kinki University

ABSTRACT

Bone incision by excimer laser irradiation with a layer of water on the bone surface was found to be more effective than without. In XeCl laser irradiation, the saturation of the incision depth was not observed below the intensity of 6 J/cm^2 for bone surface with a layer of water. In pulse irradiation with high peak power such as the excimer lasers, tissues are incised by an ablation effect. In this tissue ablation, some of the incidence laser lights are scattered or absorbed by particles ablated from the bone surface in laser pulse duration, especially at high intensity irradiation. The water layer acted to suppress the expansion of particles from the bone surface, so that the laser energy could be efficiently injected to the ablation surface.

1. はじめに

エキシマレーザーは生体軟組織に加えて骨、歯などの硬組織も非炭化切開が可能であり、今後のレーザー医療において最も注目されるレーザーの1つである。エキシマレーザーのなかで代表的なXeClレーザー（波長 308 nm）、

KrFレーザー（波長 248 nm）の骨穿孔特性については前回の大会で報告した。¹⁾ この穿孔特性では、XeClレーザーは 2.0 J/cm^2 以上で、KrFレーザーは、 1.0 J/cm^2 以上で穿孔深さが飽和する傾向を示した。この飽和の原因としてアブレーションにより噴出した粒子がレーザ

ー光を散乱、吸収し、レーザーエネルギーがアブレーション面へ効率よく注入されていないことが考えられる。

この粒子の噴出を抑制する1手段として骨表面に水を流してレーザー照射し、穿孔を行った。水はエキシマレーザー光に対しては透過性が高いが、²⁾ 噴出してくる粒子に対しては遮断の効果が大きい。このため、レーザー光のエネルギーが噴出した粒子に遮られることなくアブレーション面まで注入され、切開効率の改善が期待できる。

本論文では、XeCl、KrFレーザーの骨穿孔について、水を流した場合と流さない場合の穿孔特性を比較し、生体アブレーションの機構について検討した。

2. 実験条件

XeCl、KrFレーザービームとも焦点距離100、300 mmの2枚のシリンドリカルレンズを用いて直径約1 mmに集光し、牛骨に照射した。タンクに水道水を溜め、幅1 mmのスリットを通してレーザー照射部の骨表面に自然流下した。流量は特に制御しなかった。水層の厚さはスリット幅より多少薄くなると思われるが、噴出粒子が遮断されるには十分な厚さである。水を流した場合、流さない場合とも穿孔深さの測定には光学顕微鏡を用い、照射領域内で最も深く穿孔した場所の深さを測定した。この測定した深さと照射パルス数から1パルス当たりの平均的な穿孔深さを算出した。

3. 実験結果

XeClレーザーで骨組織を穿孔したときの穿孔深さと照射強度の関係を図1に示す。パルス相互間の影響を抑えるため、照射パルス周期は500 msecと長くした。穿孔は測定可能な範囲で浅くし、照射パルス数200とした。穿孔が深いとレーザー光が穿孔側壁で吸収され、穿孔先端部でレーザー強度が低下する可能性があるためである。骨表面に水を流した場合、流さない場合とも穿孔閾値は約1 J/cm²であった。照射強度の増加とともに穿孔深さは大きくなるが、水を流さない場合は2.0 J/cm²以上の照射強度では穿孔深さが飽和傾向を示す。水を流した場合には照射強度6 J/cm²まで直線的に増加し、照射強度6 J/cm²で約2.6 μmの穿孔が可能であった。

KrFレーザーの骨穿孔特性を図2に示す。パルス周期500 msec、照射パルス数100とした。穿孔閾値は約0.3～0.5 J/cm²であり、XeClレーザーの場合にくらべ低い照射強度から穿孔が可能である。水を流さない場合、照射強度が1 J/cm²を超えると穿孔深さが約1 μmで飽和した。これに対して水を流した場合は約2 J/cm²まで直線的に増加した。このときの穿孔深さは約3.2 μmであり、これ以上の照射強度では水を流した場合でも、穿孔深さは飽和し、4 μmを超えなかった。

4. 検討

エキシマレーザーを生体組織に照射すると照射部は高温状態となり、組織は微粒子群となって表面より噴出する。これがアブレーションである。アブレーションでは、レーザー照射強度

図1 XeCl レーザーの骨穿孔特性 (○:水を流さない場合, ●水を流した場合)

図2 KrF レーザーの骨穿孔特性 (○:水を流さない場合, ●:水を流した場合)

3) が高くなると粒子の噴出速度も大きくなり、レーザーパルス幅が長い場合には、照射初期に噴出した粒子が入射レーザーパルスの後半部を散乱、吸収するようになる。吸収されたエネルギーは熱伝導などでアブレーション面まで運ばれるが、アブレーション面までの距離が大きくなるとエネルギー伝達の効率が悪くなる。したがって、穿孔深さも照射強度に比例して増加せず、飽和傾向を示すものと考えられる。

骨表面に水を流してレーザーを照射するとレーザー光は水にほとんど吸収されずに骨表面まで到達し、アブレーションを起こす。アブレーションにより噴出した微粒子は水の層で噴出が制限され、水を流さない場合ほど自由に噴出できなくなる。したがって、レーザーパルスの後半部は噴出した粒子に吸収されても場所的にアブレーション面に近いため、エネルギーが効率よくアブレーション面まで伝達されるものと思われる。

KrFレーザーの場合、水を流して照射しても照射強度が 2 J/cm^2 を超えると穿孔深さが飽和した。この場合、レーザー照射時には水が粒状になって弾け飛んでおり、粒子の噴出が激しいため水の層が破れているものと推測される。水を流して穿孔した場合、XeClレーザーでは穿孔深さの飽和は観測されていないが、照射強度が 6 J/cm^2 より高くなるとKrFレーザーの場合同様に穿孔深さが飽和する可能性がある。流す水の層を厚くすると噴出粒子の遮断効果は大きくなるが、レーザー光が入射するとき水中での散乱などにより骨表面での照射強度が低下することが懸念される。水の層は必要以上に厚くすることは避けるべきである。

骨（緻密骨）は無機成分（約50%）、有機成分（約30%）と水分（約15%）に大別できる。無機の主成分はリン酸カルシウムであり、有機はコラーゲンが主成分となる。⁴⁾ 無機成分のリン酸カルシウムはアパタイトと呼ばれる非常に複雑な結晶構造をとる。アパタイトを構成するイオンは化学的置換を起こしやすいことが知られており、⁴⁾ Ca原子が水中の H^+ 、 H_3O^+ などのイオンと化学的に置換している可能性もある。このような化学反応により、骨組織が変化し、アブレーションを助長していることも考えられ、今後、検討していく必要がある。

5. まとめ

エキシマレーザーで骨穿孔を行う場合、骨表面に水を流してレーザー照射を行うと水を流さない場合にくらべて穿孔深さの向上が見られた。XeClレーザーでは、水を流した場合穿孔深さは飽和することなく、照射強度 6 J/cm^2 まで直線的に増加した。KrFレーザーでは、水を流した場合でも穿孔深さは飽和したが、水を流さない場合にくらべて約3倍の穿孔深さが得られた。

参考文献

- 1) 岡田、岸田、久保；第11回日本レーザー医学会大会論文集、p. 621.
- 2) G.M. Hale and M. R. Querry ; Appl. Opt. Vol. 12, No 3 (1973) 555.
- 3) R. M. Gilgenbach and P. L. G. Ventzek ; Appl. phys. Lett. Vol. 58, No. 15 (1991) 1597.
- 4) 須田、小澤、高橋；骨の科学（医歯薬出版（株）、1987年）