生体硬組織のエキシマレーザー照射における組成変化

細川 泰靖、中野 人志、中山 斌義、久保 宇市

近畿大学理工学部電気工学科

Change of Elemental Composition in Hard Tissue by Excimer Laser Irradiation

Yasuharu Hosokawa, Hitoshi Nakano, Takeyoshi Nakayama, Uichi Kubo

Department of Electrical Engineering, Faculty of Science & Technology, Kinki University

Abstract

Change of elemental composition in hard tissue by excimer laser irradiation has been investigated through Electron Probe Micro Analyzer (EPMA). A cow's thighbone is used as a sample. Two excimer lasers (ArF, 193nm : KrF, 248nm) have been used in present experiment. The ratio of Ca to P (Ca/P) is also estimated as a measure of change of composition in irradiated surface. The Ca/P of ablation particle is estimated for comparison. ArF excimer laser caused the change of Ca/P at relatively low energy fluence. On the other hand, Ca/P was not influenced by KrF excimer laser at any irradiation parameters. These results have been discussed with the relation between the binding energy of molecules composed in bone and the energy of individual photons for excimer radiation.

1. はじめに

エキシマレーザーは、生体組織に対し切開の閾値が低い¹⁾。特に骨の切開において、熱損傷の無い優れた切開能力を有している。そのため、骨に対する切開機構の様々な検討、解明が行われている²⁾³⁾。例えば、生きたラットの大腿骨にレーザーを照射し、切断能と治癒過程を検索した報告⁴⁾がある。

一方、エキシマレーザー切開の問題点として、物質に照射すると物質表面の物性が変わってしまうことが挙げられる⁵⁾⁶⁾。これは、紫外レーザーであるがための高いフォトンエネルギーによる光化学効果に起因する。骨や歯など生体硬組織においても、エキシマレーザー照射によって組成変化が生じることが判っている⁷⁾⁸⁾。現実には、

エキシマレーザーの種類によって照射物質の反応も様々であり、アブレーションが光化学効果によるものではなく熱的な効果が主であるとされる場合もある。我々は2種類のエキシマレーザーを用い、メスの応用の医学的知見を得るために、レーザー照射時の骨表面及びアブレーション粒子の組成変化を検討した。

2. 試料、装置及び方法

生体硬組織の試料として、牛大腿骨を用いた。牛大腿骨の皮質骨部分を板状に切り出し、レーザー照射を行った。骨は、無機成分と有機成分からなっており、無機成分は70%である。無機質の主成分は結晶質のハイドロキシアパタイト $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ である^{9) 10)}。用いたレーザーは、ArF (波長 193nm, パルス幅 15ns)、KrF (波長 248nm, パルス幅 23ns) のエキシマレーザーである。両レーザー共に、繰り返し周波数は 10pps に設定した。骨の組成変化を調べるための指標として HAp に含まれる Ca と P の比 (Ca/P) を採用した。EPMA (電子線プローブマイクロアナライザー) を用いて、レーザー照射後における Ca 及び P の元素比を調べた。EPMA は電子銃によって加速された電子線を試料に当て、発生する様々な原子固有の x 線を測定することによって、原子種とその量を分析するものである。測定対象は、レーザー照射後の骨表面及びレーザー照射で噴き出す粒子を基板上に堆積させたものである。レーザー照射エネルギーを変化させて得られた試料における Ca/P を評価した。照射表面の組成変化とアブレーション粒子の組成変化を比較し、ArF 及び KrF エキシマレーザーの硬組織に対する作用を検討した。

3. 結果

3-1 ArF レーザー照射

図 1 に ArF レーザー照射後の照射フルエンスに対する Ca/P を示す。

図 1 ArF レーザー照射における組成変化

図の縦軸は、個々の試料が持つ組成の異なりを減ずるために、測定した Ca/P を照射前の $(\text{Ca/P})_0$ で除した値を採用している。つまり、この値が 1 であれば組成変化が生じていないことを示す。図 1 より試料表面及びアブレーション粒子はともに比較的低強度の照射で組成変化が大きく生じ、高強度になるにつれて、1 に漸近することが判る。照射表面における Ca/P の増加は、P 原子の減少を示し、アブレーション粒子には、逆に P 原子の存在割合が増加していることを示唆する。両者の結果が反転の関係となる結果は、定性的に矛盾はない。

3-2 KrF レーザー照射

KrF レーザー照射時のフルエンスに対する組成変化を図 2 に示す。

図 2 より、照射試料表面では Ca/P の変化がなく ArF レーザーの場合とは大きく異なっている。アブレーション粒子では ArF レーザーと同様な

傾向を示している。

図2 KrFレーザー照射における組成変化

4. 考察

レーザー照射による骨表面における組成変化をレーザー光の光化学効果及び照射エネルギー密度との関連で検討する。この現象についてP,Ca原子に関わる分子の結合エネルギーとエキ

シマレーザーの光子エネルギーの関係を図3に示す。

4.1 ArFレーザー照射⁷⁾

ArFレーザーの光子エネルギーは6.4eVであり、P=O, Ca-O, P-Oの結合エネルギーより大きく、Ca=Oの結合エネルギーより小さい。従って、P=O, Ca-O, P-Oの結合は一光子吸収で切断可能である。Caでは一重結合のみが切断されるが、P原子の結合は全て切断されることになる。このことから照射表面のP原子の割合は減少し、アブレーション粒子のP原子の割合は増加することが説明できる。照射強度が比較的高強度になると、二光子あるいは多光子吸収の発生が考えられる。この場合は、P,Ca原子ともにすべての結合が切断可能である。つまり両者の結合切断に差異は無くなり、組成変化は生じない。

4.2 KrFレーザー照射⁷⁾

図3 P,Ca原子の結合とレーザーの光子エネルギー

KrF レーザー照射の場合、照射表面の組成変化は生じないが、アブレーション粒子には組成変化が生じている。これらの結果はArF レーザーと同様の考察では説明できない。但し、アブレーション粒子の組成変化の特徴が、ArF レーザー照射の場合と似通っていることからアブレーションの主たる機構自体については同様であると思われる。図3より、KrF レーザーの一光子吸収で切断できる結合は、Ca-O, P-O であり、残りの P=O, Ca=O は切断されずに残る。したがって、Ca 原子と P 原子の放出に差が無いため組成変化は生じないと考えられる。また KrF レーザーの二光子吸収では、フォトンエネルギーと結合エネルギーの大小関係が ArF レーザーの一光子吸収の条件と同じになり組成変化が生じると考えられる。しかしながら実験結果は、そうはなっていない。これは高強度照射になると、熱的アブレーションが支配的になるために上記の光化学的効果が極めて小さいためと思われる。アブレーション粒子の組成変化については、Ca のイオン化等の影響が考えられる。アブレーション粒子の質量分析等の手段により解明する必要がある。

5. まとめ

エキシマレーザーを牛大腿骨に照射し、照射表面及び飛散するアブレーション粒子の組成変化について検討した。ArF レーザー照射の場合、低強度照射において組成変化が生じ、高強度照射では組成変化は生じないことが判った。組成変化及びその照射エネルギー依存性をレーザーのフォトンエネルギーと各原子の結合エネルギー吸収過程の違いで説明した。一方、KrF レーザー照射の場合、照射表面においては組成変化が

生じないが、アブレーション粒子では低強度照射において組成変化が生じていることが判った。この原因は今のところ不明であるが、Ca 原子のイオン化等の影響が考えられる。

エキシマレーザーで骨切開を行う場合、骨表面の組成変化をさけるためには KrF レーザーを、使用するのが望ましく、また ArF レーザーを使用する場合には高強度照射での使用が望ましいことが判った。

6. 参考文献

- 1) N.Furzikov, IEEE Journal of Quantum Electron. **QE-23**(1985)1752.
- 2) 藤坂紳一、伊藤利昭、佐藤勝彦：レーザー研究、**22**(1992)552.
- 3) 佐藤勝彦、垣内岳春、鈴木孝：レーザー研究、**22**(1992)559.
- 4) 落合聡他：日本レーザー医学会誌、**11**(1990) 647.
- 5) S. Kuper, M. Stuke, Appl.Phys., **A49**(1989) 211.
- 6) N. Baker, L. Wilson, Journal of Lipid Research **7**(1966)341.
- 7) 原口能純、堀清太郎、中山斌義、久保宇市：近畿大学理工学部研究報告、**30**(1994)149.
- 8) 中村幸生、床鍋博昭、松本光吉：日本レーザー医学会誌、**17**(1996)9.
- 9) 須田立雄、小澤英浩、高橋栄明：骨の科学 (医歯薬出版、1987)1111.
- 10) 岡崎正之：アパタイトの化学 (東海大学出版、1992)1.