硬組織の $9\ \mu\text{m}$ 帯巨大吸収波長の検索とその加工効果の検討 ——加工効果の実験的検討——

長澤 明範¹⁾, 加藤 一²⁾

¹⁾ 東海大学開発工学部医用生体工学科, ²⁾ 芝浦工業大学工学部通信工学科

Pilot study on the research for the peak absorption wavelength around $9\ \mu\text{m}$ in hard tissues and the surgical effect of the tunable CO_2 laser at the peak wavelength —— on the surgical effect of the laser

Akinori Nagasawa¹⁾ and Kazuichi Katoh²⁾

¹⁾ Tokai University, School of High-Technology for Human Welfare, Department of Biomedical Engineering

²⁾ Shibaura Institute of Technology, Department of Electrical Communication

Abstract : CO_2 laser has been popularly recognized as the infrared laser of the wavelength $10.6\ \mu\text{m}$ with a powerful surgical effect in its excellent cutting and vaporizing ability. Previous studies have showed that either bone or dental structure has a huge absorption in the narrow wave range around $9.6\ \mu\text{m}$. In addition to this, the authors' recent spectral analysis on hard tissues have revealed that the peak absorption wave length is delicately different in each hard tissue. This pilot study was designed for evaluating the surgical effect of the laser beam of the peak absorption wavelength for each hard tissue.

METHOD : The CO_2 laser PX-2500 (ULTRA LASERTECH) was applied for this experiment. The irradiating wavelength is tunable in the range of $9.44\sim 10.74\ \mu\text{m}$. The experimental subjects were pig bones and extracted human teeth. The surface of the subjects was exposed to the focused laser beam tuned to the nearest wavelength of the subject's peak absorption wavelength ($9.58\ \mu\text{m}$, $9.62\ \mu\text{m}$, $9.63\ \mu\text{m}$) and the laser beam of $10.6\ \mu\text{m}$ at the same condition of irradiation. In addition to this, cutting effect of the laser beam for bone was examined.

RESULT : This experiment demonstrated that the laser beam of the nearest wavelength to the huge absorption for the hard tissues showed the most effective surgical result for the target and the boring and the cutting effect of the laser were much more superior to that of the CO_2 laser of $10.6\ \mu\text{m}$. The CO_2 laser of $9\ \mu\text{m}$ wave band must be remarked as a new surgical laser for hard tissues.

I 結 言

骨や歯の各硬組織は、 $9.6\ \mu\text{m}$ 付近に著るしく大きな吸収スペクトルをもつことがこれまでに報告されていたが^{1), 2)}、著者らは本研究に先立って各硬

組織のこの巨大吸収ピーク波長部の精密な赤外分光分析を試みた結果、各硬組織のピーク波長は $10^{-2}\ \mu\text{m}$ レベルで微妙な相異を示すことを確認した。

本研究は波長可変式 CO_2 レーザーを用いて各硬組

織の最大吸収ピーク波長の各硬組織の治療効果（穿孔・切断）にも意義について実験的な評価を行うものである。

II 実験方法

実験に使用したレーザー装置は、Wlstratech 社の波長可変式 CO₂レーザー Model PX-2500-GL(最大出力 CW, 50W)である(図1)。本機は光共振器の非射出側の全反射鏡部に設けた回折格子のグレーティング角度を調節することにより9.44~10.74 μm の範囲で間欠的に波長を可変することができる。発振波長の測定には Optical Engineering社のスペクトルアナライザーNo.1282 を用い、これにレーザー光を入射したとき、波長スケール上に表われるスリットラインによって発振波長を読み取ることができる。出力測定には Ophir Optics 社製アナログ式パワーメーター No.1282を使用した。

実験試料としては屠殺後の新鮮な豚骨（大腿骨緻密質、肋骨）およびヒトの抜去歯（大臼歯、滅菌水中保存したもの）を使用した。①大腿骨は固定照射による穿孔深さおよび移動照射による切り込み深さの測定に、②肋骨は切断能の測定に、③抜去歯はエナメル質面と象牙質面に固定照射を行い、穿孔深さの測定にそれぞれ使用した。

レーザー光は焦点距離75mmの照射器を用い、焦点位で試料に照射した。出力はすべて10W とし、固定照射の照射時間はすべて0.4 秒とした。照射部は液化 CO₂ガスを噴射して、煙塵を排除した。

本実験に用いた各試料の 9 μm 帯の最大吸収ピーク波長は、分光分析の結果、骨緻密質：9.636 μm 、象牙質：9.653 μm 、エナメル質：9.582 μm となっているが、本レーザー装置の発振光の波長は9.44~10.74 μm の範囲で間欠的にしか変えられないため、今回は発振可能な波長のうち、各試料で最大吸収ピーク波長の最寄の波長として、9.58 μm 、9.62 μm 、9.63 μm の3波長と通常の CO₂レーザーの10.6 μm の4波長の各レーザー光を用いて各々の加工効果を比較した。

III 実験結果

3-1 穿孔実験

骨の表面へ前記各波長のレーザー光を照射したときの穿孔部の断面の状態を図2に示す。最大吸収波長(9.636 μm)に近い波長のビームほど穿孔深さが深いことが示されている。象牙質についても骨と同様の加工効果が得られた。

骨および歯（象牙質面およびエナメル質面）へ各波長のレーザーを照射したときの穿孔深さを表1に示す。骨と象牙質面照射の場合は、各組織の最大吸収波長に最寄の波長のレーザーほど穿孔深さが深いことが示されており、9.58, 9.62, 9.63 μm のいずれの場合も10.6 μm の場合より穿孔深さが深い。ただし、エナメル質面から歯へレーザーを照射した場合は、エナメル質と象牙質の各最大吸収波長に最寄の2波長(9.58, 9.63 μm)に加工効果が高いことが示されている。

3-2 移動照射による骨の加工実験

表2は豚大腿骨へ最大吸収ピーク波長最寄りの9.63 μm 、それに10.6 μm の各波長のレーザー光を焦点位で、1.0mm/s、2.0mm/s、4.0mm/s の各速度で移動照射したときの切れ込み深さを示す。切れ込み深さはいずれの場合も9.63 μm のレーザー光の方が10.6 μm のものよりも深いことが示されている。

豚の肋骨に9.58 μm 、9.63 μm および10.6 μm の各波長のレーザー光を焦点位で 1mm/sの速度で繰り返し移動照射したときの切断までの走査回数を表3に示した。9.63 μm のレーザー光の場合は10.6 μm のレーザー光の約2倍の切断能があることが示されている。

IV 検 討

今回の実験の結果、各硬組織は 9.6 μm 付近に10.6 μm よりも極度に高い吸収波長をもち、この最大吸収波長のレーザーは10.6 μm の通常の CO₂レーザーよりも明らかに高い加工効果のあることが示された。最近 3 μm 付近のEr:YAGレーザーが骨加工効果に優れているという報告があり、その根拠としてこのレーザーの波長は水による吸収率がCO₂ レーザ

一の波長より大きいことと指摘されている³⁾。しかし、硬組織の水含有率は軟組織と比較して極めて微量であり、この考え方には疑問がある。一方、硬組織の $9.6 \sim 9.7 \mu\text{m}$ のレーザービームの吸収率はEr:YAGレーザーよりも格段に大きいので、骨の加工効果は前者の方がはるかに優れていると考えられる。

図3 a～cは分光分析器 (FT/IR-5300) で得た各硬組織の透過スペクトル分析を同機のズーム機能を用いて得たピーク部付近の拡大分光特性を示す。各図共にその最大吸収ピーク波長を▼で示してある。今回の各波長のレーザー光の各硬組織に対する穿孔能 (表1) をこの図と比較して検討すると、各硬組織共にそれぞれの最大吸収ピーク波長に近いレーザー光ほど高い加工効果の得られることがわかる。エナメル質面から歯へレーザー光を照射した場合の穿孔部は象牙質内へ貫通しているので、この複合組織でエナメル質、象牙質双方の光学特性が共に穿孔効果に関与しているものと考えられる。

今回の実験結果から、レーザーの組織加工効果は、対象組織の最大吸収波長に近い波長のレーザーほど高い組織加工効果のあることが示されたが、この場合の波長のもつ意義は $10^{-1} \mu\text{m}$ よりも $10^{-2} \mu\text{m}$ という微細なレベルで効いてくるという、厳格なものであることが示された。

V 結 論

今回の実験によって、硬組織は骨、歯共に $9.5 \mu\text{m} \sim 9.7 \mu\text{m}$ の範囲にある巨大吸収ピーク波長に最寄りの波長のレーザーを用いたときに、最大の治療効果 (穿孔、切断) が得られ、この場合、いずれも波長 $10.60 \mu\text{m}$ の通常の CO_2 レーザーよりもその効果ははるかに大きいことがわかった。更に、最大ピーク波長は $10^{-1} \mu\text{m}$ レベルよりむしろ $10^{-2} \mu\text{m}$ レベルで意義のあることが示された。

本研究は、これからのレーザーの医学応用の向上には現存する各種のレーザーを無作為的に用いて治療効果を追うのではなく、対象組織の精巧な分光分析と、それに基づいた至適波長のレーザーを選択して用いることが望まれることを示唆している。

【参考文献】

- 1) 鈴木 貢 : 生体硬組織無機質の性状に関する理化学的研究, 口腔科誌, 1975.
- 2) 長澤明範, 西川宏司, 平柄喜章 : 歯牙の光学特性と各種レーザーの歯牙への作用の相異, 医用電子と生体工学, 18, 特別号, 178-179, 1980.
- 3) 熊崎護 : Er:YAGレーザーによる歯牙硬組織切削, 日医レ, 14, 257-259, 1993.

図 1 波長可変式 CO_2 レーザーによる加工効果の実験

図 2 骨の表面へ各波長の CO_2 レーザーを照射したときの穿孔部の剖面
a : $9.63 \mu\text{m}$, b : $9.62 \mu\text{m}$, c : $10.6 \mu\text{m}$

波 長 (μm)	9.58	9.62	9.63	10.60
穿孔深さ (mm) (緻密骨面照射)	4.50	4.70	5.00	3.90
穿孔深さ (mm) (象牙質面照射)	4.05	4.10	4.65	3.75
穿孔深さ (mm) (エナメル面照射)	3.50	3.00	3.40	2.80

試料：緻密骨は豚骨，歯はヒトの抜去歯（10W，焦点位，f:75mm）

表 1 9.6 μm 帯 CO₂レーザーの硬組織への加工効果

移動速度 (mm/s) 波 長 (μm)	1.0	2.0	4.0
9.63	3.3 (mm)	2.2 (mm)	1.7 (mm)
10.60	1.6	0.8	0.7

波 長 (μm)	9.58	9.63	10.60
豚 肋 骨 14.3×9.5 (mm)		4 回	8 回
豚 肋 骨 16.2×11.4 (mm)	10 回	8 回	15 回

試料：豚骨（10 W，焦点位，f:75 mm）

（10W，1mm/sec.，焦点位，f:75mm）

表 2 骨面移動照射の切り込み深さ

表 3 骨切断能（切断までに要した走査回数）

図 3 硬組織の9 μm 帯のピーク部付近の拡大分光特性