レーザー硬組織加工効果の波長依存性
—これからのレーザー治療応用の発展に向けて—
Wavelength Dependence in Laser Surgical Effect on Hard Tissue
—Pilot Study on Future Advance of Laser Surgery—

長澤 明範

東海大学開発工学部医用生体工学科

〒410-03 静岡県沼津市西野317番地

TEL 0559-68-1111 FAX 0559-68-1156

Akinori NAGASAWA

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

Nishino 317, Numazu, Shizuoka, 410-03 Japan

要 旨

硬組織は波長 $9.6\mu\text{m}$ 付近に著しく巨大な吸収スペクトルをもっている。今回、精密な赤外分光分析によって各硬組織のこの巨大吸収ピーク波長を精査し、それがレーザー加工効果にもつ意義について実験的な検討を行った。まず、フーリエ変換赤外分光光度計を用いて豚骨、ヒト抜去歯の分光分析を行い、各巨大吸収ピーク波長を細密に検索した。つづいて、波長可変 CO_2 レーザー装置を用いて、各硬組織毎にその巨大吸収波長近傍のレーザーをチューニングし、その収束光を各硬組織に照射したときの加工効果を比較検討した。その結果、 $9.6\mu\text{m}$ 帯のレーザーの加工効果は $10.6\mu\text{m}$ の CO_2 レーザーよりも著しく大きく、また各硬組織の吸収ピーク波長に近いレーザーほどその加工効果は大きいことが示され、加工効果にもつレーザー波長の意義は $10^{-2}\mu\text{m}$ レベルと緻密なものであることがわかった。今回の研究結果は今後高度化するレーザー医学応用研究の一つの方法論を示唆するものと考えられる。

キーワード：硬組織、赤外分光、波長可変 CO_2

Abstract

Previous studies have revealed that hard tissues, either bone or dental structures, have the huge absorption spectrum in the narrow wave band around $9.6\mu\text{m}$. This study was designed to evaluate the wavelength dependence in the laser surgical effect on hard tissues. The subjects applied to this experiment were the removed pig bones and the extracted human teeth. (1) First of all, the precise spectral analysis was experimented on each subject tissue using the fourier transform infrared spectrophotometer covering the wave band of $2.17\sim 25.0\mu\text{m}$. In result, the subject tissues, cortical bone, spongy bone, enamel and dentin, were demonstrated to have the peak of the

huge absorption spectrum at the wave band of $9.58\sim 9.65\mu\text{m}$ with the delicate differences of the wavelength. (2) Secondly, using the wavelength tunable CO_2 laser X-2500, the surface of each subject was exposed to the focused laser beam tuned to the closer wavelengths of the subject's peak absorption wavelength ($9.58\mu\text{m}$, $9.62\mu\text{m}$ and $9.63\mu\text{m}$) and the laser beam of $10.6\mu\text{m}$ at the same irradiation condition and the surgical effect on the subject tissues were compared in every wavelength. In result, the laser beam of the nearest wavelength to the huge absorption for each hard tissue demonstrated the most effective surgical effect on the target tissue in boring and cutting, and the laser beam were much more superior to that of the CO_2 laser of $10.6\mu\text{m}$. The result of this study suggests the new application methodology for future advance of laser medicine and surgery.

Key words : hard tissue, absorption spectrum, wavelength tunable CO_2 laser, laser surgical effect, wavelength dependence, infrared spectral analysis

1. 緒言

硬組織は波長 $9.6\mu\text{m}$ 付近の赤外帯域に極めて顕著な光吸収特性をもっており^{1)~3)}、著者はこの巨大吸収波長でのレーザー光の硬組織治療効果について注目していた。本研究はまず、硬組織についてさらに細密な赤外分光分析を行って最大光吸収ピーク波長を精査し、この結果に基づいてレーザーの組織加工効果における波長依存性の意義について実験的な検討を加えたものである。

2. 分光学的検討

2-1 実験方法

2-1-1 分析装置

分光分析には高精度の分解能をもつフーリエ変換赤外

分光光度計FT/IR-5300型(日本分光株式会社)を使用した。本装置の主な仕様は、①波数範囲: $4600\sim 400\text{cm}^{-1}$ ($2.17\sim 25.00\mu\text{m}$)、②取り込み波数: $\pm 0.01\text{cm}^{-1}$ 、③分解能: $2, 4, 8\text{cm}^{-1}$ 、④測光範囲: 透過率 $0\sim 100\%$ T, 吸光度 $0\sim 3\text{Abs}$ 、⑤走査時間: $2.5\text{秒}/\text{Scan}$ 、⑥スペクトル演算処理機能: a) 差スペクトル演算, b) $\text{Abs}\leftrightarrow\%T$ スペクトル変換, c) ベースライン補正, d) ズーム, e) ピーク打ち出し, f) 定量分析, などである。本実験装置の測定条件は、分析能: 4cm^{-1} 、積算回数: 32回、増幅度: auto、検査波数(波長)領域: $4600\sim 400\text{cm}^{-1}$ ($2.17\sim 25.00\mu\text{m}$) とした。

2-1-2 測定試料

測定試料には、①豚大腿骨緻密質(屠殺後の新鮮骨)、

図1 波長 $2.17\sim 25\mu\text{m}$ (波数 $4600\sim 400\text{cm}^{-1}$ の赤外領域における豚骨緻密質の透過率分光特性

表1 図2の各試料の被検波長帯域における各吸収ピーク波長 (μm)

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12
緻密骨	2.924	---	4.235	6.049	6.488	6.866	7.053	---	9.636	11.444	16.562	17.693
歯-エナメル質	2.937	3.417	---	---	6.464	6.866	7.072	---	9.582	11.444	16.562	17.634
歯-象牙質	2.954	---	---	6.035	6.472	6.885	7.063	8.063	9.653	11.444	16.562	17.693

図2 各硬組織の透過率分光特性の比較 (同一波長軸)

②ヒト抜去歯エナメル質、③ヒト抜去歯象牙質を用いた。分光分析の測定法はKBr錠剤法によって行った。即ち、赤外透過性のKBr顆粒と組織の粉末をそれぞれ4000:1程度の割合で混和し、さらに乳鉢乳棒を用いて破砕細粉化したのちこれを加圧して3mmφのdiskを作成し、これをKBr diskの光学特性と参照して検体の透過率分光分析を行った。

2-2 実験結果

図1は緻密骨(豚骨)の透過率分光分析の結果を示す。被検波長範囲の中に12個所の吸収ピーク部が認められ、その多くは10.6 μm の吸収率(矢印で示した実線)を上まわり、とくにNo.9のそれは巨大な吸収特性を示している。図2は各試料(豚骨緻密骨、人歯エナメル質、人歯象牙質)の透過スペクトラムを同一波数(波長)軸で比較的に示したものであり、各硬組織共にほぼ同様のスペクトル特性をもつことが示されている。即ち、12か所の

吸収ピーク部はそれぞれほぼ同じ波長位にあり、とりわけNo.9のそれはいずれの試料においても巨大な最大吸収特性を示している。表1は図2の結果について本分析装置でピーク波長検出処理を行って得られた各硬組織の12か所の吸収ピーク部の波長を示す。各吸収ピーク部の波長は各試料共に0.013~0.126 μm の僅差の範囲内ではほぼ一致している。No.9の最大吸収ピーク波長は各試料で10⁻² μm レベルの微妙な差を示し、今回使用した試料では、緻密骨:9.636 μm 、エナメル質:9.582 μm 、象牙質:9.653 μm であった。図3a~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。

各組織の吸収ピーク部の吸収率を波長10.60 μm の場合と比較すると、No.2, 3, 8, 10以外はいずれも10.60 μm 光の吸収率を上回り、No.9, 11, 12ではその1.6倍以上、とくに巨大な吸収性を示すNo.9の9.6 μm 前後のピーク波長では、10.60 μm のCO₂レーザー光の2.2~2.7倍にも相当し、これはまた優れた加工効果があると指摘されている2.94 μm のEr:YAGレーザー光¹⁾よりも高い吸収特性を示している。

3. レーザー加工効果の検討

今回の硬組織の分光学的実験結果から、各硬組織の吸収ピーク波長のレーザーは通常発振波長10.60 μm のCO₂レーザー光よりもはるかに高い硬組織加工効果をもつことを示唆している。そこで硬組織の最大吸収ピーク波長域で発振波長を可変できるCO₂レーザー装置を用いて、この分光学的示唆に対する実験的な検討を試みた。

3-1 実験方法

実験に使用したレーザー装置は、Ultratech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4)。本機は光共振器の非出射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。

図3 各硬組織試料の9 μ m帯のピーク部付近の拡大分光特性

図4 実験に用いた波長可変式CO₂レーザーPX-2500-GL

実験試料には分光学的実験に用いたのと同じ豚骨（大腿骨緻密質）とヒトの抜去歯および豚肋骨を使用した。①大腿骨は固定照射による穿孔試験および移動照射によるカッティング試験に、②肋骨は切断試験に、③抜去歯はエナメル質面と象牙質面に固定照射を行って、穿孔試験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 μ m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 μ m、象牙質：9.653 μ m、エナメル質：9.582 μ m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 μ m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 μ m、9.62 μ m、9.63 μ mのほかに通常のCO₂レーザーの10.6 μ mの4波長の各レーザー光を発振させて各々の加工効果を比較した。

3-2 実験結果

3-2-1 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5に示す。最大吸収波長(9.636 μ m)に近い波長のレーザー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の深さを表2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 μ mのいずれの場合も10.6 μ mの場合より穿孔深さが深い。ただし、エナメル質面

表2 9.6 μm 帯CO₂レーザーの硬組織への加工効果 (穿孔深さ mm)

対象試料 \ レーザーの波長(μm)	9.58	9.62	9.63	10.60
豚骨緻密質 (緻密骨面照射)	4.50	4.70	5.00	3.90
ヒト抜去歯 (象牙質面照射)	4.05	4.10	4.65	3.75
ヒト抜去歯 (エナメル質面照射)	3.50	3.00	3.40	2.80

(10W, 焦点位, f:75mm)

図5 骨の表面へ各波長のCO₂レーザーを照射したときの穿孔部の断面 (豚骨緻密質)

a : 9.63 μm , b : 9.62 μm , c : 10.6 μm

表3 骨面移動照射の切り込み深さ

移動速度(mm/s) \ レーザーの波長(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

試料: 豚骨 (10W, 焦点位, f:75mm)

表4 骨切断能 (切断までに要した走査回数)

レーザーの波長(μm) \ 対象試料	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

(10W, 1mm/sec., 焦点位, f:75mm)

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。

3-2-2 移動照射による骨のカッティング実験

表3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4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。

4. 検討

4-1 分光学的観点から

硬組織の主要構成要素は無機成分のリン酸カルシウム化合物ハイドロキシアパタイトCa₁₀(PO₄)₆(OH)₂の複雑な結晶であって、骨は歯質よりもタンパク質などの有機成分の含有率が大きく、歯質は骨よりもリン酸カルシウム化合物を多く含み、この無機と有機の2つの成分が分子オーダーにおいて複雑に結びついて組織を構成している。このほかにMg, F, Na, K, N₂, CO₂などのような成分を微量含んでいる⁵⁾。今回の実験結果におけるNo.1のピーク(2.9 μm 帯)はH₂Oの、またNo.9のピーク(9.6 μm 帯)はPO₄³⁻に由来するものであるが、各組織における吸収ピーク波長の微妙な相違は組織個々の組成の違い、即ち硬組織の主成分であるアパタイト自体の結晶構造の不安定さ、および分子レベルでの複雑な組織構成の差異に基づくものと推測される。

4-2 レーザー組織加工効果の観点から

今回の実験の結果、レーザーの組織加工効果はレーザーの波長の組織吸収分光特性に対応していることが示唆された。そして、各硬組織の最大吸収ピーク部近傍におけるレーザー加工効果(表2)を図3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り、この場合の波長のもつ意義(レーザー組織加工におけるレーザーの波長依存性)は10⁻² μm レベルという緻密なものであることが示された。

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、このような複合組

織の場合は、構成組織の各光学特性がそれぞれ加工効果に関与するものと考えられる。

5. 結 論

今回の実験によって、硬組織は骨、歯共に $9.6\mu\text{m}\sim 9.7\mu\text{m}$ 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。さらに、この場合のレーザー加工効果におけるレーザーの波長依存度は $10^{-1}\mu\text{m}$ よりむしろ $10^{-2}\mu\text{m}$ という緻密なレベルで意義のあることが示された。

これまでのレーザーの医学的応用では、身近にある限られた種類のレーザーを無作為的に用いてその治療効果を追いかけていた嫌いがある。本研究の結果、レーザー治療において最も効果的な効果を得るためにはまず対象組織の精密な分光分析を行い、それに基づいて最も効果的な至適波長のレーザーを選択して治療にあたることの重要性を示したもので、レーザー医学の今後の発展に寄与する一つの方法論を示唆するものである。

【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，口科誌：145-166, 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) 長澤明範：レーザーの組織作用特性と口腔領域への応用，歯科ジャーナル，国際医書出版，1988.
- 4) 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.
- 5) 須田立雄，他：骨の科学，医歯薬出版：30-40, 110-128, 1985.