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 ——分光学的検討——

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 huge 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 spectral analysis

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 : Understanding of the actual effect of laser beam on tissues is the essential aspect in the therapeutic application of lasers from the viewpoint of evaluation of the therapeutic effect and the safety. Spectral analysis for the target tissue of the laser surgery is the most important experiment to assess the most effective laser wavelength and to lead to successful result in the laser therapy. 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 result fully suggested much more effective laser wave band for the laser surgery of hard tissues than the conventional CO_2 laser of $10.6\mu\text{m}$. This study was designed for the precise research for the wavelength at the peak absorption spectrum in hard tissues around $9.6\mu\text{m}$.

METHOD : The subjects were ① removed pig bones, ② extracted human teeth. Each subject was processed into powder, which was mixed with KBr granule and pressed into the KBr tablet. The spectral analysis on each KBr tablet was experimented using fourier transform infrared spectrophotometer FT/IR 5300 (Nihon Bunkoh CO., LTD.) covering the wave band of $2.17\sim 25.0\mu\text{m}$.

RESULT : The subjects compact bone (cortical bone), spongy bone, enamel and dentin were to have demonstrated 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 of the peak absorption spectrum in each subject.

I 緒 言

硬組織は波長 $9.6\mu\text{m}$ 付近の赤外帯域に顕著な光吸収特性をもつことが従来報告されており^{1)~3)}、著者ら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のこの巨大吸収波長についてさらに精密な赤外分光分析を行い、最大光吸収ピーク波長を精査し(本研究)、この分光分析結果の治療効果にもつ意義に

ついて検討するために行われた(次研究)。

II 実験方法

2-1 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(日本分光株式会社製)を使用した。本装置の主な仕様は、①波数範囲: $4600 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ ($2.17 \sim 25.00 \text{ }\mu\text{m}$)、②取り込み波数: $\pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$ 、③分解能: 2, 4, 8 cm^{-1} 、④測光範囲: 透過率 0~100 % T, 吸光度 0~3 Abs、⑤走査時間: 2.5 秒/Scan、⑥スペクトル演算処理機能: a) 差スペクトル演算, b) 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、分解能: 4 cm^{-1} , 積算回数: 32回, 増幅度: auto, 検査波数(波長)領域: $4600 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ ($2.17 \sim 25.00 \text{ }\mu\text{m}$)とした。

2-2 測定試料

測定試料は、①豚大腿骨緻密質(屠殺後の新鮮骨)、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 $3 \text{ mm}\phi$ の disk を作成し、これを用いて透過スペクトルの測定を行った。

III 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箇所の吸収ピーク部が示され、とくに NO.9 のスペクトルは巨大な吸収特性を示している。図2は全試料(豚骨緻密骨, 人歯エナメル質, 人歯象牙質)の各透過スペクトルを同一波数(波長)軸で、比較的に示したものである。これから各硬組織共に、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箇の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 のそれはいずれも最大の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によりピー

ク波長検出処理を行った各硬組織の12箇所のピーク部の波長を示す。短波長側より NO.2, NO.3, NO.10 の3箇所の波長は完全に一致し、その他のピーク部でも $0.013 \sim 0.126 \text{ }\mu\text{m}$ の僅差でほぼ一致している。NO.9の最大吸収ピーク波長は各試料で $10^{-2} \text{ }\mu\text{m}$ レベルの微妙な差を示し、今回使用した試料では、緻密骨: $9.636 \text{ }\mu\text{m}$, エナメル質: $9.582 \text{ }\mu\text{m}$, 象牙質: $9.653 \text{ }\mu\text{m}$ であった。

また、各組織の吸収ピーク部の吸収率を波長 $10.60 \text{ }\mu\text{m}$ の通常の CO_2 レーザー光と比較すると表2に示すようになり、NO.2, 3, 8, 10 以外はいずれも $10.60 \text{ }\mu\text{m}$ 光の吸収率を上回り、NO.9, 11, 12ではその1.6倍以上の吸収率を示し、とくに顕著な吸収性を示す NO.9 のスペクトルの $9.6 \text{ }\mu\text{m}$ 前後のピーク波長では各組織とも80%~99%以上の値を示し、これは $10.60 \text{ }\mu\text{m}$ の CO_2 レーザー光の 2.2~2.7 倍に相当する。

図3は本装置のズーム機構を用いた拡大分光図による NO.9 の巨大吸収ピーク部付近の精査の一例として緻密骨の場合を示す。

IV 検 討

4-1 レーザーの組織加工効果の観点から

今回の分光学的実験結果からみると、NO.9の巨大吸収ピーク部における各試料の吸収率は $10.6 \text{ }\mu\text{m}$ のその2倍以上と極度に高値を示すことから、各硬組織の吸収ピーク波長のレーザーは通常発振波長 $10.60 \text{ }\mu\text{m}$ の CO_2 レーザー光よりも、また、それよりもさらに優れた加工効果があると指摘されている発振波長 $2.94 \text{ }\mu\text{m}$ の Er:YAG レーザー光⁴⁾よりもはるかに高い硬組織加工効果のあることを示唆している。

4-2 分光学的観点から

骨の約 60 %は無機成分のリン酸カルシウム化合物を占めるハイドロキシアパタイト $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ で、これは非常に小さな結晶で、質量モメントの関係から、組成が複雑となり不安定な状態で存在している。また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占め、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き、組織を構成している。このほかに微量の Mg, F, Na, K, N₂, CO₂ といった無機質を含んでいる⁵⁾。今回の実験結果における NO.1 のスペクトル (2.9 μm 帯) は H₂O 由来の、また NO.9 のスペクトル (9.6 μm 帯) は PO₄³⁻ に由来するものである。各組織における吸収ピークにおける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機構による組成の差異に基づくものと推測される。

今後さらに硬組織の、同一個体での種類による差異、個体差、動物の種類による差異など検討すべき課題は残されているが、基本的に同様な結果が得られるものと推定される。

V 結 論

豚大腿骨、ヒト抜去歯を用いて、硬組織の精密な分光分析を波長 2.17~25.0 μm の赤外領域で行った結果、各試料のスペクトルに12箇所のほぼ類似した波長位に吸収ピークが認められ、そのうち8箇所は

10.60 μm の CO₂ レーザー光よりも高い吸収率を示した。とくに 9.6 μm 付近に巨大な吸収ピークが確認され、これは硬組織加工効果の高いといわれている Er:YAG レーザー光のそれをもはるかにしのぐものである。この最大吸収スペクトルのピーク値の波長は組織によって 10⁻² μm レベルの微妙な差を示したが、これは各硬組織のアパタイトの結晶構造の不安定さと組成の複雑さに基づく微妙な差異によるものと考えられる。

【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，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.

図 1 波長 2.17~25 μm (波数 4600~400 cm^{-1}) の赤外領域における豚骨緻密質の透過率分光特性

図 2 各硬組織の透過率分光特性の比較 (同一波長軸)

図 3 ピーク部付近の拡大スペクトル

	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

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)

	10.60 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	43.5	53.1	---	23.5	52.0	45.3	54.4	54.4	---	94.0	37.4	71.0	75.0
10.60 μmとの比		1.22	---	0.54	1.20	1.04	1.25	1.25	---	2.16	0.88	1.63	1.72
歯-エナメル質	36.5	37.7	22.3	---	---	20.5	46.1	39.8	---	99.8	28.2	84.2	88.4
10.60 μmとの比		1.03	0.61	---	---	0.54	1.26	1.09	---	2.73	0.77	2.30	2.42
歯-象牙質	37.0	55.4	---	---	52.2	43.3	48.1	47.5	31.6	82.5	33.2	57.5	60.8
10.60 μmとの比		1.50	---	---	1.41	1.17	1.30	1.28	0.85	2.23	0.90	1.55	1.64

表 2 図2の各試料の各吸収ピーク部の吸収率のそれぞれの10.60 μmにおける吸収率に対する比率