尿路結石性状 in vivo 測定のためのファイバー化 Pulsed Photothermal Radiometry

Fiber Optic Pulsed Photothermal Radiometry for Diagnosis of Urinary Stone Characteristics in Vivo

大道雄一郎⁽¹⁾, 小峰志訓⁽¹⁾, 中村 宏⁽²⁾, 中川真人⁽³⁾,

荒井恒憲⁽³⁾, 菊地 眞⁽³⁾, 稲崎 聡⁽⁴⁾, 若木守明⁽⁴⁾

Yuichiro Daidoh⁽¹⁾, Yukikuni Komine⁽¹⁾, Hiroshi Nakamura⁽²⁾, Masato Nakagawa⁽³⁾, Tsunenori Arai⁽³⁾, Makoto Kikuchi⁽³⁾, Satoshi Inazaki⁽⁴⁾ and Moriaki Wakaki⁽⁴⁾

1) 自衛隊中央病院・泌尿器科, 2) 防衛医科大学校・泌尿器科講座,
3) 同・医用電子工学講座, 4) 東海大学・光工学科

Pulsed laser photofragmentation attracts our attention as the urinary stones fragmentation, since this method has less surrounding tissue damage than the other method and it can be done in vivo using laser energy delivery by a flexible fiber. Urinary stones consist of the various crystalloids, calcium oxalate etc. They have different optical absorption spectrum each other. Therefore, laser wavelength for photofragmentation should be changed to the stronger absorption peak of the stone for efficient and safety therapy. In this point of view, in vivo stone discrimination may be necessary. We demonstrated a fiber optic PPTR method to measure the absorption coefficient of urinary stones. The excitation laser pulse was obtained from CO laser and CO₂ laser. The infrared radiation signal from the stone surface was collected and delivered by As-S or As-Se chalcogenide glass fiber. As the results of experiment, absorption coefficient of calcium oxalate stone was 109cm^{-1} and that of uric acid stone was 130 cm^{-1} . Two different sorts of stones were successfully discriminated by this fiber optic PPTR method. In the future, a single fiber might be used for both the laser delivery and the PPTR signal delivery for in vivo applications.

緒言

現在、内視鏡下の結石破砕法として、周囲組織への傷害が少なく、フレキシビリティに富み、軟性鏡にも使用できる点で、パルスレーザーが注目を集めている。レーザー結石破砕においては、結石での吸収が大きい波長のレーザー光をパルス照射すれば、同じエネルギーの照射でより大きい振幅の衝撃波を発生でき、より効率的に結石を破砕できる。しかし、結石は硫酸カルシウムをはじめ種々の結晶成分より成り、それぞれ吸収特性が異なっている。そこで、我々は図1に示すごとく、結石破砕治療時、内視鏡下に赤外ガラスファイバー光伝送路を用いたレーザー励起赤外分析法 (Pulsed Photothermal Radiology^{1),2)}、略称PPTR法) による結石の吸収特性測定装置と、レーザー結石破砕装置を統合したレーザー結石破砕システムを提案している。治療時に内視鏡下に結石の吸収特性を測定できれば、現在実用化されている色素パルスレーザー³⁾や、我々が提唱している $3\mu\text{m}$ 帯の中赤外パルスレーザー²⁾等から最も結石に吸収の大きい波長のレーザーを選択でき、より効率的な結石破砕が施行できる。また、レーザー照射野が結石か周囲組織か識別できれば、誤照射防止にも応用できる。今回は、まず、PPTR法をファイバー伝送化することによって、結石の光学特性を内視鏡下に測定する方法について検討した。内視鏡下に結石および周囲組織の吸収係数を測定することができるになれば、その結果から結石破砕に最も適切な波長のレーザーを選択したり、また、周囲組織と結石との吸収係数の相違より周囲組織への誤照射防止にも応用できると考えられる。

方法

長波長の赤外線のカルコゲンファイバーにおける透過性を調べるために、 CO_2 レーザーを用いて波長約 $10\mu\text{m}$ の赤外光におけるカルコゲンガラスファイバーの透過率を測定した。図2はその実験装置である。 CO レーザーを、グレイティングを回転させることにより波長を $9.54\mu\text{m}$ と $10.24\mu\text{m}$

図1 レーザー結石破砕システム

図2 カルコゲン化物ガラスファイバーの波長 $10\mu\text{m}$ 帯の透過率測定実験構成図

との二種類に変えて発振させ、ZnSeレンズで集光して、約 10cm のAs-SファイバーおよびAs-Seファイバーの両カルコゲン化物ガラスファイバーに入射した。入射前と出射後のエネルギーを測定して比をとり、カルコゲン化物ガラスファイバーの透過率を求めた。

また、結石の吸収特性を内視鏡下に測定する基礎研究として、励起レーザーに波長 $5.4\mu\text{m}$ の CO レーザーと波長 $10.6\mu\text{m}$ の CO_2 レーザーを用い、放射赤外線の受光にカルコゲングラスファイバーを用いたファイバー伝送型PPTR法にて尿路結石の吸収測定を行った。図3は、励起レーザーとして波長 $5.4\mu\text{m}$ の CO レーザーを用い、赤外線シグナル伝送用カルコゲン化物ガラスファイバーとしてAs-Sファイバーを用いた実験装置である。 CO レーザーのパワーは 8W 、パルス幅を $1/30\text{sec}$ として、尿路結石表面にレーザー光をZnSeレンズで約 3mm に集光して直接照射した。結石表面からの放射赤外線シグナルを3本のAs-Sカルコゲン化物が

ラスファイバーにて集光し、伝送後、MCT高感度検知器で測定した。記録および解析にはTektronix7854ストレージオシロスコープを使用した。結石の熱拡散度は煉瓦等と同程度と考え、 $0.00556\text{cm}^2/\text{sec}$ と仮定した。

さらに、尿管膀胱組織の模擬として大動脈血管壁の吸収係数をPPTR法で測定することによって、結石と周囲組織との識別できるかどうかを調べた。

PPTR法

PPTR法は、試料を粉砕することなく、非接触性に、特定の波長のパルス光を試料表面に照射し、照射面が発生する放射赤外線の時間的変化を測定することによって照射波長における吸収係数の絶対値を理論式より算出するものである¹⁾。すなわち、照射波長に吸収の大きい物質であれば、表面温度の上昇は大きく、結石内部の温度勾配が大きくなる。その結果、熱伝導速度が速いので、表面温度下降が、速いわけである。

結果

約10cmのカルコゲン化合物ガラスファイバーにおける透過率測定の結果を、表1に示す。図4は波長 $5.4\mu\text{m}$ のCOレーザーを用いて測定した尿酸カルシウムおよび尿酸のPPTR波形である。やはり、直接放射赤外線を測定する場合に比べ、信号は小さくなった。ファイバー伝送によるPPTR法による吸収係数の結果は、表2に示すごとくである。ファイバー伝送型PPTR法による結石の吸収係数を測定したところ、尿酸カルシウムと尿酸とで明らかに結石結晶成分による相違が認められ、結石の識別に用いることが出来ることが確認できた。図5は、励起レーザーとして波長 $5.4\mu\text{m}$ のCOレーザーを用いて放射赤外線を直接測定した場合の尿酸カルシウム結石と、大動脈血管壁のPPTR波形である。波長 $5.4\mu\text{m}$ における吸収係数は、尿酸カルシウムで 130cm^{-1} 、血管壁で 370cm^{-1} と吸収係数に大きな相違が認められた。尿管、膀胱粘膜も血管壁と同様の生体組織であるから、吸収係

図3 ファイバー伝送型PPTR法による尿路結石吸収測定実験構成図

表1 波長約 $10\mu\text{m}$ におけるカルコゲンガラスファイバーの透過率

波 長	As-Se (103mm)	As-S (104mm)
$9.59\mu\text{m}$	55.2%	0.0092%
$10.24\mu\text{m}$	38.4%	測定不能

図4 尿路結石のファイバー伝送によるPPTR波形

表2 カルコゲンガラスファイバー伝送型PPTR法による尿路結石吸収測定

結 石	吸収係数 (cm^{-1})	
	5.4 μm (CO Laser)	10.6 μm (CO ₂ Laser)
Ca (COO) ₂ 56%	105	69
Ca ₃ (PO ₄) ₂ 44%		
Ca (COO) ₂ 98%	109	80
Uric acid 98%	130	115
使用ファイバー	As-S	As-Se

(熱拡散度: $0.00556\text{cm}^2/\text{sec}$)

数を示すものと考えられ、結石と周囲組織との識別に応用できると考えられる。

考察

As-SファイバーおよびAs-Se ファイバーを用いた PPTR 法では、これらのファイバーはMCT 高感度検知器で検知可能な量の放射赤外線シグナルを伝送でき、結石成分の分析を行うことができることが判明した。また、As-Sファイバーに比べ、As-Seファイバーの方が、長波長の赤外線の透過率が大きいことがわかった。長波長の赤外線の透過率が高ければ、吸収係数の小さい試料の測定や、励起光強度を小さくして試料をあまり温めないで測定できる。ゆえに、内視鏡下におけるファイバー伝送型PPTR法の実用装置には、As-Se ファイバーの使用が適していると結論できる。ただし、カルコゲン化物ガラスファイバーを伝送するため、ファイバーの特性により長波長の赤外線の透過率は低下しており、フィルターの役割をしているので、本来の放射赤外線を直接測定するPPTR法に比較すると、吸収係数の測定は、絶対値測定から相対値測定となると考えられる。今回は、PPTR法で尿管及び膀胱組織の模擬として大動脈血管壁と結石との吸収係数を比較したが、両者の鑑別ができた。ファイバー伝送型PPTR法を尿路結石と周囲組織との鑑別に用いれば、内視鏡下に直視下で結石と周囲組織とを確認することと併用して、レーザーの誤照射防止をより確実に行うことが出来る。レーザーエネルギー伝送用ファイバーとPPTRシグナル伝送用ファイバーを単一化できれば、一本のファイバーで、PPTR測定による結石分析および周囲組織との識別でき、また、そのファイバーでレーザー結石破砕ができるようになる。このようなレーザー結石破砕治療システムを開発する予定である。

参考文献

- 1) Tam, A.C.: Infrared Phys., 25: 305, 1985.
- 2) 大道雄一郎等., 日本レーザー医学会誌8, 3: 233, 1987.
- 3) Watson, G.M. et al, J. Urol., 138: 195, 1987.

図5 尿路結石と大動脈壁のPPTR波形