Ho:YAGレーザーによる尿路結石破碎の基礎的検討

大道雄一郎、荒井恒憲、床鍋繁喜、林琢也、中島章夫、菊地眞、
辻明、浅野友彦、小田島邦男、中島史雄、早川正道、中村宏

防衛医大泌尿器科、同大医用電子工学、自衛隊中央病院泌尿器科

The basic study of the laser fragmentation using Ho:YAG laser

Yuichiro Daidoh, Tsunenori Arai*, Shigeki Tokonabe**, Takuya Hayashi*,
Akio Nakajima*, Makoto Kikuchi*, Akira Tsuji, Tomohiko Asano, Kunio Odajima,
Fumio Nakajima, Masamichi Hayakawa, Hiroshi Nakamura

Dept. of Urology, National defense Medical College

*Dept. of Medical Engineering, National defense Medical College

**Dept. of Urology, Self Defense Forces Central Hospital

To explain the mechanism of the stone fragmentation with Ho:YAG laser irradiation, we investigated the fragmentation efficacy in air and in water. We employed the stone model which had been reported by Uchida. The models in dry condition (water content: 14%), in wet condition (44%), and in water were fragmented with Ho:YAG laser on energy level of 0.5 J/pulse and at frequency of 10 Hz through a quartz fiber. The various components of stones were fragmented in air or in water similarly. The fragmentation efficiencies of models in dry condition, in wet condition and in water were 0.12 mg/J, 0.82 mg/J, and 3.0 mg/J, respectively. Those of calcium oxalate stone in air and in water were 0.12 mg/J and 0.36 mg/J. Those of calcium phosphate stone in air and in water were 0.32 mg/J, and 1.1 mg/J. It was clear that the stone fragmentation with pulsed Ho:YAG laser was caused by the expansion of vapor bubble, which was produced by irradiation in water within or around the stone.

結 言

近年、Ho:YAGレーザーは組織の蒸散に優れ、
フレキシブルな石英ファイバーで導光できるので、

多用途に種々の領域で臨床応用されている。
Ho:YAGレーザーは、泌尿器科領域では組織の蒸
散・切開及び尿路結石の破碎に用いられている。
Ho:YAGレーザーによる結石破壊の機構はいまだ

に解明されていない¹⁾。Ho:YAGレーザーの2.1 μm の発進波長では、水の吸収は比較的大きいが、尿路結石の光吸収は小さい²⁾。我々はHo:YAGレーザーによる結石破碎の機構は、色素レーザーの衝撃波による破碎機構と異なり、結石内の水蒸気を発生することによる応力によるのではないかと考えた。Ho:YAGレーザーによる結石破碎において、結石の含水量または、結石周囲の水分が重要な因子であることを調べるために、結石モデル及び結石の含水量を変えて、破碎効果を比較した。

対象及び方法

1) 結石モデルの作成

結石モデルは内田等が微小発破による尿路結石の研究で開発した方法に基づいて作成した³⁾。石膏に紙やすりの材料である金剛砂(#280)を同量配合し、それに等量の水を加えて、直径約1 cmの円筒状のモデルを作成した。この結石モデルを7日間乾燥させると含水量は約14%となった(乾燥状態)。7日間乾燥させた結石を生理食塩水に約5分間浸して後に、取り出すと含水量は約44%であった(空中湿潤状態)。水中湿潤状態として結石モデルを生理食塩水に浸して用いた。

2) 結石モデルにおける破碎効率

対象には、乾燥状態、空中湿潤状態及び水中湿潤状態の結石モデルを用いた。Ho:YAGレーザーを直径365 μm の石英ガラスファイバーで導光し、軽く結石モデルに接触させた状態で、周波数を10 Hz、出射端での出力を0.5 J/pulseに設定して、それぞれの結石モデルに500発ずつ照射した。Endourology、ESWLによる結石治療の評価基準に基づき、破碎された結石モデル片の大きさを直径4 mmで分類した⁴⁾。破碎効率を単位エネルギー当りで結石を直径4 mm以下に破碎できる重量(mg/J)と定義して、結石モデルのそれぞれの条件で比較した。

3) 尿路結石における破碎効率

尿路結石は自然排石又は観血的に摘出した結石を試料として用いた。50%以上占める構成成分で結石を分類し、蔞酸カルシウム結石:5個、蔞酸カルシウム結石:2個、蔞酸マグネシウム・アシムニウム結石:1個、尿酸結石:1個、シスチン結石:1個を対象とした。それぞれの構成成分の結石において、乾燥状態と生理食塩水に7日間浸した状態(水中湿潤状態)で実験に用いた。照射出力は結石モデルの実験と同様にファイバー出射端で0.5 J/pulseとした。総ショット数は空中での照射は結石モデル実験と同様に500発、水中での照射は結石破碎片が4 mm以下なるまで行った。

結 果

1) 結石モデル

Ho:YAGレーザーによる結石破碎の特性から結石はドリルで孔を開けるように細かく破碎された。その結果、空中乾燥状態では結石モデルの破碎片は細かく破碎されたが、水中では結石モデルを大きな破片に容易に破碎できたので、結石モデルを分割して破碎することができた。結石モデルの結石破碎効率は、乾燥状態で $0.12 \pm 0.02 \text{ mg/J}$ 、空中湿潤状態で $0.67 \pm 0.35 \text{ mg/J}$ 、水中湿潤状態で $3.04 \pm 0.54 \text{ mg/J}$ であった。水中における破碎効率は空中での乾燥状態及び湿潤状態での照射による破碎効率と比較して有意に高く、含水量の増加及びその周囲の水の存在によって破碎効率は増加した。(図1)。

2) 尿路結石

乾燥した結石を空中で照射すると、破碎は生ぜず、発熱し、照射し続けると一部が炭化する状態であった。水中では結石モデル実験と同様に、細かくかつドリルで孔を開けるように破碎されるので照射部位を少しずつ移動して細かく破碎した(図2)。

蔞酸カルシウム結石は乾燥状態で 0.12 ± 0.05

mg/J、水中湿潤状態で 0.33 ± 0.08 mg/J、磷酸カルシウム結石は乾燥状態で 0.37 ± 0.22 mg/J、水中湿潤状態で 1.1 ± 0.73 mg/J、磷酸マグネシウム・アンモニウム結石は乾燥状態で 0.48 mg/J、水中湿潤状態で 0.63 mg/J、尿酸結石は乾燥状態で 0.02 mg/J、水中湿潤状態で 0.44 mg/J、シスチン結石は乾燥状態で 0.12 mg/J、水中湿潤状態で 0.15 mg/Jであった。結石構成成分によって破碎効率に差はあるが、すべての結石で破碎効率は水中照射の方が空中照射より高い値を示した。

考 察

尿路結石に対するレーザー治療機器として、QスイッチNd:YAGレーザー、色素レーザー、アレキサンドライドレーザー等が臨床で用いられている。これらのレーザーによる結石破碎の原理は照射によって結石表面にプラズマが発生し、その膨張によって生じた衝撃波が結石内を伝搬し、音響インピーダンスの変化によって結石が破碎されるとされている⁵⁾。近年、Ho:YAGレーザーを用いた結石破碎の臨床例が報告されている。我々は以前、尿路結石に対するレーザー治療における至適波長を選択するために、赤外線領域の結石の光吸収スペクトルを測定し、報告したが、図3に示すように、波長 $2.1 \mu\text{m}$ では結石の光吸収は低い。Ho:YAGレーザーは比較的水の光吸収が高いパルス波ということから、結石破碎の機構に対する水の関与は大きいと考えられるが、その機構は解明されていない。

結石の含水量または周囲の水の存在による破碎効果の比較のためには、結石の構成成分を均一にして、結石の含水量を正確に設定する必要がある。また、Ho:YAGレーザーの波長で結石の光吸収が低いことを考えると、結石自体の光吸収はあまり重要な因子ではないと考え、内田等が微小発破による結石破碎の実験で開発した結石モデルを採用した。モデル実験において破碎効率は乾燥状態、

図1 左上段はHo:YAGレーザー照射前、右上段は乾燥状態で照射後、左下段は空中湿潤状態で照射後、右下段は水中湿潤状態で照射後の結石モデルの状態。

図3 尿路結石の赤外線領域における光吸収スペクトル A: 尿酸カルシウム：98%、B: 尿酸カルシウム：98%、磷酸カルシウム：44%、C: 尿酸：98%

図2 尿酸カルシウム結石のHo:YAGレーザー照射前後の状態。上段は空中照射。下段は水中照射。

空中湿潤状態、水中湿潤状態の順で有意差をもって増大した。尿路結石では結石構成成分によって破碎効率に差を認めたが、すべての結石において乾燥状態よりも水中湿潤状態で破碎効率は向上した。乾燥状態では結石モデルも石英ファイバーもともに熱くなり、照射中のファイバーの損傷が生じた。確かに含水量の増加に伴い、結石モデル及び尿路結石の強度は低下するが、水中湿潤状態では結石内に存在する水分が照射によって水蒸気気泡を形成し、その急激な膨張時の応力波または、水蒸気気泡の膨張・収縮によって生じる衝撃波とによって破碎されるのではないかと推測される。しかし、空中湿潤状態では、応力波による破碎が主で、照射部位周囲の水分は蒸散して乾燥するために衝撃波の発生が十分でないか、または衝撃波が十分に結石に伝搬されないために水中湿潤状態より破碎効率が劣るのではないかと考えられる。

また、Ho:YAGレーザーによる結石破碎は細かい破砕片になることと、ファイバーを同一部位に接触させるとドリルで孔を開けるように破碎されるという特性があった。Ho:YAGレーザーは直接石英ファイバーが尿管に接触しないかぎり、水の吸収が大きいので尿管の損傷は少ないと考えられるが、石英ファイバーが結石を突き抜けて直接尿管に接触して尿管を照射した場合、穿孔する可能性もあり、十分に注意をする必要があると考えられる。

結 語

Ho:YAGレーザーによる結石破碎効率は、結石の含水量の増加及び周囲の水の存在によって向上した。Ho:YAGレーザーは尿路結石での光吸収が低く、水の光吸収が大きいことを考慮すると、Ho:YAGレーザー照射で結石内及び結石周囲の生理食塩水中で発生する水蒸気気泡の膨張力とそれによって発生する衝撃波とが、結石破碎機構に深く関与していることが示唆された。

参考文献

- 1) Sayer, J., et al.: J Clin. Med. Surg., 11, 61, 1993.
- 2) Daidoh, Y., et al.: J Endourol., 245, 1991.
- 3) 内田睦他：日泌会誌, 76, 1309, 1985.
- 4) 園田孝夫：日泌会誌, 505, 1989.
- 5) Watson, G.: Laser in Urologic Surgery, 183, 1994.