パルスCO₂レーザーの生体作用に関する基礎研究

The effect of pulse shapes on CO₂ laser ablation

中井完治, 中川眞人, 荒井恒憲, 菊地 眞

K.Nakai, M.Nakagawa, T.Arai, and M.Kikuchi

防衛医科大学校・医用電子工学講座

In order to achieve independent control of thermal damaged layer thickness and ablation depth(or volume), the effect of pulse shapes on CO₂ laser ablation was experimentally and theoretically discussed. In the condition of 400W/cm² in intensity and 2.8kJ/cm² in total energy density, an independent control of thermal damaged layer thickness was achieved by a duty ratio control of chopped pulses from 0.5 to 0.04. In the above conditions, the ablation capability was remained constant. To explain and estimate these results, an ablation simulation model was discussed. Preliminary results of calculation showed excellent agreement on tendency by the duty ratio control. TEA pulsed laser beam was also used to discuss. The optimum energy density which offered the maximum energy efficiency for the ablation was found at 12J/cm². The ablation hole with no thermal damaged layer thickness was revealed by TEA CO₂ laser ablation.

1. はじめに

最近、虚血性心疾患の治療として動脈内レーザー手術が注目されている。このような小さく薄い手術対象にレーザー治療を行うためには、切開・蒸散能と熱凝固能の精密な調整が必要である。電気メスでは切開能と熱凝固能は高周波電流の波形を変えることで容易に調整できるのに対し、レーザーでは自由な調整は困難であり、照射強度と照射時間の調整で色々な治療に対処しているのが現状である。¹しかし、熱作用によるレーザー治療では、照射時間内の波形をパルス状に制御すれば、切開・熱凝固能調整が行えると考えられる。そこで今回我々はCO₂レーザーを用いて、レーザーの照射の時間的パターンでパルス状に変化させ、切開能や熱凝固能の性能変化について検討した。一方、これらの照射時間パターンの変化による作用について考察するために、切開蒸散を考慮した計算モデルについても検討した。

2. Chopped pulseレーザー照射効果の検討

パルス状のレーザー光源として、連続波形を chop して得られるパルス列（以下 chopped pulse という）を用いた。図1に chopped pulse 照射実験系を示した。照射材料は脱血したブタの肝臓を用いた。連続CO₂レーザー光は電磁シャッターにて chopped 波形とした。以後の実験はすべて、ビーム径を1.16mm、照射強度を400W/cm²、総エネルギー密度を2.8kJ/cm²に固定して行った。照射効果は組織標本の寸法計測で評価した。図2に照射条件の変化方法を示した。パルス列はDuty比と繰り返し周波数の2つのパラメーターで表現できる。Duty比とは、周期をT、一周期でのレーザー光の照射時間をtとすると、t/Tの値である。照射総エネルギー密度を一定の条件でDuty比を変化させると、照射が終了するまでの時間も変化するが、一方、照射総エネルギー密度とDuty比を変えずに繰り返し周波数を変化させた場合は、照射が終了するまでの時間は一定となる。この2つの系統の照射パラメーター変化を実験的に調べた。

まず、総エネルギー密度と繰り返し周波数を一定にして、Duty比が切開能や熱凝固能に与える影

図1. Choppedパルス照射実験装置

図2. Choppedパルスの照射条件の変化方法

図3. Duty比による照射効果の変化

響を調べた結果を図3に示す。組織蒸散孔の深さと体積は切開能と対応し、熱凝固層の厚さは熱凝固能と対応する。Duty比が1すなわち連続照射のときから0.5までは切開能は低下するが、熱凝固能は誤差を考慮すればほぼ一定である。これに対し、Duty比が0.5以下になると切開能はほとんど一定であるが熱凝固能が低下している。つまりこの原因はDuty比低下とともに照射の間隔が長くなり、熱が逃げる時間が確保され、かつ組織変性の生ずる閾値が存在するためであると考えられる。

次に、総エネルギー密度とDuty比を一定にして、繰り返し周波数が切開能に与える影響を調べた結果を図4に示す。測定点が少ないが、繰り返し周波数を高くすると切開能は低下し熱凝固能は上昇する傾向があるといえる。これは、周波数上昇に伴い一周期におけるレーザー照射時間が短くなるにつれ、組織に吸収されるレーザーエネルギーが切開に必要な熱エネルギーの閾値に達しなくなり、その結果熱凝固の形で現れるためであると考えられる。

3. 切開蒸散を考慮した計算モデルの検討

次に、今回の chopped pulse 照射実験に理論的な考察を加えるため、組織の切開蒸散を考慮した計算モデルを検討した(図5)。

生体試料は含水率60%の均一な組織とし、組織に一边0.025cmの立方体マトリックスを考えた。その組織に対して、エネルギー密度がTEM₀₀モードのガウス分布をしたCO₂レーザービームを垂直に照射したと仮定した。組織に光吸収されたレーザーエネルギーは水に吸収されて熱化する。この発生熱の三次元的な熱伝導について考察した。マトリックスにたまったエネルギーが100℃の熱エネルギーと気化熱を加えた値より大きい場合、そのマトリックスを消去するとともに次の計算サイクルではその形状変化を考慮するようにした。条件は実験条件と同じ総エネルギー密度で、繰り返し周波数を0.5Hzにした。計算結果では、組織蒸散孔の深さ・体積すなわち切開能は計算値と実測値との間に開きがあるものの、実験結果と同様に傾向の一致を示した。熱凝固能は実験との間に差違がみられた。計算値と実験結果の不

一致は、照射表面での熱放射と、発煙や蒸散物による組織への熱のインプットの低下を考慮しなかったためと推察される。

図4. 繰り返し周波数による照射効果の変化

図5. レーザー蒸散計算モデル

4. 高ピーク出力レーザー照射効果の検討

高ピークパワーのCO₂TEAパルスについて、照射効果の調査を行った。TEAパルスレーザーでは、パルス放電メカニズムの特性からDuty比や繰り返し周波数の範囲には制限がある。そのため今回我々は、エネルギー密度が切開能と熱凝固能に与える影響を調べた。図6に1Hz、30 shotsで照射した結果を示す。照射エネルギー密度が12J/cm²のときに切開能は最大となったが、これ以上のエネルギー密度ではむしろ切開能は低下した。この原因は、プラズマ発生頻度が12J/cm²付近から上昇していることより、プラズマ発生と関連があるものと考えられる。すなわち、ある値以上のエネルギー密度になるとパルスレーザーエネルギーの大半がプラズマ発生のために消費され、さらに発生したプラズマによりパルスレーザーエネルギーが組織に到達する直前で弱め

られるのが原因であると考えられる。また、蒸散孔側面の凝固層は肉眼的にも低倍率における観察でも認められなかった。これは極めて特徴的な作用である。TEAパルスレーザーの切開の機序は、主として衝撃波による作用であると考えられている。衝撃波による傷害を考慮する必要があるが、凝固層が全くないので特殊な治療に適用できる可能性がある。

図6. TEA CO₂ レーザーパルス照射による蒸散効果

5. おわりに

我々は、レーザーの切開能や熱凝固能が波長や照射強度に依存せずに照射の時間的パターンによって調整できることを示した。すなわち、Duty比や繰り返し周波数を変えることにより切開能や熱凝固能が調整できる。また、高ピーク出力パルスレーザーの照射では、プラズマが発生するため最大の切開能を与えるエネルギー密度の存在が確認された。切開の機序が衝撃波によるものであるため、蒸散孔に熱凝固層がない点が特徴的であった。chopped pulseレーザー照射を想定して組織の切開蒸散を考慮した計算モデルを考えた。切開能の評価は実験と傾向の一致を得た。今後この計算モデルに検討を重ね、レーザーの切開能や熱凝固能の評価が前もってできるようになれば、制約の厳しい条件であろうとその条件に適したレーザー照射計画が立てられるため、レーザー治療が有効にかつ安全に行えると考えられる。

参考文献

- (1) 菱木久美郎, "CO レーザー手術の生物物理学", : 渥美和彦ら編, レーザー医学, pp, 143-158 (中山書店, 1980).