Ho:YAGレーザーによる接触照射蒸散過程の 光プローブ法と時間分解写真による解析

○吉川美弥*,長谷川真*,矢野政人*,中島章夫**,荒井恒憲**,菊地眞**,小原實*

*慶応義塾大学理工学部、**防衛医科大学校医用電子工学講座

The comparative measurements of Ho:YAG laser contact ablation dynamics
by the fiber-optic probe method and time-resolved photography.

M.Yoshikawa*, M.Hasegawa*, M.Yano*, A.Nakajima**, T.Arai**, M. Kikuchi**, M.Obara*

*Dept. of Elec.Eng., KEIO Univ., **Dept. of Med. Eng., National Defense Medical college

We have developed the fiber-optic probe method to monitor the ablation bubble which is generated at the fiber tip during Ho:YAG laser ($\lambda=2.1\mu\text{m}$) ablation. We performed comparative measurements by means of time-resolved photography and this probe method. The backscattered probe light, that was the probe method signal, which was simultaneously delivered together with Ho:YAG laser was measured at the incident end of the fiber. The ablation bubble volume at the end of laser output was about 10mm^3 at $240\text{J}/\text{cm}^2$ in water by the time-resolved photography, but it didn't obey a liner relation to the backscattered light intensity. The results from the water irradiation experiments explained that the probe method signal indicated the ablation bubble behavior because the observed signal was consists of boundary reflection between bubble and water and debris scattering in the bubble. In the case of the agar experiments at $240\text{J}/\text{cm}^2$ in fluence, photographs and measured waveform corresponded to a ablation bubble behavior.. At $500\text{J}/\text{cm}^2$ in fluence, the cavitation which induced tissue dissection could be observed by photographs after ablation bubble collapse. The decay of measured waveform was longer, which was influenced by the cavitation. We confirmed the possibility of monitoring tissue dissection from measured waveform by the fiber-optic probe method.

【緒言】

レーザー血管形成術における術中の最大の副作用は血管穿孔と血管組織解離である。この治療では、血中あるいは生理食塩水で接触照射法を施行するので、組織が接触しているファイバー先端の蒸散状態を血管内視鏡により把握

することは不可能になる。ファイバー先端の蒸散状態のモニターが可能であれば、術中の主要な急性副作用である血管穿孔と血管断裂を検知し防止できる可能性がある。

波長 $2.1\mu\text{m}$ のパルスHo:YAGレーザーは、ファイバー伝送、血管蒸散性能、装置の完成度

などの観点から血管形成術レーザーとして適しており、臨床に普及している。蒸散用レーザーとしては生体での吸収係数が小さく（約 20cm^{-1} ）蒸散に必要な照射フルエンスが大きいために、蒸散時にファイバー先端に気泡が形成される⁹⁾。気泡の形成は体積除去によるいわゆる蒸散の他に、応力発生による照射方向の組織の切離を促進するため治療に不可欠である。しかし気泡の過剰な形成は、照射軸と直交する方向への血管断裂を起こす可能性がある。このようにHo:YAGレーザー蒸散では、気泡形成のモニターが蒸散状態のモニターと同義となる。モニター法は、in vivoで使用するためには経ファイバー的なリアルタイム計測法を適用しなければならない。そこで、我々は簡便で情報量の多い光プローブ法をHo:YAGレーザー接触蒸散のモニター法として提案してきた。本法により血管穿孔防止のための照射組織の判別が可能であることは、既に報告した⁹⁾。本論文では、蒸散基礎研究手段として主用されている時間分解写真撮影法と光プロ

ーブ法を同時に透明モデル物質に適用し、血管断裂が生じる状態のとき光プローブ法でどのような信号が検知できるかを検証した。

【実験方法】

図1に実験装置の概要を示す。プローブ光にHe-Neレーザー（632.8nm）を用い、1本のLow-OH石英ガラスファイバーに蒸散用Ho:YAGレーザーとプローブ用He-Neレーザーを同時・同軸に伝送した。蒸散を行いながら、プローブ光の戻り光量の時間変化をファイバー入射端で測定した。時間分解写真撮影装置は遅延トリガ付きの照明用フラッシュランプとCCDカメラで構成した。

試料は写真撮影のため可視光透過性を確保する観点から、生体組織の主成分である水と、寒天（重量濃度0.8%）を用いた。

測定した照射フルエンスはヒト動脈血管壁を損傷なく蒸散できる $240\text{J}/\text{cm}^2$ と、血管断裂の生じた $500\text{J}/\text{cm}^2$ を用いた⁹⁾。

図1 実験装置図

【実験結果及び考察】

図2に水中で照射した際の光プローブ法の測定波形と、気泡の時間分解写真を示す。気泡はレーザーの照射と同時にファイバー先端に発生し、レーザー照射中は形を変化させながら成長していく様子が時間分解写真より観察された。レーザー照射終了時に最大となる気泡の大きさは、照射フルエンス $240\text{J}/\text{cm}^2$ の場合、縦径（照射

軸方向）が約 4mm 、体積が約 10mm^3 であった。光プローブ法測定信号を気泡の時間分解写真と比較すると、測定波形は気泡の生成・消滅に対応した強度変化を示している。波形の立ち上がりから立ち下がりまでは $200\mu\text{s}$ と、レーザーのパルス幅と一致している。これらのことから、プローブ光の戻り光は気泡の界面反射光と気泡中の粒子の散乱光であり、気泡の大きさ、形状に関する情報を含んでいると推定できる。

図2 水中照射実験結果（照射フルエンス $240\text{J}/\text{cm}^2$ ）
↑光プローブ法による測定波形、↓気泡の時間分解写真

寒天中に生じた気泡の写真と光プローブ法測定波形を図3（照射フルエンス： $240\text{J}/\text{cm}^2$ ）と、図4（照射フルエンス： $500\text{J}/\text{cm}^2$ ）に示す。図3では、レーザー照射に対応した気泡の生成・消滅が時間分解写真から観測された。プローブ

法測定波形は、時間分解写真と比較すると気泡の発生と同時に立上り、消滅と同時に減衰しており、気泡の様子を反映していることが確認できる。

図3 寒天中照射実験結果（照射フルエンス $240\text{J}/\text{cm}^2$ ）
↑光プローブ法による測定波形、↓気泡の時間分解写真

図4では、レーザー照射終了後にファイバー先端に発生するキャビテーションが時間分解写真から観測された。写真の(a)～(c)が気泡の生成・消滅に、(d)～(e)がキャビテーションに対応している。図4の光プローブ法波形は1msであり、200

μs 以降は気泡消滅後のキャビテーションを反映している。キャビテーションは、気泡消滅時の大きな衝撃力の反作用により生じるため⁽⁴⁾、この様子から周囲組織に与えた衝撃力の大きさがわかり、血管断裂を検知できると考えられる。

図4 寒天中照射実験結果（照射フルエンス $500\text{J}/\text{cm}^2$ ）
 ↑光プローブ法による測定波形、↓気泡の時間分解写真

【結言】

光プローブ法により、Ho:YAGレーザー蒸散状態をモニターすることを検討した。水中照射実験では、気泡の時間分解写真と光プローブ法による測定波形とを比較し、光プローブ法から気泡の大きさ、形状に関する情報が得られることを示すことができた。寒天中照射実験では、光プローブ法でキャビテーションのモニターが可能であり、その結果周囲に与えた衝撃力の様子から血管断裂を検知できることが示唆された。前大会での報告⁽²⁾と併せると、本法は簡便で安価であり、照射組織判別、血管断裂検知が可能のため、レーザー血管形成術の2大副作用を防止する手段として有用であると判断できる。

【参考文献】

- (1) Miya Yoshikawa et.al. Proceeding of SPIE '93, 1882, 382 (1993)
- (2) 吉川美弥ら、日本レーザー医学会誌、13、523 (1992)
- (3) 中島章夫ら、日本レーザー医学会誌、12、333 (1991)
- (4) T.G.Leeuwen et.al. J.A.C.C., 19、1610 (1992)