組織表面温制御下YAGレーザー照射治療法の開発

橋本大定 星野高伸 篠原一彦 横谷定雄* 庄司正弘* 前間篤** 幕内雅敏***

東京警察病院外科 *東京大学工学部機械工学科 **国立精神神経センター国府台病院外科

***東京大学医学部第2外科

The Development of Cooling Laser Irradiation Device

Daijo Hashimoto, Takanobu Hoshino, Kazuhiko Shinohara, Sadao Yokoya*,
Masahiro Shouji*, Atsushi Maema**, Masatoshi Makuuchi***

Dept. of Surgery, Tokyo Metropolitan Police Hospital

*Dept. of Precise Machinery Engineering, Thermodynamics Division, Tokyo University

**Dept. of Surgery, Neuro-psychiatric Center of Koonodai Hospital

***Second Dept. of Surgery, Tokyo University Hospital

Abstract

The Nd-YAG laser, which is known to penetrate tissues well and is within the infrared wavelength, mainly produce tissue coagulation and vaporization with heat. Through preliminary experiments, it was found that by cooling the tissue surface, only the deep area forms the various shapes of laser coagulation corresponding to different irradiation pattern and different cooling environment, even though no change can be detected on the tissue surface with naked eyes. The device manufactured for this research, named *Cooling Laser Irradiation Device*, consists laser irradiation part, water circulation pump with a constant temperature apparatus, and a super-high sensitivity video monitor. This device selectively forms desired shape of coagulation in the deep tissues while the surface remains undamaged. Under video observation, the convex lens tip can slide smoothly over the concerned lesion while maintaining contact with the surface tissue. Adjustable irradiation pattern of the laser beam can be applied to the tissue surface while its temperature is controlled by the flow velocity and temperature of the cooling water. With the use of the *Cooling Laser Irradiation Device*, the temperature distribution of the deep tissue was analyzed using multiple thermo-coupling system. In the future, this device will contribute significantly in the development of less, or even non-invasive surgery.

1. はじめに

近年の外科手術においては、術後の疼痛が少なく、快復や社会復帰が早く、美容的にも優れ

た低侵襲性治療法が急速に普及して来ている。現在の低侵襲手術は、内視鏡や特殊長鉗子を用いる身体深部の病変を対象としたものが主流であるが、組織表面に近い病変に対しても、レー

レーザー光等の組織深達性と加熱能力を利用することにより、表面を損傷することなく低侵襲な治療を行える可能性がある。本研究は、身体的主要な構成要素である水および組織に対し透過性のよいレーザー光を選択し、それと表面冷却法を組み合わせることにより、体表に全く損傷を与えずに身体内部の病変部を加熱凝固させる、極めて低侵襲な治療法を開発しようとするものである。

2. 研究開発の内容

2-1 治療法の原理に関する理論的検討

本研究が理論的に可能であるかどうかについて、まず伝熱学に基づいたモデルを構築し、数値シミュレーションを行って検討した。その結果の一例が図1であり、所期の目的どおり、組織内部を高温に加熱しても表面を低温に保持することが可能であることが確かめられた。また、このシミュレーションから、深部の治療を行うには、レーザー照射に先立って予冷すること、およびレーザーの間欠照射が有効となる可能性が示唆された。

図1 シミュレーション結果
(被照射体内の等温線)

2-2 加熱源の選定

本治療法の過熱源としては、レーザー、超音波、電磁波など各種のものが考えられる。しかし本研究では、医療分野で広く用いられているレーザーに注目し、各種レーザーについて組織透過性および熱凝固性能などを調査検討し、その結果、今回は、コアグレートとして既に普及しているNd-YAGレーザー（波長1.06 μm ）を最適な光源として採用することとした。

2-3 照射冷却実験装置の製作

本研究で製作した装置は、レーザー焦点照射法と表層冷却法を組み合わせ、表層に損傷を与えず選択的に組織深部でレーザー凝固層を形成させるもので、照射中にも照射部表面を観察できる工夫が加えられており、我々はこの装置を冷却式レーザー照射観察装置と命名した。表面を冷却する熱媒体として、水のほか、低温ガスの可能性についても様々な観点から検討を加えたが、除熱性の高さから最終的には水冷方式を採用することとした。システム構成は、レーザー照射部、恒温装置、ロータリー式循環ポンプ、ならびに超高感度テレビである。ビデオ観察下に、接触移動が可能な凸面レンズを患部に接触させ、流速および水温の調節により組織表層温を任意に制御した状態でのレーザー照射が可能である。照射するレーザーのスポット径は、ノブの調節により直径2～8mmの任意のサイズに設定できる。冷却装置には恒温槽が装備しており、還流させる水の温度を自在に制御できる。機器の操作性や実用性を考慮し、ハンディなプロトタイプの照射治療具を設計し製作した。（図2）

図2 ハンディなプロトタイプ照射治療具

2-4 温度分布解析装置の製作

レーザー照射中の経時的温度分布の変化を測定するための実験装置を製作した。被照射体の内部に9本の外径0.25mmの微細なシース熱電対を挿入し、各部位の温度が精度よく測定できるようになっている。熱電対がレーザー光を直接受熱することによる影響を避けるため、熱電対を誘導して保護する注射針の外面には金メッキを施している。

レーザー入力：10W

上面

断面

上面

断面

上面

断面

図3

(1) 直接照射

(2) 冷却水 15°C, 1L/min

(3) 冷却水 5°C, 1L/min

2-5 基礎実験

まず、豚角切り肉片を用いて予備実験を行った。レーザー出力を10W、スポット径5mm、連続30秒照射において

①直接組織表面に垂直方向から照射した場合

②15°Cの水を1ℓ/minの速度で表面に還流しながら照射した場合

③5°Cの水を1ℓ/minの速度で表面に還流しながら照射した場合

の3つのケースについて照射部の中央に割を加え比較をした。

その結果、直接照射では表面に蒸散炭化層が軽度の陥凹を伴って形成され、その深部に比較的層の薄い白色の組織凝固層が形成されたのに対し、表層を持続還流した場合には、いずれも表層には蒸散炭化層が形成されず、組織深部に白色の凝固層が形成され、その範囲は15°Cの水に比べ5°Cの水を用いた場合の方がより深く広がった。(図3)

次に、表面冷却式レーザー照射法の効果を多面的に検証するため、還流する冷却水温に加え、照射するレーザーの出力、スポット径、および

照射パターンなどを変化させて基礎実験を重ねた。図4は、その結果の1例である。

(a) 連続照射の場合

(b) 間欠照射の場合

図4 照射冷却実験で得た温度測定結果の例

3. 結果と考察

本研究で開発された装置を用い、レーザー照射と表面冷却に関する基礎実験を重ねた結果、当初、理論的に示唆されていた予冷法あるいは間欠照射が有効であることが確認された。

照射冷却実験の結果を熱工学的に分析すると、被照射体の熱拡散率、表面熱伝達率などの冷却能、さらにはレーザー光の吸収率を求めることができる。こうした解析から、レーザー光を照射したときの組織表面の温度の経時的变化を放射温度計によって測定すれば、レーザー光の組織透過率を評価しうること、つまり、動物実験や臨床応用の際に簡便な、レーザー照射時の熱分布予測が可能であることが示唆され、現在、測定法の理論的裏付けと測定機器の概念設計に着手している。

恒温動物では、体中に張り巡らされた動静脈系により組織が一定の温度（熱のホメオスタシス）を保っている。そこで、還流させる水の温度を体温以上に設定すると、表層から深部に向かう円錐状の凝固層を、組織を蒸散させることなく作成することが理論的に可能であると思われるが、この点に関しては、今後、順次検討を加えたい。

この治療法は、病変部に対しては強い侵襲性を有し、周辺の非病変部に対しては無侵襲という点で、理想的な治療法の構築を目指している。これを確実性のある安全な治療法として確立するためには、なお解決すべき問題も多いが、本研究の完成により、癌病変の深達性に応じたレーザー内視鏡治療や、皮膚を損傷させない下肢静脈瘤の硬化療法（レーザー凝固治療）などが可能になると考えている。