レーザー医療応用

渥美 和彦[†]

Medical Application of Laser

Kazuhiko ATSUMI[†]

(Received December 9, 2009)

Development of laser application in medicine since the discovery of a ruby laser in 1960 is reviewed. Various types of lasers have widely been used not only for diagnostics of disease but as tools in therapy. Significance of medical application of lasers will expand further under the support of progress in electronics, material science, mechatronics and communication technologies.

Key Words: Laser therapy, Medical laser application

1. はしがき

1960年, Maimanがルビーレーザーの発振に成功し, レーザー光応用の幕はひらかれた. レーザー光は, ①単色性, ②指向性, ③収束性, ④高輝度などの優れたコヒーレントな光線であり, 従来の非コヒーレントな光線では考えられない多くの特色をもっている.

レーザー発見の翌年には, ルビーレーザーを利用した眼底の網膜剥離に対する光凝固治療への応用が始められるようになった. レーザーの医学への応用の進歩は, 1963年~1975年の第一期, 1975年~1985年までの第二期, それ以後の第三期の3つに分けることができる.

第一期においては, ルビー, He-Ne, あるいはアルゴンなどのレーザーが使用されて, 高分子, タンパク質, 酵素, 細胞, あるいは生体組織などに対してレーザー光を照射し, レーザーによる生体反応の基礎的研究のデータが集積された時代であったと言える. 眼科領域では, 早期からルビーレーザーが臨床に試みられたが, 1960年~1970年代のレーザーの医学応用の最大の関心の一つは, 悪性腫瘍への効果であったと言える.

第二期においては, CO₂レーザーの開発が進み, 無血外科手術用メスとして, 臨床各分野に広がった. また, Nd:YAGレーザーやアルゴンレーザーが光ファイバの中を通ることから内視鏡と組み合わせられることにより, 独自の治療法も開発されるようになった. 一方, レーザー光の優れた特性を利用したレーザー診断法は, 画期的な精密診断を可能にしたと言える. 光増感物質を利用した光化学治療(PDT)やレーザー医学の診断への応用は,

レーザーの高エネルギーの利用から低エネルギーの利用への道を開いた.

第三期には, 低エネルギーを利用した生体刺激作用へのレーザーの応用が新しい分野を開くことになった. さらに, パルスレーザーの非熱作用による結石破壊への応用が始まったが, これもレーザーの新しいエネルギー利用である.

2. 医学に利用されるレーザー

レーザーはパルス波と連続波を発振する. その発振波長はレーザー材料により, 固有のものであるという特色を有している. すなわち, レーザー源の物質が決まると, それから発振されるレーザー光の波長が決まるということになる.

医学応用のレーザーは, 固体, 気体, 半導体, 色素(液体)といった現在までに開発されたレーザーのほとんどすべてのものが利用されており, 発振されるレーザー光の波長は, 紫外から赤外の領域をカバーしている(Table 1).

医学の治療用としては, 初期においてはルビー, アルゴン, あるいはクリプトンが中心であり, 最近までは炭酸ガス(CO₂), Nd:YAG, アルゴンの3つが中心であった. さらにその後, 半導体や色素レーザーが治療に応用されたが, 最近では, ホロミウム, エキシマレーザーの利用も始められ, 自由に波長を選択しうる自由電子レーザーの医学的応用も各国で検討し始められている. 一方, 医学の検査, あるいは診断用としては, He-Neが利

[†]東京大学 名誉教授

[†]Professor Emeritus, University of Tokyo

Table 1 Lasers used in various medical purpose.

種類	発振様式	波長(Å)	連続出力(W)	ピーク出力(MW)	用途
固体	ルビー	パルス Qスイッチ 6,943 3,472 (第2高調波)	2.4	数十	眼科用光凝固装置(小出力), 皮膚・腫瘍への照射, 細胞微小外科, ホログラフィー, 発光分光分析
	Nd:ガラス	パルス Qスイッチ 10,600 5,300 (第2高調波)		100	皮膚・脳腫瘍への照射, 発光分光分析, 色素レーザー励起
	Nd:YAG	連続波 10,610 5,300 (第2高調波)	105	10	内視鏡的光凝固装置, 外科手術用 レーザーメス (肝臓外科, 脳神経外科など)
	Ho:YAG	パルス 2060			歯科用, 結石破壊用
	Er:YAG	パルス 2940			ク
	アレクサンドライト	パルス 7550			美容(脱毛), 整形
気体	He-Ne	連続波 6,328 11,500 33,900	0.01~0.1		写真, 透過照明, ホログラフィー, 流速計, 細胞微小外科, 鍼灸術
	He-Cd	連続波 3,250 4,416	0.01 0.06		癌の治療 蛍光法, 流速計, 顕微鏡
	Ar ⁺	連続波 4,579~ 5,145	22	10 ⁻⁴	眼科用光凝固装置, レーザーメス, 細胞微小外科, ホログラフィー, 光化学療法
	Kr	連続波 4,762~6,471	6		ホログラフィー, 眼科用光凝固装置
	CO ₂	連続波 92,800 96,200 106,000	封じ切り30 低速フロー 1~1,000 高速フロー 1~20,000	10 ⁻¹	外科手術用レーザーメス, (一般外科, 脳神経外科, 耳鼻科, 産婦人科, 歯科など)
	CO	連続波 53,000	20~50		外科手術用レーザーメス
	Cu	連続波 5,000	0.1~5		生物学的研究(癌) 内視鏡的光凝固装置
	N ₂	準連続波 3,371	0.25	10 ⁻² ~10 ⁻¹	生物学的研究(癌)
	Xe	連続波 4,603~6,270	0.1~0.5		生物学的研究(癌)
	Ne	連続波 3,324	0.25		生体計測, 診断
	エキシマ	連続波 1930~3530			角膜切削(眼科), 血管内形成術
	Ga-As	準連続波 8,400	1~20		低エネルギー利用(創傷治癒, 痛み抑制) レーザー杖, 鍼灸術
液体	色素	連続波 3.62~10.20	0.01~1		生物学的研究
		パルス波 3.11~12.85		0.001~1	癌の治療

用されることが多い。

レーザー光は、従来の光にはない優れた特性を利用することによって、従来は不可能であった診断や治療を可能にしている。その医学への応用は広く (Table 2) のごとく、治療、診断、その他とに分類することができる。

3. レーザー医学の学会と会議

1965年に米国のボストンで第1回のレーザー医学研究会 (1st Annual Biomedical Laser Conference of Laser Medical Research) が開かれ、レーザーの腫瘍への効果が発表された。その後、レーザー医学あるいは医用レーザー専門の国際的な研究会や会議がもたれるようになったが、本格的に国際的な会合が開かれるようになったのは、1975年以降である。

第4回国際レーザー外科会議は、1981年、東京において筆者らにより開かれ、内容も外科に関するレーザーの応用から、広く、内科、診断学にまで拡大されて、参加者は800人、発表論文は292題と、質量ともに国際会議は大きく飛躍することとなった。

この正統な国際会議の他に、光化学レーザー療法、Nd:YAGレーザー医学、レーザー低エネルギーの医学応用などの国際会議が米国、イタリア、西ドイツなどで開かれた。また、米国、フランス、イタリア、日本などの各国においても盛んにレーザー医学会議がひらかれるようになった。

なお、中国(1982年)、韓国(1983年)、台湾(1984年)と、東南アジアにおいても、次々と各国の学会が組織され、学会交流活動も盛んになってきている。1985年には、アジア・太平洋レーザー医学会議が設立され、第1回の会議が東京において開催された。

4. わが国におけるレーザー医学の進歩

わが国のレーザー医学の研究は、1965年すでに筆者らの東大グループにより、ルビーレーザーを使用した基礎的研究が進められた。その後、医用高出力ルビーレーザー装置が開発され、1967年、皮膚癌へのレーザー治療の本邦第一例が試みられている。その後、ルビー、CO₂、He-Ne、アルゴン、Nd:YAGの各レーザーの開発お

Table 2 Medical laser application (Kazuhiko Atsumi, Yasuhisa Sakurai, 1978).

A) 治療への応用	
(1) レーザーメス	・網膜光凝固装置(眼科), パルスレーザーメス(皮膚科),
	・マイクロ外科レーザーメス(耳鼻科), 連続波レーザーメス(無血手術)
	・直達鏡レーザーメス(レーザー内視鏡手術), 光ファイバメス,
	・ステレオタキシク脳手術(下垂体手術)
(2) レーザー碎石器	・尿路結石用, 胆石碎石器
(3) 生体用レーザー溶接器	・血管溶接, 骨溶接用(整形外科), 虫歯予防(歯科)
(4) 生体用レーザー刺激	・鍼灸用つば刺激, 創傷治療用, 痛み抑制用
B) 診断への応用	
I) 生体検査用	
(1) 照射用	・レーザー光透過照射
(2) 分光分析用	・レーザー発光分光分析(散乱, 吸収, 蛍光スペクトル)
	・がん蛍光分析, 血液酸素飽和度, 血中アルコール
	・血液成分測定
(3) レーザー干渉計	・聴覚器振動検査, レーザー聴診器, 変形検出用
	・体壁微小振動検出, 網膜解像力測定
(4) レーザードブラー計測	・心血管の血流計測, 網膜血管血流計
(5) 刺激関知測定	・病覚計, 温感計, 色覚計
(6) レーザーホログラフィ	・眼底カメラ
(7) 超音波ホログラフィ	・軟部組織の三次元映像
(8) スペックルパターン応用	・眼球屈折異常検査用
II) 検体検査用	
(1) レーザー微粒子光計測	・自動細胞分別
(2) レーザー散乱	・精子泳動度計測, 懸濁計
(3) レーザードブラー流速計	・抗原・抗体反応検出用
(4) レーザー顕微鏡	
(5) レーザー分光分析	
(6) 画像処理	・血球分別用, 細胞診用
C) その他	
(1) ミクロ照射	
(2) ミクロレーザー刺激	
(3) 人工光合成	
(4) 酵素賦活	
(5) 細胞増殖賦活	
(6) レーザー孔あけ(縫合針)	
(7) 立体視用ホログラフィ	
(8) 殺菌用	・汚染創傷用, 下水処理用
(9) 感覚補助用	・盲人用レーザー杖, ホログラフィ眼鏡
(10) 立体視用ホログラフィ	

よび利用により, 基礎的, 臨床的研究がわが国の各地において行われた。さらにその後, 光化学治療, CO₂レーザーやCO₂レーザー導光路の開発, コンタクトレーザープロローベ, 低エネルギーレーザー治療, 血管吻合や骨折治療, 心臓血管系への応用など, 多方面にわたりレ

ザーの治療への応用が広がった。

一方, 医学の検査・診断の分野におけるレーザーの利用も1960年代の後半に, 筆者ら東大グループにより進められた。すなわち, レーザードブラー血流計測, レーザー発光分光分析, 超音波ホログラフィの開発などである。

その後, レーザースペックルパターン, 光ファイバによるレーザードブラー血流計測, 生体組織のレーザースペックル分析, 自動生体細胞分離, レーザー光励起蛍光癌計測などのユニークな研究が行われた。さらに, レーザーホログラフィ, レーザー回折法なども利用されている。

5. レーザー医学の三大成人病への挑戦

レーザー医学は, レーザーを生体に作用させる, あるいは医学に利用することによって, 人類の診療のみならず, 健康維持, 疾病予防, リハビリテーション, 老化防止などに広く役立つものである。日本人の3大死因は, 癌, 心臓病および脳血管障害であり, これらの疾病の克服のための挑戦は, レーザー医学にとって最も重要な課題であろう。

5.1 心臓病のレーザー診断およびレーザー治療

現在, 心臓病のレーザー診断の方法としては, ①超音波ホログラフィ, ②X線ホログラフィ, ③レーザードブラー血流計測, ④レーザー発光分光分析などの方法がある。これらのうち, 超音波ホログラフィの発展のためには, 今後, 超音波透過像の基礎的研究, ホログラム材料の開発および映像の画質向上のための処理の研究が必要である。X線ホログラフィは将来その応用が考えられるものである。

レーザードブラー血流計測は, 光ファイバの開発, 局所誘導法などの基礎的研究により, 血管および心臓系の多くの分野に利用される可能性がある。レーザー発光分光分析は, 最近, ドイツにおいて一段と感度を向上させた装置が開発され, 従来測定が不可能であった新しい元素の半定量分析が可能になったとのことであるが, 今後, 装置の簡便化が重要な課題となろう。

心臓病の治療としては, ①血管内レーザー内視鏡による心臓弁手術, ②レーザー光穿通による心筋内血管再生, ③レーザー光による狭窄冠動脈の開存, ④レーザー光による洞房結節および刺激伝導路への刺激などがあげられる。

これらの中, ①については, 動物実験が行われ, その可能性が検討されている。②については, 米国およびわが国において十数例の臨床応用が試みられ, ③については, 開胸下および非開胸下での臨床例が米国において数百例が報告されたが, 術後に狭窄が起こることが判り, その後, 臨床が中断されている。④については, 世界において臨床例が続けられている。

5.2 癌に対するレーザー診断およびレーザー治療

主な癌のレーザー診断としては、①レーザー光スペクトル診断法および②レーザー光癌蛍光法などがあげられる。レーザー光スペクトル診断法は、レーザー光により生体組織の反射、吸収、散乱、蛍光スペクトルを分析するもので、基礎的研究、各種波長の発振レーザー、さらにそれらの光を導光する光ファイバの開発が重要である。レーザー光癌蛍光法は、癌の部位がアルゴンレーザー光の励起により蛍光を発生するというもので、簡便できわめて応用の多い方法である。現在、必ずしもすべての悪性腫瘍にのみ蛍光が発生するわけではなく、今後、蛍光発生のメカニズムの解明が重要である。

癌の治療の方法としては、レーザー光の高エネルギーを利用して癌を破壊(気化・蒸散・凝固)する方法と、レーザー光の低エネルギーを利用して光化学療法を行う方法とがある。前者においては、今後、レーザーの波長、エネルギー密度、作用時間などと生体組織の相互作用の基礎的研究や周囲損傷部を検知し防護する方法、あるいは制癌のソフトウェアのガイドラインなどが重要であろう。後者においては、光増感物質の励起による制癌作用機序の解明、および新しい、さらに有効で副作用の少ない、腫瘍に選択的に集積する光増感物質の開発が必須であり、医用波長選択性のレーザーの開発も重要となる。

5.3 脳卒中のレーザー治療

脳卒中の治療法としては、①脳内出血部位の止血および修復、②レーザー光刺激による壊死巣の吸収および拡大の防止、③脳内血管の動脈瘤治療(経血管)、④四肢麻痺筋のレーザー刺激によるリハビリテーションなどがあげられる。

これらの基本としては、レーザー光の細胞活性化に対する、酵素レベルあるいは分子レベルでのメカニズムの基礎的解明が必要となる。

6. 未来のレーザー医学

現在までに開発された医用レーザー技術としては、下記の(1)から(13)までがあげられて、その一部は臨床にも応用されつつある。(14)および(15)は将来の夢として開発が期待されている。

- (1)携帯用(出力20 W)超小型CO₂レーザーメス
- (2)癌治療用紫外線レーザー(N₂, He-Cd, エキシマなど)メス
- (3)波長可変の医用色素レーザー装置
- (4)レーザー鍼治療用半導体レーザー
- (5)医用エキシマレーザー血管外科用装置
- (6)紫外線より遠赤外線までの各種の領域のレーザー光を伝達する光ファイバ(無毒性)

- (7)光ファイバによるCO₂レーザー, Nd:YAGレーザー, アルゴンレーザーとの組み合わせ装置と中央管理手術室設計
- (8)高感度, 小型レーザー発光分光分析装置
- (9)レーザー散乱, 吸収スペクトル分光分析装置
- (10)レーザー散乱汚濁度測定装置
- (11)携帯用簡便型レーザードップラー血流計測装置
- (12)レーザー蛍光癌診断装置
- (13)医用超音波ホログラフィ装置
- (14)自由電子レーザー
- (15)X線レーザー

ここで、遠未来の夢も含めてレーザー医学の未来を考えてみると、次のような項目が期待されよう。これらのほとんどのものは、原理的には実現可能のものであるが、その開発のためにはレーザー技術の他にメカトロニクス, マイクロエレクトロニクス, 光技術, 高分子材料あるいは超伝導など周辺の高度の技術の支援を必要とすることとなる。

- (1)レーザー内視鏡による全身の組織の非侵襲, 無血手術の実現
- (2)レーザー分光や蛍光による各種病変や疾患, 癌などの診断
- (3)モノクローナル抗体とレーザー自動細胞識別による各種疾患や癌診療
- (4)癌の選択的治療
- (5)レーザー光化学作用による癌リンパ線郭清
- (6)光ファイバレーザーによる血管内および心臓手術
- (7)超微小外科による細胞内手術
- (8)波長可変レーザーによる細胞内代謝の解明
- (9)免疫拒絶反応の予知
- (10)レーザー微弱発光による生体内自動酸化や酵素過程の解明
- (11)超音波, X線ホログラフィによる生体臓器のオンライン三次元映像化
- (12)レーザー鍼治療による健康増進や痛みの抑制
- (13)X線レーザーによる遺伝子工学
- (14)光ファイバレーザー通信による医療情報や画像の伝送
- (15)光コンピュータ(レーザー)を利用した高密度, 高速の医療データバンクの実現
- (16)レーザー診療を総合化したレーザー病院の実現

7. 結 び

レーザー医学は、従来は不可能であった診断や治療を可能にするという点で意義がある。今後、レーザー技術の進歩とその医学への応用により、医学の研究や医療の分野のみならず、医療経済の分野にも革命が起こる可能性がある。