特集

レーザーの医学への応用

久保 宇 市*

(1987年6月11日 受理)

Medical Application of Lasers

Uichi KUBO*

(Received June 11, 1987)

Medical application of lasers has been rapidly progressive and has become an important field in laser application. The instruments (CO₂ laser scalpel etc.) availing thermal effects have been mainly developed so far. Recently, with the advance of laser techniques, short wavelength lasers are developed and could be put to practical use. The photochemical effects have attracted much interest in medicine and new surgical treatments are expected using ultraviolet lasers, tunable lasers, etc.. In this paper, the features and future prospects of medical lasers are interpreted.

Key Words : Medical laser, Thermal effect, Photochemical effect, Ultraviolet laser, Tunable laser.

1. はじめに

レーザー医療は眼底凝固治療に始まり、レーザーメス、レーザー内視鏡などレーザーエネルギーの熱的効果を利用した新しい治療法として発展してきた。これらは従来の方法では得られない利点をもって医療の分野で広く実用化されつつある¹⁾。レーザー照射によって生じる生体組織への熱効果は、組織破壊の結果、切開、切除機能、また熱凝固によって止血効果をもたらす。更に組織の熱凝固を利用して患部組織を壊死させ治癒させる方法も有効に用いられている。医用レーザーの発達にはレーザー発振器自体の進歩に負うところが大きいのは当然であるが、光フ

ァイバー技術がタイミング良く発達してきたことは見逃せない事実で、光ファイバーはレーザー医療を発展させるのに大きく貢献している。

レーザー自体の開発は周知の如く短波長化を指向しており、エキシマを利用した紫外レーザーも商品化されるに至り、これらの医学応用も検討されている。最近、レーザー医学に於ては光化学的な医療技術の開発が注目されており、同調形レーザー、エキシマレーザーの医療応用も具体化されつつある²⁾。

赤外、可視域のレーザーを主としたレーザーエネルギーの熱的効果を利用したものを第一世代の医用レーザーとすれば、短波長レーザーを主体にした光化学的効果の利用が、第二世代医

* 近畿大学理工学部電気工学科 (〒577 東大阪市小若江3-4-1)

* Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Kinki University (3-4-1, Kowakae, Higashiosaka 577)

用レーザーとして発展すると考えられる。

2. レーザーの産業応用と医療応用

レーザーの医療応用には産業応用と対応する類似点が多く見出される。まずレーザー加工はレーザーメス (Laser Scalpel) による外科治療、レーザー凝固による内科治療に対応する。

レーザー同位体分離の技術は、患部組織の色、または光感受性物質、増感剤の吸収帯にレーザー波長を同調させて照射する治療法に対応する。レーザー同位体分離ほど微細な同調性は要求されないと思われるが利用法としては同じ手法である。

レーザー CVD をはじめ表面改質、新素材関係のレーザー応用技術は、光化学的治療法に対応する。産業面での新しいレーザー応用は、医学応用に於ても活用されようとしている。

その他、光ファイバー技術は内視鏡とレーザーを組み合わせた非切開治療と密接に関係しており、レーザー計測技術も新しい診断、計測法として医療面で用いられている。

これらの関係を Table I に示した。

3. エキシマレーザー

エキシマレーザー装置の普及化に伴い、その医用化も検討されており、近い将来、医用エキシマレーザーが実現すると思われる。既に眼科

Table I Correlation of industry with medicine in laser applications.

Industrial Applications	Medical Applications
Laser processing (cutting, drilling, welding, marking, annealing, trimming, scribing.)	Laser scalpel and coagulator (CO ₂ , YAG, Ar)
Laser chemical reactions (CVD, surface processing)	Laser photochemical therapy (Excimer)
Laser isotope separation (uranium concentrate)	Photodynamic therapy (Ar, Cu, Excimer) + Dye
Optical fiber (optical communication)	Endoscopic therapy and diagnosis (He-Ne, YAG, Ar, Dye)
Laser measurement	Diagnosis (He-Ne, Ar, Dye)

Fig.1 Characteristics of laser beam transmittance in pure water.

ではXeClレーザーを用い、その光集束性を始め以下に述べる特徴を生かして、角膜、水晶体の手術に利用され始めている^{3,4)}。

エキシマレーザーで発振する紫外ビームの特徴のひとつに水中透過性の高いことがあげられる。例えばKrFレーザーの0.248μmビームの水中減衰距離は約240cmで、水中透過性の高いArレーザー (0.515μm) の減衰距離約300cmに近い透過性を示す (Fig. 1)⁵⁾。この特性は、CO₂レーザー (10.6μm) の水中透過性が極めて低く、減衰距離10⁻²mm以下であるのに対し正反対である。従って、KrFレーザービームは生体組織に対してCO₂レーザービームと異った効果を与えようと考えられる。即ち、CO₂レーザーは生体組織中の水分に作用し、その蒸発、凝固を起すが、KrFレーザーは生体組織内へ浸透し、水以外の組織物質に直接作用すると考えられる。また、CO₂レーザーメスは一般連続発振のものが使われているが、エキシマレーザーは短時間幅、高尖頭値パルスの繰り返し発振である。更に波長がCO₂レーザーの約1/40であるからビームの集束性を高めることができる。但し、高出力エキシマレーザーは一般に多モード発振であるための難点はある。

紫外レーザーを医用化する上での技術的問題点のひとつは導波路であり、通常の光ファイバーがCO₂レーザーに使用できないのと同様に紫外レーザーに対しても損失が大きい。医用レーザーの実用化には可撓導波路が不可欠であり、

Fig.2 Absorption spectrum of DNA and mutate probability.

紫外レーザー用光ファイバーの開発が重要な課題になるであろう。現在, KrFレーザーの $0.248\mu\text{m}$ が水中透過率の高い事実よりOHイオンを多量にドーピングした光ファイバーの検討が進められている⁶⁾。

紫外レーザーの生物学的に注意すべき点は, DNAによる吸収の結果生じる突然変異である。DNAは $0.26\mu\text{m}$ に吸収のピークをもつ。また, 突然変異の起る頻度曲線もほぼ一致する。Fig. 2に紫外域波長とDNAによる吸収曲線及び突然変異の誘導頻度曲線との関係を示した⁷⁾。図よりXeClの $0.308\mu\text{m}$ は安全性が高いが, KrFの $0.248\mu\text{m}$ の危険性が高い。しかし, それぞれ有効な医療応用があると考えられ, 今後の検討に待つところが大い。

今後エキシマレーザーの医療応用を進めるための参考資料として, KrFレーザーによって骨切開を行った例を示す⁸⁾。Fig. 3は牛の肋骨をKrFレーザーで切断した断面の写真である。CO₂レーザーの連続照射で生じる炭化は見られない。また豚の膝軟骨を切開した部分の顕微鏡写真(組織標本)をFig. 4に示した。切り込み面附近の骨細胞に乱れが生じていないことが明

Fig.3 Photograph of cow's bone cutting surface with KrF laser.

Fig. 4 Microphotograph of cut up pig's articulation genus (cartilage) with KrF laser, without putting it disturb the order bone's cell at around of cutting part.

白である。

このように炭化を生じない鋭利な切開の機構は現在十分明かではないが, 紫外ビームであること, 短時間, 高尖頭値パルスの繰り返し照射であることに起因すると考えられる。その何れが主な効果をもたらすか検討中である。また, KrFレーザーの場合, CO₂レーザーで見られる熱凝固による止血効果は見られない。即ちKrFレーザーでは熱的作用が小さく, 止血能力はない。従って, 連続発振CO₂レーザーは高熱切開, KrFレーザーは低温切開であると云える。両者の特徴をTable IIにまとめた。

4. 金属蒸気レーザー

金属蒸気レーザーとして一般的に考えられるものは殆んど可視域で, ビーム径が大きいこと, 準連続発振であることなどから医療の分野によっては有効なレーザーとなる。特に銅蒸気レーザ

Table II Effect of water on CO₂ and KrF laser irradiations.Light absorption by water.CO₂ laser beam : very strong absorption.

KrF laser beam : very weak absorption.

↓
cooling effects of tissue by water.CO₂ laser (cw) : higher temperature cutting.

KrF laser (pulse) : low temperature cutting.

Most important problems.

- Probability of KrF laser beam induce cancer.
- Surviving of cancer cells under KrF laser beam irradiation.

ーは、0.5106 μ mの比較的直径の大きなグリーンビームが得られるので、皮膚科、形成外科、眼科に適しているが現状では装置が高価なため広く実用されるに至っていない。しかし上記の医療分野で要求される出力は数ワットで足りるから小形で価格も適当なものが出来ると思われる。

次に金蒸気レーザーは、0.6278 μ mの明るい赤色ビームを発する。この波長域のビームは生体組織への透過性が優れ（透過長、数cm）、深い患部への照射効果が期待できる。従って、深部の温熱治療（hyperthermia）、光感受性物質を併用した深部の光化学的治療の応用に適している。

現在、考えられる金属蒸気レーザーの種類をTable IIIに示した。融点、沸点は何れも1気圧下での値である。この表で見る限りでは鉛（Pb）蒸気レーザー、ビスマス（Bi）蒸気レー

ザーなどが銅、金に次いで医用レーザーとして応用される可能性がある。

5. 色素レーザー

色素レーザーの同調性に注目して医療への応用が進められているのは、癌治療を目的とするレーザー応用のひとつに、腫瘍親和性光感受物質を癌組織に取り込ませ、その物質の吸収帯に同調した波長のレーザービームを照射して癌組織を破壊する方法がある。このために同調形レーザーが要求される。既にアルゴンレーザー励起色素レーザーは色素に RhB, DCN, Kiton redなどが使われている。腫瘍親和性光感受物質にはHpD（ヘマトポルフィリン誘導体）が主に使用されている。HpDの特性から診断用には0.405 μ m、治療用には0.63 μ mが適しており、出力は1～3 W程度である⁹。

また皮膚科に於ては、治療対象の色に様々な場合があるため、最も治療効果の高いレーザー波長が異なる。従って波長可変の色素レーザーが注目されている。

医用色素レーザーとしては、銅蒸気レーザー励起形、XeClレーザー励起形が挙げられる。これらは産業用としては既に商品化されており、医療に適した装置にまとめることが今後の課題である。

6. その他のレーザー及び周辺技術

6.1 半導体レーザー

レーザー鍼を始め光刺激治療には半導体レー

Table III List of metal vapor lasers with wavelengths, melting and vaporizable points.

Metal	Wavelength	Melting point (°C)	Vaporizable point (°C) (1atm)
COPPER(Cu)	0.5106 μ m(green), 0.5782 μ m(orange)	1085	2580
GOLD(Au)	0.6278 μ m(red), 0.3122 μ m(UV)	1064	2710
LEAD(Pb)	0.7229 μ m(red), 0.4057 μ m(dark blue)	328	1750
MANGANESE(Mn)	0.5341 μ m(green), 1.29 μ m(near IR)	1244	2152
CALCIUM(Ca)	0.8662 μ m(near IR)	848	1487
BISMUTH(Bi)	0.4722 μ m(blue)	271	1560
THALLIUM(Tl)	0.5350 μ m(green)	303	1457

ザーが適しており、半導体レーザーの性能向上によりこの分野の研究も盛んになってきた。半導体レーザーは小型で取り扱い容易、更に廉価である点で他の種類のレーザーに優るが現状では一般に近赤外域のものが使用されており、可視域で比較的输出の高い半導体レーザーが普及すればこの分野の医療応用は一層活発になると予想される。

6.2 パルスレーザー

医用レーザーは現在まで連続発振のものか、シャッターでパルス化したものが殆んどである。従って熱蓄積による炭化、変性など、目的とする治療以外の弊害を生じる場合がある。この改善法として高尖頭値、短時間パルスの繰り返し照射が考えられる。例えばエキシマレーザーはこれに該当する。即ち高尖頭値、短時間パルスの繰り返しによって組織破壊を行う場合、パルス間に十分な熱緩和時間をとると熱蓄積を起さず破壊が進行し、照射部近傍の炭化、変性を抑えることができる。

この場合、温度の上昇が抑えられるので熱効果が小さく、生きた組織細胞を照射によって散布する欠点も考えられる。従って治療対象によっては連続照射が有利な場合もある。即ち、相対的に治療部位の高温化を利用する治療と高温を必要としない治療への使い分けが肝要であると考えられる。

6.3 セントラル・レーザービーム供給システム

将来のレーザー医療機関としては、各種の治療を扱うに当り各々適切な種類のレーザーを必要とするであろう。それらの装置は恐らく大形化すると共に特殊な環境条件を必要とすることも予測される。即ち治療室に設置することが不可能な場合も起る。この場合、レーザー発振装置を集めた発振室を設け、各治療室へ伝送系によってビームパワーを供給する方法が考えられる。伝送系に問題なければ隔離した場所へもパワーを送り込めるのがレーザーの特徴である。

既に国内に於て、この方式を試みている医療機関も実現している¹⁰⁾。更に多数種のレーザーに対する有効なビーム伝送系の技術を開発する必要がある。新しい時代のレーザー医療には、これら周辺技術の発達に負うところも大きいと考えられる。

7. おわりに

ルビーレーザーが始めて発振してからのレーザーの足跡の概観をFig.5に示した。図の如くレーザーは年と共に短波長領域へ発達しており、医用レーザーの将来もこの傾向に沿って発展してゆくものと予想される。

最近の医学界は進取の気象に富んでおり、既に述べた如くレーザー医療に於ても波長可変レ

Fig.5 Overview of laser developments.

Table IV Future medical lasers.

NEAR FUTURE MEDICAL LASER

Ultraviolet lasers

Metal vapor lasers

Dye lasers

Semiconductor lasers

Laser central supply systems

FAR FUTURE MEDICAL LASER

Free electron laser

ーザーを必要とする気運が高く、自由電子レーザーに着目し、その医療応用の声を聞くことがある。寡聞にして現状では不可能と思われるが、遠い将来の有力候補となることは考えられる。

将来の医用レーザーとして活躍すると予想される主なものを Table IV に示した。これ以外にもあると思うが代表的なものとして、この種のレーザーが医用として活用されると思う。

これら第2世代医用レーザーとも云うべき新しい装置、技術が実現しても、将来のレーザーメス、コアグレータなど第1世代医用レーザーの価値は廃れるものではない。それなりの優れた治療法として確立されている。第2世代医用レーザーは、その上に立って更にレーザー医療の分野を広げる役割を担うものと考ええる。技術の世界でしばしば見られるように古いものは役に立たず先端を追うのとは趣を異にする。

科学技術の発達には、その成果を人間社会に還元してこそ意義がある。先端技術の代表とも云

えるレーザーも医療福祉への貢献が技術の意義を深めるものと確信する。新しい世紀を目指して一層の発展を期待するものである。

参 考 文 献

- 1) 久保：医用レーザー入門（オーム社，東京，1985）.
- 2) 久保：レーザー学会研究会報告，RTM-86-25 (1986) 21.
- 3) S.P. Kern: SPIE, Vol.712 "Laser in Medicine" (1986) 86.
- 4) R.G. Caro, D.F. Muller: SPIE, Vol.712 "Laser in Medicine" (1986) 95.
- 5) 橋新，岡田，久保：レーザー学会第7回年次大会予稿集，30pV2 (1987) 191.
- 6) 久保，岡田，田中：電気学会研究会資料，OQD-86-77 (1986) 93.
- 7) 中村：基礎生物学（培風館，東京，1986）.
- 8) 久保，岡田：日本レーザー医学会誌，7 (1987) 87.
- 9) 加藤，会沢，早田他：レーザー研究，14 (1986) 44.
- 10) 角田，杉山，末永，渥美他：レーザー研究，14 (1986) 107.