特集 6

整形外科領域におけるレーザー応用

米澤 卓実*・小野村敏信*・本村喜代二**

渥美和彦**・久保宇市***

(1986年2月20日 受理)

Laser Applications in Orthopedic Surgery

Takumi YONEZAWA* Toshinobu ONOMURA* Kiyoji MOTOMURA**

Kazuhiko ATSUMI** and Uichi KUBO***

(Received February 20, 1986)

1. はじめに

整形外科領域におけるレーザーの臨床応用は、実験的段階の域を超えていないのが現状である。しかし、発振器の開発および導光路のめざましい開発により、臨床応用への可能性は拡がりつつある。一般的にはCO₂レーザーやYAGレーザーを中心とする蒸散・切開・止血・凝固などの使用方法と低出力レーザーによる微小血管吻合や神経縫合と生体系への治癒促進作用や除痛効果への利用法などがある。

1960年、maimanがRubyレーザーを実用化した3年後には、キセノンアークランプに代わって、Rubyレーザーが光凝固装置として、眼底疾患に応用され始めた。日本では、1965年、東

京大学の渥美・桜井・藤正ら¹⁾により製作されたRubyレーザーによるマウスの組織や腫瘍への生体反応の効果検索が、医療応用への第一歩であった。

その後、各種波長のレーザーが開発され、一般的医療応用には、CO₂レーザー・YAGレーザー・Arレーザーが多く使われるに至った。また、近年では、半導体レーザーやエキシマレーザーによる臨床応用への検討がさかんになされている。しかし、整形外科領域での研究報告や臨床報告例は極めて少なく、他科に較べて、後発のそしりはまぬがれないのが現状である。その理由として、①骨切りなど硬組織に対する効果的波長や出力のレーザーがなかったこと、②蒸散・切開・止血・凝固を中心としたレーザー

* 大阪医科大学整形外科学教室 (〒569 高槻市大学町2-7)

** 東京大学医学部医用電子研究施設 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

*** 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 Orthopedics, Osaka medical College (2-7, Daigaku, Takatsuki, Osaka 569)

** Institute for Medical Electronics, Faculty of Medicine, The University of Tokyo (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113)

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

Table I レーザー治療の特徴

- (1) 非接触である。
ア) 感染の危険性が少ない。イ) 消毒が容易である。ウ) 機械的刺戟がなく、創面の安静が保てる。
- (2) ふく射的熱利用である。
ア) 非接触的熱効果。イ) 必要な範囲にのみ熱作用を限定できる。ウ) 伝導性の熱的障害を抑制できる。エ) 創面の殺菌効果がある。オ) 蛋白を凝固するので悪性腫瘍の手術における転移を抑制できる。カ) 出血を抑制できる。キ) 電氣的生体障害がない。ク) 放射線のような副作用がない。
- (3) 熱効果の他に、光効果、圧効果、電磁界効果もあり、従来の方法とはまったく異なった治療法が考えられる。
- (4) 無振動、無騒音操作である。
- (5) 治療時間が短い。
- (6) エネルギーの体内への伝送が容易である。
ファイバーの利用
- (7) 微小点治療が可能である。
細胞外科、マイクロサージェリーへの応用。
- (8) 透過治療が可能である。

Table II レーザー手術の利点

- 1 非接触操作が可能である。
- 2 止血、凝固により出血量を抑制できる。
- 3 腫瘍細胞を播種することなく手術操作を加える。
- 4 術野の妨げなく、容易な切除操作が加えられる。
- 5 術後の疼痛、腫脹が軽度である。
- 6 創傷治癒促進効果がある。

メスの開発が中心であったこと。③従来の手術器具では得られないレーザーの特性が十分理解されてなかったことなどが考えられ、さらに、価格・スペース・操作性などの問題が大きな障害となっていたと考えられる。また、整形外科医の研究者が極めて少なく、レーザーに関する基礎的研究が遅れていることも、臨床応用の大きな遅れの原因である。

整形外科領域でもレーザーによってもたらされるメリットは他科と同様に多様であり、近年、各種波長の発振器の開発に並行し、発振器と患

者を結びつけるインターフェイスである導光路が、光通信との関連で飛躍的進歩をとげ、この2者が結びつくことにより、様々な機種のレーザー機器が開発された。このことにより、レーザー手術の基本手技の項で述べる、①Cutting (切開)、②Vaporization (蒸散)、③Coagulation (止血・凝固)、④Tissue Welding (接着) というような利用方法の他に、Photoradiation Therapy (P.R.T.) やレーザー鍼での除痛治療、さらに慢性関節リウマチ (R.A.) への免疫機構を介した治療の可能性が検討されるにいたっている。

整形外科に限らず、一般的なレーザー治療の特徴は、Table I のような内容が考えられ、さらに、レーザー手術の利点は、Table II のように考えられている。しかし、Table I、Table II の内容も、新しい波長の発振器や機種の改良により大きく変わることが十分予想される。例えば、エキシマレーザーにより軟部組織を切開しても、発煙・悪臭がほとんどなく、肉眼的にも、顕微鏡下でも、CO₂レーザーにより見られる炭化層は明瞭でなく、また、切開時の止血・凝固能も、ほとんど認められず、熱作用以外の切離作用機序があると考えられる。このことは、Table I の(2)の内容と一致しないが、逆に、レーザーがもつさまざまな可能性の一部を、我々は、見ているにすぎないことの証明でもある。

2. 整形外科領域でのレーザー使用状況

過去、レーザーの整形外科関係の論文は、渥美の報告によると、1962年～1980年の間に、わずか21編にすぎない。報告内容も、各組織への照射による組織学的検索がその大半を占める。1981年、東京で開催された第4回国際レーザー医学会においても整形外科医からの発表はなく、1983年の第5回レーザー医学会では332件中、18件の発表があったのみで、大半は、CO₂レーザーに関するものであった。1985年の第6回のイスラエル大会では、341件中34件(脳外科や血管外科でも整形外科に应用できる内容のもの含む)の報告予定であったが、イタリア船

乗っ取り事件直後のため、整形外科領域の発表の主力メンバーであるアメリカ人の欠席が多く、その詳細は得られなかった。しかし、発表件数は着実に増加しており、日本でも、日本レーザー医学会で、本村が^{2,3)}レーザーでの骨切り後の化骨形成や、Arレーザーによる骨折部の治癒促進効果について発表している。また、日本整形外科学会では、1985年、近畿大学の田中により、初めて、レーザーによる末梢神経縫合研究が発表された。広島大学整形外科のグループ⁴⁾は、低出力CO₂レーザーによる血管吻合や神経縫合の研究をマイクロサージャリー学会などで発表している。さらに、関節鏡学会では、東京女子医科大学の井上⁵⁾が、CO₂レーザーによる関節鏡視下半月板切除術や滑膜切除術を行い、第7報を出すに至っている。このように、日本国内でも、着実に発表がふえている。

3. 整形外科の概説

本論に入る前に、他領域でレーザー研究に従事している読者のために、整形外科が現代医療の中で扱う疾患の概略を述べる。

神中⁶⁾は、Haglundの定義に従い、「整形外科は、姿勢および運動器の病理と治療学である。」と解釈した。日本の整形外科は、この解釈のもとに、頸部以下の運動機能に関連する疾患を取り扱ってきた。主に、骨・関節・筋・神経・腱の疾患である。これを、神中整形外科学に沿って大別するとTable IIIのように多岐にわたる疾患にわたっている。そして、治療法は、患者その「人」の生活像を把握し、Active Daily Life(A.D.L.)上の障害を克服し、社会への復帰・適応を目ざしている。そのため同一疾患・同程度の症状によっても、おのずと、保存的療法から手術療法に至るまで、様々な治療法が用いられる。この多種多様な内容を持つ整形外科疾患に対し、レーザーは、様々な対応の可能性を持っていると期待される。

4. 整形外科手術へのレーザー応用

現在の整形外科へのレーザー応用では、手術

Table III 整形外科疾患の概要

-
A	骨系統
1	骨損傷（骨折など）
2	先天奇型（多指症、合指症など）
3	系統疾患（遺伝性疾患やクル病などの代謝性疾患など）
4	感染症（化膿性骨髓炎やカリエスなど）
5	骨、軟部腫瘍
6	姿勢異常（側湾症など）
B	関節系統
1	関節損傷（捻挫、脱臼など）
2	感染症、炎症
3	関節リウマチと近似疾患（慢性関節リウマチなど）
4	変形性関節症
5	代謝、内分泌疾患（痛風など）
6	先天性遺伝性疾患
7	皮膚疾患を伴う関節炎（全身性エリテマトーデスなど）
8	血液疾患を伴う関節炎（血友病など）
9	腫瘍
10	いわゆる骨端炎（ペルテス病など）
11	関節の拘縮、強直、病的脱臼（癰痕拘縮、先天性股関節脱臼など）
C	神経系統
1	神経損傷（脊髄および末梢神経の損傷）
2	脊髄、脊髄疾患（椎間板ヘルニアなど）
3	神経、筋疾患（神経原性筋萎縮性疾患など）
4	脳性麻痺および脊髄性小児マヒ
5	腫瘍
6	先天異常（髄膜瘤など）
7	感染症、炎症（髄膜炎など）
D	筋、腱系統
1	外傷
2	感染症、炎症（腱鞘炎など）
3	神経筋疾患（筋ジストロフィーなど）
4	腫瘍
5	先天異常
-

臨床的には、

- 1 脊椎、脊髄疾患
- 2 関節疾患
- 3 手の外科疾患
- 4 小児整形外科疾患
- 5 骨折を中心とする外傷性疾患
- 6 骨、軟部腫瘍

など、治療に即したグループにより、診療に従事している。

Table IV 整形外科でのレーザー手術適応

(a) 絶対適応：腫瘍手術
血友病患者の手術
(b) 相対的適応：骨・関節手術
手の外科手術
慢性関節リウマチの再建術

への利用が最も考えられ、以下、手術適応および手術基本手技について述べる。

4.1 レーザーの整形外科手術への適応

1975年、1977年の第1回および第2回国際レーザー外科学会で、整形外科領域でのレーザー手術適応は、Horosowskiら⁷⁾により、Table IVのようにまとめられた。

そして、レーザー手術の限界と合併症について、①熱傷、②切開深度の制御不良、③非接触感、④除痛効果の不定性などを挙げている。また、整形外科手術一般に対する利点として、①関節手術後のR. O. M.の増加が期待できる、②感染を引き起こさない、③出血が少ない、④腫瘍・出血性疾患には絶対適応である。⑤機能的予後が良好であるなどの点を挙げている、しかし、その後の開発により、限界や合併症の問題点が改善され、また新しい機種が登場により適応の拡大が生じている。

4.2 レーザー手術基本手技

レーザー手術時、レーザー光は、非接触照射法・接触照射法・穿刺法と使い分けられている。また focus 照射と defocussed 照射により、Fig. 1 のように使用している。ここでは、CO₂レーザー・YAGレーザー・Ar レーザーを中心に、Cutting (切開)、Vaporization (蒸散)・Coagulation (凝固)・Tissue Welding (組織接着)について述べる⁸⁾。

(i) Cutting

CO₂レーザーが主流である。非接触手術が可能であるが、最近では、石英ファイバーによる接触型も多く使われるようになってきた。切開部の治療は、金属メスと電気メスの中間に位置す

a. focus beam b. defocussed beam

Fig. 1 Differences of focus and defocussed beam.

Table V CO₂レーザーによる各組織の手術に適したパワー

		(単位 W)
1) 皮	膚：5～15	
2) 皮下脂肪	：10～15	
3) 脂肪	：10～20	
4) 筋膜	：5～10	
5) 筋肉	：10～20	
6) 粘膜	：5～10	
7) 腹膜	：5～10	
8) 軟骨	：15～20	
9) 骨 (開窓)	：25～35	

る。導光しうる部位であれば、狭い術野でも切開できるので関節鏡視下手術に期待が持たれているが、導光路の可撓性に問題がある。骨切り術・椎弓切除術には不適當であるが、幼児の骨皮質は薄く、かつ、水分に富むので、成人に比して、板状骨は容易に切れる。骨切り後の骨癒合は遅れ、遷延治癒や偽関節が生じることが多い。脊髄は容易に切れ、従来の器具同様、再生は不良である。これは、末梢神経でも同様に、容易に切れ、かつ再生を不良とするが、切断操作時には神経腫の発生を防ぐ利点ともなりうる。筋組織は容易に切れ、比較的出血が少なく済むが、脂肪組織は、熱を持ち、鋭利に切れがたい。Arレーザー・YAGレーザーは、切開器具とし

ては不適当である。Table Vは、CO₂レーザーによる切開出力を各組織別にしたものである。

(ii) Vaporization

CO₂レーザーにより腫瘍細胞を播種することなく蒸散しうる。限局している小さな腫瘍には、蒸散法が適当である。大きな腫瘍では蒸散により腫瘍総量を減少させ、正常組織より引き剥がし摘出する方法もとられる。ArレーザーやYAGレーザーも使えるが、CO₂レーザーに比べて莫大なエネルギーが必要であるとともに、正常組織への熱の影響も無視できず、一般に脊髄腫瘍では使わない。血管豊富な腫瘍であれば、YAGレーザーにより塞栓や凝固を施し、蒸散をすることもある。CUSA（超音波により組織破壊を行なう手術器具）は、熱の発生もなく組織破壊をするが、超音波振動による正常組織破壊の問題があり、マイクロサージャリーには不適当である。また、石灰化や線維性組織に対しても、CO₂レーザーがすぐれている。しかし、手術器具より指を通じての組織の感触がなく、腫瘍と正常組織の区別がつかないという不利な点もある。

(iii) Coagulation

CO₂レーザーでも、defocussed照射で凝固可能であるが、動脈では、直径0.5mm以上、静脈では、直径1mm以上で、止血は不可能となる。Arレーザー・YAGレーザーでは、もう少し太い血管まで止血・凝固が可能である。Oozing

Table VII レーザーの医療機能の比較

レーザー		CO ₂	Nd:AG	ARGON
機	能			
切	開	++	+	+
蒸	散	++	+	+
止血・凝固		+	++	++
組織接着		—	++	+

++=優
+=良
—=不可

（滲出）による出血には、ゲルフォームやアビテンなどの止血剤より有効である。Arレーザーは、色選択性があり、神経上の細血管凝固に適している。出血性疾患にレーザー止血は有効であるが、バイポーラー（電気凝固・止血器具）は無理であり、整形外科で頻回に使われるバイポーラーとレーザーの比較は、Table VIのようになり、微小部分よりの出血は、レーザーによる方が組織の損傷が軽いことがわかる。

(iv) Tissue Welding

熱効果により組織表面の膠原線維をゲルよりゾルの状態とし、組織間接着を行なう手技である。一般には、ArレーザーやYAGレーザーが適している。しかし、微小血管吻合や末梢神経縫合では、低出力CO₂レーザーによる方が、すぐれていることが林⁹⁾により報告されている。

Table VI レーザーとバイポーラーによる止血・凝固の比較

レーザー止血・凝固	バイポーラー止血・凝固
1. 非接触操作	1. 接触操作
2. 血管への機械的損傷がない。	2. 血管への圧排や機械的損傷がある。
3. 周囲への影響が少ない。	3. 漏電や周囲への影響が大きい。
4. エネルギーの出力調整が正確にできる。	4. エネルギーを正確に組織に出せない。
5. 組織への照射時間を容易に調整できる。	5. 組織への照射時間を容易に調整できない。
6. 血管壁に器具がつくことがない。	6. 血管壁に器具がつくことがある。
7. 血管閉塞が広範に生じることがある。	7. 血管閉塞は接触部のみに生じる。
8. 血栓なしに血管閉塞をできる。	8. 血栓形成による血管閉塞である。
9. 血液・体液の存在によって無効となるものもある。	9. 血液・体液の存在に影響を受けにくい。
10. 複雑かつ高価	10. 単純かつ安価

以上、レーザー手術時の基本手技を説明したが、Table VIIは、高出力CO₂レーザー、YAGレーザー、Arレーザーの比較である。

5. 各論

この項では、整形外科と関連する報告（他科領域での発表も含む）を中心に紹介し、参考の解剖図を各項に図示した。

5.1 骨・軟部腫瘍

この領域での、整形外科医による臨床報告はほとんどない。しかし、形成外科での血管腫や手の悪性腫瘍への応用例、脳外科での脊髄腫内

・髄外腫瘍への応用例、及び、腫瘍からの出血が多く腫瘍全摘出が実施できなかった症例に、レーザー手術により全摘出した応用例を考慮し、手術適応が適確に選択されれば、レーザー手術により、より有効な手術ができる。特に血管に富んだ腫瘍では、術中出血に難渋することも少なくて済み、有用な利用法である。我々は、軟部良性腫瘍の診断であっても、レーザー手術室を利用し、より術中出血の少ない手術法を選択し手術を行っている。

使用方法は、①蒸散により腫瘍の気化蒸散をはかる方法。②大きな腫瘍に対し、一部を蒸散させ腫瘍の体積を減少させ、周囲組織への接触

Fig. 2 anatomy of vertebrae thoraciae (胸椎の解剖図)

操作を極力さけて、より非侵襲的に腫瘍を摘出する方法、③腫瘍細胞・組織を融解・凝固・壊死させる方法、④他科とも、研究に力を注いでいる Photoradiation Therapy (P. R. T. : 光化学療法) による方法、⑤腫瘍が43℃の温熱に弱いことを利用した、レーザーによる局所へのハイパーサーミア (温熱療法) による方法などが研究されている。尚、光化学療法は、ヘマトポルフィリン (HpD)、オトリジンオレンジなど、腫瘍への取り込みや滞留率の高い物質を、生体内に投与後、これらの物質を取り込んでいる腫瘍に、レーザー照射する。HpDでは、レーザー照射により、シングロオキシジェン (活性化した酸素) が発生し、これが腫瘍細胞内で致死的に作用すると考える研究者が多い。現在、各科とも、このHpD利用による臨床応用の症例を多く報告している。この治療法の利点は、選択的に腫瘍細胞を破壊できること、また、導光可能な部位であれば、内視鏡下やX線透視下で、最小の侵襲操作、即ち、従来の検査手技をもって治療が可能であることである。このことは、全身状態が不良で、根治的手術を放棄せざるを得なかった症例なども治療対象となることを意味している。

整形外科領域では、Ascher^{10,11)}やHeppner¹²⁾らによる、脊髄腫瘍をCO₂レーザーにより摘出した症例を見るにすぎない。今後、前述した使用方法を駆使したレーザーによる骨・軟部腫瘍の根治療法を、整形外科医自身によって研究されることが望まれる。しかし、東京大学の中島・本村ら¹³⁾がレーザー照射による染色体への影響や、正常組織の腫瘍化という問題を検討し、安易に生体へレーザー照射をしたり、光化学療法を行なうことの危険性に言及している。このことは、レーザーを扱う研究者にとって、常に考慮された上での臨床応用をめざすべきであるとの非常に重要な問題提起であり、真摯に耳を傾けるべきである。

5.2 神経外科 (脊椎・脊髄外科を中心に)

Fig. 2は、胸椎部の解剖であり頸椎・腰椎と

Table VIII 神経外科でのレーザー手術の特徴

神経外科でのレーザーの長所

1. 腫瘍の蒸散・血管の穴の修復や微小切開の際、非接触操作が可能である。
2. 脳や脊髄の危険な領域での手術時に、牽引力をかけることなく、組織損傷を最少にできる。
3. 組織に正確なエネルギー量を加えられる。
4. 微小な標的を対象にできる。
5. 微小手術同様に手が自由に使える。
6. 微小操作が可能である。
7. 無縫合血管吻合が可能である。
8. 出血状態を改善できる。
9. 術野を殺菌できる。
10. 電気的な障害をひきおこさない。
11. 術野の妨げにならない。

神経外科でのレーザー手術の欠点

1. 器具を通しての、感触が感じられない。
2. 複雑な準備が必要である。
3. 価格・医療費が高つく。
4. レーザーの危険性がある。

脊髄外科でのCO₂レーザー手術の適応

1. 椎弓切除時に骨より筋肉を剥離する際。
 - a. 脊椎の骨折・脱臼時に後方進入のために骨に穴をあける際。
 - b. 髄核の蒸散による切離の際。
2. 脊髄腫瘍
3. 脊髄空洞症の時、脊髄を穿孔する際。
4. 脊髄の正中切開の際。
5. 慢性疼痛の除去のため、背側枝の進入路を切離する際。
6. 視床脊髄路の切離の際。

も基本的に構造は同じと考えて、以下の参考にしたい。

1976年、オーストリアのAscher および Heppner¹⁴⁾により、脊髄・脊椎のレーザーによる臨床手術例が報告されて以来、1984年3月までに、彼らは、35件の手術を経験した。主に、脊髄腫瘍の切除・摘出に用いられており、CO₂レーザーによるものである。尚、彼らは、この間、28件の末梢神経への手術を実施している。

神経外科へのレーザー手術の利点・欠点および、CO₂レーザーによる脊椎手術の適応¹⁵⁾は、Table VIIIのようにまとめられる。

表の利点・欠点を見る限りにおいては、レー

ザーが、あたかもオールマイティかのような印象を与えるかもしれないが、あくまでも、各種レーザーの特徴を理解し、各々の長所・欠点、即ち、限界を理解した上での利用によって、その長所が生かされる。

使用法は、CO₂レーザーによる、脊髄の正中切開や、充実性腫瘍の蒸散・切除が中心である。

YAG レーザーは、生体内蛋白の変性および止血・凝固に適しており、血管の豊富な組織への使用がよい。このことは、アメリカのStanley¹⁶⁾の報告にも見られる。腫瘍への利用法以外には、広範囲椎弓切除術の際、椎弓・棘突起より筋肉の剝離をレーザーで行なうと、術中出血量を減少させることができ、また、術後疼痛の軽減もはかれる。棘突起・椎弓の穿孔には適しているが、椎弓切除に適するレーザーは、まだ出現していない。硬膜の切開は、安全かつ正確にできるが、出力の調整が正確でなければ危険である。脊髄空洞症は、中心管に穿孔し、中心管の内圧をさげれば症状改善が見られる疾患であるが、Brownは、CO₂レーザーにより、半永久的な瘻管作成術を行なっている。前側方からの脊髄切断術では、金属メスによる切断術後に生じるような脊髄視床路の再生も見ることがなく、術後良好であるとの報告もある。脊髄の動静脈奇型の治療は、患部血管の摘出術が行われるが、他方、閉塞術も一方では行われている。

我々は、480 nm の励起光により、フルオレッセン静注ラットの腸間膜動静脈に血栓形成ができるとの報告¹⁷⁾より、Arレーザーとフルオレッセンにより血栓形成が生じることを確認してお

り、脊髄内にある、グロームスタイプの動静脈奇型に血栓形成術を行ない、虚血性神経障害ができないか検討している。また、脊髄の再生について、アメリカの脳外科が中心に、移植¹⁸⁾の他、様々な可能性が研究されているが、解決のメドは立っていない。我々は、これに対し、中枢神経の再生阻害因子であると考えられている膠細胞を、光化学療法的应用により、中枢神経の再生条件を造り出すことができないかという夢をもっている。日本での脊椎外科での報告は、江頭による¹⁹⁾Arレーザーによる誘発電位記録が報告されているにすぎない。尚、末梢神経については手の外科の項で述べる。

5.3 手の外科

レーザーの手の外科への応用は、当初、術野が狭く、かつ複雑な機能的解剖を持つために、単に駆血帯の使用による阻血性拘縮や麻痺が生じる可能性をなくし、無血野が得られるに過ぎないという点が利点としてあげられ、種々の制限が多く、レーザー手術は不適當と考えられていた。しかし、Riccardo²⁰⁾は、1974年以来、腫瘍手術や慢性関節リウマチによる変形の修復手術を数多く実施している。そして、解剖学的構造を熟知し、最大限の安全な処置を施されるなら、手の外科領域でも、レーザー手術の有用例があると考えている。手の悪性腫瘍には、無血野で、腫瘍細胞の播種を最小限にし、正確な腫瘍摘出術が可能である。また、腫瘍により菲薄化した骨皮質の有窓にも、外力を加えることなく使用できる。慢性関節リウマチの手指変形

Fig. 3 関節とリウマチ病変の進行の模型図

Fig. 4 Arteriola, venula and vas capillare
(動脈(左), 静脈(右)および毛細管
(上)の横断)

I. 内膜 Intima M. 中膜 Media E. 外膜 Adventitia
A. 動脈 V. 静脈 ca. 毛細管 co. 結合組織 en. 内皮 Endothelium ef. 弾性線維 er. 赤血球 ei. 内弾性板 Lamina elastica interna fc. 脂肪細胞 m. 平滑筋線維 n. 神経 vv. 脈管の血管 Vasa vasorum.

に対しては、関節の破壊性病変や肥厚した滑膜に対し、病変の各段階 (Fig. 3 参照) に応じたレーザー手術がなされる。そして、術後の浮腫や疼痛の軽減により、機能的予後の改善に役立っている。

次に手の外科領域における血管・神経・腱についてレーザー接着の応用を中心に述べる。

5.3.1 微小血管吻合について

中等より微小の血管吻合は、脳外科・心臓外科を中心に、低出力レーザーを利用し研究が進められた。整形外科では、マイクロサージェリーの進歩とともに、特にトレーニングを積んだ専門医により微小血管への手術操作が可能となった。この項では、切断指はもとより血管柄付筋皮弁の移植や血管柄付骨移植の際の微小血管吻合について報告する。レーザーによる微小血管吻合は、外膜・中膜 (Fig. 4 参照) を中心に、膠原組織をゲルからゾルの状態にし、切断端をカバーリングした後、ゲルの状態にすることによる吻合法である。そして、手術操作の簡略化をはかることにより、手術時間の短縮を計るとともに、縫合糸の使用より良好な組織再生を観察するとともに、縫合糸のみによる吻合に劣ら

Fig. 5 Truncus of peripheral nerve.
(末梢神経幹)

ない手術結果を得ている。低出力レーザー、YAGレーザー²¹⁾、Arレーザーにより血管吻合は可能である。しかし、微小血管に対し、組織透過率の高いYAGレーザー・Arレーザーは、内膜への熱の影響もあり、低出力CO₂レーザーより血栓を作ることが多いことを林⁹⁾は報告している。林は、3本の支持糸により血吻断端どうしの適合を良好にし、低出力CO₂レーザー照射による血管吻合の研究結果を発表している。現在、さらに無縫合血管吻合の可能性が検討されており、より容易な血管吻合術により、一般の整形外科医のみならず、一般の外科医にも、微小血管吻合術が可能となるであろう。

5.3.2 末梢神経について

従来は、レーザーによる末梢神経の切断²²⁾による利点、即ち、スムーズかつ鋭利に切断されるとともに、断端の完全変性によるカバーリングにより、末梢神経の再生が阻止でき、神経腫の形成が防げるという点で、レーザー応用がなされた。しかし、近年、レーザー接着法により、末梢神経の縫合が研究されている。末梢神経幹はFig. 5のような構造を持ち、縫合法としては、縫合糸により、神経上膜を縫合する方法や神経束単位で縫合を行なったりしている。レーザーによるものは、神経上膜の接着による。切断さ

れた中枢神経端の神経束は、無数の神経線維を末梢に伸ばし、末梢神経端に達した神経線維は、ワラー変性後の神経束内に軸索を伸ばし、神経の再生を行なう。レーザー縫合は、縫合部での神経上膜のゾル化により、より完全な神経束の被化をはかり、神経幹外への線維の再生を防ぐとともに、速やかな神経の再生をはかるものである。

日本では、1985年、近畿大学の田中が、ラットを用いた末梢神経の接着結果を報告し、1986年、広島大学の大瀬戸⁴⁾がマイクロサージャリー研究会で、フィブリン糊を利用し、より正確なレーザー接着法として発表している。ソ連では Rakhishev や Ratsboun により、He-Neレーザー照射による末梢神経再生促進作用が報告されている。中国では、Shu Qiu²³⁾が、外傷による四肢の神経障害に、CO₂レーザーを照射し、神経症状を改善した臨床例を多く報告している。

5.3.3 腱について

Wolfgang²⁴⁾は、Carpal-tunnel Syndrome (手の腱鞘炎) に対し、CO₂レーザーによる腱鞘切開術を施行し、術後の出血量が少なく、癒痕形成も減じることができ、予後が良好であったと報告している。腱そのものについては、1985年、国際レーザー外科学会で、Herrera²⁵⁾が、ニワトリの腱を接着した実験結果を報告したにすぎず、腱へのレーザー手術の可能性は未知数である。

以上、血管・神経・腱を中心に、手の外科について述べたが、一般的手術時の細かい神経・血管・腱の剝離は、レーザーでは不適當である。

5.4 骨

骨に対しては、レーザーの臨床応用の当初より、骨切りについて検討されてきた。そして、出力などの点からCO₂レーザーによる報告が大半を占めている。CO₂レーザーによる骨切り機序も、熱反応によるものであり、必ず骨切り面に炭化(charring)が生じること、また、炭化層にハイドロオキシアパタイトが、少量ながら

Fig. 6 Anatomy of bone (Os longum)
(長管骨の解剖図)

散在する形で発生する点に、従来にない問題が生じる。また骨切り部に発生する高熱は、周囲組織に損傷を引き起こすほどの発熱である。骨は、長管骨を例にとると、Fig. 6のような構造をもっており、皮質骨部と海綿骨部へのレーザー照射の影響は、当然のことながら相違がある。レーザーによる骨切りで問題となるのは、水分含量の少ない皮質骨の切開能に難点があることである。

Horch²⁶⁾は、レーザーでの骨切りによる骨組織像を以下のように分類している。

- ① Zone one: Carbonized material zone.
炭化壊死層で、この中にハイドロオキシアパタイトが少量ながら散在する。
- ② Zone two: fuchsinophilic zone.
骨細胞が完全に変性・消失した層
- ③ Zone three: normal stained zone.
一部に正常骨細胞が残存する層で、正常に染色される層
- ④ Zone four: transitional zone.
正常組織に移行する層

以上の四層に分類した上で、第1層と第2層が完全損傷部と記述している。しかし、この四層は、光熱反応による損傷を組織学的に検討しているものであり、実際には、組織破壊を伴わない熱反応や、さらには非光熱反応も生じていることが予想される。完全損傷部位では、骨構成細胞の壊死およびムコ多糖蛋白の変性が生じて

おり、骨癒合の遷延治癒・偽関節の発生を引き起こす原因と考えられ、本村²⁷⁾によって確認されている。Carlo²⁸⁾は、切断能率を大きく低下させ、また、骨癒合の障害になる炭化層を減少させるには、連続照射よりパルス照射が有効であると報告している。しかし、Gertzbeim²⁹⁾(1977, 1981)は、レーザー骨切りに関し、①時間がかかる。②骨髓腔からの出血は少なくすむが、完全止血は無理である。③骨癒合の遷延を見ると報告した上で、骨癒合した場合には、従来の骨切法によったものと同様の強度を持つと報告している。

以上より、現況では、レーザーによる骨切り術は、不適當であると言える。しかし、菲薄化した皮質骨に、外力を加えることなく有窓したり、深部での骨切り操作の時、複雑なデザインを要する骨切り術の時および骨腫瘍切除の際には、レーザー手術適応の対象となる。

一方、He-Ne レーザーの骨折部への照射が、化骨形成促進作用を持つと Cherkow (1972) や Gorpinski (1973) らが報告しており、Shuiskaya³⁰⁾ (1975) は、移植骨への照射により、骨癒合が良好であったと発表している。本村 (1985) は、Ar レーザー・Dye レーザーによっても骨癒合が良好であるとし、後述するレーザーの創傷治癒促進効果と関連した興味深い応用法が考えられる。

尚、我々は、現在、エキシマレーザー(KrF)による骨切りを実験的に行なっている。エキシマレーザーにより骨切り術を行うと、照射パルスの周期を短くしなければ、表面は、肉眼的に炭化層を認めず、発熱・発煙もほとんど認められない。現在、組織検索中であるが、従来のレーザーの熱効果による、水の気化・蒸散を介する切開作用とは明らかに異なる。このことは、筋肉・脊髄・膝半月板に照射しても同様のことが観察され、軟部組織では特に鋭利な切離面を持っている。逆に、他のレーザーの長所である止血・凝固の作用は、ほとんど認められなかった。今後、エキシマレーザーの組織切開機序を検討するとともに、骨切り・骨癒合の検討を加える

予定である。

5.5 関節

関節に対するレーザー応用は、より未開拓の分野であるが、東京女子医大の井上⁵⁾は、数年来、膝関節手術をより非侵襲的に行なうべく、関節鏡視下における半月板切除術・滑膜切除術への応用をCO₂レーザーにより行なってきた。

当初の問題点は、①CO₂レーザーによるため air arthroscopy が必要で、機器の改良が必要であった、②CO₂レーザーの導光路として、可撓性のある optical fiber が、当初なく、患部への導光に難点があった、③レーザー導光路を有する関節鏡の開発が必要であった、④照射時に発生するガス・発煙の処理問題があった、⑤飛散物による fiber の破損や軟骨面への影響をなくす必要があったなど、多くの難問を抱えていた。しかし、機器の開発や導光路の開発が、日本では諸外国より進んでいたことと、世界的にも、早くから、日本の整形外科医により開発・発展してきた関節鏡が結合し、井上らの手により臨床応用され始めている。その成果を、1986年、関節鏡学会の第7報にて、レーザーによる関節鏡視下半月板手術症例の検討で報告している。

この報告によると、関節鏡視下手術におけるレーザー応用の長所は、以下になる。

- ①術野を妨げないので関節腔後方の処理もしやすい。
- ②関節内手術が、より無菌および殺菌的に操作できる。
- ③局所麻酔手術が可能で、術後出血・術後疼痛が少なく、入院期間の短縮がはかれるとともに、機能的障害を最小限にできる。

一方、欠点としては、

- ①レーザーの特性を把握した上で、関節鏡の操作に熟練する必要がある。
- ②目の障害に特に注意を要する。
- ③導光路の可撓性に、まだ限界がある。

以上、長所および欠点を列挙したが、これから、おおいに発展の期待される領域である。尚、参

Articulatio genus 膝関節.

Fig. 7 Anterior view of right knee joint. (右膝関節正面より見た解剖図)

1. Capsula articularis 関節包	2. Meniscus lateralis 外側半月
3. Meniscus medialis 内側半月	4. Lig. transversum genus 膝横靱帯
5. Lig. cruciatum anterius 前十字靱帯	6. Lig. cruciatum posterius 後十字靱帯
7. Plicae alares 翼状ヒダ	8. Lig. collaterale tibiale 内側側副靱帯
9. Lig. collaterale fibulare 外側側副靱帯	

考までにFig. 7は、膝関節の解剖を示す。

関節軟骨への研究は、1983年、Schulz³¹⁾により始められ、レーザーによる関節固定術を報告するとともに、その後、実験的に、関節軟骨の欠損を作成し、各出力の YAG レーザー照射による、関節軟骨の修復・軟骨細胞の再生への促進効果を検討している。そして、過度の照射は、軟骨面の細胞壊死を生じ、線維組織が形成され治癒の障害となる。適切量の照射は、軟骨面の修復が認められ、レーザー非照射群より有意に有効であることを報告している。このことは、初期の変形性関節症など、軟骨破壊病変に対する治療法としての可能性を示唆している。

今後、関節を構成する各組織へのレーザー照射による基礎的研究が進めば、膝のみならず、肘や肩関節を含み、関節内遊離体除去や関節内腫瘍などに対しても、より非侵襲的手術操作が可能となるであろう。

5.6 慢性関節リウマチ (Rheumatoid Arthritis)

膠原病に属する難治性である慢性関節リウマ

チは、多発性関節炎で、関節破壊の進行経過をたどる (Fig. 3 参照)。1980年、Goldmann³²⁾は、定型的な慢性関節リウマチ (R. A.) と確実な R. A. 患者を対象に、YAG レーザーを経皮的に患部に照射し、有効であったことを報告している。日本では、小山田 (1985)³³⁾が、He-Ne レーザーの経皮的照射の臨床報告を行なっている。我々も、痛みのために関節の運動制限の著明な定型的 R. A. 患者に、半導体レーザーを照射し、著明な改善を示した症例を経験している。Goldmannによると、両手に症状のある症例の片側にレーザー照射を行ない、他側にも症状の改善が認められる症例が多いことから、R. A. に対するレーザー効果の検討を加えている。特に、Moskalikらの腫瘍へのレーザー照射により免疫能が生体にとって有利な形で、抑制および促進されるとの研究より、R. A. に対するレーザー効果も、自己免疫能への効果であると推論している。即ち、自己免疫能の破綻により生じた多発性関節炎にレーザー照射を行なうことにより、T細胞系 (体液性免疫能を有する)、B細胞系 (細胞性免疫能を有する) に作用し、一部へ

の照射によっても、全身的な症状の改善を見ると推論している。

5.7 この項では、レーザー鍼の他、整形外科領域に関連のあるレーザー医療を紹介する。

5.7.1 レーザー鍼

経皮的にレーザー照射を行なうことにより除痛効果を期待するものである。ペインクリニックにおける従来の鍼治療に対し、患者には恐怖感を与えることなく、清潔に治療を行ないうる利点がある。使用レーザーは、YAGレーザー、He-Neレーザー、半導体レーザーなどが使用されている。レーザー効果として、goldmann は、①レーザーのショック波、②色素吸収、③免疫効果、④創傷治癒効果、⑤レーザー照射野外への効果、⑥除痛効果などを列挙している。レーザー鍼は、この中の除痛効果を応用したものであるが、作用機序は不明である。多くの研究者は、単なる局所的熱効果ではなく、神経系を介した末梢循環の改善も関与していると考えている。しかし、使用レーザーの出力が低いためか、従来の電気生理学的検索によるインパルスの変動は、レーザー刺激によっては、明確に記録されていない。我々はウサギの交感神経・副交感神経を含み、末梢神経へのレーザー刺激を行なったが、有意な変化を認めなかった。現在のところ、①末梢神経への直接作用、②末梢の神経刺激が、一度、中枢を介した後、フィードバックされ、広範な除痛効果を発現する、③細胞の活性そのものを高め、抗炎症作用が発現するなどの意見がでている。一方では、単に温熱効果によるものであるという見解や、圧迫を加える力が除痛効果をより高めることから、指圧の效果にすぎないというレーザー研究者もいる。今後の検討がまたれる領域である。照射法としては、①単なる圧痛点に照射する方法、②末梢神経の走行に応じた部位に照射する方法、③“つぼ”に照射する方法などがとられている。ヨーロッパを中心とするレーザー鍼の研究も始まってい

るが、日本・中国での臨床応用への検討は盛んである。中国では“つぼ”への照射に重点がおかれ、獣医により、牛や馬に対する照射の報告³⁴⁾もなされている。日本では神川³⁵⁾、大城³⁶⁾、ナロン、白戸³⁷⁾らにより、各々、別個の報告がなされ、その有効性をあげている。しかし、その作用機序は未だ明確にはなっていない。

5.7.2 創傷治癒

ここで述べる創傷治癒は、レーザーメスによる切開創の治癒ではなく、Arレーザー、He-Neレーザー、YAGレーザーの創傷部照射での創傷治癒促進効果を対象とする。Mester³⁸⁾が難治性潰瘍の治療や疼痛の緩解を報告して以来、レーザーは創傷治癒促進の作用があるとの報告が、ヨーロッパを始めとし、数多く発表されている。Mesterは、ルビーレーザーの反復照射による発癌性研究の際、発毛の促進効果や創傷の治癒促進効果を認めた。その後、この効果を応用し、難治性潰瘍の臨床応用を始めた。そして、Arndt-Schulzの法則（生体の異常に対し、適切な刺激が加えられれば、機能亢進にせよ低下にせよ、共に正常状態に復するように生体は反応する）により、レーザーが治癒機転に作用すると考えた。具体的には、レーザー刺激が、末梢循環の改善をもたらし、抗炎症的に作用し、肉芽および上皮化の形成が促進されと考えられている。

5.7.3 血管再疎通化

狭窄した血管による循環不全は、より末梢側の虚血性組織障害をもたらす。この種の疾患は、各科において重篤な疾患を引き起こす。整形外科領域では、特に、四肢の阻血性壊死が問題となる。D.Kaplan³⁹⁾は、Arレーザーによる再開通術を行なった研究報告をしているが、アメリカの心臓外科医たちは、近年、エキシマレーザーによる冠動脈の狭窄や塞栓の除去について盛んに研究報告がなされている。整形外科で、この種の応用が可能となれば、整形外科医にとって最も夢のない四肢の切断症例以外の新しい症例が出てくる可能性もある。

5.7.4 殺菌効果

レーザーによる殺菌効果は、各種レーザーで検討されたが、焼却という意味以外では、鈴木⁴⁰⁾が、紫外エキシマレーザーによる大腸菌への殺菌効果を調べ、より短時間に限局された範囲の殺菌を行なう可能性を検討している。従来、253 nmの水銀灯による紫外線の殺菌効果を、KrFによる、248 nmのエキシマレーザーで行なおうとする試みである。この試みがより効率よく臨床応用されるなら、化膿性関節炎や化膿性骨髄炎に対する手段として、興味深いところである。

5.7.5 骨セメント除去への応用

イスラエルのHoroszkowski⁴¹⁾は、骨セメントを使用した人工関節置術に、何らかの問題が生じ、人工関節を除去する必要がある際、骨セメントにより強固な固定状態にあれば、骨セメントにCO₂レーザーを照射し、溶解・蒸散させ、容易に除去できる方法として紹介している。しかし、発生するガスの毒性や除去法を充分考慮されねば、嘔気・嘔吐、めまいなどが生じる。骨セメントに限らず、人工産物への照射時には、より慎重な配慮の必要なことを示唆している。

6. おわりに

今世紀最大の発明の1つと考えられているレーザーは、オプトエレクトロニクス産業ともいえる市場を生み出し、情報処理など、我々の生活の一部に定着し始めている。しかし、近畿大学の久保宇市氏⁴²⁾が、医用レーザー入門の中で「レーザー技術は、人間の生命・健康に密接につながる医用と、その人間の生存する環境を保つために必要なエネルギーの開発を、2大方向として指向すべきである。」と述べられておられるように、一つには核融合への利用によるエネルギー問題の解決に、もう一つには、医療応用による健康の保持への利用という2大方向を、レーザーは、その基盤とすべきであろうと考えられる。本文では、整形外科領域でのレーザー応用としながら、主に治療手段としてのレーザー利用の記述に終始した。しかし、今後は、治

療手段としてのみならず、基礎医学・診断学・データ解析などにも、応用範囲が拡大され、治療体系そのものへの革命をひき起こすであろうことは、容易に想像しうる。そのためには、理工学部諸氏の医療応用への理解と協力が、必要である。基礎的応用としては⁴³⁾、①レーザー顕微鏡による組織診断、②レーザー自動細胞分別装置での免疫学的解析による免疫疾患や腫瘍疾患への応用や、染色体分析による染色体異常疾患への応用、③レーザードップラー流速計による各種流体の計測、④ホログラフィーによる三次元的映像による診断、⑤X線ホログラフィーによる高分子の解析、⑥レーザー分光分析による悪性腫瘍の診断、⑦レーザー化学による生体内での基礎的化学現象の解明、⑧レーザー内視鏡による診断と治療など、様々な可能性を持ち、レーザーは人類に貢献しようとしている。この様々な可能性を、現実のものとするためには、理工学者、化学者、医療従事者はもとより、レーザーにかかわる人々の協力による、地道な研究と開発の努力が必要である。

参 考 文 献

- 1) 渥美：医学のあゆみ，124 (1983) 309.
- 2) 本村：日本レーザー医学会誌 4 (1984) No.1, 195.
- 3) 本村：日本レーザー医学会誌 3 (1984) No.1, 25.
- 4) 大瀬戸：日本マイクロサージャリー研究会第十二会抄録集 (1985年11月) p. 19.
- 5) 井上：日本関節鏡学会第10会講演集 (1984年12月) p. 157.
- 6) 神中：神中整形外科科学 (南山堂，東京)
- 7) Horoszkowski: *Laser Surgery Vol. I-II* ed. I.Kaptan. p.74.
- 8) K.K.Jain: *Handbook of Laser Neurosurgery* (Springfield, Illinois, 1983) p.42.
- 9) 林：脳神経外科 11 (1983) p. 17.
- 10) P.W.Ascher: Abstracts of the 7th Int. Congress of Neural. Surg. München: G.Thieme Publ., July 12-18, 1981, p.160
- 11) P.W.Ascher: I Congresso Panamericano de Cirurgia con Laser, Cartagena, June 26-29, 1983. Abstract, p.28.
- 12) F.Heppner, P.W.Ascher: Laser operation. In: "Tumoren der Wirbelsäule," WS-Band 103. Stuttgart: Hippokrates Verl., 1984, p.161.
- 13) 中島，本村：医用電子と生体工学 20 (1982) 233.
- 14) P.W.Ascher: *Laser in Surgery and Medicine* 5 (1985) 499.

- 15) K.K.Jain: Handbook of Laser Neurosurgery. (Springfield Illionis 1983) p.91.
- 16) S.Stanley: Laser in Surgery and Medicine **4** (1984) 215.
- 17) 佐藤: 医用電子と生体工学 **23** (1985) 75.
- 18) J.R.Sladek: Neural Transplants (Plenum. New York. 1984)
- 19) 江頭: 日本レーザー医学会誌 **4** (1984) No.1, 247.
- 20) Riccardo: New Frontiers in Laser Medicine and Surgery, ed. K.Atsumi. Excerpta Medica Amsterdam-Oxford-Princeton, (1983) p.429.
- 21) K.K.Jain: Journal of Microsurgery **1** (1980) 436.
- 22) F.Heppener: Laser Surgery Vol. I-II (ed. I.Kaplan) p.149.
- 23) S.Q.Cheng: Laser-Tokyo '81. The 4th Cong. of the Int. Society for Laser Surgery. Tokyo, 1981. (Inter. group corp. Tokyo, 1981) p.4-6.
- 24) Wolfgang: Laser-Tokyo '81. The 4th Cong. of the Int. Society for Laser Surgery. Tokyo, 1981. (Inter. group corp. Tokyo, 1981) p.18-13.
- 25) Herrena: Abstract of 6th Cong. of the 6nt. Society for Laser surgery and Medicine. Israel. October. 1985. p.75.
- 26) Horch: Laser Surgery Vol. I-II (ed. I.Kaplan) p.255.
- 27) 本村: 日本レーザー医学会誌 **4** (1984年) No.1, 195.
- 28) C.Carlo: Laser-Tokyo '81. The 4th Cong. of the Int. Society for Laser Surgery, Tokyo, 1981. (Inter. group corp. Tokyo, 1981.) p.19-4.
- 29) S.D.Gertzbeim: Laser in Surgery and Medicine **1** (1981) 361.
- 30) 本村: 医学のあゆみ **124** (1983) No.5, 577.
- 31) R.J.Schultz: Laser in Surgery and Medicine **5** (1985) 577.
- 32) Goldmann: Laser in Surgery and Medicine **1** (1980) 93.
- 33) 小山田: 第6回日本レーザー医学会抄録集 (1985年10月) p.70.
- 34) Y. Chuan: 第1回アジア・太平洋医学会抄録集 (1985年7月, 東京) p.66.
- 35) 神川: 日本レーザー医学会誌 **5** (1985) No.3, 215.
- 36) 大城: 日本レーザー医学会誌 **5** (1985) No.3, 221.
- 37) 白戸: 日本レーザー医学会誌 **5** (1985) No.3, 227.
- 38) Mester: Laser in Surgery and Medicine **5** (1985) 31.
- 39) M.D.Kaplan: Laser in Surgery and Medicine **5** (1985) 275.
- 40) 鈴木: 日本レーザー医学会誌 **3** (1983) No.3, 625.
- 41) Horofzowski: New Frontiers in Laser Medicine and Surgery ed. K.Atsumi. Excerpta Medica. Amsterdam-Oxford-Princeton. 1983. p.324.
- 42) 久保: 医用レーザー入門 (オーム社, 東京, 1985年).
- 43) 渥美, 桜井: 病態生理 **3** (1984) 615.