

横浜の開業医と 腎尿管結石



執筆：木村明
木村泌尿器皮膚科
（横浜市都筑区）

はじめに

腎尿管結石の標準治療

開腹手術

体外衝撃波

レーザー研究

はじめに

横浜市都筑区センター南駅前木村泌尿器皮膚科院長の木村明です。

腎尿管結石の解説だけでは電子書籍としてダウンロードしてもらえない長さにならないため、

拡大腎盂切石術の思い出、

ドイツ研修、

レーザー砕石のレビュー、

を加えました。

突発的な激痛は石が尿路をふさぐことによっておきる

尿路結石は、尿の通り道（腎盂、尿管）に石がある状態です（図1）。

尿路結石は腎盂で育ち、尿管へと流れていきます。石が尿の流れをせき止めると激痛がおきますが、尿が石の横を流れるようになると、うそのように痛みが消えます。痛みは、石の大きさとはあまり関係がありません。むしろ、小さい石のほうが、痛みがおこりやすいとすらいえます。これは、大きい石はあまり動けないので、その場でゆっくりと大きくなるだけで突然尿の流れを塞ぐことがないのに対し、小さい石はある日突然腎盂から剥はがれて落ちてきて、尿管の細い部分につまるからです。

典型的な尿路結石の症状は、突発する激痛で、石のある側の側腹部が痛くなります。尿に感染のない限り発熱は伴わず、また、胆石、虫垂炎などと違って、痛いところを押されても痛みは増強しません。このような激痛ではなく、背部の鈍痛や血尿などで発見されることもあります。痛みの発作がおきたときには、救急医を訪れて痛み止めを処方してもらうこととなりますが、うまく効くと、たちまち痛みが消えてしまいます。時には、何もしないうちに、うそのように痛みが消えることもあります。

診断には尿検査を行い、血尿（肉眼でわかるほど赤い場合と、顕微鏡で見るとわかる場合とがあります）を認めます。また、超音波検査やレントゲン検査で、石が映っていたり（図2）、腎盂や尿管が膨らんでいたりと診断がつきます。

図1 結石の種類 (場所による分類)

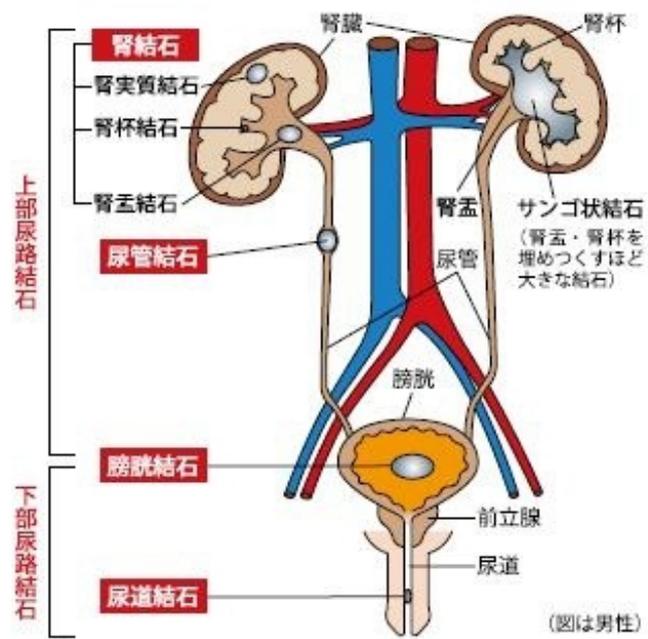


図2 腎盂にある結石



石の幅が6mmを超えると自然排石が難しくなる

治療には痛み止めを使いながら自然排石を待つ場合と、手術を行う場合があります。

尿路結石のうち8割は、結石が小さいうちに尿路を通して、自然に体外に排出されますが、残りの2割は排出されないまま大きくなって、治療をしなければなりません。

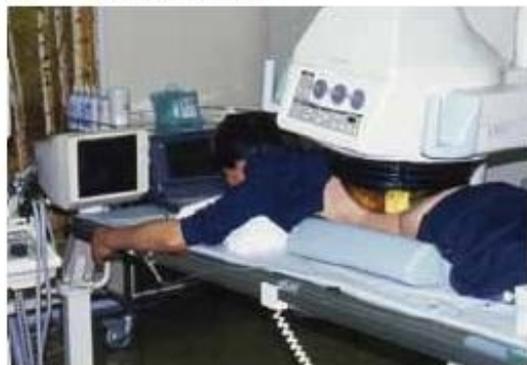
幅が6mmまでの石では、自然排石が期待できるので、痛み止めで様子を見ます。石がだんだんにさがってきて、尿管から膀胱に落ちてしまえば、痛みから解放されます。そして、次の排尿のときに、尿と一緒に石が飛び出します。幅が6mm以下の石でも、自然排石にどのくらいの日数がかかるのかは予想できません。

石の幅が6mmを超えると、自然排石の可能性は低くなります。

手術は、衝撃波による粉碎もしくは内視鏡併用で

石が腎盂の出口や尿管につかえている場合には、それより上流が拡張します。腎盂が拡張しているのを放置しておくと、腎臓に過度な負担がかかり腎臓の機能が失われてしまいますので、あまり長く自然排石を待てません。

図3 破碎治療の様子



この姿勢で20分ぐらい衝撃波を当てる

図4 超音波モニター画像



衝撃波の焦点が石から外れていないか、チェックしながら治療する

その場合には、衝撃波で結石を破碎する装置で治療します。患者さんはベッドにうつ伏せになり、水が満たされたゴム袋をからだに密着させます。背中に衝撃波発生装置をつけ（図3）、結石が焦点にあるかどうかを超音波で確認しながら衝撃波を発射し（図4）、水とゴムを経由して衝撃波が体内に伝わります。麻酔は原則 unnecessary なので、治療後すぐ歩けますし、食事もとれます。粉々になった石は尿に混ざって数日中に出てきます。

ただし、この装置が得意とする石は、腎臓の石で、尿管の石ではうまく粉々にできない場合があります。衝撃波は結石を表面から少しずつ砕いていくのですが、石が尿管にぴったりはまり込んでいて石と尿管の間に隙間がない場合は、砕いた破片がその場に留まるため、中心部にエネルギーを伝える事ができません。

その場合は内視鏡手術を併用することがあります。尿管鏡を、尿道・膀胱を経て尿管に挿入し、レーザーで碎石します。

よく「石を溶かす薬はないですか？」という質問を受けますが、非常にまれなチスチン結石以外にはそのような薬はありません。シュウ酸カルシウム結石やリン酸カルシウム結石では、薬で溶かすという方法はありません。

結石の原因は、人によって異なりますので、一概にはいえませんが、日常生活においては

- ・水分の摂取量を多くする
- ・適度な運動をする

の2点に気をつけていただければよいでしょう。

衝撃波碎石機がない時代

私が3年目にローテーションしたのは[三井記念病院](#)。

2年目の[東芝病院](#)では部長の下は私だけだったのに対し、三井記念病院は部長の下に、7年目・4年目・3年目（私）・2年目・1年目。

症例数がいっぱい、仲間もいっぱい。

N部長は手術の名人、であるだけでなく、医局人事に決して注文をつけない先生。

大学に近い（御茶ノ水と秋葉原）ので、引っ越す必要がないという事情も若干作用して、医局員がローテートしたい人気関連病院でした。

希望者が多くて、部長が人事に口出ししないと、どうなるか。

毎年、総入れ替えです。2年居たい、と希望を出しても通りません。

定員が多い上に、毎年入れ替わるので、東大医局員で三井記念病院のN部長の手術を見たことがない人は少数派。

東大の医局員の会話で「部長なら、こうするだろうな。」という時の部長とはN部長のことでした。

教授は一人しかいませんから、「教授」で通じますが、

（そういえば赴任されたばかりの教授に〇〇教授！と声をかけたら、教授は俺しかいない、と注意された医局員がいました）、

部長といえば、三井記念病院のN部長のこと、というのは凄いことです。

格上の国公立病院にも部長はいるのですから。

手術の上手かったN部長ですが、皆が感心していたのは、腎結石の再手術。

まだ[衝撃波碎石機](#)がない時代。何度も再発する結石。

3度目の腎結石の手術なんて、腎臓周囲は癒着だらけ。鈍的に剥離しようと思ってもちっとも前進

しません。

かといって、鋭的に切開していくと、腎動脈を損傷してしまうかも。

腎臓には毎分**500ml**（心拍出量の**10分の1**）の血が流れ込んでいます。

腎結石という良性疾患なのに術中出血死の危険と背中合わせの手術でした。

ならば手術しなければ、と今の若い医者は思うかもしれません。

昔は腎結石のせいで腎不全になってしまう人もいたのです。

30年前にBack

Back to the Futureは1985年から1955年と2015年にタイムトラベルする話でした。

あと4年後に、空飛ぶ自動車が出来そうな気はしませんが、30年というとすごく遠い気がしますよね。

もし息子と娘が、タイムマシンに乗ってちょうど30年前に行ったら、

息子を宿した身重の母親と、医者になって3年目（娘も今3年目）の父親に会うでしょう。

父親は、腎結石の手術を執刀しているはずです。

[体外衝撃波](#)が普及してからは、まったく行われなくなった[拡大腎盂切石術](#)。

腎実質を切らない（腎を切るのは腎切石）で、石を取れば、腎機能は損なわれません。

最新の手術法を学ぶため、当時結構高かった洋書を何冊か買いました。

最近、調べる必要ができて、本棚を見ましたが、もうありませんでした。

唯一、今も捨てないで取っていた、**Campbell's Urology**（第7版の第3巻）に模式図が残っていました。

この教科書は捨てずに取っておかなければなりません。

もしくはクラウドに預けておくか。

Gil-Vernet の腎洞鉤

国際泌尿器科学会には**1982年**と**1985年**に参加しました。

1982年には、**1歳**の息子にテレビの形をしたオルゴール（ロンドン橋が落ちたの紙芝居が動く）をお土産しました。

1985年には、**2歳**になりかけの娘も一緒にウイーンに家族**4人**で行きました。

子供の歳はすぐに思い出せますが、

Gil-Vernet の拡大腎盂切石術の講演を聴いて、

あの腎洞鉤（特注の筋鉤：眼瞼鉤を少し大きくしたもの）が欲しいと思ったのはどっちの学会だったのかは、

すぐには思い出せません。

1984年日本に結石破碎装置が上陸したら、消えてしまった手術方法ですから、

たぶん、**Gil-Vernet** の講演に感激したのは、**1982年**のサンフランシスコの学会だったんでしょ
うね。

体外衝撃波腎結石碎石装置は、1980年ドイツで発明

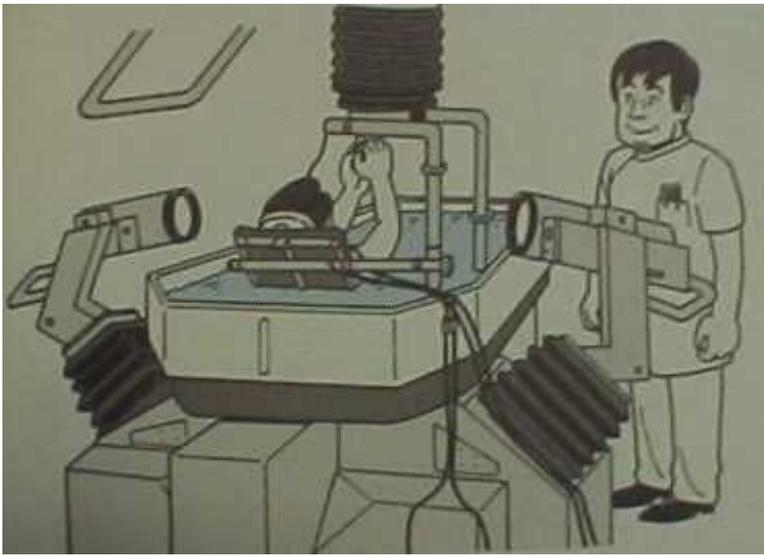
体外衝撃波腎結石碎石装置は、1980年ドイツで発明されました。それまでは手術でしか取り除けなかった結石を衝撃波で砕いて砂にしてしまい、尿といっしょに流してしまうものです。結石を砕くためのエネルギー源を、尿道から挿入し石に接触させて砕く方法なら、凡人でも思いつきますが、体の外で発生させたエネルギーを体をす通りさせて結石だけに集中させる夢のような装置でした。

原理は？

戦時中、ドイツの戦闘機のメーカーが、潜水艦はこわさずに中にいる人間だけを殺す超音波の研究をしていました。その技術が、戦後医学のために利用されたわけです。図1のように、水中で発生した衝撃波（超音波）は球面の焦点に向かってすすみます。人間の体も水でできているようなものですから、音速は水中も体内も同じなので、衝撃波は体をす通りして結石に作用するわけです。

実際の治療は？

患者さんはベッドにうつ伏せになり、背中に衝撃波発生装置を密着させます。この装置は、結石が焦点にあるかどうかを超音波で常に確認しながら衝撃波を発射するように改良されたタイプのもので、麻酔は原則 unnecessary なので、治療後すぐ歩けますし、食事も取れます。粉々になった石が尿に混ざって数日中に出てきます。入院も4〜5日（大きな石の場合はもっと）ですみます。



ドルニエ社の初号機HM3。患者は天井から担架で吊るされ、水槽に浸けられる。担架の操作、レントゲン装置、電極（消耗品）の取替え、電圧の調整、お風呂の給排水など、操作パネルには無数のスイッチがあった。

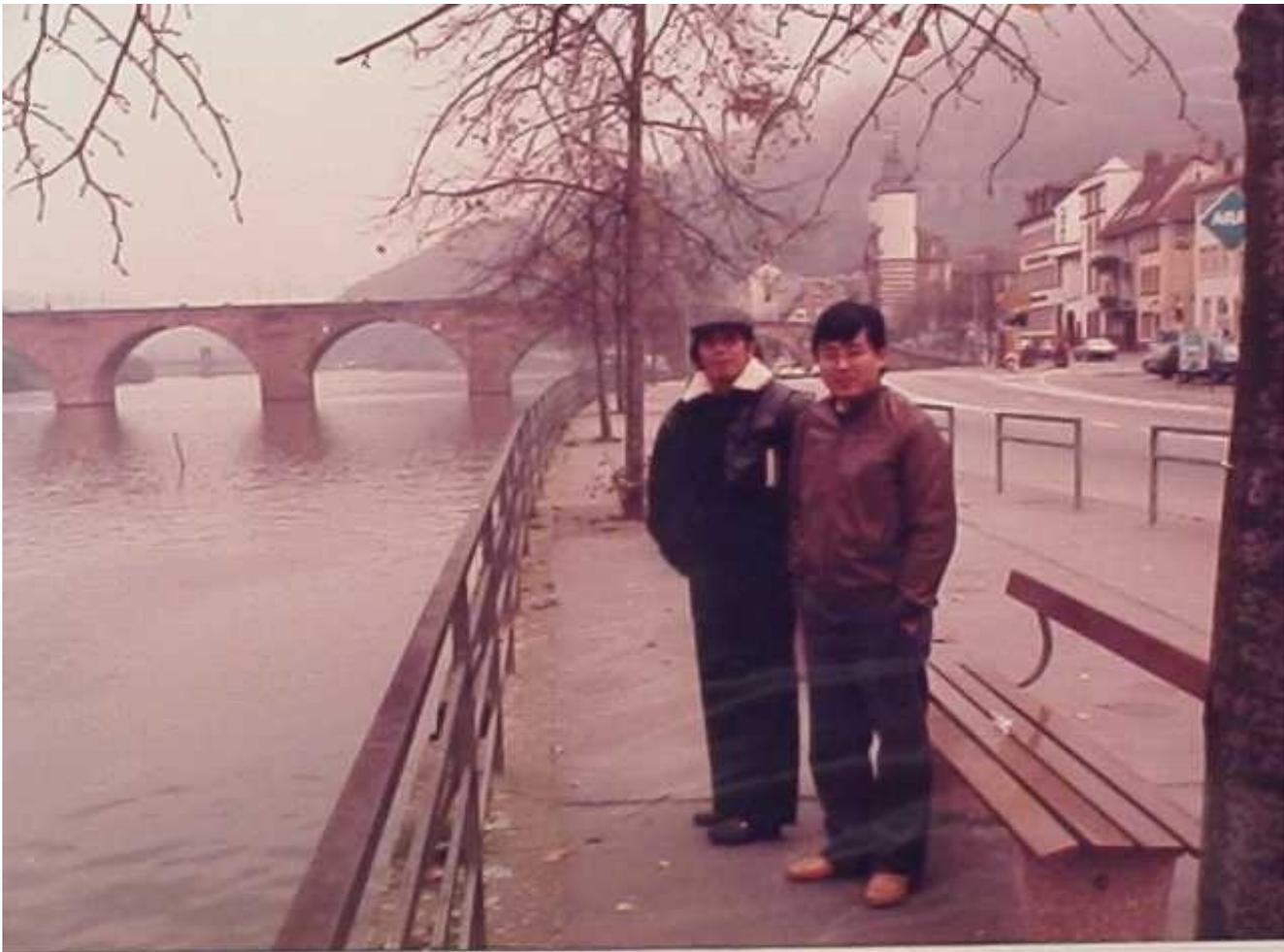
操作パネルとは別に、壁にスイッチがあり、いつもは1になっていたのが、ある日2になっていた。英語があまり得意でないその日の担当者に、意を決して"**Was ist das?**"と尋ねたら、"**Air conditioner**（エルコンディショネール）"という答えが返ってきたのをよく覚えている。



秘書。紹介状の返事はすべて彼女たちがタイプするので、医者は事務仕事から解放され、治療とカンファレンスに専念できる。日本は20年以上遅れている！



朝7時からのカンファレンス、9時からの結石破碎の見学の後、アフターファイブはビアホールで一杯。富永登志氏（現三井記念病院部長）と。



週末は行楽地を訪れたが、季節はずれで閑散としており、店は閉まっていた。男二人ですごく惨めだった。

1989年（平成元年）に戻りたい？

[プロポーズ大作戦](#)や[偉くなった同級生の話題](#)や[役員選挙で役員になってしまった先生](#)、きっかけいろいろ、で最近、「僕の生きる道」はこれでよかったのか、と考えさせられて、プチブルーです。

1978年に東大の泌尿器科教室に入局。[超音波](#)やメディカルエンジニアリングの分野でやりがいを感じながら仕事していました。衝撃波結石破碎装置の勉強に[ドイツに派遣](#)してもらうなど、恵まれた環境で仕事していました。

1987年に教授交代。[新教授の得意分野は腎移植](#)。風向きが変わり、私はそのまま傍流になれば良かったのですが、1989年の医局長選挙（立候補者はいつもいなくて、ぶっつけ本番の投票です）で、（たぶん教授がなってほしかった）本命を破って医局長に選ばれてしまいました。

1989年（平成元年）は、私の厄年だったのでしょうか？私を医局長に選んで何かを変えてほしいと願う医局員と、腎移植ではなく[レーザー碎石](#)という私の得意分野での新たなテーマを与えてくださった新教授。

生徒会長とか学級委員などが嫌いだったし、体育会系で揉まれたこともなかった私は新教授と医局員との橋渡しができず、4ヶ月で辞表を出しました。短い夏休みに小学3年生の息子と小学1年生の娘と[房総半島で海水浴](#)しながら、家族との時間を大切に生きようと思いました。辞表は受理されず、翌年、医長として[青山病院](#)に赴任しました。レーザー碎石の研究も中途半端なまま終わりました。

1989年（平成元年）にもっと頑張っていたら別の人生があったのでしょうか？

[プロポーズ大作戦](#)では、過去にもどっても人生を変えられませんでした。過去にもどったおかげで、現在の考えた方がポジティブになりました。

今、私は、低空飛行ながら軌道に乗ったクリニックの今後の方針について、いろいろ考える時期です。

ローコストで安全に、しかも医局長が勤まらなかった最大の原因である労務管理からも逃れたくて（人を増やすと、いろいろ面倒。今の規模でも時々、土曜日の休み希望がかち合ってしまう。7月28日（土）と9月15日（土）は事務長が出勤です。大丈夫？）、[マクシミリアン](#)スタイルに憧れる私は、縮小路線（皮膚科の標榜を外して、スタッフも削減）に走りたいのが本音です。

でも将来、偉くなった友人をテレビで見て、「2007年にもっと頑張っておけば良かった」と思わないように、クリニックの方針を決めなくては、と思うのでした。

はじめに

1980年前後に体外衝撃波腎尿管碎石器（**extracorporeal shock wave lithotriper, ESWL**）¹）、経皮的腎碎石術（**percutaneous nephrolithotripsy, PNL**）²）、硬性尿管鏡を用いた経尿道的尿管碎石術（**transurethral ureterolithotripsy, TUL**）³）が発表されてから、尿路結石の治療として従来行われてきた切石術はほとんど施行されなくなった。

特にESWLは、エネルギー源を直接結石に接触させることなく、体外で発生させたエネルギーが体内をす通りして結石を破碎するという、画期的なアイデアであった。

しかしESWLも、ある程度の大きさまでの腎結石では治療成績が非常によいが、尿管結石では成績が落ち（位置合わせに超音波断層法を使用するタイプの装置では尿管結石を描出できないため破碎が不可能）、大き過ぎる腎結石を破碎すると尿管内に**stone street**を形成し症状や腎機能をかえって悪化させることもあり、ESWLは万能ではないことが明かとなり、むしろESWLの普及にともない尿管鏡等の**endourological**な手法が要求される頻度が多くなっている。

I 超音波碎石器と電気水圧碎石器（EHL）

I 超音波碎石器と電気水圧碎石器（EHL）

TULにおける結石破碎のためのエネルギー源としてわが国で商品化されているのは超音波碎石器と電気水圧碎石器（EHL）である4）。

商品化されている超音波碎石器は硬性の振動子によりエネルギーを結石に伝達するため硬性の尿管鏡を用いなければならない。これに対しEHLはエネルギーの伝達は電気コードによるので軟性の尿管ファイバースコープで使用可能である。硬性の尿管鏡を上部尿管まで挿入すると尿管口が内側に牽引されて尿管口狭窄を生じることがあり、また操作中腎盂に押し戻された結石の治療は不可能であるため、著者らは結石が上部尿管にある場合には軟性の尿管ファイバースコープを用いるべきだと考えている5）。

一方、超音波は軟部組織への障害性が低いので振動子を誤って尿管へ当てても短時間であれば障害を起こさないが、電気スパークにより生じる水圧は結石にも軟部組織にも同様に作用するのでプローブを尿管へ当てて放電すると尿管は簡単に穿孔してしまう。

著者らは超音波を伝達するための軟性の振動子を試作し、軟性の尿管ファイバースコープ下での破碎に成功した6）。軟部組織への障害が低く軟性の尿管ファイバースコープ下での破碎が可能となれば理想的な破碎装置となるわけであるが、プローブ先端でのパワーがまだ不十分であること、軟性の振動子とは言え90°も屈曲させることはできないので振動子を挿入した状態では尿管ファイバースコープを自在に操作出来ないなど、まだ改良すべき点がある。

II レーザーの原理と種類

II レーザーの原理と種類

超音波碎石機にかわる**flexible**な装置でしかも尿管に組織障害がなく石を砕くエネルギーとしてレーザーが注目されることとなった。

レーザーは、反転分布状態の媒質による光の誘導放出を利用して、光波を発振または増幅する装置のことで、語源は英語の**Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**である⁷⁾。原子の電子軌道、振動、回転の状態には、それぞれ固有の状態が離散的に存在し、この状態に応じた内部エネルギーを持っている。普通の状態の媒質は、上のエネルギー準位にある原子数 N_2 は下のエネルギー準位にある原子数 N_1 より少ない。媒質に外部よりエネルギーを与えると、原子が励起されて $N_2 > N_1$ の状態になる。この状態を反転分布状態という。

レーザーの基本的構成は、図1のごとく2枚の反射鏡の間にレーザー媒質を入れたものである。媒質に適当な方法でエネルギーを加え（ポンピング）、媒質を励起して反転分布状態を作り、誘導放出によって光を増幅する。2枚の反射鏡は光共振器を構成して、共振周波数の光を閉じ込め、その一部が反射率**100%**以下の反射鏡を透過して外部に取り出される。ポンピングには、光を照射する光励起、気体では放電励起がよく用いられる。

レーザー光の特徴は、指向性が良く、ほとんど完全に単色であり、位相が良くそろっていて干渉性が良いことである。

レーザーは媒質の種類により、気体レーザー、固体レーザー、液体レーザー（色素レーザー）に分類できる。また、レーザー光の放出の様式により、連続波とパルス波に区別できる。パルス波を出す方法には、フラッシュランプによる光励起のようにポンピングを断続的に行う方法と、ポンピングは継続的に行いながらエネルギーを外部に取り出すのは瞬時に行うQスイッチと呼ばれる方法がある。

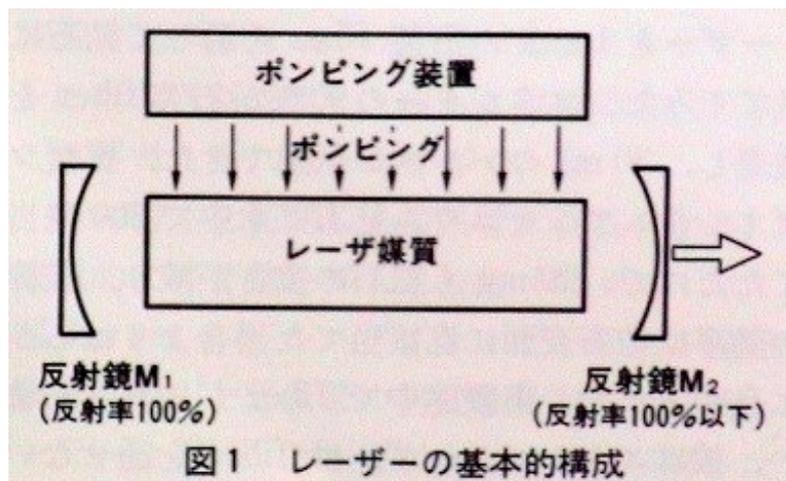


図1 レーザーの基本的構成

例えば図1の反射鏡M₁をモーターで回転させると、M₁とM₂が向かい合っていない時はポンピングのエネルギーが反転分布状態として蓄えられ、M₁とM₂が向かい合った時に極めて大きな出力のレーザー光が放出される。

III レーザー破碎研究のレビュー

III レーザー破碎研究のレビュー

これまでに結石破碎実験が行われたレーザーを、気体レーザーか固体レーザーか色素レーザーか、さらに連続波かパルス波かで分類したのが表1である。このうち結石破碎装置として最初に実用化されたのはパルスダイレーザーである。この項ではそれ以外の、実用化にまで到らなかったレーザーについてレビューする。

連続波

棚橋ら8)は、CO₂レーザーの連続波で結石に穴を開けた。16 Wattで毎秒2mmの速度で穿孔が進んだ。CO₂レーザーはfiberを通らないので、棚橋らはYAGレーザーの連続波をfiberを通して膀胱結石に当てた。出力は70 Wattで、熱による組織障害を防ぐため還流を要した。fiber先端もレーザーにより傷むため何度も研ぐ必要があった。2例の患者に行い、それぞれ3500Jと14700Jを要した。

Penselら9)はYAGレーザーの連続波を使用し1cmの結石を空気中で50Wで20分(60000J)で割ることができた。fiberを結石に近付ければ効率が良くなるがfiberが壊れやすくなった。

Watson 10)はアルゴンレーザーの連続波をfiberを介して結石に照射したが、結石を気化させるのにYAGレーザーと同等のエネルギーを要し、500J照射したあとで手で持とうとすると非常に熱くなっていた。

パルス波

ルビーレーザー

Mulvaneyら11)は1968年にルビーレーザーのパルス波により破碎を試みた。パルスあたりのエネルギーは50-300Jと非常に高く、パルス巾についての記載はないが、エネルギーが非常に高いことから想像して100-1000 microsecondだったのだろう。彼らはパルス波が結石を気化させるのではなく、破碎してくれることを示した。

Fair 12)は2JのQスイッチレーザーを固体に当てると1 Kilobarの圧を与えると述べている。この圧は、パルスレーザーによって生じるプラズマを透明な固体内に閉じ込めれば非常に強めることが出来る。彼は、結石を石英板で作った箱の中に入れ、20 nanosecondのパルス巾のQスイッチルビーレーザー(1.8J/pulse)を当てたところ衝撃波が生じ破碎された。

YAGレーザー (Qスイッチ)

Penselら9)はQスイッチYAGレーザー(5J/pulse以下)を一発だけ、fiberを介さず直接結石に

焦点を合わせて当てた。パルス波では結石は気化せず、破碎された。彼らはこのパルスを何発もあてる研究をしなかった。連続波を映写機の羽のようなもので区切ってパルス状にしてみたが、連続波と同じ作用しかなかった。

Watson 10) はQスイッチYAGレーザー (元々の1064nmの波長) や周波数を倍にしたQスイッチYAGレーザー (532nmの波長) のようなパルス波は結石の破碎に適していることを確認し、さらに30分前に殺した豚の腎臓に磷酸カルシウム結石を入れ、周波数を倍にしたQスイッチYAGレーザー (532nmの波長) を、パルス巾15 nanosecond, 1パルスあたり600mJまで、繰り返し速度は10Hzまでで当てた。結石は3分で壊れ、更に20分腎盂に当てた。腎盂には肉眼上変化はなかった。この結果は臨床応用への期待を抱かせるものであり、次に彼はこのレーザーをfiberで導光できるかを検討したが、fiberの遠位端からレーザーが出てこず、パワーを上げるとfiberの近位端が粉々になった。QスイッチYAGレーザーのパルス巾は15nanosecondであるので、パワーが100mJのレーザーを600micron径のfiberに通そうとするとパワー密度は2300Megawatt/cm²となり、まったくきずのないガラスの域値に近く、ごく僅かのきずでfiberが壊れることになる。

100 microsecond YAGレーザー

Qスイッチレーザーは組織を損傷せずに結石を破碎するが、fiberを通せないことが判明した後、Watsonはこのレーザーを試みた10)。パルス巾100 microsecond, 1パルスあたり1Jまで、繰り返し速度は30Hzまでで、金属に穴を開ける工業用レーザーである。空気中では特に良く結石を破碎したが、結石は熱くなっていた。水中では効果が落ちた。次に600micron径のfiberを通して700mJ/pulseで5mm結石から離して当てた。水中でも空気中でも効果は弱かった。fiberを結石に密着させると良く壊れたがfiberの先も壊れた。空気中ではカルシウム結石にこげめをつける作用があった。尿酸結石とシスチン結石は完全に気化した。水中ではfiberを結石に密着させてもfiberの先は壊れなかった。水中では尿酸結石はすぐに破碎された。磷酸カルシウム結石とシスチン結石はまったく破碎できず、磷酸カルシウム結石はゆっくりと気化した。従って、カルシウム結石はまず空気中で当ててこげめをつけ、水中でfiberを介して当てるということを、何回か繰り返すことにより、結石を壊すことにした。この方法でもシスチン結石だけは破碎できなかった。

動物実験の結果。

1. 層状構造をした磷酸カルシウム結石を1.5mmの厚さにしたものを、摘出した豚の腎盂にのせて、600micron径のfiberを通して700mJ/pulseで30Hzで40秒空気中で当てた。腎盂は5mmの深さの所では温度上昇は僅かであった (0.5-1.8°C) が、1mmの深さの所ではかなりの温度上昇 (13-28°C) が見られた。摘出した豚の腎盂や尿管内に結石を入れ、内視鏡下で破碎実験をした。尿酸結石は壊れ易く破碎中の尿管の温度上昇は6.9°Cまでであった。磷酸カルシウム結石では、まず空気中で当ててこげめをつけ、水中でfiberを介して当てるということを、何回か繰り返すことにより、結石を壊したが、この際尿管は26°C上がった。シスチン結石は空気中で気化させる以外に方法がなかったが、この際尿管は55°C上がった。

2. 犬を全麻下に膀胱高位切開し、碳酸カルシウムと磷酸カルシウムの混合結石を植え込み、恥骨上から入れた膀胱鏡下で生理食塩水内でレーザー破碎を試みた。少ししか割れなかった。時々失敗して膀胱三角部を照射した。次に膀胱を空にし、層状構造をした磷酸カルシウム結石を**1.5mm**の厚さにしたものを膀胱の後壁の2箇所置き、それぞれ**20秒**と**40秒**照射し、膀胱を縫合した。**10日**後、再開腹し、左尿管を切断し、**4mm**の碳酸カルシウム結石を詰め込み、尿管鏡下で空气中で当ててこげめをつけ、水中で**fiber**を介して当てるということを、**2回**繰り返すことにより、結石を壊した。右尿管と膀胱側壁には直接レーザーを当てて、**3時間**後に殺した。膀胱三角部には筋層に及ぶ**crater**があった。層状構造をした磷酸カルシウム結石を**1.5mm**の厚さにしたものを膀胱に置き、**20秒**照射した部分には、**lamina propria**に及ぶ浮腫を生じており、**40秒**照射した部分には筋層に及ぶ**crater**があった。左尿管の損傷ははっきりしなかったが、結石も満足には壊れていなかった。

殺す**3時間**前にレーザーを照射した膀胱側壁は、**1秒**では**lamina propria**迄、**4秒**で筋層迄、**13秒**で全層がおかされていた。

このレーザーは結石を破碎できるエネルギーでは、組織を損傷することが示された。またこの**1064nm**という波長は、色の薄い結石には吸収され難いようであった。

エキシマレーザー

エキシマとは、励起状態においてのみ存在する分子のことで、この分子が解離する時に紫外パルス光を放出するのを利用したレーザーがエキシマレーザーで、発振波長は封入ガスにより異なり、パルス巾は**10**ないし**15nanometer**と短い。

Watson 10)はエキシマレーザーをレンズを介して**0.5mm**のspotにして結石表面に当てる実験を、空气中、水中、空气中で水をかけながら(破碎されて粉々に飛び散る結石がレーザーの通過を妨げている可能性があったので)、の3とうりで行った。フッ化アルゴンガスによるエキシマレーザー(波長**197nm**)を**12mJ/pulse**で**100Hz**で磷酸マグネシウムアンモニウム結石に当てると小さい穴ができた。水中では効果がなく、空气中で水をかけながらやっても効率は上がらなかった。焦点で気泡が無数に発生した。

フッ化クリプトンガスによるエキシマレーザー(波長**249nm**)を**2x0.5mm**のspotで当てると**15mJ/pulse**で目に見える効果が出た。空气中で**50000**発当てると**111.5mg**結石の重さが減ったが、ろ過しても**1mg**しか回収できなかった。水中で**50000**発当てると**25.6mg**結石の重さが減ったが、ろ過しても**1mg**しか回収できなかった。空气中で水をかけながらだと**37.5mg**結石の重さが減った。碳酸カルシウム結石に水中で**50000**発当てると**92mg**結石の重さが減った。水をろ過しても**19mg**しか回収できなかった。

塩化クセノンガスによるエキシマレーザー(波長**308nm**)を**2x0.5mm**のspotで当てると**12mJ/pulse**で目に見える効果が出た。**100mJ/pulse**で碳酸カルシウム結石に水中で**6000**発当てると**23.9mg**結石の重さが減り、磷酸マグネシウムアンモニウム結石では**6000**発当てると**30.1mg**減った。

フッ化クセノンガスによるエキシマレーザー(波長**351nm**)を**4x1mm**のspotで当てると

と**17.5mJ/pulse**で目に見える効果が出た。他の波長と違って、**crater**のまわりにこげめがついた。**26mJ/pulse**で磷酸マグネシウムアンモニウム結石に空気中で**50000**発当てると**176.5mg**しか減らず、水中で**50000**発当てると**15mg**しか減らず、碳酸カルシウム結石に水中で**50000**発当てると**45.5mg**しか減らなかった。

ろ過して回収できる結石の重量は常に減少量より少なかった。破碎された結石の大きさは大体**30-50micron**であった。

フッ化クセノンガスによるエキシマレーザーを**1mm**の石英**fiber**を通してみた。**4x1mm**の**spot**を丸い穴を通すことにより周りを切捨ててから**fiber**を通した。**90%**通過し、**30mJ**のパルスが伝達できた。結石から**5mm**離して**30Hz**で、碳酸カルシウム結石に水中で**20**秒当てると ($30\text{mJ}\cdot 30\text{Hz}\cdot 20\text{sec}=18\text{J}$)、**50mg**結石の重さが減った。磷酸マグネシウムアンモニウム結石では**20mg**,シスチンでは**35mg**減った。破碎された粉は霧状に広がった。実験途中で**fiber**が壊れてしまい、ついに彼はエキシマレーザーは**fiber**を通せない、従って内視鏡操作に適さないとの結論に達した。

IV パルスダイレーザー

IV パルスダイレーザー

組織障害を起こさない程度のエネルギーで結石を破砕するには、結石に吸収され易く、生体に吸収され難い波長のレーザーが好ましい。Watsonは吸光計を用いて種々の波長での結石の吸光度を測定した。1000nm付近の波長の光（赤外線）は結石にほとんど吸収されず、より短波長になるほど良く吸収されることを確認した彼はパルスダイレーザーの実験を開始した。

このレーザーはフラッシュランプで色素を励起することによりパルス波のレーザーを発生させるものなので、色素を交換することにより種々の波長のレーザーが出せ、またフラッシュランプの放電時間を変化させることによりパルス巾も1μsecから300μsecまで可変である。パルス巾が1μsec以上とQスイッチYAGレーザーの15nanosecondよりはるかに長いので、非常に細い石英fiberを通すことができる。

パルスダイレーザーをどの条件（波長、パルス巾、fiberの太さ）で使うのがいいかの基礎実験として、波長は、445nm, 504nm, 577nmとで、パルス巾は、1μsec,10μsec,120μsec, 300μsecとで、fiberの太さは、200Micron, 400Micron, 600Micron, 1000Micronとで比較した13）。人の結石を5cmの深さの水中に置き、レーザーをあてた。出力は低値から次第に上げ、破砕の起きる域値の出力を求めた。波長は短いほど、パルス巾は短いほど、fiberは細いほど、少ないエネルギーで破砕できた。

この基礎実験の結果、パルス巾は1μsecが、fiberの太さは200Micronが採用されることになったが、波長は445nmではなく504nmが採用された。その理由をWatsonは445nmの波長の光は504nmの波長の光よりヘモグロビンに吸収されやすく、従って組織障害性が高いことが考えられるためとしている。

豚の腎盂を切開し上部尿管に結石を詰め、経尿道的に尿管鏡を挿入し波長504nm、パルス巾1μsecのパルスダイレーザーによる破砕実験を行い、上部尿管の病変を検討した結果、レーザーはEHLより害が少ないことが解った14）。下部尿管の病変は上部尿管より強く、尿管鏡挿入による合併症が最も大きいことも判明した。レーザーのfiberはEHLより細く、その分尿管鏡も細くて良く、尿管への侵襲が少なくできると考えられた。

こうして、波長504nm、パルス巾1μsecのレーザーを、200Micronの太さのfiberで、10Hz（毎秒10発）の繰り返し速度で、30-60mJ/pulseのパワーで照射する装置が臨床応用されることになった15）。その装置はすでにアメリカではCandela社により商品化されており（図2）、日本でも著者らの教室などで治験が終了し16）厚生省に申請中であり、近々承認されるものと思われる。

Coptcoatらの最近の報告17）によれば107例の尿管結石患者に9.5Fの硬性尿管鏡下に行い、成功率84%であった。失敗例は石が腎盂に逃げたもので、PNLもしくはESWLで治療した。破砕に要したパルス数は100発から1200発、平均500発で、合併症は尿管鏡による尿管口の狭窄を2%に認めただけでレーザーに起因したものはなかった。

パルスダイレーザーによって結石が破砕される機序については、下記3通りの可能性がある10）。

(1)パルスレーザーによって結石のごく一部だけが暖められて膨張し、その圧力によって結石が壊れる。fiberが細いほど、暖められる体積は小さくなり、同じエネルギーでも高温になりやすい。この理論は連続波では破碎されない理由を説明してくれるが、パルス波によって暖められた一部から他の部分に熱が伝わるには**1 millisecond**かかり、パルス巾が**1 microsecond**か**300 microsecond**かで破碎効果に大きな差が出ることは説明できない。

(2)結石内に生じた蒸気による破碎。結石の中には**0.5 micron**から**100 Angstrom**ぐらいの洞窟があって気管支のようにつながっている。この中で水が蒸発して膨張し破碎するとの考え。沸点の高い**glycerol**の中では破碎効率が悪くなるが、**150°C**に暖めてからやると水中と同等の効果が得られることが実験で示されているが、この理論により説明できる。パルス巾が長すぎると、蒸気が洞窟を伝わって逃げてしまう。

(3)結石表面でプラズマが発生することにより破碎される。プラズマとは結石の色素がレーザーエネルギーを吸収して気化する時にできる局所的なイオンと電子の集合である。パルス巾は短いほど、fiberは細いほど、結石は良く壊れたが、これはパワー (**Watt/cm²**) が高いほど良いことを示している。パワー (**Watt/cm²**) が高いほど、プラズマも発生しやすい。プラズマが生じると、元々のレーザーの波長とは異なる波長の光が放出され、かつエネルギーの一部が音に変換されるということが知られている。Candela社のFurumotoは結石に**504nm**のレーザーを当てた時、**504nm**以外の波長の光が放出されていることを証明した。プラズマは水中では膨張を制限されるため、衝撃波を発生させることとなる。

V 改良の余地について

V 改良の余地について

レーザーによる破砕器が実用化されるまでの経過をこうして振り返ってみると複数の研究者の努力の積み重ねというより**Watson**個人の執念がいかにこの分野の発展に寄与しているかがわかる。彼は利用可能なレーザーはことごとくチャレンジしたようであり、その結果選択された波長**504nm**、パルス巾**1μsec**のパルスダイレーザーは最良のものとの印象を抱いてしまう。しかし彼の論文を詳細に検討すると、論理が飛躍している点もいくつか発見できた。

第1点は、波長が**445nm**のほうが破砕効果が良いのに、**445nm**の波長の光は**504nm**の波長の光よりヘモグロビンに吸収されやすいとの理由だけで実際に組織障害性の動物実験をすることなく**504nm**を採用したことである。

第2点は、パルス巾について**1μsec (=1000 nanosecond)**と**15 nanosecond**との間のものについては検討されていないことである。単位時間あたりのパワー (**Watt/cm²**) が高いほどプラズマが発生しやすく破砕効率が高くなる。パルスあたりのエネルギーが同じでも、パルス巾が短いほどパワーが高くなるので、破砕効率を高めるにはパルス巾が短いほど良い。しかしQスイッチ**YAG**レーザーやエキシマレーザーのようにパルス巾が**15nanosecond**と極端に短いと、パワー密度が極度に高値となり、まったくきずのないガラスの域値に近く、ごく僅かのきずで**fiber**が壊れることになる。石英**fiber**を通せる範囲でしかも破砕効率がより良くなるようなパルス巾についてももっと検討されて良いと思われる。

第3点は、レーザー自体に関してはかなり詳しく検討してあるが、導光用の**fiber**については、市売の石英**fiber**以外にはあまり検討してないことである。**Candela**社によるパルスダイレーザーの商品化を追いかける形でいま西ドイツのグループがQスイッチ**YAG**レーザーによる破砕装置の実用化を目指して研究を続けている(18)。彼らはパルス巾が**8 nanosecond**のレーザーを**600Micron**の**fiber**で導光することに成功しているようである。石英**fiber**を通せないという理由だけでエキシマレーザーを断念するのではなく、より強固な**fiber**を探す努力もすべきである。

我々の教室でも、軟性の尿管ファイバースコープを用いたTULに適したより良い破砕器を追求しており、レーザー破砕器についても上記のような改良の可能性につき検討を開始しており、その成果についてはいずれ報告したい。

文献

- 1) Chaussy Ch, Brendel W, Schmiedt E : Extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves. *Lancet*, 2: 1265-1268, 1980.
- 2) Fernstrom I, Johansson B : Percutaneous pyelolithotomy, A new extraction technique. *Scan. J. Urol. Nephrol.*, 10: 257-259, 1976.
- 3) Perez-Castro E, Martinez-Pineiro JA : Transurethral ureteroscopy : A current urological procedure. *Arch. Esp. Urol.*, 33: 445-460, 1980.
- 4) Goodfriend R : Ultrasonic and electrohydraulic lithotripsy of ureteral calculi. *Urology*, 23, 5-8, 1984.
- 5) Aso Y, Ohtawara Y, Fukuta K, Sudoko H, Nakano M, Ushiyama T, Ohta N, Suzuki K, Tajima A : Operative fiberoptic nephroureteroscopy : Removal of upper ureteral and renal calculi. *J. Urol.*, 137: 629-632, 1987.
- 6) Higashihara H, Aso Y : Flexible ultrasonotrite and fiber optic ureteroscope : a new approach to ureteral calculi. *J. Urol.* in press.
- 7) Stein BS : Laser physics and tissue interaction. *Urol. Clin. N. Amer.*, 13, 365-380, 1986.
- 8) Tanahasi Y, Numata I, Kanbe K, Harada K, Chiba Y, Toyoda S, Orikasa S : Transurethral disintegration of urinary calculi by the use of laser beam. In *Laser Surgery IV. Proceedings of Fourth International Symposium on Laser Surgery*. Kaplan (Ed.), 10: p30-33, Academic Press, Jerusalem, 1981.
- 9) Pensel J, Frank F, Rothenberger K, Hofstetter A, Unsold E : Destruction of urinary calculi by neodymium YAG laser irradiation. In *Laser Surgery IV. Proceedings of Fourth International Symposium on Laser Surgery*. Kaplan (Ed.), 10: p4-6, Academic Press, Jerusalem, 1981.
- 10) Watson G : Laser fragmentation of urinary calculi (with particular emphasis on the stone in the ureter). Unpublished paper.
- 11) Mulvaney WP, Beck CW : The laser beam in urology. *J. Urol.*, 99: 112-115, 1968.
- 12) Fair HD : In vitro destruction of urinary calculi by laser-induced stress waves. *Med. Instr.*, 12: 100-105, 1978.
- 13) Watson G, Murray S, Dretler SP, Parrish JA : The pulsed dye laser for fragmenting urinary calculi. *J. Urol.*, 138: 195-198, 1987.
- 14) Watson G, Murray S, Dretler SP, Parrish JA : An assessment of the pulsed dye laser for fragmenting calculi in the pig ureter. *J. Urol.*, 138: 199-202, 1987.
- 15) Dretler SP, Watson G, Parrish JA, Murray S : The pulsed dye laser fragmentation of ureteral calculi : initial clinical experience. *J. Urol.*, 137: 386-389, 1987.
- 16) Higashihara H, Kameyama S, Takeuchi T, Asakage Y, Hosaka Y, Honma Y, Minowada S, Aso Y : Transurethral lithotripsy using pulsed dye laser. *Jpn. J. Endourol. ESWL*. in press.
- 17) Coptcoat MJ, Ison KT, Watson G, Wickham EA : Lasertripsy for ureteric stones in 120 cases

: lessons learned. Br.J.Urol.,61:487-489,1988.

**18) Hofmann R,Hartung R,Geissdorfer K,Ascherl R,Erhardt W,Schmidt-Kloiber H,Reichel E :
Laser induced shock wave lithotripsy – Biologic effects of nanosecond pulses.
J.Urol.,139:1077-1079,1988.**