

レーザーとは何か？ 第1歩からやさしく

レーザー 基礎の基礎

宮崎大学 教授

黒澤 宏・著

オプトロニクス社

はじめに

20世紀を一言で言えば“エレクトロニクス”に代表される時代でした。電話，放送，医療にと，エレクトロニクスが大活躍し，家庭にもどんどん入り込んできた時代です。おかげで，とても便利で快適な生活を送る事が出来るようになってきました。今の私たちは“エレクトロニクスのかご”の中で暮らしていると言っても過言ではありません。

エレクトロニクスと言えば「トランジスター」や「コンピューター」ですが，これらと並んで20世紀最大の発明の中に「レーザー」が入っています。トランジスターは集積回路（IC）に発展し，私たちの身の周りにあふれるようになってきましたが，一方のレーザーはそれほどでもありません。でも「21世紀は光の時代」と言われています。レーザーが大活躍する時が来るのです。

レーザーというと，何だかむずかしいもの，何だか怖いもの，というイメージを持っていませんか。身近な例では，スーパーのレジでバーコードを読むのに使われていますし，CDの中にも入っています。自動車工場に行くとレーザーで鉄板を切ったり，穴を開けたり，くっつけたりと，レーザーロボットが大活躍しています。通信にも大量に使われていて，未来の発電といわれている核融合を起こすのにも使われようとしています。

この本では，このようなレーザーについて，第一歩からやさしく，そして正確に書いてあります。この本を読んでレーザーについて興味を持ってください。きっと面白くなるものと思います。

この本は「光とは何ですか？」，「レーザーとは何ですか？」の問いに答えることから始まって「いろいろなレーザーの構造や特徴」，そして「レーザーが使われている応用例」について書いてあります。

一言でいえば「レーザーとは役に立つ新しい光とそれを作る機械」
のことです。医学から電話，通信，さらにはCDプレーヤーなどで
重要な役割を果たしているレーザーですが，殺人光線に代表される
ようなSFの世界のものとしか思っていない人が多いのが現実です。
そこで，レーザーの本当の姿を知って，新しい利用法を見つけ，こ
れからの光の時代に即応できるようにするのがこの本の目的です。

できれば未来の人たちに，この本を読んでもらいたいと思ってい
ます。いろんなことに興味を持って，いろんなことに目を向けて欲
しいのです。理系に限らず，文系の人たちにも解るように書きまし
た。大学の教養過程や高専での教科書として，また理工学部でも専
門以外の学科の科目の教科書としてお使いいただけるものと思いま
す。ぜひ，読んでみてください。

1999年4月

黒澤 宏

レーザー 基礎の基礎 もくじ

第1章 レーザーとは何？

1. レーザー学の始まり 1
2. レーザーの歴史 2
3. レーザーはどのように使われているか？ 4
4. レーザーの重要な性質 8
 - 4.1 波長 8
 - 4.2 出力パワー 10
 - 4.3 パルス光と連続光 10
 - 4.4 ビームの大きさと発散角 12
 - 4.5 コヒーレンス 13
 - 4.6 効率 14

第2章 原子と光

1. 電磁波と光子 16
2. 量子力学と古典力学 20
3. 光と物質との相互作用 25
4. 初歩の光学 30

第3章 レーザー内部を見てみよう

1. 反転分布をつくる 34
2. ポンピング 40
3. 光共振器 42
4. レーザー光線を作る 46

第4章 レーザー光線の特徴

1. レーザーの発振波長とスペクトル線幅 52

2. レーザービームとモード	57
3. コヒーレンス	60
4. 偏光	62
5. パルス発振と連続発振	64

第5章 ガスレーザーのいろいろ

1. ガスレーザーの仲間達	69
2. ヘリウムネオンレーザー	76
3. 希ガスイオンレーザー	78
4. 金属蒸気レーザー	82
5. 炭酸ガスレーザー	84
6. エキシマレーザー	86
7. その他のガスレーザー	88

第6章 固体レーザーのいろいろ

1. 固体レーザーとは?	90
2. 固体レーザーのポンピング	96
3. ルビーレーザーの原理	99
4. ネオジウムレーザー	101
5. 波長可変固体レーザー	106
6. その他の固体レーザー	109

第7章 半導体レーザーのいろいろ

1. 半導体のエネルギー構造	111
2. 半導体の性質	120
3. ダイオード	122
4. 発光ダイオード	126

第8章 半導体レーザーの実際

1. 半導体レーザーの構造 131
2. レーザー共振器の構造 138
3. 波長と材料 142
4. 代表的な半導体レーザー 144

第9章 色素レーザーと超短パルス発生

1. 色素レーザー 150
 - 1.1 色素レーザーとは? 150
 - 1.2 色素レーザーの構造 152
 - 1.3 レーザー色素 155
 - 1.4 色素レーザーのポンピング 158
2. 超短パルスの発生法 160
 - 2.1 Qスイッチング 160
 - 2.2 モード同期 165
 - 2.3 パルス圧縮法 166
 - 2.4 まとめ 168

第10章 自由電子レーザー，エックス線レーザー， シンクロトロン放射光

1. 夢のレーザー：自由電子レーザー 171
 - 1.1 電子と光の不思議な関係 171
 - 1.2 光速で運動する電子 175
 - 1.3 いろいろな自由電子レーザー 177
2. エックス線レーザー 178
 - 2.1 エックス線とは? 178
 - 2.2 エックス線レーザーのポンピング 181
3. シンクロトロン放射光 184

第11章 レーザービームを操る技術

1. 光の屈折 188
2. レンズ 193
3. コーティング 196
4. 光ファイバー 199
5. 偏光 201
6. 非線形光学 204

第12章 レーザーの応用

—レーザー出力の低い例

1. レーザーで読み取る 211
2. 光ディスク 215
3. レーザー印刷 219
4. ファイバー通信 221
5. 直線測定（距離測定） 226
6. ホログラフィー 228

第13章 高出力レーザーの応用

1. 材料加工への応用 231
2. 医療へのレーザー応用 238
3. 集積回路をつくる 243
4. レーザーで発電（レーザー核融合） 245
5. レーザーの意外な応用 247
6. レーザーで雷も自由自在 248
7. 特殊なレーザーの特殊な応用 249

- 索引 252

第1章

レーザーとは何？

1. レーザー学の始まり

最近のキーワードの一つに“ハイテク”があります。先端技術とか高度技術の意味ですが、英語でもハイテク (Hi-Tech) で通じます。この“ハイテク”のシンボルは、集積回路とコンピュータと衛星、そしてレーザーです。これらのハイテクは私たちの生活に大きく影響し、その生活を変えつつあります。TV、電話、インターネットに形を変えてコンピュータと衛星は身近なものになった感じがしますが、レーザーはまだまだ身近になったとは言えません。でも、これからますます重要になってくるのがレーザーです。ところで、「光とは何ですか？」「レーザーとは何ですか？」の問いへの答えは、難しく言えば「光とは原子・分子の中に存在するエネルギー」「レーザーとは、原子・分子から出てくる足並みそろえた光」であると言えますが、もっと簡単に言えば「レーザーとは、役に立つ新しい光とそれを作る機械」と言えます。医学から電話、通信、さらにはCDプレーヤーで重要な役割を担い始めているレーザーですが、殺人光線に代表されるようなSFの世界のものとしか思っていない人が多いのが現実です。そこで、本講座では、レーザーの本当の姿を知って、新しい利用法を見つけ、これからの光の時代に即応できるようにするのが目的です。

20世紀の“ハイテク”時代は集積回路とコンピュータが作ってきましたが、これらの中で働いているのは“電子 (エレクトロン)”です。電子は原子

の中に閉じ込められている極めて小さな粒子です。“…子”は、微粒子の代名詞ですが、電子はそれのご先祖様です。電子の大活躍する現代の人間は、電子の森の住人であると言えるでしょう。電子が原子から解き放たれて自由になったとき、動き回って仕事をします。時には熱になり、時には電気を起こし、時には情報を伝えます。電子は動くことでエネルギーを伝達し、仕事をします。しかしながら、電子は小さすぎて、沢山の電子が集まらないと仕事になりません。例えば、100Wの電球をひからせるには、1秒間に $10 \cdots 00$ （0が18）個の電子が必要です。こんなにたくさんの電子が電球の中を走って、やっと100Wの明るさを出すことができます。

また、放送局では、音声や映像を“電子の働き”に乗せてアンテナから“電波”として発信します。ラジオやTVでは、アンテナで電波を受けて、電子の動きに変え、スピーカーやTV画面に映し出します。このためには、受信した信号を運ぶ電子の数を多くする、すなわち信号の振幅を大きく、強くする必要があります。ラジオやTVの中にはこの増幅の働きをする増幅器が入っています。光の世界でこの増幅器と同じ働きをするものが“レーザー”です。増幅だけでなく、光を作り出す、すなわち発振器もレーザーと呼んでいます。光の速度は1秒間に地球を7周半するほど速いので、放送局の出来事が、ほぼ同時に家庭で見たり聞いたりできるわけです。これは電波が、中学校で習う正弦波（図1-2参照）の形をしており、理論（計算）通りに、取り扱うことができるからです。光は電波と同じ種類にありますが、もし電波と同じ正弦波ですと、電波と同じことを光波でもできることになります。一般の光は電波とは異なる波ですが、レーザーはまさに電波と同じ形の波であると言えるでしょう。レーザーは、電波でできることを光の世界で実現することが最初の目標でしたが、最近のレーザーの進歩を見ると、電波ではできないことまでやってのけようとしています。

2. レーザーの歴史

レーザーの言葉は“誘導放出による光の増幅”の頭文字を取ったものです。

原子や分子が余分に持っているエネルギーを光の形で放り出します。電球の光は、電気によって温度が上昇したタングステン原子が、余分のエネルギーを放出する際にでる光です。誘導放出は、この電球の光とは少し異なります。余分のエネルギーを放出するのは同じですが、光による誘導作用によって光が放出されます。誘導放出についてのくわしい話は後ほどすることにして、ここではレーザー発明の歴史について見てみましょう。

レーザーのそもそもの歴史は、1917年にアインシュタインが誘導放出の可能性を理論的に明らかにしたことに始まります。原子や分子が余分なエネルギーを放出するのは、自然界の発光に広く見られる、自然放出と呼ばれる現象であり、誘導放出の現象ははるかに弱いものでした。科学者たちは誘導放出現象が起こる条件を長い間探し続けていました。誘導放出が実現できる条件を明らかにしたのは、光ではなく、光と同じ電磁波ですが、光に比べると遥かに波長の長いマイクロ波においてでした。1951年、当時コロンビア大学に在籍していたタウンズがマイクロ波で誘導放出の生じる条件を明らかにしました。さらに数年遅れて、光で誘導放出を実現できる可能性を明らかにしたのは、1957年のベル研究所のタウンズとシャロウでした。時を同じくして、コロンビア大学の大学院生だったグールドが研究ノートに同じアイデアとレーザーの名前を書き留めていました。グールドは、論文を書くよりも特許に興味を持ち、レーザーのアイデアを特許申請しており、これが後になって有効になり、世界が驚くはめになりました。1988年5月にグールドの特許が認められ、現在もなおレーザーを作る際にはこの特許を避けて通ることはできません。シャロウとタウンズは、別々にノーベル賞を受けましたが、一方グールドは富を得ました。

ところで、レーザーの実現競争に勝ったのは、ヒューズ社のメイマンでした。1960年のことです。彼は、ルビーがレーザー媒質として優れていることに着目し、ルビーレーザーから赤色の光線を得ることに成功しました。ルビーの結晶を明るいフラッシュランプで照らし、ルビー結晶の両端に鏡をおいた構造でした。連続的に光線を出すことはできませんでしたが、フラッシュランプがひかると同時に、赤い光線を瞬間的に出すことに成功しました。それは、今までに見たこともないくらいに明るい光線でした。まさに、赤い弾丸

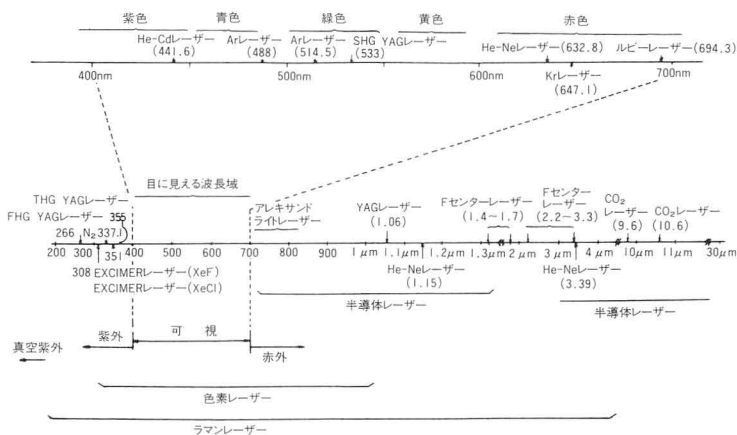


図1-1 代表的なレーザーの種類と波長¹⁾

のようでした。ほとんど同時期に、ベル研究所のジャバンがヘリウムとネオンガスを放電管の中に入れ、両端に鏡をおくことで、今度は赤い光線が連続的に得られました。片手で持てるほどの小さなものでしたが、明るい光線を得ることができました。これ以来、各種のレーザーが発明され、現在使われている代表的なものだけをあげても図1-1の様にたくさんあります。半導体レーザーを除けば、ほとんどが最初に発明されたものと比べると大きなものとなっています。

3. レーザーはどのように使われているか？

それでは、レーザーがどこで、どのように使われているかを、ざっと見てみましょう。レーザーがもっとも身近になったのは、小型の半導体レーザーが発明されて以来です。携帯用のものも普及しているCD（コンパクトディスク）の再生装置に使われています。レーザー光を使って、わずかな凹凸の有無を検出し、音に変えているのです。また、スーパーマーケットやコンビニエンスストアに行くと、レジのところでバーコードを自動的に読みとって

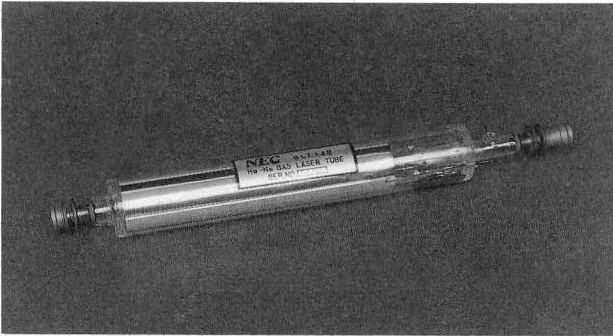


写真1-1 ヘリウムネオンレーザーの本体
赤い光線が出る。(日本電気㈱提供)

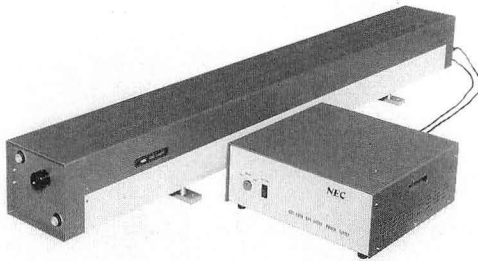


写真1-2 世界最大75mW以上の出力が得られるヘリウム
ネオンレーザー
(日本電気㈱提供)

る装置があります。商品についているバーコードを、ガラス面の上をなでるようにすると、瞬時にバーコードの記号を読みとっています。ガラス面からのぞいてみてください。赤い線が何本も走っているのが見えます。ヘリウムネオンレーザーか赤色半導体レーザーから出ている赤色の光線です。この光線をバーコードに当てて、その反射光を読んでいるのです。コンピューターを使っている人ならレーザープリンターを使うこともあるかと思います。今までのプリンターと比べると、格段にきれいに字や絵を書いてくれます。

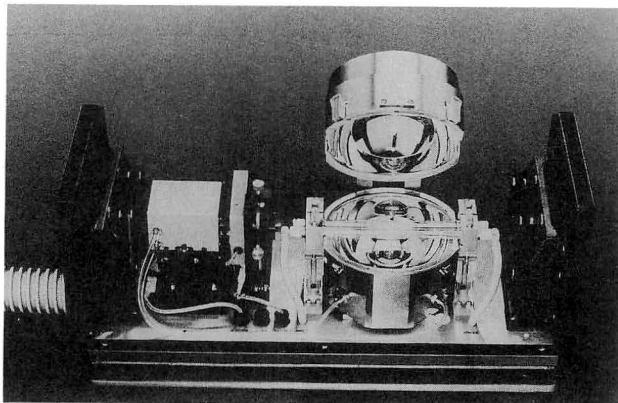


写真1-3 初期の頃のYAGレーザー
フラッシュランプの光を効率よくYAG結晶に集めるために集光器が装備されている。(日本電気㈱提供)

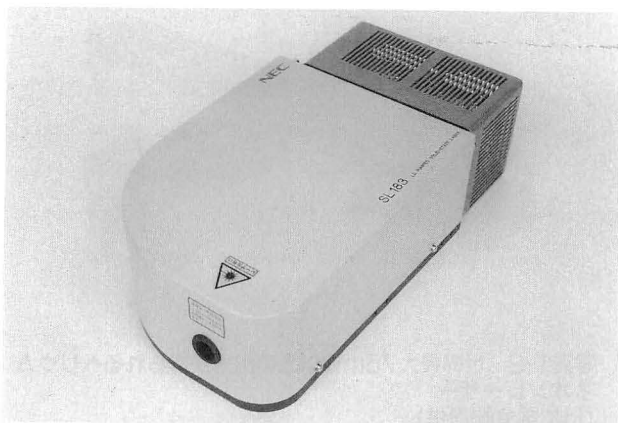


写真1-4 最も新しい半導体レーザーで励起する方式のYAGレーザー
(日本電気㈱提供)

電子複写機と同じ原理ですが、レーザーを使うことによって、細かい点も書けるようになっているために、きれいな字が書けるのです。

この他にも、光通信があります。高速道路に沿って張り巡らされている光ファイバー中を光信号が走って行き、信号を遠くに伝えます。この信号を伝えるのにも半導体レーザーが使われています。また、顔のあざを消すのにも

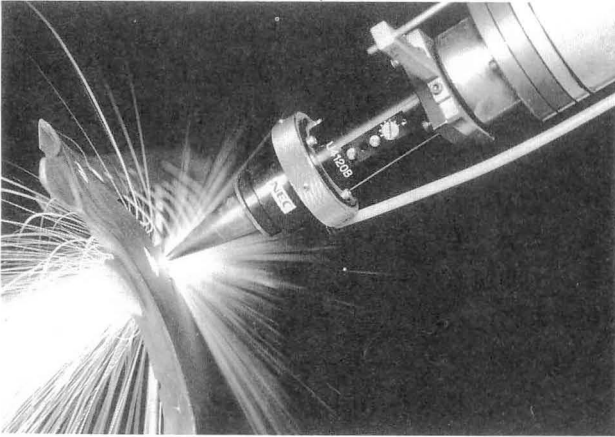


写真1-5 自動車ボディーの鉄板を切断しているところ
いわゆる、レーザーロボット。このような自動車用レーザー
ロボットの使用台数は日本が世界一。（日本電気㈱提供）



写真1-6 赤色の光線を出す半導体レーザー
（日本電気㈱提供）

レーザーが使われています。レーザーであざの部分焼き取ります。手術に使われるメスとしてもレーザーが役に立っています。レーザーメスは、切った部分からの出血が少ないなどの特徴があります。ガンの治療や診断にもレー

ザーが役に立っています。歯に治療にも。このような医療の分野におけるレーザーの役割は、今後ますます重要なものとなるでしょう。

自動車を作る際にもレーザーが大いに役立っています。鉄板を切ったり、溶接したりするロボットに採用されています。自動車産業におけるレーザーの導入数は、日本が断然トップです。世界中の自動車用レーザーロボットの半数以上が日本で使われています。切断といえば、柔らかい布の切断にもレーザーが役立っています。柔らかいので切断が難しいのですが、レーザーを使えば柔らかいなんて問題ありません。建築材料にレーザーを当てて、表面に模様をつけたりするのも役に立っています。他にも、ディスコなどで見られる赤や緑の光線が飛び交うレーザーショー、プレゼンテーションで使われるレーザーポインター、核融合や同位体分離などにもレーザーが有効です。日本ではありませんが、もちろん、兵器としての利用も開発されています。数え上げたらきりがなくくらいにレーザーが使われているのですが、以外と知られていないのがレーザーです。このようなレーザーの本質から実際の応用例までをくわしくお話するのが、この本の目的です。

4. レーザーの重要な性質

ここでは、各種のレーザーに共通した性質について見てみましょう。これからレーザー学を始めるためには無くてはならない言葉の意味を勉強しましょう。重要な性質としては、(1)波長、(2)出力、(3)パルス光か連続光か、(4)ビームの大きさと発散角、(5)コヒーレンス、(6)効率などでしょうか。それでは、これらの言葉を順番に見ていきましょう。

4.1 波長

光も電磁波の一種で、 1-2 のように波の性質を持っています。したがって、光の基本的性質は波長です。可視光の領域では、波長は色を表わします。各種のレーザーは、それぞれ特有の波長の光だけを出すことができます。これはレーザーの特徴でもあり、欠点ともなっています。ある特定の波長の光

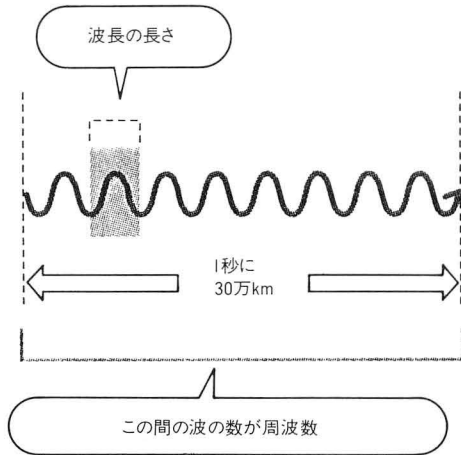


図1-2 波の波長と周波数

が欲しくても、レーザー装置から直接得られるとは限りません。いろいろな工夫をしてやっと手にできる波長の光もあります。レーザーの波長は材料によって決まります。電球は何となく赤っぽい光を放っていますが、全体としては白色に近い光です。一方、ポインターとかバーコードリーダーの光線はきれいな赤色をしています。赤色だけで、他の色は混ざっていません。これを「**単色光**」と言います。レーザーの中には、広い波長範囲の光を放っているものもありますが、これは例外といえるでしょう。ほとんどのレーザーは、単一波長か、狭い範囲の波長の光だけを出しています。レーザーの中には、いくつかの異なる単一波長の光を出ることができるものもあります。条件を変えることによって波長を変えることができます。たとえばヘリウムガスとネオンガスを混合したヘリウム-ネオンレーザーからは、通常は633nmの赤色の光が得られますが、鏡の性質を変えることによって緑や黄色、あるいは赤外光も出すことが可能です。アルゴンガスを使ったアルゴンイオンレーザーは、紫外から緑色までの範囲に10本以上の波長で発振します。レーザー鏡で構成する共振器の中に、プリズムを入れて望みの波長の光を取り出すことが可能な構造になったものもあります。また、半導体レーザーや色素レーザー

は、一般に広い波長範囲にわたって発振が可能なレーザーです。

4.2 出力パワー

レーザー光線の強さは出力パワーで計ります。出力パワーの単位としては、電気がする仕事の単位と同じワット (W) を使います。出力パワーとは、レーザーが出すことができる単位時間あたりのエネルギーと考えられます。すなわち、数式で書くと

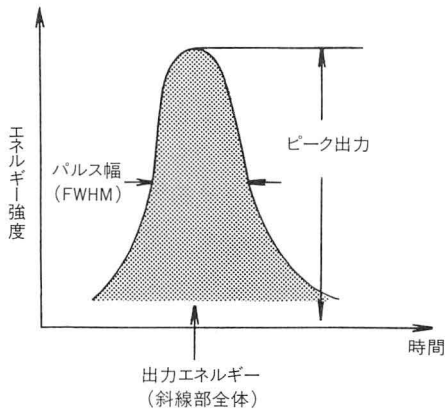
$$\text{パワー} = \text{エネルギー} / \text{時間}$$

となります。1 Wとは、1 秒間に1 ジュールのエネルギー割合として定義されます。

レーザーの出力パワーは、極めて大きな範囲にわたっています。小さなものではミリワット ($\text{mW} = 1 / 1000 \text{W}$) から、大きなものではキロワット ($\text{kW} = 1000 \text{W}$) まであります。ヘリウムネオンレーザーでは、数十mWを出すのがやっとですし、炭酸ガスレーザーでは数十kWなんて簡単にでせます。必要なパワーに応じてレーザーの種類を選ぶ必要があります。

4.3 パルス光と連続光

電球のように定常的に光を発しているレーザーもあれば、瞬間的に光を発するレーザーもあります。日常眼にするレーザーとしては、定常的なものの方が多くでしょう。これを「**連続発振レーザー**」と呼びます。一方、瞬間的に光を発するレーザーのことを「**パルスレーザー**」と言います。パルスレーザーの場合、光の発する時間と単位時間あたりの繰り返し回数が問題となります。パルス時間ないしはパルス持続時間では、ミリ秒 ($\text{ms} = 1 / 1000 \text{秒}$) からフェムト秒 ($\text{fs} = 1 / 1000,000,000,000.000 \text{秒}$) の広い範囲に及んでいます。パルスの繰り返し回数としては、装置の性能によりますが、1 秒間に数千回から数百万回が普通です。ところで、眼の応答速度は数十ミリ秒ですので、1 秒間に数十回を越える繰り返し回数のパルスは、人間の眼には連続光の様に見えます。上に述べたパワーとしては、エネルギーが同じであれば、パルス持続時間が短くなればなる程、ピークパワーが高くなります。最近のレーザー技術の進歩によってフェムト秒の極めて短いパルスの発生が可能に

図1-3 パルスレーザーの出力エネルギー²⁾

なったことで、極めて高いピークパワーを持ったパルスの発生が可能となりました。簡単に言えば、図1-3に示すように

$$\text{パルスエネルギー} = \text{ピークパワー} \times \text{パルス持続時間}$$

となります。言葉を変えて言えば、パルスの持つ全エネルギーは、図1-3の波形の面積に相当し、ピークパワーは頂点の光強度に相当することになります。

パルス発振レーザーの平均出力は

$$\text{平均出力} = 1 \text{ 秒間のパルス数} \times 1 \text{ パルスのエネルギー}$$

で与えられます。ピークパワーも平均パワーもレーザーにとっては重要なパラメータであり、レーザーの応用を考える際に必要な数値となります。ところで、パルスエネルギーはジュールの単位で計り、ピークパワーや平均パワーはワットで測りますが、互いの関係は

$$\text{ワット} = \text{ジュール} / \text{秒}$$

$$\text{ジュール} = \text{ワット} \times \text{秒}$$

であることは言うまでもありません。

4.4 ビームの大きさと発散角

レーザー光線（ビーム）は、目に見えないのが普通です。壁などに当たったところだけが明るい点のように見えます。図1-4のように電球の光はこのような光線のようには見えません。全体を明るく照らしている感じです。レーザー光線がときどき目に見えるようになることがあります。レーザー光線が横から見えるのは、レーザーが空気中のちりなどの微粒子の当たって、散乱された光を見ているのです。レーザー光線の中をじっと見ていると、ほこりが動き回っているのが見えます。レーザー光線は一本の線のようになっています。でも、この様なレーザー光線を遠くまで飛ばしてみると、遠くに行くにしたがってわずかですが大きくなっていることが分かります。手元にレーザーポインターがあれば、近くにある壁を照らしたときと、遠くにある天井などを照らしたときの光の大きさを比べてみてください。遠くに行くほどわずかに大きくなっていることが分かるはずです。このように遠くに行くほどわずかに大きくなっている光線の性質を“**発散**”と言います。発散の定義は、図1-5の様に、光線が広がっている角度の半分をもって、発散角と呼びます。レーザービームの発散角は極めて小さいのが普通ですので、発散角の単位としてはラディアン（rad）を使います。 θ radの発散角を持った光線が距離Dの

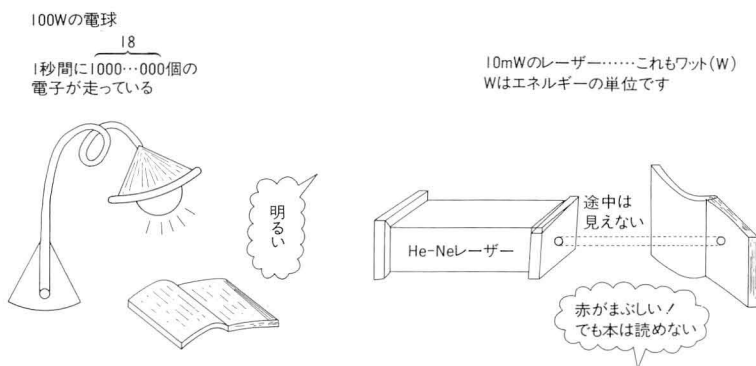


図1-4 電球とレーザー光線

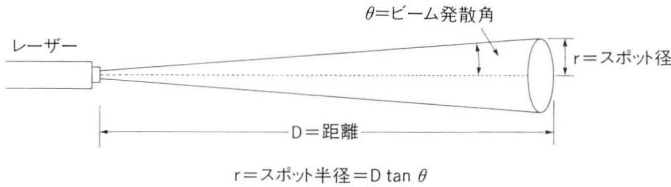


図1-5 レーザービーム発散角とスポット径

地点における光線の半径に相当するスポットサイズは

$$\text{スポットサイズ} = D \times \tan \theta$$

で与えられます。1 ラディアンは角度に直せば57.3度に相当し、360度は 2π ラディアンになります。例えば、2 ミリラディアン (mrad) の発散角を持つレーザー光線が10m離れた地点の壁に当たったとき、壁の上での光線の大きさは $10 \times 0.002 = 0.02\text{m}$ となり、光線の直径は0.04m、すなわち4 cmとなります。このように発散角が小さいことは、レーザー光線（ビーム）が一方向に向かって“線”のように進むことを意味しており、レーザーの持つ最大の特徴の一つです。

4.5 コヒーレンス

波の性質を表す言葉に、“コヒーレンス”と“インコヒーレンス”があります。図1-6に示すように、2つ以上の波の山と底がそろっている場合を、コヒーレンスを持つ波といい、逆に、そろっていない波をインコヒーレンスの波といいます。レーザー光はコヒーレンスを持ち、一方電球から出てくる光はインコヒーレンスな波です。コヒーレンスな波は重ね合わせることができますし、波の最大の特徴である干渉を起こすこともできます。当然、インコヒーレンスの波は、長距離にわたって重ね合わせたり干渉させたりはできません。

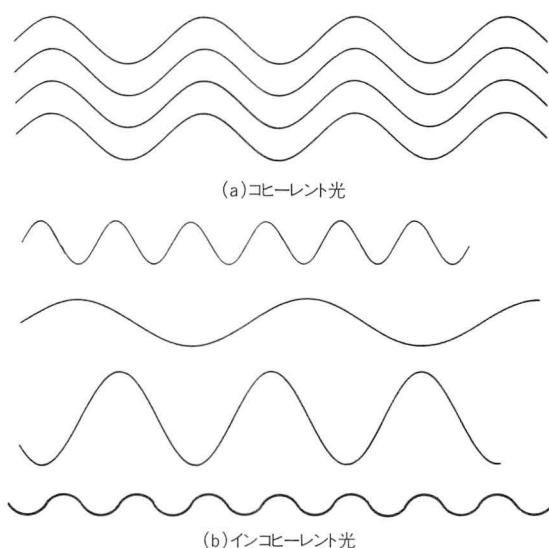


図1-6 コヒーレント光とインコヒーレント光

4.6 効率

レーザーは、波長、出力、コヒーレンス、パルス特性などによって特徴づけられます。もう一つのパラメータは**効率**です。電気エネルギーをつぎ込んでレーザー発振させる場合は、いくら電気エネルギーを入れて、どれだけの光エネルギーが得られるかという**効率**を問題にします。レーザーの効率は一般には高くはありません。普通の装置ですと0.01%から0.001%程度です。すなわち、1000Wの電力を入れると、0.1~0.01Wのレーザー出力を得ることができます。レーザーで得られる最大の効率は30%程度です。レーザーの出力がmW程度と低い場合は、効率はあまり問題になりませんが、例えば1kWのレーザー出力を得たい場合に、0.1%の効率でしたら、1MW（100万W）もの電力を入れなければなりません。当然、光にならない99万Wの電力は熱となって機器を傷めることになります。このような大出力のレーザーでは、

わずかな効率の差が大きな影響を与えることになります。

次章では、レーザーを理解する上でさけられない、原子の構造と光学に関するお話をしましょう。レーザーから出てくる光は、とりもなおさず原子や分子から出てきています。したがって、レーザーを理解するためには、原子や分子の内部構造を理解する必要があります。また、レーザーも光の一種ですから、光学の知識なしには理解できません。これからも幾度となく出てくる話題です。レンズや鏡などの光学は、レーザーにとって最も重要な話でもあります。

参考文献

1), 2) 大竹祐吉「レーザの使い方と留意点」(オプトロニクス社), p48, 53, 1993年