

まるわかり

レーザー原論

黒澤 宏 著



株式
会社

オプトロニクス社

まえがき

レーザーは、非常に純粋な周波数あるいは波長を持つ指向性が高く、高強度の光ビームを作りだし、場合によっては光を増幅するデバイスである。サイズから見れば、髪の毛の直径の十分の一から大きなビルの大きさまで、パワーで見れば、 10^9W の極小出力から 1020W の大出力まで、波長で見ればマイクロ波（あるいは、テラヘルツ波）から軟X線、周波数で見れば $10^{11}\sim 10^{17}\text{Hz}$ の広範囲に及ぶ特殊な光源である。光パルスを供給するパルスレーザーでは、 10^4J の高エネルギーパルス、 $5\times 10^{-15}\text{s}$ の超短パルスの発生も可能である。このようなレーザーは、世界中を駆けめぐっている光通信光源として、厚い鉄板に穴を空け、切断し、溶接したり、人間の目の手術に、そして核融合にも利用されている。しかも、まだまだ発展途上にあり、常に新しいレーザーが開発されているのが現状である。

このように極めて広範囲に利用されているレーザーであるが、わずか50年間の間の出来事である。そこで、光はどこから、どのようにして産まれる（光源）、光はどのように伝わる（伝搬）、光はどうやって操る（制御）、光をどうやって見る（検出）、そして光をどのように使う（応用）について、日頃疑問に思っていることに答えるべく、光の中でも、最も扱いやすいレーザー光を中心にこの本を書いた。予想より大部になったため、光学のみ、レーザーのみ、応用に関する部分だけでも読み進めることができるように、下記の三部に分けた。

- I 部 レーザーを理解するための光学入門
- II 部 レーザーの原理入門
- III 部 レーザー光を操る・測る・使う技術

レーザー光に関する光学の原理、レーザーの仕組み、レーザー光の制御技術とその応用について、この本を一冊読めば、一通りの知識が身につくことを願っている。時には数式がたくさん出てくるので、難しく感じられるかもしれない。数学は、あくまでも道具であって、それに惑わされることなく、

最終結果だけでも理解していただきたい。レーザーを深く理解して、うまく使って、新しい世界を開いていただきたい。

最後に、2009年4月号から24回にわたって月刊オプトロニクスに「原点に戻って学ぶレーザー原論」として連載してきた記事を基にして、この本を刊行することになった。(株)オプトロニクス社編集部三島慈弘氏、杉島孝弘氏には、連載原稿をていねいに見ていただいた。単行本をつくる際には、宮崎尚樹氏に原稿の隅々まで目を通しなおしていただいた。この人たちに加えて、(株)オプトロニクス社の上野直樹社長および川尻多加志編集長の叱咤激励がなければ、刊行はおぼつかなかったと思う。ここに記して深謝したい。

2011年4月 黒澤 宏

目 次

序章 レーザーの科学入門	1
1. レーザーの歴史	1
2. 光（電磁波）と原子	4
3. 世界最初に発振に成功したルビーレーザー	6
4. 世界最初に連続発振したヘリウムネオンレーザー	9
5. レーザービームの性質	10
第 I 部 レーザーを理解するための光学入門	15
第 1 章 電磁波としての光	16
1. 電場とは	16
2. 磁場とは	19
3. 電場と磁場	20
4. 電磁波の発生	23
5. 電磁波のエネルギー	28
第 2 章 波の重ね合わせ	31
1. 平面波の表わし方	31
2. 電磁波は平面波	36
3. 波の重ね合わせ	40
第 3 章 フーリエ変換	46
1. 周期を持つ波形のフーリエ級数展開	46
2. 周期を持たない波形のフーリエ積分	48
3. 時間的なパルス波形のフーリエ展開	53
4. 波束の表現	55
第 4 章 物質中の光の伝搬 —波としての反射と屈折—	58
1. 物質と光	58
2. 光電場と原子内電子の振動運動	59

3. 原子からの二次光の発生	62
4. 原子による光の散乱	64
5. 物質中の光の透過	67
6. 反射と屈折	71
第5章 電磁気学から見た光の反射と屈折	76
1. 偏光	76
2. 電磁気学から見た反射と屈折	81
3. 電磁気学から見た反射と屈折 (電場ベクトルの方向と振幅に関する境界条件から)	83
3.1 p偏光の振幅係数	83
3.2 s偏光の振幅係数	85
3.3 空気とガラスの界面における反射と屈折 (空気からガラスに入射する場合)	87
3.4 空気とガラスの界面における反射 (ガラスから空気に入射する場合)	91
4. エネルギーの流れ(反射率と透過率)	94
第6章 光の干渉	97
1. 干渉縞	97
2. 複スリットによる干渉(波面分割二光束干渉)	100
3. 薄膜の干渉(振幅分割二光束干渉)	102
4. 多光束干渉(ファブリーペローエタロン)	104
5. 多層膜干渉(反射防止膜, 多層膜鏡)	109
第7章 波の回折	113
1. 回折とは	114
2. フラウンホーファー回折	116
2.1 単一スリットによるフラウンホーファー回折	116
2.2 円形開口による回折と分解能	122
2.3 複スリットによるフラウンホーファー回折	124
2.4 回折格子	126
3. フレネル回折	129

第Ⅱ部 レーザーの原理入門	133
第8章 原子のエネルギー状態と光の吸収・放出	134
1. 電子について	134
2. 電子のエネルギー準位	136
3. 原子のエネルギー状態と遷移	140
4. 原子と光の関係	146
第9章 光の増幅とレーザー発振	148
1. 原子のエネルギー準位と共鳴周波数	148
2. 自然遷移と誘導遷移	150
3. 3準位レーザーと4準位レーザー	155
4. 光の増幅と利得	158
5. レーザー発振	160
第10章 レーザー共振器	164
1. レーザービームを作る	165
2. 共振器の共鳴（縦モード）	167
3. レーザービーム内強度分布（横モード）	169
4. 種々の共振器構造	171
5. コヒーレンス	174
第11章 連続発振とパルス発振	179
1. パルス光の性質	180
2. パルスの時間幅と周波数スペクトル幅	183
3. Qスイッチ発振	184
4. モード同期	186
5. 単一周波数発振	194
第12章 ガスレーザー	195
1. ガスレーザーの基本	199
2. 原子ガスレーザー	203
3. 炭酸ガス (CO ₂) レーザー	205
3.1 振動一回転準位	205
3.2 炭酸ガスレーザー	208

4. エキシマレーザー (フッ素レーザーを含む)	210
5. その他のガスレーザー	211
第13章 固体レーザー	213
1. 固体レーザー材料	213
2. 光ポンピング	216
3. ネオジウムレーザー	220
3.1 ルビーレーザー	221
3.2 ネオジウムレーザーの動作と母材	222
3.3 応用に向けたネオジウムレーザー	223
4. チタンサファイアレーザーに見る波長可変レーザー	225
5. ファイバーレーザー	229
第14章 半導体レーザー	233
1. エネルギーバンド構造	233
2. 半導体からの発光 (再結合)	241
3. LEDとレーザー	246
4. レーザーの基本構造	248
5. 半導体レーザーの発光	251
5.1 端面発光レーザーの構造	253
5.2 面発光レーザーの構造	255
5.3 量子井戸レーザーと量子カスケードレーザー	257
6. 結晶成長法	261
7. 各種半導体レーザー	263
第Ⅲ部 レーザー光を操る・測る・使う技術	269
第15章 レーザー光を操る技術入門	270
1. 光電場の振幅と位相	270
2. 結晶中を伝搬する光波	274
3. 電子の非線形振動による非線形光学効果	277
第16章 二次非線形光学効果	283
1. 非線形光学効果とは	283
2. 二次非線形光学過程	285

2.1	第二高調波発生	285
2.2	和周波発生と差周波発生	287
2.3	光パラメトリック発振	291
2.4	非線形光学結晶	293
3.	位相整合	293
3.1	非線形分極波と波長変換波	293
3.2	位相整合	297
3.3	擬似位相整合 (Quasi-Phase Matching: QPM)	300
第17章 三次非線形光学効果		304
1.	三次非線形光学過程	304
2.	非線形屈折率	307
3.	自己集光	308
4.	位相共役	309
5.	非線形光学過程とパルス圧縮	314
5.1	自己位相変調	315
5.2	群速度分布	318
5.3	パルス圧縮	320
第18章 非パラメトリック非線形光学過程		322
1.	過飽和吸収	322
2.	二光子吸収	326
3.	誘導光散乱	327
3.1	光散乱入門	328
3.2	誘導ラマン散乱	330
3.3	誘導ブリルアン散乱	335
第19章 外部信号によるレーザー光の制御技術		338
1.	偏光	338
2.	電気光学効果	341
3.	磁気光学効果	347
3.1	磁性体とは	347
3.2	磁気光学効果	348
4.	音響光学素子	353

第20章 レーザー光を測る	357
1. 何を測るか	357
2. 光電効果	360
3. 光電子倍增管 (PMT) とマイクロチャンネルプレート	361
4. 固体センサー	364
4.1 フォトダイオード	364
4.2 固体イメージセンサー	369
5. 熱型光検出素子	374
5.1 熱電対とサーモパイル	374
5.2 焦電 (パイロ) 素子	375
5.3 ボロメーター	377
第21章 低パワーレーザーを使う	378
1. 低パワーレーザー	378
2. レーザーで情報を読み取る, 書き込む	380
3. レーザーで距離, 速度を測る	386
4. ホログラフィー	389
第22章 高パワーレーザーを使う	394
1. 高パワーレーザー	394
2. 工業におけるレーザー応用	395
3. 医療分野におけるレーザー応用	401
4. 高出力レーザー核融合への応用	404
5. 新しいレーザーへの挑戦	406
5.1 高エネルギーレーザーへの挑戦: ペタワットレーザー	408
5.2 短いパルスへの挑戦: アト秒パルス	409
5.3 短い波長への挑戦: X線レーザー	410
5.4 自由なパラメーターを持つ新しいレーザーへの挑戦: X線自由電子レーザー	412
あとかき	415
索引	418

序章

レーザーの科学入門

1917年にアインシュタインが発表した「誘導放出の可能性」の論文に端を発し、それからおよそ40年以上経った1960年にレーザーが発明された。それまでの光と言えば、太陽からの自然光か、ガス灯、電球、蛍光灯などの人工的な光であった。どちらも、原子の中の電子が持っている余分なエネルギーが光として放出されたものである。では、レーザーとこれらの光とどこが違うのか？ 一般的には、レーザー光は広がらない（指向性）、なめらかな（コヒーレンス）、鮮やかな（単色性）、そして輝く（高輝度）光である。しかしながら、レーザー光の持つ最も大きな特徴は波動としての「光の制御性」である。光波の振幅、パワー、波長、位相、周波数、偏光を人為的に操ることができることである。ラジオやTVの放送あるいは携帯電話などには電波が使われている。音声や画像の信号を電波に乗せて遠くまで運び、家庭などで再現している。この電波と同じことを光でできるようになったのがレーザーの発明に始まる。太陽の光や電球ではこれができない。このように便利な光であるレーザーの基礎と実用を中心に、光の発生、性質、物質との係わり、そしてレーザー光を自在に操る技術の基礎である非線形光学について勉強する。読んで、理解して、興味を持つことに主眼を置いて書いてある。原点に戻ってレーザーの科学、そして光の原理からレーザー光を操る技術までを第一歩から勉強するつもりで読んで欲しい。

1 レーザーの歴史

LASERを英語で書くとLight Amplification by the Stimulated Emission of

Radiationである。この言葉がレーザーそのものを的確に説明している。そこで、この言葉の意味を後ろから順に見ていこう。Radiation（放射）は、電磁波のことであり、光速で伝搬する質量を持たないエネルギーのかたまりのことである。可視光、赤外、紫外、ラジオ（電波）波、マイクロ波、X線を含む多様な形で現れる。光ないしは他の形式の電磁放射は波と粒子（光子と呼ばれる）の両方の性質を持っている。Stimulated Emission（誘導放出）は、レーザー光が特別な方法で作られたものであることを示している。通常、原子（ないしは分子）は電磁放射によって自然にエネルギーを放出する。太陽、炎、蛍光灯などはすべて、光を放射することによって余分なエネルギーを放出している。しかしながら、ある場合には、原子や分子は光として余分なエネルギーを、外から入った電磁波によって強制的に電磁波として放出することがある。この過程が誘導放出と呼ばれている。Amplification（増幅）は、光の量が増えることを意味している。誘導放出においては、入射電磁波が原子や分子を刺激してそれらが持つエネルギーを、入射電磁波と完全に調和（整合）した第二の電磁波として放出する。誘導放出された電磁波は、他の原子を刺激して、最初と全く同じ性質の電磁波を作り、その結果、振幅が大きくなる増幅を受ける。Light（光）は、読んで字のごとしであるが、作り出された電磁放射の形式のことである。実際は、人間の目が感じる可視光だけでなく、波長が短すぎたり（紫外）、長すぎて目で見ることができない（感じる）電磁波も含まれる。

アルバート・アインシュタインが誘導放出の可能性について最初に書いた論文が1917年である。誘導放出が最初に観測されたのは1920年代であるが、自然放出の方がはるかに起こりやすく、そのために誘導放出は、はるかに弱いものであると、物理学者は長い間考えていた。誘導放出がより強いものになり得る最初のヒントは、第二次世界大戦直後のラジオ波での実験であるが、鍵となる実験は1950年代になってからである。当時コロンビア大学に在籍していたチャールズ・タウンズは、1951年にマイクロ波周波数において誘導放出を作り上げる方法について想像をめぐらしていた。彼のアイデアは、過剰なエネルギーを持つアンモニア分子を分離し、アンモニア分子から放出されたマイクロ波を反射する共振器中をこのアンモニア分子を通過させたときに、それに刺激されてある特定のマイクロ波周波数で過剰なエネルギーを放出するというものである。彼は、この装置を「メーザー（MASER）」と呼んだ。その言葉は、Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiationの

頭文字をとったものである。タウンズと彼の学生であったジェームズ・ゴードンは1954年までメーザーの実験を続け、この装置が増幅器としても発振器としても働くことを見いだした。あるアンモニア分子は24 GHzの周波数でマイクロ波を自然に放出し、この自然放出マイクロ波が他の励起されたアンモニア分子を刺激して同じ周波数のマイクロ波を放出し、その周波数で振動している信号を増幅する。言い換えれば、24 GHzの信号はアンモニア分子を刺激して24 GHzの周波数でマイクロ波を放出し、信号を増幅する。原理的には、正しい材料が見つかったら、このメーザー過程は他の電磁波にも拡張可能であることは明らかであり、次の目標は、当然光の波長であり、多くの研究者がそれに挑戦した。タウンズは、1957年にその研究を開始した。当時、コロンビア大学の大学院生であったゴードン・グールドは、学位取得の研究の中で、光ポンピングという重要かつ新しいアイデアを持っていた。タウンズはグールドと話し合ったときに、レーザーにおける原子を励起するために光ポンピングを利用しようと考えたが、このレーザーのアイデアはグールドの好奇心をそそった。タウンズは彼の義理の兄弟であるアーサー・シャロウに協力を求めた。当時、シャロウは光の誘導放出をいかにして増幅するかについての仕事をしており、光学について深い造詣があった。しばらくして、グールドもこの問題に挑戦しはじめた。彼らは別々に同じ問題に取り組み、両端にミラーが置かれた円筒形レーザー共振器を提案した。光はこのミラー間を往復し、その間に光が増幅される。グールドはこのアイデアを特許出願し、一方のタウンズとシャロウは科学雑誌であるPhysical Review Lettersに論文を投稿した。タウンズはメーザーとレーザーの原理を実証した研究によって、ソ連のアレキサンダー・プロコロフ、ニコライ・バゾフと共に1964年のノーベル物理学賞を受け、一方でグールドは特許によって大金を手に入れた。しかしながら、最終的なレーザー競争の勝者はテオドル・メイマンであり、彼は1960年5月16日にカリフォルニア州マリブにあったヒューズ社の研究所において手の指サイズの合成ルビー結晶からレーザーパルスを発生させることに成功した。

円筒形のルビーを写真用のフラッシュランプからの高輝度光で照射することによってルビー内のクロムイオンを励起する。いくつかの励起されたクロムイオンから自然放出光が得られ、この光が他の励起クロムイオンを刺激して、同じ光波として励起原子が持っている余分なエネルギーを放出する。ルビーロッドの両端に施された銀膜が鏡として働いて共振器を構成し、光波を

往復させ、クロムイオンからのさらなる光を誘導し、赤色光を増幅する結果、光線を形成する。レーザービームは、一方の銀膜に開けられた小さい穴を通して取り出した。レーザー光は694 nmの単色光であり、コヒーレント光であった。メイマンのルビーレーザーはパルス発振であったが、その直後の1961年2月に、アリ・ジャバンは同僚であるベネット、ヘリオットと共に1152.3 nmで連続発振するヘリウムネオンレーザーを発表した。

2 光（電磁波）と原子

レーザーは原子が直接関与する装置であり、その基本は量子力学である。野球のボールから人工衛星、さらには地球に至るまで、その運動はニュートンの運動方程式にしたがう。日食の予測も人工衛星の軌道予測もこの運動方程式にしたがって計算できる。ところで、光が関与するのは原子であり、その中でも原子の中の電子である。原子の構造を見てみよう。我々が想像できる範囲で原子をイメージすると、図1のようなになるであろう。このような模型は筆者が勝手に考えたのではなく、多くの学者が想像したものである。中央に中性子と陽子からできている原子核があり、その周りを電子が取り囲んでいる。電子は負電荷を持っており、陽子の持つ正電荷と釣り合って全体と

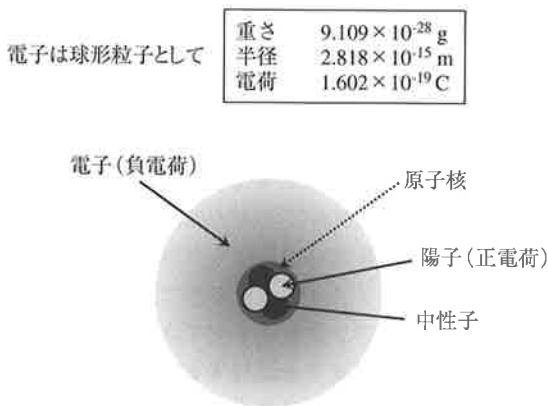


図1 原子の構造（中性子と陽子（正電荷）を中心にして電子（負電荷）が周りを取り囲む）

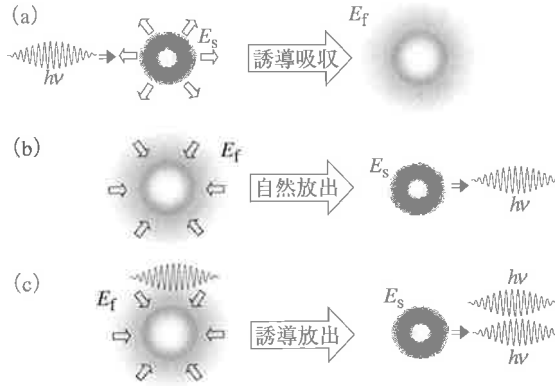


図2 原子と光（原子による光の吸収）

してみれば中性を保っており、なおかつ電荷間に働くクーロン引力によって電子が原子の中に閉じ込められている。このような電子の状態やエネルギーについては次章以降に譲るとして、ここでは、この模型からスタートしよう。なお、このように小さい原子や電子はニュートンの運動方程式にしたがうはずもなく、かつ直接見たことがある人もいないので、想像するしかないのであるが、原理的にはニュートン力学ではなく量子力学にしたがって運動する。その存在は統計的に確率としてしか明らかにできない。

このような原子に光が当たると、原子の中の電子が光からエネルギーをもらってエネルギーを蓄えた状態になるであろう。その状態を図2 (a) のように描いてみる。電子がエネルギーをもらって幾分ふくらんだ形に見える。次に、このエネルギーの高い状態にある原子は、図2 (b) のようにその余分のエネルギーを放出して元のエネルギーの低い状態に戻る。このエネルギーを光の形で放出すると、その原子が光って見える。原子と光の関係は、もう一つある。高いエネルギー状態にある原子に光が当たると、その光に刺激されて原子が余分のエネルギーを光として放出する。この過程を図2 (c) に描いてあり、「誘導放出」と呼んでいるが、(a) の吸収も外からの光によって発生するので、あえて「誘導吸収」と呼ぶこともある。レーザーはこの誘導放出過程を利用したものであり、この原理については次章以降に勉強するとして、ここでは大まかな話をしよう。ただ、誘導放出の特徴は、入射した光と同じ周波数（波長）、同じ「位相」、同じ「偏光」、同じ方向に進む波を出すことで