

# 工科系学生のための 光・レーザ工学入門

博士(工学) 中野 人志 著

コロナ社

# まえがき

レーザーはトランジスタと並び 20 世紀最大の発明の一つとして位置づけられている。今日までの性能向上に関する継続的な技術開発により、レーザーは、CD、DVD、ディスプレイなどの家電製品、バーコードリーダなどの情報処理、インターネットなどの光通信、レーザーメス、眼科治療などの医療、そしてレーザー切断、溶接など、産業界のさまざまな分野において応用されるに至った。レーザーはわれわれの生活に身近な「ツール」としての地位を確立しており、さらにその優れた性能を十分に引き出して応用範囲を広めるための研究が各所で精力的に行われている。

本書は、工科系の学部・学科で学ぶ学生を対象とした光・レーザーに関わる入門書である。工科系の技術者は、近年の光・レーザー・エレクトロニクス・メカニクスの融合によって開発された各種機器類の本質的な動作原理や適用範囲などについて理解を深める必要がある。レーザー動作における物質内部の原子・分子のミクロな運動は量子力学によって理解できるが、外部に取り出されるのは古典的なマクロな量の光（電磁波）である。本書は量子力学による説明を避け、レーザーをツールとして活用するための必要最低限の項目に絞って記述されている。光・レーザーを用いた最先端技術に接する際の予備知識との位置づけでもあり、読者の興味に応じて積極的に関連の文献などでさらに勉学に励む姿勢を望んでいる。

また、演習問題の解答はコロナ社の Web ページ<sup>†</sup>にあるので是非活用していただきたい。

本書の執筆に際し、多数の関連文献、既存のテキストなどを参照した。また、近畿大学理工学部の吉田 実教授には有益なコメントを多数いただき、図表の作成、編集には田中美憂氏に多大なる協力を得た。ここに感謝を申し上げる。

2016 年 8 月

中野 人志

---

<sup>†</sup> <http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339008890/>

# 目 次

## 第 1 章 光の基本的性質

1-1 波動としての光の性質	1
1-1-1 光の直進	3
1-1-2 光の反射・屈折	4
1-1-3 全反射	6
1-1-4 干渉・回折	7
1-1-5 ヤングの実験	9
1-1-6 偏光	11
1-1-7 散乱	16
1-2 粒子としての光の性質	18
1-2-1 黒体放射のスペクトル	19
1-2-2 光電効果	22
1-2-3 物質波	23
1-2-4 コンプトン効果	24
1-2-5 不確定性原理	25
1-3 光と電子の相互作用	27
1-3-1 エネルギー準位	30
1-3-2 光の吸収と放出	31
演習問題	33

## 第 2 章 光 源

2-1 熱放射	34
2-1-1 白熱電球	34

2-1-2 太陽光	35
2-2 電子の準位間遷移による光放射	36
2-2-1 放電管からの発光	36
2-2-2 発光ダイオード	40
演習問題	49

## 第3章 レーザ

3-1 レーザ開発の歴史	50
3-2 レーザの基本的性質	53
3-2-1 指向性	53
3-2-2 単色性	54
3-2-3 可干渉性	55
3-3 レーザの原理	57
3-3-1 自然放出と誘導放出	58
3-3-2 反転分布	61
3-3-3 光増幅器の利得	64
3-3-4 利得飽和	66
3-3-5 レーザ発振と光共振器	67
3-3-6 光共振器と縦モード	69
3-3-7 レーザの発振条件	71
3-3-8 光共振器から出力されたレーザー光の性質	72
3-3-9 光共振器と横モード	73
3-3-10 球面ミラーによる光共振器	75
3-3-11 ガウスビームの伝搬	75
3-4 レーザの基本構成	78
3-5 レーザ媒質の励起方法	79
3-5-1 放電励起	79
3-5-2 光励起	80
3-5-3 電流による励起	81

演習問題	81
------	----

## 第4章 レーザ光の特性評価

4-1 連続発振とパルス発振	83
4-2 レーザの特性評価	84
4-2-1 レーザ出力（パワー，エネルギー）の評価	84
4-2-2 パルスレーザにおける平均パワー	85
4-2-3 パルスレーザにおけるピークパワー	86
4-2-4 パワー密度	87
4-2-5 レーザ出力の測定方法	88
4-2-6 レーザの集光特性評価	89
4-2-7 レーザ集光径の測定方法とビーム品質の評価	91
演習問題	92

## 第5章 各種レーザ

5-1 気体レーザ	94
5-1-1 He-Ne レーザ	95
5-1-2 Ar <sup>+</sup> レーザ	96
5-1-3 CO <sub>2</sub> レーザ	97
5-1-4 エキシマレーザ	98
5-2 固体レーザ	99
5-2-1 Nd:YAG レーザ	100
5-2-2 Nd:Glass レーザ	101
5-2-3 Ti:Sapphire レーザ	103
5-2-4 Cr:Sapphire（ルビー）レーザ	104
5-3 液体レーザ	105
5-3-1 色素レーザの構成例	105
5-3-2 色素レーザ	106

5-4 半 導 体 レーザ	108
5-4-1 半導体レーザーの基本構造	108
5-4-2 代表的な半導体レーザー	110
5-5 ファイバレーザー	110
5-5-1 光ファイバ	111
5-5-2 ファイバレーザーの特長	113
5-6 X 線 レーザ	114
5-6-1 X 線	114
5-6-2 X線レーザーの構成	115
5-7 自由電子レーザー	116
5-7-1 制動放射	116
5-7-2 自由電子レーザーの構成	117
演 習 問 題	118

## 第6章 レーザ制御

6-1 光共振器内部でのレーザー制御	120
6-1-1 Qスイッチング	121
6-1-2 モード同期	127
6-1-3 パルス幅の変調	129
6-2 光共振器外部でのレーザー制御	130
6-2-1 レーザ光の進路変更	130
6-2-2 レーザ光の集光	131
6-2-3 レーザ光の結像	132
6-2-4 アラインメント	134
6-2-5 レーザ光の空間フィルタリング	135
6-2-6 レーザ光の偏光制御	136
6-2-7 レーザ光のパワー制御	138
6-2-8 レーザ光の高調波変換	139
6-2-9 チャープパルス増幅	142

演習問題	143
------	-----

## 第7章 レーザの応用

7-1 光ディスクによる情報の再生・記録	144
7-2 レーザ計測	145
7-2-1 指向性の利用	145
7-2-2 可干渉性の利用	147
7-3 光通信	149
7-3-1 伝送損失	149
7-3-2 高速・大容量光通信	150
7-4 照明	151
7-5 レーザ加工	152
7-5-1 レーザ加工の基本的な考え方	153
7-5-2 レーザ熱加工	155
7-5-3 レーザアブレーション	157
7-6 レーザ核融合	159
演習問題	160
引用・参考文献	162
索引	163

# 第 1 章

## 光の基本的性質

「光」といえば、多くの人はわれわれの生活に身近な「電球」「蛍光灯」などの照明器具を思い浮かべるようである。太陽光、テレビから出る光、夜空を彩る花火の光、焚き火の光など、われわれは光に囲まれて日常生活を送っている。光は、原子や分子から放たれた電磁波であり、テレビ・ラジオ放送や携帯電話の電波と本質的には同じ波動である。また、光は、光子と呼ばれる粒子をエネルギーの基本単位とした、粒子としての性質も有している。この章では、イントロダクションとして、光の本質を理解するために必要な光の波動性・粒子性についての基本的事項について説明していく。

### 1-1 波動としての光の性質

光は物質とエネルギーのやり取りを行う場合は粒子性を示すが、真空中、空气中、水中など、光にとって透明な物質中を伝搬するときは波動性を示す。

光は**電磁波** (electromagnetic wave) の一種であり、**Fig. 1-1** に示すように、電界と磁界が振動しながら空間を伝搬する横波である。電磁波の基本形は**正弦波** (sinusoidal wave) であり、光も正弦波として扱うことができる。光が真空

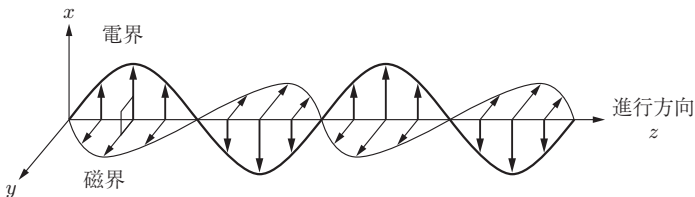


Fig. 1-1 伝搬する電磁波



## 2 1. 光の基本的性質

中を伝搬するときの速さは一定であり

$$2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

の大きさをもつ。 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$  (1秒間に約30万km)と記憶しておいて問題ない。光の速さ(光速)と波長および振動数との間には高等学校で学ぶ

$$c = \nu \lambda \quad (1-1)$$

のよく知られた関係がある。ここで、 $c$ は光速、 $\nu$ は振動数(あるいは周波数)、 $\lambda$ は波長である。

光を透過させる物質のことを**媒質**(medium)という。真空、空気、ガラス、結晶、プラスチック、水などはすべて媒質の一種である。媒質中の光速は真空中よりも遅い。媒質中の光伝搬においては振動数 $\nu$ が不変であり、 $\lambda$ のほうが変わっている。光の性質は振動数 $\nu$ を用いて議論するのが本質的であると思われるが、一般には波長で説明されている現象も多い。

電磁波にはさまざまな波長あるいは振動数をもつものがあり、**Fig. 1-2**に示すように、さまざまに呼称されている。われわれが一般に光と認識しているのは、視覚を生じる波長 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ の電磁波である。この範囲の電磁波を**可視光**(visible light)と呼んでいる。可視光では、波長の違いを色の違いとして視覚することができる。波長の長いほうから、赤・橙・黄・緑・青・藍・紫(せき・とう・おう・りよく・せい・らん・し)の順の色になる。よく知られた虹の七色である。

可視光の代表的なものとして太陽光、蛍光灯からの光、白色発光ダイオード(LED)からの光などが挙げられるが、これらは虹の七色ではなく、白く感じられる。白く感じるこれらの光を**白色光**(white light)という。さまざまな波長の光、つまりさまざまな色の光が混じり合うことで光は白色に見えるようになる。光と呼ばれる波長範囲は可視光域にとどまらないが、境目は定まっておらず、おおむね波長 $0.1 \mu\text{m}$ の真空紫外領域から波長 $10 \mu\text{m}$ 程度までの赤外領域とされている。

放出と呼ばれる現象について知る必要がある。

### 3-3-1 自然放出と誘導放出

物質は多数の原子で構成されており、おのおのの原子が複数のエネルギー準位に分布している。原子や分子における電子のエネルギー状態は離散的であり、これをエネルギー準位図として模式的に表すことはすでに述べた。話を単純化するため、上準位  $E_2$  と下準位  $E_1$  という二つのエネルギー準位のみをもつ原子について考察してみる。

光の吸収と放出は、1-3-2 項で述べたように、エネルギー準位  $E_1$ ,  $E_2$  においてボーアの振動数条件、すなわち

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (3-5)$$

に従って原子が遷移する際に起こる現象のことである (Fig. 3-4)。

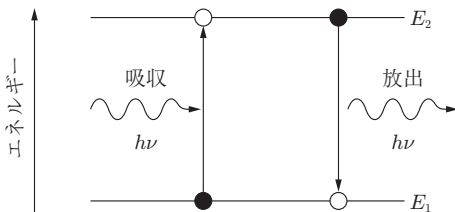


Fig. 3-4 光の吸収と放出

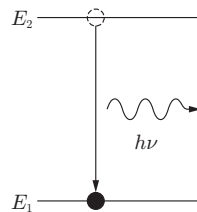


Fig. 3-5 自然放出による光放出

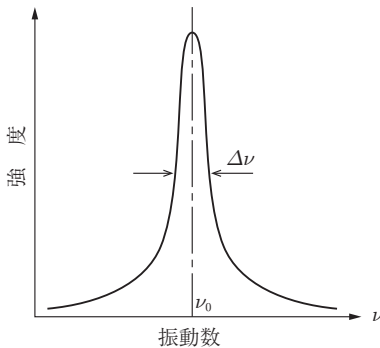
外部から  $E_2$ ,  $E_1$  のエネルギー差に相当する  $E_2 - E_1 = h\nu$  の光を入射すると、 $E_1$  にある原子は光に共鳴してそのエネルギーを吸収し  $E_2$  に励起される。これを吸収と呼ぶことは 1-3-2 項で述べたが、吸収は原子と共鳴する特定の波長 (振動数) において生じる現象であり、その度合いは入射される光子数に比例する。入射された光子は吸収によって消滅するが、消滅した光子が有していたエネルギーを原子は獲得する。励起準位  $E_2$  にある原子は一般に不安定であり、短時間で安定な準位である  $E_1$  に移ろうとし、このときに吸収で得たエネルギーに応じた光を放出する。この場合の光放出は偶発的に生じることから自

**自然放出** (spontaneous emission) と呼ばれている (**Fig. 3-5**)。自然放出による光は、無数の電子励起された原子・分子から無秩序に放出されるため、位相が揃っておらず、コヒーレンスは低い。

自然放出は  $E_2 - E_1 = h\nu$  の発光のため、そのスペクトルは単一の線スペクトルになると考えられる。しかしながら、実際の物質では原子や分子が  $E_2$  の上準位に留まる時間が有限であり、不確定性原理により、エネルギー  $E_2$  の値が不確定となり、自然放出光のスペクトル線は幅をもつことになる。このスペクトル線の広がりはずべての原子・分子について同一であるため**均一広がり** (homogeneous broadening) と呼ばれ、以下に示すローレンツ形のスペクトル形状を有する。

$$f(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2\pi \left[ \left( \frac{\Delta\nu}{2} \right)^2 + (\nu - \nu_0)^2 \right]} \quad (3-6)$$

ここで  $\Delta\nu$  はスペクトルの半値全幅、 $\nu_0$  は発光の中心振動数である。ローレンツ形のスペクトルは **Fig. 3-6** に示すような形状となる。



**Fig. 3-6** ローレンツ形の光スペクトル

励起状態の原子が下準位に遷移するまでの時間を**緩和時間** (relaxation time) あるいは**平均寿命** (life time) という。緩和時間は物質の種類、励起準位などでさまざまな値となり、さらに同じエネルギー準位中の原子は無数にあると考えられるので、確率的に表されることもある。緩和時間の逆数を  $E_2$  から  $E_1$  への**遷移確率** (transition probability) という。

### 3-3-6 光共振器と縦モード

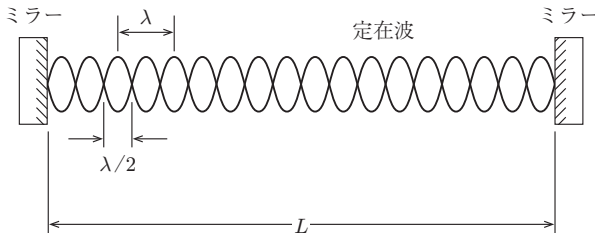
正のフィードバックを実現するには入力光の位相とフィードバック光の位相を一致させる必要がある。光共振器における二つのミラー間の距離を光の波長の整数倍 ( $n$  倍) とすれば、**Fig. 3-13** に示すように、光共振器中に**定在波** (standing wave) が立ち、入力光の位相とフィードバック光の位相が完全に一致する。光共振器の長さ (二つのミラー間の距離) を  $L$  とすると、光共振器内に存在できる定在波の振動数  $\nu$  は次式のように示すことができる。

$$\nu_n = \frac{c}{2L}n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3-24)$$

ここで  $c$  は光速である。式 (3-24) で示される振動数のことを**共振振動数** (resonance frequency) という。光共振器の内部には光増幅器が存在しているので、特定の振動数、位相の光のみが増幅される。2枚のミラーペアを「光共振器」と呼んでいるのは、ミラーペアで光を閉じ込めることによって、共振した特定の振動数、位相の光のみに対して増幅作用が生じることによる。共振振動数を波長で表現すると

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3-25)$$

となる。

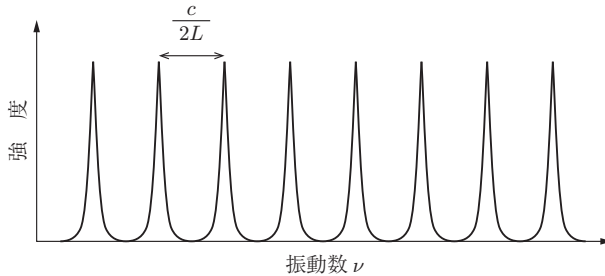


**Fig. 3-13** 光共振器中の定在波

式 (3-24) (および式 (3-25)) で示した振動数 (波長) の光のような離散的なスペクトル分布の形態を**縦モード** (longitudinal mode) と呼んでいる。縦モード間隔  $\delta\nu$  は

$$\delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (3-26)$$

と示される。**Fig. 3-14** に光共振器における共振周波数、縦モードを示す。



**Fig. 3-14** 光共振器の縦モード

光の波長は光共振器の長さ比べてきわめて短いので、通常、 $n$  は非常に大きな値となる。波長  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ 、共振器の長さ  $L = 1.0 \text{ m}$  として、 $n = 4.0 \times 10^6$  となり、光共振器には 400 万ほどの多数の共振振動数、つまり縦モードが存在することになる。しかしながら、誘導放出による光増幅は上準位と下準位のエネルギー差 ( $E_2 - E_1 = h\nu$ ) に相当する狭い振動数の利得範囲 (狭い波長の利得範囲) において生じるので、最終的にはその利得範囲のいくつかの振動数においてレーザー発振が生じる。**Fig. 3-15** にその様子を示す。この図においては、つぎの 3-3-7 項で述べる光共振器の損失も考慮されている。

複数の縦モードが同時に発振している状態は、レーザー動作において、発振周波数 (波長) が安定していないことを意味している。応用において、発振周波数の安定化が重要となる場合は、**単一縦モード** (single longitudinal mode) 発振実現のための工夫がなされる。その代表的な方法は光共振器内に周波数選択素子としての**エタロン板** (etalon plate) を挿入することである。エタロンは、一般に、**ファブリ・ペロー干渉計** (Fabry-Perot Interferometer) として知られており、分光用途などに広く用いられているものである。

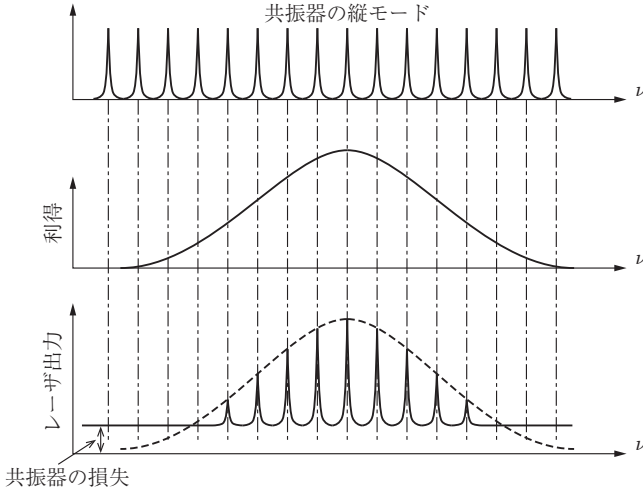


Fig. 3-15 レーザ発振における縦モード

### 3-3-7 レーザの発振条件

レーザー発振が安定に生じるには、光増幅器の利得が光共振器内部の損失を上回っていなければならない。出力光の取出しに部分反射ミラーが用いられており、これが光共振器内部における大きな損失となる。いま、光共振器を構成する部分反射ミラーの反射率を  $R$ 、もう一方のミラーの反射率が 100%であったとすると、光共振器からのレーザー出力  $I_o$  は、式 (3-23) より

$$I_o = \frac{(1 - R)G(\nu)}{1 - RG(\nu)^2} I_i \tag{3-27}$$

と示すことができる。ここで  $I_i$  は光共振器への光入力、 $G(\nu)$  は光増幅器の利得を示す。レーザーの発振条件は、式 (3-23) において  $G\beta \geq 1$  であるから

$$RG(\nu)^2 \geq 1 \tag{3-28}$$

となる。光増幅器の利得  $G(\nu)$  は、共振器の長さを  $L$  として、式 (3-19) より

$$G(\nu) = \exp[\alpha(\nu)L] \tag{3-29}$$

で与えられるから、これを式 (3-28) に代入すると

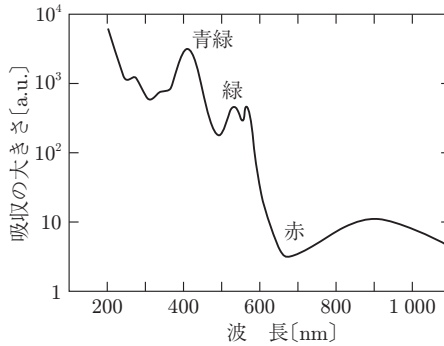


Fig. 7-9 血液の吸収スペクトル

いる。

Fig. 7-10 には水の吸収スペクトルを示している。可視光域の吸収が小さいのは水の透明性を示していることになるが、水は赤外域において水分子の振動に起因した強い吸収を有している。水は、赤外域では透明ではなく、吸収物質として作用するわけである。水を効率的に「加工」するためには、波長  $2\mu\text{m}$  以上の赤外光を照射すべきであることがわかる。

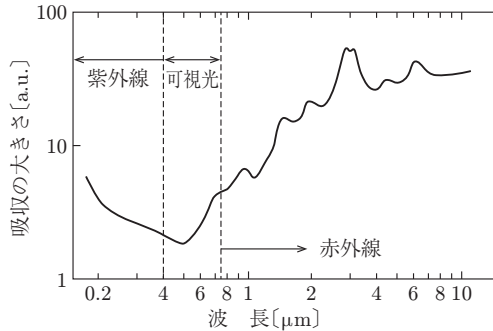


Fig. 7-10 水の吸収スペクトル

吸収されたレーザー光のエネルギーは非放射遷移によって熱に変換され、物体に作用する。したがって、レーザー加工は「熱加工」と位置づけることができる。レーザーの特長である指向性（集光性）を活かすと、局所的に物体に熱を与える

ことが可能となる。レーザー加工では、通常、CW レーザが用いられることが多いが、入熱の制御や適度な冷却時間を導入したい場合はパルスレーザーも用いられる。

### 7-5-2 レーザ熱加工

前項では液体における光吸収を例として示したが、実際のレーザー加工は固体に対して行われることが多い。Fig. 1-24 に示したように、レーザー光が固体物質に吸収されるとその固体を構成する原子が励起され、電子がエネルギー準位間を遷移する。レーザー照射によって、まずは原子系にエネルギーが与えられるのである。吸収されないレーザー光は表面反射、あるいは散乱で損失となる。励起された電子が非放射遷移で下準位に落ちると、そのエネルギーは固体中の格子振動を励起する。こうして原子系から固体にエネルギーが移乗される。格子振動のエネルギーは熱として固体中を伝わり、固体の表面温度を上昇させる。

熱は固体物質に固有の**熱放射率** (thermal emissivity) に従って放射されるので物質表面の温度は下がるが、放射されない残りは物質の**熱拡散率** (thermal diffusivity) に従って内部へと伝わり、物質内部の温度を上昇させる。到達温度は、熱放射によって失われるエネルギーとレーザー照射によって与えられるエネルギーのバランスによって決定される。これが物質の融点を超えると溶融が生じ、穴あけ、切断などの加工につながる。レーザー光による入熱を止めたり、表面をガスなどで冷却したりすれば凝固が起き、溶接となる。到達温度が融点以下であれば物質を熱処理（金属であれば焼入れ、焼きなましなど）することになる。

いずれのレーザー加工においても、到達温度を決めるのは、4-2-4 項で述べたレーザーのパワー密度（エネルギー密度）である。また、レーザーを照射する時間、パルスレーザーであればパルス幅など、望ましい加工を達成するためのパラメータは多種多様である。

代表的な金属材料のレーザー加工について例を挙げて考えてみる。**Fig. 7-11** に、銅、鉄、金、アルミニウムの可視から近赤外域における吸収スペクトルを



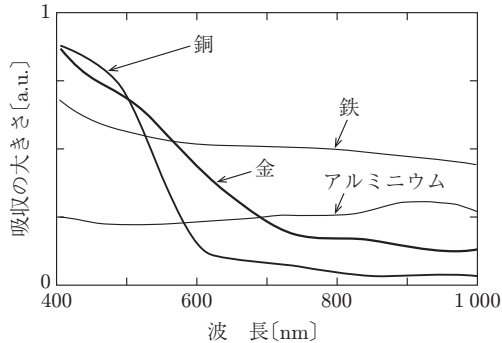


Fig. 7-11 銅、鉄、金、アルミニウムの吸収スペクトル

示す。この4種の金属の中でわれわれが「明確に」色を感じるのは銅および金である。吸収スペクトルを見ると、銅は青緑の可視光領域において強い吸収をもち、赤の領域での吸収は小さくなっている。これがわれわれには銅が赤く見える所以である。鉄およびアルミニウムに関しては、可視光域で特異な吸収帯が存在しない。白色もしくは銀色との表現が可能であろう。

いま、銅板に対するレーザー加工について考えてみる。銅の吸収スペクトルに着目すると、先に述べたように、青緑色の吸収が大きく、その近傍の発振波長をもつレーザーを利用・照射すべきであることがわかる。穴あけ・切断加工なのか溶接なのかなど、目的によってレーザーパワーを変えていくことになる。

このように、レーザー加工では、レーザー光の基本的性質を理解した上で、材料と加工形態に応じたレーザーを選択することが重要となる。レーザー加工には多種多様のパラメータがあり、要求される加工の質に対して、それらは精密に制御可能である。パラメータの代表例は、レーザー側ではレーザーパワー（エネルギー）、パルス幅、集光径、集光ビームの形状（ビームプロファイル）、パワー密度、レーザーを照射する時間、走査速度、繰返し速度などが挙げられる。材料側のパラメータとしては、材料の光吸収係数、熱伝導率、融点、沸点、表面形状・状態などである。

# 索引

## 【あ】

アクセプタ準位	44
アクセプタ不純物	44
アラインメント	135

## 【い】

イオン化エネルギー位相板	29 137
--------------	-----------

## 【え】

エキシマ	98
エキシマレーザ	99
液体レーザ	105
エタロン板	70
エネルギー準位	30
エネルギー準位図	32
エネルギーバンド	41
円偏光	14

## 【お】

音響光学効果	124
--------	-----

## 【か】

開口数	112
回折	3
回折角	9
回折限界径	91
ガウスビーム	76
可干渉性	55
拡散電位	46
カー効果	124
可視光	2
価電子帯	41
可飽和吸収	124

干渉	3
干渉縞	10
慣性閉じ込め核融合	159
緩和時間	59

## 【き】

幾何光学	3
寄生発振	103
気体レーザ	94
基底準位	32
基底状態	30
希土類	99
逆方向電圧	48
吸収	31
吸収係数	66
球面波	8
共振器	68
共振振動数	69
均一広がり	59
禁制帯	41
禁制帯幅	41

## 【く】

空間コヒーレンス	55
空間コヒーレンス領域	57
空間周波数	135
空間フィルタ	135
空乏層	46
屈折の法則	4
屈折率	5
クラッド	111
繰返し率	86

## 【け】

蛍光体	151
-----	-----

## 【こ】

コア	111
光化学的効果	158
光学	3
光学濃度	138
光学部品	5
光子	21
光子エネルギー	21
光線	3
光線行列	133
高調波変換	139
光電効果	21
光電子増倍管	88
光量子仮説	21
黒体	19
黒体放射	19
コヒーレンス時間	56
コヒーレンス長	56
コヒーレント光通信	151
コントラスト	57
コンプトン効果	24
コンプトン散乱	24

## 【さ】

再結合	43
-----	----

## 【し】

時間コヒーレンス	55
色相環	153
色素レーザ	105
指向性	53
自己収束	142
仕事関数	22
自然放出	58

自然放出増幅光	116
自由電子レーザ	116
周波数チャープパルス	143
充滿帯	41
受動的 Q スイッチング	125
受動的モード同期	128
主発振器出力増幅器方式	102
主量子数	28
準安定準位	60
順方向電圧	48
焦点距離	132
衝突励起	80
浸入長	157

【す】

スネルの法則	6
スペクトル	19

【せ】

正弦波	1
正孔	42
制動放射	116
絶対屈折率	5
遷移	31
遷移確率	59
遷移金属	99
線スペクトル	19
全反射	7

【た】

ダイオード	48
楕円偏光	14
多重化	150
縦モード	69
多モード	74
多モードファイバ	112
単一縦モード	70
単一モード	74
単一モード光ファイバ	113
単一横モード	74
単色性	54

【ち】

チャープパルス増幅	142
直線偏光	13
直交ニコル	138

【て】

定在波	69
定常状態	30
電気感受率	140
電気光学効果	124
電子	22
電磁波	1
伝送損失	149
伝導帯	41

【と】

ドナー準位	43
ドナー不純物	43

【な】

内殻電子	115
波	
——の回折	9
——の干渉	8

【ね】

熱拡散距離	157
熱拡散率	155
熱平衡	61
熱放射	19
熱放射率	155

【の】

能動的 Q スイッチング	125
能動的モード同期	128

【は】

媒質	2
パウリの排他原理	31
爆縮	159
白色光	2
波源	8

バーコード	146
発光ダイオード	36
パッション系列	38
発振	67
波面	8
パルス発振動作	83
パルス幅	83
バルマー系列	37
パワー	84
パワー密度	87
反射の法則	4
半値全幅	89
反転分布	62
半導体可飽和吸収ミラー	126
半導体レーザ	81
半波長電圧	124

【ひ】

光共振器	68
光散乱	16
光スイッチ	103
光ディスク	144
光の二重性	23
ピークパワー	86
非線形屈折率	142
非線形光学効果	139
非放射遷移	63
ビームウエスト	77
ビームエキスパンダ	134

【ふ】

ファイバレーザ	110
ファブリ・ペロウ干渉計	70
フェムト秒レーザ	104
フォトダイオード	88
負温度	62
不確定性原理	27
物質波	24
部分偏光	16
ブラケット系列	38
プラズマ	80
プランク定数	20
プランクの量子仮説	20

フーリエ変換極限パルス	127
ブリュースター角	15
フレネル反射	109
分極	141
分光	6
分散	6
プリント系列	38

【へ】

平均寿命	59
平均パワー	85
平行ニコル	139
平面波	9
偏光	11
偏光板	16

【ほ】

ボアア	
——の振動数条件	31
——の量子理論	28
ボアア半径	29
放射再結合	43
放射冷却	19
放出	31
法線	5
放電管	36
放電励起	79
飽和光強度	126
母材	99
補色	153

ポッケルス効果	124
ポッケルスセル	103
ホール	42
ボルツマン分布則	61
ホログラフィ	147
ホログラム	147
ポンピング	60

【ま】

マイケルソン干渉計	55
-----------	----

【む】

無反射コーティング	132
-----------	-----

【め】

メーザ	51
-----	----

【も】

モード	112
モード同期	121
モード分散	112

【や】

ヤングの実験	9
--------	---

【ゆ】

誘導放出	60
誘導放出断面積	64

【よ】

横モード	73
------	----

【ら】

ライマン系列	38
ラマン散乱	18
ランベルト-ベール則	66

【り】

利得	65
利得係数	65
利得飽和	66
リュードベリ定数	38
量子	20
量子条件	28
量子数	31
リレーレンズ系	133

【れ】

励起準位	32
励起状態	30
レイリー散乱	17
レーザ	50
レーザアブレーション	157
レーザ核融合	159
レーザ加工	152
レーザフルエンス	88
連続スペクトル	19
連続発振動作	83

【英字】

Ar <sup>+</sup> レーザ	96
CO <sub>2</sub> レーザ	97
F ナンバー	91
FBG	113
He-Ne レーザ	95

n 形半導体	44
ND フィルタ	138
Nd:Glass レーザ	101
Nd:YAG レーザ	100
p 形半導体	45
p 偏光	15
Q スイッチング	121

Q 値	121
s 偏光	15
TEM 波	74
X 線	24
X 線レーザ	114

— 著者略歴 —

1993年 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了  
博士（工学）  
2010年 近畿大学教授  
現在に至る  
専門：レーザー工学

工科系学生のための 光・レーザー工学入門

Introduction to Lasers and Electro-Optics for Engineering Majors

© Hitoshi Nakano 2016

2016年10月20日 初版第1刷発行



検印省略

著者 中野ひとし  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00889-0 (新井) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします