

入門

まるわかり

非線形光学

黒澤 宏 著

オプトロニクス社

まえがき

拙著「レーザー 基礎の基礎 (オプトロニクス社)」を1999年に世に出して、レーザーに親しみを覚えていただけたと思っています。これからレーザーや光学に関する仕事や研究に従事しようとする人、すでにレーザー関連の技術者として仕事をしているが、レーザーの基礎についてかっちりと勉強したことがない人、あらためてレーザーについて勉強を始めてみたい人、などにレーザーを身近に感じていただけたと思っています。今回、同じ視点から、非線形光学に関する本を書くことになりました。時には、数式を使うこともありますが、できるだけ平易な文章でお話ししようと思っています。少なくとも、中学程度の知識でも読み進めるように。ちょっとでも、レーザー並びに非線形光学に親近感を持っていただくために。物理の知識をお持ちの読者は、ところどころ読み飛ばしていただいて結構です。

「光」は電磁波の仲間です。「電波」も電磁波の仲間です。電波と光は波長あるいは周波数の範囲で呼び名が違うだけです。電磁波を波長ないしは周波数で区分すると、図1のようになります。波長が長い「電波」の世界では、もっぱら「周波数」が使われます。例えば、NHK第一放送で利用している電波の周波数は540 kHz (キロ, 10^3 , ヘルツ), FM放送は77 MHz (メガ, 10^6), 携帯電話で使っているのは1.5 G (ギガ, 10^9) Hzのマイクロ波と言う具合です。光も電波も同じ仲間ですが、光の周波数が高すぎて、周波数で区別するよりも波長で言う方が便利です。例えば、波長が1 μm (マイクロ, 10^{-6} , メートル) の赤外光、緑の光は500 nm (ナノ, 10^{-9} , メートル) の光と言うように。ちなみに、1 μm の波長の光の周波数は 3×10^{14} Hzに相当します。目に見える光の波長範囲は0.7 ~ 0.4 μm です。波長が長い方から「赤橙黄緑青藍紫」の七色の順番の色に相当します。太陽の光をプリズムを通してみると、この七色に分かれて見えます。プリズムの屈折率が波長によっ

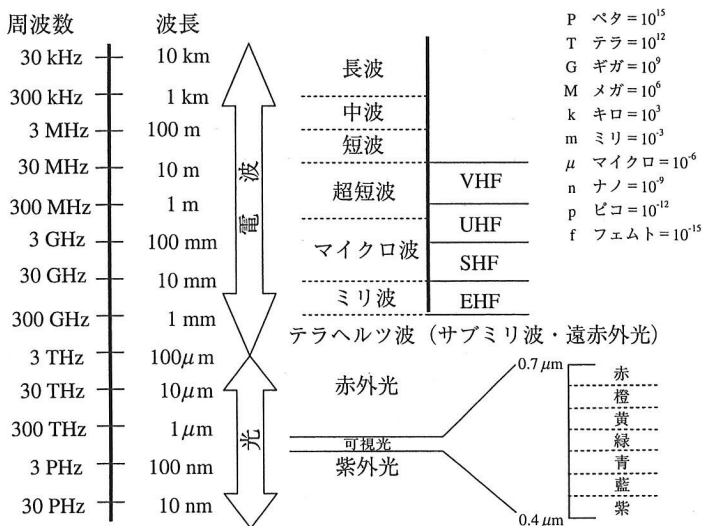


図1 電磁波の波長と周波数

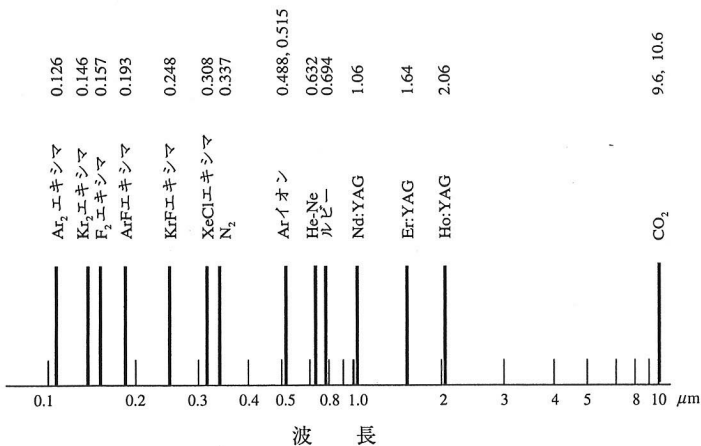


図2 代表的なレーザーと発振波長

て変化する性質を利用して、光を波長によって分解する道具がプリズムです。

光が空気中を伝搬するときは「波」としての性質を持っていますが、非線形光学効果を考える際には、少し異なった考え方をしなければなりません。物質は多数の原子から構成されています。光が物質の中の原子に入ると、原子を構成している電子に力を及ぼし変位させます。

電子は光電界と同じ周波数で往復振動します。一方、原子核は重いので動きません。その結果、原子から入射光と同じ周波数を持つ光が放射されます。入射光の電界が強い場合、電子の振動振幅が大きくなり過ぎて対称振動が出来なくなり、非対称な運動をします。この非対称振動には入射光と同じ周波数成分とともに異なる周波数成分が含まれています。後者が非線形光学効果の源点です。このような原子と光の視点から物質と光を考えなければなりません。

レーザーは光の中でも特殊な部類に入ります。が、非常に役に立っている光です。レーザーも物質と光の相互作用の結果、現われる光です。レーザーのお陰で、光の時代が到来したといっても過言ではありません。代表的なレーザーを列挙したのが図2です。発振波長を横軸にとって描いてあります。全てのレーザーを記入しているわけではありません。また、半導体レーザーの種類は多いので、これも記入してありません。図から分かるように、レーザーの発振波長は、波長の全範囲にわたって存在している訳ではありません。言葉を換えて言えば、欲しい波長のレーザー光が手に入るわけではありません。レーザー光として発振する波長は飛び飛びの値しか存在しません。これがレーザーの特徴でもあり欠点でもあります。この欠点を補う技術が、これからお話する「非線形光学」です。非線形光学は、技術として非常に役に立つだけではありません。物理的に奥深いものがあります。これを知っていただくのがこの本の目的です。

2008年5月

黒澤 宏

— 目 次 —

第 1 章 非線形光学事始め	1
1. はじめに	1
2. レーザー光の性質	1
3. 非線形光学とは	3
4. 物質と光	6
5. 電子の非線形振動	9
6. 分極と光の発生	11
7. 二次非線形光学効果	16
7.1 第二高調波発生 (Second Harmonic Generation)	16
7.2 和周波発生 (Sum Frequency Generation) と 差周波発生 (Difference Frequency Generation)	18
7.3 光パラメトリック発振	22
8. 三次非線形光学効果	24
8.1 第三高調波発生	24
8.2 強度依存屈折率	25
8.3 四波混合	27
9. おわりに	29
第 2 章 数式で理解する非線形光学	30
1. はじめに	30
2. 電子と電界, 磁界	32
3. 電磁波の発生	35
4. 位相整合条件	39

5. 和周波発生 (SFG) にみる非線形波動	41
6. 第二高調波発生	45
7. 偏光と複屈折	49
8. 位相整合の取り方	58
9. おわりに	62

第 3 章 非線形光学結晶を理解するための結晶学

1. はじめに	64
2. 二次非線形光学定数	65
3. 単結晶	68
3.1 結晶の対称性	68
3.2 結晶格子	73
3.3 結晶の方位と結晶面	76
4. 結晶系と結晶点群のまとめ	79
5. 対称中心を持つ結晶の非線形光学効果	81
6. 対称性と非線形光学効果	84
7. 複屈折と疑似位相整合	88
7.1 複屈折	89
7.2 疑似位相整合 (Quasi-Phase Matching)	92
8. おわりに	95

第 4 章 非線形光学結晶いろいろ

1. はじめに	98
2. 非線形光学結晶	99
2.1 水晶	99
2.2 KDP (2水素リン酸カリウム)	100
2.3 ボレート (ホウ酸塩) 系	101
2.4 ニオブ酸, タンタル酸系	102
2.5 KTP 系	104
2.6 赤外波長域用	104
3. 結晶成長法	105
3.1 溶液成長法	105

3.2 融液成長法	107
4. 第二高調波発生	108
4.1 変換効率	108
4.2 非線形光学結晶の使い方, 選び方	109
5. 二次非線形光学定数の測定	112
6. 擬似位相整合構造作製技術	115
7. まとめ	118
第5章 レーザー光を制御する技術 (電気光学効果の巻)	120
1. はじめに	120
2. 波長板	120
3. ポッケルス・セル	124
4. カー効果	127
5. 光変調素子	128
6. まとめ	131
[Column1] 波の基本形式	132
第6章 屈折光学素子と非線形光学	135
1. はじめに	135
2. レンズと屈折	135
3. 光強度依存屈折率	142
4. 自己集束	145
5. おわりに	147
[Column2] プリズムと虹	147
第7章 反射鏡と位相共役鏡	150
1. はじめに	150
2. 反射の法則	151
3. 位相共役波の性質	153
4. 位相共役波の発生	158
5. おわりに	161
[Column3] 「Fナンバー」	163

第 8 章 誘導光散乱と位相共益波発生165

1. はじめに165
2. 光散乱とは?165
3. 誘導ブリルアン散乱とは?168
4. 誘導ブリルアン散乱 (SBS) 増幅器171
5. SBS 発生器と位相共役鏡175
6. 音響光学素子178
7. おわりに183

第 9 章 誘導ラマン散乱： 波長変換とガス分析への応用184

1. はじめに184
2. ラマン散乱185
3. 誘導ラマン散乱190
4. コヒーレント反ストークスラマン分光
(CARS: Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy)194
5. おわりに196
[Column4] デシベル単位について197

第 10 章 フォトリフラクティブ効果と その応用199

1. はじめに199
2. 半導体結晶の電子構造200
3. フォトリフラクティブ効果207
4. 応用214
 - 4.1 二光波混合 (光による光増幅)214
 - 4.2 四光波混合 (位相共役鏡)215
5. おわりに218

第 11 章 非パラメトリック非線形光学過程 —可飽和吸収と二光子吸収—219

1. はじめに219

2. コンピューターと論理回路	220
3. パラメトリック過程と非パラメトリック過程	224
4. 可飽和吸収	227
5. 光双安定スイッチ	229
6. おわりに	234
[Column5] 開口数 (NA)	235
第 12 章 磁気と光の関係	237
1. はじめに	237
2. 電流と磁界 (磁界, 磁束密度, 磁化)	238
3. 磁性体について	242
4. 磁気と光学 (ファラデー効果とコットンムートン効果)	247
5. 非線形磁気光学効果	256
6. おわりに	256
第 13 章 光ファイバーにおける非線形光学	258
1. はじめに	258
2. 平行平板導波路	259
3. 光ファイバー	263
4. 光ファイバーにおける群速度分散と自己位相変調	267
5. 光パルス (時間パルス幅とスペクトル幅)	274
6. パルス伝搬と光ソリトン	280
7. パルス圧縮	286
8. おわりに	292
第 14 章 イメージングにおける非線形光学	294
1. はじめに	294
2. 顕微鏡について	295
3. レーザーと顕微鏡	299
4. 近接場光学顕微鏡	304
5. テラヘルツ波イメージング	308
6. おわりに	310
[Column6] 分解能 (解像度)	311

非線形光学事始め

1 はじめに

まず、非線形光学効果について、簡単に説明をしたいと思います。光の境界が原子の中の電子に力を及ぼして変位させ、その結果物質中に分極が生じます。分極の振動が新しい光の発生源となります。物質に光を入れると、新しい光の中に元の光の周波数と異なる成分が含まれることがあります。これが非線形光学効果です。ここでは、「分極」の概念を導入して、二次非線形光学効果と三次非線形光学効果の中から、代表的ないくつかの例についてざっとお話しします。

2 レーザー光の性質

レーザーの発達は1961年にアメリカのメイマンがルビーレーザーの発振に成功したことに始まります。しかし、その基礎理論は40年以上も前の1916年にアインシュタインが発表していたのです。詳しいことは「レーザー基礎の基礎」¹⁾を見ていただくことにして、レーザーの特徴を簡単に挙げると、図1.1に描いてあるように、指向性、干渉性、集光性、そして単色性です。指

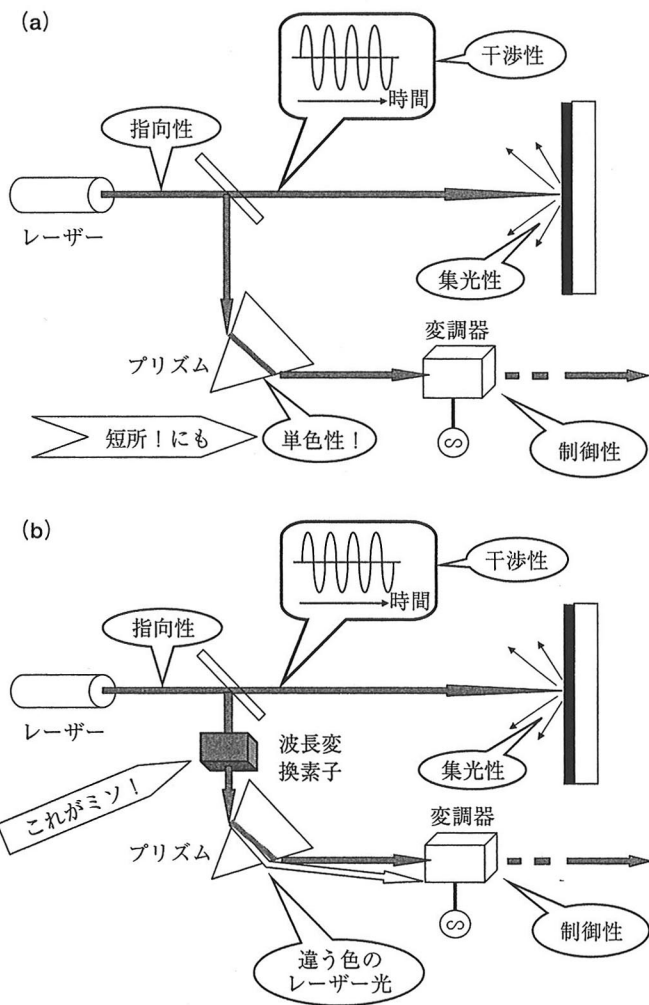


図1.1 (a) レーザーの特徴：指向性，干渉性，集光性，単色性，制御性
 (b) レーザーの欠点である単色性を補う方法：非線形光学素子

向性とは、光がほとんど広がらずに真っ直ぐ進むことを言います。干渉性とは、光の位相（波の山と谷）が揃っているため、狭いスリットを通すと、光

の強弱の縞模様が鮮明に見えることを言います。高輝度とは、指向性がよいので単位面積あたりの光強度が強いことですが、レンズで集光すれば、太陽光の何百倍ものパワーを得ることが可能です。すなわち、エネルギーを一点に集中することが可能なのです。単色性とは、レーザー光にいろいろな光が混じり合わずに純粋な一つの色（波長，周波数）の光であることを言います。逆に言うと、普通の光はほとんどあらゆる波長の光の集合と言えるでしょう。

レーザー光は図1.1に描いてあるように、正弦関数（sin関数）で書くことが出来る光ですので、外部から信号を加えることによってその振幅や位相を変えることができます。これを「制御性」が高いと言います。

レーザーは原子の中の電子のエネルギー状態の変化を利用しますので、発振できる光の波長（周波数）は利用する原子の種類によって決まっています。レーザーとして利用できる原子の種類には限りがありますので、まえがきの図2に描いてあるように、レーザー光として手に入れることができる波長には限りがあることとなります。横軸に波長を取って、現在発振している代表的なレーザーを書いてみると、ほんとうに飛び飛びというか、空白部分が多いことに驚かされます。すなわち、単色性がレーザーの最大の欠点にもなっているのです。ある特定の波長のレーザー光を使いたいとしても、見あたらない場合が多いのです。でも、レーザー光の性質を持った任意の色の光を使いたい場合が多いことは想像に難くありません。そこで登場するのが「非線形光学」です。すなわち、非線形光学効果を利用することによって、レーザー光から波長の異なったレーザー光を作ることができるのです。これからこの「非線形光学」の仕組みに入っていくことにしましょう。

3 非線形光学とは

非線形光学をやさしく解説することが本書の主な目的です。非線形光学効果は、物理現象そのものの応用範囲を格段に広げています。レーザー光の波

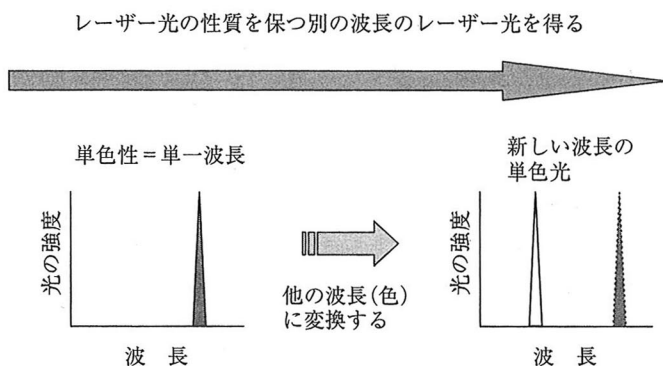


図1.2 レーザー光から異なる波長のレーザー光を作る

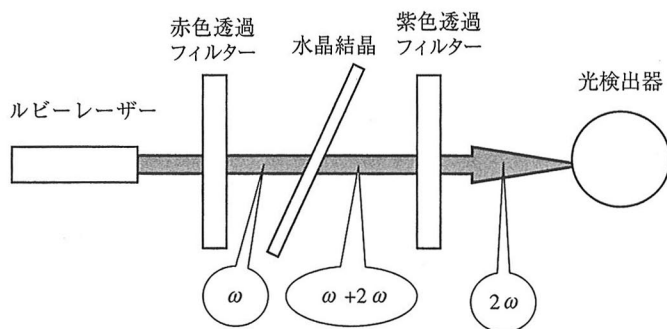


図1.3 Frankenの実験配置²⁾

長を変えるだけでなく、物理の測定や通信にも応用されています。非線形光学効果を幅広くとらえて、できるだけ全体像をお話したいと思っています。

図1.2に描いてあるように、好みの波長のレーザー光を作るのが非線形光学効果です。レーザーに限りませんが、非線形効果は非常に便利で幅広く応用されている現象です。レーザーの発明と同じく、非線形光学そのものは古くからありました。しかしながら、何と言っても非線形光学効果の、特に実験的研究が進んだのはレーザーの発明があってからでした。1961年に

◎ 第二高調波発生	$\omega + \omega$	→	2ω
	1.06 μm YAG		→ 0.53 μm 緑色光
◎ 和周波発生	$\omega_1 + \omega_2$	→	ω_3
	1.06 + 0.53 μm		→ 0.35 μm 紫外光
◎ 差周波発生	$\omega_1 - \omega_2$	→	ω_3
			赤外, 遠赤外の長波長光
◎ 光パラメトリック効果	ω_3	→	$\omega_1 + \omega_2$
			広い範囲にわたって波長可変のレーザー光の発生

図1.4 いろいろな非線形光学現象の例

Franken ら²⁾ がルビーレーザーから得られた $\omega = 694 \text{ nm}$ の波長の赤色光を水晶の結晶に照射したとき、波長が半分の $2\omega = 347 \text{ nm}$ の紫外光を観測したのが、「第二高調波」の最初です。このときの実験配置を図1.3に描いてあります。この波長変換の代表例を図1.4に挙げてあります。Franken らの最初の実験にある、元のレーザー光の半分の波長（二倍の周波数）のレーザー光を作るのが「第二高調波発生」です。例えば、1.06 μm の Nd ; YAG レーザー光から、0.53 μm の緑色のレーザー光を作ることができます。二つの異なる波長のレーザー光からちょうど波長の和に等しい光を作るのが「和周波発生」です。YAG レーザー光とその第二高調波である 0.53 μm の光を使って、0.35 μm の紫外光を発生させることができます。周波数で足し算しますので、 $1/1.06 \mu\text{m} + 1/0.53 \mu\text{m} = 1/0.35 \mu\text{m}$ と計算します。差の周波数の光を作るのが「差周波発生」です。周波数で引き算しますので、波長で言えば長い光を作ることができ、可視域のレーザー光から赤外や遠赤外波長範囲のレーザー光を作る際に利用されます。一つの光を二つの周波数の光に分解するのが「光パラメトリック効果」です。温度や角度を変えることによって、発生する波長を自由に変えることができますので、大変便利な道具にな