

# レーザー増幅

米田研究室

山口 祐太

### ・モードロック

レーザーの光は、出力の時間波形により、連続光(**CW**)とパルス光に分けられる。

パルスの場合、レーザーは複数の縦モードで発振している。

レーザーが多モードで発振しているとき、発振モード間の周波数の差は、一般に等しくない。各モードの発振周波数はレーザー媒質の非線形分散効果などのために、共振器の共振周波数とはいくらか異なるからである。したがって多モード発振レーザーの出力を検波したとき少しずつ異なるいくつものビート周波数が観測される。しかし、レーザー共振器の中に、非線形光学素子を入れたり、変調素子を入れてそれにビート周波数に近い高周波を加えて損失や屈折率を変調したりすると、多モード発振の周波数間隔が等しくなる。これをモードロックと呼ぶ。

モードロックされたレーザーの時間波形は、一定間隔の繰り返しパルス列となる。

パルス列の繰り返し周期は、共振器の縦モード間隔となり、パルス幅は利得のスペクトル広がり inverse に比例した値となる。また、振幅の最大値は、単一モード発振に比べてモード数倍となり、ピークパワーもまた平均パワーのモード数倍となる。モード同期の基本的な考え方は、位相のそろわないノイズ成分を制御し、位相のそろった一定間隔の縦モードのみを発振させることである。

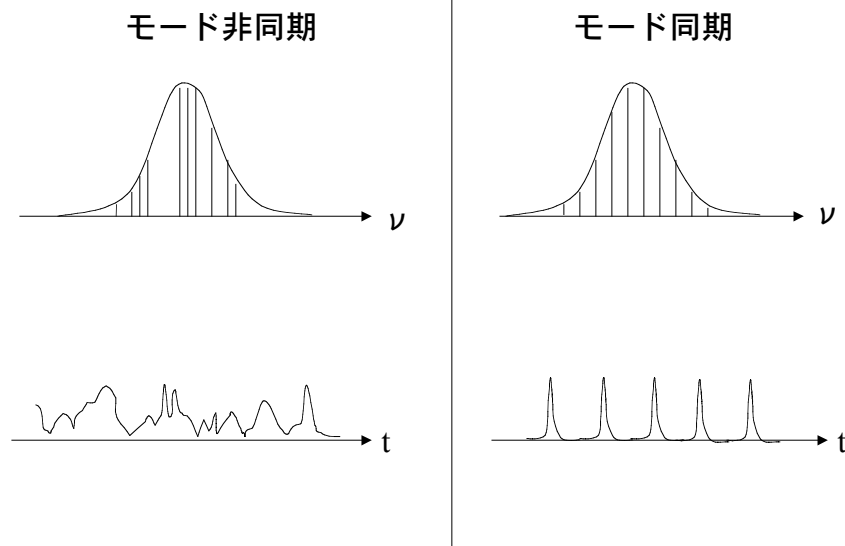


図1 モード同期とモード非同期の違い

モード同期の方法は、自己モード同期と強制モード同期の2つに大別される。自己モード同期としては、過飽和吸収色素（入射強度が増加すると吸収率が低下する色素）を発振器内に挿入する方法がある。これは、モード同期パルス列の強度が高いために、位相がそろっていないランダム発振光に対する色素の吸収率が同期パルス列に比べて大きくなり、ランダム光の発振が抑制されるということを利用している。

強制モード同期としては、音響光学素子（**A/O**）や、電気工学素子（**E/O**）などを発振器内に挿入し、モード間隔程度の周波数で電氣的にシャッターを開閉する方法がある。これは、非常に短い間だけシャッターを開くことで損失を大きくし、ランダム発振光の発振を抑えている。

ほかに、モード同期されたレーザーをシード光として発振器に入射し、発振モードをこのレーザー光に引き込む注入同期などがある。

現在広く用いられている超短パルスレーザーである **Ti:Sapphire** レーザーなどで用いられているのは、カーレンズモード同期と呼ばれる。**Ti:Sapphire** 結晶の非線形光学効果を利用した受動モード同期である。

### ・超短パルスレーザーについて

パルス幅がフェムト秒クラスのレーザーは超短パルスレーザーとよばれ、超高強度電磁場の物理への応用（非線形光学、プラズマの物理）が盛んに行われている。

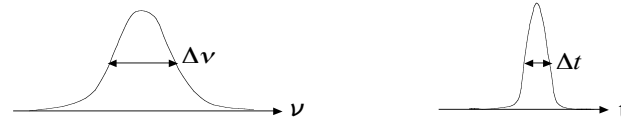
たとえば、パルス幅が **10fs** でパルスのエネルギーが **10mJ** の場合、ピークパワーは、**1TW** にもなる。レーザー光パルスではこれが可能となる。

レーザーで出力（パワー）を高めるためには

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

・パルスあたりのエネルギーを上げる  
・パルス幅を短くする

フーリエ変換の関係

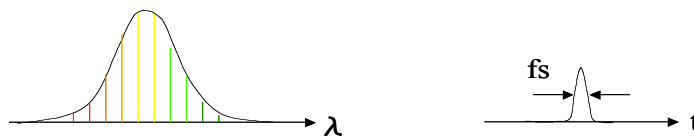


パルス幅を短くするためには、広いスペクトル幅が必要

図2 高い出力を得るためにはどうするか

複数の縦モードの同期発振

超短パルスレーザー



複数の波長のレーザーを同期させてスペクトル幅を広げることにより、パルス幅がfsオーダーのレーザーを発生させることができる

図3 超短パルスレーザーとスペクトル

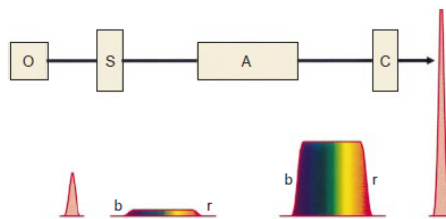
### ・チャープパルス増幅

**TW** クラスのパワーを得るためには、微弱なパルスを増幅しなければならない。しかし、あまりにもピークパワー（先頭出力）が大きいため、非線形光学効果によりビームの品質が悪化したり、さらには増幅器を含めたシステムを破損してしまう危険もある。そのため、増幅の過程では、ピークパワーを小さくし、エネルギー増幅後にパルス幅を狭める工夫が必要である。これがチャープパルス増幅である。

短パルスレーザーのスペクトル幅は広いいため分散素子（回折格子、プリズム、ガラスブロックなど）を利用すると光の位相がずれてパルス幅が広がる。これがチャープ。

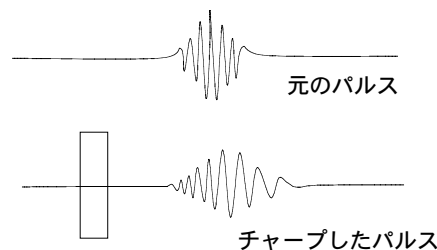
パルス幅が広がるとピークパワーは小さくなる。パワーが小さくなれば増幅器を破損することなくパルス光を増幅できる。

増幅された光は、パルスを広げた分散素子とは反対の遅延特性をもつ系に入れることで光の位相がまた同期して、元のパルス幅に戻る。最近ではこれによって **PW (10<sup>15</sup>W)** 以上のピークパワーを出すことが可能となっている。



**Figure 8** Diagram showing the principle of CPA. The oscillator output (O) is stretched in the grating stretcher (S) such that the red frequency components (r) travel ahead of the blue (b). The peak intensity is reduced in the process. The stretched pulse is then amplified in a regenerative or multipass amplifier (A) before recompression in a grating-pair compressor (C).

図 4 チャープパルス増幅の概要 (1)



分散によるパルスのチャープ現象

図 5 分散によるチャープ現象

- ・実際に使用する実験装置

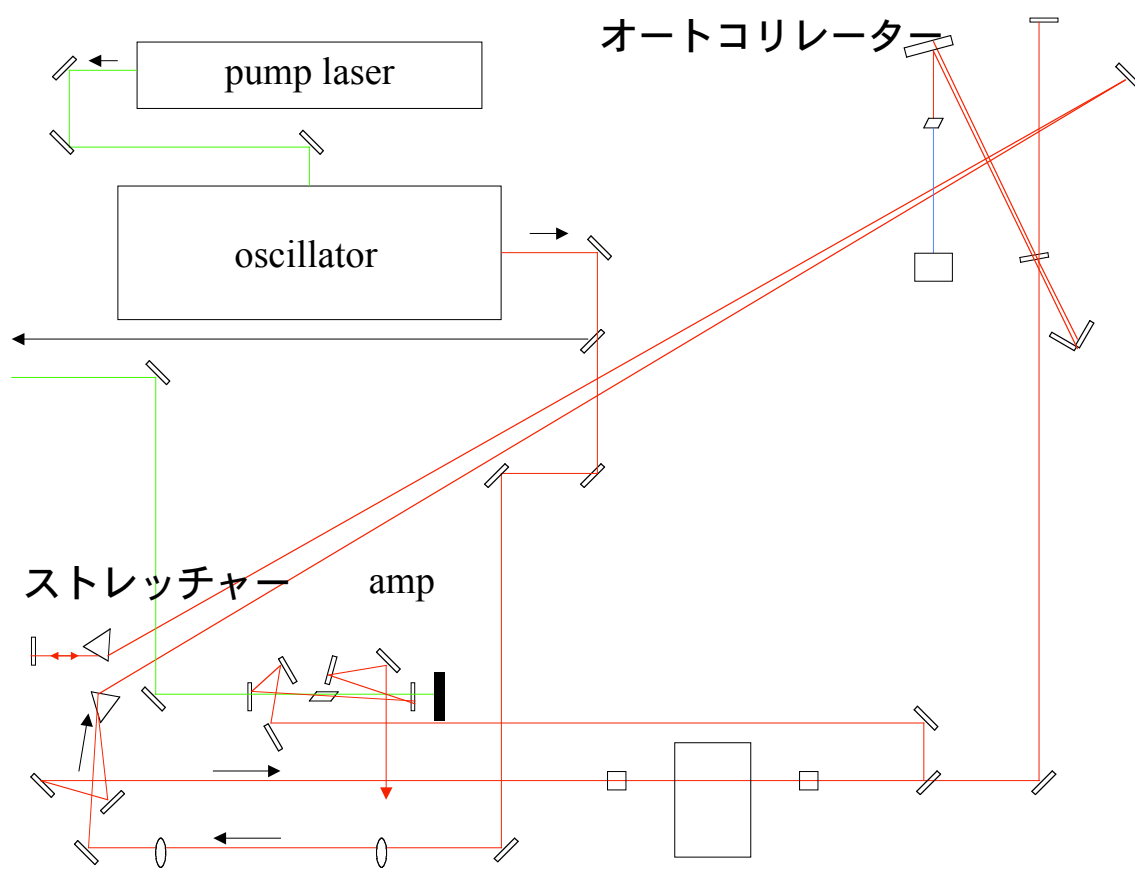


図 6 実験装置の概略

### ・オートコリレーター

パルス幅を測定するための方法のひとつとして、オートコリレーターを用いて自己相関波形を測定する方法がある。

図は **SHG** 自己相関法によるパルス幅の測定を表したもの。

ビームスプリッターで **2** つに分けたパルスをディレイをつけて重ね合わせる。

電場の強度  $I(t)$ 、ディレイ  $\tau$ 、 $G^{(2)}(\tau)$  は 2 次自己相関関数

$$G^{(2)}(\tau) \propto \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t-\tau)dt$$

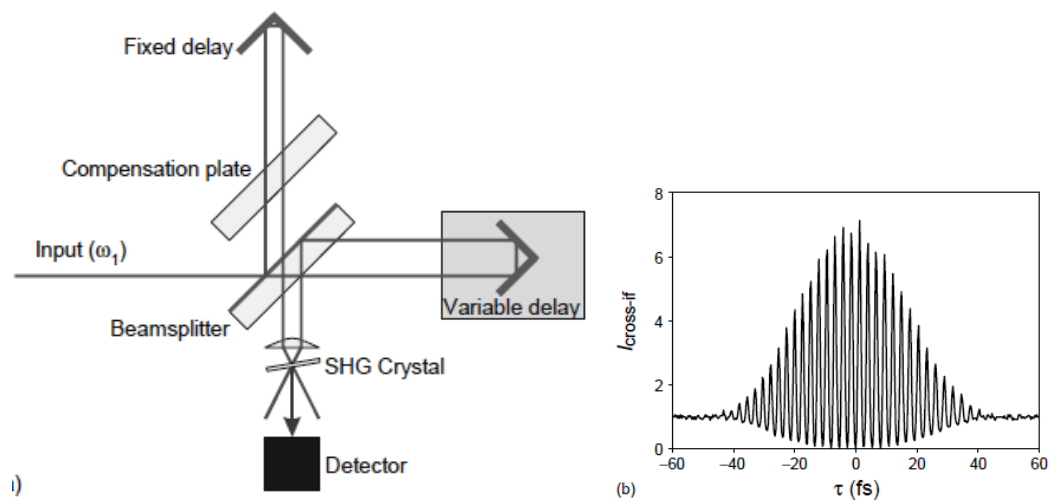
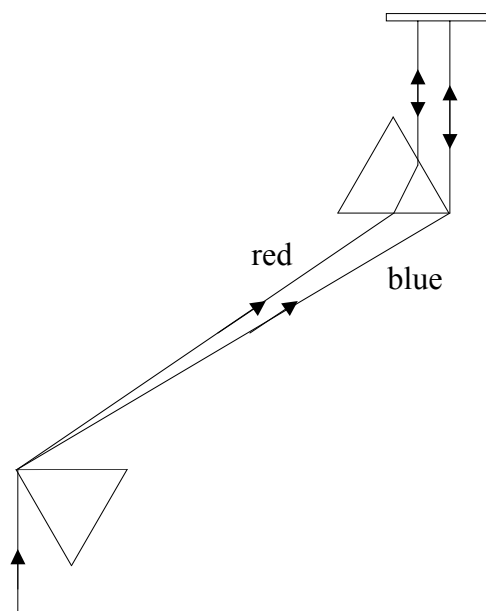


図 7 **SHG** 自己相関法 (1)

### ・ストレッチャー

パルス幅を広げる方法として、プリズムペアを用いる。

図のように配置すると、長波長側の光が短波長側に比べて遅れていくようになる。



ストレッチャー

図8 プリズムペア

・最後に

言葉の説明については最低限度に必要なものだけにしているため、さらによく知りたい方は参考文献を挙げるのでそちらを参照していただきたい。

特に参考文献(2)は端的な図で説明しており、初心者向けで非常にわかりやすい

#### 参考文献

- (1) 「**Ultrafast Laser Technology and Spectroscopy**」 Gavin D. Reid and Klaas Wynne in **Encyclopedia of Analytical Chemistry** R.A. Meyers (Ed.) pp. 13644–13670 © John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000
- (2) 「ビジュアル レーザーの科学」 レーザー技術総合研究所 丸善 **1998**