

超短パルスレーザーの基礎：パート2

オリビア・ホイラー

本稿は、超短パルスレーザーについて解説する2部構成記事の後編である。

近年、超短パルスレーザーは、研究施設でしか使用できない非常に繊細で巨大な装置から、産業プロセスへの組み込みに適したコンパクトで信頼性の高い光源への移行に成功している。医療処置から商用電子機器製造に至るまでの幅広い応用分野に浸透したことで、今ではさまざまな経歴を持つユーザーが、日常的に超短パルスレーザーを操作するようになってきている。

超短パルスレーザーは独特の性質を備えるため、現場におけるベストプラク

ティスを理解することは、新規ユーザーにとっては難しい可能性がある。本稿では、最も適切な光学部品を選定する方法や、分散と時間歪みに関する基本情報、どのような場合にパルス圧縮を検討する必要があるかなど、超短パルスレーザーを使用する際のアドバイスを示したいと思う。

超短パルスレーザーの光学部品の選定

超短パルスレーザーに伴う技術的課題

により、対象用途に適切な光学部品の選定は難しくなる可能性がある。必要とされるスペクトルカバレッジ、レーザー損傷しきい値(Laser Damage Threshold : LDT)、分散の仕様は、連続波(Continuous Wave : CW)レーザーや、より長いパルス幅のパルスレーザーに慣れているユーザーにとっては、なじみのないものかもしれない。

パート1 (www.laserfocusworld.com/14291054参照)で説明したように、超短パルスレーザーパルスの生成には、広



いスペクトル帯域幅が必要である。このことを示す例として、中心波長1030nm、パルス幅150fsのガウシアンレーザパルスの場合、半値全幅(Full Width at Half Maximum : FWHM)で10nmを超える最小スペクトル帯域幅が必要である。一方、Nd:YAG(1064nm)レーザ源の一般的なスペクトル線幅は1nm未満である。そのため、超短パルスレーザを使用する際には、その光学部品がその帯域幅全体を十分に反射、または透過して、意図しないスペクトル(および時間)歪みを防ぐことを確認する必要がある。幸い、大半の標準的な高反射性、または反射防止コーティングが、十分に広い帯域幅で動作するように設計されており、超短パルスレーザとともに使用する光学部品の調達には、それほど面倒な作業にはならない(図1)。

光学部品に対して選択したコーティングが、超短パルスレーザパルスの帯域幅全体を反射または透過するとしても、その短いパルスに伴う莫大なピーク出力に耐えられるようにその光学部品が設計されているとは限らない。長パルスレーザまたはCWレーザが、あまりにも長い間商用レーザ市場を占有していたため、LDT定格値が、ナノ秒レーザ源またはCWレーザ源を対象に規定されているのは、よくあることである。残念ながら、それらのLDT定格値を、超短パルスにそのまま適用することはできない。パルス幅が数ケタ異なると、損傷のメカニズムは全く異なるためである(図2)。

対象とする動作条件にできるだけ近い条件下で測定した、適切なLDT定格値を持つ光学部品を選定できれば、最も理想的である。実際には、与えられた光学部品のLDT定格値は、対象とする正確な条件に対して規定された



図1 超短パルスレーザの光学部品には、対象波長範囲に対する低損失のコーティングが必要という、他の種類のレーザ光学部品と同様の要件に加えて、パルスの拡大を最小限に抑えるための固有の分散要件がある(提供:エドモンド・オブティクス社)

ものではない可能性が高い。そのような場合は、光学部品メーカーに連絡して、どの光学部品が対象用途に対して最良の選択肢であるか、助言を求めるとのが最も良い方法である。

群遅延分散(Group Delay Dispersion:GDD)とは

超短パルスレーザの使用に伴う最も難しい課題はおそらく、非常に短いパルス幅を維持することである。パルス幅が短いほど、時間歪みの可能性は高まる。この現象の根拠となる数学を掘り下げることはしないが、与えられた物質の屈折率の周波数依存性を考察することによって、これが本当であることを概念的に説明したいと思う。

超短パルスレーザの広帯域パルスが、通常の分散で特定の媒体を伝播している様子を思い浮かべてほしい。これは、低周波数(長波長)成分は、高周波数(短波長)成分よりも高速に伝播することを意味する。パルスがこの物質

を伝播するにつれて、パルスの中の各色(波長帯)の時間的な差はますます拡大していく。

パルス幅が短く、つまり、帯域幅が広がるほど、この効果はさらに大きくなり、パルスの大きな時間歪みにつながる可能性がある。この効果は多くの場合、二次分散としても知られる群遅延分散(GDD)という項目によって調べるのが便利である。より高次の分散項も、超短パルスレーザパルスの時間的特性に影響を与える可能性がある。しかし実際には、GDDの影響を調べれば十分である場合が多い。

パルス幅に対するGDDの影響は、入力パルス幅(τ_{input})、中心周波数(または波長)、パルスが伝播する物質など、複数の要因に依存する。GDDに起因する時間的伸長は、次の式に基づく。

$$\tau_{output} = \tau_{input} \sqrt{1 + (4 \ln(2)) \frac{GDD}{\tau_{input}^2}}$$

この式から、入力パルスのパルス幅

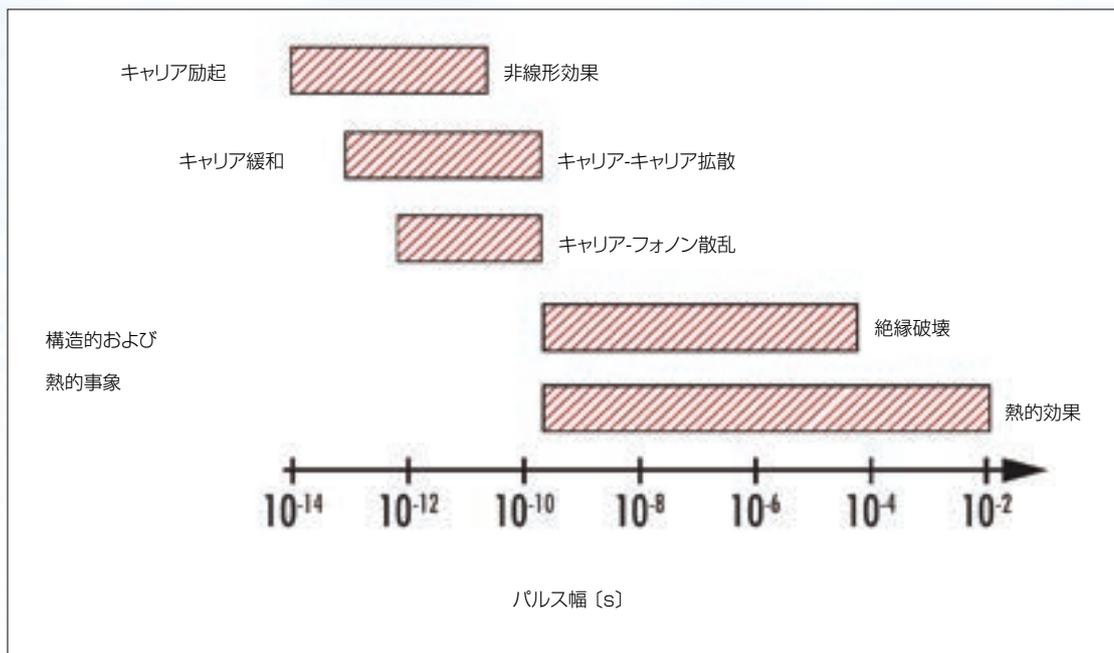


図2 異なるパルス幅に対するレーザー誘起損傷のメカニズム(提供:エドモンド・オプティクス社)

が長い場合よりも短い場合のほうが、同じ量のGDDによって大きく拡大されることが明らかである。これは、ナノ秒パルスやピコ秒パルスでGDDが決

して議論されない理由を説明している。これらのパルスの場合、1psのパルスを0.2%だけ拡大するのに、2万 fs^2 ものGDDが必要である。以下ですぐ

に示すが、これは、1030nmのパルスを1m以上の溶融シリカを通して伝播させることと等価である。

物質の屈折率と同様に、GDDの値も光の周波数に依存する。超短パルスレーザーパルスとともに使用する透過型または反射型の光学部品を選択する際には、溶融シリカを使用することが一般的に推奨される。溶融シリカは、可視域および近赤外域のGDD値が最も低い物質の一つだからである。例えば、1mmの溶融シリカにパルスを伝播させると、1030nmで約 $19fs^2$ のGDDが生成されるが⁽¹⁾、1mmのSF11光学ガラスの場合は、同じ波長で $125fs^2$ を超えるGDDが生成される⁽²⁾。refractive index.infoなどの屈折率データベースは、どの物質が光学部品に対して最も適切であるかや、どれだけのGDDがビーム経路において累積されるかを判断するために非常に役立つ。

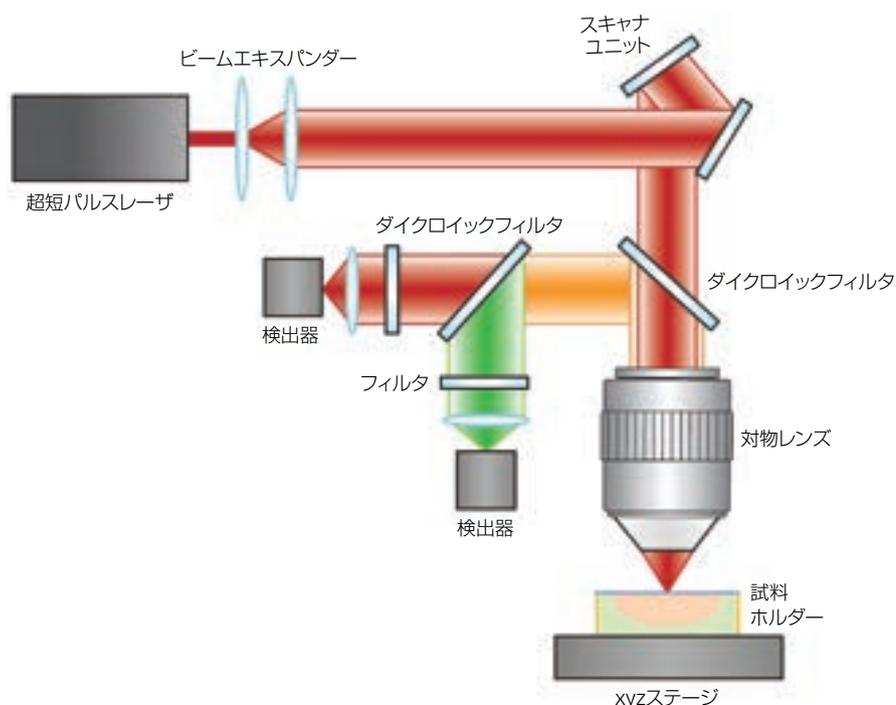


図3 多光子励起顕微鏡法の実験におけるビーム経路の構成例(提供:エドモンド・オプティクス社)

パルスの(再)圧縮

超短パルスレーザーの大半の用途において、ビーム経路に沿ってパルスに

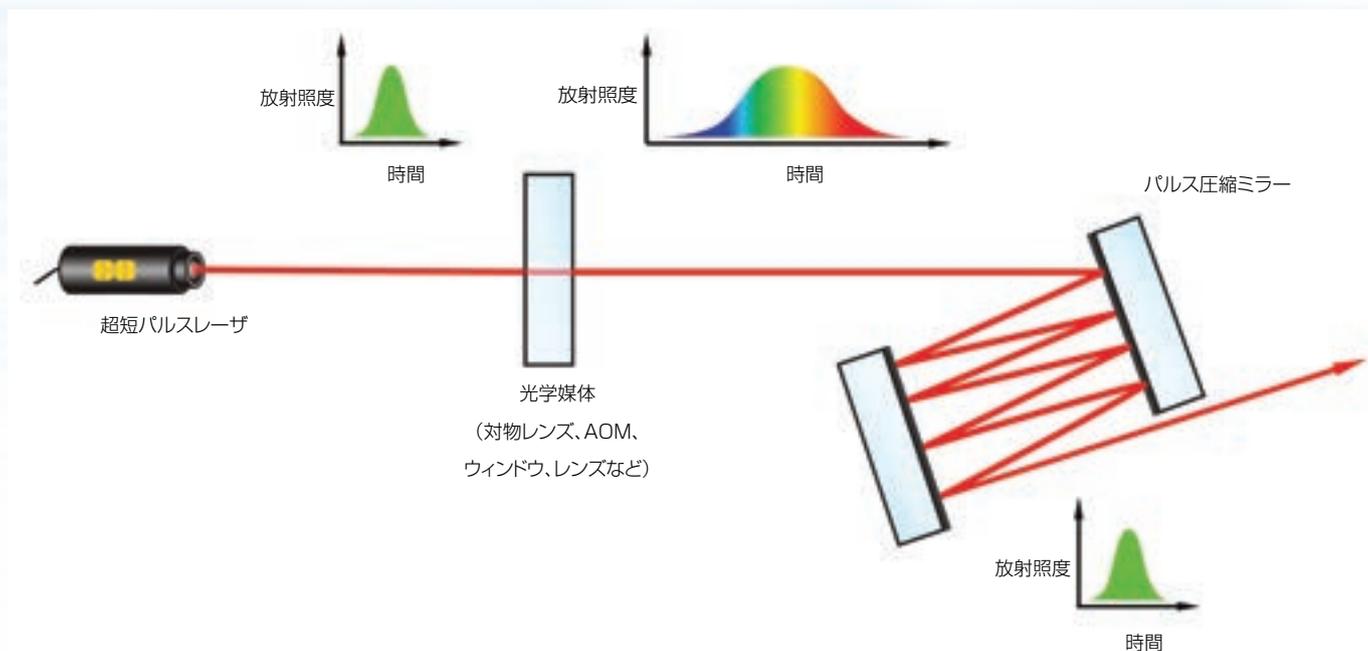


図4 負のGDDを持つ分散ミラーは、他の光学媒体で超短パルスレーザーパルスに累積された正のGDDを相殺し、パルス幅を(再)圧縮することができる(提供:エドモンド・オブティクス社)

GDDが累積されないことは稀である。反射型光学部品であっても、特に広帯域誘電体ミラーなどの一部の部品は、ゼロではないGDDを寄与する可能性がある。そこで生じるのは、レーザーパルスを(再)圧縮する必要があるかという疑問である。すべての状況に対する絶対的な指針を示すのは不可能だが、いくつかのベストプラクティスを理解する上で役立つ計算例を、以下に示す。

多光子励起顕微鏡法の実験を行っているとする。ビーム経路は、図3のような構成となる可能性がある。

パルス伸長を計算するために、レーザーが試料に到達するまでに通る、システム内のすべての素子のGDD寄与を加算して、1次近似量を求めることができる。図3の構成において、GDD寄与が最も大きいのは、ビームエキスパンダー、ダイクロイックフィルタ、対物レンズであると仮定する。スキャナミラーは、一般的に低GDDの金属コーティングが採用されているので、無視する。主要

な寄与因子を特定したところで、すべての部品のGDD寄与を合計する必要がある。パルスの中心波長を1030nmとすると、このシステムのGDDは、 600fs^2 を優に超える可能性がある。

パルスを再圧縮するべきか否かは、入力パルス幅と対象用途のニーズに依存する。最初のパルス幅を150fsとすると、これらの光学部品がパルス幅に与える影響は無視できる。しかし、基礎研究が目的で、10fs程度の時間分解能が必要な場合は、この量のGDDによってパルスは約167fs伸長し、再圧縮が必要である(図4)。当然ながら、このような詳細情報は、ビーム経路と用途に大きく依存する。パルス幅に対して最適な光学

部品の選定については、光学部品メーカーに支援を依頼してほしい。

超短パルスレーザーがさらに幅広い種類の応用分野に浸透するにつれて、より多くのユーザーが、その広いスペクトル帯域幅、非常に高いピーク出力、非常に短いパルス幅をもたらす技術的課題に直面している。応用分野にかかわらず、超短パルスレーザーを使用する場合は、このような実用的な指針に従うことにより、スペクトルカバレッジを狭めることなく、時間的特性を歪ませることなく、あるいは、その過程で光学部品に損傷を与えることなく、超短パルスレーザーパルスを対象物質に供給することができる。

参考文献

- (1) I. H. Malitson, J. Opt. Soc. Am., 55, 1205-1208(1965).
- (2) See SCHOTT Zemax catalog 2017-01-20b (obtained from <http://www.schott.com>).

著者紹介

オリビア・ホイラー (Olivia Wheeler) は、米エドモンド・オブティクス社(Edmund Optics)の超短パルスレーザー光学エンジニア。
e-mail: owheeler@edmundoptics.com URL: www.edmundoptics.com