

フェムト秒レーザー 技術の基礎知識

サイバーレーザー(株)
玉木裕介

1 はじめに

第5回目となる本稿では、フェムト秒レーザーを取り上げる。フェムト秒レーザーは、熱影響が殆どない加工が可能であり、半導体/FPD製造装置、ダイシング装置、ノズル加工機などへの導入が本格的に検討されている。フェムト秒レーザーの累計販売台数は、世界で数万台であり、これらの装置を用いて非常に高いポテンシャルを示した研究成果が多く発表されている。しかしながら、国内においては未だ数百台にとどまっている。この理由のひとつは、良い解説論文が少なく、理解が難しいといったことも背景にあるのではないかと思う。そのようなギャップを少しでも埋め技術理解の手助けになれば、と考え寄稿した次第である。フェムト秒レーザーの専門知識のみならず、一般的なレーザーの知識とレーザー加工モデルの理解も得られるように心がけた。筆者の力不足により、一部電磁波の予備知識が必要なところが残っていることは先にお詫びしたい。

以下の内容は4つの章に分かれる。2章では、レーザー光線の特徴について説明し、短パルス性、ビーム質、出力などの基本パラメータの理解を助ける。3章では、フェムト秒レーザー関連装置の内部構成を解説する。あわせて、最新のハンズフリーなフェムト秒レーザー装置を紹介する。4章ではフェムト秒レーザーでの加工物理の基礎知識を述べ、フェムト秒レーザーを用いた加工技術を開発するためのモデルを提供する。5章は本解説記事をまとめる。

2 フェムト秒レーザー光の性質

●時間特性

レーザーには、連続発振レーザーとパルスレーザーがある。パルスレーザーはさらに、擬似パルスレーザー、Qスイッチレーザー、モード同期レーザーに分けられる。フェムト秒レーザーはモード同期レーザーの範疇である。

擬似パルスレーザーとQスイッチレーザーは、共振器の利得あるいは損失をON/OFFすることによってパルス発生するものである。モード同期の発振原理は上記パルスレーザーとは大きく異なっており、意外であるが、連続発振レーザーと殆ど同一である。連続発振レーザーとの相異は、複数の縦モードが同時に連続発振していることと、互いに干渉するように各モードの位相が同期していることの2点である。音の世界ではふたつの周波数成分を持つ連続音を同時に聞くと干渉によりうなりとなって聞こえる。これは、周波数の重ね合わせの結果、パルスが生成されている分かりやすい例である。図1にモード同期によるパルス化の概念図を示した。パルス化された後、複数パルスからシングルパルスを切り出して応

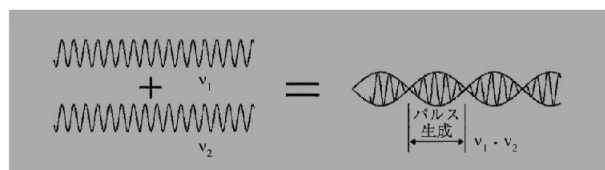


図1 モード同期のしくみ

用に用いる。

モード同期についての説明は、画像処理や音声分析に明るい技術者にとっては、フーリエ変換の原理に基づいて議論すると分かりやすい。画像処理で空間周波数をフーリエ変換した経験があれば容易に理解できよう。つまりフーリエ面において極狭い領域に鋭いピークを持たせるためには、被変換面においては①広い領域で②位相の揃ったエネルギー分布が必要である。光の時間特性と周波数特性の関係にすると、急峻な時間特性を得るためには、ブロードで位相の揃った周波数特性が必要となる。時間パルス幅とバンド幅の関係は、フーリエ変換の関係式で決まる。

$$\Delta t \cdot \Delta \nu = a$$

ここで、 Δt はパルス幅 (sec)、 $\Delta \nu$ はバンド幅 (Hz)、 a はパルス波形に依存した定数である。 a はガウシアン波形の場合0.41、双曲線正割関数sechの場合0.315となる。100 fs、中心周波数380 THzの場合、10 THz以上のバンド幅を持ち、さらに位相がそろっていることが必要になる。波長で表すと780 nmから790 nmのスペクトル幅である。5 fsレーザーの場合は500 nmから900 nmのスペクトル幅となり、これは可視域のスペクトルのほぼ全域を含む。このようなバンド幅を持ち、位相を揃えることでフェムト秒パルスが生成されるのである。装置の仕組みについては3章で解説する。ちなみに、バンド幅のみに着目した場合、フォトルミネッセンスや白色光源を用いれば同様のスペクトル幅は容易に得られるのだが、位相を揃えることができないのでパルス化はできない。

パルス幅は、慣例的にエネルギー分布の半値全幅を指している。パルス幅が短いと、計測と加工において威力を発揮する。100 fsは光の長さに換算すると30 μm となる。したがって直径30 μm に集光した場合、30 μm の粒状の光の塊ができる。ナノ秒レーザーの長さは3mであることを考えると、フェムト秒レーザーが精密計測応用に有力であることは自明である。加工での利点については4章で説明する。

パルス幅の測定には、自己相関関数測定器を用いる。自己相関関数は波形 $x(t)$ とそれから Δt だけ時間をずらした波形 $x(t + \Delta t)$ を畳み込み積分したものであり Δt の関数として表される。したがって、自己相関波形のパル

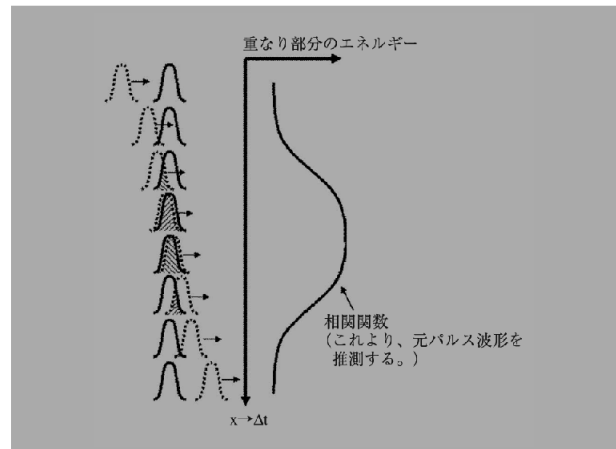


図2 パルス波形測定の原理 (自己相関関数測定法)

ス幅は Δt の関数であり実時間のパルス幅とは異なる。実時間幅は、相関幅を1.4 (ガウシアン波形の場合)、あるいは1.5 (双曲線正割関数sechの場合) で除した値である。

本方法の概念図を、図2に示す。時間遅延 Δt は、ディレイラインを利用して実現する。シングルパルスを、ハーフミラーを用いて2つの同一パルスに分け、再度重ね合わせることで自己相関関数の測定を行う。重なり部分の検出には、第2高調波発生、2光子電流などの物理現象を利用する。

●空間特性

ビーム品質の評価には、 M^2 (エム・スクエア) 値を用いる。均一波面でガウシアン強度のビームの最小スポット径と広がり角を指標に $M^2=1$ という値分布が定義されており、波面のでこぼこや強度がガウシアンでないケースでは、最小スポットと広がり角を評価すると $M^2>1$ になる。ビーム形状、エネルギー分布の均一性、集光性の3つを用いた評価では、真円-四角形、ガウシアン分布-面内均一などの定性的になってしまう。

M^2 値を使うと、集光径の推定が容易になる。集光径 (半径) w_0 は次の近似式から求められる。

$$w_0 = M^2 \pi f / (D_0 \lambda)$$

ここで D_0 はレンズ上のビーム径 (半径)、 f はレンズの焦点距離、 λ はレーザー波長 (フェムト秒レーザーは中心波長を用いればよい) である。ビーム径は慣例的にピ

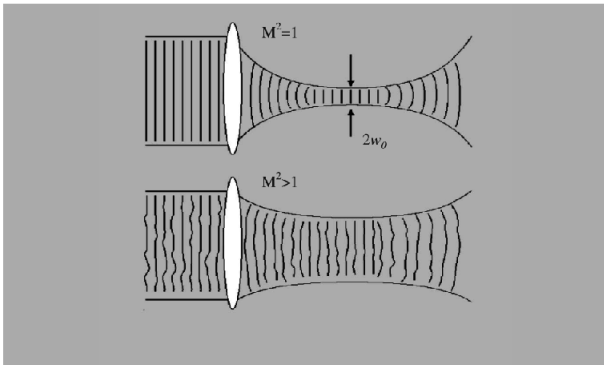


図3 ビーム伝播とM2の関係

ークの13.5% ($= 1/e^2$)での半値を指す。図3に、レーザーをレンズで集光するときの概念図を示す。この式から分かるとおり、 M^2 が2の場合集光径は2倍になる。フェムト秒レーザーを $8\ \mu\text{m}$ に集光するためには、 $M^2=1$ 、半径3 mmのビームを $f=10\ \text{mm}$ レンズで集光する必要がある。

レイリー長とは、最小スポット径を維持する距離を表す。焦点深度と同義である。詳しくは最小スポット径 w_0 が $\sqrt{2} w_0$ になるまでの距離であるが、これは次式で表される。

$$z_R = \pi w_0^2 / (M^2 \lambda)$$

レイリー長はスポット径の二乗に比例する。スポット径(半径)が $10\ \mu\text{m}$ のフェムト秒レーザーの場合、3.8 mmとなる。共焦点距離(コンフォーカルパラメータ)という言葉が用いられることもあるがこれは、レイリー長を2倍した値である。

●出力・パルスエネルギー・フルエンス・強度

レーザー光線の強さを表す諸パラメータについて説明する。出力(平均出力)とは1秒間当たりのエネルギーである。したがって、繰り返し周波数とパルスエネルギーの乗数となる。

$$P = E \times \nu$$

P は出力(W)、 E はパルスエネルギー(J)、 ν は繰り返し周波数(Hz)である。出力を増加するためには、パルスエネルギーを増加するか、繰り返し周波数を増加するかの方々の方法がある。レーザー選定において、加工速度を高めることが目的のときには、出力を増加するよ

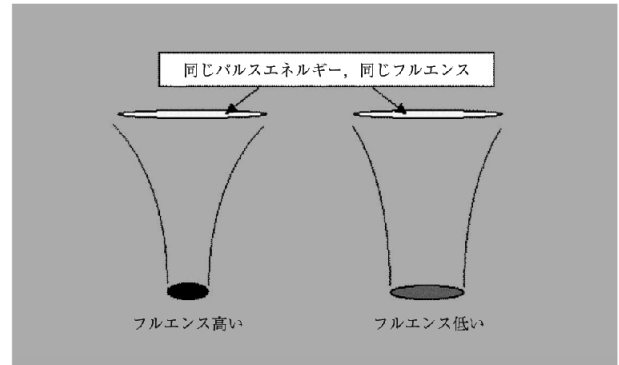


図4 フルエンスの説明図

り、繰り返し周波数を増加した方がよい。

フルエンスとは、パルスエネルギーを面積で除した値である。

$$F = E/S$$

F はフルエンス(J/cm^2)、 S は面積(cm^2)である。加工レートは、フルエンスの関数であり、パルスエネルギーの関数ではない。同じパルスエネルギーを用いた場合、集光面積が小さければフルエンスが高いため加工レートが高く、集光面積が大きければレートが小さい。したがって、大面積のパターン加工の場合は、高エネルギーパルスが必要になる。例えば、 $10\ \mu\text{m}$ に集光する時と $100\ \mu\text{m}$ に集光する時に、同じ加工レートを得るためのパルスエネルギーは100倍異なる。図4に、フルエンスを直感的に理解するための概略図を示す。

加工レートの最適化において、フルエンスと繰り返し周波数を配慮する必要がある。加工に必要なフルエンスは材料によってばらつきがあるが、おおよそ $1\text{J}/\text{cm}^2$ 程度である。フルエンスが特定できれば、所望の集光スポットサイズから、必要なパルスエネルギーを決定することができる。このようにすれば、オーバースペックなレーザーを選定するリスクを回避できる。

最後に、強度について触れる。強度はフルエンスをパルス幅で除した値である。

$$I = E/(St)$$

I は強度(W/cm^2)、 t はパルス幅(sec)である。パルスエネルギー1 mJ、100 fsのレーザーを直径 $20\ \mu\text{m}$ に集光した場合、強度は $10^{15}\ \text{W}/\text{cm}^2$ を超える。フルエンスにするとただか $0.3\ \text{J}/\text{cm}^2$ である。この物理量は、マルチフ

光子吸収のメカニズムを理解するときに重要である。

3 フェムト秒レーザー装置

● MOPA について

加工用フェムト秒レーザーは MOPA (Master Oscillator Power Amplifier), つまり, 発振器と増幅器の線形構成をとる。MOPA 構成をとる理由は, 発振器単体から十分なエネルギーを取り出せないことによる。発振器単体から十分なパルスエネルギーを取り出せない理由はふたつある。ひとつは, モード同期の安定化と高出力化の両立が難しいことであり, ふたつめは, 共振器内光学素子の損傷が避けたいことである。増幅器では, モード同期を行う必要がないので, 自由に光学設計が行える。ビーム面積とレーザーの時間幅を広げることによって, 各オプティクス上での実効強度を一万分の一以下に下げ, 光学損傷を避けている。フェムト秒レーザーの場合, 増幅器の前後にストレッチャー・コンプレッサと呼ばれる光学系を使い, 時間幅の拡大・圧縮を行う。本方式はチャープパルス増幅方式と呼ばれている。図5に構成図を示す。

● 発振器

発振器は, 微弱なフェムト秒レーザーパルスを生じさせるための装置である。シードレーザー装置あるいはシーダーと呼ぶことも多い。装置形態として多く採用されているのは, 連続発振グリーンレーザー励起のチタンサファイアレーザーか, エルビウム添加ファイバーレーザーである。どちらも, フェムト秒パルスの発生に十分な利得バンド幅を持つ。歴史的にはチタンサファイアレーザーが古い, 最近の技術革新の結果, 安定性・寿命に

優れたファイバーレーザーが多く用いられ始めている。モード同期発振器には, モード同期した時のみ発振条件が満たされるような仕組み(カーレンズ, 可飽和吸収体)を利用する。

ファイバーレーザーは部品点数が少なく, 小型で, 安定性が高く, 調整部位がないというメリットがある。チタンサファイアレーザーは, 平均出力が高く, パルス幅が短いという利点がある。ちなみにサイバーレーザー社では, アイシン精機イムラアメリカで開発された低価格・高安定・長寿命・小型なフェムト秒ファイバーレーザーのカスタムオーダーに応じている。

発振器の繰り返し周波数は, 共振器の光学的な長さによって決まる。なぜなら, 共振器長によって, 存在する縦モード間隔が決まるからである。共振器が長いほど多くの縦モードが存在できる。縦モードが多いと, 干渉縞が疎になり, 繰り返し周波数が小さくなる。チタンサファイア共振器の場合, 2 m のとき 80 MHz となる。ファイバーの場合は, 1.2 m のファイバーを直径 10 cm に巻きつけたものが共振器となりこの場合 50 MHz である。

● 増幅器

増幅器は, 微弱なフェムト秒レーザーパルスを増幅するための装置である。エネルギーを蓄えたレーザー媒質(反転分布のある利得媒質)に, レーザーパルスを通すと, 誘導放出によりエネルギーがトランスファーする。ファイバーの限界は, フルエンスによる材料損傷が決定付けている。マルチモードファイバーを用いても 10 μ J が限界であり, 高エネルギー化には向かない。さらにマルチモードファイバーは, 偏光特性の劣化や空間品質の劣化が避けられない。そこで, 数 10 μ J レーザーをターゲットにした場合, レーザー結晶を用いた増幅器を考慮する必要がある。

一方で, レーザー結晶を用いた増幅器では, 結晶サイズを大きくすることで高エネルギー化が可能である。チタンサファイアを用いた場合, 日本原子力研究所では 30 J を超えたものまである。レーザー増幅器の種類は, 線形増幅器, マルチパス増幅器, 再生増幅器の3つがある。線形増幅器は増幅を一回行うものであり, マルチパス増幅器は多重回行うものである。増幅においては, レーザ

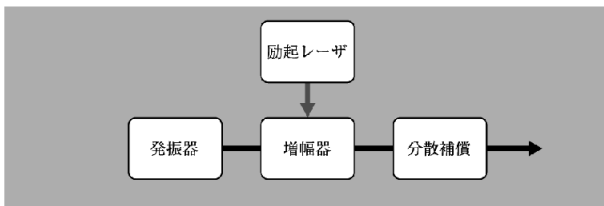


図5 フェムト秒レーザーの内部構成

一光としての3つの性質（時間特性、周波数特性、空間特性）を維持しようとする。マルチパス増幅器では、蓄積エネルギーが全て取り出せるまで利得媒質を通過させている。

再生増幅器は共振器構造をとっている。線形増幅器やマルチパス増幅器と最も異なる点はこの構造にある。増幅器への取り込み・取り出しは電気光学素子あるいは音響光学素子で行われる。再生増幅器では、利得媒質を10数回往復させることによって、レーザーパルスエネルギーを10万倍以上増幅する。再生増幅器と線形／マルチパス増幅器との性能の違いは、増幅中に M^2 値が改善する点と、パルス間安定性が励起レーザーのパルス間安定性より改善される点である。このような特長の原因は、シングルモード共振器内で増幅することと、利得と損失がバランスしたところでパルス出力することによる。ただし、損失を与えながら増幅する構造になっていることにより、蓄積エネルギーから取り出せる割合はマルチパス増幅器より劣る。

どのような増幅方式においても、発振器からのパルス列は間引きして増幅する。この理由はふたつある。ひとつは、レーザー媒質に十分なエネルギーを蓄積するための時間が必要になるからである。ふたつ目の理由は、励起レーザーである。励起レーザーのパルス幅は、レーザー媒質の自然放出寿命より短い必要があり、必然的にQスイッチレーザーになるが、このレーザーの繰り返しが1～100 kHzである（Qスイッチレーザーの動作については次回説明する）。

レーザー媒質として、チタンサファイアの他にYb:YAG, Cr:LiSaF, Nd:ガラスレーザーがあるが、フェムト秒を発生するのに十分なバンド幅、熱的安定性、高損傷閾値を併せ持つのはチタンサファイアのみである。

サイバーレーザー社は、非常に高い安定性を有する再生増幅器を開発した。この増幅器を機軸に、RD部門に需要の多い1 kHz-1 W (IFRIT)に加え、バイオ研究向けの世界最高繰り返しのパルスレーザー励起再生増幅器(IFRIT-BIO: 20-40 kHz)や、産業向けの世界最大出力の再生増幅器(FS-10: 10kHz/10 W)を製品化している。図6に、フェムト秒レーザー製品の性能分布表を示す。強調されたものが、当社製品の性能である。丸印で示さ

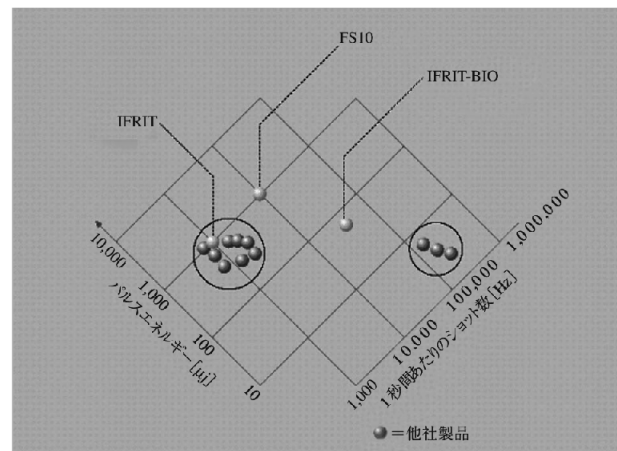


図6 フェムト秒レーザー性能分布

れた領域内にあるのが、これまでに市販されているレーザーの性能である。入手しやすい部品を組み合わせ増幅器を構築していたために、市販品の性能分布が偏っていた。

●励起レーザー

励起レーザーは、増幅器を励起するための装置である。要求される性能は、安定・長寿命・メンテナンスフリーの3点である。光の性質として重要なパラメータは、480 nm～550 nm帯、ナノ秒パルス、高パルスエネルギーの3点である。当部位は、発振器、増幅器に次いで重要な部位である。励起レーザーは、効率と熱レンズのマネジメントに対する設計論の確立が重要である。通常フラッシュランプ励起レーザーが用いられているが、サイバーレーザー社では自社開発したLD励起固体レーザー、Sivaシリーズ（図7）を励起光源に用いている。励起レーザー部分に関する詳しい解説は第2回、第3回を参照



図7 ファイバー出力型励起用グリーンレーザー

されたい。

●フェムト秒レーザー

図8に、サイバーレーザー社より製品化されている装置概観図を示す。1 kHz 1 mJのフェムト秒レーザー“IFRIT (イフリート)”は、2001年に開発をスタートした。装置名称は、フェムト秒レーザーを液体中へ集光するとビームがゆらゆらと燃えるように見えることより、ギリシャ神話の炎の神を指す名称を参考にして名付けた。IFRIT-BIOは、バイオテクノロジー産業向けという意味合いを込めている。FS10は「フェムト秒・10 W」の規格名称である。

当社製品の筐体構造は、外部環境の変化が光学系に伝わらないようになっている。一方で、光学系の耐環境許容幅が十分大きく、外部環境が少々変化しても出力安定性へ影響しないようになっている。光学共振器は、熱レンズ補償系の光学設計を独自開発しており、励起レーザーの指向性安定性（ポインティング安定性）やビーム品質変化に強く、フェムト秒レーザーとしては驚異的な安定性（100時間0.9%）を実現している。さらに、損傷に対する許容設計も十分なされている。損傷原因は空気中のコンタミによるものが多いが、当社レーザーは全てクリーンルームにて製造・密閉しており、問題を解決している。以上のような製品開発の結果、図9に示すような2,000時間の連続動作において無調整運転を続けている。2,000時間という数字は、一日8時間、年間250日間の使用に相当する。現在、一万時間の無調整運転を試験中であり、弊社工場内で24時間運転を続けている。本試験は2004年6月に完了する予定である。

サイバーレーザー社のフェムト秒レーザーシステムは、各装置が全て中央制御器で管理されている。ユーザーインターフェースは、分かりやすいタッチパネル方式



図8 フェムト秒レーザー装置概観図

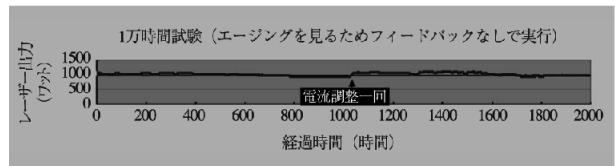


図9 連続運転による一万時間運転での出力変化測定（現在2,000時間）

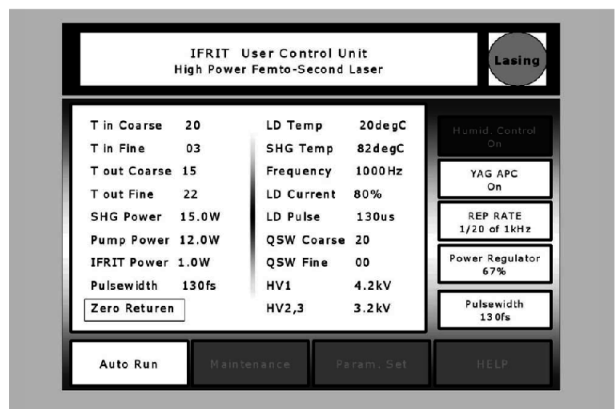


図10 タッチパネル操作画面

になっており（図10）、通常はON/OFFボタンを押すだけで、ヘッド内部の装置が順番に動き出すようになっている。同じタッチパネルにメンテナンスメニューも統合されていて、外部での大幅な温度変化や衝撃があった場合は、簡単操作で復帰できる。また、出力調整、パルス幅調整、周波数制御の機能も組み込まれており、要求仕様に応じて機能付加が可能である。ユーザーインターフェースはタッチパネルの非常にフレンドリーな操作方式をとっている。

フェムト秒レーザーが実用化されるためには、出力・パルス幅などのレーザー性能だけでなく、装置の安定性、信頼性、機能性、ユーザビリティ、価格、保守体制の完備が絶対条件と考えている。当社では、産業応用を第一優先に考えており、ハンズフリー化、高安定化、長寿命化、低コスト化、そして完全な納品後サポート体制を志向している。

●位相制御

周波數位相と波面（空間位相）を制御することにより自由自在にレーザー光線の性質を操ることができる。周

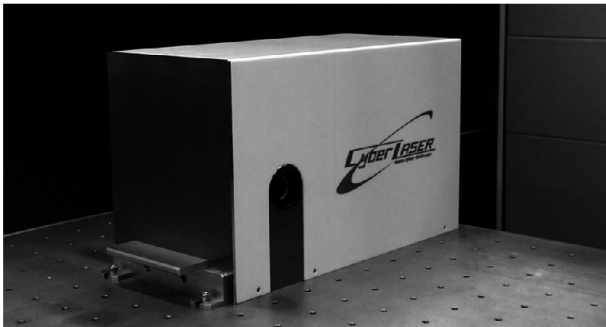


図11 空間位相変調器

波數位相の制御によって、例えば100 fsのパルスを200 fs間隔で200 fs幅の3つのパルスにすることや、ガウシアン波形を矩形や三角形にすることができる。同様なことは、波面制御においても可能である。一般的に、レーザーの強度分布はガウシアン分布を取るが、位相操作により丁寧に集光点での強度分布を操作することで、加工痕を任意形状にすることができる。

サイバーレーザー社では、空間位相変調器を製品化している。図11に、装置概観図を示す。これは理化学研究所レーザー物理工学研究室で開発されたものであり、サイバーレーザー社がライセンス生産している。本製品には、波長分散素子、4f光学系、制御用PC、オート最短パルス発生機能が標準装備されており、ユーザーは光を所定のポートに入力し、PC画面上で各位相を制御するだけで所定の機能が利用できる。本製品は、10 mJ以上の高出力レーザーに使用可能である。これまでの液晶を用いたものは、1 μJレベルが最大であり実用に耐えられなかった。当社製品は、紫外線で用いることができるのも利点であり、下述の波長変換器と組み合わせて使うことも可能である。

●波長変換

波長変換により、レーザーの波長を紫外から赤外まで自由に変換することができる。波長変換においては、本シリーズ第3回で見たとおり位相整合を考慮する必要がある。フェムト秒レーザーを波長変換する難しさは、そのパルス幅の短さにある。100 fsのフェムト秒レーザーからフェムト秒紫外レーザーを発生させるとき、群速度ミスマッチによるパルスのずれが生じる。特に、第3高

調波を発生させるときは、元のレーザーと第2高調波と第3高調波の3つのパルスに対して位相整合と群速度整合を両立しなければならない。サイバーレーザー社では多重周回による波長変換方式である光パラメトリック発振技術さえもすでに開発済みであり、シングルパスの第3高調波発生は標準製品として提供可能である。

4 レーザー加工

●加工プロセス

第8回で詳細は説明するとして、ここでは基礎的な考え方のみを説明する。

物質にエネルギーが加えられると温度上昇が発生し、固相から液層、液層から気相へ状態変化し、結果的に加工が完了する。このようなモデルは図12で説明できる。ちなみに、このような状態変化は、人によっては加工と呼ぶこともあるが、損傷と呼ばれることもある。その人が状態変化を望むかどうかで呼び方は変わる。このモデルに基いて、加工閾値のパルス幅依存性を考察する。同じエネルギーを持ったパルスを考えよう。パルス幅が短いと、入力している最中での熱拡散が少ないので、入熱効率が上がる。したがって、加工閾値（フルエンス＝エネルギー／面積）はパルス幅が短ければ短いほど少なくなる。経験的には、パルス幅と熱拡散係数のふたつの値で定量的に評価できる。加工閾値は、次の式で現される。

$$F_h \propto \sqrt{\tau} \times D_t$$

ここで、 F_h は加工閾値、 τ はパルス幅、 D_t は熱拡散係数である。このモデルは非常に多くのレーザー加工の実験研究に適用され実証されてきた。適用対象は、類似パルス、Qスイッチ、モード同期発振を問わず、炭酸ガス

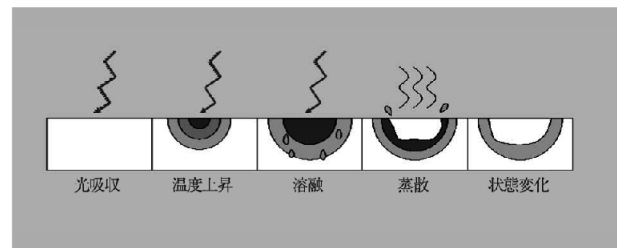


図12 レーザー蒸散モデル

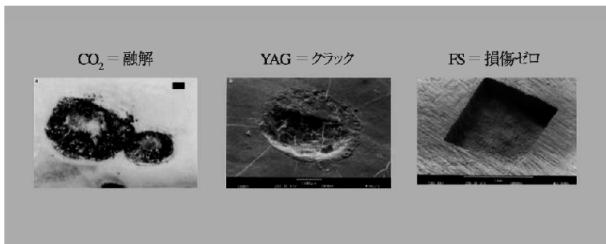


図13 レーザーを用いた加工例：対象歯牙
(M. Niems, "Laser-Tissue Interactions – Fundamentals and Applications," Springer 1996.)

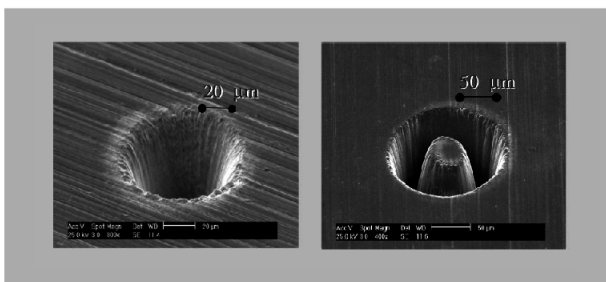


図14 フェムト秒レーザーを用いた金属材料へのノズル加工（サイバーレーザー）

レーザー，YAGレーザー，ファイバーレーザー，チタンサファイアレーザー，エキシマレーザーなどである。

パルス幅がナノ秒オーダーで線形吸収が小さい場合，上記モデルで現されない物理現象が混入してくる。高強度があるがゆえ誘電破壊が生じ，この結果プラズマが発生する。プラズマが発生すると，レーザーとプラズマ，プラズマと材料表面の複雑な相互作用になる。この場合，加工閾値は誘電破壊閾値で計算される。

さらに，パルス幅がピコ秒まで短くなり，なおかつ材料に線形吸収が少ない場合，ナノ秒加工とは違った状況になる。プラズマの発生はエネルギー入力後100 ps～1 nsで始まるので，このパルス幅領域ではプラズマとレーザーの相互作用がない。この場合，加工特性を劣化させる原因はフォノンカップリング（電子と格子の相互作用）である。フォノンカップリングはレーザー照射後1～2 psの時間スケールで発生する。

フェムト秒の場合，フォノンカップリングを回避することができる。これにより，フォノンカップリングが誘発する熱変性などを最小限に抑えることが可能になる。短時間に十分なエネルギーを与えることによって，フォノンカップリングのプロセスを経ないで電離が可能である。

しかしながら，フェムト秒レーザーでも線形吸収を持つ材料に対しては，上記加工閾値モデルが適用できる。ただし熱効果は極端に最小化されており，熱変性層は数100 nm以下と言われている。このプロセスは様々な材料に適用されており，数多くの論文発表がある。例えば，図13は，連続発振炭酸ガスレーザー，ナノ秒YAGレーザー，フェムト秒レーザーのそれぞれで，歯牙を照射した例である。従来型のレーザーでは融解，クラック発生があるのに対して，フェムト秒レーザーでは熱影響が認められない。図14は，金属にノズル加工を行った例である。周辺部分での熱変性がミクロンオーダーでも全く見られない。

●マルチフォトン吸収

パルス幅が短くなり，強度が高まるとマルチフォトン吸収という新たな物理プロセスが発生する。前回までの解説記事では「吸収させるためには波長チューニングが必要」ということを述べたが，フェムト秒レーザーには波長チューニングを行う必要がなく，マルチフォトン吸収により，透明な材料にも吸収される。このときの吸収率は，N光子吸収の場合は，強度のN乗に比例する。これは，1970年代に発見されている物理現象である。

マルチフォトン吸収を利用すると，次のふたつの特徴的な加工が可能になる。①ビーム径より小さな領域を加工できる，②透明物質の内部加工が可能になる。これらは，強度の強い領域のみで吸収が生じるといった特異な性質によってもたらされる。面内強度の中心部分のみが強いときはビーム径より小さな部分で吸収が生じ，熱拡散が小さいという特徴と合わせて，結果的にビーム径より小さな領域で加工痕が残る。

この現象はフェムト秒に限らずナノ秒でも観測し得る現象である。ただし，ナノ秒の場合は，マルチフォトン吸収が発現するより低い強度レベルで，プラズマ発生してしまう。結果として，ナノ秒レーザーではマルチフォトン吸収による加工は発現しずらく，そのような報告は非常に少ない。

誘電破壊閾値よりマルチフォトン加工閾値が低いような特殊な状況を容易に実現するのは，フェムト秒レーザーパルスのみということになる。フェムト秒レーザーの

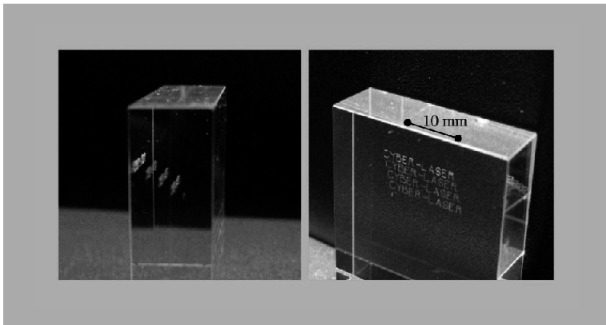


図15 フェムト秒レーザーを用いたガラス内部加工

マルチフォトン吸収を利用した高付加価値加工の例は数多く研究発表されている。光通信部品の製造がその例である。図15は、ガラス内部加工例である。

●加工技術の産業化

レーザー加工の大きな流れとして、1064 nm から 532 nm そして 355 nm へと要求仕様の高度化が進んでいる。世界の加工市場としては、今後1～3年以内に266 nm・213 nm とフェムト秒の共存状態になると考えている。当社ではこれまでフェムト秒加工の研究開発のアウトソースや装置レンタルを受けてきた。2002年に二十数件、2003年に百数十件に応じている。

5 最後に

以上で、フェムト秒レーザー技術を理解するために必要な3つの項目、すなわちフェムト秒レーザー光線、フェムト秒レーザー装置、フェムト秒加工モデルをそれぞれ説明した。本稿を機に、一度本技術に触れることをご一考いただければ幸甚である。

■ Femtosecond Laser Technology

■ Yusuke Tamaki

■ Cyber Laser Inc. Principle Researcher



タマキ ユウスケ

所属：サイバーレーザー(株) 研究開発部 主任研究員

連絡先：〒106-6034 港区六本木1-6-1 泉ガーデンタワー 34F

Tel.03-3560-3803(内線11) Fax.03-3560-3804

E-mail : tamaki@cyber-laser.com

経歴：1996年慶應義塾大学工学部卒業、2001年慶應義塾大学後期博士課程修了。その間、理化学研究所レーザー物理工学研究室にて高強度フェムト秒レーザー装置の開発、高出力コヒーレントXUV光源の研究に従事。2001年サイバーレーザー株式会社入社。現在、同社主任研究員として国産レーザー産業の育成を目的としたビジネスを行っている。レーザー学会第19回講演奨励賞、第46回応用学会奨励賞、慶應義塾大学理工学研究科藤原賞、第15回中小企業新製品賞奨励賞、趣味はコミュニケーション。

学研究所レーザー物理工学研究室にて高強度フェムト秒レーザー装置の開発、高出力コヒーレントXUV光源の研究に従事。2001年サイバーレーザー株式会社入社。現在、同社主任研究員として国産レーザー産業の育成を目的としたビジネスを行っている。レーザー学会第19回講演奨励賞、第46回応用学会奨励賞、慶應義塾大学理工学研究科藤原賞、第15回中小企業新製品賞奨励賞、趣味はコミュニケーション。