

最新固体レーザーの高信頼性技術

サイバーレーザー(株)
中村 新

1 はじめに

固体レーザーはランプ励起式 YAG レーザーが市場に投入されて 20 年以上が経過し、レーザーマーキング、レーザー溶接などの用途において一定の地位を築いてきた。一方、近年半導体レーザー励起の固体レーザー（以下 LD 励起固体レーザーと略す）の出現によってレーザーの小型化、高効率化（投入電力と利用可能な光出力の効率）が図られてきている。しかし、固体レーザーの信頼性は一般の工作機械や組み立て機械に比べると低く、「レーザーは信頼性が低い」「扱いにくい」というイメージがあり、新しい加工用途への採用がいまひとつ広がらないという実態がある。本稿ではそのような実態を打破すべく、UV レーザーやフェムト秒レーザーなどの最新式の LD 励起固体レーザーの信頼性について述べることにする。2 章において信頼性の一般論に触れ、3 章において固体レーザーの信頼性をつかさどる構成要素について、4 章においては信頼性向上のための課題について、5 章においては今後の方向性について、6 章において全体をまとめる。

2 信頼性とは

2.1 品質と信頼性

品質とは「品物またはサービスが使用目的を満たしているかどうかを決定するための固有の性質・性能の全体

(JIS)」と定義されており、ユーザーの期待にどれだけ適合するかという製品やサービスの良さ、ということになる。一方信頼性とは、時間軸を意識して「将来のある時点でその機能を発揮している確かさ」と一般的に解釈されている。つまり、最初はうまく動いているのだけど、時間がたつうちにだんだん動きがおかしくなる、ついには全く動かなくなる、というような状態を「信頼性が悪い」というわけである。概念的には品質のほうが広くて信頼性をも含んで「品質」と解釈されている。

2.2 故障率曲線

信頼度を語るときに欠かせないのが故障率曲線である。ここでいう「故障」とは「対象が規定の機能を失うこと (JIS)」と定義されており、偶発的な故障と寿命的な故障を両方含んでいる。さて、故障率曲線は一般的に図 1 に示すような「バスタブカーブ」を描く。これは人間の寿命によくたとえられるが、幼児期は死亡率が高く、

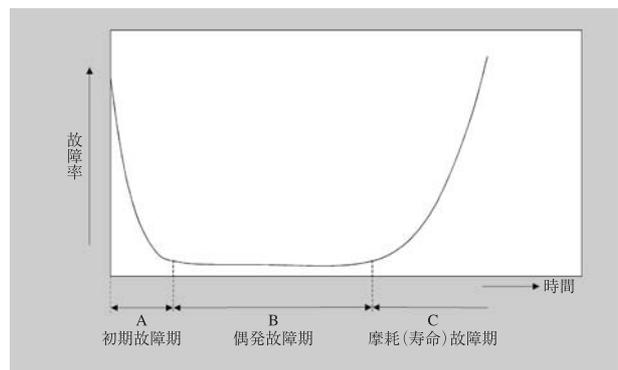


図1 バスタブカーブ

青年から壮年期は一定の低い死亡率で、老年期になると急激に死亡率が高くなるというカーブである。LD 励起固体レーザーの故障率も典型的にこのバスタブカーブに乗る。すなわち、製品を組み立て直後、最初のうち（期間A）は初期故障が多く見られる。この期間は数分から数十時間である。初期故障の時間が経過した後はしばらくの間低い故障率で落ち着く（期間B）。この期間はレーザーの波長や出力によって異なるが数百時間から数万時間である。期間B 経過後は寿命部品が故障しますので、故障率が急激に高くなってくる（期間C）。レーザーの故障は多くの場合光出力の低下であるが、突然光が出なくなる、あるいは一部の機能が動かなくなるという故障モードも存在する。

3 固体レーザーにおける信頼性の因子

3.1 固体レーザーの構成

図2に代表的固体レーザーである、UVレーザーの代表的構成を、図3にフェムト秒レーザーの代表的構成をブロック図で示す。フェムト秒レーザーも再生増幅器のレーザー媒質の励起光を作り出すグリーンレーザーの構成は基本的にはUVレーザーと同じである。

3.2 固体レーザーの故障因子

故障要因として考えられる要素を前述のバスタブカーブに照らし合わせて、初期故障、偶発故障、磨耗故障それぞれの因子について説明する。

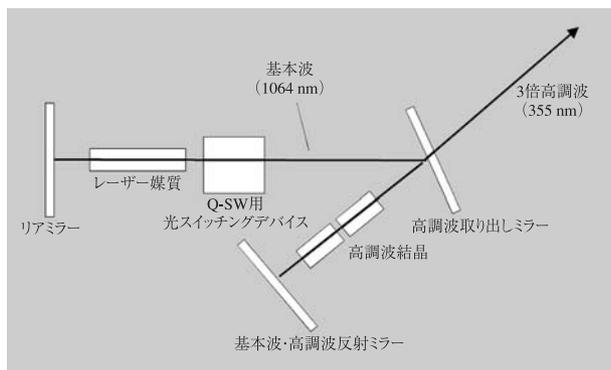


図2 UVレーザーの構成例

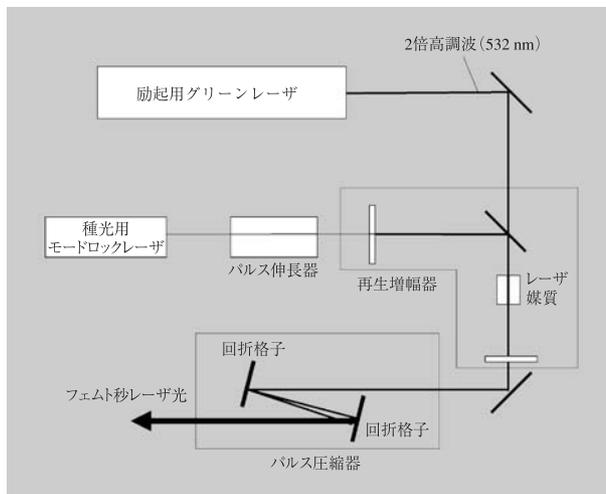


図3 フェムト秒レーザーの構成例

3.2.1 初期故障の因子

初期故障として最も起こりやすい部位は、レーザー媒質、ミラー、レンズ、光スイッチングデバイス、高調波結晶などの光学部品である。故障要因はほとんどの場合光によるダメージである。レーザー媒質や光学部品は物質ごとに定まる一定のダメージ閾値を有しており、これ以上の光強度が印加されると極めて短時間でダメージを受ける。光強度は、時間的空間的なピーク光強度で決まる。つまり、パルス光タイプのLD励起固体レーザーにおいては、平均出力の大小よりも、レーザー内部のビーム径が細く、パルス幅が短いほどピーク光強度は高くなりダメージを発生しやすくなる。

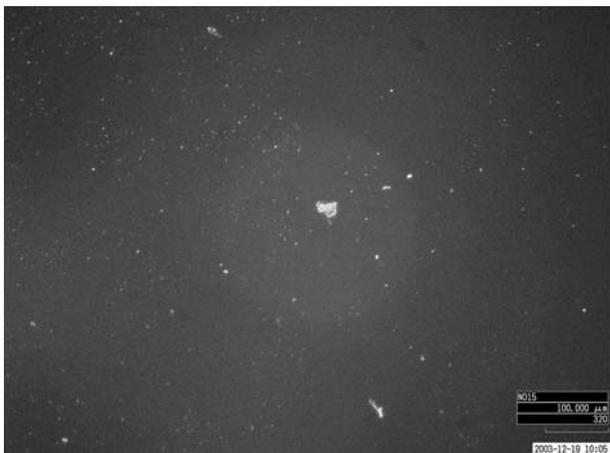
ダメージはほとんどの場合光学部品の表面に発生する。表面は何らかのコーティングがなされているが、コーティングがダメージを受ける場合が多い（図4）。これらのダメージは本質的に物質が持っている限界値はやむを得ないとして、限界値以下でもコンタミネーションや微小欠陥が中心となってダメージを発生させる場合がある。

3.2.2 偶発故障の因子

大きくは電気的因子、機械的因子、光学的因子に分けられる。電気的因子で最も多いのが一般の電子機器と同じく、はんだや圧着などの接合部の断線である。機械的



(a) 高調波結晶のダメージ



(b) 共振器ミラーのダメージ

図4 ダメージの例

因子としては、モーターやソレノイドを用いた可動部分の故障が主である。光学的因子としては、ホコリなどのコンタミネーションや微小欠陥が中心となって長期的にダメージを進行させる場合がある。偶発故障期の故障はお客様にとっては最もたちが悪く、予期せぬダウンタイムを招くことになる。したがって、偶発故障期の復帰の対策をスピーディーに行うことは非常に重要なことである。

3.2.3 磨耗故障の因子

光学的因子が主である。LD 励起固体レーザーの場合、もっとも寿命の短い部品がUV レーザーの高調波結晶で

ある。特に3倍高調波（355 nm）結晶は今のところ光強度による数百時間から1000時間での劣化があり、多くのメーカーは「結晶シフタ」と呼ばれる移動機構を設けて、劣化部位を少しずつずらせることによって、レーザー全体を長寿命化している。また、UV レーザーにおいて波長が短くなればなるほど光子エネルギーが高くなるので、全ての光学部品や高調波結晶は材質自体、コーティングともに光による劣化が発生する。ここでも、光強度が高いほど早く劣化する傾向にある。

またこれらの光学部品以外に、励起用LD自体も劣化する。LDの各種故障モードについては、LDメーカーによって深く追求されており、初期故障、磨耗故障のそれぞれの因果関係は概ね把握されている。LDも光学部品同様、使用する光出力が高いほど劣化は早くなる。

4 信頼性向上のための現状と課題

これまで述べたように、初期故障期、偶発故障期、磨耗故障期のそれぞれにおいて部位はほぼ特定できている。これらにおける課題を、設計、部品、組立工程、しくみという観点で述べる。

4.1 設計における課題

設計においては品質や信頼性に関する設計技術、管理技術の導入が課題である。自動車や電子機器において長年培われてきた田口メソッドに代表される品質工学という概念、すなわちばらつきを含めたコストと品質というトータル概念の導入やFMEA（Failure Mode and Effects Analysis）の導入が課題である。

品質工学の例を紹介すると、たとえば初期故障の主要因であるダメージ閾値を超えてしまうことによる故障においては、ばらつきを含めた応力-耐量（ストレス-ストレングス）の設計が必要である。すなわち図5に示すように、部品側のダメージ閾値のばらつきに対して、出来上がった共振器における部品表面上の光強度が、ばらつきを考慮したうえで上回らない設計が必要である。レーザーの場合にやっかいなのは、ビームプロファイルやパルス幅はレーザーの個体間のばらつきに加えて、いったん組み上げてからも、レーザー媒質の熱レンズの

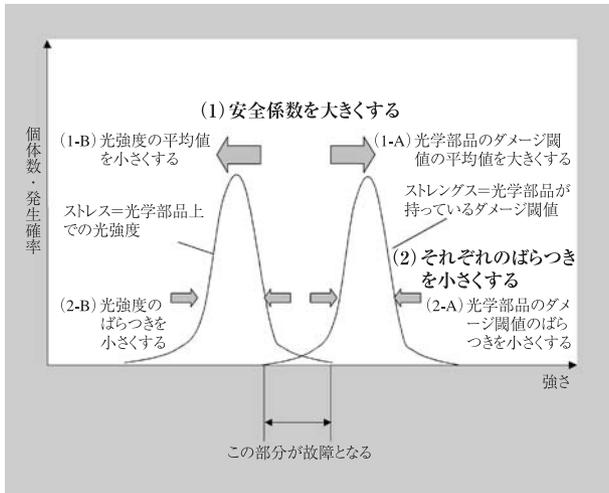


図5 ストレス-ストレングス設計

影響や筐体の微妙なゆがみによってある程度変化することである。変化する最悪値でも部品のダメージ閾値を上回らないような設計が必要となってくる。そのためには、図中(1)のようにそれぞれの平均値を離す(安全係数を大きく取る)ということと同時に、図中(2)のようにそれぞれのばらつきを減らすことも重要である。つまり、図中(2-A)部品側のダメージ閾値のばらつきを減らすための部品品質管理と、図中(2-B)光強度のばらつきを減らすための設計技術、たとえばパラメータ設計手法など

が有効である。

次にFMEAの例を紹介する。FMEAとはプロジェクトマネジメント手法でいうところの、リスク分析と類似の手法であり、故障発生因子において故障が発生したときに、装置全体にどのような悪影響を及ぼすかということ推定し、重要なものから対策を打つ、という手法である。図6にUVレーザーのFMEAの例を示す。

また別の設計課題の例として、高調波結晶の光強度の設計がある。高調波結晶は非線形光学素子であるので、高調波の変換効率を高めるためには光強度を上げることが必要だが、光強度を上げるとダメージ閾値を超えるという、明らかなトレードオフ関係にあり、これらのどこに設計値を設定するかということは常に設計者の頭を悩ます課題である。

もうひとつの設計課題の例として、温度変化や振動、機械的外力によるアライメントのずれは、光出力の低下を招くとともに、ビームモードが変化することで逆に部分的に高い光強度をひきおこす事によってダメージを招くこともあり、重要な設計要素である。温度変化などの外乱因子によってもビームモードが変化しにくい、いわゆるロバストな設計が重要である。

さらに、ホコリやアウトガスなどのコンタミネーションと信頼性との関係、あるいはメカニカルな傷や残留応

部品名	機能	故障モード	原因・要因		システム・ユーザーへの影響		考えられる対策	
			発生頻度		重要度 影響度		番号	
YAGロッド	レーザー媒質	端面ダメージ	大	・光強度が設計値をこえてしまう ・部品のダメージ閾値が設計値を下回る	B	組み立て中、スクリーニング中に光出力低下	1A	・部品QC基準を定める ・クリーンルームのクリーン度管理を徹底する ・組み立て中の端面コンタミネーション管理基準を定める ・組み立て手順を定めることにより一時的な光強度増加を防ぐ
				・YAGロッドの欠陥やコンタミネーションが種となってダメージが広がる	A	使っているうちに光出力が次第に低下		
高調波結晶	高調波を作り出す	内部熱レンズ異常	中	・励起光モードの異常により部分的に熱レンズが発生 ・冷却水経路のつまり	B	・ビーム品質が悪い ・ビーム品質が安定しない	1B	・励起用光学部品ホルダの寸法公差の指定 ・冷却水流量と圧力の管理基準を設ける
		端面ダメージ	大	・組み立て調整中に光強度がダメージ閾値を超える	B	組み立て中、スクリーニング中に光出力低下	2A	1Aと同じ
高調波結晶	高調波を作り出す	変換効率低	中	・高調波結晶部品不良 ・温度調節不良	B	・組み立て中、スクリーニング中に光出力低下 ・使っているうちに光出力が次第に低下	2B	・高調波結晶の部品QC基準を定める ・結晶直近温度のモニタリングを行う

図6 UVレーザーのFMEAの例

力と信頼性との関係を把握することで、レーザー共振器の中で使ってよい材料とそうでないもの、使ってよい構造や工法とそうでないもの、を分別していく必要がある。

今後、これらの品質工学的な設計技術の向上を、業界間の技術者の交流や知識データベースの活用などで盛り上げていくことが望まれる。

4.2 部品における課題

LD 励起固体レーザー用の高い光強度で用いられる光学部品の品質保証体制は電子部品と比べるとまだまだの感がある。実際のピーク光強度はおよそ数百 MW/cm²、パルスエネルギーでは数 J/cm² のレンジにあり、これらの値を仕様として十分な信頼水準で保証できるメーカーは少ない。電子部品や光通信用の光学部品と比べると、品質の定義、信頼性試験の方法、故障メカニズムの解明ともにあまり確立できていない。そもそもダメージ閾値という特性は測定しにくいということに加えて、市場が小さいことにも起因しているのであろうが、部品の品質を向上させること、品質保証体制を構築することが部品業界全体の火急の課題である。

4.3 組立工程における課題

組立工程においては、工程ごとの品質の作りこみを確

実にを行うことである。具体的には、初期故障、偶発故障、磨耗故障全ての原因になるコンタミネーションを避けること、工程ごとの手順を正しく定めること、重要な工程においては QC 検査項目を入れること、などであろう。

サイバーレーザー(株)においては、クラス 1000、実力値 100 のクリーンルームを導入するとともに部品の洗浄を確実にすることで組立工程におけるコンタミネーションを避けている。

4.4 しくみにおける課題

しくみにおける課題として、初期故障に対してはスクリーニングの実施が効果的である。偶発故障に対しては一般の電気機器と同様の、設計品質、部品品質、組み立て品質をトータル的に向上させる努力が必要である。磨耗故障に対しては、保守プランを用意し、お客様にも装置の寿命を納得していただきながら現実的な解決を図る必要がある。

また、故障が発生したときの原因の特定と対策を効率よくスピーディーに行うことも重要であり、FTA (Fault Tree Analysis) と呼ばれる故障解析のチャートの活用も有効である。FTA とは部分の故障と全体の故障の関係、別の言い方をすると、故障の原因と結果の全体像をわかりやすい図で表したものであり、故障診断とともに、設

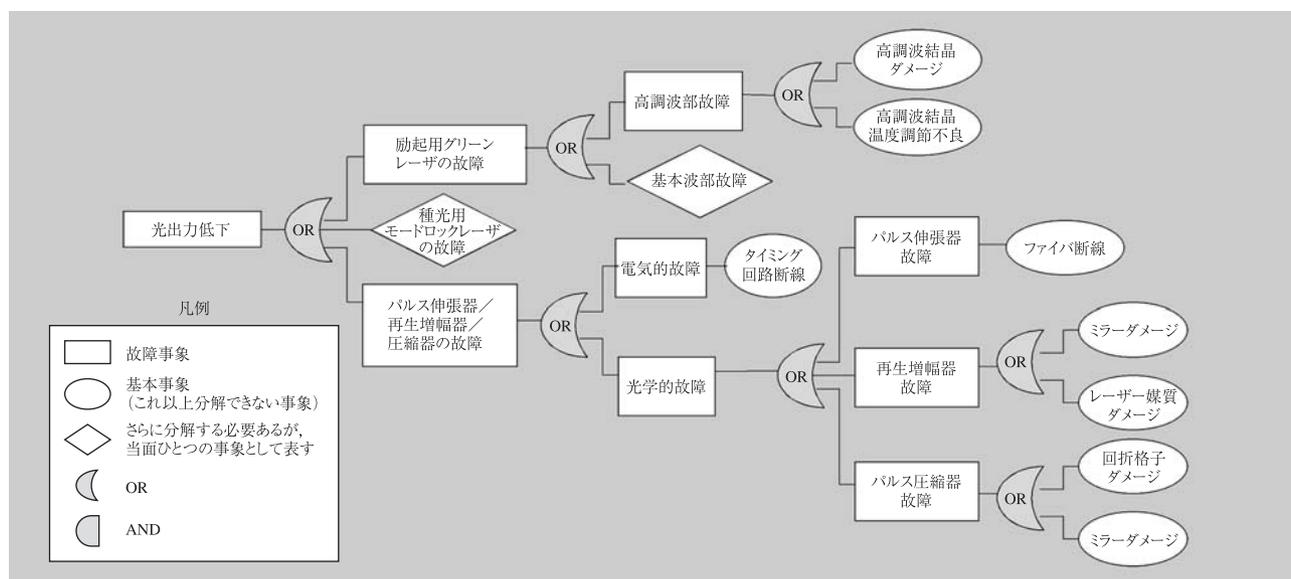


図7 フェムト秒レーザーの FTA の例

計においてどこに重点的に対策をすればよいかという判断にも役立つものである。図7にフェムト秒レーザーのFTAの例を示す。

これらのしくみを、前述の設計品質、部品品質、工程品質の向上とともに組み合わせてトータルな品質マネジメント（ISO9000に代表されるTQM）を展開していくことが課題である。

5 今後の方向性

5.1 信頼性を高める

信頼性を高めるためには、設計、部品、工程それぞれの品質向上が必要である。

設計においては品質工学や信頼性工学の導入が、部品においては部品メーカーとレーザーメーカーの共同体制での品質向上が、工程ではいわゆる工程内品質管理能力を向上することが必要であろう。特に部品品質向上のためには量産部品の検査をコストパフォーマンス良く行うための検査計測器の開発なども必要となるであろう。

サイバーレーザー(株)によるフェムト秒レーザー「イフリート」では長期連続試験を継続しており、図8に示すように、6000時間経過後でもLD電流による補償のみで1Wの出力を維持できていることがわかる。この結果は、総合的な品質向上の成果であるといえる。LD電流による補償は各種の寿命部品のゆっくりした劣化を総合的に補償するものである。

5.2 ダウンタイムを短くする

次に対顧客の観点でいうと、故障してもダウンタイムを短くする工夫が重要である。具体的には、故障が発覚

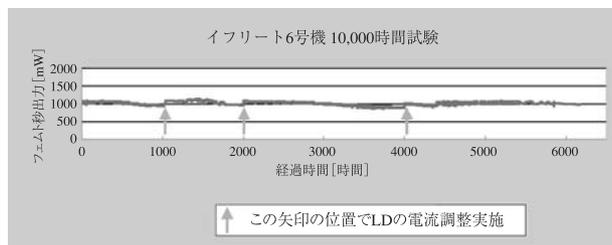


図8 フェムト秒レーザー「イフリート」の長期信頼性データの例

してから現場対策までの時間を短くする組織的工夫、定期点検による予防保全、さらにはリモートモニタリングによるリアルタイムの予防保全、というように進化していくものと思われる。また、別の観点では、装置の設計をユニット交換しやすい構造にすることで、現地での保守作業の時間を短縮することが求められる。

5.3 品質体系を構築する

信頼性を高め客先におけるダウンタイムを短くするためには、構成部品のトレーサビリティ、保守やリモートモニタリングにおけるデータの蓄積とフィードバックのしくみを含んだTQMの構築を進める必要がある。

サイバーレーザー(株)においては、保守契約による定期保守を進めるとともに、「サイバー」という社名の由来にもなっている、リモートモニタリングによる最適予防保全ができる設計と体制の構築を進めていく予定である。

6 まとめ

UVやフェムト秒のLD励起固体レーザーも、研究用途から生産設備あるいは医用機器として長時間安定稼動する用途へと広がりを見せている。ここで、レーザーの信頼性を高めておくことが市場拡大の要であろう。今後いろいろな企業や研究機関がネットワークを組んで、レーザーの機能性能の向上や新用途の開拓とともに信頼性の向上にも取り組み、有用なLD励起固体レーザーが生産や医療の現場で活躍することを願って止まない。

参考文献

- 1) 信頼性・保全性の考え方と進め方 塩見弘著 技術評論者
- 2) トヨタ式未然防止手法 GD3 吉村達彦著 日科技連
- 3) 日立半導体デバイス信頼性ハンドブック

■ Reliability of Advanced solid state lasers

■ Arata Nakamura

■ Cyber-Laser Inc.



ナカムラ アラタ

所属：サイバーレーザー(株) 製造部

連絡先：〒212-0054 神奈川県川崎市幸区小倉
308-10 KBIC 205

Tel. 044-588-3791 Fax. 044-580-3808

E-mail : nakamura@cyber-laser.com

経歴：1982年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。同年立石電機(株) (現オムロン(株)) 入社，光センサーの開発に従事。2003年9月オムロン(株)退職。同年サイバーレーザー(株)入社。趣味：登山