

レーザー製品の安全基準と作業安全

石川レーザー技術士事務所
石川 憲

1. はじめに

レーザー技術は、研究、消費者向け製品、光通信、バイオフォトンクス分野等に広く展開されている。家庭から工業現場まで適用され、専門家以外も日常的に接する状況にあるが、非常に低レベルの光放射でも目や皮膚に深刻な損傷を引き起こす。特に図1のように、網膜上での微小な集光点の形成は障害のもとになる。LEDやランプ製品は、網膜上では比較的大きなスポットの像となるが、これらの光源でも条件によっては網膜に永久的な損傷を与える。特に意図的な露光が行われる医学環境等において、無意識に行われる瞬き動作まばたの嫌悪反応や瞳の収縮などの保護的な反応が目の動作で抑制される場合には、損傷を引き起こしやすい。

非イオン化放射保護 (ICNIRP) に関する国際委員会は、レーザー、LEDやランプなどの非コヒーレント広帯域の放射に対して、皮膚と目に対する安全な最大露光レベルに対するガイドラインを研究し、最大許容露光量を提示している。一般に、波長、露光持続時間、それと損傷の潜在的な場所、網膜上のスポットサイズなどが人体への露光限界を決める最大許容露光量 (MPE) を決定している。国際電気標準会議 (IEC) のレーザー製品の安全基準は MPE を基に導き出される、放射レベルに応じて決められた危険性に応じた、クラスごとの被ばく放出限界 (AEL) により分類されている。

各クラスの放射限界は、安全な露光距離と持続時間、それと目の瞳または双眼鏡やルーペの光束集光能を基に設定された限界 (制限) 開口を設定することによ

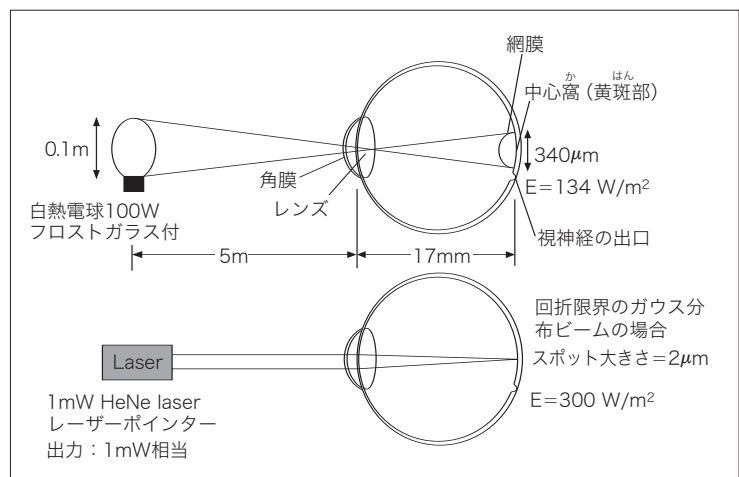


図1 100W ランプと1mW レーザーの網膜上の放射照度比較：平行レーザービームはレンズで網膜に高放射照度 $\sim 300\text{MWm}^{-2}$ で集光されるので危険性が増強される。ランプは光源像が網膜に投影されても入射パワーの割には低放射照度で危険性は低い^{1),12)}。

り決定されている。障害のタイプは放射レベル、波長域に関連付けられている。IEC 国際規格は、光学器具による観察条件を加味したクラスを含め、7段階のクラス分けを採用している。日本のJIS規格をはじめ、欧米各国はその新たな規格の運用によるレーザー製品の安全管理を行っている¹⁾。

2. レーザー事故発生状況

レーザーの発明以来、その事故件数は技術の普及に伴い増加している。アメリカ 1,103 件、日本 39 件、イギリス 34 件、ドイツ 31 件、中国 27 件、フランス 20 件等、2005 年 3 月時点で累計 1,341 件が、レーザーによる目と皮膚の事故として集計されている³⁾。これを見ると、レーザー技術先進国が事故発生件数において上位を

いしかわ けん

表1 JIS C 6802 /IEC60825-1 のレーザー製品の安全基準：レーザークラス分けと特徴

クラス1	組込形レーザー製品のクラス1：被ばく放出を制限するような、筐体やその他のセーフティインターロック等の技術的手段によって組み込まれているレーザーの本来の能力よりも低いクラス1に割り当てられたレーザー製品もクラス1として存在する。インターロックを解除する作業中は危険性の高いクラスのレーザー製品レベルになるので取り扱いには注意がいる。 ※クラス2より高出力のクラスにも組込形レーザー製品は存在することがある。
クラス1M	低パワーレベル、平行大口径ビーム、または広がりビーム 予知できる合理的な条件のもとで裸眼では網膜に達するパワーがMPE未満であり、網膜でのAELはクラス1と同じ。光学機具を用いてレーザー光を集光して観察すると危険となるが、裸眼での観察はクラス1と同じで安全。
クラス2	低パワーの可視光、可視光レーザー（波長400～700nm）で、目の瞬き、頭の回避行動により安全。長時間観察は目に障害を発生する可能性あり、特に青光の長時間観察は光化学的網膜障害で危険。露光時間は0.25秒以下、AELはCW可視出力で $C_6 \times 1mW$ 以下。
クラス2M	低パワー可視光、平行大口径ビーム、または広がりビーム 可視レーザーに適用され、裸眼では目の瞬き、頭の回避行動により安全である。光学機器（双眼鏡またはルーペなど）を用いて観察すると危険、AELはクラス2と同じで安全。
クラス3R	露光時間基準は不可視の場合は100秒間、可視光は0.25秒以下、AELはクラス2（可視域）の5倍、またはクラス1（不可視の波長域）の5倍を超えない範囲のレーザー。偶発の露光は通常危険でない、意図的ビームの凝視は危険。AELはCW、可視域では $C_6 \times 5mW$ 。
クラス3B	クラス3Bに該当するレーザー製品、旧JISではクラス3Bに分類されていたものが、新JISではクラス1Mまたはクラス2Mに分類されるものもある。ビームの目または皮膚への被ばくは危険、見たり触れたりしないこと。AELはCWで0.5W（波長>315nmの場合）。
クラス4	クラス3BのAELを超えた高出力レーザーであり、ビームや散乱光の目または皮膚への被ばくは危険、見たり触れたりしないこと。AELには上限はない。パワー上限は無制限。

占めている。1960年から10年経過ごとに、前の10年間の件数の約4倍の増加率である。職種別事故発生では、科学者、技術者、患者、工場作業員、医師看護師、学生の順で件数が多い。不定形作業や直接ハイパワーを人体に放出する医用機器周辺で発生件数が多い。年齢的傾向はなく、CW（連続波）レーザーではクラス4の光出力域の障害が多いが、パルスレーザーでは高エネルギーのレーザー障害に限定されず、比較的低エネルギーの単パルスでも網膜に損傷を生じる事故が多い。レーザーの種類ではNd:YAGが多く、網膜への危険性が高い。障害部位は、目が70%、皮膚が27%、障害発生時状況では、保護メガネの不使用が目の障害原因の98%を占める。目に後遺症を伴う事例はそのうち約半分である。適正なメガネの着用が、目の事故防止には重要である。図2はNd:YAGレーザーのレンジファインダー使用の網膜焼損事故の眼底写真であり、視力を完全に喪失した例である²⁾。

国内でも、光産業技術振興協会のレーザー安全スクールなどで紹介される事故の傾向は上記内外の傾向と類似している。研究員、大学院生、技術者などが事故にあった件数も多く、YAGレーザー、チタンサファイヤレーザーなどパルスレーザーが多い。視力0.7以下の障害が残る割合は40%を占めている⁴⁾。

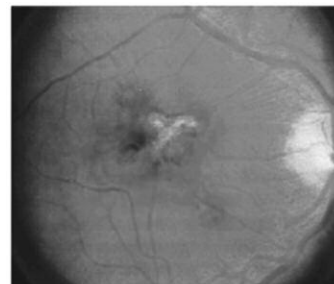


図2 Nd:YAGレーザーレンジファインダーによる完全視力喪失眼底写真例²⁾

3. レーザーによる人体への障害

3.1 目の障害（表1）

目は生体レンズを備えた特異な構造を有し、外部から網膜に向けて進行する光線は波長に依存し、損傷を起こす場合がある。網膜の熱的損傷は、可視光（400～700nm）と赤外線（700～1400nm）の領域で生じ、部分的または完全な視力喪失を起こす場合がある。これらの波長域の光（アパーレント光源）では、目のレンズ作用で直接または鏡面反射されたビームは網膜に達し、微細に集光する。網膜では角膜上の放射照度よりレンズの集光作用で約10万倍の放射照度に増強される（図1）。低いパワーの光源でもレーザーでは網膜上

に放射照度の大きな集光スポットを形成する。紫外線 (<400nm) のレーザー放射ならびに遠赤外線 (>1400nm) 領域の光は、組織の吸収による途中の減衰作用のため網膜まで到達せず、主として角膜に吸収されて損傷を生じ、近紫外線範囲 (315～400nm) の光は、一部が目のレンズまで達し、そこでも吸収され光化学的な白内障の原因になる。

3.2 皮膚の障害 (表1)

皮膚傷害は赤外線または紫外線への露光から生じることがある。赤外線露光については、放射照度に依存し、熱的な損傷または過度の乾燥皮膚を生じる。紫外線の230～380nmの範囲では、日焼け、皮膚がん、皮膚老化の加速等が生じる可能性がある。最も有害な領域はUV-Bとして知られた280～315nmにある。

3.3 そのほかの危険性

電氣的危険性：多くのレーザーが高電圧用の部品を有し、それらは潜在的に致死の危険源となる。高電圧用の部品が関与する場合、適切な立ち入り禁止の措置が必要である。

火災危険性：多くのクラス4のレーザーは燃焼性の物質を発火させることがある。ビームストップと遮へい物の選定とその使用に注意が必要となる。

物質による危険性：レーザー技術関連の研究所は、多くの化学研究所と同じような危険源を多く含んでいる。したがって、化学研究所と類似の注意が必要である。大部分のレーザー色素は、危険な物質と考えられ、適切な毒性、火災に注意する必要がある。レーザー光と物質とのレーザー相互作用は、有毒ガスの生成の危険性がある。適切な排気が必要である。

4. 最大許容露光量 (MPE) と被ばく放出限界 (AEL)^{5),11)}

レーザーに対するMPEは、目に対してのMPEを光化学的と熱的の両方の作用により定められている。青の短波長スペクトル域で10秒以上の露光では、光化学的な作用が熱的作用よりも障害となりやすい。MPEを基準として定められるレーザークラス分けに用いるクラスごとのAELも、目の網膜に対して熱的と光化学的の両方が限界値として規定されている。MPE, AELは露光時間と波長によって細かく規定されている。パルス露光の場合は、パルス1発の露光はパルス幅を露光時間とし

て危険性を評価する。繰り返しパルスの場合は単一パルスのMPEに補正係数 C_5 ($C_5=N^{-1/4}$: N は時間基準または T_2 内の短い方の時間内のパルス数) を乗じた値をMPE, AELとして用いる、これは単一パルスのMPE, AELより低い値で各パルスを厳しく制限する補正係数である。繰り返しパルスや変調レーザーのMPE, AELを求める場合は、

- 1) 単一パルスのMPE, AEL
- 2) 所定放出持続時間に対する単一パルスの平均の出力条件に対するMPE, AEL
- 3) 上記の C_5 を1)で求めた単一パルスのMPE, AELに乗じた値

の3つの条件で求めた値の最も低い値をMPE, AELとして求める。所定時間 T_2 は光源の種類や装置の露光時間で決められる値である。アパーレント光源に対する視角が100mm以上離れて光源を見る場合、視角 α が最小1.5mradより大きいと、最大100mradまでの視角を有する光源のMPE, AELは $C_6=\alpha/\alpha \text{ min}$ 倍、 α が100mrad以上では $C_6=66.7$ 倍まで限界値が増加する。これは分散光源観察のMPEは平行ビームより危険性が低いから大きいMPEが設定される。具体的なMPEはJIS C6802(2005)に掲載されている。

5. 新JIS C 6802 (2005) レーザー製品の安全基準によるレーザーのクラス分け⁵⁾

JIS C 6802(2005)はIEC 60825-1(2001)に準拠し、クラスごとにAELがクラス1と1M, クラス2と2M, クラス3R, クラス3B, クラス4の5段階に定められる。「安全」なクラス1の放射限界は、目のMPEによるAELに等しく、クラス分けのAELは、露光の時間基準をクラスごとに定め、波長、光源の視角が反映された、危険性に応じた製品のクラス分けがなされている。2005年の改正前のJISでは、クラス分けはクラス1, 2, 3A, 3B, 4の5段階であったが、改正後のJISではクラス1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B, 4の7段階に分類された。これらのレーザー製品のクラス分けは、製造業者またはその代理業者の責任とされ、製品の改造を行った者またはその組織は、当該レーザー製品について再度クラス分けおよびラベルの張り付けを確実にを行う責任がある。

なお、JIS C 6802(2005)にはLEDもレーザーと同様の安全基準適用が規定されているが、IECのTC76では

	長時間観察		短時間観察		散乱 反射	皮膚 露光
	光学 器具	裸眼	光学 器具	裸眼		
クラス1	○	○	○	○	○	○
クラス1M	×	○	×	○	○	○
クラス2	×	×	○	○	○	○
クラス2M	×	×	×	○	○	○
クラス3R	×	×	△	△	○	○
クラス3B	×	×	×	×	△	△
クラス4	×	×	×	×	×	×

表2 JIS C 6802(2005)のクラス分けと危険性の目安
×危険, △注意, ○安全

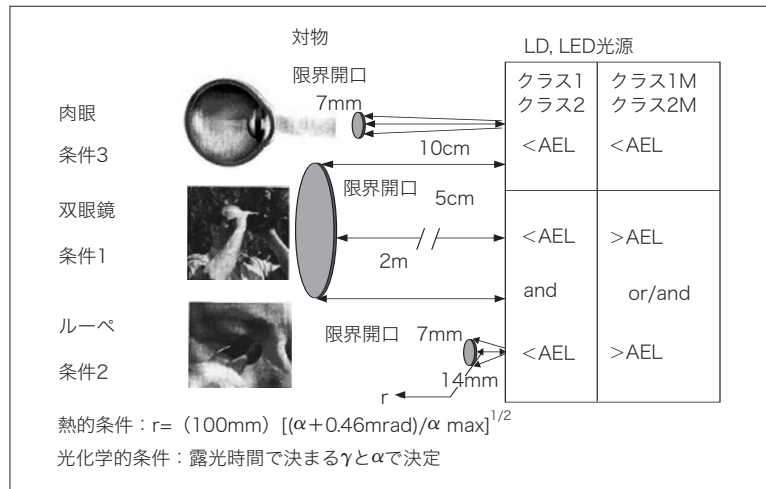


図3 JIS C 6802によるクラス1と1M, クラス2と2Mの判別法ガイド

60825-1 から LED を除いた, 光ファイバー端面の光学器具使用による場合を除外し, LED は IEC62471 を適用するように IEC 60825-1, Ed.2(2007-03)を発行した。

5.1 クラス分けによる7段階の特徴

クラスごとの特徴を表1に, 目に対する危険性の目安を表2に示す。

5.2 クラス1, 2とクラス1M, 2Mの特徴と仕分け方法^{5),6)}

レーザーの波長が400nm～1400nmの範囲(アパーレント光源)のクラス分けでは, 望遠鏡での観察条件1(製品から2m離れて50mm直径の開口が設置される場合の開口通過パワー), ルーペでの観察条件2[光源から開口部までの距離が $r=14\text{mm} \sim 100\text{mm}$ 。 r は光源の視角 α に依存(7.2-1参照)の開口を通過するパワー], 肉眼での直接観察条件3[光源から100mmの位置にある直径7mmの開口を通過するパワーによる放射照度(W/m^2)または放射露光(J/m^2)の測定]の3条件の測定値とクラスごとに規定されたAELとを比較してクラス1, 1M, 2, 2Mが分けられる。条件1, 2, 3のすべての測定値がクラス1または2のAELを超えないなら, 該当のAELのクラス1または2に分類される。条件1または2のいずれかがAELを超え, 条件3を超えなければ該当のクラス1M, または2Mと分類される。ほかの波長域についても測定開口の直径が定められている(図3)。

5.3 クラス3R

新JISのクラス3RのRは要件の緩和(Reduced requirements)を意味する。旧JISのクラス3AのCW

可視光域の放射照度のAEL条件($< 25\text{W}/\text{m}^2$ ならびに $< 5\text{mW}$ の2重条件)の $25\text{W}/\text{m}^2$ が無くなり従来のクラス1, 2と危険なクラス3B, 4の間に置かれる。このクラスは米国におけるCDRHのIIIaとANSIの3aの「 $< 25\text{W}/\text{m}^2$ の場合の“注意”(CAUTION)」または「 $> 25\text{W}/\text{m}^2$ の場合の危険(Danger)」とラベル付けされるクラスが含まれる。可視のクラス3Rレーザーは, アライメント用として医用, 工業, 研究等で広く用いられている。

6. 国際規格IEC 60825-1とJIS C 6802, レーザー光線による障害の防止対策, ほかの適用

IEC60825-1(2007)によりレーザーの製品安全基準からLEDが分離され, 一部の用途を除きLEDはIEC62471が適用基準であるが, 現行のJIS規格には反映されていない。米国の食料医薬管理局(FDA)の認可制度では従来のCDRHのレーザー製品の安全基準の要求事項とIEC基準との二者択一で, IEC文書に従ったクラス分け, ラベルの規定を受け入れると通達している^{7),8)}。米国のFDAでは従来, LEDはランプとして扱われ, レーザー安全製品の基準に従わない。欧州では, 製品は法的に規制された多数のEC指令に準拠しなければならない。IEC文書と同一内容の出版であるEN60825-1がEC指令のもとに適用される。JIS C 6802(2005)は医用レーザー製品を適用範囲からの除外事項としたこと以外はIEC60825-1(2001)と内容が一致している。JIS C 6802(2005)にはレーザー製品安全要件と

使用者に対する要件も記載されており、厚生労働省から都道府県労働局長宛に配布される「レーザー光線による障害の防止対策」(通達基発第0325002号)⁹⁾には、この内容に準じた安全措置事項が制定されている。レーザー安全規格の個別安全規格には、医用レーザー装置の安全基準としてIEC60601-2-22がクラス3Bとクラス4に分類される医用レーザー装置が規定されている。国内では旧厚生省薬審524号「レーザー手術装置について」にガイドが示されている。レーザー加工機の安全基準はIEC/ISO11553に、光ファイバー通信システムの安全性の基準はIEC 60825-2に、情報の伝送用空間伝搬光通信システムの安全性の基準はIEC 60825-12にそれぞれ規定されている。そのほかに経済産業省令¹⁰⁾による、JIS C6802(1997)クラス2相当のレーザー出力1mW以下にパワーを限定した「携帯用レーザー応用装置」(可視光に限るレーザー光を外部に照射して、文字または図形を表示することを目的として設計されたいわゆるレーザーポインター)が消費生活用製品安全法の特別特定製品に指定されている。国の定めた技術上の基準に適合した旨のPSCマークを貼ることが定められている。このため、第三者の検査機関で検査し、合格することが義務付けられている。

7. 最新版IEC60825-1, Ed.2(2007)のレーザー安全基準の主な修正要点^{13),14)}

新版IEC 60825-1 Ed.2は旧版の2001年版から変更された主な内容は、また旧版とほぼ一致した内容のJIS C 6802(2005)との相違でもあり、以下が主な相違点である。

7.1 文書の単純化

1) LED 除外

LEDを60825-1(2001)から除外し、LEDを別扱いとして、LEDはCIE/IEC 62471を適用する。ただし、光ファイバー通信(IEC 60825-2)無線光通信(IEC 60825-12)の要求事項にはIEC 60825-1(2001)の分類が適用される。

2) 使用者への安全指針の分割

使用者の安全指針は、IEC60825-1から分離されたIEC60825-14として2004年に発行されているので削除された。ただし、MPEの章は含まれている。

7.2 クラス分け

1) 発散性ビームの測定距離、測定系の追加

条件2の測定距離条件が、従来の視角に依存した距離 r に対して固定距離70mmに改定された。2001年版では点光源に対する距離は14mm(クラス1, 2, 3R, 3Bに対して)であったが、70mmになったことで、例えば、LDなどの製品のクラス1の出力はクラス1Mレベルの50%になる。

2) 点光源の測定

視角 $\alpha < 1.5\text{mrad}$ の場合の測定は指定された基準固定位置、すなわち、レーザーダイオードの放出チップ、光ファイバーの出力チップ、光ライン発生器の出力側レンズ表面、走査器の走査頂点、拡散表面、製品のビームウエスト等からの距離において測定を行う。

3) 可視とIRの両方を含むビーム

時間基準がIEC60825-1(2001)では不明確であったが、クラス2, 2M, 3Rの混在したIRレーザーのクラス分けの時間基準は、可視部分がクラス2, 2M, 3Rであり、IR部分がクラス1または、1Mの場合は時間基準として0.25sで評価する。

4) 可変パルス幅または持続時間の出力

繰り返しの各パルス幅が一定でない場合は、トータルオンタイムパルス(TOTP)の手法が用いられる。この条件では、全オン時間が加算され、出力がその持続時間に対するクラスのAELと比較される。

5) クラス分けに対するアクセス

クラス分けには、操作者が工具またはインターロックを解除しないような手順(たとえその手順をマニュアルで記述した禁止条件に指令した場合でも)も考慮に入れて評価すること。例えば顕微鏡付き測定機器が切り替え可能な対物レンズまたは光ファイバーコネクタを有する測定機器の場合など。

6) 人体の被ばく状態の定義の緩和

レーザー装置のギャップまたは隙間は、筐体^{きょうたい}内の内部にあるエネルギー源がクラス3B未満である場合は、筐体の中より大きなギャップまたは隙間が許容される。これは皮膚、目に直接の露光がない場合には通風孔、筐体の小さな開口などの設置が可能になる。さらに変更の結果、歩行立ち入り可能な囲い内のエネルギー放出を、自動検出システムがそのレーザービームへのアクセスを自動的に阻止しないなら、アクセス可能と見なす。

歩行立ち入りを提供するレーザー製品に対して、人体の被ばくの決定に対する保護筐体の内部と外部の両方の放射を考慮することが必要である。筐体の内部における人体の被ばくは、自動的な検出システムのような技術的制御により防止することができる。

7.3 エンジニアリング制御

1) 歩行立ち入りステーション

人間が筐体に立ち入れる場合のレーザー製品に適用され、合理的に危険を予知できる筐体に関して適用される。そのような装置では、もしクラス 3R を超える放射が、人が筐体中に居るときアクセスできるなら、クラス 3B 未満にクラス分けされる製品に対しては検出システムが要求される。

2) 手動リセット性能

クラス 4 レーザー製品はリモートインターロックコネクタ作動や主電源が遮断後にレーザー再開の場合に手動での介入が要求される。CDRH と規定が IEC に採用された。

3) ビーム減衰器性能

オン/オフスイッチまたは、キースイッチも減衰器として認める。(JISC 6802 : 2005 では不認可)

7.4 そのほかの改定

クラス 3B またはクラス 4 レベルへのアクセスの可能性を持っている場合、「保守」(適切な訓練を受けていない操作者によって実行される作業)としては、クラス 3B 未満に分類された製品においては「保守」の定義に含めることは許されない。クラス 3B 製品の保守においては、クラス 4 レベルへのアクセスを禁じられる。この点は、現状の規格 (JISC 6802 : 2005) では保守中におけるアクセスレベルに関する規格は明記されてない。そのほかの変更としては、ラベル、いくつかの警告：追加のマニュアル中の警告に対する代替文の使用に対する表記法の改変；露光が生じそうにない場合の走査レーザー製品に対する安全保護への緩和要求、クラス 1M, 2M ビームが密着皮膚障害を生じる条件、そのほかの要求事項の明確化など。

8. まとめ

レーザー事故の発生防止策

事故を未然に防止する方策としては、職場、装置等に

起因する危険性や有害物質のリスクアセスメントを行い労働者の危険または健康障害を防止するための措置を講じること (改正労働衛生法第 28 条 2 項), また厚生労働省通達の作業安全措置事項を理解し実行すること等に集約されていると考えられる。安全への認識を高め、レーザーを使用する職場に、より大きな安全をもたらす必要がある。

なお、詳細は関連の規格書を参照されたい。

参考文献

- 1) IEC60825-10 (February, 2002), [http://domino.iec.ch/preview/info_iec60825-10\(ed1.0\)en.pdf](http://domino.iec.ch/preview/info_iec60825-10(ed1.0)en.pdf)
- 2) Kenneth L. Barat: "In Laser Safety, Little Mistake Can Have Big Consequences", PHOTONICS SPECTRA, March, pp. 56 ~ 62 (2005)
- 3) Bill Ertle: "laser accidents: A thirty year Review(307)" International laser Safety Conference, Marina del Ray, March, p. 146 (2005)
- 4) 植田俊彦, 西坂剛: 第 20 回レーザー安全スクールテキスト S2 コース, pp67 ~ 81, 光産業技術振興協会編 (2005)
- 5) IEC60825-1, Ed. 1.2 (August 2001) [http://domino.iec.ch/preview/info_iec60825-1\(ed1.2\)en.pdf](http://domino.iec.ch/preview/info_iec60825-1(ed1.2)en.pdf) 並びに JIS C 6802, 日本規格協会 (2005 年 2 月)
- 6) IEC 60825-13, IEC TC76 Draft (2005)
- 7) Code of Federal Regulations: Title 21, Vol. 8: Revised as of April 1, 2005 : CITE: 21CFR1040.10, 1040.11, <http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcr/CFRSearch.cfm?FR=1040.10>
- 8) Laser notice 50: Laser Products-Conformance with IEC 60825-1, Am. 2 and IEC 60601-2-22; Final Guidance for Industry and FDA, <http://www.fda.gov/cdrh/comp/guidance/1346.html>
- 9) 厚生労働省通達基発第 0325002 号 (2005 年 3 月 25 日)
- 10) 経済産業省省令第 6 号 (2001 年 1 月 31 日), <http://www.fda.gov/bbs/topics/NEWS/NEW00609.html>
- 11) Roy Henderson, Karl Schulmeister: "Laser Safety", pp. 66 ~ 220, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia (2004)
- 12) 石川憲: "レーザー安全規格の最新の動向", オプトロニクス, Vol. 12, No. 288, pp. 126 ~ 131 (2005)
- 13) IEC60825-1, Ed. 2 (2007)
- 14) Robert Weiner: *CHANGE IN NEW EDITION TO THE IEC 60825-1 LASER SAFETY AND STANDARD*, ILSC (2007)