

2022/1/18

11:00-11:30

分子科学研究所研究棟301号室

レーザー機器の安全な取り扱い

佐藤 庸一

理化学研究所 放射光科学研究センター
分子科学研究所 社会連携研究部門

E-mail : yoichi@spring8.or.jp

概要

- レーザーによる障害の実例
- レーザー安全に関する法規制
- どのような対策が求められるか
- ゴーグルの適切な利用法
- 安全用語：MPEとAEL
- 総括

実例紹介

・日本レーザー医学会誌, 22(3) : 117, 2001.

レーザーの誤照射により黄斑部に障害をきたした4例

中村 誠、高桑英夫、鈴木俊光、寺崎浩子、三宅養三
名古屋大学医学部眼科

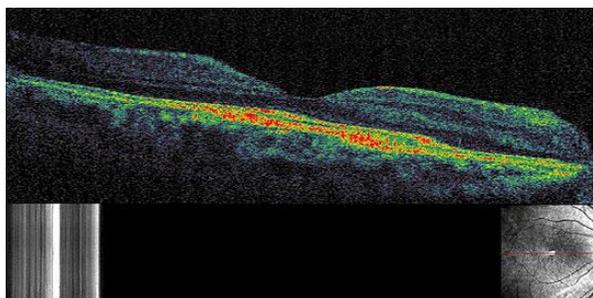
目的：近年レーザーの誤照射により網膜障害をきたした症例の報告が散見される。今回は我々が最近経験した4症例につき報告する。

症例：4症例全てがレーザー開発研究に関わる大学や研究所の男性の学生や研究員である。症例1は31歳で実験中にチタンサファイヤレーザーが左眼に誤入射した。左眼黄斑部に白色凝固斑が認められたが、わずかに中心窩からずれており、約6ヶ月後中心暗点は残存しているものの、視力は0.8と比較的良好である。症例2は31歳で実験中にOPOレーザーが右眼に誤照射した。初診時0.8だった視力は徐々に低下し、約1ヶ月後には0.2となり照射部位に黄斑円孔が認められるようになった。硝子体手術を施行したところ黄斑円孔は閉鎖したが、視力は0.2にとどまっている。

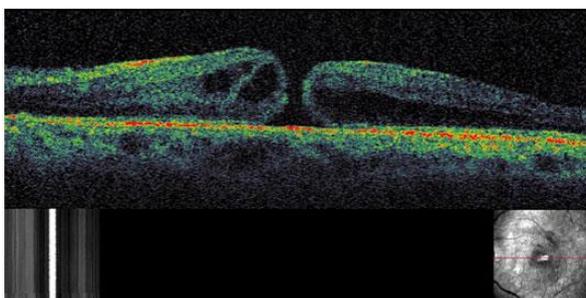
結論：レーザーの誤照射の事故により視機能の低下をきたす症例をしばしば経験する。レーザー事故の予防のため、保護眼鏡の使用や改良などの安全対策が肝要であると考えられた。

黄斑円孔とはどんな症状か？

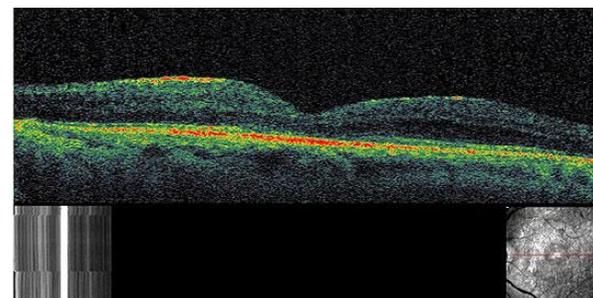
- 網膜断層解析検査(OCT)と眼底写真



(a) 事故前



(b) 事故後



(c) 硝子体手術後

円孔を放置すると、網膜剥離を併発し、視野狭窄及び暗点の拡大が生じる。

通常、黄斑円孔であれば硝子体手術により改善する。レーザー障害の場合、神経が焼けていたら回復不能。



レーザーにより生じうる事故

- 皮膚障害

高出力レーザー光線に対する過度のばく露を受けると軽度の紅斑から水疱形成、熱凝固、炭化までの変化が起こる。

- 眼障害

目は他の組織に比べて機能再生が低く、生活に及ぼす影響も大きいことから眼の障害は重要である。さらに眼の集光作用により予想以上のダメージを受ける場合があるため、特に保護対策に細心の注意が必要。

- その他の事故

レーザー光線が事故原因では無い事故も多い。

その他の事故

- 高電圧（オゾン発生、火傷、放電、感電）
- 火災（着火）
- スパッタ物
- ガス漏れ、水漏れ
- 色素・有機溶媒（発癌性）
- その他の放射光（マイクロ波、UV、X線）

事故の原因

使用者の不注意が原因

- 不適当な器具の使用：可燃性チューブや反射性金属製品
- レーザー光誤照射：ガーゼ、ドレーブへの引火、火災
- 保護具（ゴーグル）：未着用、波長不適正
- 周囲への警告なしでの照射

• 装置の事故・誤動作が原因

- 偶発的照射：ソフトウェア、回路の不具合
- 照射中の停止不能：フットスイッチの故障
- 設定値よりもはるかに高出力の照射
- ファイバ未接続時の接続口よりの照射

日本における事故履歴 (1)

| | 職業 | 年 | laser | 状況 | 発生 | 視力 |
|----|------|----|-------|-----------|------|------|
| 1 | 大学講師 | 34 | Ruby | ガラス板反射 | 1965 | 1.5 |
| 2 | 研究員 | 35 | Ar | | 1973 | 1.2 |
| 3 | 研究員 | 35 | YAG | 直接 | 1975 | 0.06 |
| 4 | 大学院生 | 25 | YAG | 反射 | 1979 | 1.2 |
| 5 | 研究員 | 30 | YAG | | 1980 | 0.8 |
| 6 | 大学院生 | 23 | YAG | 直接 | 1982 | 0.3 |
| 7 | 研究員 | 31 | YAG | Jトミラ-誤認直接 | 1982 | 0.1 |
| 8 | 技術員 | 24 | Ar | 眼科用・点検中 | 1982 | 0.2 |
| 9 | 大学院生 | 26 | YAG | 反射 | 1983 | 0.1 |
| 10 | 大学生 | 22 | YAG | 実験見学中反射 | 1984 | 0.6 |
| 11 | 研究員 | 23 | YAG | 反射 | 1984 | 1.2 |
| 12 | 研究員 | 43 | YAG | 直接 | 1987 | 0.1 |
| 13 | 技術員 | 43 | Ar | ライトシヨウ調整中 | 1988 | 0.9 |
| 14 | 技術員 | 26 | Ar | ライトシヨウ調整中 | 1988 | 0.9 |
| 15 | 研究員 | 32 | YAG | 反射 | 1989 | 1.2 |
| 16 | 大学院生 | 24 | YAG | | 1990 | 1.5 |
| 17 | 技術員 | 35 | Ar | 眼科用調整中 | 1991 | 1.2 |
| 18 | 研究員 | 30 | YAG | 照射の自覚なし | 1991 | 1.0 |
| 19 | 研究員 | 30 | Ti:S | IRカード反射 | 1992 | 0.5 |

| | 職業 | 年 | laser | 状況 | 発生 | 視力 |
|----|------|----|---------|-----------|------|-------------|
| 20 | 大学院生 | 29 | YAG | 白紙で反射 | 1992 | 1.0 |
| 21 | 研究員 | 20 | Excimer | 衝立が倒れる | 1992 | 0.6, 0.9 |
| 22 | 大学院生 | 24 | YAG | 鏡で反射 | 1993 | 1.0 |
| 23 | 研究員 | 28 | YAG | スライトガラス反射 | 1993 | 0.2 |
| 24 | 学生 | 23 | YAG | | 1994 | 0.4 |
| 25 | 研究員 | 38 | Ti:S | 745nm | 1993 | 1.5 |
| 26 | 研究員 | 36 | Ti:S | 波長変換 眼底 | 1995 | 1.2 |
| 27 | 研究員 | 37 | Ti:S | 波長変換 眼底 | 1993 | 1.2 |
| 28 | 大学講師 | 34 | YAG | プリズム面反射 | 1995 | 0.9 |
| 29 | 研究員 | 30 | YAG | 数百 mJ 直接 | 1996 | 0.1 |
| 30 | 研究員 | 31 | Ti:S | 実験中反射 | 1996 | 0.8 |
| 31 | 大学院生 | 21 | YAG | ミラー調整中 | 1997 | 0.06 |
| 32 | 大学院生 | 29 | YAG | 装置の観測窓 | 1997 | 0.01 |
| 33 | 大学院生 | 22 | YAG | 装置の観測窓 | 1997 | 1.5 |
| 34 | 大学院生 | 29 | YAG | 装置の観測窓 | 1997 | 1.2 |
| 35 | 大学院生 | 24 | YAG | 装置の観測窓 | 1997 | 1.5 |
| 36 | 大学院生 | 26 | YAG | 装置の観測窓 | 1997 | 0.4 |
| 37 | 大学院生 | 23 | YAG | 実習中 | 1998 | 1.5 |
| 38 | 研究員 | 30 | Ti:S | SHG,偏光板反射 | 1999 | 1.5 |

日本における事故履歴 (2)

- 熟練者でも事故を起こしている (油断)
- パルス赤外レーザーの事故が多い (不可視)
- 左目の事故例が多い (偶発性)
- 日本における事故の大半は学生 (安全意識)
- **No.32-36**の五人はほぼ同時に被曝

レーザーの事故を防止するためには

- 自分の使用するレーザーの特性を知る
- そのレーザーにどのような危険があるかを知る
- レーザーに対して適切な取り扱いを行う

レーザー安全に関する年表

- ・1960 レーザー発明
- ・1965 レーザー事故発生例の国内初報告
- ・1973 米国にてANSI Z136. 1が策定
- ・1976 米国にて連邦法21CFR1000, 1040が策定 (CDRH基準)
- ・1980 JIS C6801「レーザー安全用語」策定
- ・1984 IEC publication 825策定
- ・1986 「レーザー光線による障害の防止対策」 (労働省基発第39号)
- ・1988 JIS C6802「レーザー製品の放射安全基準」策定

(以下、IECおよびJIS基準の改定が続く)

- ・2005 JIS C6802 : 2005に改定 (クラス分けの細分化)
- ・2005 「レーザー光線による障害防止対策要綱」
- ・2011 JIS C6802 : 2011に改定 (LED対象外、医療用・教研用途を含)
- ・2014 JIS C6802 : 2014に改定 (繰り返し・複数波長・分散光源等)
- ・2018 JIS C6802 : 2018に改定 (クラス分け基準の明確化)

レーザー安全に関する法規制

- 労働安全衛生法
 - 安全衛生管理体制の確立（事業所単位）
 - 機械、有害物、ガス容器等の規制
- 高圧ガス取締法
- 消防法
- レーザー光線による障害防止対策要綱
(労働省基準局基発第39号)
- レーザー光線による障害の防止対策について
(厚生労働省労働基準局基発第0325002号)

レーザー光線による障害防止対策要綱

ユーザーとして取り組む必要がある内容

| 措置内容 (項目のみ) | | レーザー機器のクラス | | | | |
|----------------|--------------------------------|----------------|----|-----|----------|---|
| | | 4 | 3B | 3R | 2M 1M | |
| レーザー機器管理者の選任 | | ○ | ○ | ○※1 | | |
| 管理区域 (標識、立入禁止) | | ○ | ○ | | | |
| 作業管理・健康管理等 | 操作位置 | ○ | | | | |
| | 光学系調整時の措置 | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | 保護具 | 保護眼鏡 | ○ | ○ | ○※1 | |
| | | 皮膚の露出の少ない作業衣 | ○ | ○ | | |
| | | 難燃性素材の使用 | ○ | | | |
| | 点検・整備 | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | 安全衛生教育 | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 健康管理 | 前眼部 (角膜、水晶体) 検査 | ○ | ○ | ○※1 | | |
| | 眼底検査 | ○ | | | | |
| その他 | 掲示 | レーザー機器管理者 | ○ | ○ | ○※1 | |
| | | 危険性・有害性、取扱注意事項 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | レーザー機器の設置の表示 | ○ | ○ | | |
| | レーザー機器の高電圧部分の表示 | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | 危険物の持ち込み禁止 | ○ | ○ | | | |
| | 有害ガス、粉じん等への措置 | ○ | ○ | | | |
| | レーザー光線による障害の疑いのある者に対する医師の診察、処置 | ○ | ○ | ○ | ○ | |

安全対策の策定にはレーザーのクラス分けが適切になされていることが前提

クラス分け対象外のレーザー機器に対して規制は無いが、事故の危険性を下げるために機器の露光レベルに相応の安全対策を**(機器管理者が責任を持って)施す!**

レーザー光線による障害防止の措置基準

レーザー管理について

レーザー危機管理責任者を設定・表示する

レーザー管理区域を明示する
(囲い等により、他の区域と区別し、標識を示す)

レーザー管理区域は、関係者以外のものの立ち入りを禁止
(出入口には必要に応じ、自動ロック等の措置を講じる)

関係者以外がレーザー管理区域に立ち入る場合は、レーザー機器管理者の指揮のもとに行動させること

レーザー管理区域の出入口等の見えやすい箇所に、レーザー機器の設置を示す表示、レーザー光線の危険性、有害性及びレーザー機器取り扱い上注意すべき事項を掲示すること。

レーザー光線による障害防止の措置基準

レーザー機器管理

レーザー光路は、作業者の目の高さを避けて設置

レーザー光路は、可能な限り短く単純にし、可能な限り遮蔽する

レーザー光路の末端は、適切な反射率及び耐熱性を持つ拡散反射体又は吸収体とする

供用者としての義務:

- ・非常停止スイッチを操作部及び必要な個所に設ける
- ・放射中又は放出可能な状態の表示灯(パトライト)等を設ける
- ・レーザー光線の放出口にはシャッターを設ける
- ・インターロック機能を設ける
- ・レーザー光線の放出口には、その旨の表示を行う
- ・機器の高電圧部分には、その旨の表示および安全措置を講じる

レーザー光線による障害防止の措置基準

作業管理

レーザー機器の操作は、レーザー光線からできるだけ離れた位置で行うこと

レーザー光線により光学系の調整を行う場合は、調整に必要な最小の出力のレーザー光線により行うこと

レーザー光線の種類に応じた有効な保護メガネを作業者に着用させること。

できるだけ皮膚の露出が少なく、燃えにくい素材を用いた衣服を作業者に着用させること。

作業開始前に、レーザー機器管理者にレーザー光路、インターロック機能等及び保護具の点検を行わせること。

レーザー光線による障害防止の措置基準

一定期間において施行すべき作業環境整備

レーザー光線の出力、モード、ビーム径、広がり角、発振波長等の点検・整備

入力電力、励起電圧・電流、絶縁、接地等の点検・整備

安全装置、自動表示灯、シャッター、インターロック機能等の作動状態の点検・整備

パワーメータ、パワーモニタ等の点検・整備

ファン、シャッターその他の可動部分の点検・整備

冷却装置、ガス供給装置、有毒ガス除去装置、粉塵除去装置等の作動状態の点検・整備

レーザー光線による障害防止の措置基準

健康管理・その他

レーザー労働者の雇い入れ、レーザー作業への業務変更、又は使用するレーザー機器を変更したときは、安全教育を行うこと。(機構による安全教育)

レーザー業務に常時従事する労働者については、視力検査に併せて前眼部(角膜、水晶体)検査及び眼底検査を行うこと。(機構による特殊健康診断)

レーザー管理区域内には、爆発性の物、引火性の物等を持ち込まない。

レーザー業務を行う際、有毒ガス、粉塵等が発生する場合には、相応の措置を講じること。

レーザー光線による障害(疑い)の際は速やかに医師による診察又は処置を受けさせること。

レーザーのクラス分類

JIS C 6802で規定している

| クラス | 危険評価の概要 |
|-------|---|
| クラス1 | 合理的に予見可能な運転条件下で、または観察用光学器具（ルーペまたは双眼鏡）を用いても安全なレーザー製品。 可視光の場合、目がくらむなどの視覚的影響が出る場合がある。 |
| クラス1M | 合理的に予見可能な運転条件下で、裸眼では安全なレーザー製品。 光学器具を用いると、条件により目の障害が出る可能性がある。 |
| クラス1C | 医用、美容の分野で、眼部以外の体組織にレーザー放射を直接適用するレーザー製品。 出射されるレーザーはクラス3R、3Bまたは4のレベルである場合もあり、目標組織に対して潜在的に危険である。 |
| クラス2 | 通常、まばたきなどの嫌悪反応によって目は保護され、瞬間的な被ばくのときは安全であるが、意図的なビーム凝視をすると危険なレーザー製品。また、残像による一時的な視力障害や、驚きによる反応動作によるリスクに注意が必要。 |
| クラス2M | 裸眼においては、クラス2と同じく、通常まばたきなどの嫌悪反応によって目は保護され、瞬間的な被ばくのときは安全であるが、意図的なビーム凝視をすると危険なレーザー製品。また、残像による一時的な視力障害や、驚きによる反応動作によるリスクに注意が必要。光学器具を用いると、条件により目の障害が出る可能性がある。 |
| クラス3R | 直接ビーム内観察による障害がクラス3Bに比べて比較的少ない。意図的に目に露光することは危険である。 また、残像による一時的な視力障害や、驚きによる反応動作によるリスクに注意が必要。 |
| クラス3B | 目へのビーム内露光が生じると、偶然による短時間の露光でも通常危険。 条件により、軽度の皮膚障害または可燃物の点火を起こす可能性がある。 |
| クラス4 | ビーム内の観察および皮膚への露光は危険。火災を発生させる危険性もある。 |

レーザーに関するJIS規格

- ・JIS C 6801 : レーザ安全用語 (廃止)
- ・JIS C 6802 : **レーザー製品の安全基準**
- ・JIS C 6803 : 光ファイバ通信システムの安全
- ・JIS C 6804 : 情報伝送のための光無線通信システムの安全
- ・JIS T 8143 : 保護フィルターと保護メガネ
- ・JIS Z 8113 : 照明用語

JIS C 6802の概要

- **2011年より教育研究用途でのレーザー製品も適用対象**
 - レーザー開発の研究だけなら対象外
 - 一般に向けて**供用するパワーレーザーは対象**
- 目及び皮膚に対するレーザー放射の危険性だけを扱う
 - 他は通常の労働安全衛生基準などに従う
- 波長180 nm～1 mm (0.3THz) のレーザー製品が対象
 - THzを発生するシステムも対象
- レーザークラス分けはレーザーメーカーの責任で行う
 - クラス分けされていない商品は対象外
- 装置から取外された際に**工具不要で運転可能な場合**は適用対象

レーザーによる障害

表 B.1 光に対する過度の露光に伴う病理学的影響の要約

| CIE 波長領域 ⁽¹⁾ | 目 | 皮膚 | |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------|
| 紫外 C (180 nm~280 nm) | 光化学的角膜炎 | 皮膚ガン 紅しん(疹) (日焼け) 皮膚老化プロセスの加速 | |
| 紫外 B (280 nm~315 nm) | | 色素の増加 | |
| 紫外 A (315 nm~400 nm) | 光化学反応による白内障 | 色素の黒化 光による反応 | 皮膚のやけど |
| 可視 (400 nm~780 nm) | 光化学反応による及び熱性の網膜 損傷 (出血→浮腫→黒こげ) | | |
| 赤外 A (780 nm~1 400 nm) | 白内障, 網膜熱傷 | | |
| 赤外 B (1.4 μm~3.0 μm) | 前房フレア, 白内障, 角膜熱傷 | | |
| 赤外 C (3.0 μm~1 mm) | 角膜熱傷だけ | | |

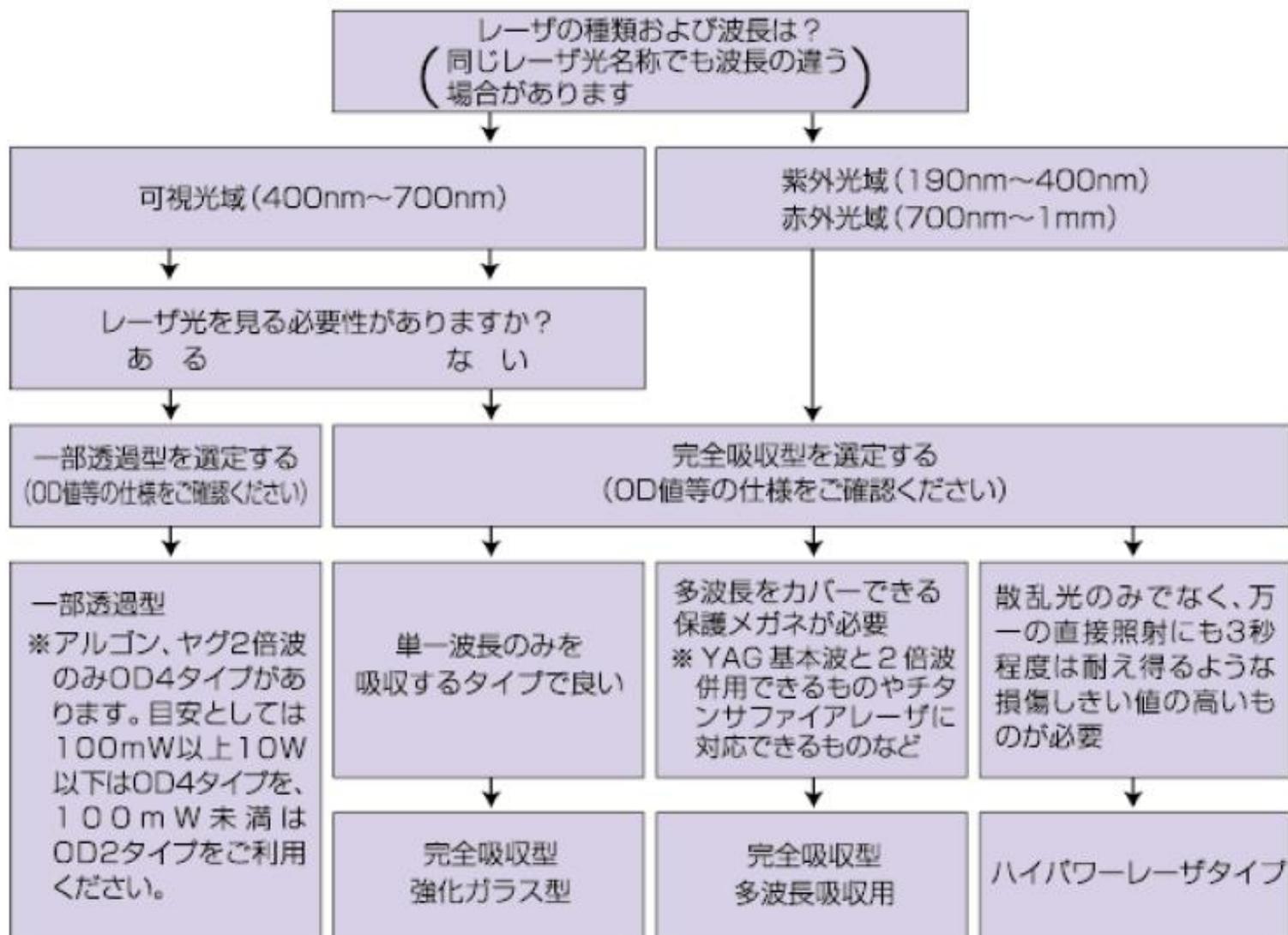
注⁽¹⁾ CIE (国際照明委員会) によって定義される波長領域は, 生物学的影響を記述する際に役に立つ簡単
 明りょうな表記であり, MPE 表にある波長の切れ目と完全には一致していないことがある。

代表的なレーザー装置による損傷部位

| | 180～315nm | 315～400nm | 400～780nm |
|----------|--|----------------------------|--|
| 主なレーザー | エキシマ F2: 157nm ArF: 193nm KrF: 248nm XeCl: 308nm 固体・ファイバ・ディスク FHG: 266nm | 固体・ファイバ・ディスク THG: 355nm | 半導体レーザー 400～700nm 固体・ファイバ・ディスク SHG: 532nm |
| 損傷しやすい箇所 | 角膜 | 水晶体 | 網膜 |

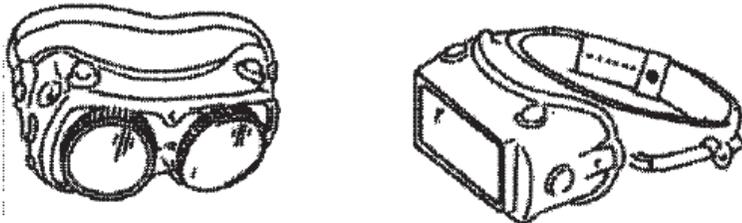
| | 780～1400nm | 1400～3000nm | 3000nm～ |
|----------|---|--|--|
| 主なレーザー | 半導体レーザー 800～940nm 固体・ファイバ・ディスク Nd:YAG: 1064nm Nd:YVO4: 1064nm ディスク: 1030nm ファイバ: 1070nm | 半導体レーザー 1310nm, 1550nm 固体・ファイバ・ディスク Er:YAG: 2940nm ファイバ: 1950～2100nm | COレーザー 5000nm CO2レーザー 9300nm 10600nm |
| 損傷しやすい箇所 | 水晶体 | 水晶体と網膜 | 角膜 |

ゴーグルの選定



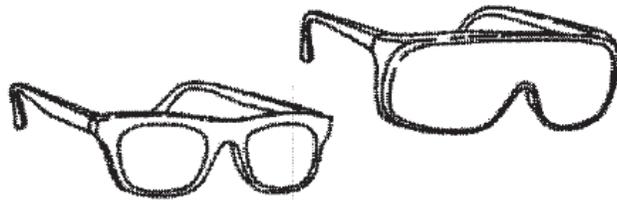
ゴーグルの形状

(1) ゴグル形(LG)



散乱光も危険な場合

(2) スペクタクル形サイドシールドなし(LS)



(4) フロント形サイドシールドなし(LC)

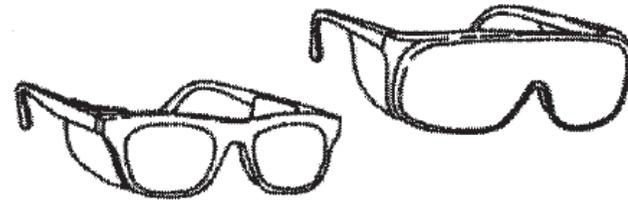


ビーム内観察のみ危険な場合

表2 レーザの発振形態の種類, 記号及び放出持続時間

| 発振形態の種類 | 記号 | 放出持続時間 T (s) |
|-------------|----|----------------------------|
| CW (連続波) 発振 | C | $0.25 \leq T$ |
| 長パルス発振 | P | $10^{-7} \leq T < 0.25$ |
| 短パルス発振 | G | $10^{-9} \leq T < 10^{-7}$ |
| 極短パルス発振 | M | $T < 10^{-9}$ |

(3) スペクタクル形サイドシールド付き(LSS)



(5) フロント形サイドシールド付き(LCS)



鏡面反射光も危険な場合

OD

OD (Optical Density: 光学濃度)

ODの定義

$$OD = \log_{10} \frac{\text{入射ビームの照度}}{\text{透過ビームの照度}}$$

必要なOD

$$OD = \log_{10} \frac{\text{入射ビームの照度}}{\text{MPE}}$$

| 光学濃度 (OD) | 透過率 (%) | 減退率 |
|-----------|------------|------------------|
| 0 | 100 | 0 |
| 1 | 10 | 1/10 |
| 2 | 1 | 1/100 |
| 3 | 0.1 | 1/1,000 |
| 4 | 0.01 | 1/10,000 |
| 5 | 0.001 | 1/100,000 |
| 6 | 0.0001 | 1/1,000,000 |
| 7 | 0.00001 | 1/10,000,000 |
| 8 | 0.000001 | 1/100,000,000 |
| 9 | 0.0000001 | 1/1,000,000,000 |
| 10 | 0.00000001 | 1/10,000,000,000 |

MPE

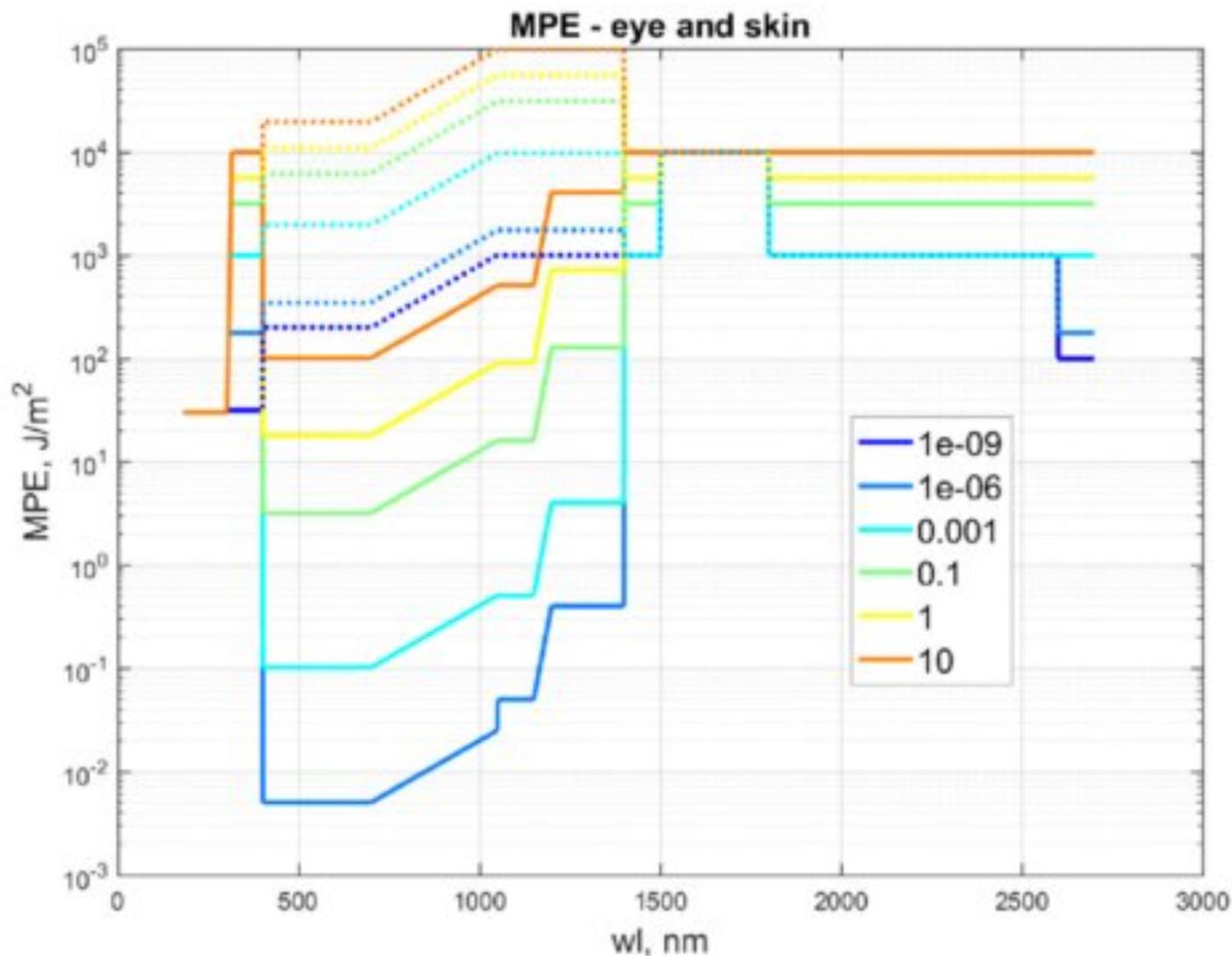
MPE (Maximum permissible exposure: 最大許容露光量)

通常の環境の下で、人体に照射しても、その直後または長時間にわたる結果として有害な影響を与えることのないレーザー放射照度の最大値(単位は W/cm^2 もしくは J/cm^2)

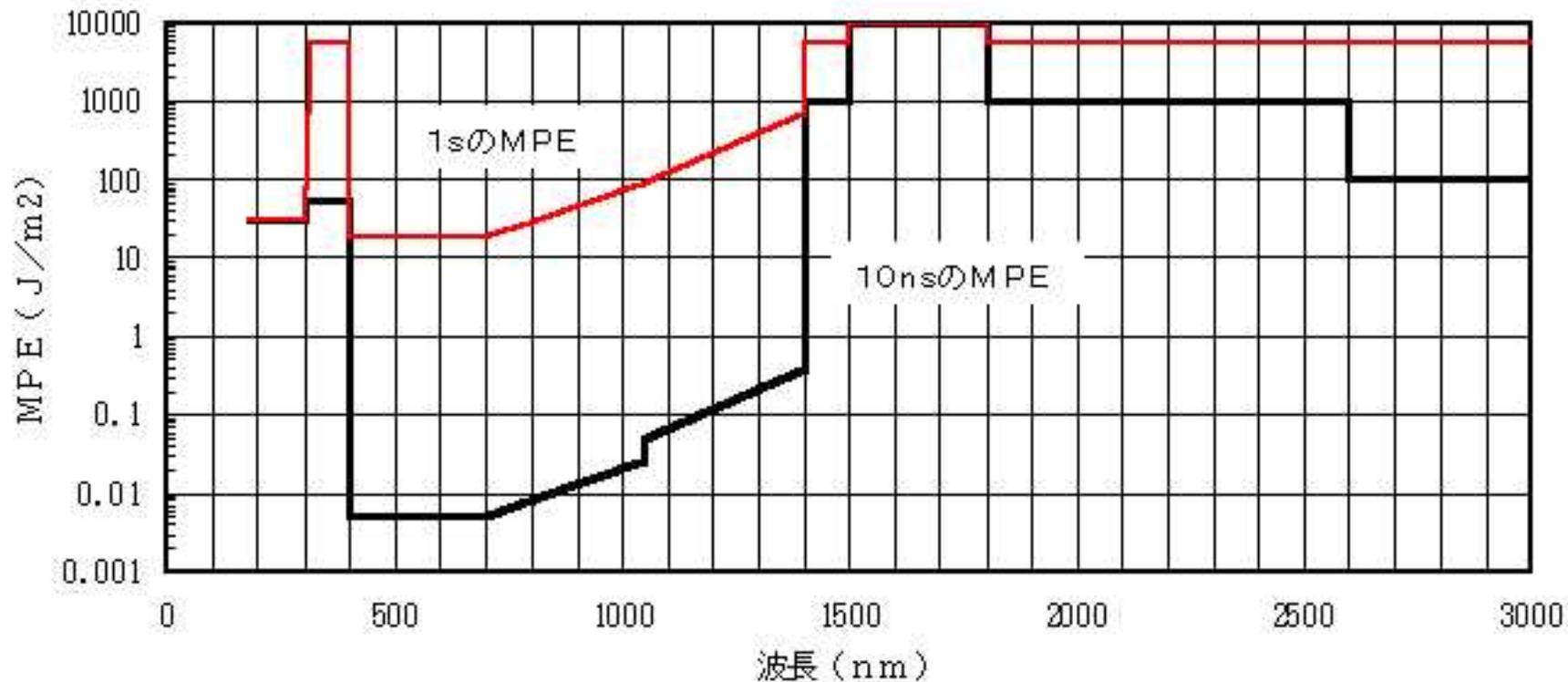
•MPEにより、その場所が安全かどうかを判断する

- 眼、皮膚、もしくは瞳孔の領域全体でどの程度光が侵入するかは波長・露光時間などの条件で変化する。
- ビームの直接露光と散乱光の露光でMPEは異なる(散乱光のMPEの単位は $W/cm^2 \cdot sr$ もしくは $J/cm^2 \cdot sr$)

MPEの例（波長、パルス幅に依存）



パルス光の危険性



- パルスの危険性
- 可視光の危険性
- アイセーフ波長の妥当性

AEL

AEL (Accessible emission limit:被曝放出限界)

各クラスで許容される最大放出パワー(単位はWもしくはJ)。波長やパルス幅で異なるが、大雑把には以下の通り：

クラス 2

$0.39\mu\text{W} < \text{放射パワー} \leq 1 \text{ mW}$

クラス 3 R

$1\text{mW} < \text{放射パワー} \leq 5\text{mW}$

クラス 3 B

$5\text{mW} < \text{放射パワー} \leq 0.5\text{W}$

クラス 1

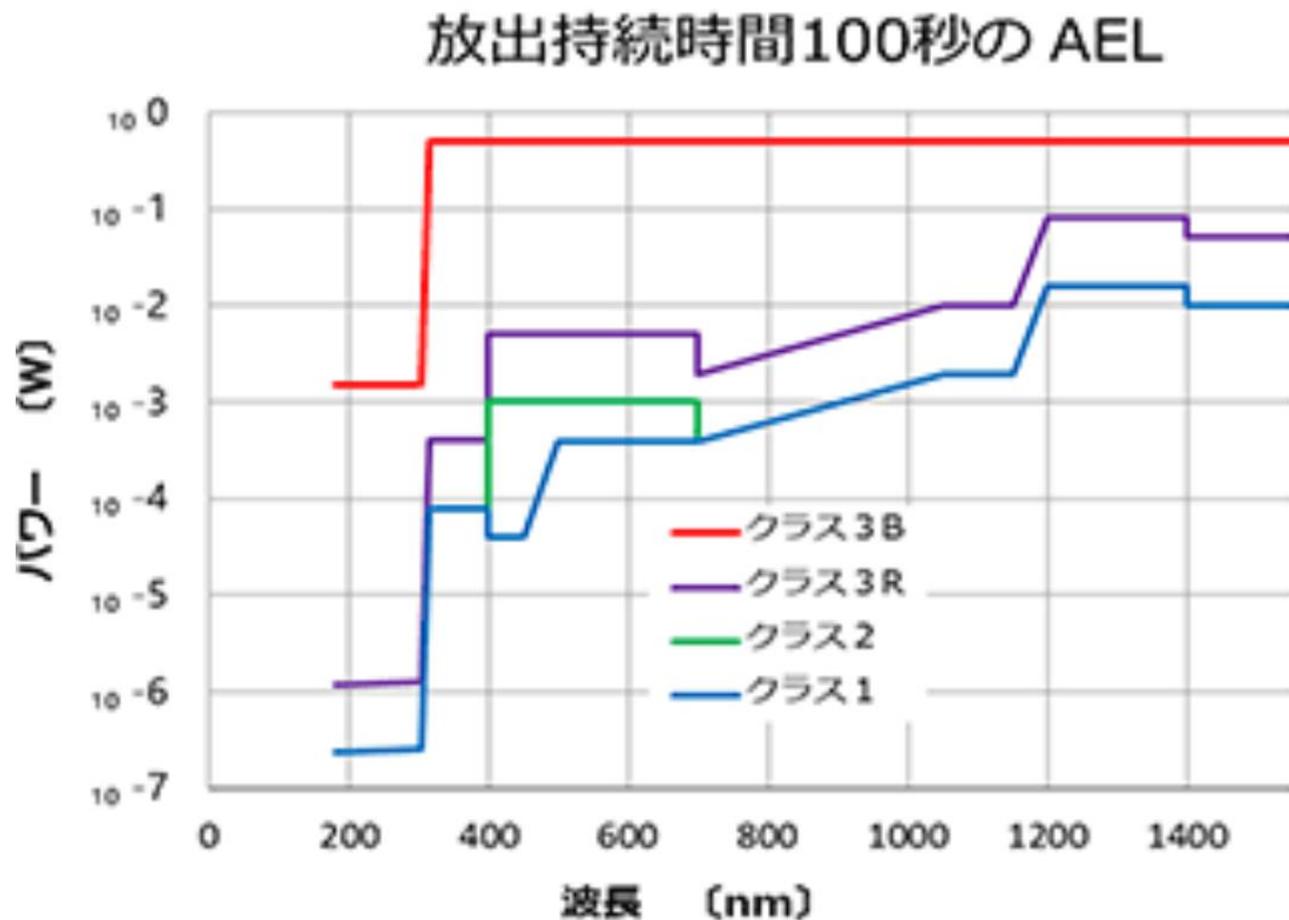
$\text{放射パワー} \leq 0.39\mu\text{W}$

クラス 4

$0.5\text{W} < \text{放射パワー}$

正しいクラス分けは、製造者あるいは販売者の義務

AELの例（波長、パルス幅に依存）



まとめ

- どんなに規制を整備しても、それを運用するのは人間。注意しすぎてしすぎることは無い。
- 安全な取り扱いに慣れた、と思う自覚が危険
- 市販レーザー装置は規制をクリアしている。自作レーザーの安全管理は大丈夫か？