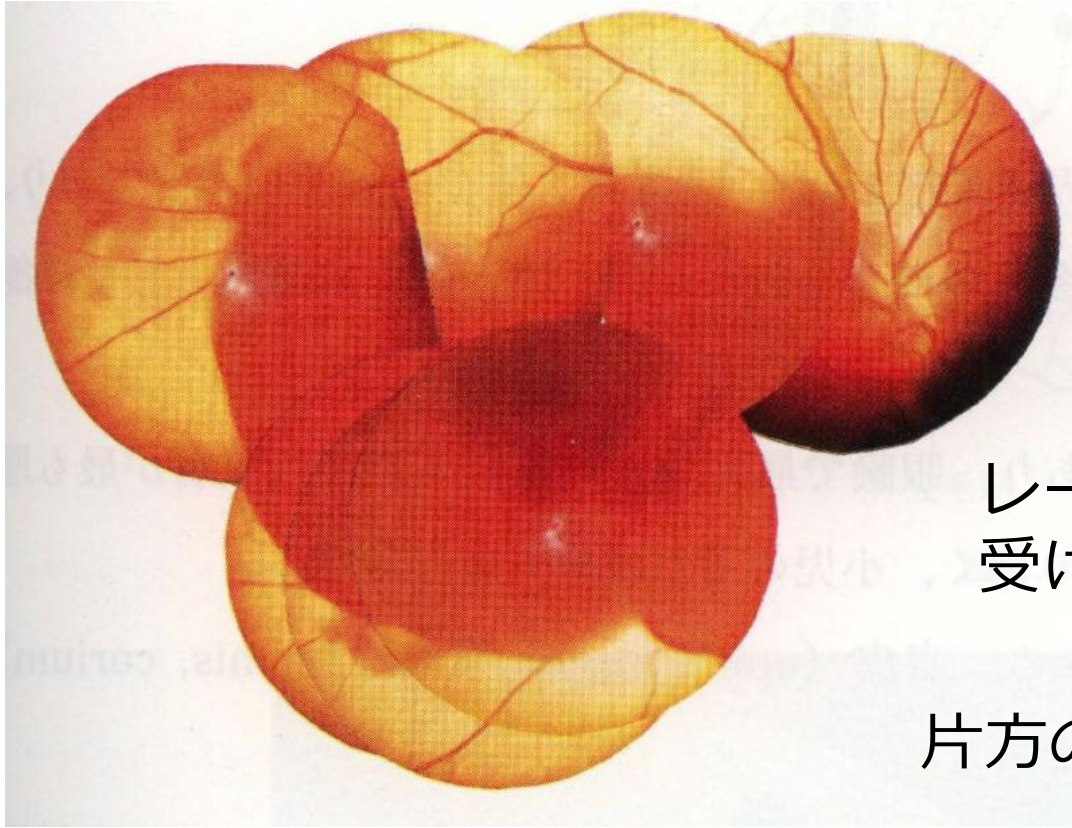


レーザーの危険性・安全な使い方 (レーザー安全講習2026年4月版)

間中 孝彰

工学院電気電子系

レーザーによる視力障害は直らない



レーザーでダメージを
受けた網膜

片方の目は機能しなくなる！

レーザー安全ガイドブック（新技術コミュニケーション）より

最重要

正しいレーザーゴーグルをしていて
失明した人はいない

- 事故で一番困るのは本人
- 身を守るためには、原理を理解して忠実に実行する
 - 実験はマニュアル外に進行する。自分で危険性を判断して対策が取れないと事故は防げない

第1部（レーザーを使う人の基礎知識）

第2部（レーザー実験系を組み立てる人のために）

- 講師はレーザー安全の専門家ではない！
- 研究室では特定のレーザーのみを使用
 - レーザーの用途はいろいろ
 - 自分の研究室では、物性系の光学実験が主

- 自分が使っているレーザーの種類、波長を知っていますか？
- 自分が使っているレーザーのクラスを知っていますか？

2つとも「もちろん知っている」という人は、
挙手をお願いします。

- 建物・構造物

- 火災（レーザー光・電源系）
- 冷却水漏れ

レーザー光を可燃物で止めるな

- 防火措置のない暗幕は危険
- 数百mW以上は発火の危険性

冷却水を使うものは水漏れに注意

- 最後に帰る人は、停止を確認
- 床にテーブルタップを置かない

- 人体

- 感電
- 皮膚（火傷）
- 目（視力低下・失明）

感電

- 200V系のレーザーでは漏電注意
- カバーを開けている時には、高圧部分に注意

火傷等

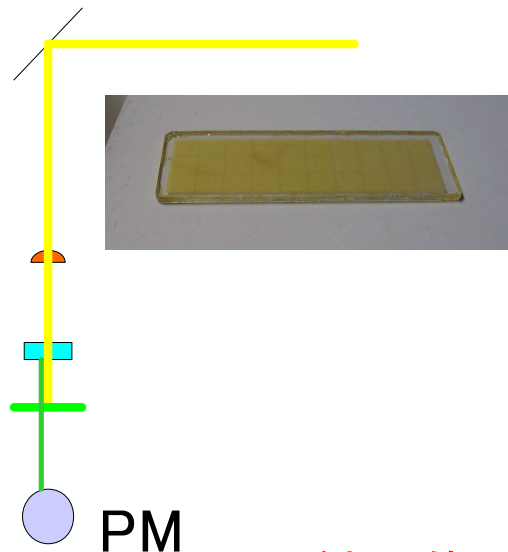
- 光の通り道を常に確認
- 紫外光源（非レーザーも）の場合には、皮膚を直接光に晒さない

笑える事故・笑えない事故

装置に大きな被害がなく、障碍が残らない怪我（かつ、障碍が残る可能性のない怪我）なら、後には笑い話にもなる。

障碍が残る事故（失明・視力低下）は、後になっても、笑い話にできない → 目の事故だけは絶対防ぐ

事故例 パルスYAG-SHG光学系調整中



光路調整のために、スライドガラスにSHG物質を挟んだもので、SH光を頼りに調整
→スライドガラスで反射した基本光が目に入射

原因：

経験（教育訓練）不足、レーザーゴーグルの未装着（SH光が見にくく調整時にゴーグルを外していた）

結果的に障碍が残らなかったが、これは笑い話にならない！

初心者もベテランも事故に遭う

- 初心者
 - やってはいけないことを知らないため
(そもそも危険性を認知していないことも)
 - 不注意
- ベテラン
 - 慣れから来る油断
 - 根拠のない安全に対する考え
 - 不注意

見学に来て目に障害をうけた人もいる。

レーザー事故例（目）

症例	年齢	レーザー	年	最終視力
大学講師	34	ルビー	1965	1.5
研究員	35	Y A G	1975	0.06
研究員	43	YAG	1987	0.1
—				
大学院生	23	YAG	1982	0.3
大学生	22	YAG	1984	0.6
大学生	21	Ti:S	2004	0.1(?)

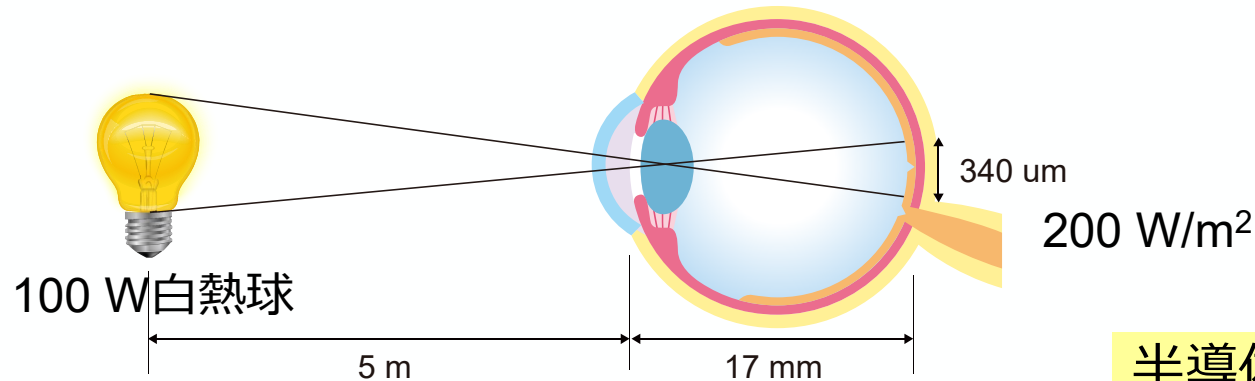
最近は、大学での学生の事故例が相対的に増える傾向

レーザー安全ガイドブック（新技術コミュニケーション）より（改変）

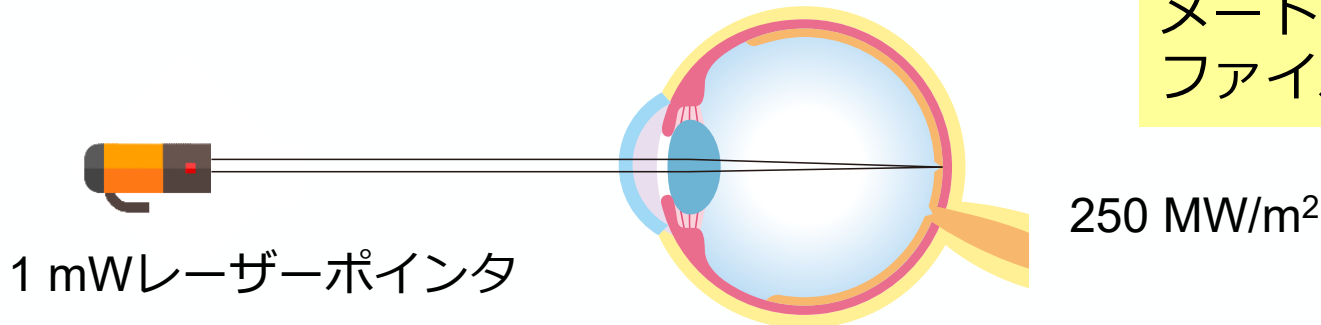
レーザーの発明以来、2005年までの日本では39件の事故報告例（目および皮膚）

レーザーは何故危険か

- 高輝度
 - 局所にエネルギー集中（目や皮膚障害、火災を引き起こす）
- 平行性
 - 遠く離れていてもビームが拡がらない（離れていても危険）
 - 無意識状態で網膜に焦点を結ぶ（突然目にはいると危険）

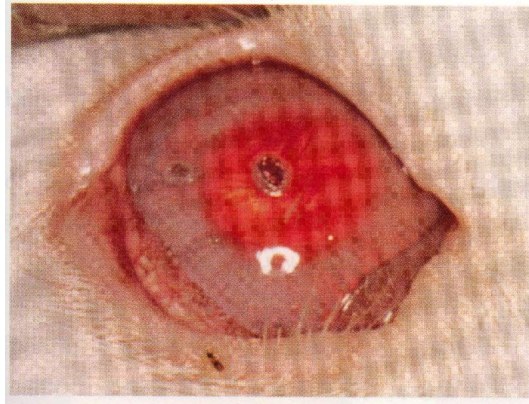


半導体レーザー（コリメートレンズなし）やファイバーは少し違う。



目のどこがやられるか

角膜の障碍

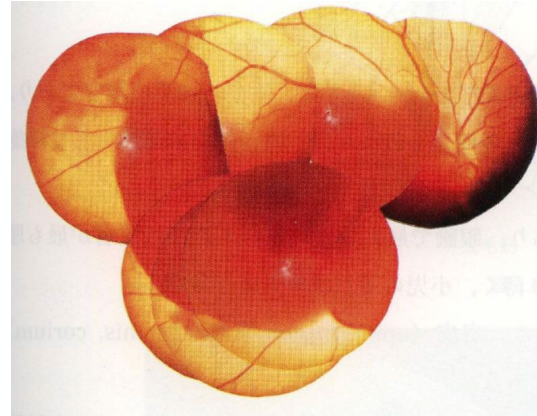


レーザーにより障碍をうけた
ウサギの目

紫外・赤外レーザーは角膜で
吸収され、角膜にダメージ

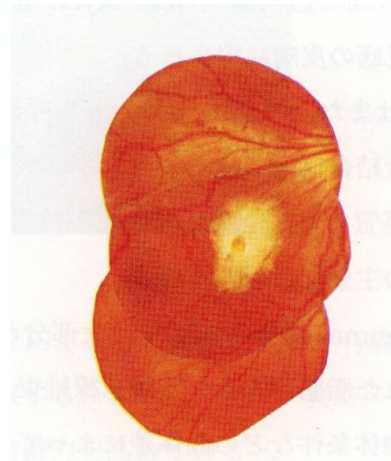
※角膜外皮の障害なら、回復
はするが、内部がやられると
回復しない。

網膜の障碍



YAGレーザーによる
眼底出血。事故直後

出血が広い範囲
に渡っている

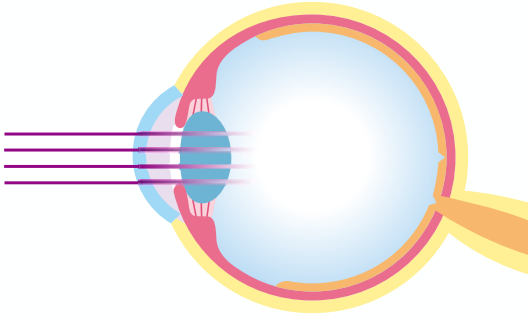
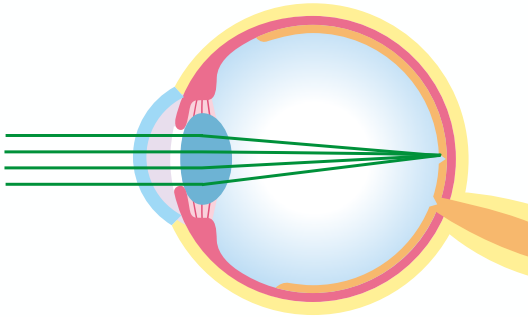
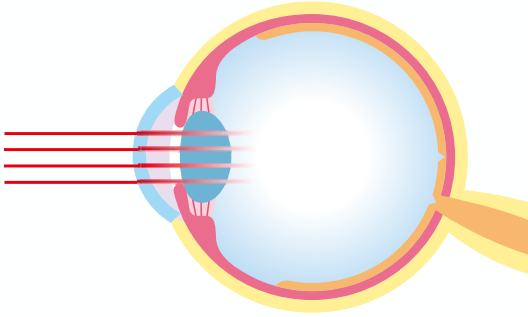


6週間後

出血が引いているが、
網膜が破壊された領
域が出現

→視力低下や失明
網膜は再生力がなく、
回復はしない

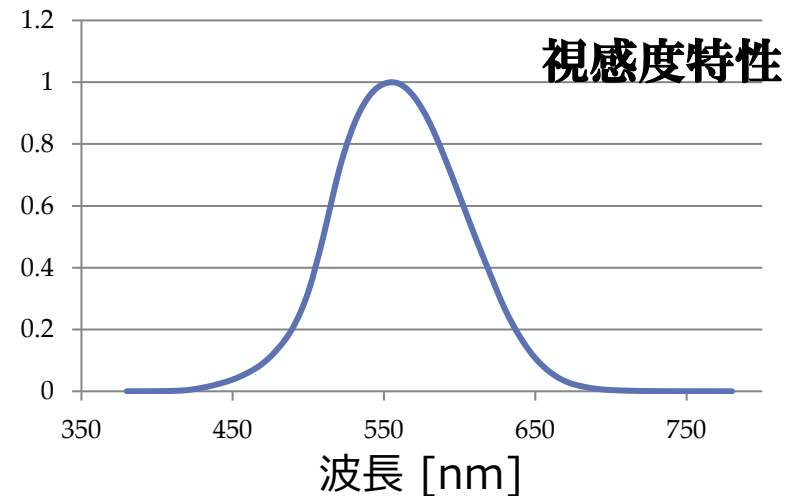
目や皮膚のどこに影響があるか

CIE波長領域	目への影響		皮膚への影響
紫外C (180nm～280nm)		光化学的角膜炎	紅斑（日焼け） 皮膚老化プロセス加速
紫外B (280nm～315nm)		光化学的白内障	
紫外A (315nm～400nm)			色素の増強 光線過敏症 皮膚のやけど
可視 (400nm～780nm)		光化学的及び 熱的網膜損傷	
赤外A (780nm～1400nm)		白内障、網膜熱傷	
赤外B (1.4um～3.0um)		前房フレア、白内障、 角膜熱傷	皮膚のやけど
赤外C (3.0um～1mm)		角膜熱傷	

特に危険な波長領域

750nm～1400nmと400nm付近

網膜に到達する
目の感度が低い（ない）ために、
レーザー光の脅威が感じにくく、
光路を把握しにくい。



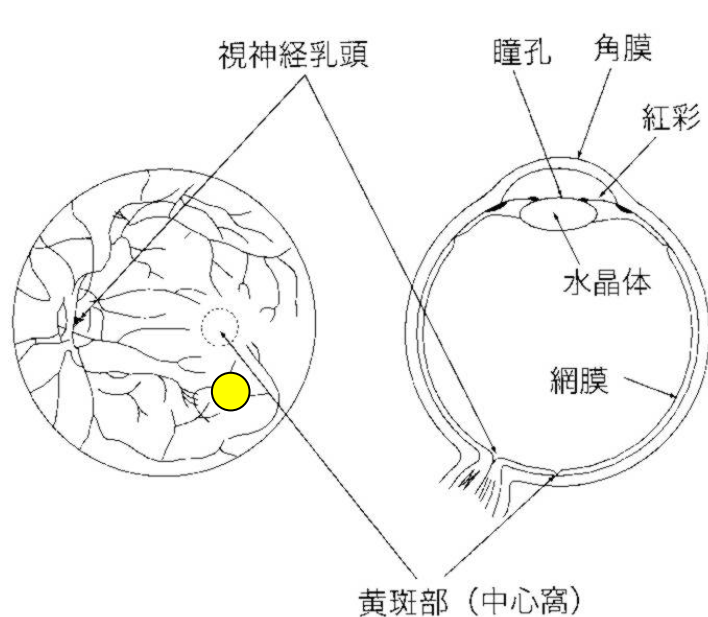
Nd:YAG、チタンサファイヤレーザー、青色 L D は要注意

視力低下は矯正不可能

失明しなくても不幸中の幸いとは言えない！

メガネ・コンタクトで視力は戻らない！

色分解できる視力1.2を持つのは黄斑（おうはん）部のみ



視細胞には明るさに鋭敏な桿体（かんたい）細胞と、色彩に鋭敏な錐体（すいたい）細胞がある

黄斑では錐体細胞の密度が高く、黄斑中心は視野のなかで最も解像度がよい部分



黄斑以外は低分解能モノクロカメラ

レーザー安全ガイドブック より

- 調整場所を見る
→調整箇所像は黄斑部に結像
- 調整場所からレーザー光が来る
→そのまま黄斑部に結像する

このため、ほぼ必然的に
黄斑部の損傷となる

同じ風景を見ても……

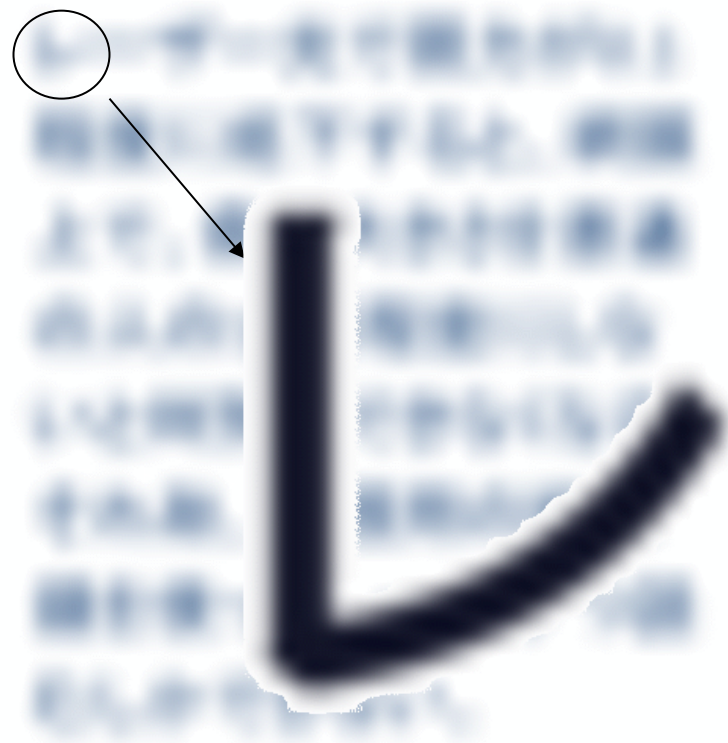


メガネ・コンタクトで補正できない！！

視力1.2の見える範囲

レーザー光で視力が0.1程度に低下すると、網膜上で、像の大きさを普通の人の10倍程度にしないと判別ができなくなる。それ故、弱視用の拡大鏡を使って、一部ずつ読むしかできない。

視力0.1の見える範囲



目の障害を防ぐために

- 使っているレーザーの危険度を知ろう
 - 危険度に応じてクラス分けされている
- 使っているレーザーが危険度が高い場合には、必ず適合するレーザーゴーグルを使おう
(自分の身を守る)
- レーザー光が想定外のところに行かないように、実験系を組み立てよう
(周りの人を事故に巻き込まない)

レーザーのクラス、MPE、AEL

最大許容露光量(MPE)

実験的研究から得られる。
波長、露光時間、露光箇所
によってかわる



被ばく放出限界 (AEL)

波長、放出持続時間
によってかわる



レーザーのクラス

波長、強度、放出持続時間
レーザーの危険度を表す



クラスに応じた安全対策

- レーザー事故事例などを通して、**最大許容露光量 (MPE ; Maximum Permissible Exposure)** が定められている。
- MPEを基準に、安全な段階から、非常に危険な段階まで、それぞれのレーザーを区切る被ばく放出限界 (ALE; Accessible Emission Limit)が定められている。
- クラスの数字が大きいほど危険性は大 (クラス1～クラス4)
 - **クラス分けは製造業者が行う**
 - 使用者はクラス分けに対応した安全管理の責任
- クラス分けは2005年に (一部) 変更になった

最大許容露光量(MPE)

通常の環境下で、**人体に照射しても有害な影響を与えることがない**
レーザ放射のレベル。

- 障害発生確率 50%となる強度の1/10
- 波長と露光時間によって定まる
 - 目のどこで吸収されるか、露光時間が長いとMPEは小さくなる
- 目と皮膚では目の方が値が小さい（2桁以上小さい）

400nm～1400nmにおけるMPE

波長 λ (nm)	露光時間 t (s)					
	10 ⁻¹³ ~10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ ~5×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁶ ~13×10 ⁻⁶	13×10 ⁻⁶ ~10	10~10 ²	10 ² ~3×10 ⁴
400~450	3.8×10 ⁻⁸ J	7.7×10 ⁻⁸ J	7×10 ⁻⁴ t ^{0.75} J		3.9×10 ⁻³ J	3.9×10 ⁻⁵ C ₃ W
450~500					3.9×10 ⁻³ C ₃ J 及び3.9×10 ⁻⁴ W	
500~700					3.9×10 ⁻⁴ W	
700~1050	3.8×10 ⁻⁸ J	7.7×10 ⁻⁸ C ₄ J	7×10 ⁻⁴ t ^{0.75} C ₄ J		3.9×10 ⁻⁴ C ₄ C ₇ W	
1050~1400	3.8×10 ⁻⁸ C ₇ J	7.7×10 ⁻⁷ C ₇ J		3.5×10 ⁻³ t ^{0.75} C ₇ J		

- 露光量の計算には、適切な開口を用いる必要がある（限界開口）
- 400nm～1400nmに対しては、開口（瞳孔）として7mmを用いる
- C_n は波長に依存する補正係数（JIS C6802:2014の表9参照）

~MPEは見直されるかもしれない~

10倍の安全率を見込んだ規格のはずだったのだが……

- フェムト秒レーザーで、MPEより弱い光での障害例が報告
- 従来とは違う障害パターン
- チタンサファイアレーザー要注意

化学薬品でも、後から毒性が見つかる例がごろごろ

~急性障害と慢性障害~

人体に対する影響には急性と慢性がある

- 化学薬品類
 - 急性：酸・アルカリ
 - 慢性：発ガン物質・アスベスト
- 光
 - 急性：レーザーによる失明
 - 慢性：紫外線による皮膚癌、白内障

※高圧水銀灯、重水素ランプ、紫外LEDの光には注意。
遅延性障害（白内障や加齢黄斑変性など）を引き起こす可能性あり。

被ばく放出限界 (AEL)

クラス1およびクラス1M

波長 λ (nm)	放出持続時間 t (s)					
	10 ⁻¹³ ~10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ ~5×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁶ ~13×10 ⁻⁶	13×10 ⁻⁶ ~10	10~10 ²	10 ² ~3×10 ⁴
400~450	3.8×10 ⁻⁸ J	7.7×10 ⁻⁸ J	7×10 ⁻⁴ t ^{0.75} J		3.9×10 ⁻³ J	3.9×10 ⁻⁵ C ₃ W
450~500					3.9×10 ⁻³ C ₃ J 及び3.9×10 ⁻⁴ W	
500~700					3.9×10 ⁻⁴ W	
700~1050	3.8×10 ⁻⁸ J	7.7×10 ⁻⁸ C ₄ J	7×10 ⁻⁴ t ^{0.75} C ₄ J		3.9×10 ⁻⁴ C ₄ C ₇ W	
1050~1400	3.8×10 ⁻⁸ C ₇ J	7.7×10 ⁻⁷ C ₇ J		3.5×10 ⁻³ t ^{0.75} C ₇ J		

クラス2およびクラス2M

波長 λ (nm)	放出持続時間 t (s)	クラス2のAEL
400~700	$t < 0.25 \text{ s}$	クラス1のAELと同じ
	$t \geq 0.25 \text{ s}$	$C_6 \times 10^{-3} \text{ W}$

波長 $\lambda = 400 \sim 700 \text{ nm}$ の可視光が対象。目の嫌悪反応（0.25秒程度）により危険性が回避される1mWのパワーレベル

被ばく放出限界 (AEL)

クラス3R

波長 λ (nm)	放出持続時間 t (s)					
	$10^{-13} \sim 10^{-11}$	$10^{-11} \sim 5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$	$13 \times 10^{-6} \sim 0.35$	$0.35 \sim 10$	$10 \sim 3 \times 10^4$
400~700	$1.9 \times 10^{-7} \text{ J}$	$3.8 \times 10^{-7} \text{ J}$	$3.5 \times 10^{-3} t^{0.75} \text{ J (} t < 0.25 \text{ s)}$ $5.0 \times 10^{-3} \text{ W (} t < 0.25 \text{ s)}$		$5.0 \times 10^{-3} \text{ W}$	
700~1050	1.					
1050~1400	1.9					

クラス3B

波長 λ (nm)	
400~700	
700~1050	
1050~1400	

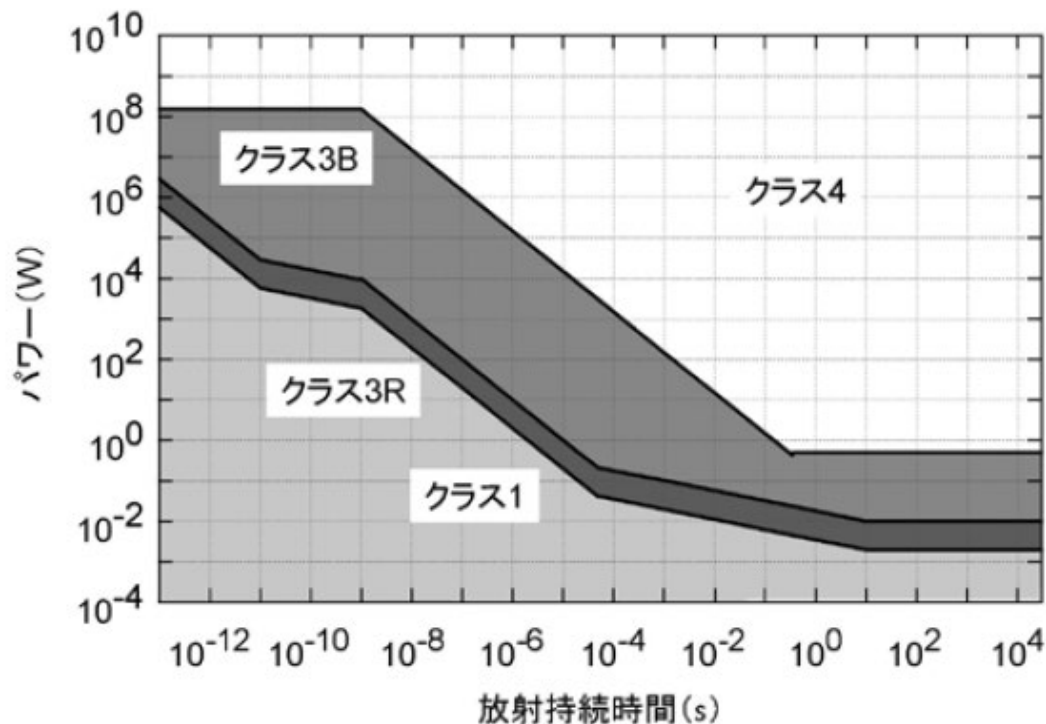


Fig.3 Nd:YAG レーザーの被爆放出限界 (AEL)

- 使っているのがクラス1、クラス1M、クラス2、クラス2Mのみなら、あまり心配しなくてよい
- クラス3Rがあったら、注意が必要
- クラス3B,クラス4のレーザーを使っている場合は、**厳重な注意が必要**
 - クラス3Bのレーザーが目に入れば、ほぼ確実に視力障害を、4のレーザーだと反射光が目に入っても視力障害を起こす。これらのレーザーは起動に鍵が必要

装置に鍵がついているレーザーは要注意

輸入品の一部のレーザーポインターにはクラス3Bや4すらある

レーザーのクラス分け

クラス1	合理的に予測できる条件下で安全	MPE以下の出力しか出せないレーザー。MPEの定義から、目に入れ続けても急性の損傷はおこさない。 慢性障害については保障されず。
クラス2	まばたきなどの嫌悪反応によって眼は保護され安全	0.25秒でのMPEを超えない出力のレーザー。 400～700nmでのみクラス1より大きな値を持ち、それ以外の波長では、目の防御が効かないため、クラス1と同じ。
クラス3R	直接ビーム内観察は危険になることがある	クラス2の5倍以下の出力のレーザー。 MPE値を超えているが、障害率50%の強度の半分には収まっている。不可視波長の場合は、レーザーゴーグルを使用すること。可視波長でもゴーグル使用が望ましい
クラス3B	直接ビーム内観察は通常において危険	0.5W以下（可視CWの場合）のレーザー。 直接目に入ると障害を起こすと考えること。 また、100～200mW以上の場合、ガラスの反射光も危険。 クラス3Bを閉じられていない空間で使うときはレーザーゴーグルの着用が必要
クラス4	拡散反射も危険になることがある	直接目に入ると絶望的。ガラスなどによる反射が目に入っても、障害の確率大。 レーザー光が届く範囲にいる人は、必ずゴーグルを着用 レーザー光を実験空間に確実に閉じ込めて、実験に携わっていない人が事故に遭わないように

クラス1M, 2M

光の発散性が強いレーザー（分散光源）のための規格
（半導体レーザー、ファイバー出力等）

強度は強いけれども裸眼は安全

例えば、角膜通過領域波長帯において、光源から10cm離れた位置で各クラスのAELを超えず、全出力がクラス3B未満のレーザー

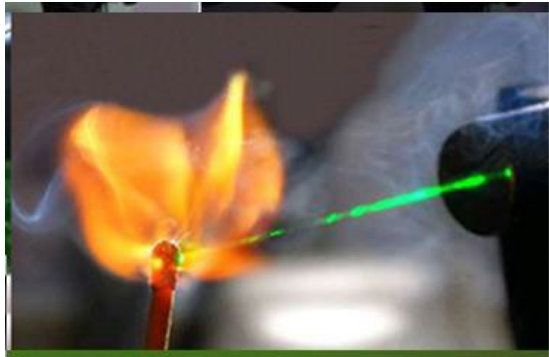
光源から2m離れて、5cm直径の開口が設置される場合の開口透過パワーがAELを超える場合（超えなければMではない）。

光源に近いところで平行にする
光学系で集光して目に入れる
近眼が強くて1cmでピントがあう

と危険

- 1 mWの緑のレーザーポインタ
CWでクラス1のAELは0.39 mWなのでクラス2以上。
クラス3RのAELは5 mWなので、クラス2。
- 10 mWのHe-Neレーザー
クラス3Rは5 mWなのでクラス3B以上。クラス3BのAELは0.5Wなので、クラス3B。
- パルス幅5ns、繰り返し周波数10Hzで100mJ/pulseのYAG(1064nm)レーザー
クラス3BのAELは0.5Wなのでクラス4。

- 国内販売は違法
- ネット購入可能（たぶん海外業者）
 - 安いからと言って、何も考えずに購入しないこと
 - **学会発表時などに使用しない**
 - 海外土産に注意
 - 国内路上販売にも注意



レーザーを使用した装置



レーザー加工機



Blu-ray レコーダー

共にClass 1だけれども、レーザー加工機は数十W, BDレコーダーも200mWクラスのレーザーが使われている

Class 1 は「運転中（通常使用時）に Class 1 の AELを超える放射にアクセスできない製品」

CWレーザー光のMPE

紫外LD (350nm,10sec)		100 mW/cm ²
Arイオン	(514.5nm,0.25sec)	1 mW
CWグリーン	(532nm,0.25sec)	1 mW
He-Ne	(632nm,0.25sec)	1 mW
Ti:S	(800nm,10sec)	0.65 mW
Nd:YAG	(1064nm,10sec)	2 mW
CO ₂ (10μm,10sec)		100 mW/cm ²

MPEの表と、対象の波長および継続時間から、
 $7 \times 10^{-4} t^{0.75} [\text{J}] = 7 \times 10^{-4} 0.25^{0.75} \div 0.25 [\text{W}]$

※網膜に到達するまで、値は大きく異なる。

※可視域は0.25秒、それ以外は10秒での値

重要：あくまで目安なので、鵜呑みにはしないこと

単発パルスレーザー光

XeCl	(308nm,10nsec)	2 mJ
N ₂	(337nm,1nsec)	2 mJ
Nd:YAG SHG	(532nm,5ns)	77 nJ
Ti:S	(800nm,100fs)	38 nJ
Nd:YAG	(1064nm,5ns)	770 nJ

連続パルスレーザー光

XeCl	(308nm,10nsec,50Hz)	1.2 mJ
N ₂	(337nm,1nsec,20Hz)	2 mJ
Nd:YAG SHG	(532nm,5ns,10Hz)	77 nJ
Ti:S	(800nm,100fs,80MHz)	8 pJ(0.65 mW)
Nd:YAG	(1064nm,5ns,10Hz)	770 nJ

※上記の値は、何れもパルス1発あたりのエネルギー。

Ti:Sは持続時間10秒、他は0.25秒として計算

※パルスレーザーのMPEは単発値と連続値を比較して小さい方を選択する

重要：あくまで目安なので、鵜呑みにはしないこと

- 可視連続レーザー10mWが目に入ったら、
ほぼ間違いなく目に重い障害が残る
- パルスYAGは10 μ J/パルスで危険
- フェムト秒チタンサファイヤは数mWで危険

クラス 3 B, 4 レーザーの注意事項

- レーザーゴーグルの使用
 - 目の障害を防ぐ、最大の手段

個人・管理者の努力

- 光学台の設置と遮光の注意
 - システムとして事故の起こりにくい環境作り

管理者の努力

- 光学調整時の注意事項
 - 自分の目を自分で守るための知識

個人・管理者の努力

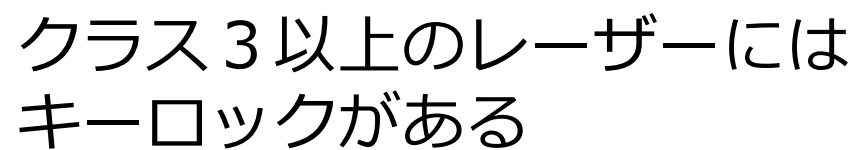
- 管理者の役割
 - 教育訓練の実施
 - 事故を防ぐ実験システムの構築
 - 鍵の管理
 - 部屋の区分け
 - ゴーグル等の購入
 - 使用状況のチェック

環境と教育

- 実験者の役割
 - ルールの遵守
特に、ゴーグルの装着
 - 安全に関する知識の学習
 - システム上の問題点の指摘

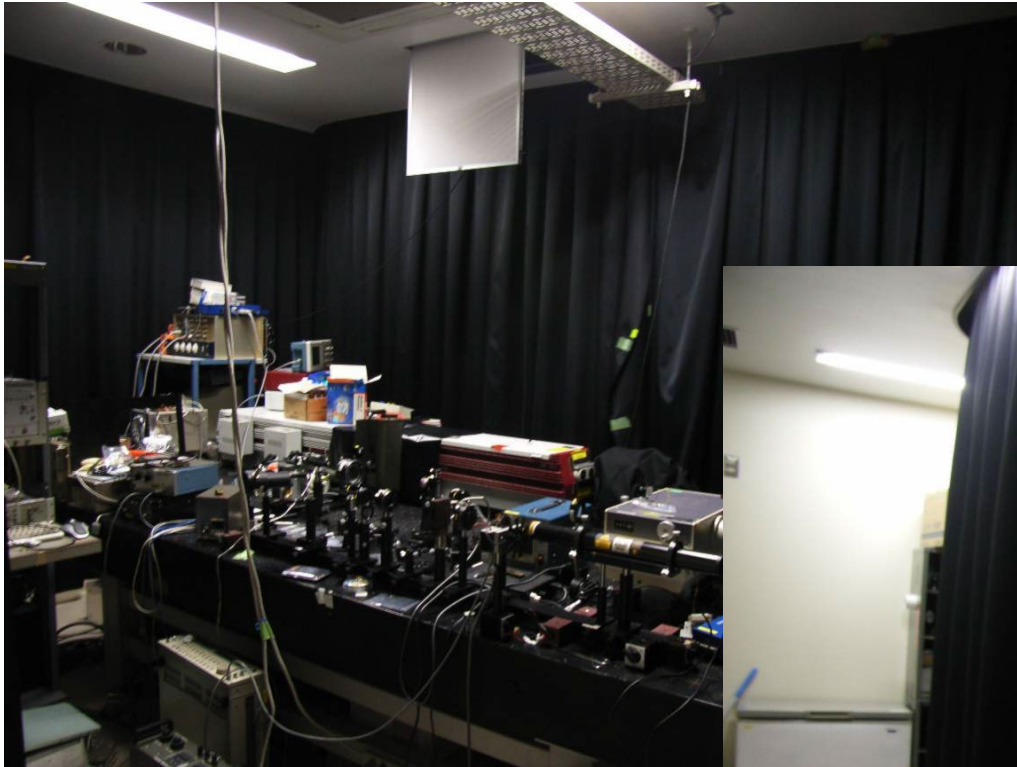
知識と気構え

Institute of
SCIENCE TOKYO



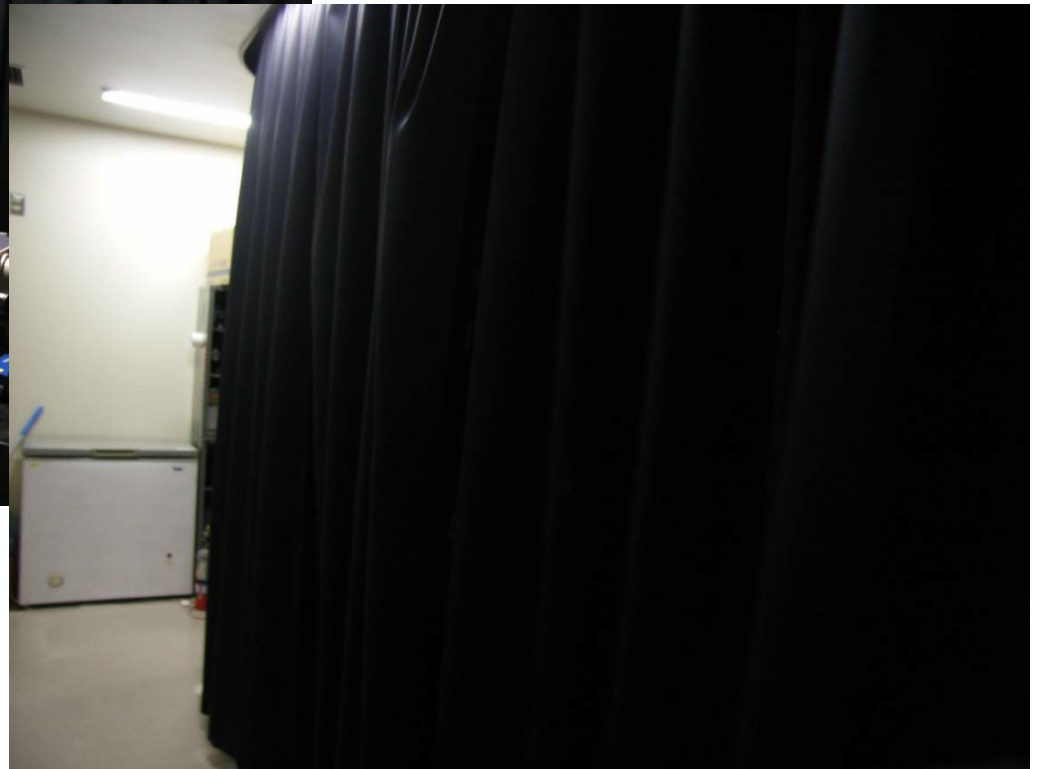
システムとしての安全性確保

部屋を区切って光を閉じ込める



←実験をしていないとき

↓実験中



さらに、光学台の上に
光を閉じ込める

使用しているレーザーに適合したゴーグルを装着していて、目の損傷事故を起こした例はほとんどない。

– ゴーグルを装着しない言い訳

- ない→これは、研究室の責任
- 操作性が悪くなる
- 初心者っぽく見える
- 自分は事故を起こさないよう気をつけている
- 忘れた

シートベルトをしないで運転するのと同じ

事故で一番困るのは実験をしている本人

レーザーにあったゴーグルを使う

異なったレーザー用のゴーグルをかけていても役に立たない



アルゴンレーザー用



ヘリウムネオンレーザー用



紫外レーザー用



Y A Gレーザー基本波用

- 波長の選択
 - 使用している波長の光をきちんと吸収するゴーグルでないと、事故は防げない
 - 特にYAGの基本波と倍波など複数の波長が出ている時は注意
- 光学濃度の選択
 - ゴーグル透過後の光がクラス2以下になるべき
 - 可視領域のレーザー用には調整のためにある程度はレーザー光が透過するもの（調整用ゴーグル）がある。調整用ゴーグルと、保護用のゴーグルは使い分けることが必要
- 耐久性
 - ある程度のレーザー照射に耐えることの保障
 - 色があるサングラスは代用にならない

波長と光学濃度が示されている

必ず、ある波長での光学濃度(OD)値が記してある。
使っているレーザー波長に
合致するか、ODが十分かを
確認する。



このゴーグルは調整用。
514.5nmで、1%の光を
透過

数Wのレーザーだと、直
入射では確実に目に障害

透過率と光学濃度（吸光度）

$$\text{Abs(OD)} = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

OD値	透過率 (%)
0	100
1	10
2	1
3	0.1

必要なゴーグルのOD値

CW { CWグリーン (532nm,10W)
MPEが1mWなので、10Wを1mW以下にするには、1 / 1 万
の減衰率が必要 → ODは4 以上

Nd:YAG (1064nm,10W)
MPEが2mWなので、減衰率は2/ 1 万 → ODは3.7以上

パルス { Nd:YAG SHG (532nm,100mJ)
MPEが77nJなので、OD6.2以上

Ti:S (800nm,80MHz,1W)
MPEが0.65mWなのでOD3.1以上

Nd:YAG (1064nm,500mJ)
MPEが770nJなので、OD5.9以上

重要：あくまで目安なので、
鵜呑みにはしないこと



ゴーグルタイプ（左）の方が、どの方向からの光も遮断できるので安全性が高い。メガネの上からも装着できる。
なるべく、ゴーグルタイプを使用する（曇ったりして使いにくいこともあるのが難点…）

- 調整用ゴーグル
 - 光の減衰が弱く、装着していてもレーザー光が見える。
- 保護用ゴーグル
 - 光の減衰が強く、装着するとレーザー光が（ほぼ完全に）見えなくなる

可視領域以外では区別なく、保護用クラスを着用すべき

- 使っているレーザー・目的に対して、合致するゴーグルがない場合は
 - レーザーゴーグルのカタログには分光スペクトルがあるので、それから、適合しそうなものを探し出して使うようにする
- 波長可変レーザーを使う時は、ゴーグルの保護範囲を逸脱していないか注意せよ
- 多波長のレーザーを同時使用するときは、
 - 使用波長全てに対応したゴーグルがあればそれを使う
 - 全てに対応するゴーグルがないなら、もっとも危険度の高い（不可視・高強度）への対策を優先し、ゴーグルで対応していない波長はきっちりとビーム保護を行う

- 異常を感じたら、軽微でも、すぐに眼科を受診（夜間は救急外来）
 - 角膜障害は痛みがある。まぶたを閉じて、目を安静にして、至急眼科に。手近に、冷やす物があったら、穏やかに冷やしてもよいと思われる。
 - 網膜の障害は痛みがない場合もある。この時もまぶたを閉じて、至急眼科に行く。痛みがあったら、穏やかに冷やしてもよいと思われる。
 - 回りの人は、本人を落ち着かせるように気を配ること。

※眼科までの応急処置には不確かさがあるので、必要に応じて医師をアドバイスを

謝辞：近藤眼科クリニック（相談掲示板2007年4月）

より詳しいことを知りたい人に

頼りになる参考文献

レーザー安全ガイドブック（第4版）

新技術コミュニケーションズ

規格はJIS C6802、C6803

厚生労働省基準：レーザー光線における障害の防止対策について

https://www.mhlw.go.jp/web/t_doc?dataId=00tc0756&data Type=1

光学系の組み立て

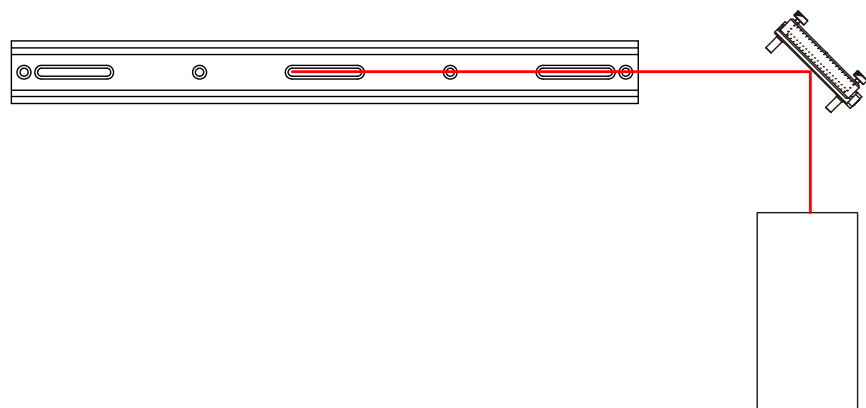
- 事故率が低くなる光学系のデザインを行う
ー調整に手間取るほど、事故確率は増加していく
- 目に入る可能性、入ったときのダメージを減らす
ー事故確率を低くする努力
- 複数人での実験、レーザー実験区域の出入りに注意
ー人を巻き込まない注意

調整時の事故が一番頻度が高い

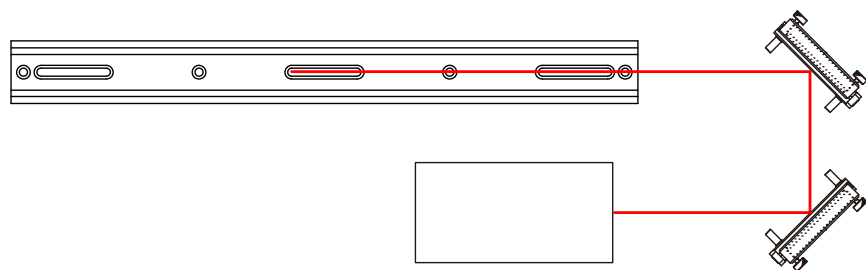
合理的な光学系の設計と調整

調整しやすい配置

- 光学用レールに平行に光路を調整する場合
 - 高さ・角度調整には2箇所以上の可動部分が必要

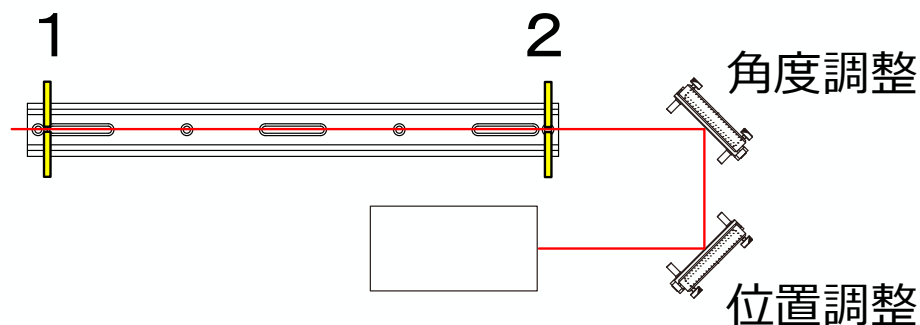


元のレーザーの高さと水平が出ていないと調整不可能



元のレーザーの高さと水平が異なっても調整可能

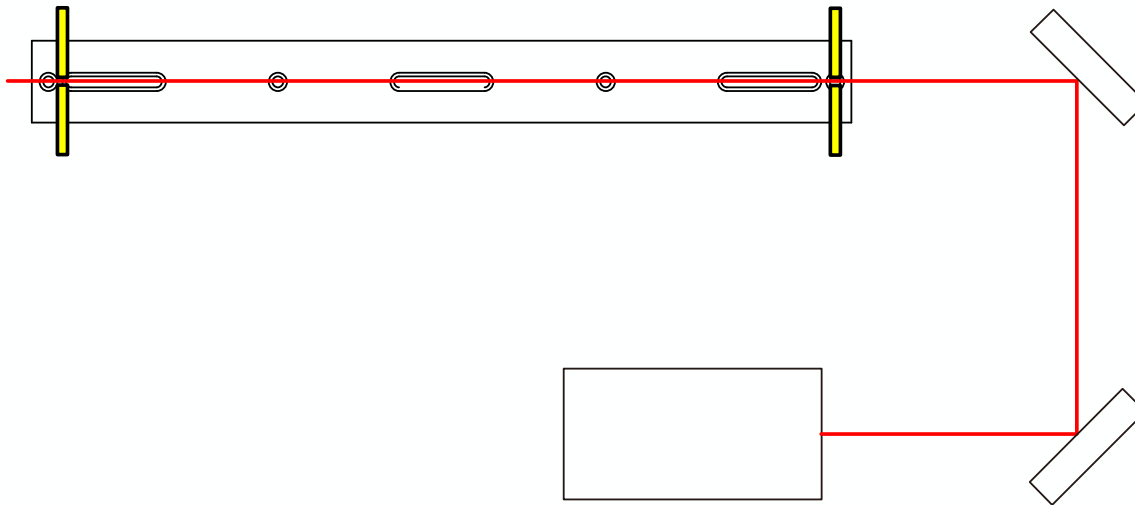
- ピンホールを2に置き、位置調整でピンホールを通るようにする。
- ピンホールを1に置き、角度調整でピンホールを通るようにする。



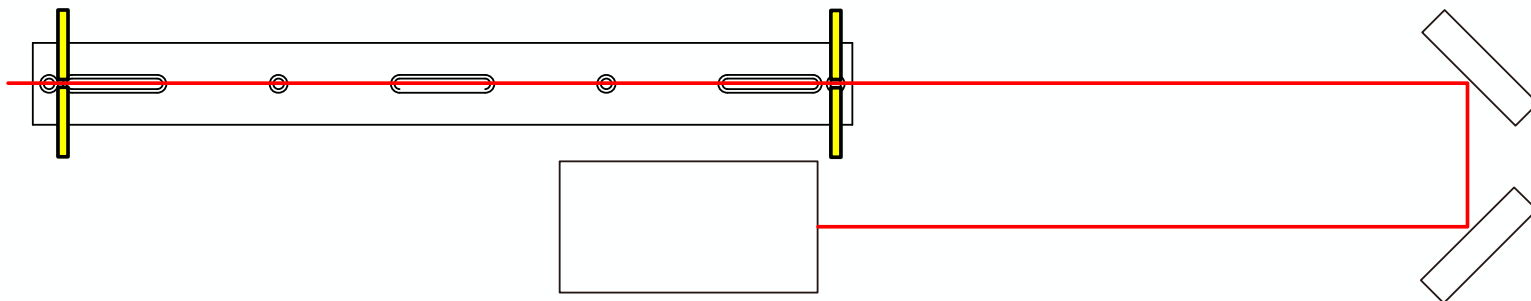
後は、両方のピンホールを通るようになるまで、上の手順を繰り返す

※2枚のレンズで光を広げてまっすぐ飛ばす時なども、考え方は同じ

よい配置と悪い配置

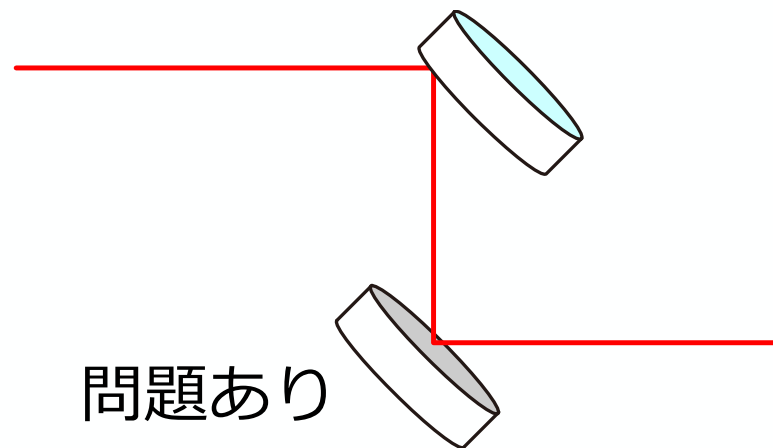
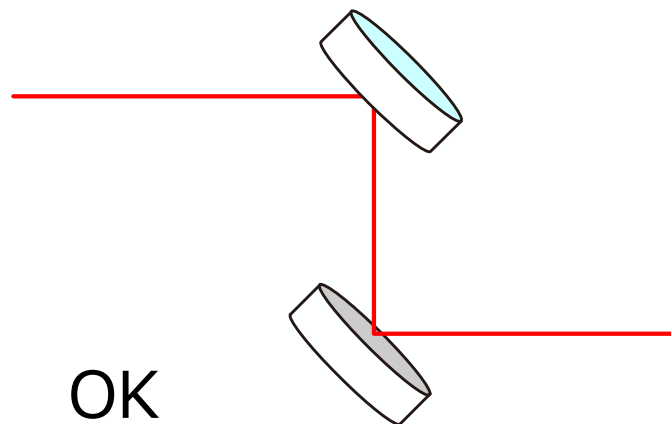


位置と角度の役割分担
がはっきりしている



位置と角度の役割分担ができていない

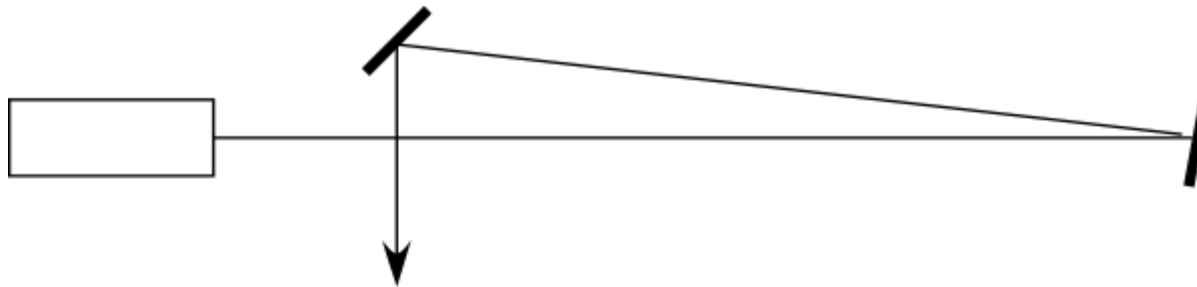
光学素子の中心に光を通す



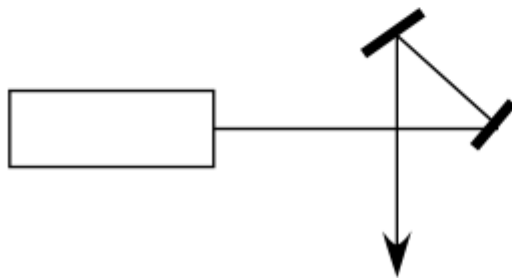
※ミラーの端だと、調整過程でミラーの端から外れると、予想できない方向に光が飛ぶ・ 調整中は光の位置をチェックして、端に行きすぎるようなら、ミラーの場所を再調整する

ミラーの厚みのために、どうしても端を使わなければならない場合もある…

光路はコンパクトにまとめる

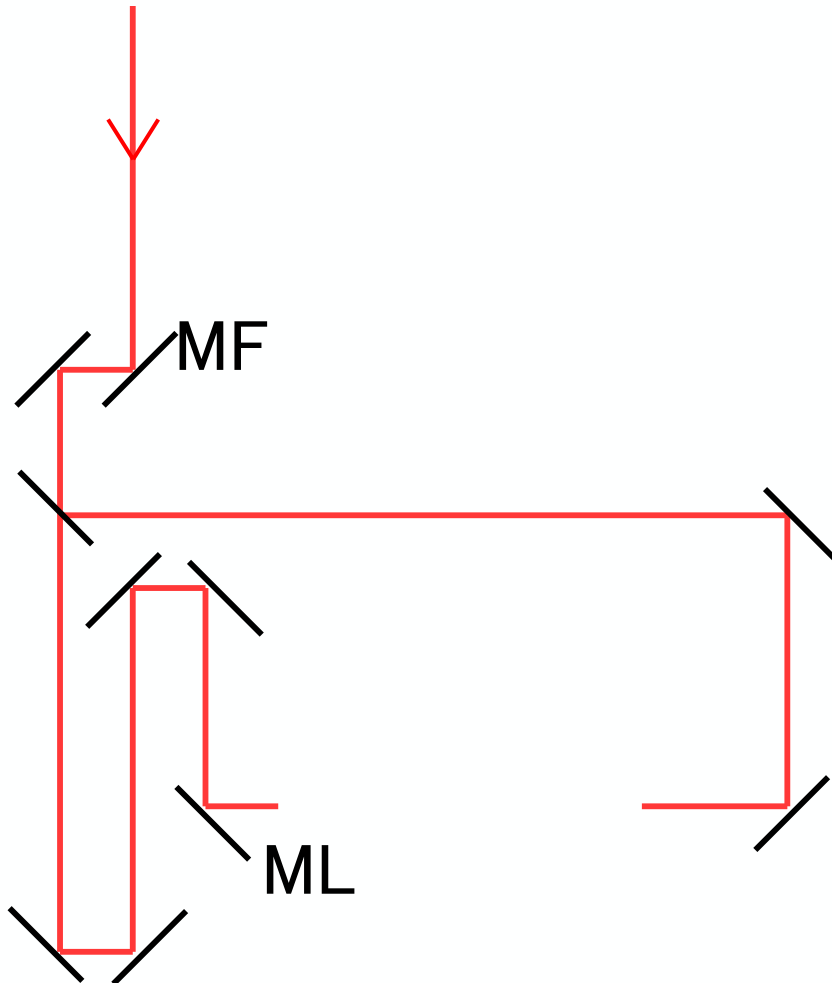


特別な理由が無い限りは下のセットアップの方がよい。



- ・ 光路が長い方が光路にものが入る率が高まる
- ・ ミラー後の光路が長いと振動により弱くなる。

調整は順番に



基本的に調整は光源側から詰めていく。

きちんと合わせていけば、遡って修正する必要は生じない。

たとえば、途中でMFをいじるような真似をすると、MF以降をすべてやり直す必要が生じる。

光学系の要所にピンホールを入れると、どこが狂ったかを確認しやすい

その他の注意

レーザーに光は戻さない

- レーザーに光が戻ると発振異常が生じ、発振が不安定に。
 - CWは発振が不安定になる
 - モードロックが落ちたりする
 - Qスイッチパルス Y A Gだと内部破損が起きることもある。

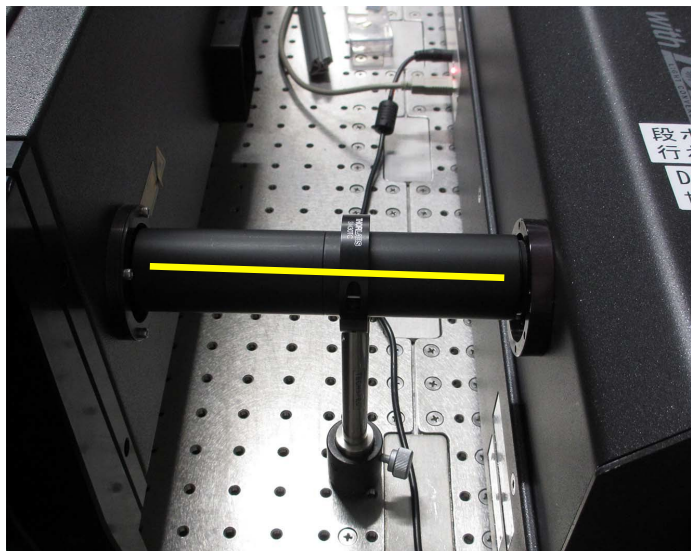
戻り光がわずかに出射光からずれるようにする
光アイソレータを入れることもある

光学素子の破損に注意

- 強いレーザーだと金属ミラーに穴が開き、吸収型フィルターは熱で割れることがある
 - 吸収の弱いフィルターから入れる
- ついでに
 - 高出力レーザーを使うときは、反射光が偏光子で集光すると素子がダメージを受けることがある

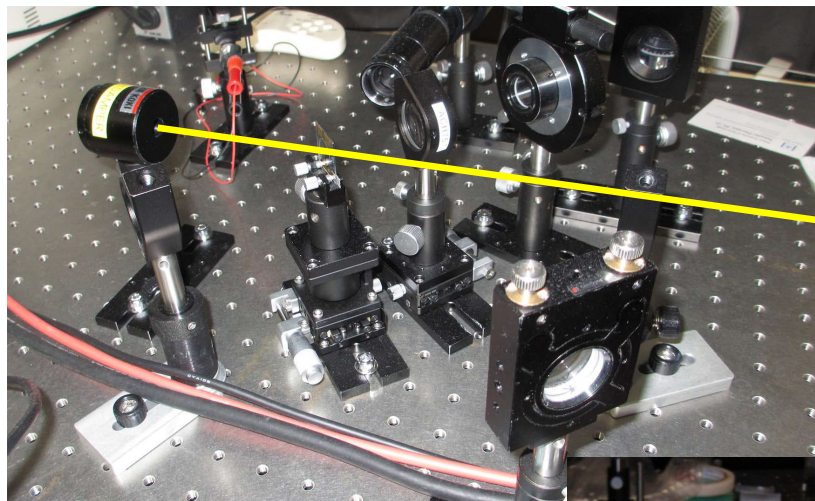
光を閉じこめる

パイプによる光路の保護



※測定中などに光路に物が
が倒れ込むのも防げる。
埃を防ぐのにも効果的

光を止める



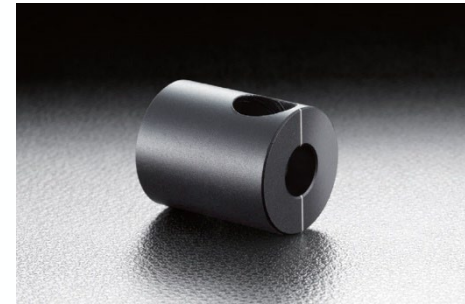
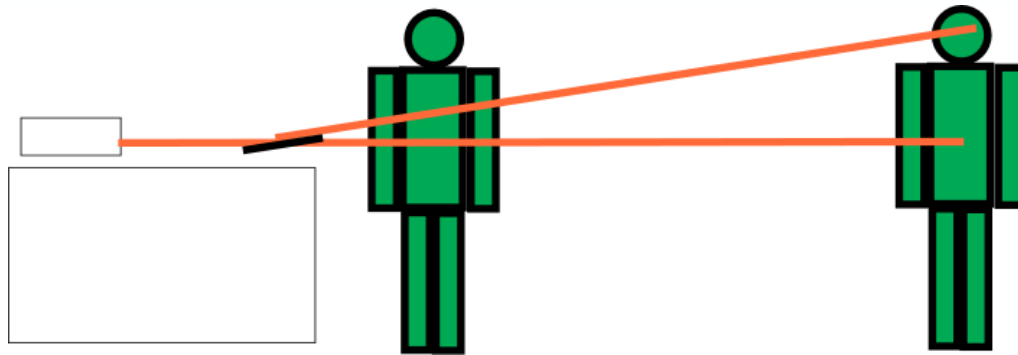
↑まっとうな
ビームダンパー

→これは…悪い例



レーザー光は水平にのみ飛ばす

- ・ 斜めにレーザー光が飛ぶと、外に飛んだときに、予定外の高さに光が行く
- ・ 光学台の上の空間にもレーザーが飛ばないように処理する（のぞき込んだときに目に入る危険性がある）



ポートがある
グランレーザープリズム

目に入る可能性、入ったときのダメージを減らす

ゴーグルをする

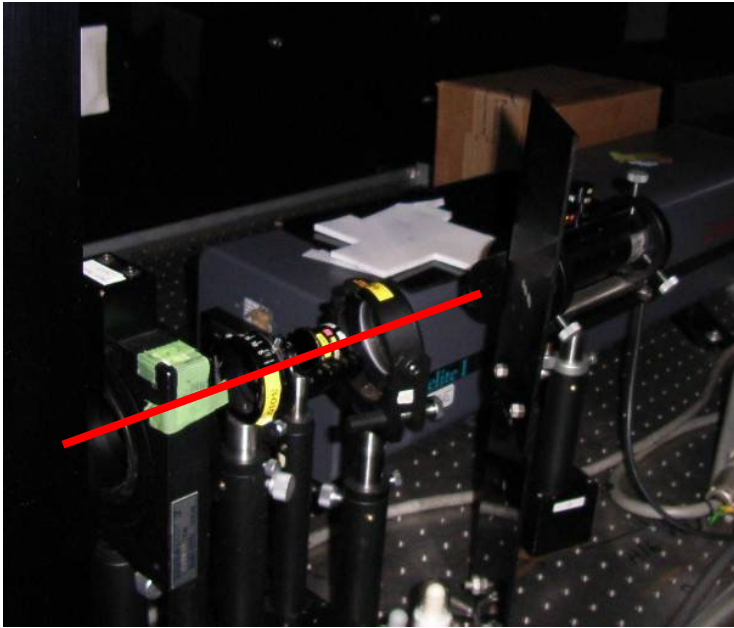
- レーザー事故を防ぐもっとも基本的な手法
- 調整している本人以外は必ず保護クラスのゴーグルをする

調整時の出力は弱く

- 光軸をあわせる時は低出力（出力を弱くしておけば、万一の事故の時にも、助かる率は高くなる）
- 光学部品を動かすときは光を弱くするか遮断する（移動時に予期せぬ反射が生じやすい）
- 不可視レーザーの場合には同軸でHe-Neを
- 800nm程度のレーザーは、CCDビデオを利用

目に入る可能性、入ったときのダメージを減らす

不可視光を見る

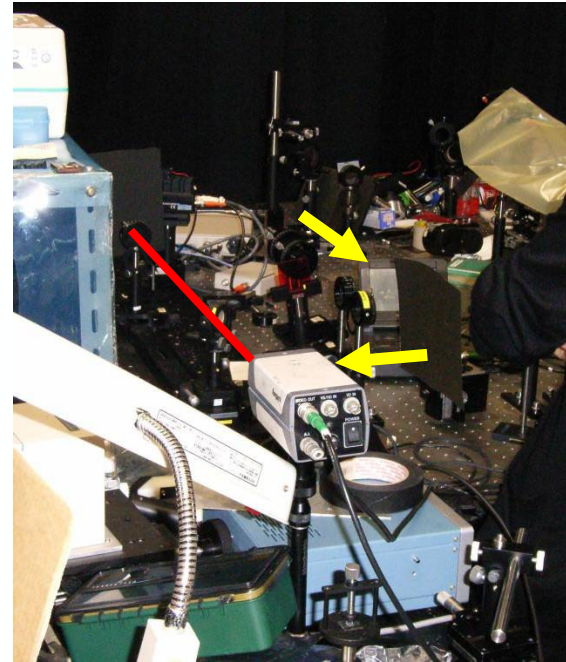


赤外光と同軸に見える光を飛ばす

赤外ビューアーも必需品



ビデオカメラを使った光学調整



近赤外に感度のあるCCDカメラを使うと、肉眼よりはるかに高感度でレーザー光を見られる。

※カラービデオでは近赤の感度が低いものもある。モノクロカメラならOKだと思う。

目に入る可能性、入ったときのダメージを減らす

部屋は暗くしない

人間の瞳孔の大きさ
1mm (明所)

→7mm (暗所)

瞳面積は暗所では明所の50倍に。
ということはレーザー光が瞳孔を
通過する確率もおよそ50倍。



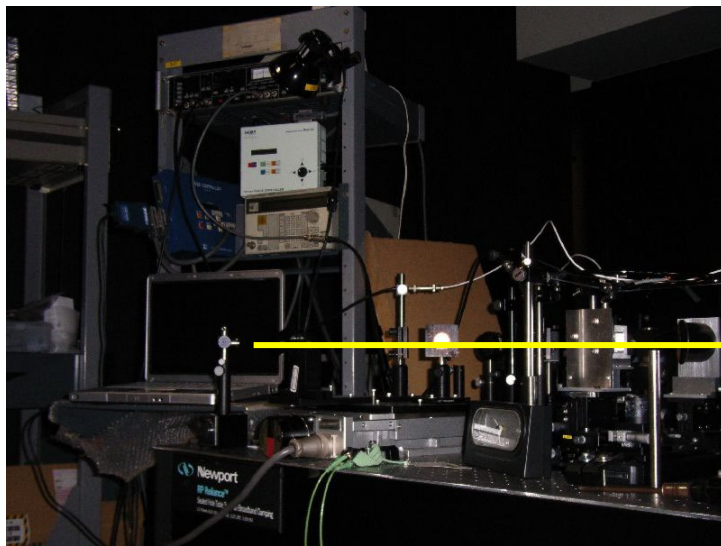
反射するものを持ち込まない

- 腕時計や指輪は意図しない反射を引き起こすので実験時には外す
- 工具類も可能な限り黒色のものを用いる
- ビームダンパーに鏡面は（黒色でも）は用いない
※段ボールは火災の原因に！



レーザー光と同じ高さで作業しない

- パソコン操作等の時の視点の高さがレーザーが通っている平面と重ならないようにすること（例え、光学台と逆向きだったとしても）。



※この場合は目線は、光路より少し上に出ている。ただし、ノートPCの画面の角度と表面によっては危険になりうる。

※ひとりが作業をしながら、ひとりがPCを操作するような状況は特に避ける。

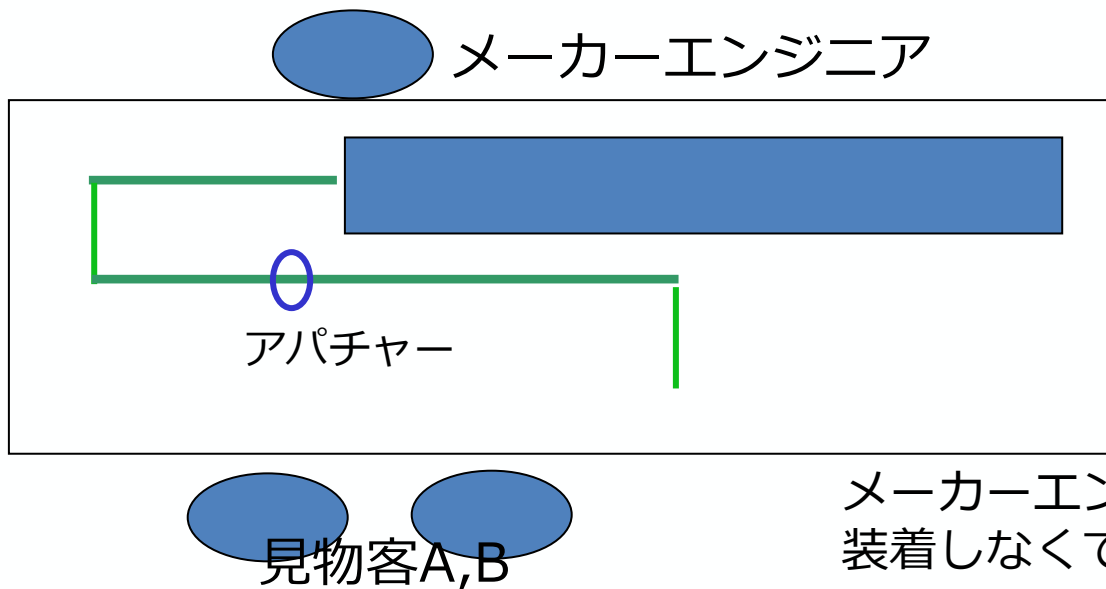
- 床に落ちたものを拾うときは光学台の反対側を向いてしゃがむようにして、目が光学台の方向を向いたまま光線高さを横切らないようにすること。

※垂直に立っているポールに光があたると水平面に拡がる

複数人作業では嚴重な注意を

- 複数人で作業をするときは、事故の確率が 1 人の時に比べ格段に高くなる。
 - 調整者以外は常にゴーグル着用
 - 観察している人の方が、事故に巻き込まれやすい。必ずゴーグル着用
 - レーザの遮断解除は必ず 2 ステップ以上
 - 誰かがレーザー光の遮断を間違えて解除しても、事故が起こらないように複数箇所遮断

ヒヤリハット例



メーカーエンジニアが調整中に光路のアパチャーを着脱。
この時、アパチャーのポールで散乱した光が見物客側に飛んだ

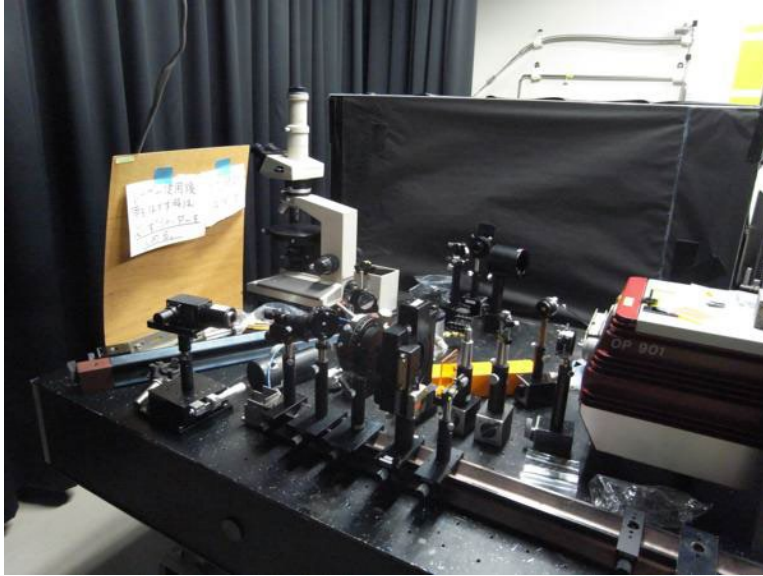
メーカーエンジニアがゴーグルを装着しなくても、見物客は装着を

レーザー実験区域（管理区域）の 出入りに注意

- 暗幕の先の様子が分からない場合、声をかけて中の様子確かめてから暗幕をあける（原則、管理区域は関係者以外立入禁止）
- レーザーを使用しているか、外部から確認できるように、「使用中」の標識を用意する
- 出るときには、光と一緒に外に出さない



最初はこれでよい

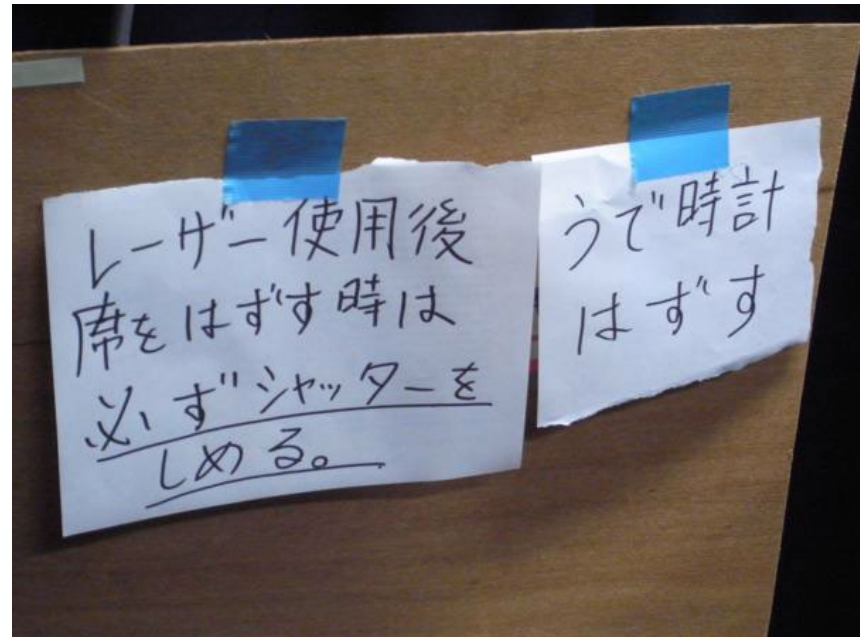


慣れない間、きちんとやるための
良い工夫

本当は管理区域内にベニヤ板
と紙で掲示するのは・・・

◆ でも、これ無しでも自然
に危険を避けられるよう
になってほしい

何故なら

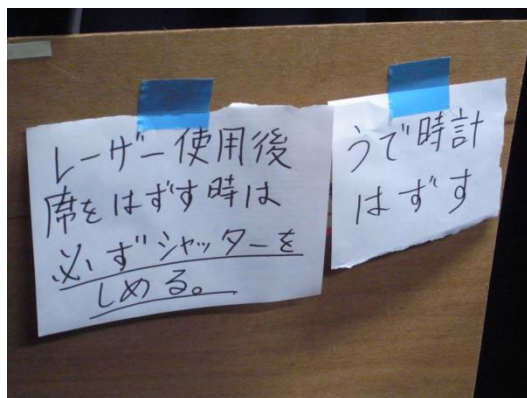


何故なら・・・

人間は一度失敗する理由を持っていれば、百のヴァリエーションをもって千の失敗を続ける。

辻 まこと

→失敗を減らすためには、失敗の理由を減らすことが重要



※「うで時計はずす」は「光路内に反射体を持込まない」のバリエーションの一つ

実験では必ずイレギュラーが起こる

- イレギュラーなことが起きた場合、自分で危険性を評価して行動しなければならない。
 - 原理を理解していないと安全か判断できないし、応用もできない
 - 研究室の伝承は根拠のないことも結構ある。それに従っても良いけれども、ダメージを受けるのは我が身

レーザー事故で目をだめにする危険性を減らすには

どの程度の強さで目に障害が残るかの正確な知識を持ち
それを防ぐのに必要なゴーグルのスペックを
理由を含めて話せるようにせよ

ご清聴ありがとうございました