

大阪国際感染症研究センター勉強会
2025年 5月 16日（金）@ UR森ノ宮ビル2階210室

紫外線消毒の現状と 紫外線量評価の高度化

○准教授 秋吉 優史

大阪公立大学 工学研究科 量子放射線系専攻、
放射線研究センター、
大阪国際感染症研究センター兼任

E-Mail: akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp

<https://www.omu.ac.jp/eng/akiyoshi/home/>



なぜ感染制御研究を？



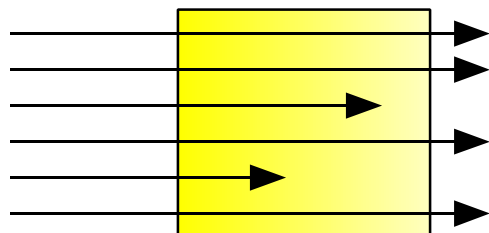
非密封のRI(放射性同位元素)を取り扱う上での汚染拡大防止と、感染制御は共通点が多い。

防護着として用いられているタイベックスーツはRI用と生物用で同じ物。

教育現場で使われるクルックス管の安全管理を行う上で、中途半端なエネルギーのX線の線量評価をしている。

強透過性放射線

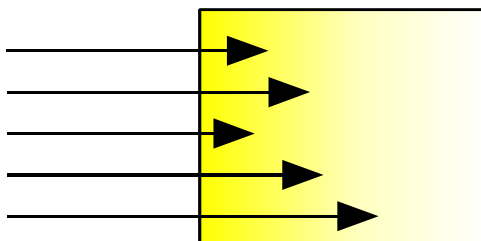
$$H_p(0.07) \leq 10 H_p(10)$$



整列拡張場

ほとんど素通りでほぼ均一にエネルギーを与え、入射エネルギーでは無く物質が受け取ったエネルギーで評価($J/kg = Gy$)。

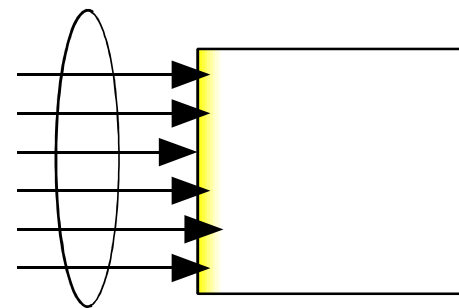
低エネルギーX線



20keV の X線は1cm で半分に減衰して、体内でのエネルギー付与が均一では無く、実効線量の評価が困難。

紫外線の正確な線量評価

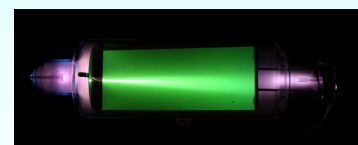
紫外線



数 $10\mu m$ の範囲で完全に吸収されてしまい、その範囲での微小体積へのエネルギー付与の評価が困難なため、単位面積あたりの入射エネルギー(J/m^2)で評価。

先生、ご存じですか？

**理科の授業で使っているクルックス管からは
高い強度のX線が漏洩している場合があります！**



現行の教科書にも記載されているクルックス管は、製品によっては 15cmの距離で、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率が 200mSv/h にも達する高い線量率の低エネルギーX線が放出されている場合があります。知らないで近付いたりすると非常に危険です。

・20keV程度とエネルギーが低いので普通のサーベイメーターは役に立ちません

でも、心配はいりません！

・ごく基本的な誘導コイルの設定と、距離を取って時間を短くするなどの簡単な運用法の改善で、劇的に線量を小さくすることが出来ます。

本当に大丈夫なのか心配・・・

暫定ガイドラインで本当に問題無いのか、実証試験を行っています。
ガラスバッジを用いた簡単な測定を各学校で行うことが出来ます。詳しくはホームページをご覧ください ↓



みんなの暮らしと放射線展とは

「みんなの暮らしと放射線展」は、大阪公立大学 放射線研究センターが中心となり(2023年度からは、事務局業務を大学の受託事業として位置づけを明確化)、様々な放射線関係の団体(*)の協力を得て「みんなの暮らしと放射線」知識普及実行委員会により運営され、昭和58年から40年以上にわたり開催され、延べ50万人以上の一般市民に放射線に関する知識普及活動を実施してきた(以前はデパートの催事場などで1週間実施されるなどの非常に大規模な運営が行われていた)。

近年は大阪科学技術センターに於いて8月第一週の週末にイベント開催を行っており、2日でのべ2千人以上の来場を得ていた。

*2023年度の協賛:(国研)日本原子力研究開発機構、(一財)電子科学研究所、(一財)日本原子力文化財団、(一社)大阪ニュークリアサイエンス協会、(公社)大阪府診療放射線技師会、(公社)日本アイソトープ協会、(一社)日本原子力学会関西支部、関西原子力懇談会



放射線の被ばく

酸素呼吸によるエネルギー生成、
紫外線や様々な化学物質

がんを防ぐ体のはたらき

放射線が直接DNA鎖を切ってしまう直接作用もありますが、6-7割程度が活性酸素による間接作用です。



偏った食事や過労などのストレスにより、体の防御機能が上手く働かなくなってしまう。

あまりにもダメージが大きいと、完全に修復しきれなくなり、修復の際にミスが起こることがあります。

修復ミスが残ると、一部の細胞はがん化してしまいます。毎日数千個のがん細胞が発生しており、長い時間をかけて増殖しがんに成長します。刺激物などによる炎症はがん化を促進します。

活性酸素などの発生

放射線や紫外線、生きていく上で絶対に必要な酸素呼吸によるエネルギー生産の過程で、化学的な活性の高い、活性酸素などのラジカルが発生します

活性酸素などがDNAと反応すると、二重らせんの鎖を切断してしまいます。

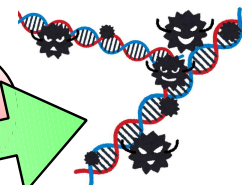
ビタミン、ポリフェノール
や酵素などによる還元

DNA損傷の生成

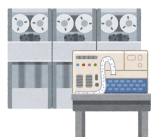


バックアップデータ
からの修復

DNA損傷の修復誤り



野菜や果物に含まれるビタミンやポリフェノールや体内で作られる酵素には、活性酸素を還元し無害にする働きがあります。



修復を断念して死を選ぶ

DNAはお互いペアとなる分子が1組となり2重のらせん構造を持っているため、片方の鎖が切れてももう片方のデータをコピーすることで修復することができます。また、2本とも切れてしまった場合でもほとんどの場合で修復できる働きがあります。

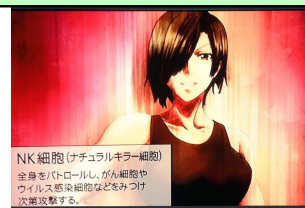


あまりにもダメージが大きいと、完全に修復しきれなくなり、修復が無理だと判断した細胞は自ら死を選ぶことで、間違った遺伝情報が残らないようにします(アポトーシス)。人の体は37兆個といわれる沢山の細胞で出来ていて、毎日沢山の細胞が死んで、また新しく生まれて機能を維持しています。

がん細胞の発生



免疫細胞による攻撃



NK細胞(ナチュラルキラー細胞)
全身をパトロールし、がん細胞やウイルス感染細胞などをみつけ攻撃する。

体の中には病原菌やウイルス、がんを攻撃する様々な免疫細胞がはたらいています。その中の一つナチュラルキラー細胞(NK細胞)はがん細胞を狙い撃ちすることが出来る細胞です。笑うことによって活性化する一方、ストレスに弱いことが知られています。免疫細胞の働きで、体内で発生した変異細胞のほとんどが摘み取られています。

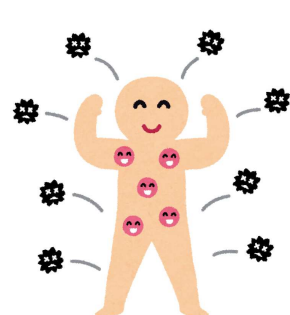
放射線治療



逆に、大量の放射線をはんに集中的に照射することで、がん細胞を殺してしまう治療法があります。

→ 医療のコーナーをチェック!

バランスの取れた楽しい食事で
健康な体を保ちましょう!



それぞれの役割を持つ免疫細胞達は、体の中に入ってくるさまざまな細菌やウイルス、そしてがん細胞と、毎日戦い続けて、健康な体を守っています。

免疫細胞たちの活躍

はたらく細胞

学校の授業、身体の中のことを教える機会、医療施設での各種説明、及びそれらに類似する場などで、「はたらく細胞」で擬人化された細胞たちや細菌等の画像の一部を無償で利用することが出来ます。

白血球 (好中球)



外部から体内に侵入した細菌やウイルスなどの異物を食べて排除する(食食)。好中球は血液中の白血球の半数以上を占めており、最前線で真っ先に侵入者と戦う自然免疫の細胞。多種類の異物、病原体の分子に反応することができるが、特定の病原体に繰り返し感染しても、自然免疫能が増強することはない。

ナチュラルキラー

NK細胞



全身をパトロールし、がん細胞やウイルス感染細胞などを見つけ次第攻撃する自然免疫細胞。自分のがん細胞を判別することができるためがん細胞への攻撃力が特に強い。笑うことによって生じる神経ペプチドによって活性化する一方で、ストレスによるホルモンで活性が低下する。

マクロファージ



細菌などの異物を捕らえて殺し、抗原や免疫情報を見つけ出す。がん細胞を発見すると、それを食べて確認して、ヘルパーT細胞に伝える。殺傷能力が高く、死んだ細胞や細菌を片付ける役割も有している。

樹状細胞



体内に侵入してきた細菌や、ウイルス感染細胞などの断片を抗原として提示し、他の免疫系の細胞に伝える役割を持つ。その名の通り周囲に突起を伸ばしている。

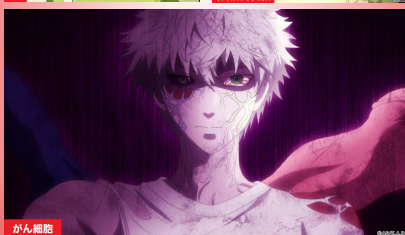
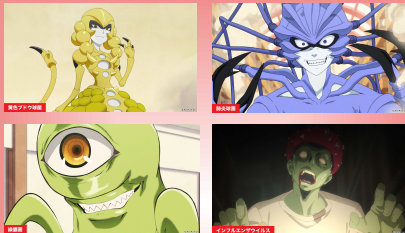
抗原情報の提示

ヘルパーT細胞



外敵侵入の知らせを受け、敵の情報をもとに、的確に攻撃できるように戦略を決める司令官。マクロファージや樹状細胞からもらった抗原情報を基に、キラーT細胞やB細胞をその抗原に合わせて活性化する。

毎日これらの敵と戦っています!



キラーT細胞



ウイルス感染細胞、がん細胞などの異物を認識・破壊する殺し屋。抗原情報を受け取ったヘルパーT細胞の命令(サイトカインの分泌)によって活性化して出動する。一度出動したあとは、記憶T細胞が残り次回素早く反応する。

B細胞



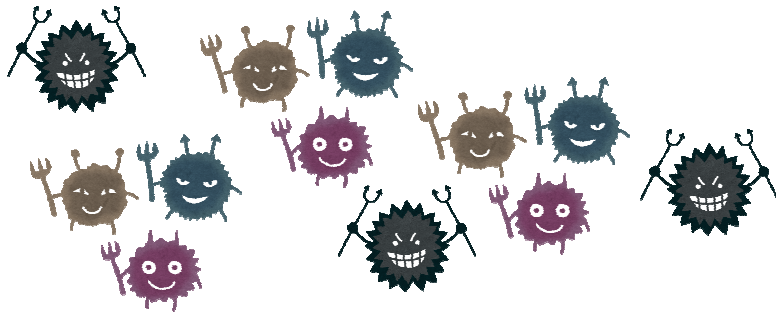
細菌やウイルスなどそれぞれ異なる抗原に対し、抗原特異的な抗体(免疫グロブリン)というオーダーメイドの武器を作って戦うリンパ球の一種。一度抗体を作ると記憶B細胞が残り次回の侵入時に素早く抗体を作ることができる(いわゆる免疫の獲得)。

初めて対応する抗原に対しては、抗原情報の獲得、分析、活性化、抗体の生産までに、2~3日かかってしまいます。一度対応した抗原は記憶されており、次回から素早く反応します。

「感染」とはどういった状態か

菌やウイルスなどが体内に入ると直ちに感染するかというそうでは無く、自然免疫や獲得免疫の働きで常に攻防が繰り広げられており、あまりにも侵入した病原体の数が多く、防衛が間に合わずに体内で増殖し、症状が出たりPCR検査などによって検知できるレベルにまで数が増えた状態を「感染」と呼ぶ。

どれぐらいの数を取り込むと感染に至るのかは病原体によっても異なり、個々人の免疫の状態、どのような形で取り込んだのかの物理的な状態によっても異なるが、一匹でも取り込んでしまうと感染する、と言うことは無い。逆に、ワクチン接種により獲得免疫が得られていてもあまりにもたくさんのウイルスが侵入すると感染してしまう。

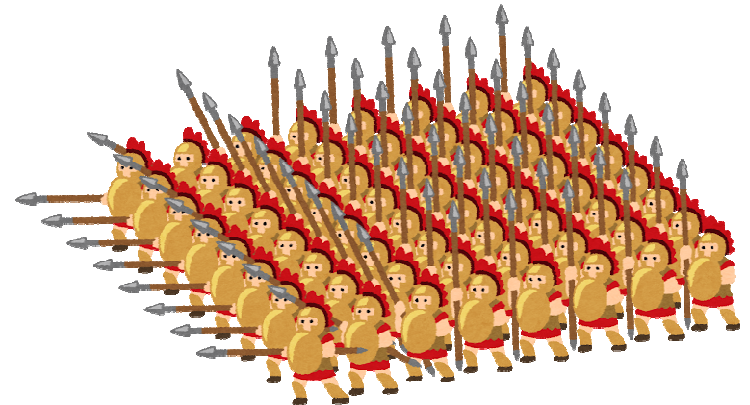


自然免疫

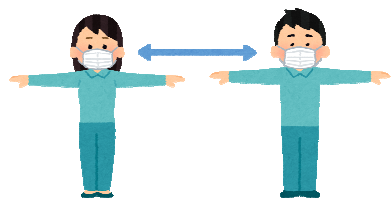


獲得免疫

**数と数のぶつかり合いなので、
取り込む数を減らすことが重要。**



ソーシャルディスタンス



感染拡大の原因と三密とは？



うちで過ごす

~~密集~~



マスクをしよう

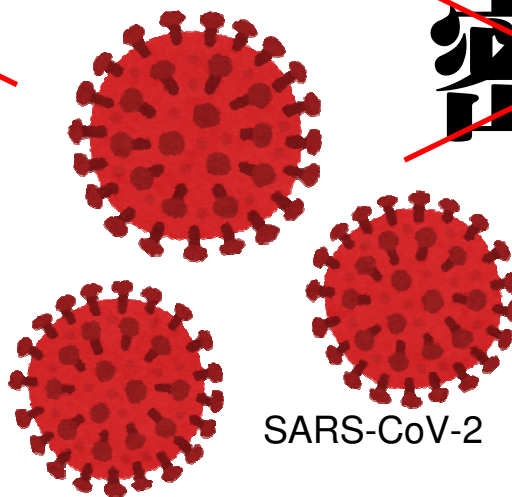
エアロゾル



換気しよう

~~密閉~~

飛沫



SARS-CoV-2

~~密接~~

表面への接触

口腔から放出される $5\mu\text{m}$ 以上の液滴。
感染者から2m程度の範囲で飛散。
マスクを付けていても20%程度が放出される。

$5\mu\text{m}$ 以下の微粒子で、数分間
空气中に滞留し、広い範囲に拡
散する。喋るだけでも飛散する。
一般的なマスクを付けていても
50%程度が飛散する。



手を洗おう



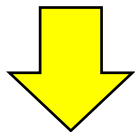
消毒しよう

どこに潜んでいるか分からない
トラップ。

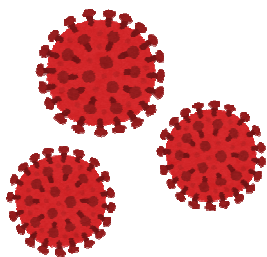
材質によっては数日間感染力を
持ったまま付着している可能性
がある。

新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(1)

~~密閉~~



エアロゾル



マスクをしていても、繊維の間や顔との隙間から**半数近くのエアロゾルは飛散**している。長時間滞留するため、換気が悪いと徐々に濃度が高くなる。

換気の状態は二酸化炭素濃度が一つの指標となる。



換気しよう

どうしても換気が悪い場所もある

長時間空気中に滞留し風に乗って遠くまで移動する

5 μ m以下の微粒子で飛沫核とも呼ばれる。数分間空気中に滞留し、広い範囲に拡散しうる。

空気清浄機

△二酸化塩素・オゾンを空間に噴霧するアクティブな「空間除菌」は、有効な濃度と人体に悪影響を与える濃度が近く制御が困難なため推奨しない。

光触媒、紫外線、高性能フィルターを使用したものなど、様々なタイプが販売されており、エアロゾルの捕集、エアロゾルに含まれるウイルスの不活化を行う。

高温になる、ファンヒーターやストーブでも不活化は可能。(エアコンでは不可)



うがいしよう

粘膜に付着してから15～20分で感染するため、うがいが出来ない状況であればこまめに飲み込んでしまい胃酸で不活化する方が better。感染者が居る状況で飲食しても大丈夫と言うことでは無い(飲み込む途中で感染する可能性はゼロでは無く、鼻や目からの感染は防げない)。

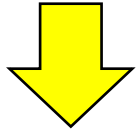
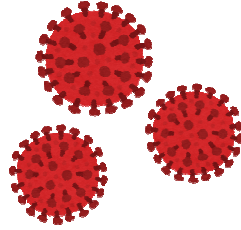
人の居ない空間への紫外線照射

不活化の効果の高い UV-C は人体に対して有害(眼の角膜、皮膚に強い炎症)であるため、**人にあたらないよう**上方の空間に向けて UV-C を照射することで空気中のウイルスを不活化できるため食品工場などでは古くから用いられている。米国疾病予防管理センター、CDCでは公式サイトで Upper-room Ultraviolet Germicidal Irradiation (**UVGI**) を推奨している。

新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(2)

飛沫が物体表面にばらまかれて乾燥

~~密接~~



どこに潜んでいるか分からない
ブービートラップ

物体表面からの接触感染



手を洗おう



消毒しよう

コロナウイルスは脂質の膜、エンベロープを表面に持つタイプであるため、「あぶら」を溶かすことが重要。物理的に洗い流すだけでも効果的。次亜塩素酸なども効果がある。

環境によっては物体表面に付着したウイルスが数日間感染力を保持していることも。飛沫が落下した後もウイルスは感染力を保持していて、接触感染の原因となりうる。

手袋、衣類への
光触媒塗布

防護具へのUV-C照射

感染症対策の医療現場では、防護具を脱装する際のリスクが高いため、Cold エリアへの境界で防護具に対してUV-C照射を行う事で感染リスクを低下させる。

物体表面へのUV-C照射

短時間でSARS-CoV-2の不活化が可能なが様々な論文で確認されている。

人体に有害なため人が居るところでは使用することが出来ない。(Care222などは極めて人体への影響が小さい製品も存在するが、まだ完全に安全とは認められていない)

距離の二乗に反比例して弱くなる、透過力が極めて低い、斜め照射では弱くなる、有機物を劣化させるなどの様々な問題を理解して使用する必要がある。

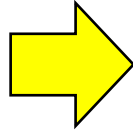
共有物品表面への光触媒や、銅・銀などの金属微粒子の塗布

物体表面への塗布により、常に少しずつ不活化の効果を発揮する。蛍光灯と異なりLED照明は紫外線を放出しないため屋内では可視光応答の光触媒が必要。銅などの金属含有の光触媒は暗くなっても一定期間不活化の効力を発揮する物もある。

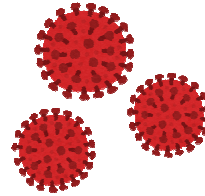
最も簡単には、銅箔テープの貼付けなどでも一定の効果がある。

新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(3)

~~密集~~

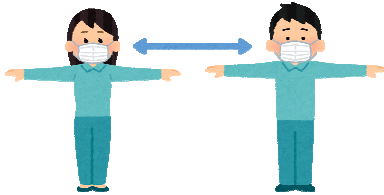


飛沫



うちで過ごそう

ソーシャルディスタンス



飛沫は2m程度しか飛ばないため、
他人との距離を取ることで飛んでくる
飛沫から身を守れる

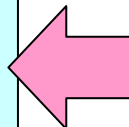
大きな液滴に大量のウイルス

口腔から放出される $5\mu\text{m}$ 以上の液滴を飛沫と呼び、
 $120\text{-}150\mu\text{m}$ 程度に分布のピークを持つ。数秒の間に
2m程度までの範囲に飛び散る。咳やくしゃみだけで
無く、普通にしゃべっているだけでも飛散する。

小型飛沫除去装置

フィルターと光触媒の組み合わせで飛沫をキャッチしてウイルスを酸化分解。

対面する人と人の間、飛沫の飛ぶ距離の範囲に設置されていないと意味が無いため、たくさん
の台数が必要。

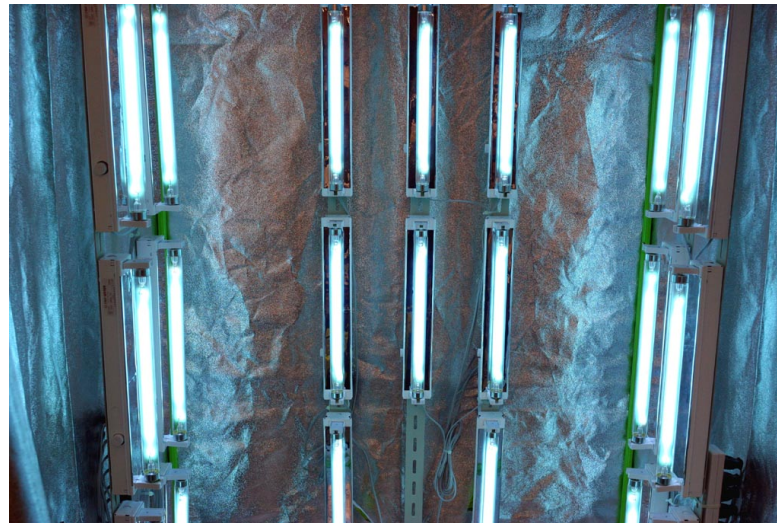
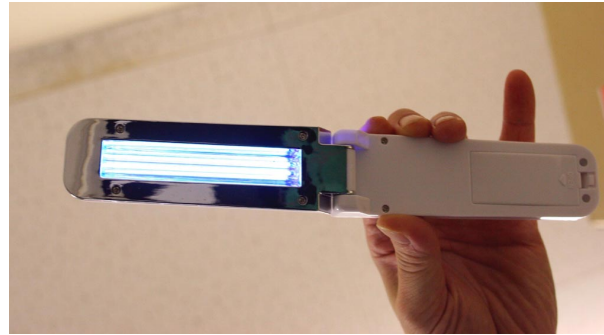


飛沫の放出を防ぐためにはマスクが有効で、不織布や布製のマスクでは8割程度の飛沫を止めることが出来るが、残りの2割程度は隙間などから飛散する。このため、飛程よりも近くに座ってのミーティングや窓口などでの会話で感染リスクがある。また、食事中にマスクは困難で会食時のリスクが高い。



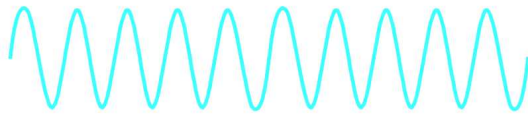
「感染を広げない」
目的で全員が着用

第二部：紫外線消毒

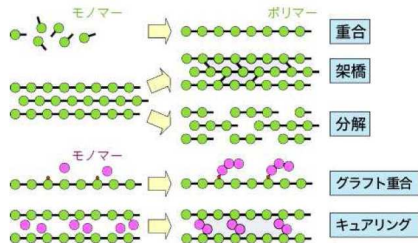
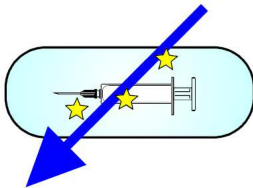
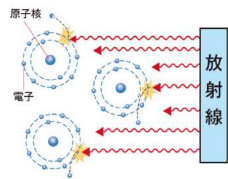


エネルギー 大

ガンマ線、エックス線

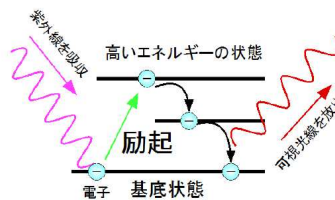
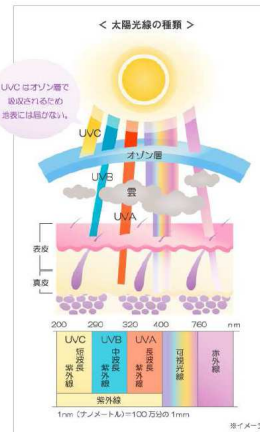
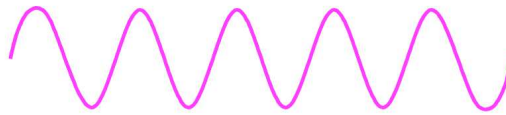


電離作用



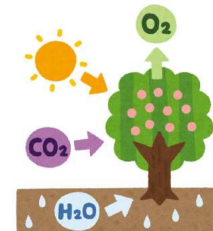
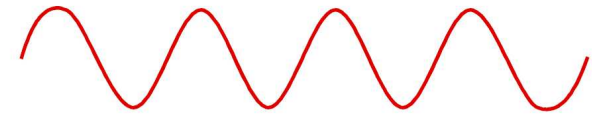
エネルギーの大きいガンマ線やエックス線は、物体の中を突き抜けていき、その途中の原子の周りの電子を弾き飛ばす働きがあります。この力を使って、注射器などの医療用の器具を滅菌したり、様々な機能を持った高分子化合物を作ったりすることが出来ます。

紫外線



可視光線よりも少しエネルギーの高い紫外線は、目には見えませんが、物体の中の電子に少しだけエネルギーを与えて「励起(れいき)」させることが出来、日焼けの原因になったり、「UVレジン」と言う接着剤を固めてアクセサリーを作ったり、ウランガラスなどの蛍光体を光らせることが出来ます。

エネルギー 小 可視光線



目で見える光、可視光線は波長が長くエネルギーの低い赤から、波長が短くエネルギーの高い紫までの間で、虹の七色のように見え方が異なります。光も電磁波の一種ですから少し電子を励起して、写真フィルムを感光させたり、太陽光発電を行ったり、植物の葉緑体の中で光合成を行うなどのパワーを持っています。波長(波の長さ)と位相(波の位置)の揃った光のことを、レーザー光線と言い、強度(波の高さ)がとても強く、遠くまでまっすぐ飛ぶなどの性質があります。

紫外線による殺菌・不活化効果



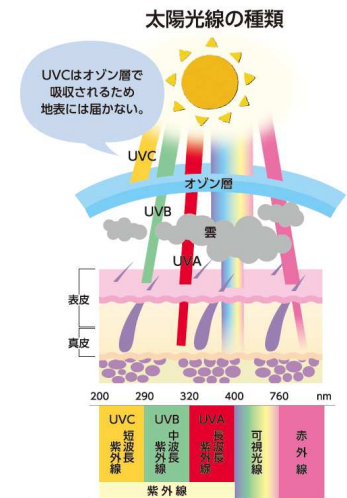
太古の昔から生物にとって紫外線は大敵で、オゾン層が出来るまで生物は陸上に上がることが出来ませんでした。紫外線は、放射線のように直接遺伝子を傷つけ、不活化します。菌、ウイルスの種類を問わずに紫外線は有効で(多少の強い、弱いはありますが)、**新型コロナウイルスも紫外線で不活化されることが様々な論文で報告されています。**

紫外線は波長によって長い方から UV-A (400-315nm), UV-B (315-280nm), **UV-C (280nm未満)** と分類されます。

紫外線による殺菌効果のピークは **260nm** 程度で、DNA/RNAに直接損傷を与えます。310nm 程度になるとほとんど効果が無くなり、**UVレジン**などで使用する UVライトは **375nm** 程度で殺菌の目的ではほとんど使えません。太陽光では、5%程含まれるUV-B 成分によって、**最も条件の良い場合2時間弱で1/100にまでインフルエンザウイルスを不活化できます。**

論文として報告されている新型コロナウイルスのデータ(*)を元にする
と、8W の**UV-C 殺菌灯**からの**紫外線量**を実際に測定してみた結果、
正面位置15cmの距離でおよそ **3秒で99.9%** が不活化可能であるという
計算となりました。

*Mara Biasin et al., Scientific reports, 11 (2021) 6260.



UV-A / UV-B による滅菌・不活化

私の知っている限りで UV-A/UV-B によるウイルス不活化のデータは、徳島大学の高橋先生のインフルエンザウイルスに対する論文のみです。
この論文のデータ元に、太陽光線によるウイルスの不活化にどれぐらい時間がかかるかを計算してみました。

UV-A のみの場合 (高橋先生は365nmのLEDで実験)

UV-A では 1/100 に減らすのに $50\text{J}/\text{cm}^2$ が必要です。
紫外線強度が一番強い場合でおおよそ $2.5\text{mW}/\text{cm}^2$ ですので、 $50 / 2.5 \times 10^{-3} = 20,000\text{sec}$ 、**5.5時間ほど必要**です。12月では(日照時間を一日として) 1.4日ほどかかる計算になります。

UV-B のみの場合 (高橋先生は310nmのLEDで実験)

UV-B では 1/100 に減らすのに、 $0.45\text{J}/\text{cm}^2$ が必要です(UV-A のおおよそ1/100)。
7-8月では、 $25\text{kJ}/\text{m}^2/\text{day}$ となっており、0.18day, ピーク時であれば**1.6時間程度**で済みます。が、UV-B は UV-A よりも吸収されやすく冬場は 1/5 程度に大きく落ち、ほぼ丸一日必要、と言う計算になります。

UV-Cによるウイルスの不活化

既に世界中で研究が進められており、SARS-CoV-2 に対しても複数の研究者からデータが出てきている。2), 3), 5) については査読が終了しています。

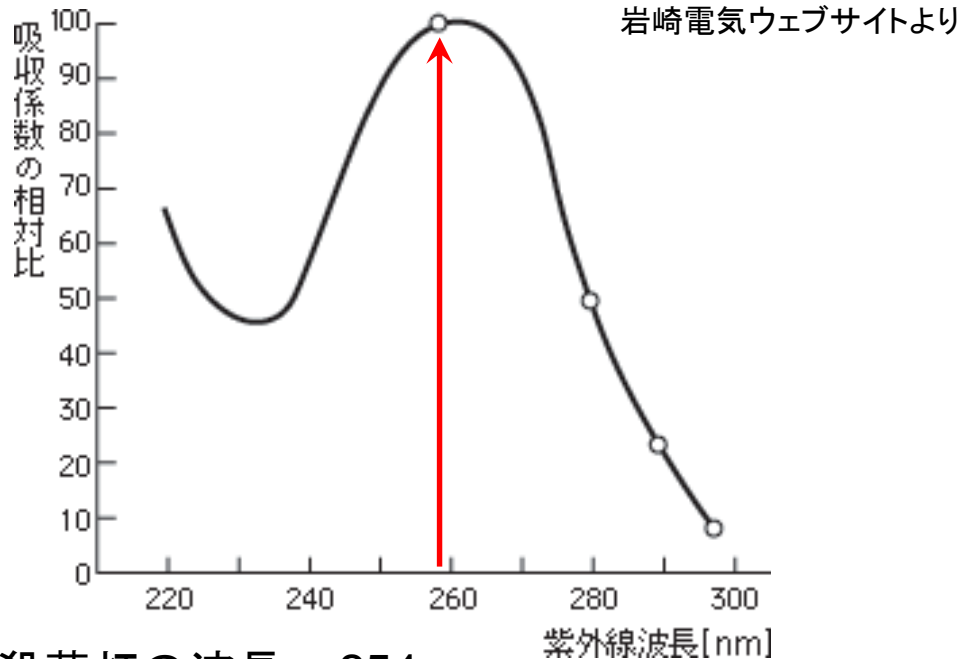
No	1)	2)	3)	4)	5)
グループ	ミラン大 Biasin ら	ボストン大 Storm ら	スタンレー電気	宮崎大 Inagaki ら	広島大 Kitagawa ら
光源	254nm 殺菌灯	254nm 殺菌灯	265nm LED	280nm LED	222nm エキシマランプ
99.9%まで不活化に 必要な線量 (mJ/cm ²)	3.7	Wet: 5.3 Dry: 4.1	5.1	37.5	3.6
査読	査読済	査読済	査読無し	査読済	査読済

インフルエンザウイルスの 254nm 殺菌灯 6.6mJ/cm² で 99.9% まで不活化、よりも低い値となっており、**新型コロナウイルスの紫外線耐性は低い**と言える。

280nm LEDに対しても、高橋先生のインフルエンザに対する実験では99.9% まで不活化に75mJ/cm²(最新の論文では 60mJ/cm²)となっており、10倍程度 254nm での照射よりも積算照度が必要で、上記のSARS-CoV-2の結果と整合性が取れている。

UV-C によるウイルスの不活化

DNAに対する紫外線吸収の波長依存性

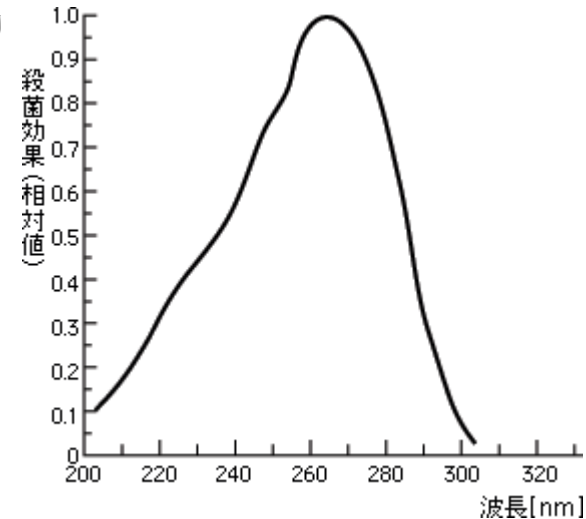


殺菌灯の波長 = 254nm

紫外線に対する殺菌、ウイルスの不活化の研究はほぼ全てが波長254nmの殺菌灯について行われている。様々な菌、ウイルスについて横断的なデータが存在する。

太陽光に含まれるUV-Bについては古くから殺菌効果が知られているが、定量的研究は極めて限られている。

殺菌作用の紫外線波長依存性

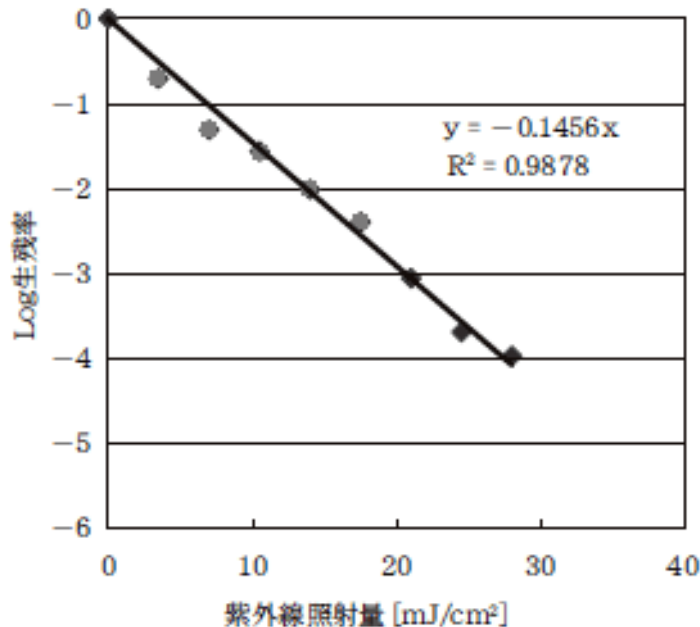


UV-C	UV-B	UV-A
200-290nm	290-320nm	320-400nm

近年話題になっている222nmの遠紫外光は、透過力が極めて小さく、皮膚ごく表面の $20\mu\text{m}$ 程度の厚さの角質層などで止まってしまい生きている細胞にまで到達せず、炎症や皮膚癌などを引き起こさない。その一方で物体の表面に付着した直径 $0.1\mu\text{m}$ 程度のウイルスの中までは届くため、遺伝子に損傷を与えて不活化できる。ウイルスよりも大きい菌(直径 $1\mu\text{m}$ 程度)の場合細胞質の中のDNAまで到達する量が少なくなるため効果は小さくなる。

紫外線積算照度と生残曲線

放射線の場合は吸収線量(Gy)などの単位で、どの程度照射を行うとどの程度影響が出るかを評価します。同様に、紫外線の場合は単位面積に単位時間あたり与えるエネルギーを**照度**(SI単位系では W/m^2 、慣例的に mW/cm^2 が良く用いられる)と呼び、照射時間で積分したトータルのエネルギーを**積算照度**(J/m^2 、 mJ/cm^2)と呼び、積算照度が増えるに従って、殺菌や不活化されずに生き残っている菌やウイルスの数は、指数関数的に減少していきます。この様子を**生残曲線**と呼びます。効果が有る/無しではなく、**照射する量によって効果が変わります**。



生残曲線の例。横軸に紫外線積算照度 (mJ/cm^2)、縦軸にどれだけ生き残っているかという生存率の**対数値**(-3 で $10^{-3} = 0.1\%$ で、99.9%まで殺菌/不活化されたことを意味する)をプロットした物。必ずしも直線的になるわけではなく、最初なかなか下がらない、肩を持つ場合も多い。また、対象となる微生物によってこの曲線の傾きが異なり、どの程度照射すれば良いかが変わってくる。

なお、高い照度で短時間照射も、低い照度で長時間照射も、**積算照度が同じであれば効果は同じ**である(極端に高い照度の場合を除く)。

紫外線の弱点

距離の二乗に反比例して照度が下がる

広い範囲に照射するために光源を遠くに設置すると、照度が非常に弱くなり、同じ量を照射するのに必要な時間が長くなります。

ほとんどの物質に対して透過力が非常に小さい

石英ガラスや水などの一部の物を除いて、数 $10\mu\text{m}$ 程度しか透過できません。ゴム手袋や紙一枚で完全に止まります。照射できるのは**表面に付着している物**に限られますし、光源から影になる部分には効果がありません。また、透過力の高い放射線と異なり**斜めに入射するとコサイン則に従って照度が低下**します。

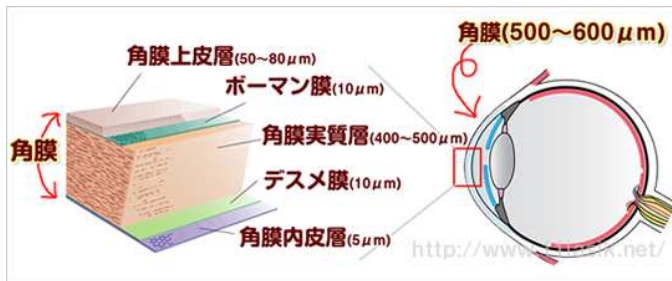
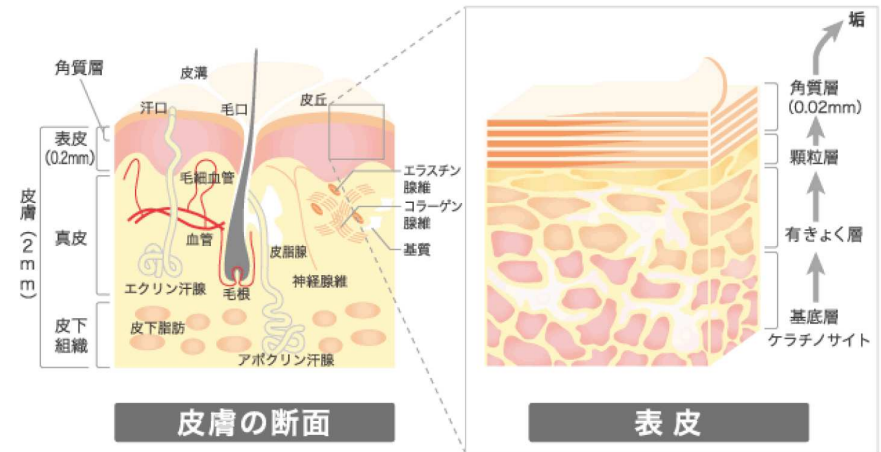
皮膚や目に強い炎症を起こし、人体に有害

波長が短くエネルギーの高いUV-Cは**皮膚や眼の角膜に強い炎症を与えます**。その場ですぐには気が付かず後になって皮膚癌や失明を引き起こす可能性があります。このため、人がいる場所での使用が基本的に出来ません。JIS Z8812では、UV-Cに対する許容限界値基準は $6\text{mJ}/\text{cm}^2$ となっています。また、プラスチックや繊維、塗料などの有機物も大量の照射により次第に劣化していきます。

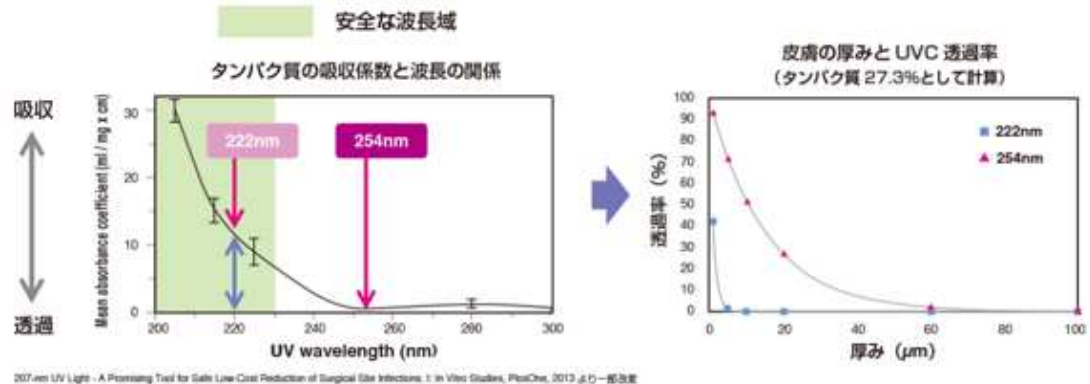
皮膚の構造と紫外線の透過率

紫外線は一般的に波長が短くなるほど吸収されやすくなり、透過率が下がる。UV-A では真皮や皮下組織、水晶体に至るのに対して、殺菌灯の波長254nmでは皮膚の内側60 μ m程度までであるが、顆粒層や有きょく層、眼では角膜上皮の内側の細胞に炎症を発生させる。

一方で近年話題となっている222nmの波長では、厚さが20 μ m程度の角質層(死んだ細胞の層)や角膜上皮でほぼ完全に止められるため、炎症が発生しないと言われている。



角膜の構造。角膜全体で0.5mm程度の厚みがあり、最上層の角膜上皮は極めて新陳代謝が活発なのに対し、角膜実質細胞は数が大変少なく傷の治りが遅いと言われている。



1. 222nmは254nmと比較すると、タンパク質の吸収係数で10倍以上高い。
2. 厚み20 μ mでの生体透過率は、222nmで0.01%以下、254nmでは30%程度。

紫外線を利用した機器普及上の問題点

- ・現在感染症対策として紫外線消毒が注目されており、様々な UV-C 紫外線照射機器が販売されている。また光触媒を使用した機器でも UV-A 紫外線を照射して励起する物が存在する。
- ・個々の微生物に対する効果を広告などで表示することは薬機法の規制により出来ないが、市場には〇秒で99%除菌などと言う広告があふれている(実測の結果ほとんどがパチ物)。信頼できる機器の普及のため、**客観的な効果を示すために物理的な紫外放射照度の表示義務化**が望ましい。



10秒以内に 99.9%の滅菌率
(距離の記載無し) →
5cm で 0.02 mW/cm²



10秒即効 99.9%細菌消滅
(距離の記載無し) →
5cm で 0.03 mW/cm²

市場で販売されていた製品の例と、謳い文句、紫外放射照度計(ケニス YK-37UVSD) UV-C プローブでの実測値。

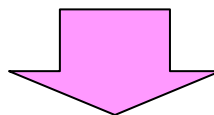
この当時は紫外分光放射照度計がなかったため分光照度は不明。

紫外線照度評価標準化の重要性について

・この問題について内閣官房新型コロナウイルス感染症対策推進室と2020年9月からコンタクトを取り、産総研イノベーション推進本部、製品評価技術基盤機構(NITE)バイオテクノロジーセンター等と現状について意見交換し、**紫外放射照度計について製品の標準化がされておらず、測定の信頼性が担保できないことが紫外線照射技術や製品を普及及び規制する上で最大のネックとなっている**ことが2020年末頃に確認された。

・紫外放射照度計に関する製品規格が存在しないことは東海大学竹下先生により以前から問題提起されており(*)、実際に様々な照度計について調査を行い機器間での大きなばらつきが問題視されている(**)。

2021年7月以降、
JCSS校正により
紫外放射照度計の
校正ができるようになった。



登録(認定)に係る区分: 光
法律に基づく初回登録年月日: 2021年7月20日
国際MRA対応初回認定発効日: 2021年7月20日
校正手法の区分の呼称 [登録(認定発効)年月日]: 光度標準電球等 [2021年7月20日]
恒久的施設で行う校正/現地校正の別: 恒久的施設で行う校正
校正測定能力

校正手法の 区分の呼称#	種類	校正範囲	拡張不確かさ (信頼の水準約 95 %)
光度標準電球等	分光応答度標準器 (フォトダイオード)	250 nm 以上 380 nm 未満	2.5 %
		380 nm 以上 655 nm 未満	1.6 %
		655 nm 以上 800 nm 以下	1.1 %

#校正の方法は、全て自社で開発された手順です。

JCSS校正事業者登録された
事業者により校正された機器
により、信頼できる測定が可能
になっている。

(*)照明ハンドブック(第3版)、照明学会、オーム社、2020年。

(**) 紫外放射の産業界における使用例とその実用測定機器・方法の現状、照明学会、JIEG-007-a、1994。

学協会の対応

- ・照明学会では1994年に紫外放射の放射照度測定方法特別研究委員会において報告書「紫外放射の産業界における使用例とその実用測定機器・方法の現状(JIEG-007-a)」 「紫外放射の標準と校正技術(JIEG-007-b)」を取りまとめているが、その後の光源及び計測器の進化を反映させるため、**2022年度より「UV-C領域殺菌用途の紫外放射研究調査委員会」**が立ち上がっている(委員長: 東海大学竹下先生)
- ・消費者庁事故調査室に赴き UV-C 消毒器による健康被害の報告を行い、Twitter の公式アカウントから紫外線消毒器利用上の注意について2021年3月にツイートが出された。
- ・一般公衆への注意喚起として、**日本照明工業会/照明学会連名で「紫外線殺菌ご利用上の注意」リーフレット**を2021年7月に作成。
- ・電気用品安全法での取扱いは、2020年度末からの日本照明工業会 消毒殺菌用UV放射小委員会において提言がなされ、2021年12月に電気用品の範囲等の解釈についての改正が行われた。これにより**庫外に紫外線を放射する機器についても電安法の対象となりOPSEマークの表示が必要となった。**

学協会からの公式なオーサライズ

紫外線殺菌

ご利用上の注意

(一社) 日本照明工業会
(一社) 照明学会

2021/08 に、東海大学の竹下 秀先生と、照明工業会加盟各社の皆様のWGに秋吉も参加を行い、一般人向けに「紫外線殺菌 ご利用上の注意」という形でパンフレットの作成を行いました⁽¹⁾。

紫外線の有用性の周知だけでなく、紫外線による事故について取り上げると共に、透過力が低い等の弱点や、いい加減な製品も存在することなど、上手に使えると有用な紫外線利用上の注意点についての周知を行っています。

このパンフレットは科学的な論文を元に記述されており、学会公認のパンフレットということで「**厚労省 医療機関における院内感染対策について(H26)**」における、「紫外線照射等については、**効果及び作業者の安全に関する科学的根拠**並びに想定される院内感染のリスクに応じて、慎重に判断すること」という記述における**科学的根拠**と捉えることができます。

また米国疾病予防管理センター、CDCでは公式サイト⁽²⁾で Upper-room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) をエアロゾル対策として推奨しています。

(1) https://www.jlma.or.jp/siryō/pdf/pamph/notice_UV-light-emitting.pdf

(2) <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation/uvgi.html>

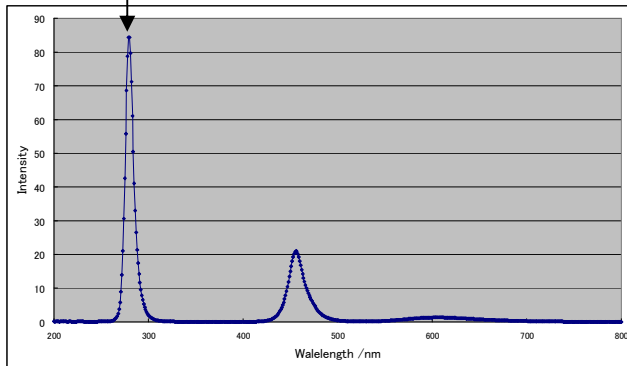
紫外線照度評価上の更なる問題点

- ・以前は UV-C 光源として殺菌灯(低圧水銀ランプ)しか存在せず、水銀励起に伴う輝線であるため製品間のスペクトルの差異はなかったが、現在は UV-C LED やエキシマランプなど、様々な光源が存在しており、**それぞれの製品によって波長、半値幅などのスペクトル特性が異なる**。このため、デジタルで単一の数値を表示する紫外放射照度計ではその光源の特性を評価することが出来ない(フラットな感度特性は現時点では実現不可能)。
- ・様々な感染症対策機器では、狭い機器内に光源を仕込み**至近距離で照射を行う**。この場合どうしても光源から斜めに入射したり反射して入射する成分が生じるため、**斜入射特性の悪い検出器では大幅に測定値が小さくなる**。また、光源からの距離の二乗に反比例して照度低下するが、検出器のプロープは一般に2cm程度の厚みを有しており、**光源から至近距離では照射面との距離の差が極めて大きく反映され、過大評価される**。
- ・広い範囲を照射する場合光源から離れ照度が弱くなると**紫外放射照度計の測定下限(一般に $1 \mu W/cm^2$)以下となり測定することが出来ないか測定精度が低くなる**。遮蔽した形で使用する装置に関しても、長時間曝露する可能性があるため照度計測定下限以下の**漏れ光の評価**が求められる。

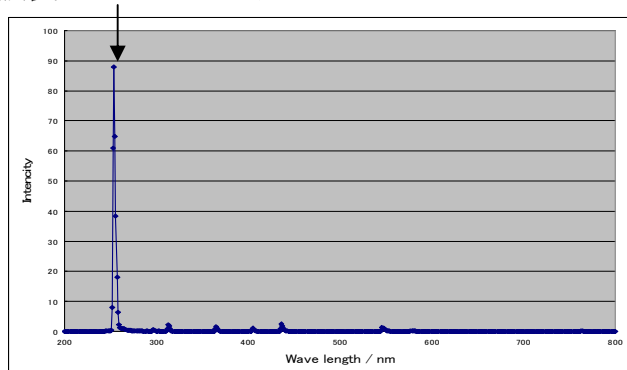
波長の異なる紫外光源への対応



UV のピーク波長は
280nm でやや幅が広い



低圧水銀ランプのピーク
波長は 254nm でシャープ



以前はUV-C光源として低圧水銀ランプについてのみ考えれば良かったが、近年260nm程度までの波長のLED光源が販売されるようになった。しかし、多くの製品で使用されている280nmでは不活化の効果は254nmの場合の1/10程度であり、**紫外分光放射照度計での測定**と波長毎の効果の評価が必要。

LEDからのUV光は水銀輝線よりも半値幅が広く、ピークとなる波長でその効果を代表して良いか、「照度」として示す際にどの波長範囲の分光照度を積分して良いのか統一的な指標は与えられていない。このため、

Σ (各波長毎の照度 × 不活化効果相対値)

と言う形で表わされる、放射線と言うところの実効線量のような指標が必要。

菌に対しては、JIS Z8811 (1968) で既に与えられている (G-ワットという名称) が、ウイルスに対しては与えられていない。今後、モノクロメーターを用いて取りだした単波長に近い光を用いた不活化効果の評価が必要。

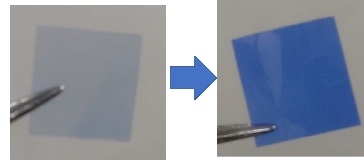
→光源の問題

← 紫外分光放射照度計 USHIO USR45 で測定

化学線量計の活用

放射線計測で用いられる**化学線量計は斜入射特性や光源至近での測定の問題を解決可能**である。

ラジオクロミック線量計:

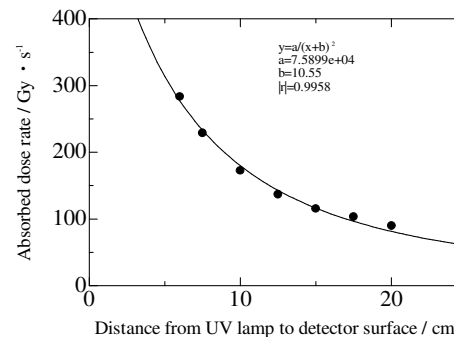


γ 線、電子線などの放射線計測で用いられるラジオクロミック線量計は、 $50\mu\text{m}$ 程度の厚さのフィルムの 600nm 及び 510nm での吸光度が吸収線量に応じて変化し、吸光度計により吸収線量が評価出来る。JIS Z 4575「ラジオクロミックフィルム線量計測システムの使用方法」によって放射線計測時の使用法が標準化されている。

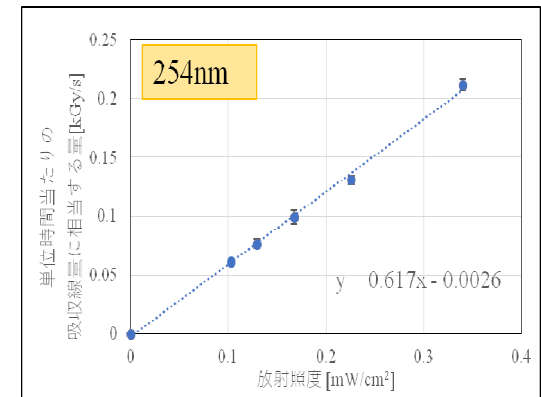


紫外放射照度計と、ラジオクロミックフィルムにより評価された吸収線量率の距離依存性の相関から、吸収線量 I (kGy) と、紫外線の積算照度 D (mJ/cm^2) の間で $D = 1.62 I$ と言う簡単な校正式を導いた。透過試験から、 $45\mu\text{m}$ フィルム内で完全にUV-Cは吸収されており、 $16.2\mu\text{m}$ までの範囲で均等に吸収されたとするとこの校正式が説明出来る。

この薄く小さなフィルムにより、立体形状の物体表面への積算照度を実験的に評価可能となる。



ラジオクロミック線量計で測定した、光源からフィルムまでの距離と、吸収線量として評価された値の相関。



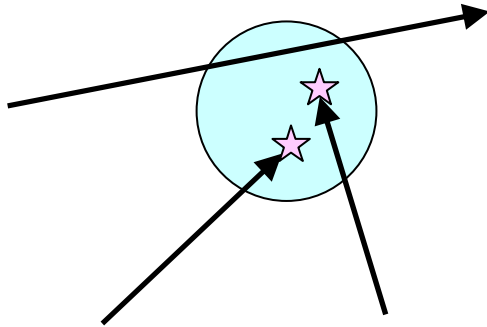
放射照度の増加に伴う吸収線量率として評価された値の線系的な増加。

吸収線量とは

吸収線量 (Gy) =

吸収された放射線のエネルギー (J)

対象とする系の質量 (kg)

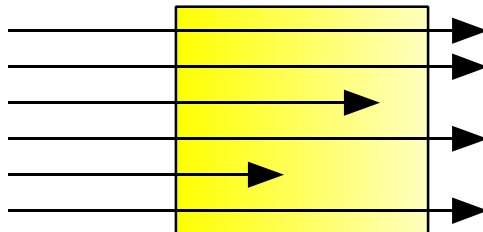


ある体系に於いて**吸収**した放射線の電離エネルギーをその体系の質量で割った量が吸収線量(J/kg)。不均一な照射の場合体系の取り方(分母の大きさ)によって値が異なってくる。

吸収線量(Gy) は電離放射線に対して定義された量で、紫外線については相当する量が定義されていないため、**質量吸収光量(J/kg)**と言う用語を**暫定的に提案**する。

強透過性放射線

$H_p(0.07) \leq 10 H_p(10)$

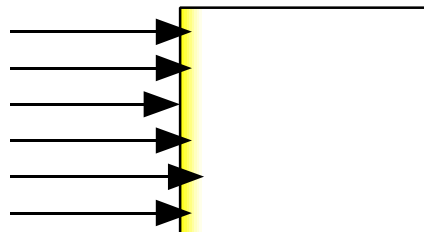


整列拡張場

ほとんど素通りでほぼ均一にエネルギーを与え、表面から1cmの微小体積に対する吸収線量(1cm線量当量)が人体全体の実効線量を代表すると見なす。

弱透過性放射線

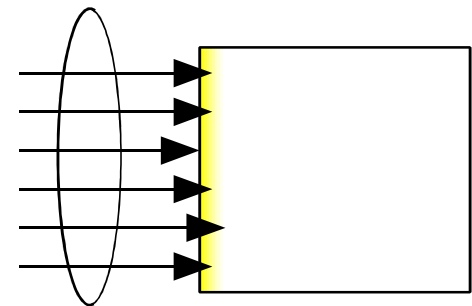
$H_p(0.07) > 10 H_p(10)$



整列拡張場

表面近傍にのみ局所的にエネルギーを与え、深さ70μmでの点での吸収線量(70μm線量当量)が皮膚の等価線量を代表する。

紫外線



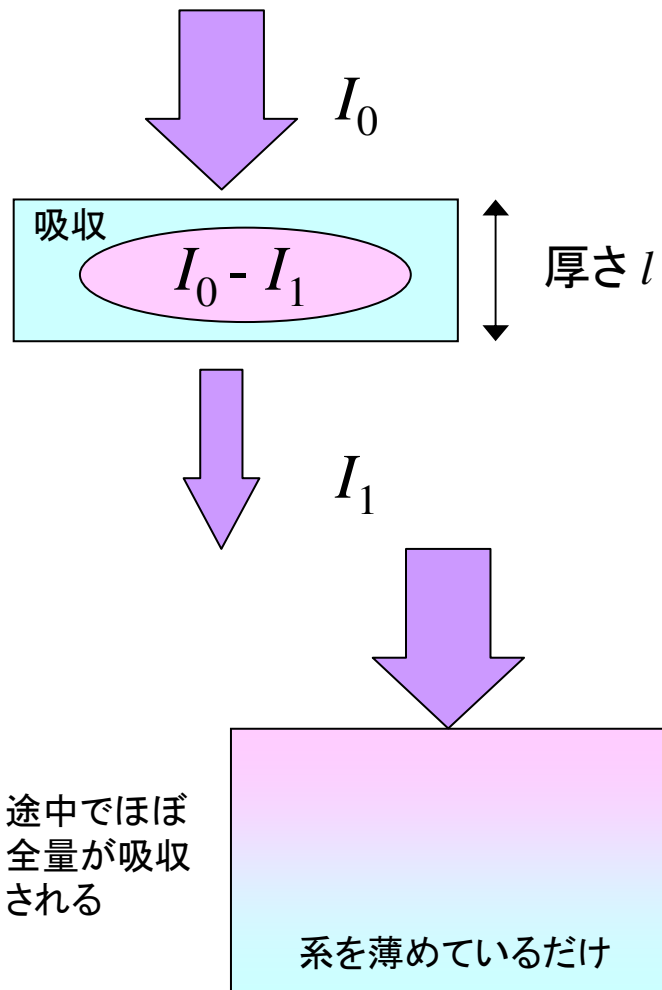
人体の皮膚では数10μmの範囲で吸収されてしまう。これまで微小体積へのエネルギー付与の評価は行われておらず、単位面積あたりのエネルギーフラックス(J/m²)で評価。

吸光度から求める質量吸収光量(1)

吸収された紫外線のエネルギー (J)

質量吸収光量 (J/kg) =

対象とする系の質量 (kg)



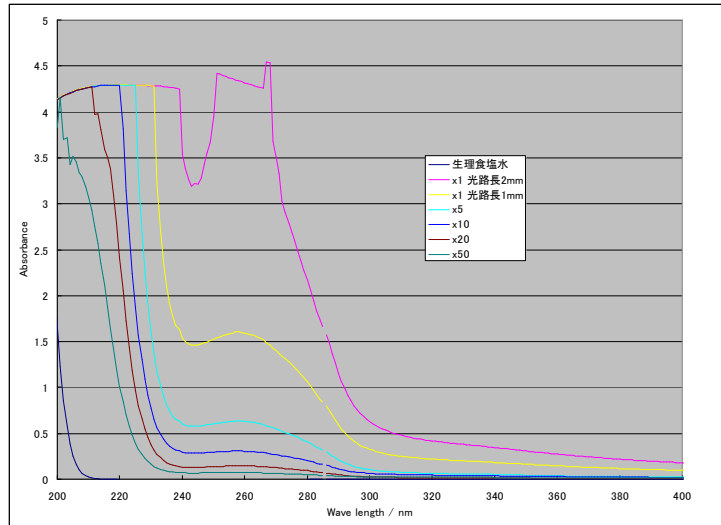
ランベルト・ベールの法則

吸光度 $A = -\log_{10}(I_1 / I_0) = \varepsilon c l$
(ε : 吸光係数、 c : 媒質濃度、 l : 光路長)

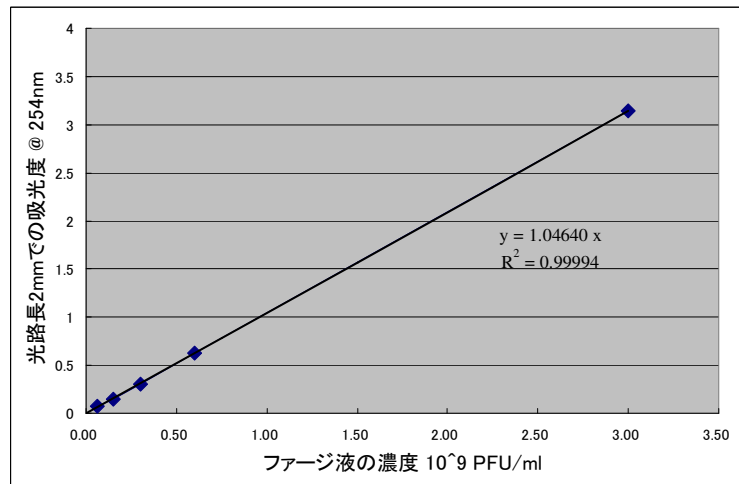
から、系に吸収されるエネルギー $I_0 - I_1$ は $I_0(1 - 10^{-\varepsilon c l})$ と表わすことが出来、吸光度が1だと90%、2だと99%吸収されたことになる。系が厚いほど、媒質濃度が高いほど、吸収されるエネルギー自体は大きくなる。

しかしながら、あまりに厚かったり、媒質濃度が高くなると、途中でほぼ紫外線の全量が吸収されそれ以上吸収されるエネルギーは増えず、媒質の量が増えるに従い媒質の単位質量あたりに吸収されるエネルギーは小さくなる。

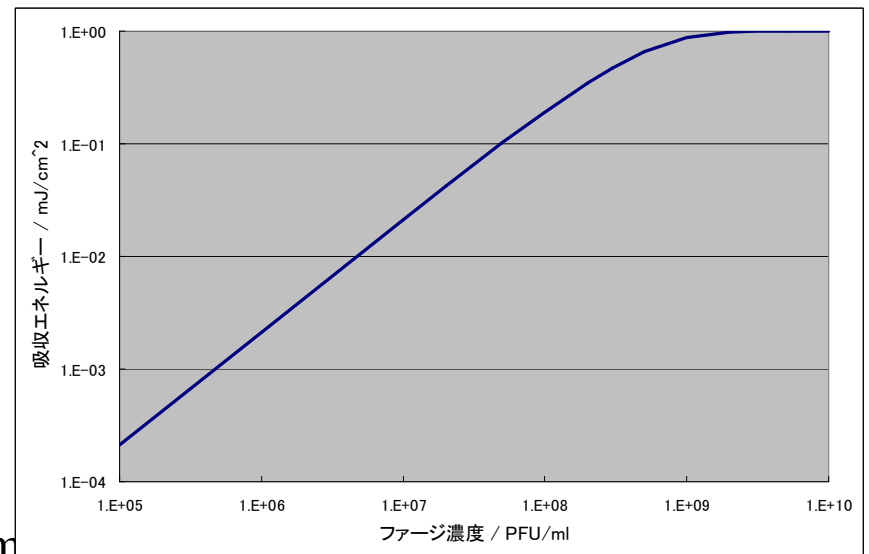
吸光度から求める質量吸収光量(2)



バクテリオファージQ β のファージストック(原液、 3.0×10^9 PFU/ml)を 5, 10, 20, 50倍に希釈していき、初期濃度の異なるファージ液を調整した。これを光路長 1mm(原液) もしくは 2mm の石英セルに入れて紫外可視分光光度計(アズワン ASUV-6300PC, ダブルビーム、石英セル使用)により吸光度スペクトルを測定した。低圧水銀ランプからの紫外線の波長である 254nm における吸光度をファージ濃度で整理し、ファージ濃度 (PFU/ml)あたりの吸光係数(ml/PFU $\cdot$ mm) を求め、 ϕ 60mm のシャーレに 5ml のファージ液を入れて 1mJ/cm 2 を照射した際の **吸収エネルギー** を求めた。



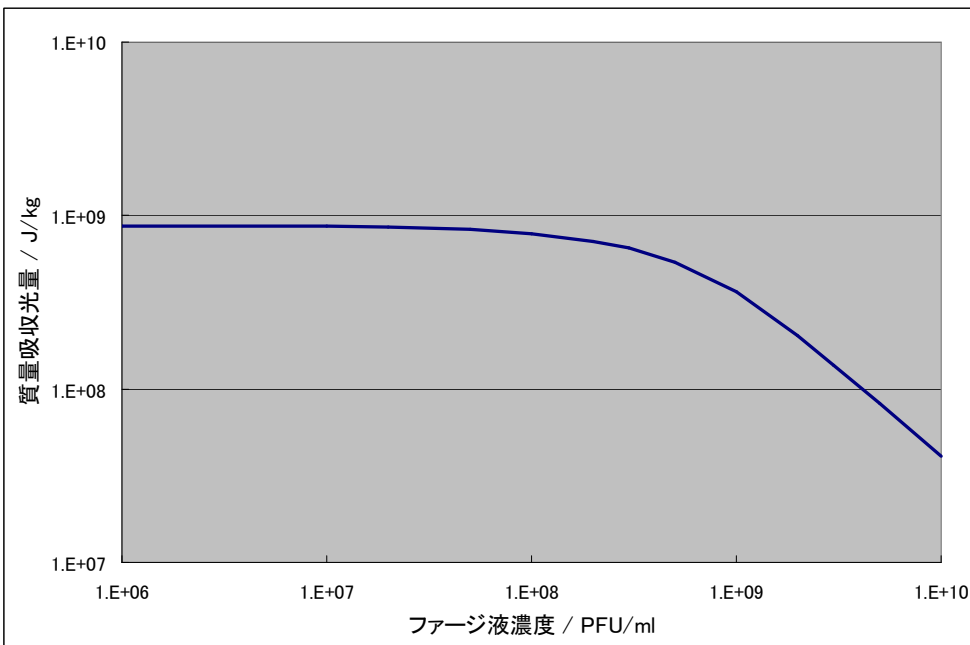
吸光係数 = 5.23×10^{-9} ml/PFU $\cdot$ mm (@254nm)



吸光度から求める質量吸収光量(3)

質量吸収光量を求める際の分母として**ファージの質量**を求めた。バクテリオファージQ β を直径28nm、密度1.2g/cm³の球体と**簡略化**して計算すると、1つあたりの質量は 1.38×10^{-17} g となった。**ファージ1つで1 PFUと仮定**すると、1cm²のファージ液(**厚さ1.77mm***)中に存在するファージの質量は、ファージ液の濃度 c (PFU/ml) を用いて $1.38 \times 10^{-17} \times 0.177 c$ と表わされる。これを**分母**として、前ページで求めた1cm²あたりの吸収エネルギーを割ると、**質量吸収光量 (J/kg)** が求まる。

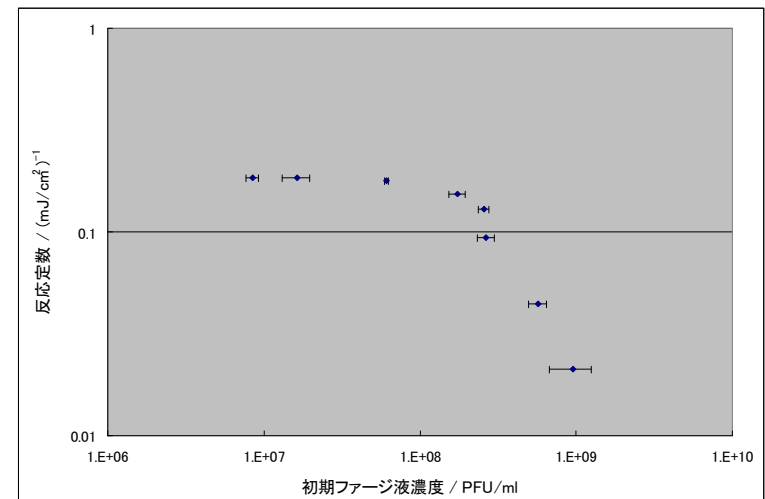
* ϕ 60mm のシャーレに 5ml のファージ液を入れて照射した



なお、ファージを分散させている生理食塩水による紫外線の吸収は無視可能であり、ここで求めた吸収線量は**系全体を平均化した場合**の値である点に注意を要する。

傾向として 1×10^8 PFU/ml を境に吸収線量の低下が見られるという結果が得られた。

これは実際に初期のファージ液濃度を変化させて生残曲線を取得した際の傾向と一致する。

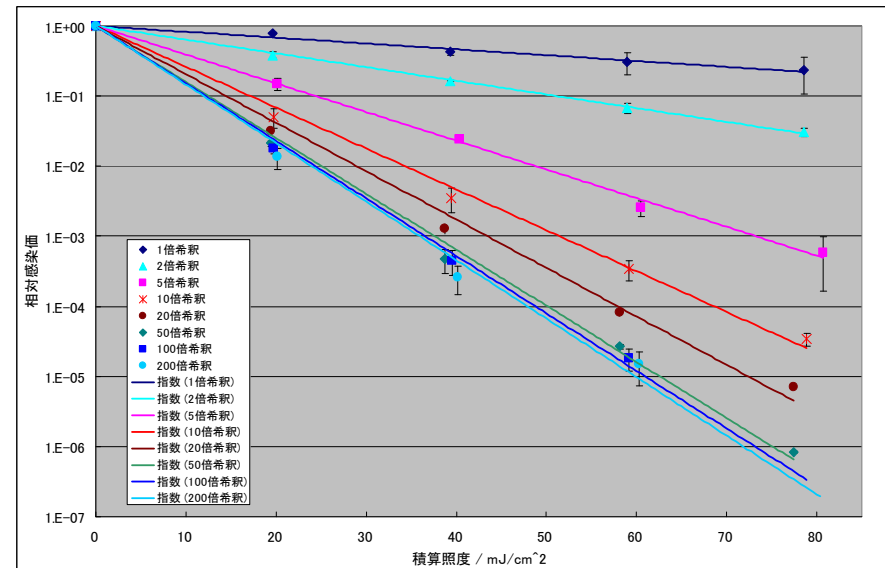
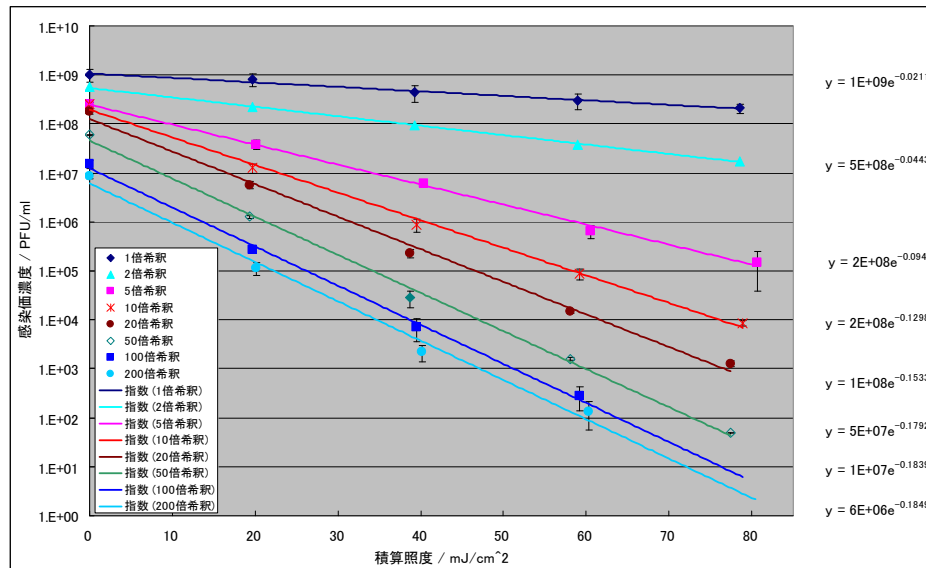


生残曲線の初期濃度依存性

サンプリングしたファージによるプラーク数の測定は2枚のJIS LB平板培地で実施し、平均を取った。照射試験は同じ日に3回行い、平均を取っている。

初期濃度は、ファージストック(原液)を m倍希釈して変化させているが、ファージストックの感染価は実験を行った日によって異なっており、m倍希釈というのは整理する上での指標に過ぎない。実際の初期感染価は照射前に実測をしている。

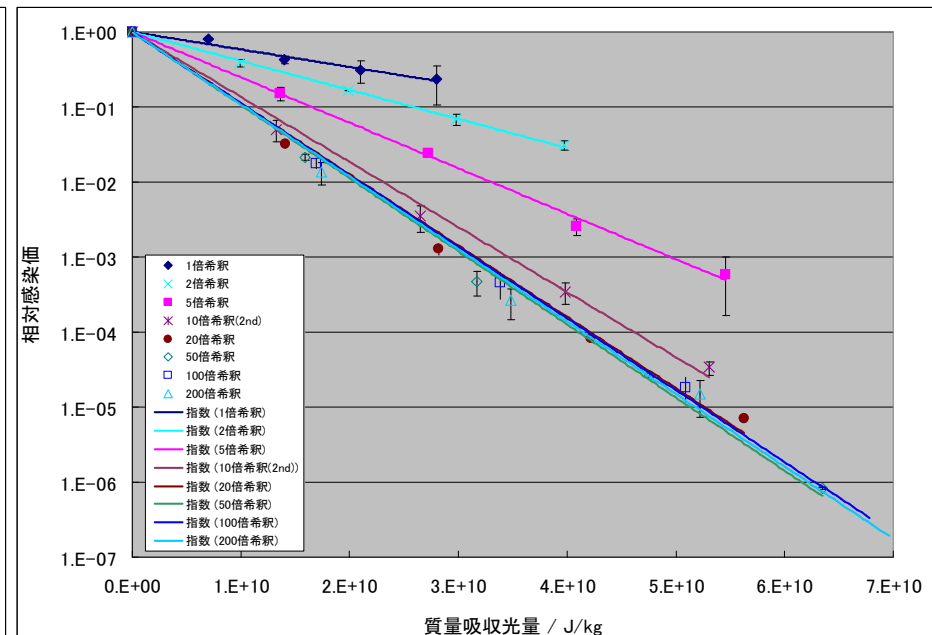
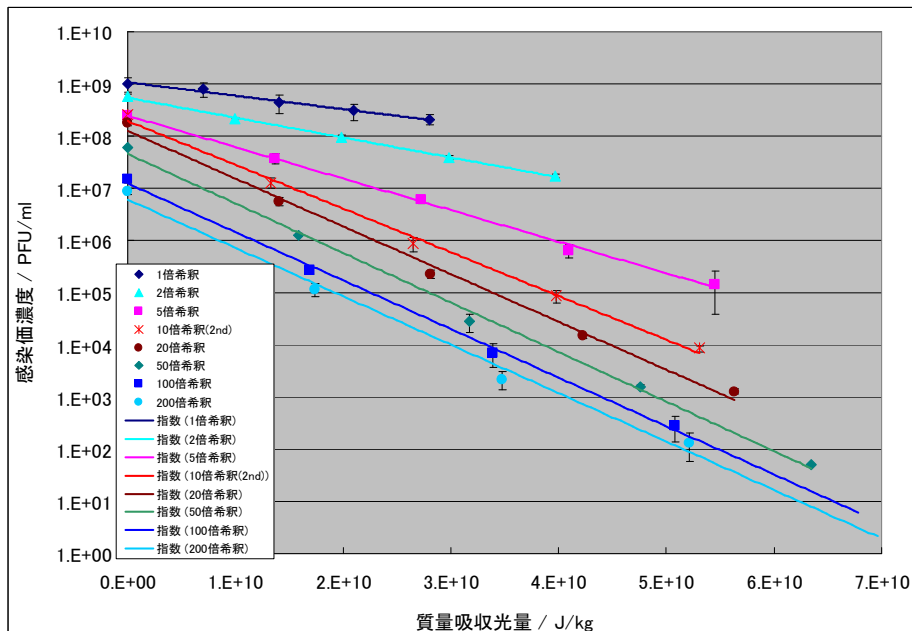
結果は、初期感染価が高くファージ濃度が高いほど反応速度定数が小さく、不活化されにくくなった。



質量吸収光量を用いた生残曲線の整理(1)

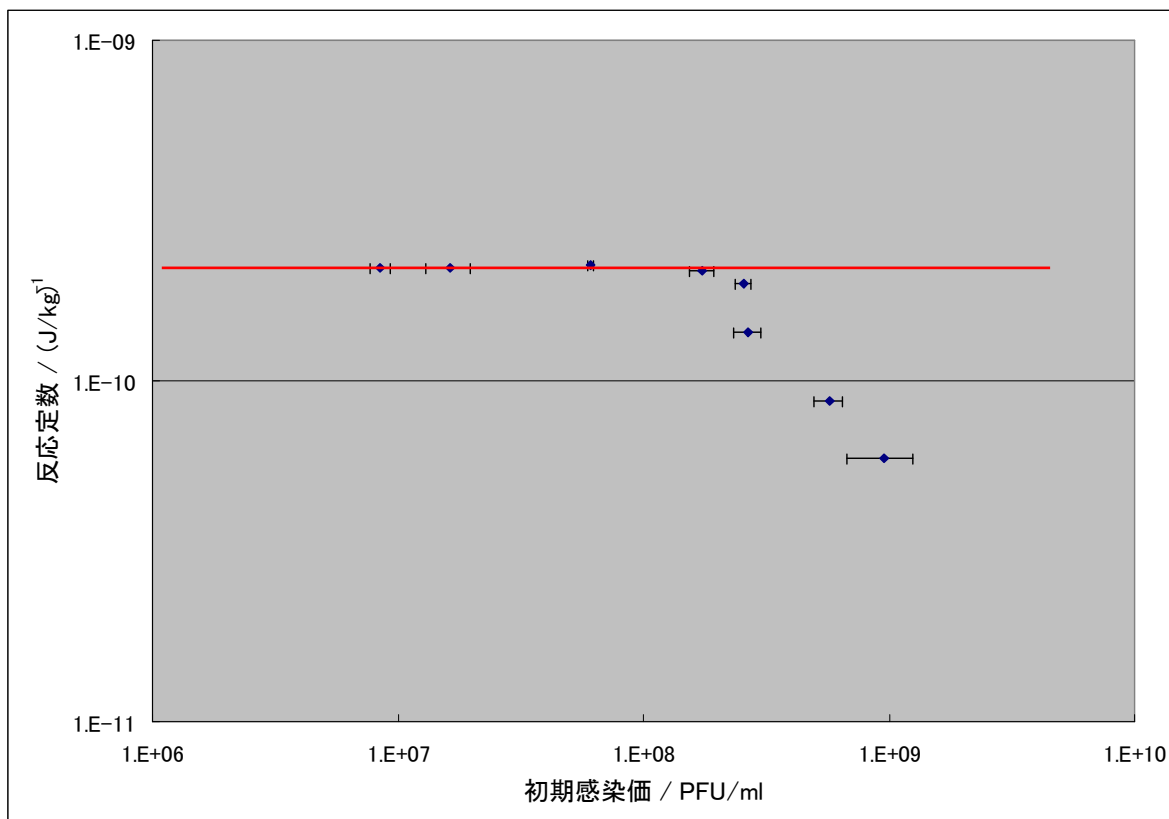
生残曲線の横軸をエネルギーフルエンスである積算照度ではなく、ファージが吸収したエネルギーとして質量吸収光量を用いて整理した。

1×10^8 PFU/ml よりも低濃度の領域では規格化した生残曲線が**ほぼ完全に一致**しており、質量吸収光量で整理することでより信頼性の高いデータを取得できているが、高濃度域では依然として初期濃度により生残曲線の傾きが変化している。



質量吸収光量を用いた生残曲線の整理(2)

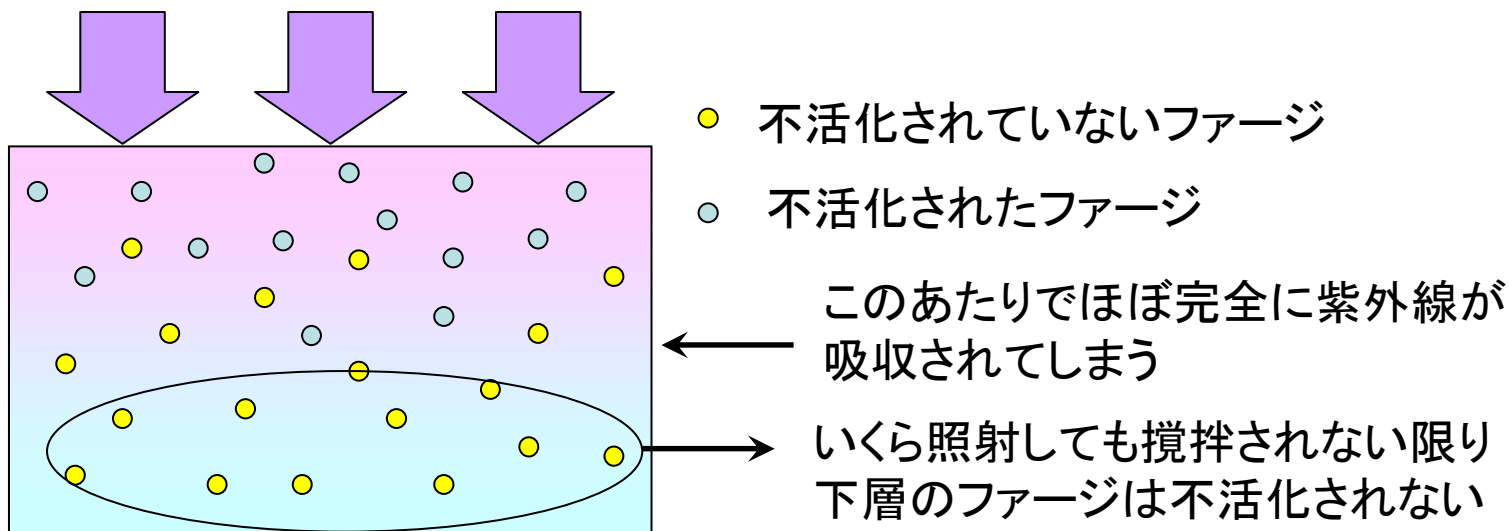
生残曲線の横軸を吸収線量とした場合の生残曲線の反応定数を初期感染価濃度に対してプロットした。積算照度で整理した場合と同様であるが、低濃度域での傾きがほぼ無くなり、 2×10^8 PFU/ml 程度まで信頼できる測定が可能である。



質量吸収光量を用いても完全に補正できない原因

本来吸収線量を用いれば、初期濃度の違いによる系全体へ吸収されるエネルギーの違いを補正できるはずであるが、高濃度域で補正しきれなかったのは、ファージ液の上層部で紫外線が吸収され**下層に到達せず、既に不活化されたファージに照射し続けている**ためであると考えられる。照射中に攪拌するなど均一化を行えば、ある程度改善されると考えられるが既に不活化されたファージがエネルギーを吸収し続ける**オーバーキル**は避けられず、完全に補正することは困難で有ると考えられる。

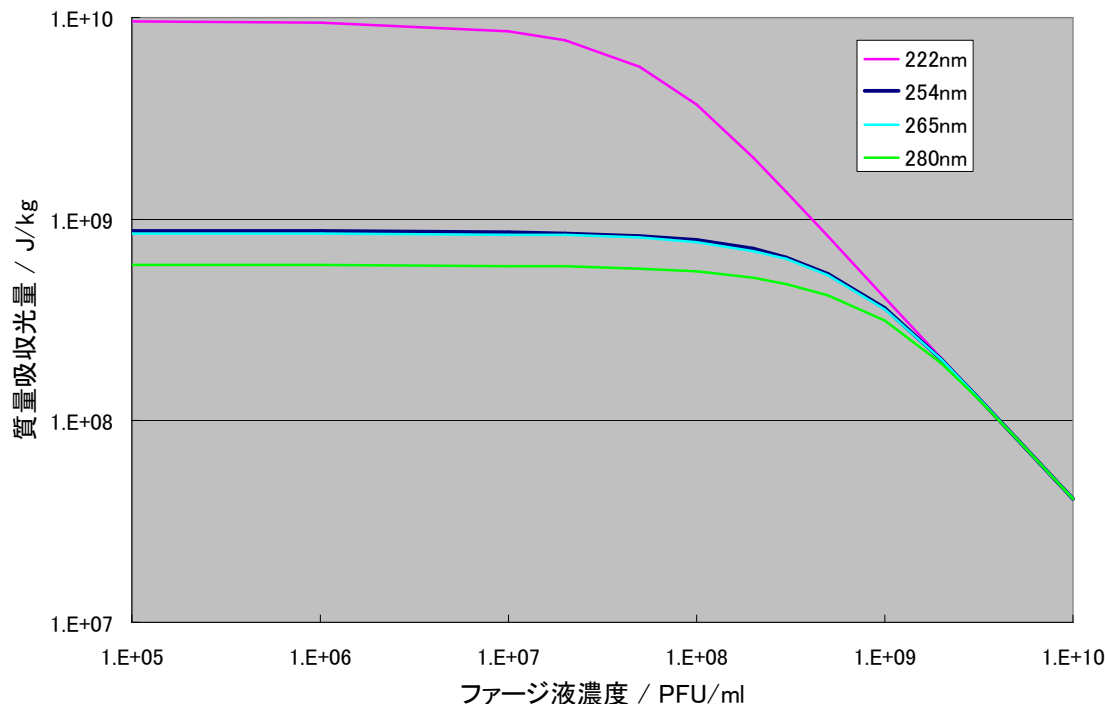
なお、ファージ1つの投影断面積は $\phi 28\text{nm}$ の球体と考えると $6.16 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ であり、 1cm^2 あたりのファージの数は $1 \times 10^8 \text{ PFU/ml}$ の場合で 1.77×10^7 個（1個で1PFUと考えた場合）に過ぎず、全く重なりが無かった場合でも $1.09 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ とわずか0.01% 程度を覆っているに過ぎない。



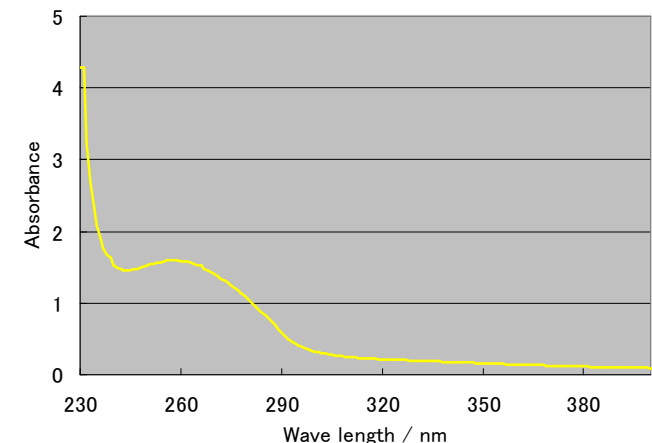
波長が異なる場合の質量吸収光量の違い

254 nm の場合と同様に、222 nm の遠紫外線を照射した場合のバクテリオファージQ β に対する質量吸収光量を計算した。254 nm の場合よりも吸光度が大きい分、**同じ積算照度であっても一桁程度質量吸収光量は大きくなった**。また、254 nm での場合よりも低い濃度から質量吸収光量の低下が見られた。

265 nm では 254 nm とほぼ同等であったが、280 nm では吸光度が下がり、質量吸収光量も低下している。ただしこれらはいずれも厚さが1.77mmの系に対する場合の計算結果である。

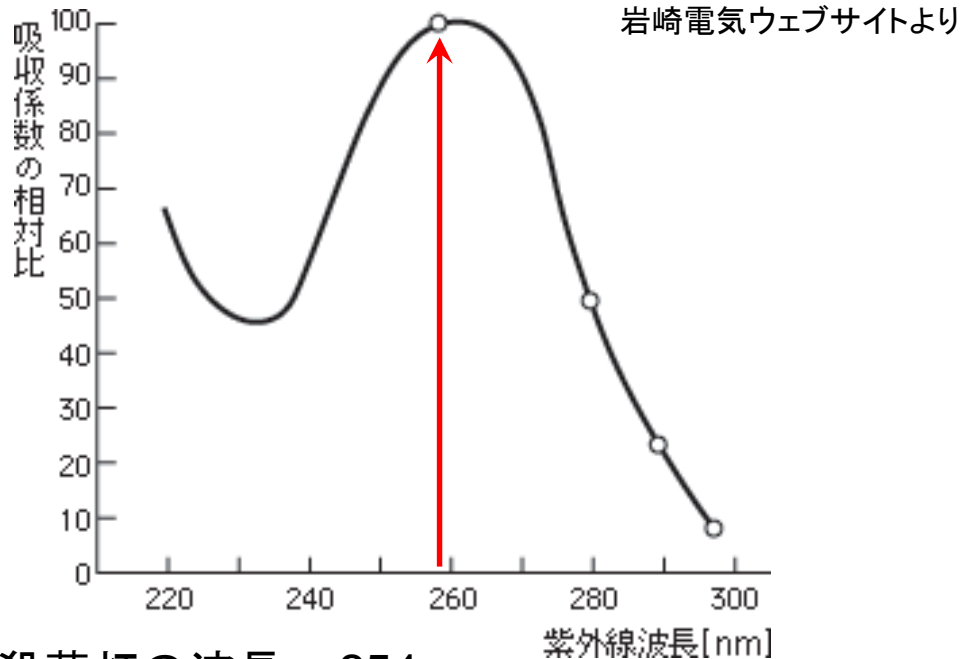


同じ積算照度で照射しても吸収するエネルギーは波長により異なるため、効果が異なる。質量吸収光量を物差しにして評価することで、初めて光子のエネルギーによる効果の違いが見えてくる。



UV-C によるウイルスの不活化

DNAに対する紫外線吸収の波長依存性

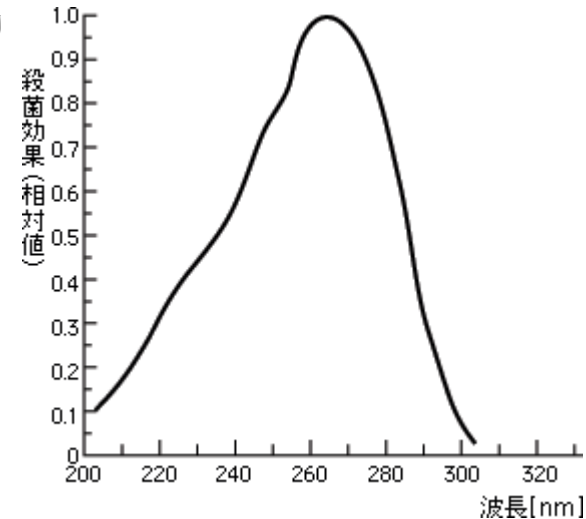


殺菌灯の波長 = 254nm

紫外線に対する殺菌、ウイルスの不活化の研究はほぼ全てが波長254nmの殺菌灯について行われている。様々な菌、ウイルスについて横断的なデータが存在する。

太陽光に含まれるUV-Bについては古くから殺菌効果が知られているが、定量的研究は極めて限られている。

殺菌作用の紫外線波長依存性



UV-C	UV-B	UV-A
200-290nm	290-320nm	320-400nm

近年話題になっている222nmの遠紫外光は、透過力が極めて小さく、皮膚ごく表面の $20\mu\text{m}$ 程度の厚さの角質層などで止まってしまい生きている細胞にまで到達せず、炎症や皮膚癌などを引き起こさない。その一方で物体の表面に付着した直径 $0.1\mu\text{m}$ 程度のウイルスの中までは届くため、遺伝子に損傷を与えて不活化できる。ウイルスよりも大きい菌(直径 $1\mu\text{m}$ 程度)の場合細胞質の中のDNAまで到達する量が少なくなるため効果は小さくなる。