

大阪公立大学 工学研究科 第145回テクノラボツアー
2024年11月11日 @ 学術交流会館小ホール
「量子放射線の研究最前線 ～多様性を秘めた量子科学技術～」

量子の力を活用した 感染症対策技術の開発 ～紫外線と光触媒～

○准教授 秋吉 優史

大阪公立大学 工学研究科、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

<http://bigbird.eng.omu.ac.jp>



第一部：概要説明

第二部：紫外線消毒

第三部：光触媒と飛沫除去

なぜ感染制御研究を？



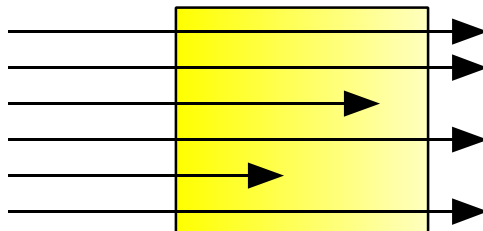
非密封のRI(放射性同位元素)を取り扱う上での汚染拡大防止と、感染制御は共通点が非常に多い。

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

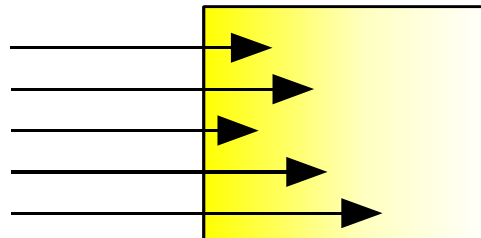
$$H_p(0.07) \leq 10 H_p(10)$$



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($J/kg = Gy$)。

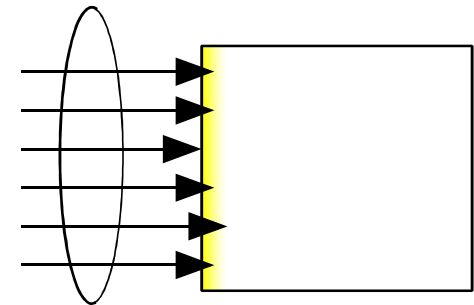
低エネルギーX線



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

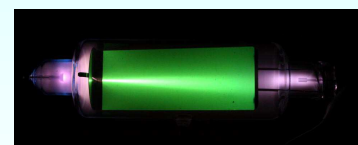
紫外線



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 ↓



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。

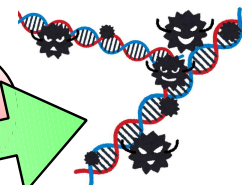
ビタミン、ポリフェノール
や酵素などによる還元

DNA損傷の生成

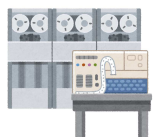


バックアップデータ
からの修復

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。



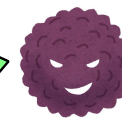
修復を断念して死を選ぶ

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。

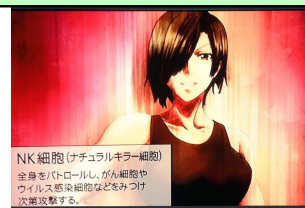


あまりにもダメージが大きいと、完全に修復しきれなくなり、修復が無理だと判断した細胞は自ら死を選ぶことで、間違った遺伝情報が残らないようにします(アポトーシス)。人の体は37兆個といわれる沢山の細胞で出来ていて、毎日沢山の細胞が死んで、また新しく生まれて機能を維持しています。

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。

がん細胞

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。

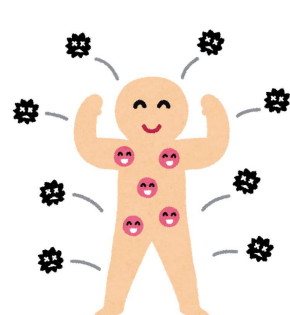
放射線治療



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!

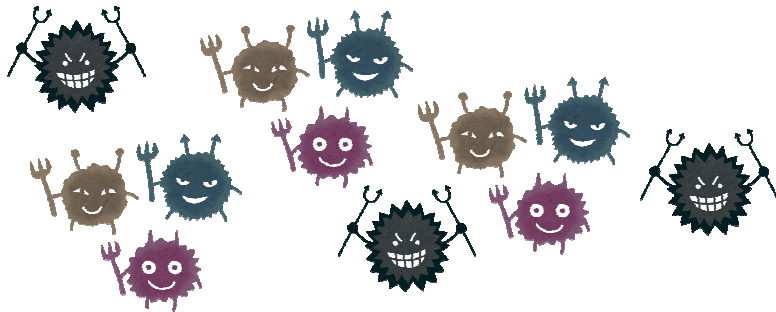
バランスの取れた楽しい食事で
健康な体を保ちましょう!



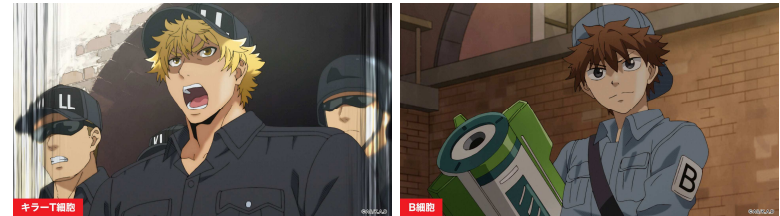
「感染」とはどういった状態か

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。

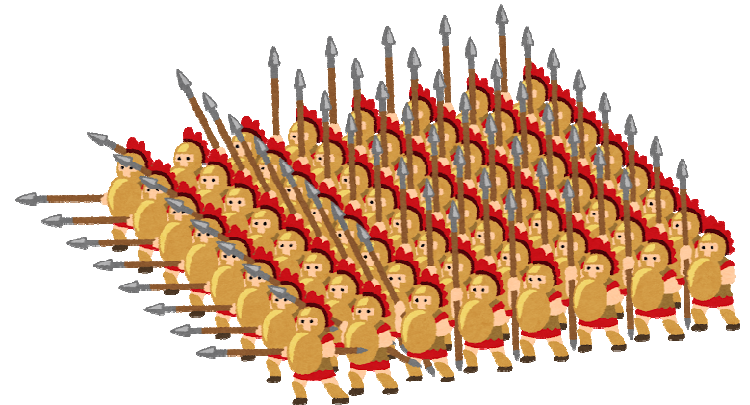


自然免疫

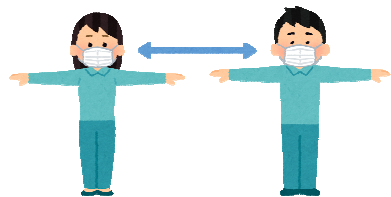


獲得免疫

**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

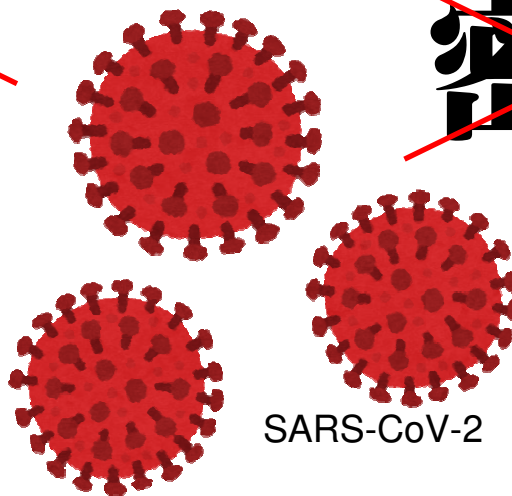
エアロゾル



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
散しうる。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



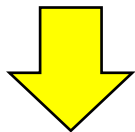
消毒しよう

どこに潜んでいるか分からない
トラップ。

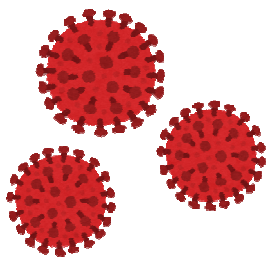
材質によっては数日間感染力を
持ったまま付着している可能性
がある。

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)。

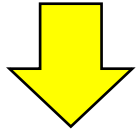
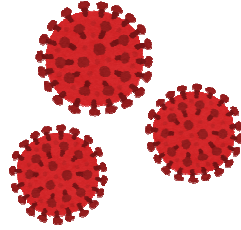
人の居ない空間への紫外線照射

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。

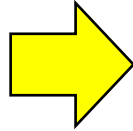
共有物品表面への光触媒や、銅・銀などの金属微粒子の塗布

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。

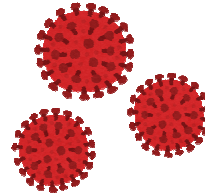
最も簡単には、銅箔テープの貼付けなどでも一定の効果がある。

新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(3)

~~密集~~

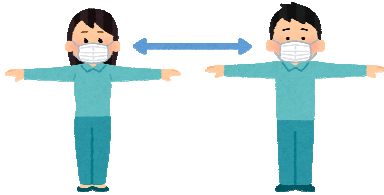


飛沫



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

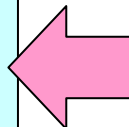
大きな液滴に大量のウイルス

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、たくさんの方が必要。

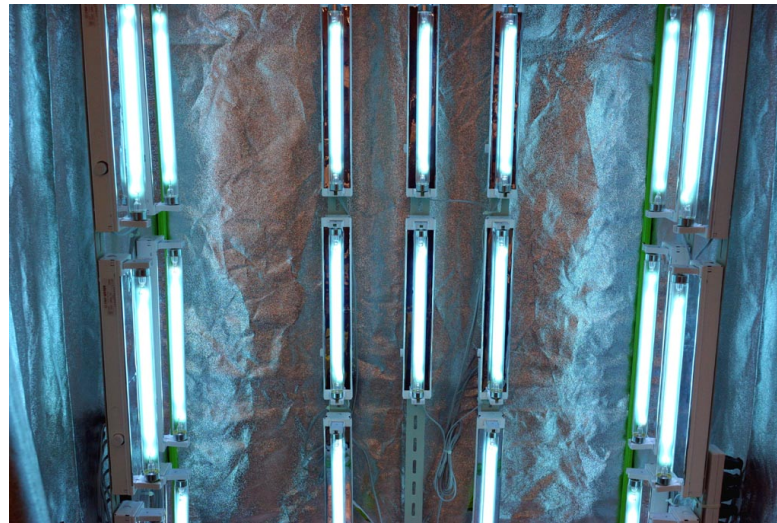
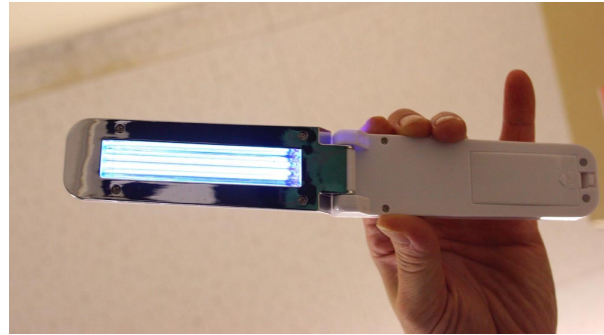


飛沫の放出を防ぐためにはマスクが有効で、不織布や布製のマスクでは8割程度の飛沫を止めることが出来るが、残りの2割程度は隙間などから飛散する。このため、飛程よりも近くに座ってのミーティングや窓口などでの会話で感染リスクがある。また、食事中にマスクは困難で会食時のリスクが高い。



「感染を広げない」
目的で全員が着用

第二部：紫外線消毒



紫外線による殺菌・不活化効果



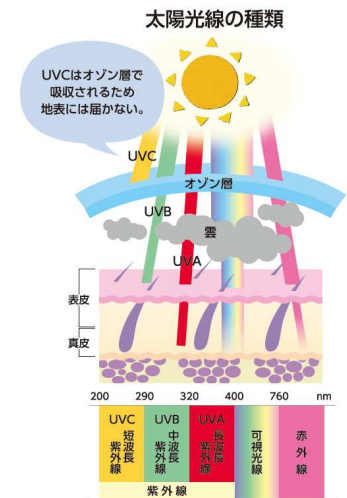
太古の昔から生物にとって紫外線は大敵で、オゾン層が出来るまで生物は陸上に上がることが出来ませんでした。紫外線は、放射線のように直接遺伝子を傷つけ、不活化します。菌、ウイルスの種類を問わずに紫外線は有効で(多少の強い、弱いはありますが)、**新型コロナウイルスも紫外線で不活化されることが様々な論文で報告されています。**

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。**

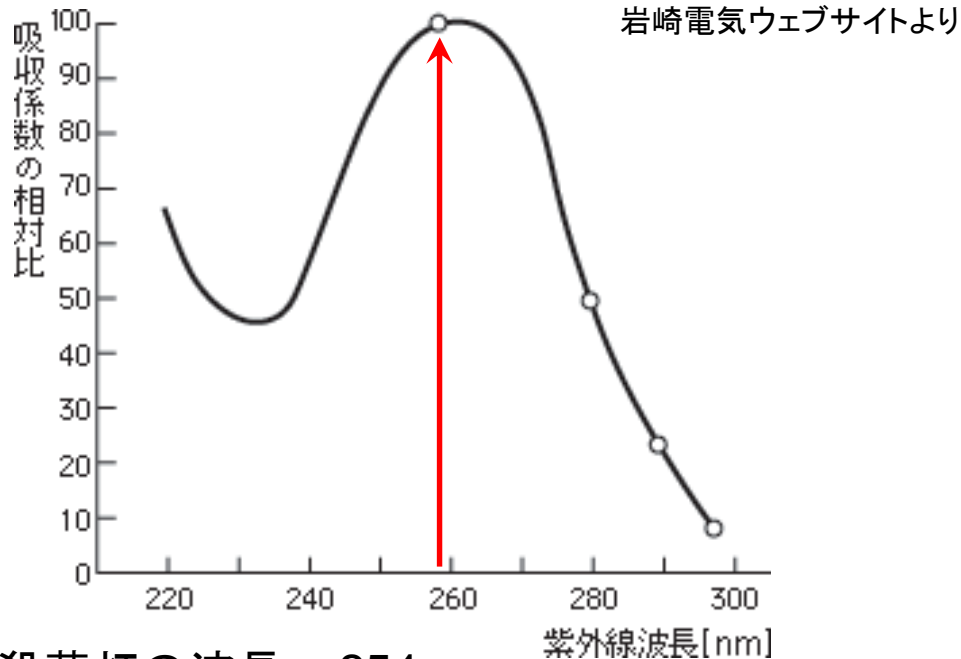
論文として報告されている新型コロナウイルスのデータ(*)を元にする
と、8W の**UV-C 殺菌灯**からの**紫外線量**を実際に測定してみた結果、
正面位置15cmの距離でおおよそ **3秒で99.9%** が不活化可能であるという
計算となりました。

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



UV-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

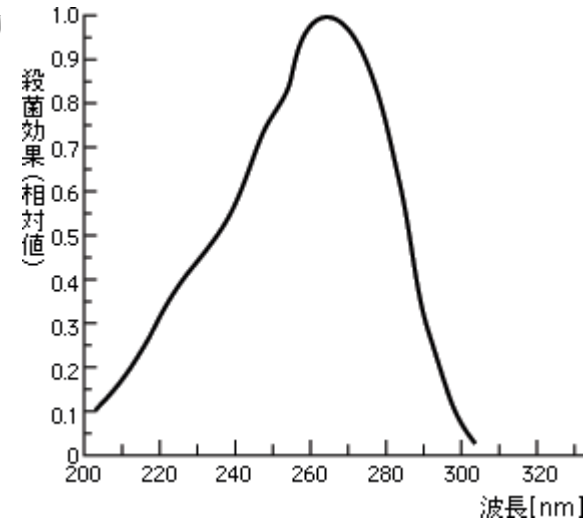


殺菌灯の波長 = 254nm

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

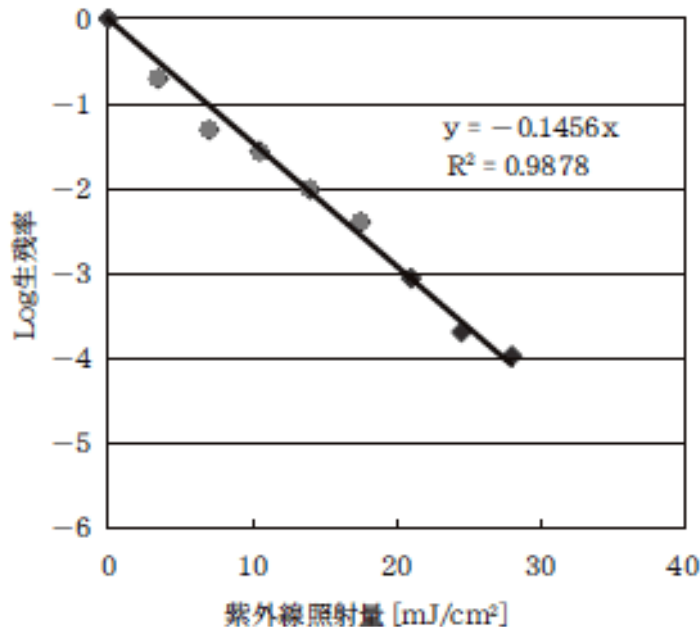


UV-C	UV-B	UV-A
200-290nm	290-320nm	320-400nm

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)。

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。

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。

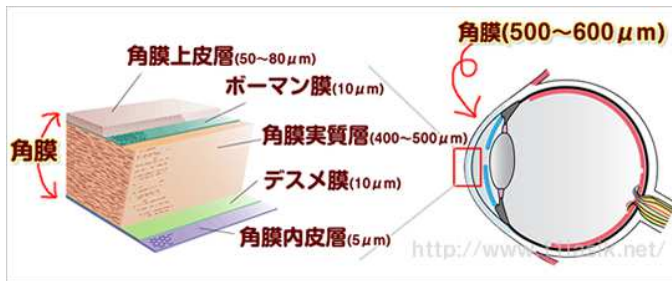
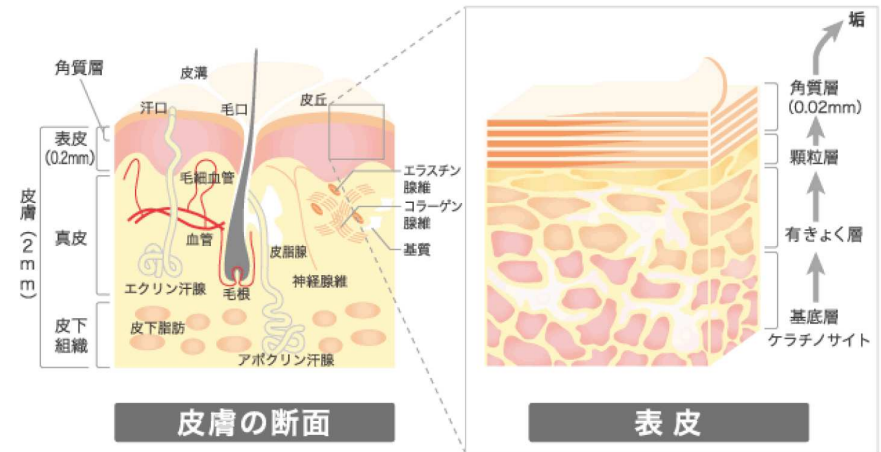
皮膚や目に強い炎症を起こし、人体に有害

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。

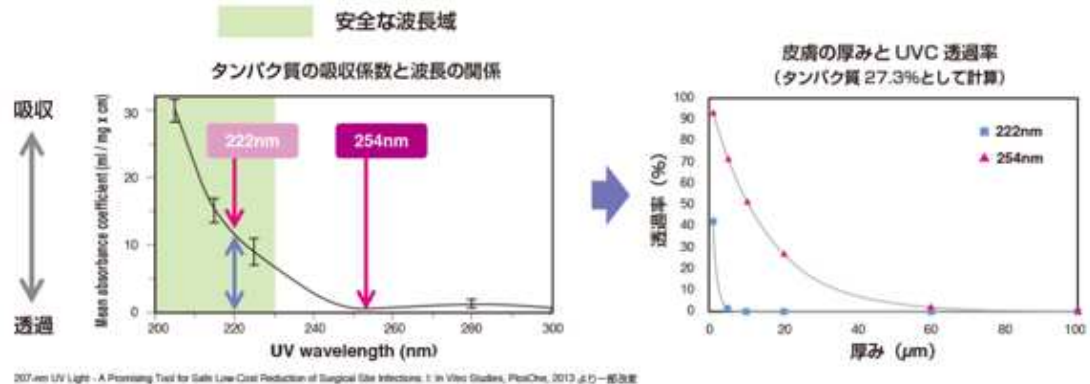
皮膚の構造と紫外線の透過率

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。

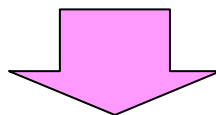
この当時は紫外分光放射照度計がなかったため分光照度は不明。

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。

第三部：光触媒と飛沫除去

I：光触媒と飛沫除去の概念

II：飛沫除去装置の開発

- ① 飛沫の吸引**
- ② フィルターでの捕集**
- ③ 光触媒での分解**

飛沫とエアロゾル

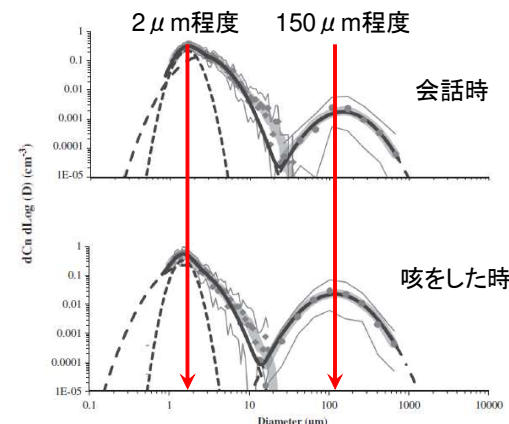
医学的には口腔から放出される $5\mu\text{m}$ 以上の液滴を**飛沫**と呼び、それ以下の物を**エアロゾル**と呼ぶが、 $5\mu\text{m}$ を境に急に物性が変化するわけではなく、落下速度などは連続的に変化する。

しかし、口腔から出る液滴の粒径が示す2つのピーク、 $2\mu\text{m}$ 程度と $150\mu\text{m}$ 程度では明らかに物性は異なり、同一の扱いとすることには無理がある。

様々な報道に於いて**飛沫による感染リスクを軽視**する意見が出ている。マスクやパーティションなどの対策をした上で**残るリスクがエアロゾル**というのは賛同できるが、そういった前提条件無しに軽視することは市民に誤ったメッセージを送ることになる。また、マスクをしていても一定の割合で飛沫は漏出し、吸い込む側は隙間からほぼフリーパスで吸入される。また、飛沫が乾燥して出来る飛沫核がエアロゾルとなる場合や、落下した飛沫が接触感染や飲食物に付いた場合経口感染のリスクとなる可能性も無視できない。

なお、液滴の体積を考えると、100万個のウイルスが口腔から放出されたとしてエアロゾルとして滞空するウイルスは100個程度という見積りが成されている(*)。

(*) 野村 俊之, 新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の感染経路に関する微粒子工学的検討, 日本接着学会誌, 57(2021)427-431.



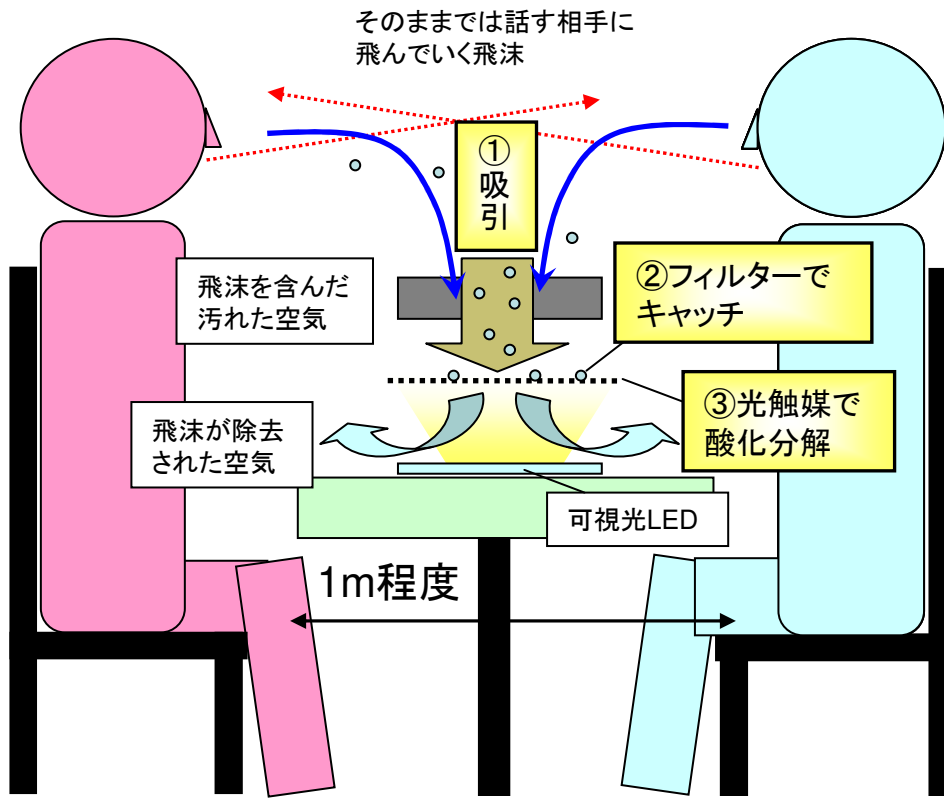
G.R. Jhonson et al., Modality of human expired aerosol size distributions, J. Aerosol Science, 42(2011)839-851.

・屋外での飲食 (BBQなど)

・屋外のスポーツ観戦

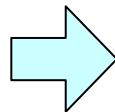
でのクラスターの発生は、マスクをしていない状況ではいかに換気がよくても飛沫感染のリスクが存在することを示唆してる。

気流、マスクの有無、会話のトーンなど、様々な状況で支配的となるリスクは変わり、対策も変える必要がある。



サブミクロンの飛沫をキャッチしようとする
とHEPAフィルターなどの高性能フィル
ターが必要で、十分な吸引を行うため
には高出力のファンが必要となり、騒音のため
人のそばには置けない。

サブミクロンのエアロゾルは
キャッチしないという割り切り



**飛沫除去に特化した小型飛沫除去装置
というコンセプトを実現**

① 吸引

発生源と対象者の間にひかりクリーナー
を設置した場合、口の高さ程度を飛ぶ
 $5\mu\text{m}$ 以上の飛沫を1/100程度にまで吸
引除去

② フィルターでキャッチ

吸引した $5\mu\text{m}$ 以上の飛沫については、
ほぼ完全にフィルターでキャッチ

③ 光触媒で酸化分解

紫外線を放出せず安全な高輝度可視光
LED と、可視光応答光触媒を使用した
無機材質ベースの高性能フィルター(特
許出願準備中)により、高い酸化分解力
を実現。フィルターではキャッチできない
エアロゾル中のウイルスについても除去
できることを確認。

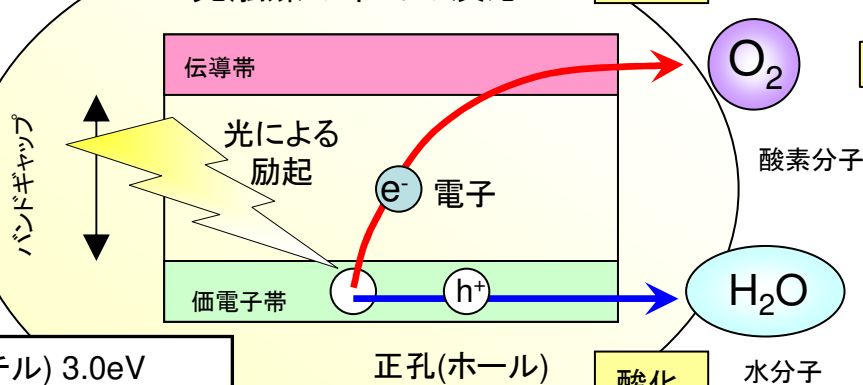
光触媒とは

目に見える可視光線
(400nm～, 3.1eV～)

光触媒粒子

蛍光灯の光には400nm以下の波長の紫外光成分も含まれていましたが、一般的な可視光LEDは440nm程度をピークの青色LEDと黄色の蛍光体の組み合わせで出来ていて、400nm以下の紫外線は含まれていません。

光触媒の中での反応



スーパーオキシドラジカル

活性酸素種の生成

オゾンよりも強力な酸化力

OHラジカル

活性酸素は百万分の一秒程度で消滅するため(※)表面から数ミクロン程度の範囲にしか届きません

TiO₂(ルチル) 3.0eV

TiO₂(アナターゼ) 3.2eV

WO₃ 2.5eV

波長495nm以下の可視光線で励起可能

様々な有機物を酸化して
化学的に分解

菌



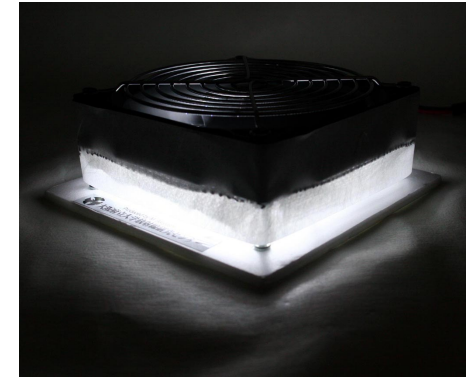
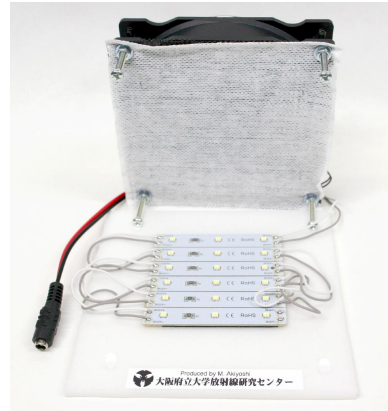
ウイルス

有機ガス

最終的には水と二酸化炭素にまで分解される(完全分解)。

※ 一瞬で大量の有機物を分解するわけではありません

可視光応答光触媒を用いた超低価格な 小型空気清浄機「ひかりクリーナー」



和紙による漏れ光の遮光

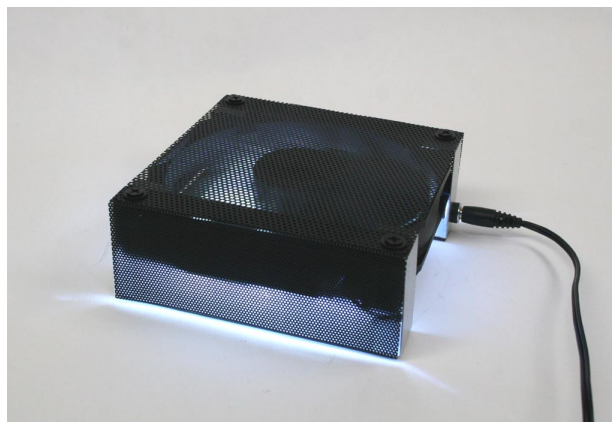


12cm角、高さ5cm、ファンの騒音19dB、消費電力5W以下で、モバイルバッテリーでの駆動も可能

可視光応答の光触媒を使用しているため、漏れ光を完全に遮蔽する必要が無く、簡易な構造での動作が可能。当初開発した標準型はPC用のパーツなどを組み合わせて、極めて安価で製作が可能。価格が安価であれば、その分多数台でのネットワーク構築が可能となる。中学生程度でも工作可能で、半田付けなどの危険な作業も不要。光触媒フィルターは、不織布と市販されている東芝「ルネキャット」スプレーにより製造が可能で、より強力なファンを使用すれば性能向上も可能。

これまでに700台程度を市民に提供し、実際に使用してもらっている。

可視光応答光触媒を用いた小型飛沫除去装置 「ひかりクリーナー2020」



メタルフレームと樹脂メッシュにより見た目を大幅に改善し、持ち運びも可能で、マグネットプレートによりスチール什器壁面への貼付けも可能。

通常は12VのACアダプターで駆動するが、アップコンバーターを使用するとモバイルバッテリーなどのUSB給電でも駆動可能でモバイルでの使用が可能。



2022型

AMED事業で得られた成果を元にした高性能フィルターを使用した製品の産学連携での商品化に向けて、試作機を制作中。試験的な提供を開始しています。

特殊画像撮影による飛沫吸引の可視化

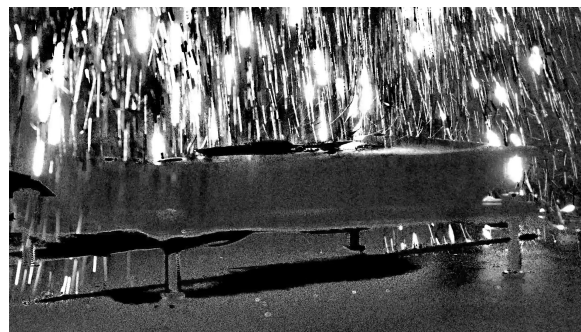


空気中の微粒子を可視化する特殊動画撮影を実施しました。

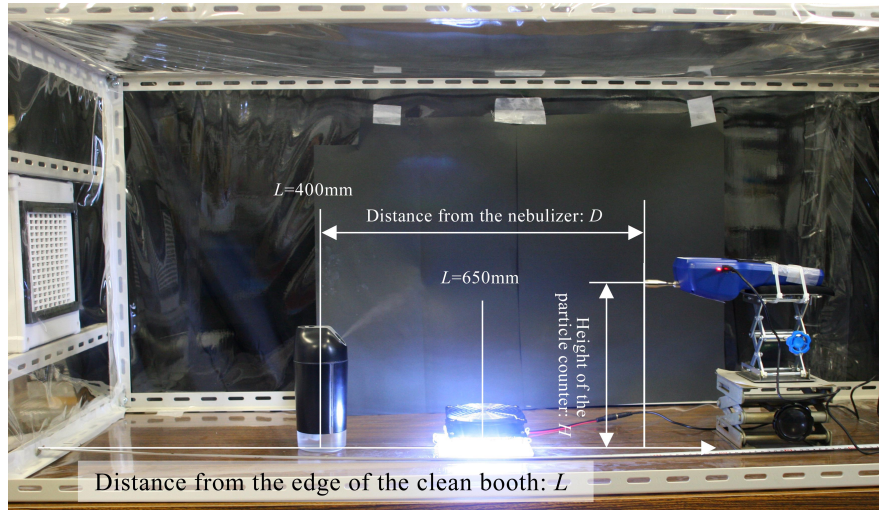
1m 程度の範囲に於いて、口から発声に伴って出た飛沫や、スプレーからの模擬飛沫、エアロゾルを模した電子タバコのベーパーなどが吸い込まれていき、なおかつフィルターによってマスクと同じように止められていることが確認出来るかと思っています。



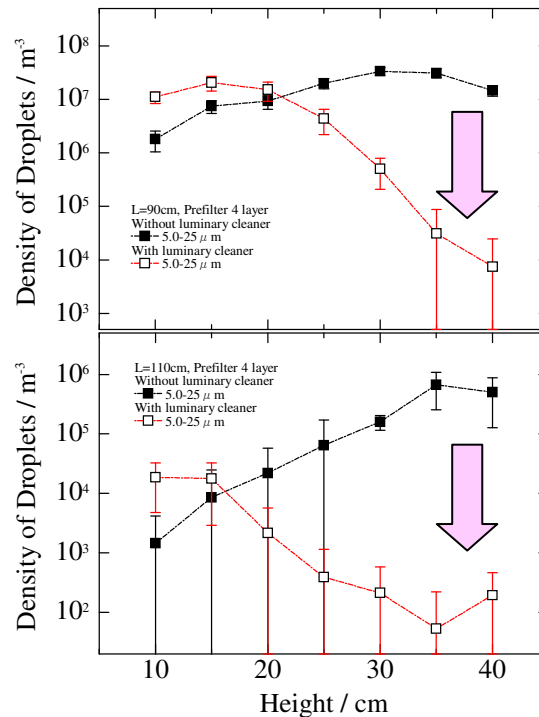
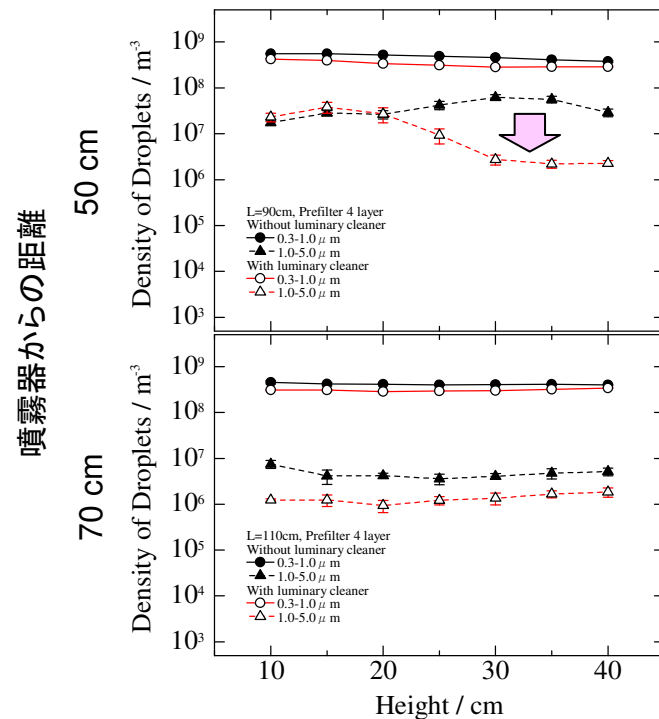
発声に伴う飛沫の撮影に際しては、「ブーブー」と言う破裂音により意図的に大量の飛沫を出しています。



空間を飛ぶ飛沫の捕集率



風速0.6m/s程度のクリーンベンチ内での飛沫捕集試験を行った。超音波加湿器からの水道水の液滴を、下流側に設置したパーティクルカウンターで測定する。液滴は斜めに噴射され、40cm程度の高さで水平に飛行した。



噴霧器からの距離50cm, 70cm の位置にパーティクルカウンターを設置し、粒子数の高さ依存性を評価した。

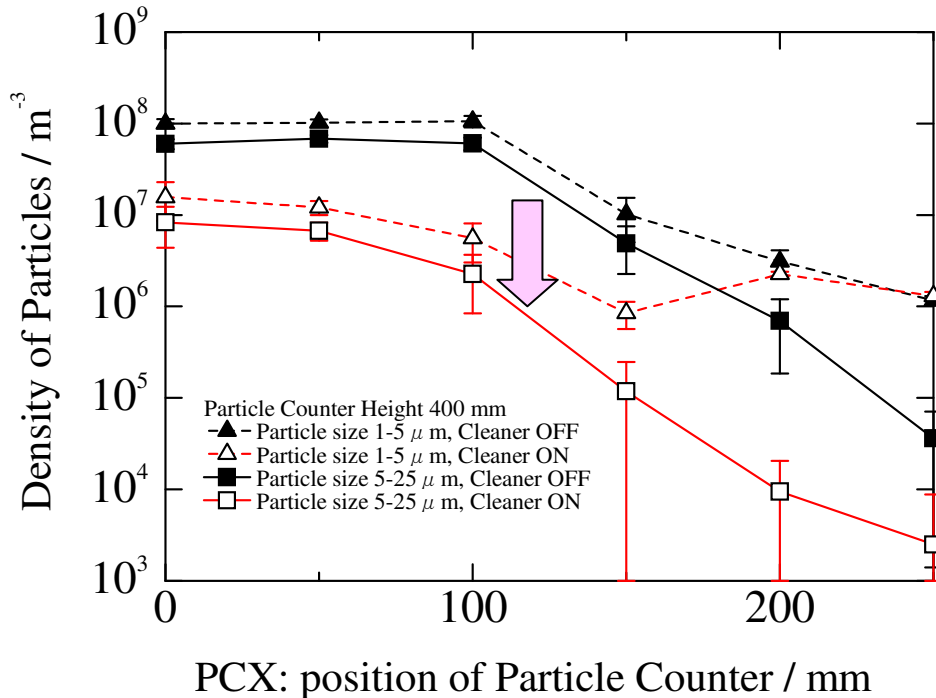
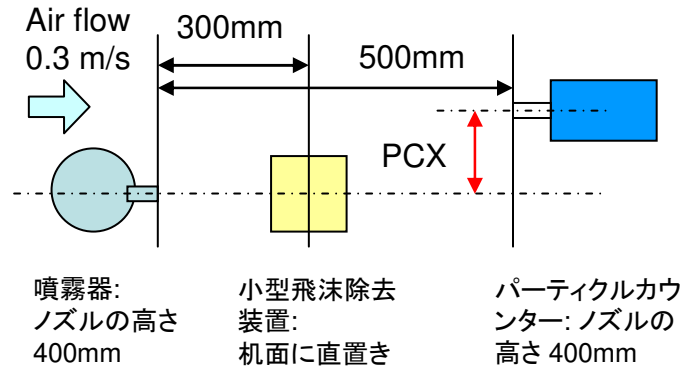
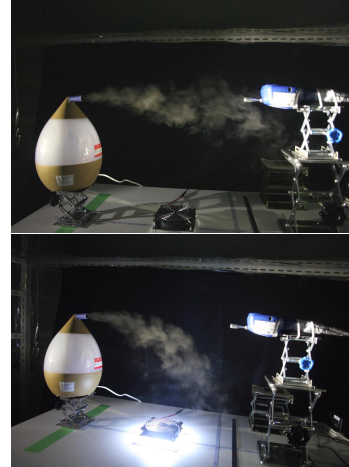
いずれの距離でも、 $5.0\sim 25\ \mu\text{m}$ の粒径の大きな「飛沫」は、飛沫除去装置の作動によって着席時の顔の高さである40cm程度の高さでは大幅に減少することが確認できた。

$0.3\sim 1.0\ \mu\text{m}$ のエアロゾルは測定可能な粒子数を超過しており評価できていないが、別途粒子数を落とした測定でも減少は見られなかった。その間の $1.0\sim 5.0\ \mu\text{m}$ のエアロゾルについては1桁程度の減少が見られた。

大型クリーンブースによる飛沫除去性能評価(1)



HEPA フィルターを使用した大型
クリーンブース: 1.5 × 1.5 × 2.4m



直線的配置だけでなく、対象者が飛沫除去装置からずれた位置にいる場合の模擬を行った。元々大気中を飛ぶ埃の影響を避けるために大型のクリーンブースをセミクリーンルームに設置した。噴霧器に水平に設置したノズルからのミストはHEPAフィルターユニットからの追い風(0.3m/s程度)によってほぼ水平に飛行するよう調整した。噴霧器、パーティクルカウンターとも、着座した際の机面から口の高さ程度である400mmにノズルの高さを設定した。

5.0 ~ 25 μm の飛沫は、中心軸から250mmの範囲で一様に概ね1桁程度減少を示した。また、口腔から放出されるエアロゾルのピークサイズに相当する1.0 ~ 5.0 μm の粒子も、150mm 程度の範囲までは1桁程度減少した。一方、0.3 ~ 1.0 μm の粒子は1割程度の減少に留まった。

フィルターによる飛沫の捕獲率



HEPAフィルターを使用したクリーンブース内にダクトを設置し、口腔からの飛沫を模擬した超音波加湿器からの液滴がどの程度フィルターに捕獲されるかを評価しました。

その結果、**5 μ m以上の飛沫に関しては、ほぼ完全に捕集**できていることが確認されました。

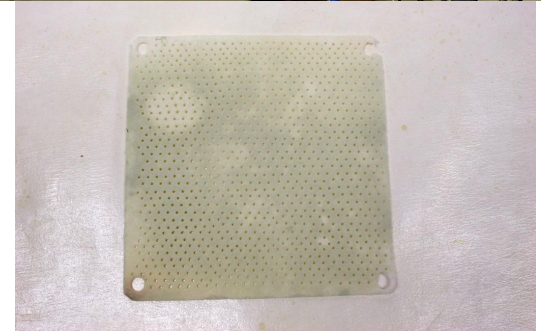
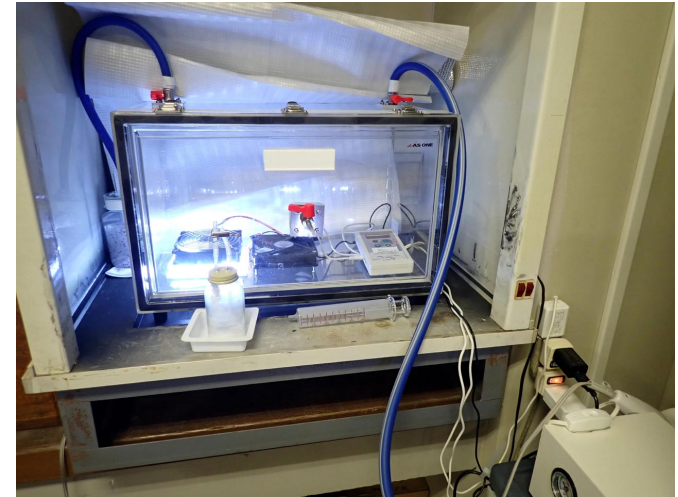
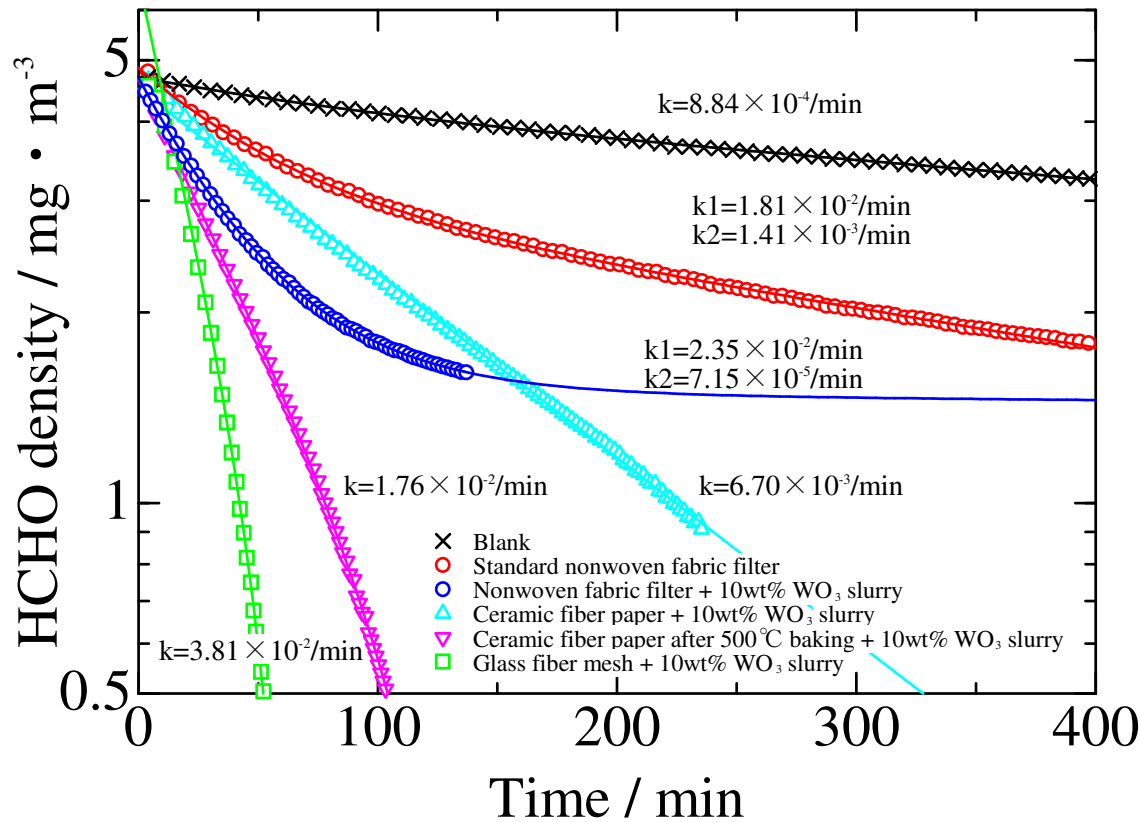
測定条件	Particle Size	上流側 粒子濃度	下流側 粒子濃度	透過率
	μ m	/m ³	/m ³	
目張り無しクリーンベンチ内	0.3~1	7.4E+06	2.7E+06	0.37
	1~5	5.1E+04	1.7E+04	0.34
	5~25	9.0E+02	1.8E+02	0.20
目張りしたクリーンベンチ内	0.3~1	1.2E+04	6.7E+03	0.54
	1~5	1.4E+02	1.8E+01	0.13
	5~25	2.0E+01	0.0E+00	0
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(1回目)	0.3~1	4.1E+08	4.6E+08	1.14
	1~5	1.2E+07	3.6E+06	0.30
	5~25	3.7E+06	2.1E+02	5.76E-05
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(2回目)	0.3~1	2.8E+08	2.5E+08	0.87
	1~5	2.6E+06	1.0E+06	0.40
	5~25	3.0E+05	1.8E+01	5.99E-05
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(3回目)	0.3~1	2.7E+08	2.7E+08	0.99
	1~5	2.0E+06	1.5E+06	0.76
	5~25	1.1E+05	5.3E+01	4.73E-04

キャッチしてゆっくり分解

一般に**5 μ m以上の液滴**を飛沫、それ以下の物をエアロゾルと呼んでいます。

1 μ m以下の液滴は計測可能な濃度を超過しており捕獲率が評価できませんでした。

ホルムアルデヒド分解実験



38L サイズのアクリルデシケーターを使用して、有機ガスの一種であるホルムアルデヒド(HCHO)濃度の変化をホルムアルデメータ htV-m を使用して測定した。

簡易な構造かつ低価格で、教育現場などでの自作による普及を検討しているひかりクリーナー標準機でも確実な分解性能が確認されると共に、さらに高濃度の光触媒と無機系の材料を使用したフィルターを用いた試作機は、市販の小型空気清浄機をはるかに凌ぐ性能を発揮した。現在、さらに高性能のフィルターが量産可能となっている。

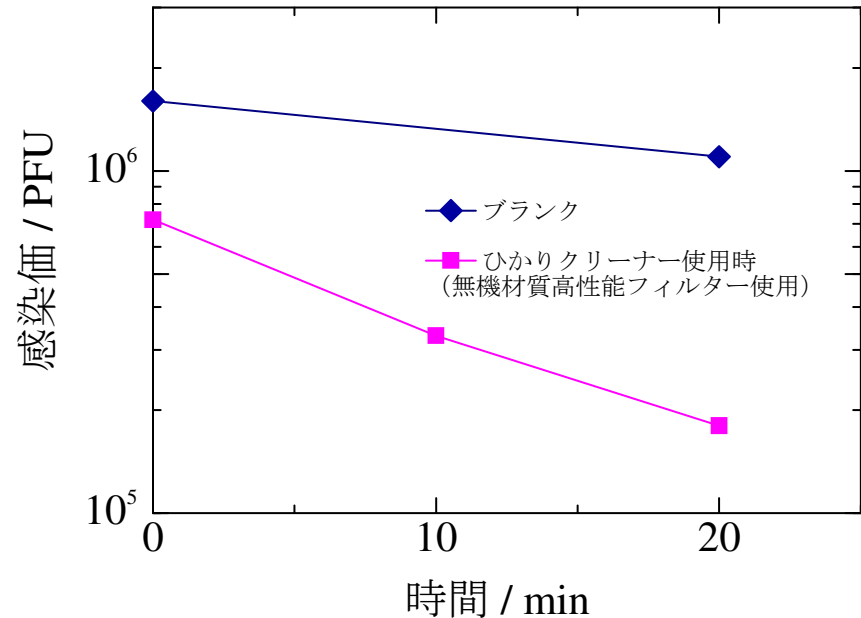
ひかりクリーナーによるエアロゾル中のウイルス除去

370 L のグローブボックス中でネブライザーを用いてバクテリオファージQ β を含む溶液を噴霧、ファンで攪拌しながら 10 L をゼラチンフィルターでサンプリングし、プラーク法に依り感染価を評価した。

その結果、ブランクでは 1.6×10^6 PFUであったのが 20分で 1.1×10^6 PFU となり、**30% 程度減少した**。一方無機材質高性能フィルターを使用したひかりクリーナーを使用することによりスタート時に 7.2×10^5 PFU であったのが 10分後には 3.3×10^5 PFU、20分後には 1.8×10^5 PFU と、**10分でおおよそ半分、20分で 1/4 に減少した**。

ただし、光触媒により不活化したかどうかは、光触媒を塗布していないフィルターも使用して比較を行う必要がある。

実環境は 370L のチャンバーよりもずっと体積が大きい、エアロゾルはガスなどと異なり気流が無ければ余り遠くまで拡散しない事が知られている。人と人の間に設置する事を考慮するとたとえば机の上の直径1mの半球の体積は 262 L 程度になり、現実的な実験と言える。



フィルターでキャッチすることは出来ない、長時間空中に浮遊するエアロゾルに含まれるウイルスも除去できることが示唆された。

東芝「ルネキャット」のSARS-CoV-2
に対する効果

Masashi Uema et al., "Effect of Photocatalyst under Visible Light Irradiation in SARS-CoV-2 Stability on an Abiotic Surface", Biocontrol Science, 26 (2021) 119-125.

査読付論文として公開されている

リスクの考え方

放射線に関しても同様ですが、一般公衆のリスクの捉え方は実態からかなり乖離している場合が多く、安全か危険かの、0 か 1 で考えている例が多く見られます。

しかしながら当然**絶対の安全も危険も存在せず、程度の問題に帰結します**。コロナウイルスの場合、個人から見ると感染するかしないかの 0 か 1 と言うこともできますが、社会全体で考えると**個々人がわずかでも感染するリスクを下げる**ことが重要です。小さいことの積み重ねでも、一人の感染者が何人の次の感染者を生み出すかという実効再生算数が少し下がるだけで系全体の感染者数の動向は大きく左右されるのです。

かといって、経済を全て止めて全員が隔離状態に置かれるというのもまた非現実的な話で、**リスクとベネフィットのバランス**を考える必要があります。放射線防護の世界では、**ALARAの原則**(as low as reasonably achievable)という考え方があります。何を持って**reasonable**なのかというのは人それぞれであり、社会全体として考える必要があります。**完全に感染リスクを0にする製品**というのは**絶対に存在し得ない**ですが、**経済を回しながら合理的にリスクを低減する**措置を積極的に進めていくべきだと考えます。そのためには何らかの指標で合理的に評価することが必要です。