

日本放射線安全管理学会第19回学術大会  
2020年12月9日（水）～12月11日（金）@Web開催

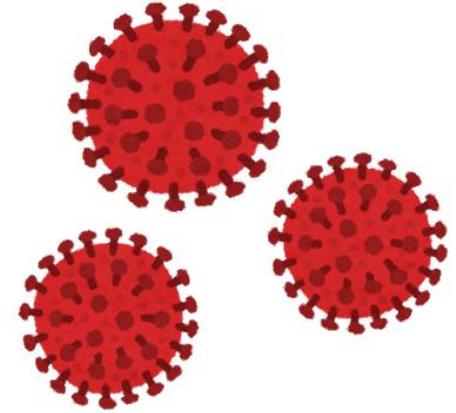
# N95マスクにおける 紫外線量の定量的評価

圓堂 寿敏, 秋吉 優史

大阪府立大学大学院工学研究科

# 研究背景

- 新型コロナウイルス感染症の世界的流行
- 様々な**感染リスク**を下げる必要
  - 密集・密閉・密接
- 医療機関に於けるN95マスクの供給不足
  - (現在は解消されている)



## N95マスクを再利用する手段

加熱・アルコールによる不活化処理



簡便な方法でない  
性能低下が報告されている

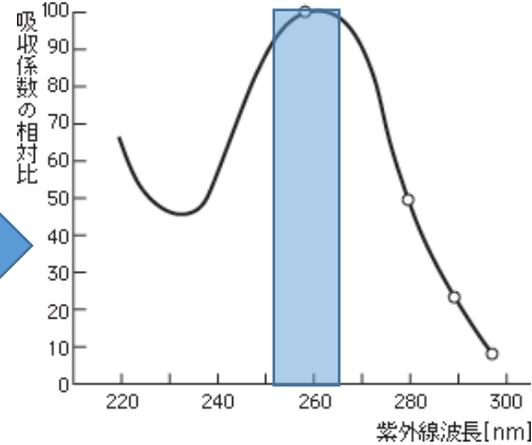
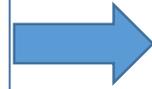
紫外線による不活化処理



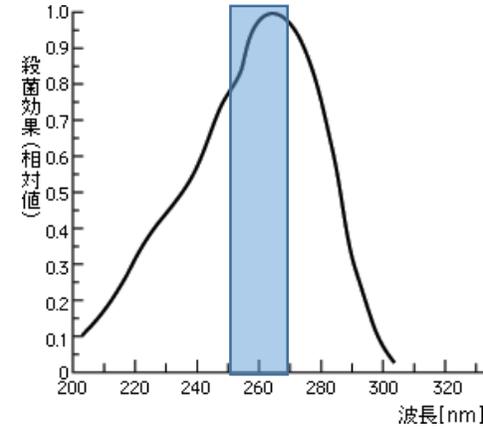
光源からの距離5cmだと5秒で  
不活化処理可能

# 紫外線のウイルスに対する波長依存性

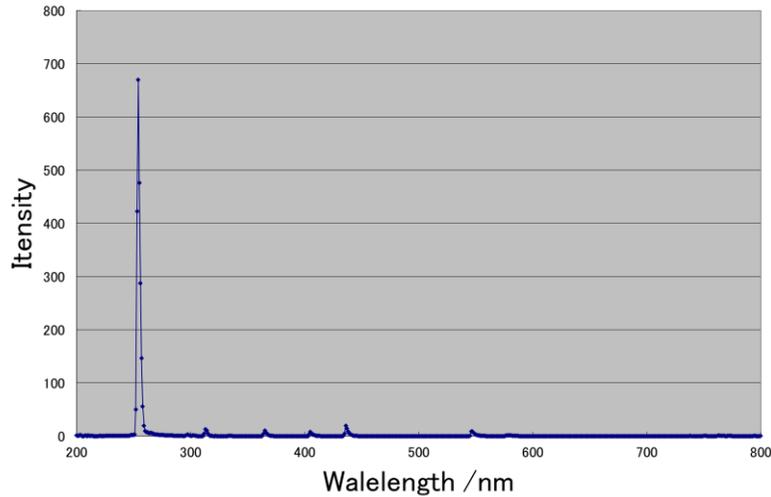
紫外線を細菌に照射すると細胞内のDNAに作用して光化学反応を引き起こされ、菌類が死滅すると考えられている。右図は菌に対してのグラフであり、大きさが異なるウイルスに対しての効果とは異なる。菌は細胞質などに紫外線が吸収されるが、ウイルスはその効果が小さく、左図のDNAの吸収特性に近いと考えられる。



DNAの吸収特性に対する紫外線の波長依存性



殺菌効果に対する紫外線の波長依存性



人工的に紫外線を発生させる低圧水銀ランプは254nmの光を効率よく発光している。

学名	99.9%不活化に必要な紫外線照射量[mJ/cm <sup>2</sup> ]
インフルエンザウイルス	6.6
大腸菌	5.4
枯草菌	21.6

紫外線は様々な菌に有効だが、必要な紫外線の照射量が異なる。

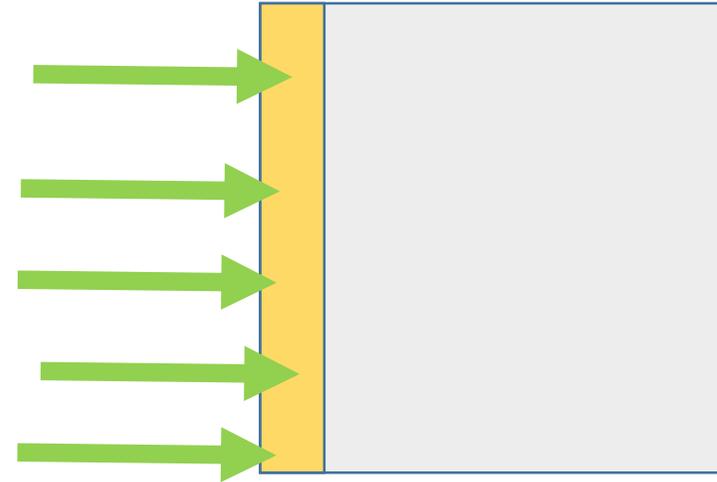
# 放射線と紫外線の吸収線量の違い

放射線



ガンマ線などの場合、透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。ほとんどの光子が素通りするため、単位質量当たりの吸収されるエネルギー[J/kg=Gy]と考える。

紫外線



紫外線の場合、表面のごく近傍（UV-Cでは数10 $\mu\text{m}$ 程度）で全エネルギーが吸収される。そのため、微小体積への吸収エネルギーを考えることは困難であるため、単位面積へのエネルギー量[mJ/cm<sup>2</sup>]と考える。

# 紫外線の吸収線量

紫外線を放射線と同様の考え方で物質の浅い部分で吸収されたエネルギー量を考える。

密度 $1\text{g/cm}^3$ の物質 $20\mu\text{m}$ の厚さで均一に吸収されたとすと、 $1\text{cm}^2$ あたりの質量は $20 \times 10^{-4}\text{g}$ で、積算照度を $10\text{ mJ/cm}^2$ とすると、吸収線量は

$$10 \times 10^{-4} / 20 \times 10^{-7} = 5\text{kGy}$$

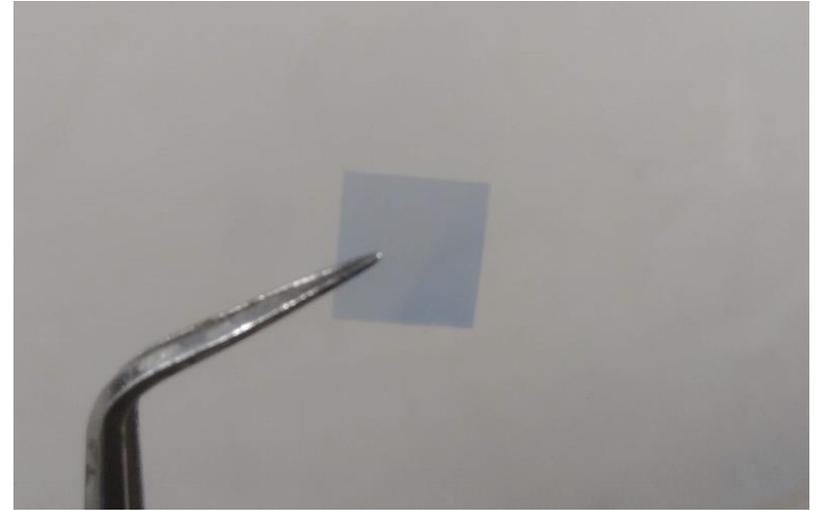
と求まり、高い線量に相当する。

# 紫外線の透過率



従来の紫外線の測定方法  
紫外線照度計・化学線量計

表面の測定をすることは可能だが、内部までの測定は不可能である。  
紫外線照度計は検出器に垂直に光が入射する必要があり、斜めから入射した光は適切に評価できない。

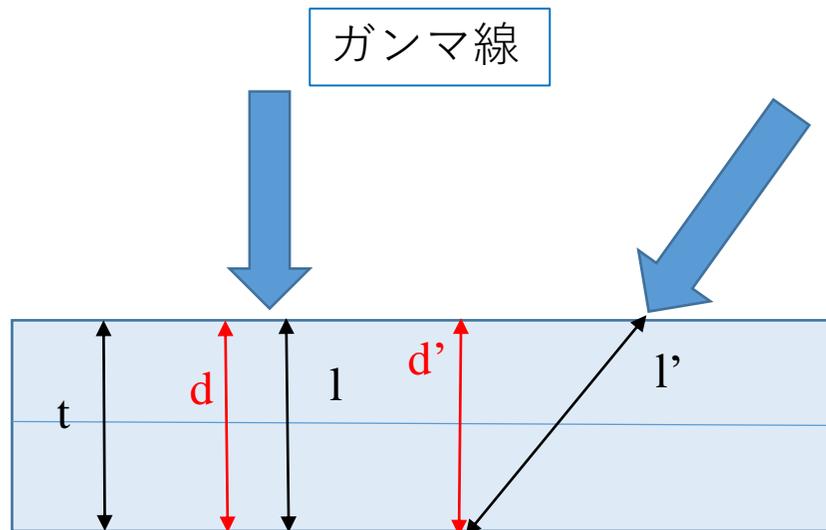


新しい紫外線の測定方法  
ラジオクロミック線量計

吸収したエネルギーによって色が変わり、その吸光度を読み取ることによって、吸収線量を評価する。  
薄いため、内部に設置可能である。  
どの角度からの光も測定可能である。

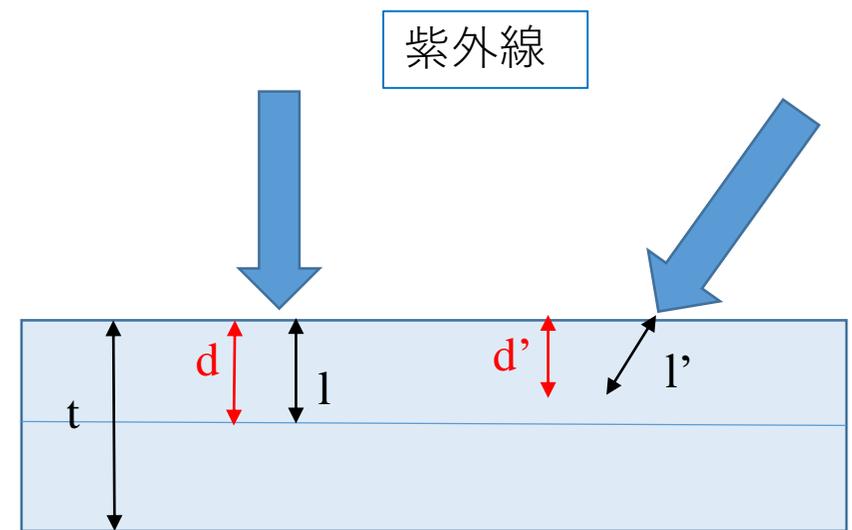
# ラジオクロミックフィルムにおける 垂直入射、斜め入射について

垂直に入射した場合、エネルギーを落とす距離を $l$ 、斜め入射した場合のエネルギーを落とす距離を $l'$ とし、その際の深さを $d, d'$ とする。フィルムの厚さを $t$ とする。



$$l < l', d = d'$$
$$t = d, d'$$

強透過性の $\gamma$ 線の場合、斜め入射は垂直入射に比べて、エネルギーが到達する深さは等しいがエネルギーを落とす距離が変化するため、適切に評価できない。



$$l = l', d > d'$$
$$t > d, d'$$

透過力の小さい紫外線の場合、斜め入射は垂直入射に比べてエネルギーを落とす距離は変化しない。エネルギーが到達する深さは異なるが、全体の厚さと比較すると小さいため、斜め入射も評価することが可能である。

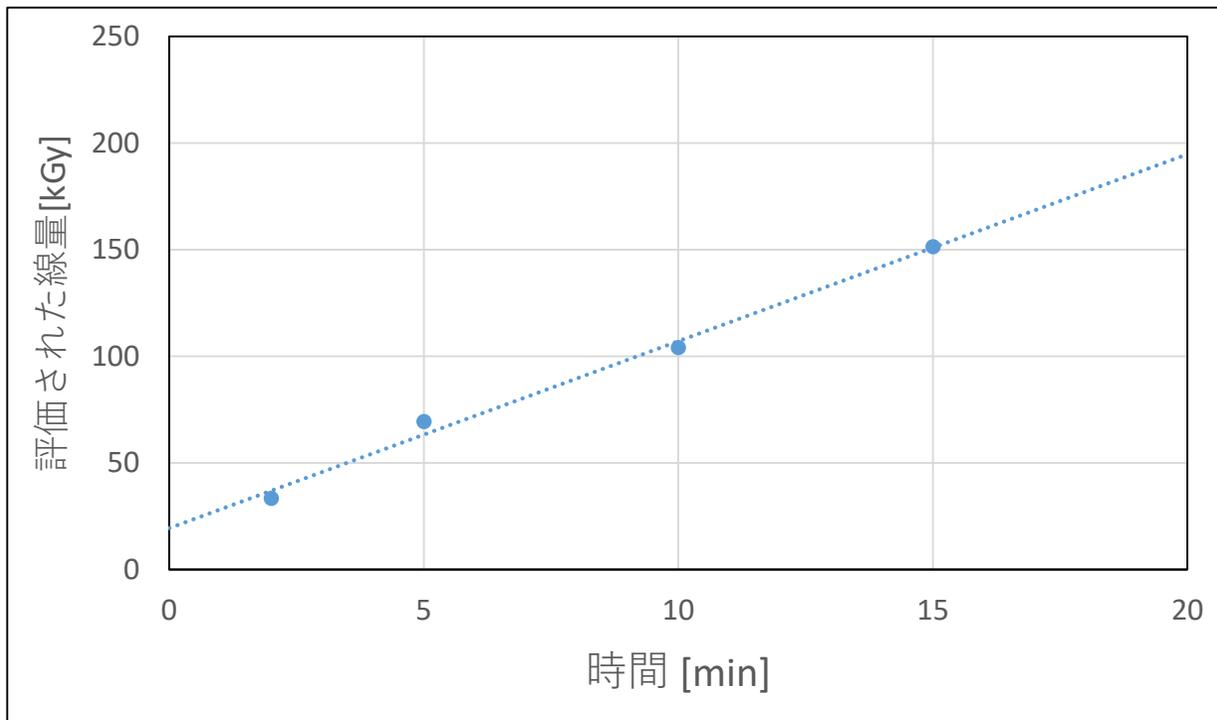
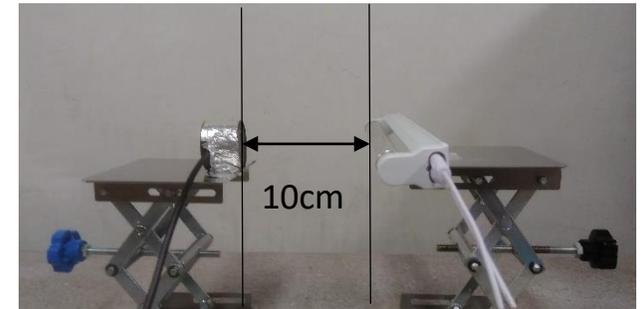
# 本研究の目的

- ラジオクロミック線量計を用いて紫外線線量の評価を試みる。  
（実際の吸収線量とは異なるが、換算値としてこの値を読む。）
- N95マスクにおけるUV-C透過率を測定することによって、紫外線殺菌がN95マスクに使用可能か判断する。特に超高性能フィルターがある2層目の透過率に注目する。

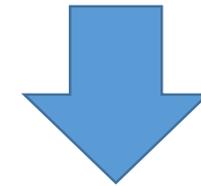


# ラジオクロミックフィルムの時間依存性

UV-C光源とラジオクロミック線量計の位置を10cmで固定し、時間変化とともにラジオクロミック線量計を評価した。  
同条件で紫外線照度計の値は $0.87 \text{ mW/cm}^2$ であった。



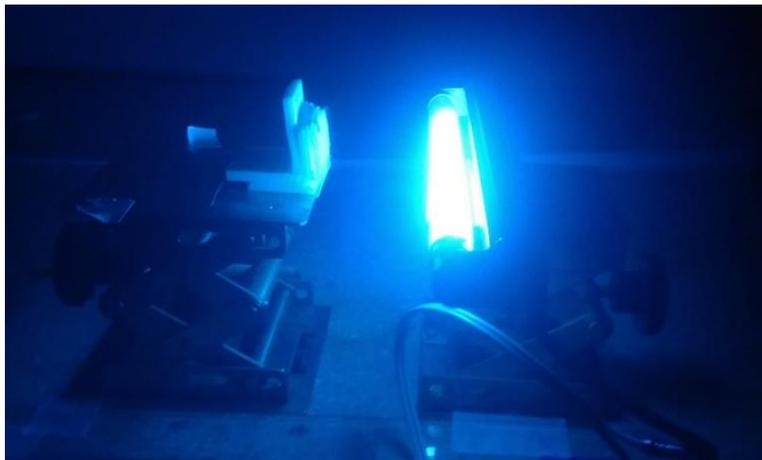
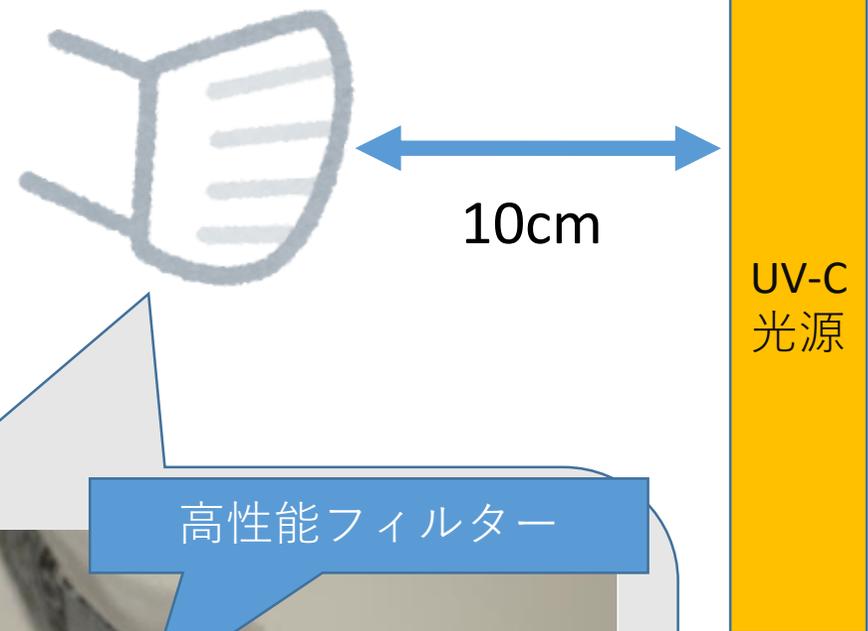
評価された線量は時間変化とともに直線的に変化している。



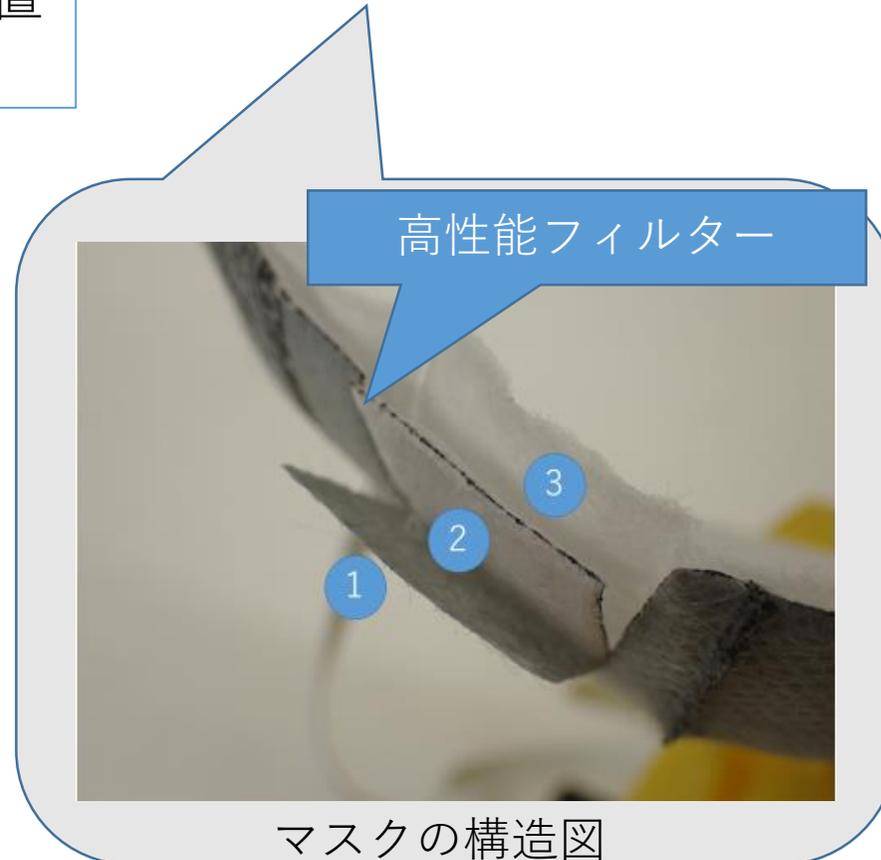
ラジオクロミック線量計は紫外線線量計としても使用可能である。

# 実験のセットアップ

殺菌灯：NEC社製GL-6  
照射時間：180秒  
光源からの距離：10cm  
各マスクの表面、2層目の前後に  
ラジオクロミックフィルムを設置  
計3回照射、平均値を算出



照射の様子



マスクの構造図

# 結果（線量）

	マスクの種類	位置	評価された線量[kGy]	評価された線量率[kGy/s]	1層目透過率	2層目透過率
 N95 (白)	N95 (白)	表面	94.96	0.528	0%	0%
		1層目	9.12	0.051		
		2層目	9.10	0.051		
 N95 (活性炭)	N95 (活性炭)	表面	92.44	0.514	32%	0%
		1層目	29.80	0.166		
		2層目	9.10	0.051		
 N95 (網目)	N95 (網目)	表面	104.05	0.578	96%	18%
		1層目	99.83	0.550		
		2層目	18.89	0.100		
 KN95	KN95	表面	93.65	0.520	80%	34%
		1層目	74.65	0.415		
		2層目	32.07	0.178		

マスク表面の値を基準とし、1層目、2層目の積算線量の比を求めることにより透過率を算出した。（紫外線を評価しているため、実際の吸収線量とは意味が異なる。換算値として評価している。）  
マスクの種類によって透過率にばらつきが確認された。

# 結果（透過率）

N95（白）に関しては1層目から透過していないため、照射時間を延ばして追加検証を行った。

種類	照射時間[s]	位置	評価された線量[kGy]	評価された線量率[kGy/s]
N95（白）	180	2層目	9.12	0.051
	300	2層目	9.26	0.051

照射時間を延ばすと、評価された線量は微量に増加したが、評価された線量率に変化は見られなかった。この結果より、照射時間に依存せず、UV-Cが透過しないマスクもあることが明らかになった。

# 評価された線量[kGy]と積算照度[mJ/cm<sup>2</sup>]の相関

ラジオクロミック線量計で評価された線量と紫外線の積算照度の関係を評価するために紫外線照度計、ラジオクロミック線量計の距離依存性を評価した。

上図に示すようにUV-Cランプ1本の線光源として相関を評価したが、ラジオクロミックフィルムのオフセットが紫外線照度計のオフセットより大きくなる問題が生じた。

下図に示すようにアパーチャーを設置し、平行光線を得られるようにし、再度実験を行った。オフセットは小さくなったが、距離が延びるにつれて紫外線照度計とラジオクロミック線量計の測定値の比が大きくなる問題が生じた。

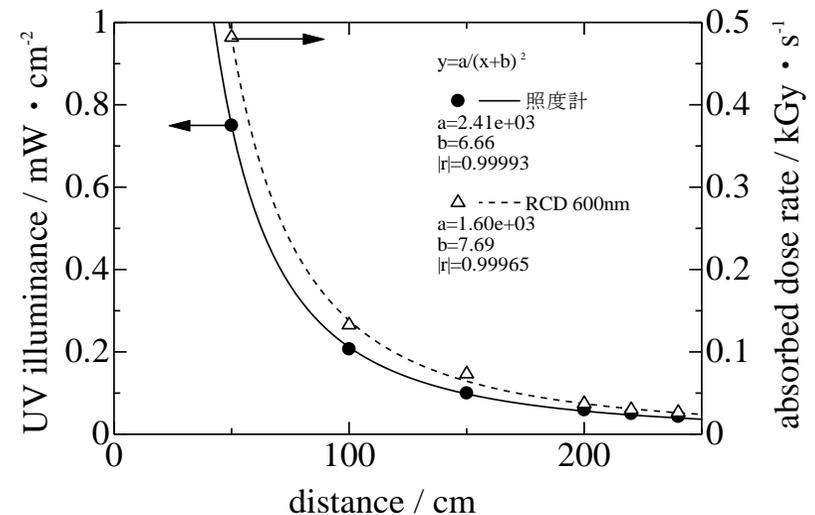


# 評価された線量[kGy]と積算照度[mJ/cm<sup>2</sup>]の相関

次にUV-Cランプを重ね面光源を作りオフセットを無視できる条件を作成した。十分に遠い地点において、ラジオクロミック線量計の測定レンジ低線量600nmに収まるよう実験を行った。



UV-C照度計測定		ラジオクロミックフィルム(600nm)			
cm	mW/cm <sup>2</sup>	cm	kGy/s	ratio	average
50	0.750	50	0.4820	1.56	1.56
100	0.207	100	0.1328	1.56	
150	0.100	150	0.0733	1.36	
200	0.059	200	0.0372	1.59	
220	0.050	220	0.0299	1.67	
240	0.043	240	0.0265	1.62	



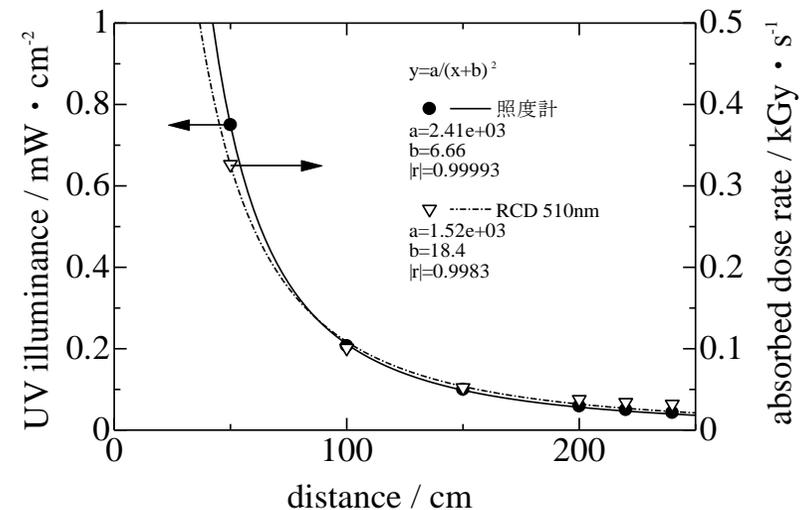
ratioは紫外線照度計の測定値[mW/cm<sup>2</sup>]とラジオクロミック線量計で評価された線量[kGy/s]の比を示している。600nmにおいては紫外線照度計と近い曲線が得られた。

# 評価された線量[kGy]と積算照度[mJ/cm<sup>2</sup>]の相関

低線量600nmに引き続き十分遠い地点において、ラジオクロミック線量計の測定レンジ高線量510nmに収まるよう再度実験を行った。



UV-C照度計測定		ラジオクロミックフィルム(510nm)			
cm	mW/cm <sup>2</sup>	cm	kGy/s	ratio	average
50	0.750	50	0.3263	2.30	1.78
100	0.207	100	0.1007	2.05	
150	0.100	150	0.0521	1.92	
200	0.059	200	0.0376	1.57	
220	0.050	220	0.0340	1.47	
240	0.043	240	0.0318	1.35	



510nmにおいて低線量率でのズレが大きいことが確認された。測定レンジ600nmと510nmを比較すると、ラジオクロミック線量計の測定レンジに波長依存性があることが考えられる。

面光源の結果より、ラジオクロミック線量計で評価された線量[kGy/s]と紫外線照度計の測定結果[mW/cm<sup>2</sup>]の比を1.6だと仮定すると、吸収線量I[kGy]と紫外線の積算照度D[mJ/cm<sup>2</sup>]の間からD=1.6 Iという簡単な校正式を導くことが可能である。

実際にN95マスクを再利用するために必要な照射時間は何秒かKN95を例にして検証してみる。インフルエンザウイルスにおいて99.9%不活化を行うのに必要なUV-C積算照度が6.6mJ/cm<sup>2</sup>必要である<sup>[1]</sup>。KN95において表面の線量率が0.52 kGy/sより0.83 mJ/cm<sup>2</sup>であるため、約8秒で表面の不活化が可能である。2層目の透過率が34%であるため、約24秒で2層目までの不活化が可能であると試算された。

[1] Mizuki Kojima et al., “Irradiation by a Combination of Different Peak-Wavelength Ultraviolet-Light Emitting Diodes Enhances the Inactivation of Influenza A Viruses” (2020)

本研究の目的であるラジオクロミック線量計を用いて紫外線線量の評価を行うこと可能であった。結果より医療用に用いられる球形状のマスクではUV-Cがほとんど透過しないマスクもあることが分かった。これによりUV-C照射がN95マスクに適応できない場合があることが明らかになった。また、ラジオクロミックフィルムを用いて立体形状の物体表面への積算照度を実験的に評価可能になると考えられる。

## 今後の課題

ラジオクロミック線量計で評価された線量と積算照度の関係をより定量的に評価する必要がある。