

照明学会 第55回全国大会  
2022年9月21日 (オンライン) 8-0-03

# フィルム状の化学線量計を用いた 紫外線放射照度評価

○秋吉 優史<sup>1) 2)</sup>、岡本陽太<sup>3)</sup>

1) 大阪公大 工学研究科、2) 大阪公大 国際感染症研究センター、  
3) 大阪府大 工学研究科

E-Mail: [akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp](mailto:akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp)  
<http://anticovid19.starfree.jp/>



# 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/cm<sup>2</sup>



10秒即効 99.9%細菌消滅  
(距離の記載無し) →  
5cm で 0.03 mW/cm<sup>2</sup>

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。

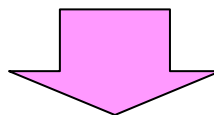
この当時は紫外分光放射照度計がなかったため分光照度は不明。

# 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。

# 紫外線照度評価上の更なる問題点

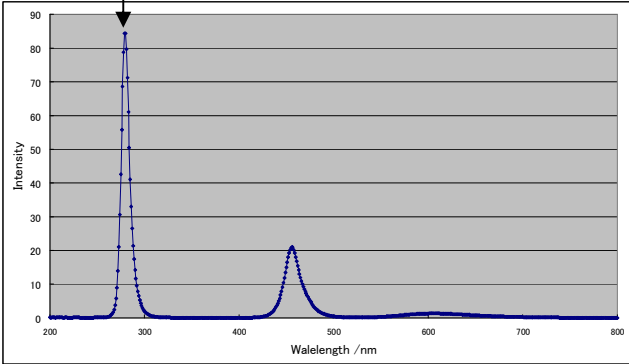
- ・以前は UV-C 光源として殺菌灯(低圧水銀ランプ)しか存在せず、水銀励起に伴う輝線であるため製品間のスペクトルの差異はなかったが、現在は UV-C LED やエキシマランプなど、様々な光源が存在しており、それぞれの製品によって波長、半値幅などのスペクトル特性が異なる。このため、デジタルで単一の数値を表示する紫外放射照度計ではその光源の特性を評価することが出来ない(フラットな感度特性は現時点では実現不可能)。
- ・様々な感染症対策機器では、狭い機器内に光源を仕込み至近距離で照射を行う。この場合どうしても光源から斜めに入射したり反射して入射する成分が生じるため、斜入射特性の悪い検出器では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

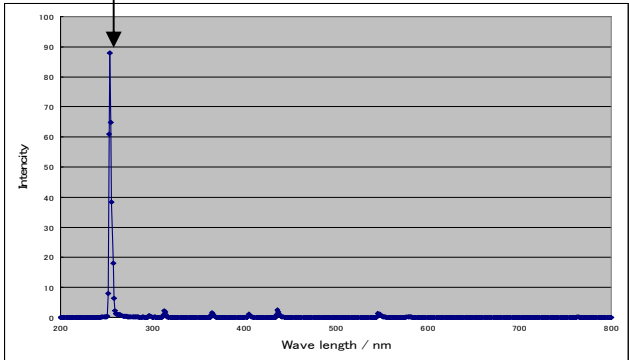


以前はUV-C光源として低圧水銀ランプについてのみ考えれば良かったが、近年260nm程度までの波長のLED光源が販売されるようになった。しかし、多くの製品で使用されている280nmでは不活化の効果は254nmの場合の1/10程度であり、紫外分光放射照度計での測定と波長毎の効果の評価が必要。

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



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、

$$\Sigma (\text{各波長毎の照度} \times \text{不活化効果相対値})$$

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。

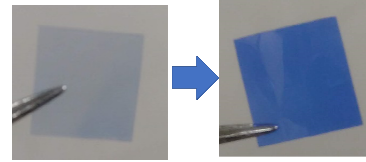
菌に対しては、JIS Z8811 (1968) で既に与えられている (G-ワットという名称) が、ウイルスに対しては与えられていない。今後、モノクロメーターを用いて取りだした単波長に近い光を用いた不活化効果の評価が必要。

→光源の問題

← 紫外分光放射照度計 USHIO USR45 で測定

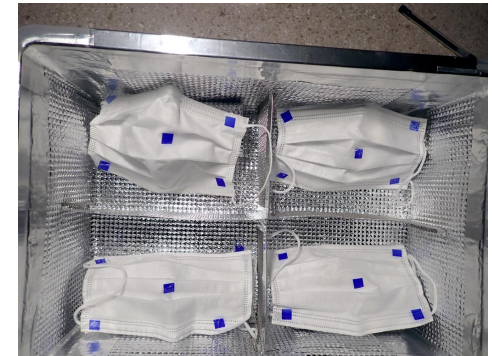
# 化学線量計の活用

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。



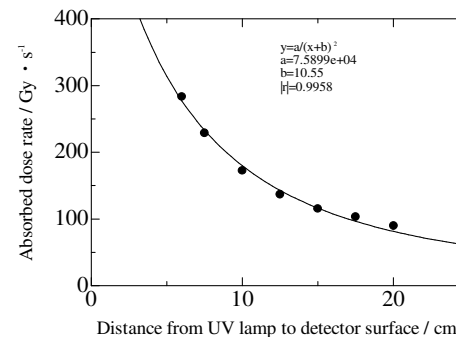
ラジオクロミック線量計:

$\gamma$ 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 $600\text{nm}$ 及び $510\text{nm}$ 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。

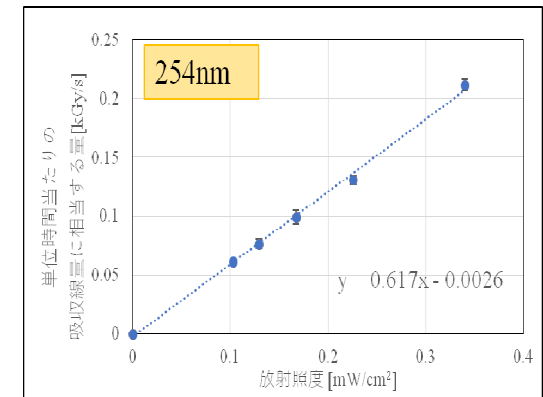


紫外放射照度計と、ラジオクロミックフィルムにより評価された吸収線量率の距離依存性の相関から、吸収線量  $I$  (kGy) と、紫外線の積算照度  $D$  ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) の間で  $D = 1.62 I$  と言う簡単な校正式を導いた。透過試験から、 $45\mu\text{m}$ フィルム内で完全にUV-Cは吸収されており、 $16.2\mu\text{m}$ までの範囲で均等に吸収されたとするとこの校正式が説明出来る。

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。

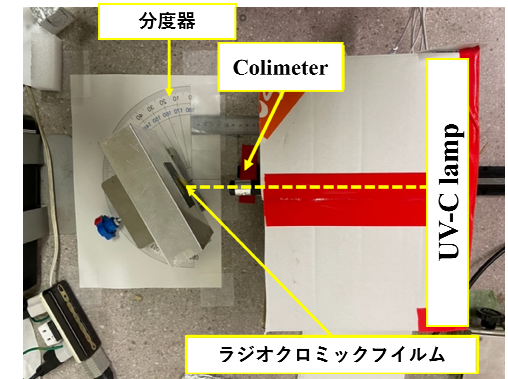
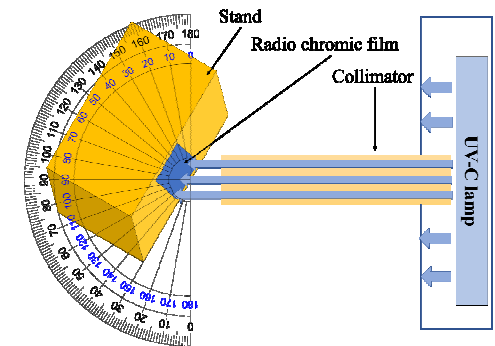
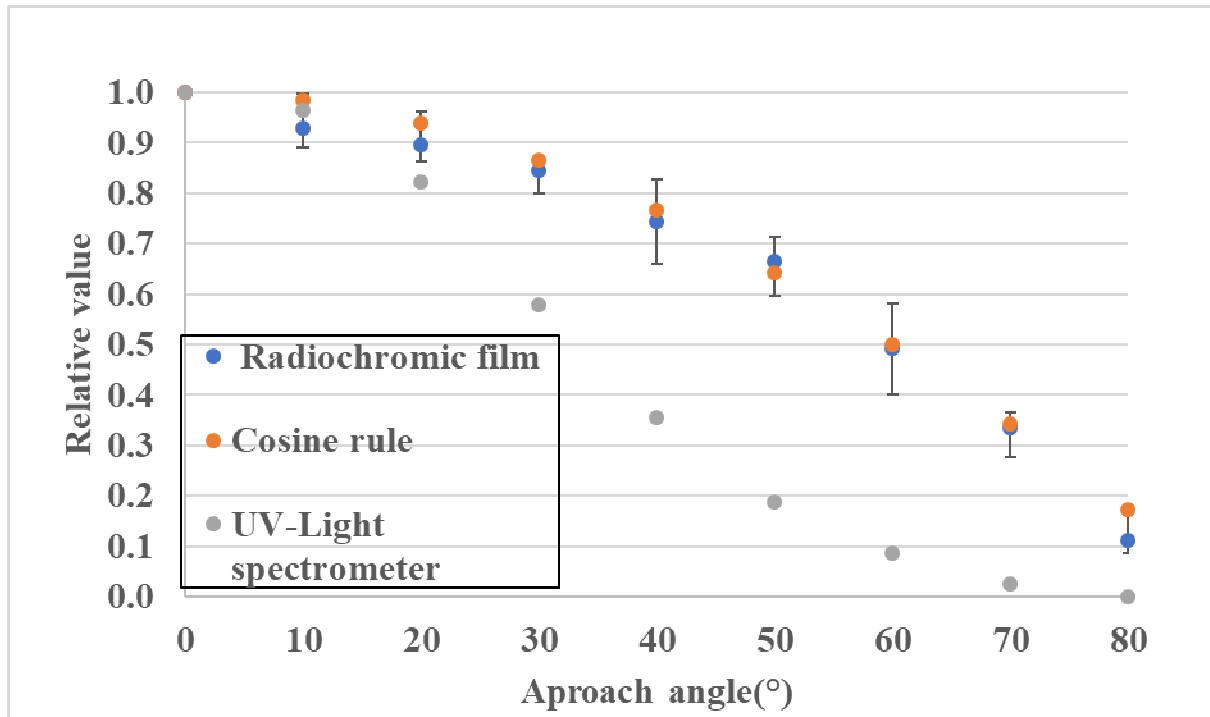


放射照度の増加に伴う吸収線量率として評価された値の線系的な増加。

# ラジオクロミック線量計の斜入射特性

ラジオクロミックフィルム(東洋メディック FWT-60-00)にコリメートした低圧水銀ランプ(GL-6)からの254nm紫外線(照度0.20~0.23mW/cm<sup>2</sup>、積算照度20~23mJ/cm<sup>2</sup>)を、0°(垂直入射)~80°まで10°おきに角度を付けて入射し、斜入射特性を評価した(n=3)。専用のリーダー(FWT-92D)により600nmにおける吸光度を読み取り、各種補正を行う計算式にフィルム厚さ43.5μmとして吸光度を入力し、吸収線量を評価した。各角度に於ける評価値を垂直入射の場合の相対値としてプロットした。

ただし、この吸収線量はフィルム全体が一様に着色することを前提としているため正しくなく、吸光度測定などから適切な厚さを設定する必要がある。



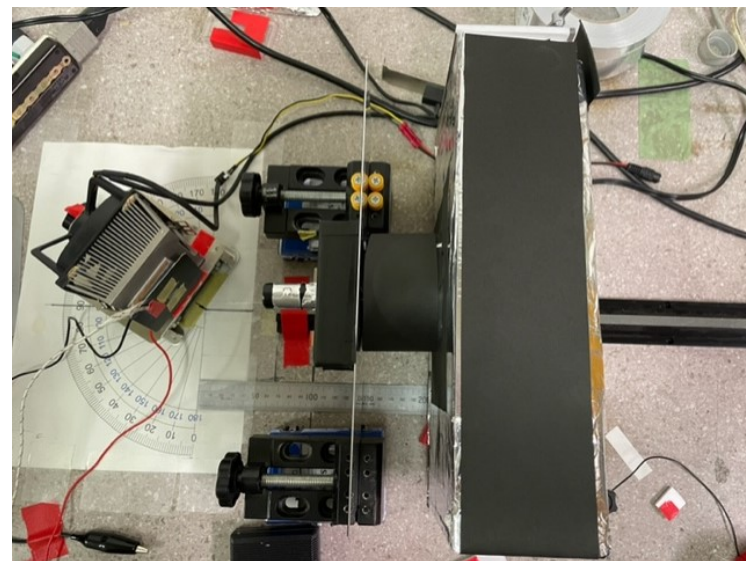
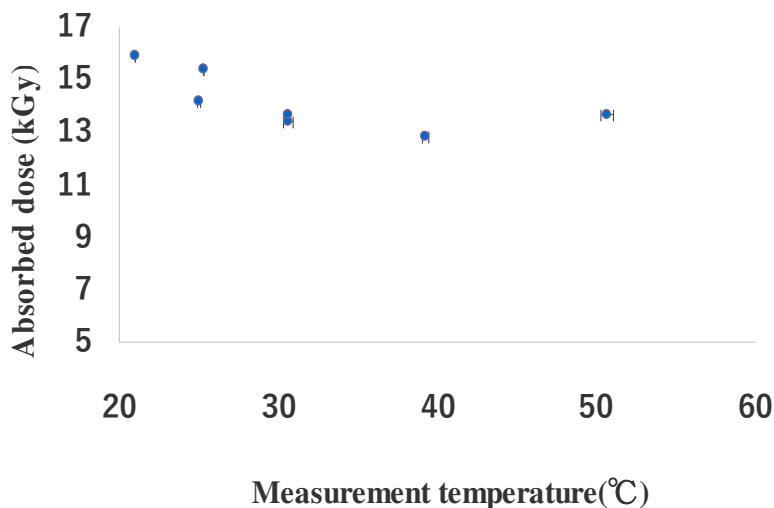


# ラジオクロミック線量計照射時温度依存性

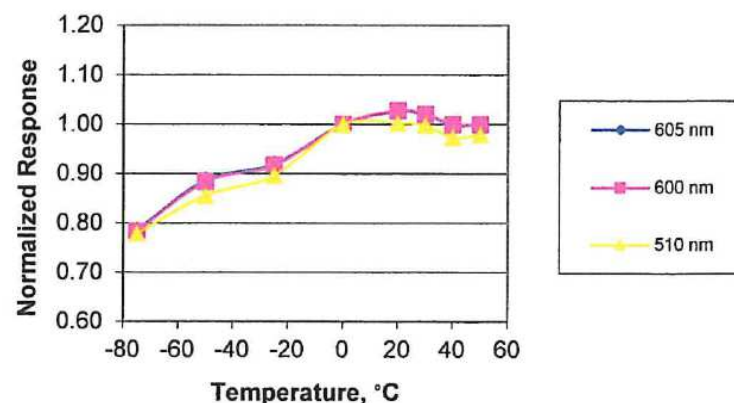
ヒートシンクに装着したペルチェ素子に黒色アルミ板を熱伝導接着剤により固定し、吸熱、発熱共に可能な変温照射ステージを作成した。

このステージを使用して、照射時温度を変化させた場合のラジオクロミック線量計の感度変化を評価した。

紫外放射照度計で測定した照度:  $0.223\text{mW}/\text{cm}^2$ ,  
100sec 照射で積算照度  $22.3\text{mJ}/\text{cm}^2$   
→ 254nm における換算係数を使用すると13.8kGy  
(換算係数自体室温(25°C)付近で評価)



Temperature Dependence

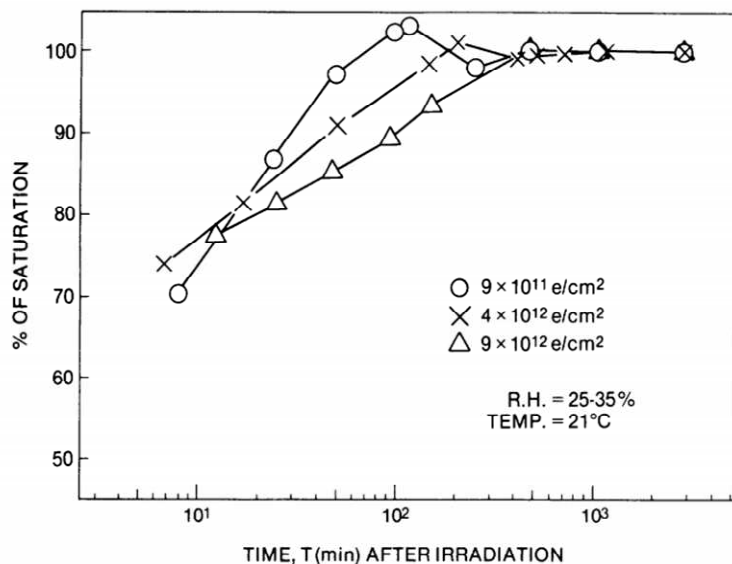


メーカー出荷時のカタログシート記載の、放射線照射時のラジオクロミック線量計感度温度依存性

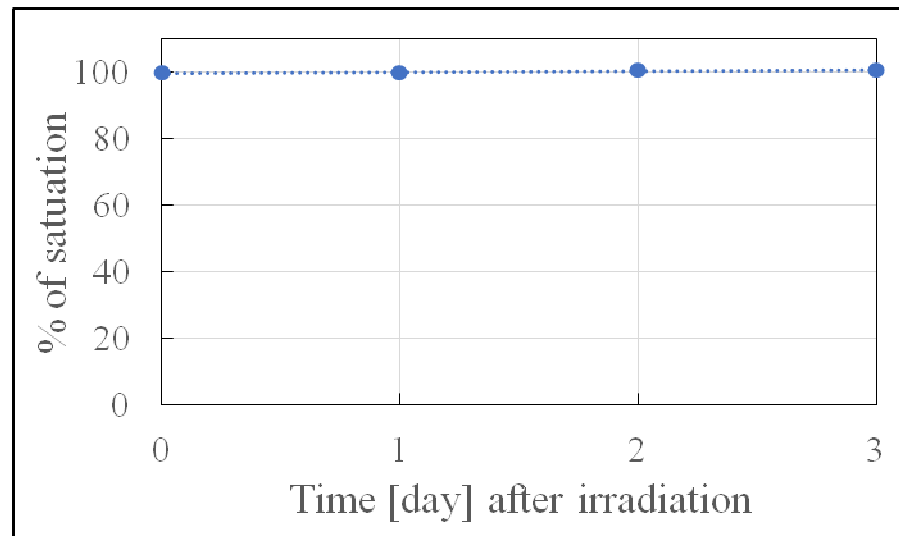
# ラジオクロミックフィルムのフェーディング挙動

JIS Z 4575 では、ラジオクロミック線量計において、電子線やガンマ線では照射後化学反応が進み吸光度が安定するまで十分な時間を要することが報告されている。そのため、紫外線照射後吸光度が安定するまでの時間経過を測定した。

※電子線



紫外線

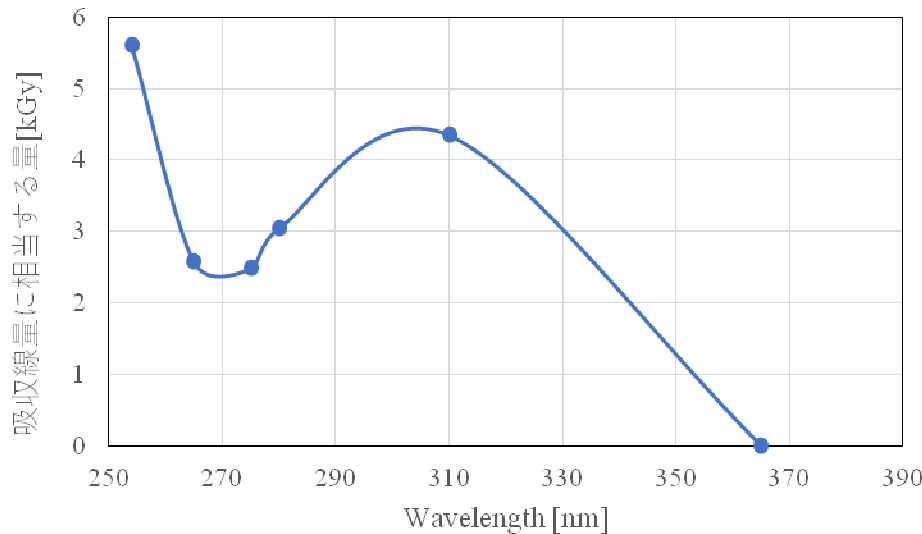


紫外線では照射後すぐに安定することが明らかになった。これは紫外線と電子線、ガンマ線によって生じる化学反応の違いを反映していると考えられる。

# ラジオクロミック線量計感度の波長依存性

様々な波長の紫外光源に対し、紫外放射分光照度計(大塚電子 IL100)により測定した分光照度スペクトルから、(ピーク値の1/100までの照度となる波長範囲を積分して、各光源の照度と定義した。

光源名	波長[nm]	傾き
GL-6	254	$6.2 \times 10^{-1}$
中国製低圧水銀ランプ	254	$5.6 \times 10^{-1}$
KLARAN	265	$2.6 \times 10^{-1}$
スタンレー電気	265	$2.8 \times 10^{-1}$
seoulviosys	275	$2.5 \times 10^{-1}$
VEEAPE	280	$3.0 \times 10^{-1}$
日亜UVB	310	$4.3 \times 10^{-1}$
日亜UVA	365	$0.5 \times 10^{-4}$
サンスターUVA	365	$0.2 \times 10^{-4}$



各波長に於いて検量線を取得し、その検量線に  $10 \text{ mJ/cm}^2$  を付与した場合の評価された吸収線量に相当する量[kGy]を評価した。

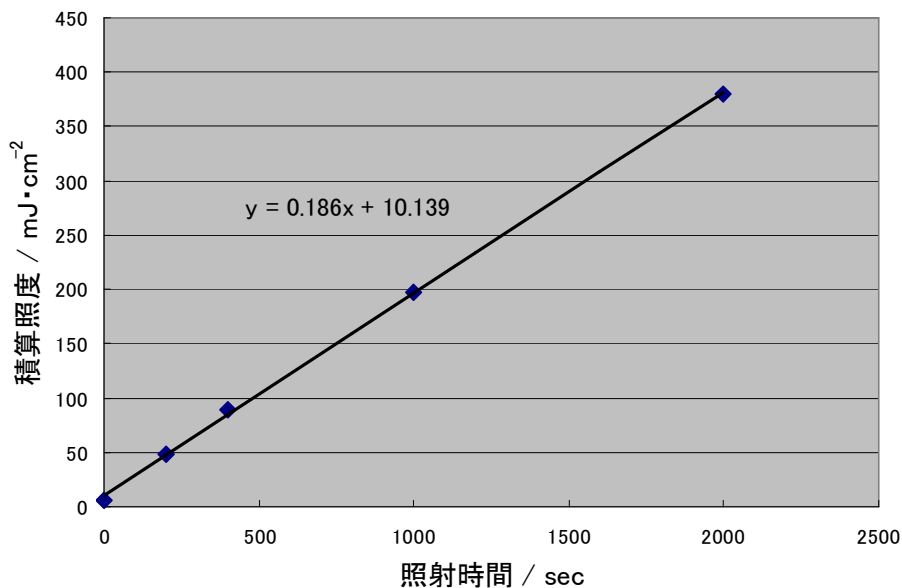


ラジオクロミック線量計は波長によって感度が異なることが明らかになった。

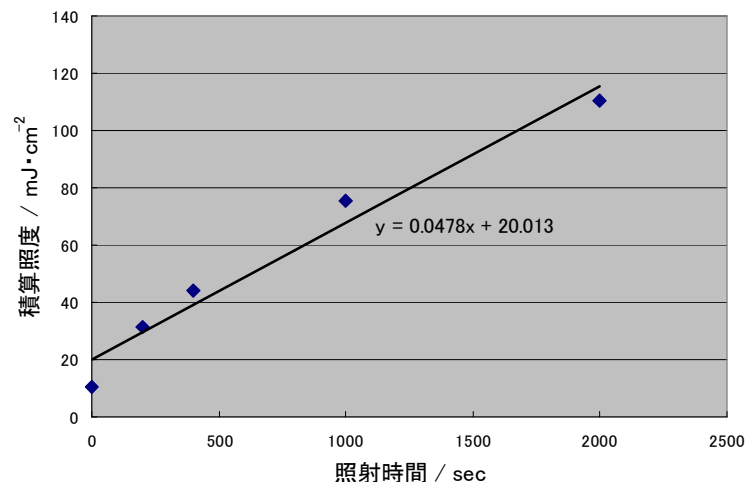
# UVスケールの活用

富士フィルムから提供されている紫外線測定用の感光紙、UVスケールを用いた定量評価を行った。低圧水銀ランプ(GL-6)からの254nm紫外線をコリメートして、平行光を入射。紫外放射照度計(ケニスSDカード式紫外線強度計 YK-37UVSD)の測定では照射位置に於ける照度は  $0.23\text{mW}/\text{cm}^2$  でUVスケールLに200, 400, 1000, 2000秒照射した。

専用のスキャナーと、解析ソフトとキャリブレーションシートを組み合わせた解析システムFUD-7010J Ver 1.3 を使用して、矩形領域の平均値として定量評価を行った。

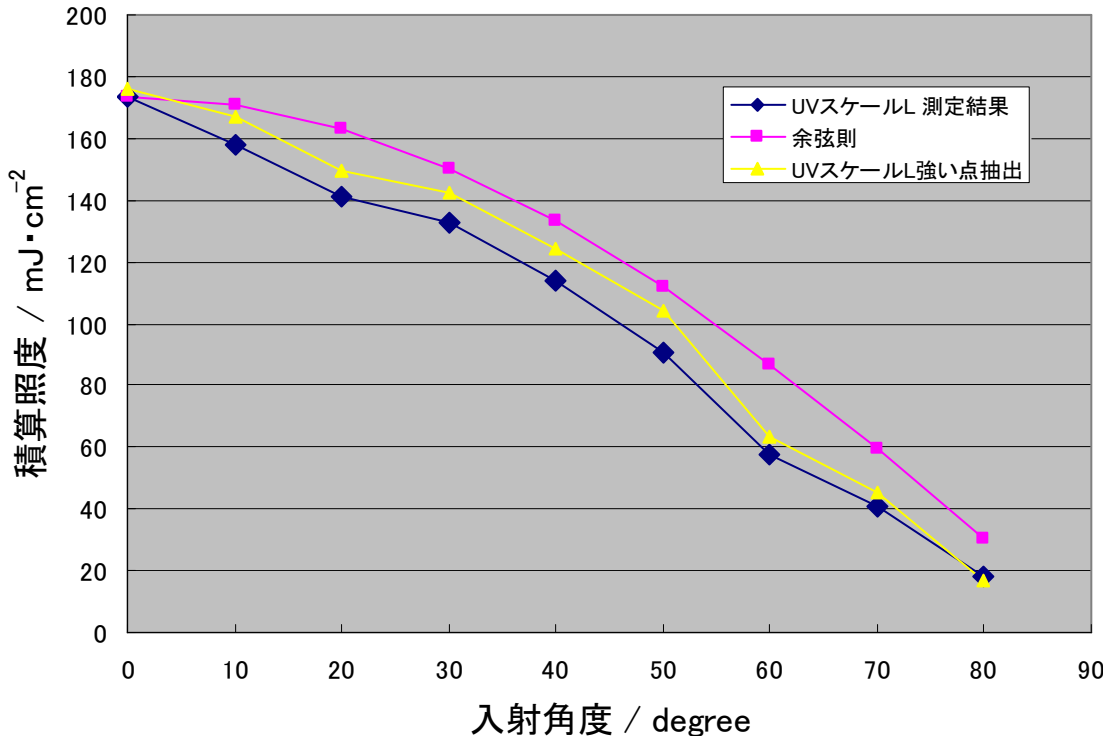


FUD-7010Jを使用せず、製品添付の発色標準チャートとUVスケールを同時に普通のスキャナで取り込み、グレースケール化、標準色見本の彩度評価による検量線作成で定量化を試みたが、標準色見本がグラビア印刷であるためか実際の積算照度と大きく異なる結果となった。



# UVスケールの斜入射特性

ラジオクロミック線量計に対する斜入射特性評価時と同様に、低圧水銀ランプ(GL-6)からの254nm紫外線をコリメートして、平行光を照射。試料を貼付けるアルミ台の角度を0~80°で変化させた。垂直入射での紫外放射照度計(YK-37UVSD)の測定値と照射時間の積は179.4mJ/cm<sup>2</sup>。UVスケールLを使用。



斜入射であるため、より光源に近い側が強く評価され、中心近傍の評価値はやや弱く出た。今後光源との距離を離して距離による影響を小さくして評価する必要性がある。

