

吸収線量の概念を用いた 紫外線量の評価

○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

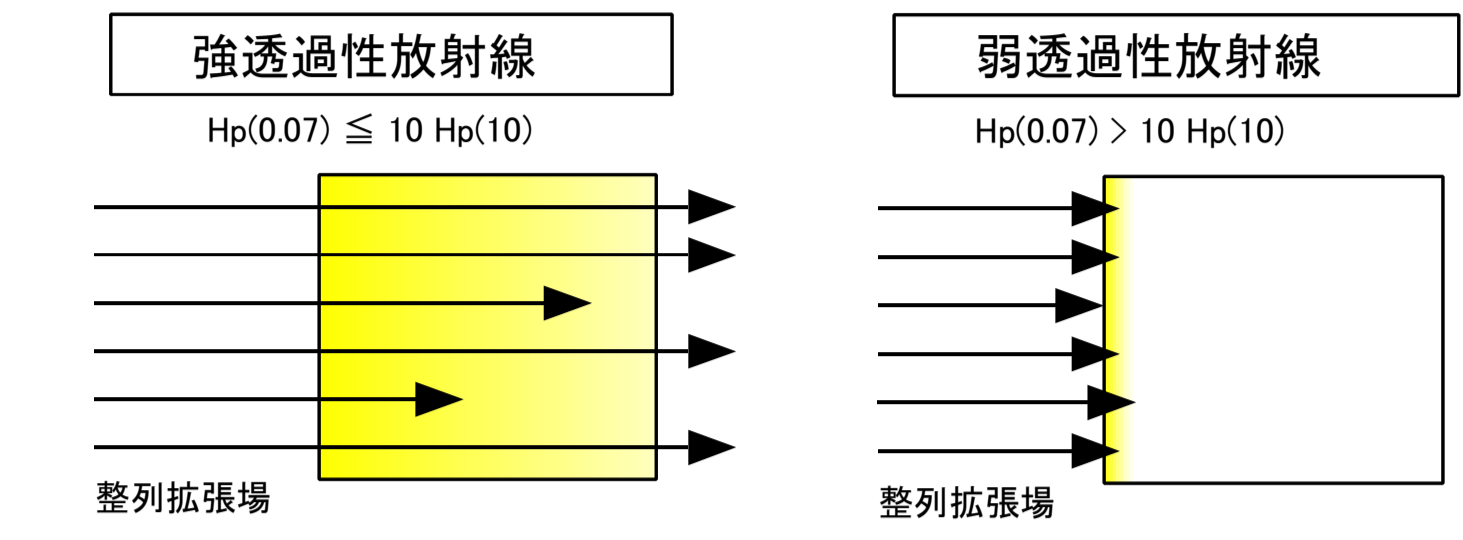
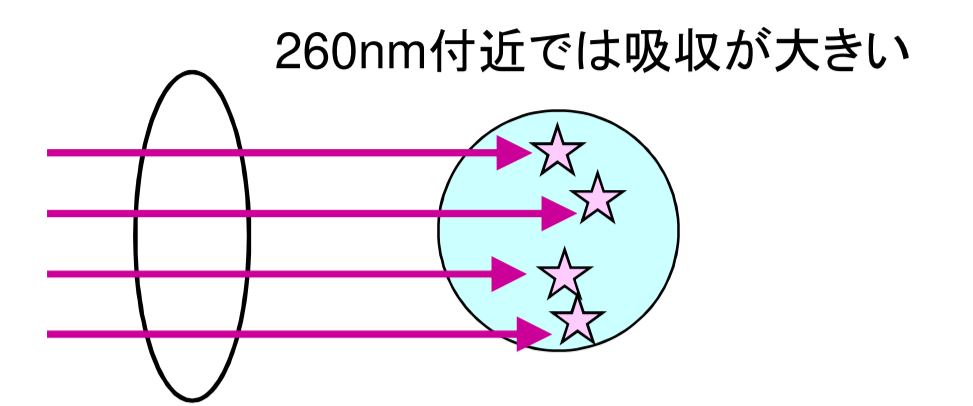
E-Mail: akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp
http://anticovid19.starfree.jp/



吸収線量とは

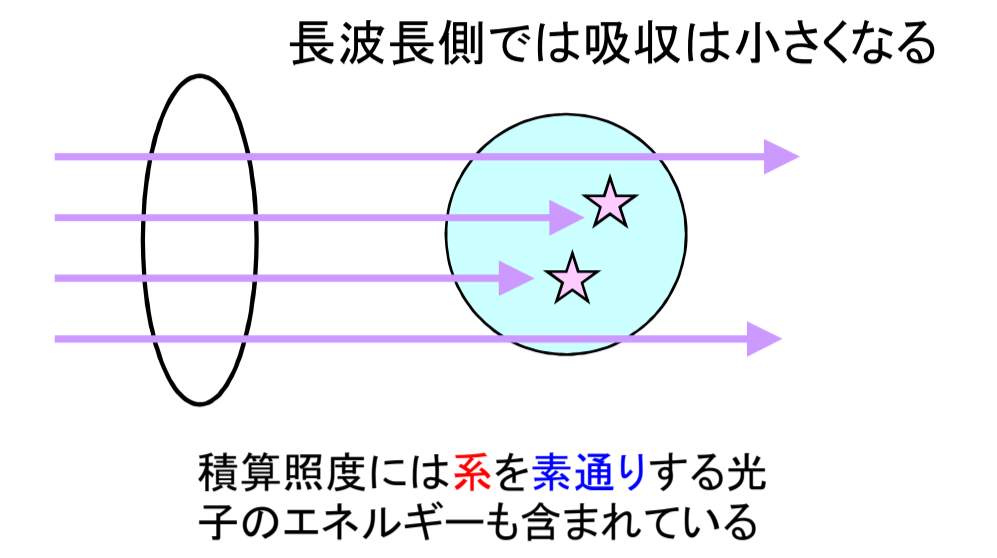
$$\text{吸収線量 (Gy)} = \frac{\text{吸収された放射線のエネルギー (J)}}{\text{対象とする系の質量 (kg)}}$$

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。



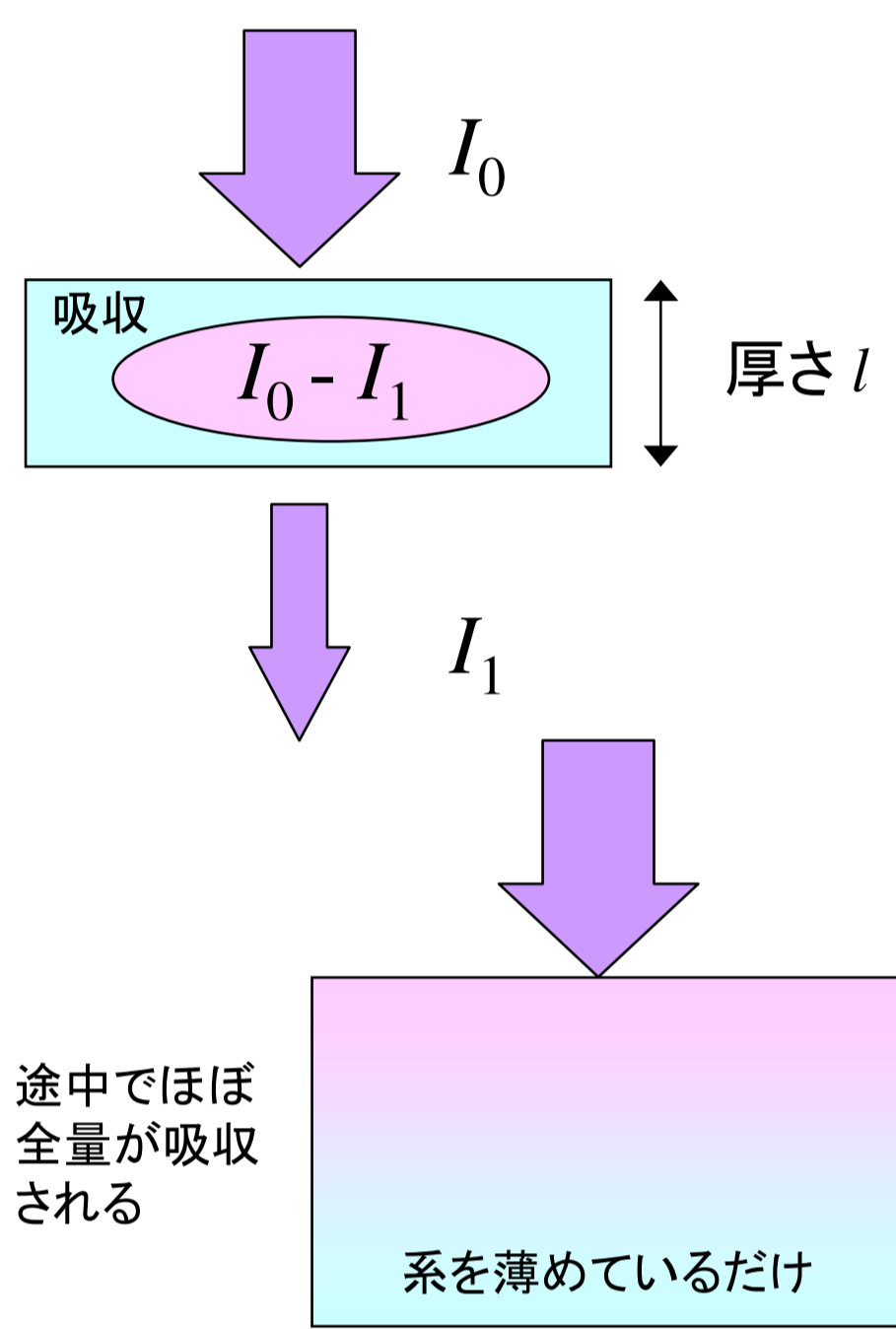
ほとんど素通りでほぼ均一にエネルギーを与え、表面から1cmの微小体積に対する吸収線量(1cm線量当量)が人体全体の実効線量を代表すると見なす。
表面近傍にのみ局所的にエネルギーを与え、深さ70μmでの点での吸収線量(70μm線量当量)が皮膚の等価線量を代表する。

同じ積算照度でも「系」に吸収されるエネルギーは異なる



吸光度から求める質量吸収光量(1)

$$\text{質量吸収光量 (J/kg)} = \frac{\text{吸収された紫外線のエネルギー (J)}}{\text{対象とする系の質量 (kg)}}$$



ランベルト・ベールの法則

$$\text{吸光度 } A = -\log_{10}(I_1/I_0) = \epsilon c l$$

(ϵ : 吸光係数、 c : 媒質濃度、 l : 光路長)

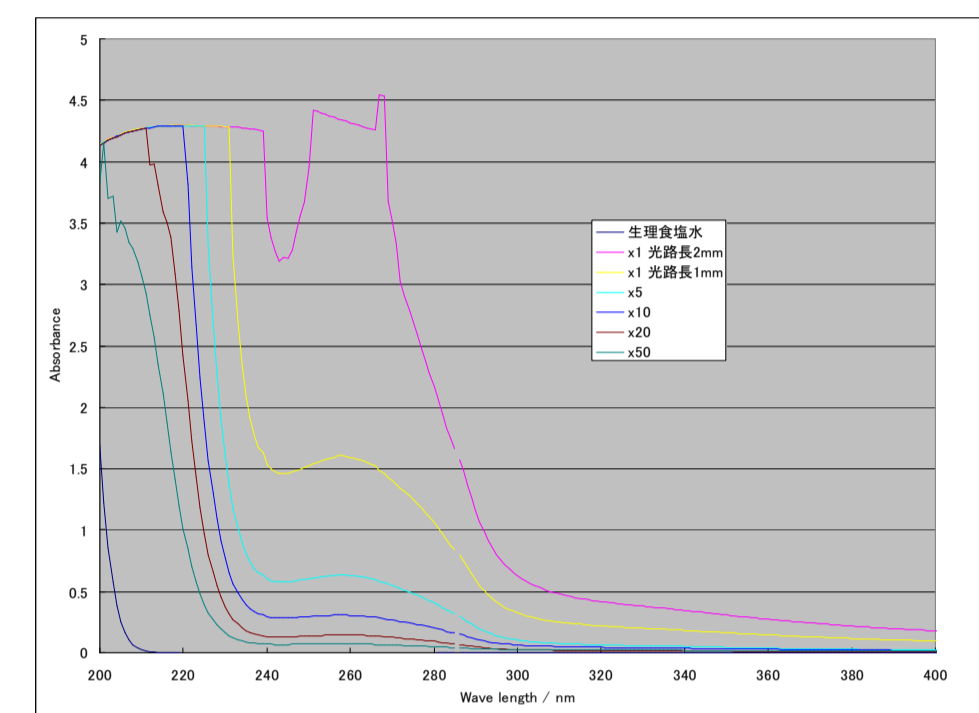
から、系に吸収されるエネルギー $I_0 - I_1$ は $I_0(1 - 10^{-\epsilon c l})$ と表わすことが出来、吸光度が1だと90%、2だと99%吸収されたことになる。系が厚いほど、媒質濃度が高いほど、吸収されるエネルギー自体は大きくなる。

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。

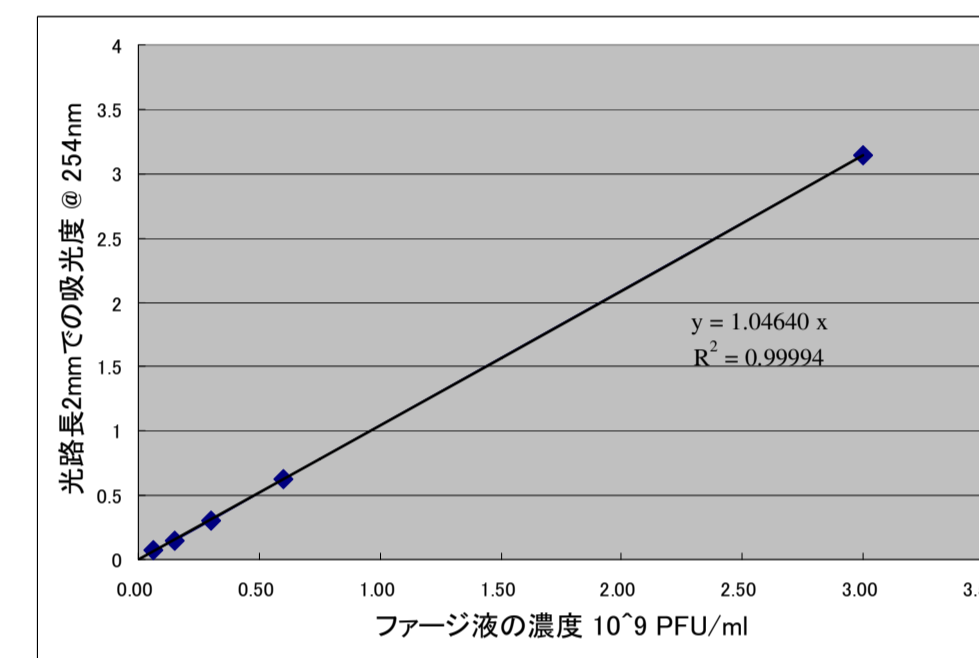
途中でほぼ全量が吸収される

系を薄めているだけ

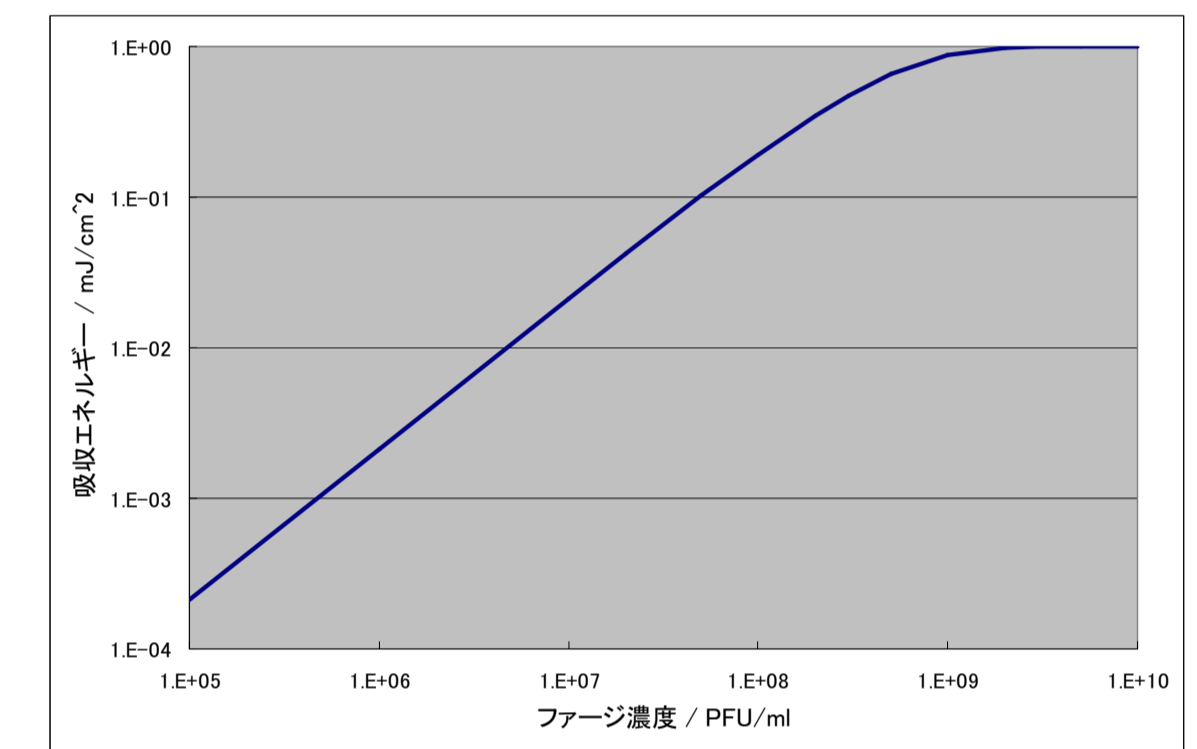
吸光度から求める質量吸収光量(2)



バクテリオファージQβ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・mm)を求め、φ60mmのシャーレに5mlのファージ液を入れて1mJ/cm²を照射した際の吸収エネルギーを求めた。



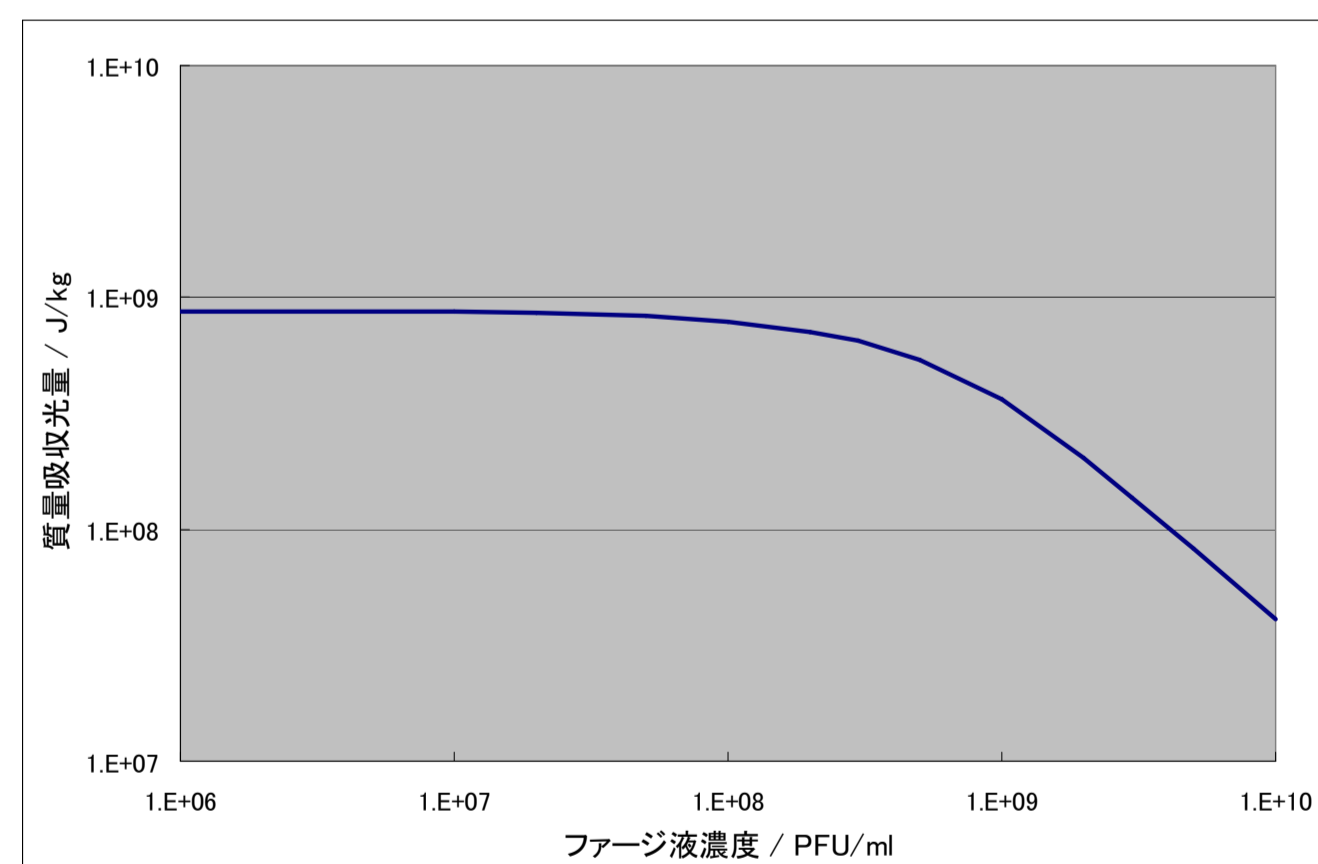
吸光係数 = 5.232×10^{-9} ml/PFU・mm



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Qβ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1PFU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。

* φ60mmのシャーレに5mlのファージ液を入れて照射した



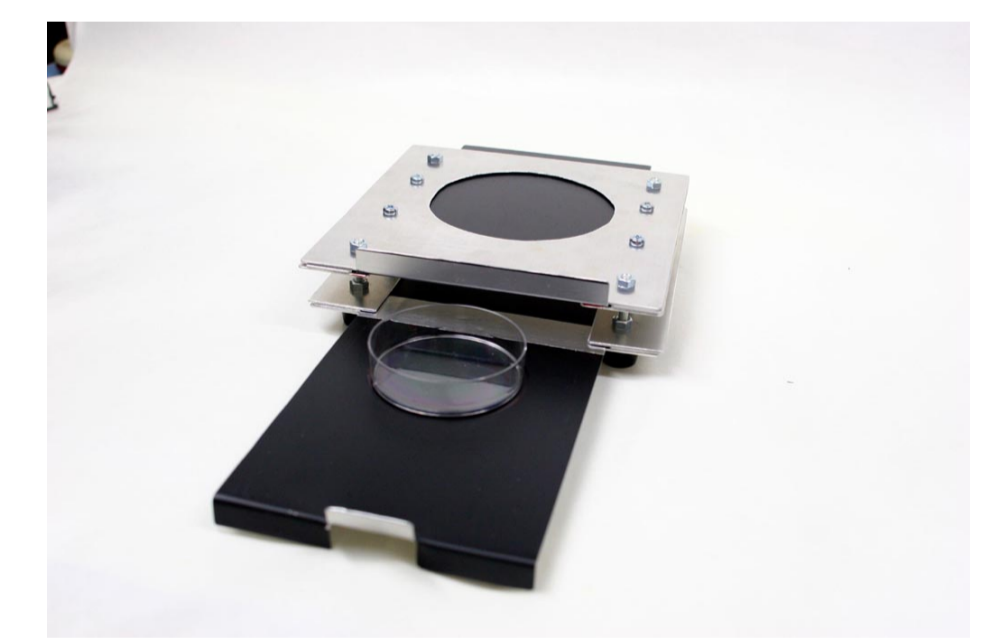
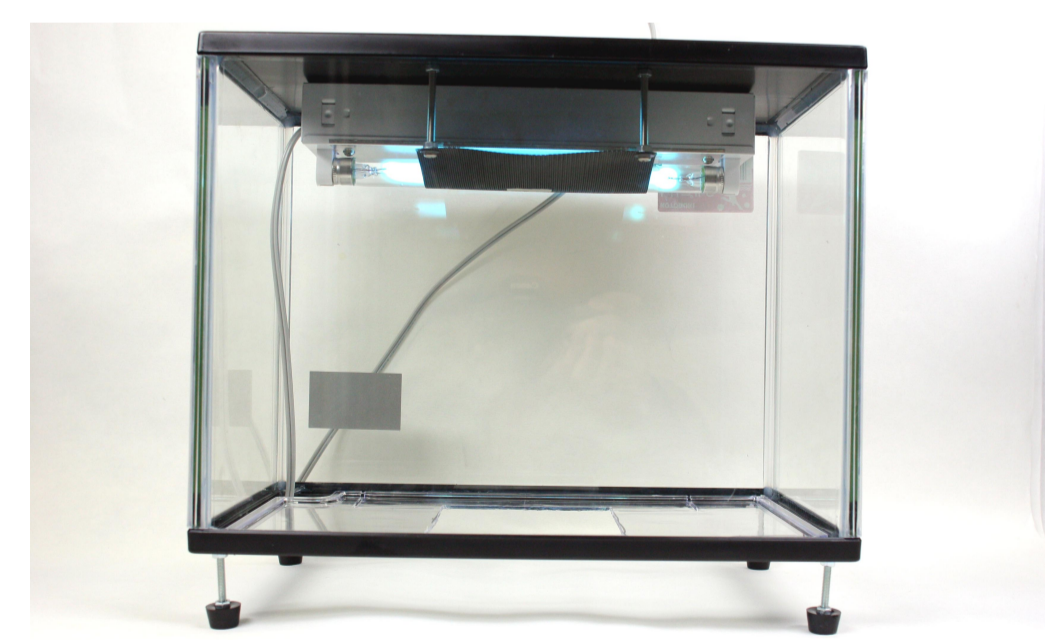
なお、ファージを分散させている生理食塩水による紫外線の吸収は無視可能であり、ここで求めた吸収線量は系全体を平均化した場合の値である点に注意を要する。

計算した質量吸収光量は、わずか1mJ/cm²の照射で1G J/kgにも達するという巨大な値となった。ファージ1つで1PFUという仮定や、実際の構造から質量を求めていない点、さらに散乱による透過光強度の低下など考慮すべき点は有るが、放射線での滅菌は数10kGy程度の照射で十分であるのとあまりにも大きく乖離している。

ただし、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。

生残曲線の初期濃度依存性(1)

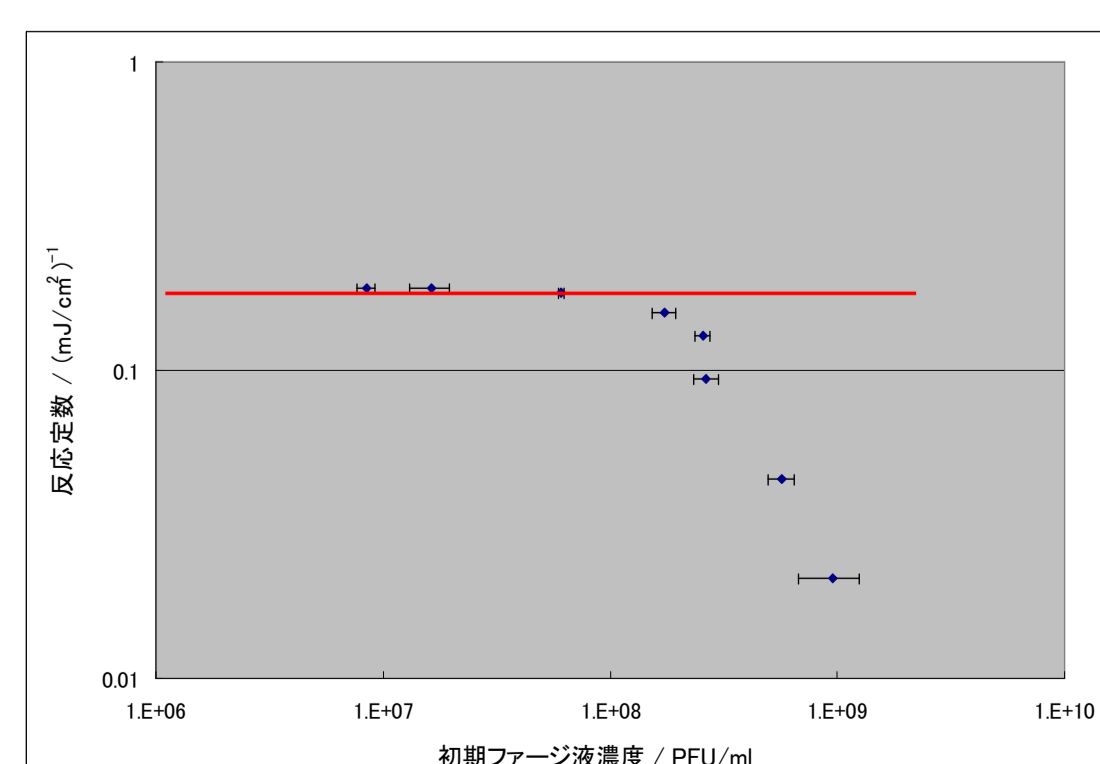
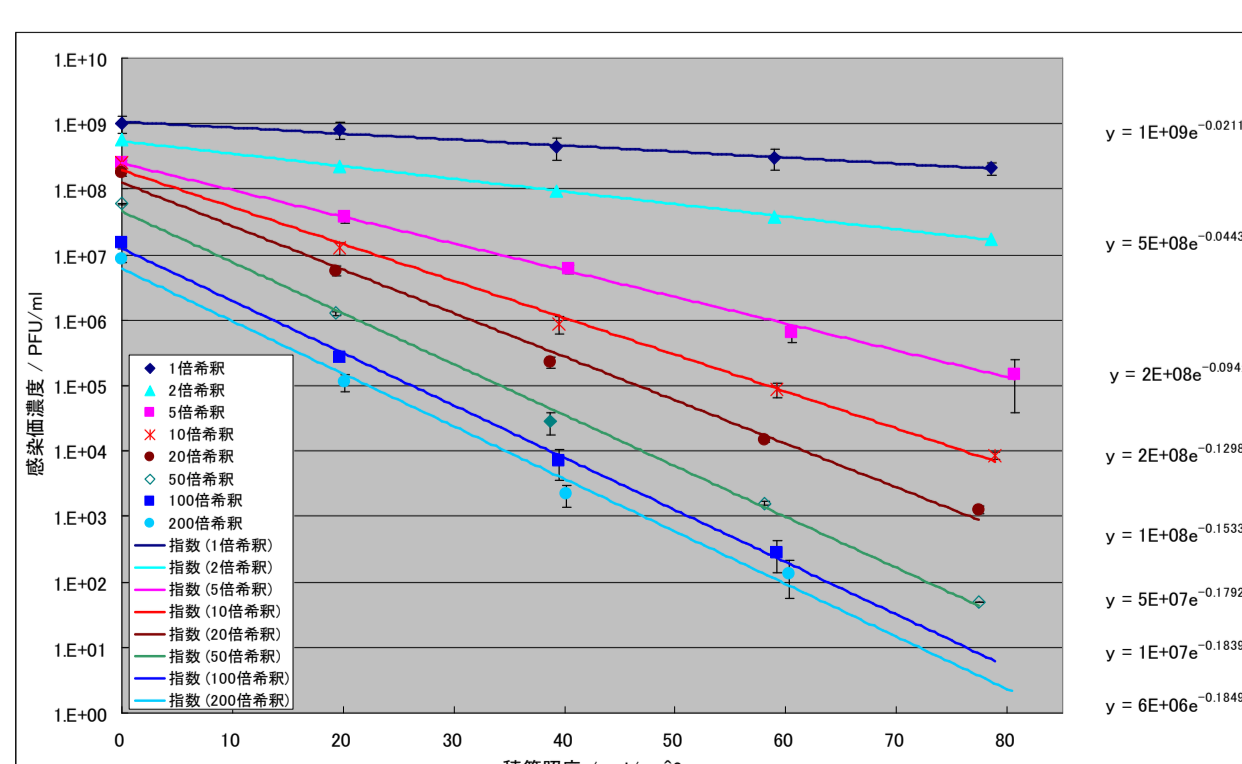
実際にバクテリオファージQβ液に紫外線照射(低圧水銀灯からの254nm)を行った際の生残曲線が、初期濃度によってどのように変化するかを検証した。照射はφ60mmのシャーレに5mlのファージ液を入れて行い、0.13mW/cm²程度に調整した照射器によって10分(78mJ/cm²程度)まで照射した。各回の照射前後で波長254nmの紫外線に対して校正されている放射照度計(ケニスYK-37UVSD)により照度測定を行い平均を求めた。途中0, 2.5, 5, 7.5, 10分で二段シャッター装置を使用して紫外線を遮光して照射を中断し、0.1mlずつサンプリングした。サンプリング後はシャーレのファージ液に対して照射を継続した。サンプリングしたファージ液は生残率に応じて10倍希釈をn回行った後に0.01mlを分取して大腸菌(NBRC13965)に加え、寒天培地に播種してプラーク数(P)を確認する事により、 $P \times 10^6/0.01$ PFU/mlとして感染価を求めた。



生残曲線の初期濃度依存性(2)

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している。

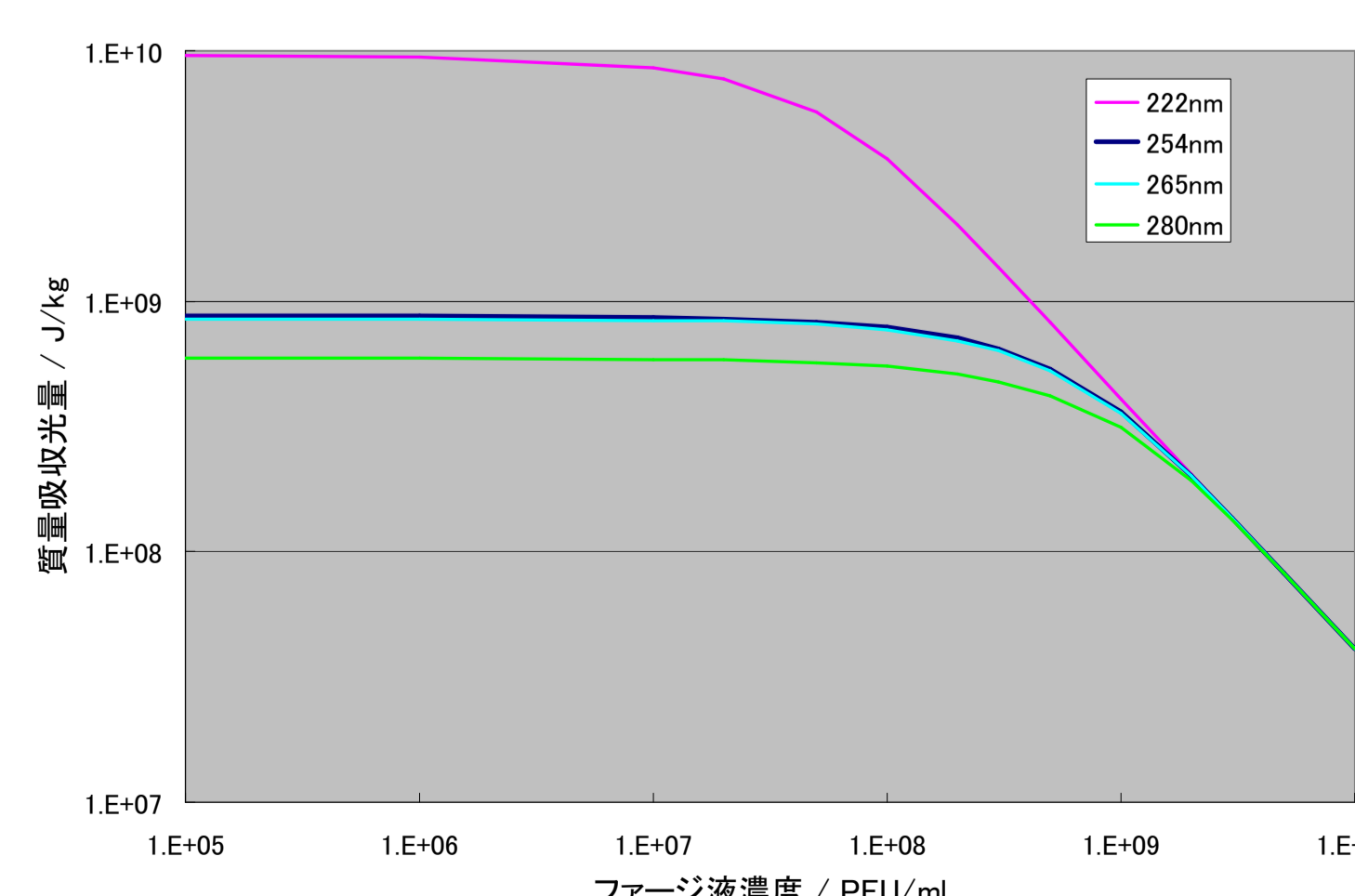
左図の結果から、初期感染価が高くファージ濃度が高いほど反応速度定数が小さく、不活化されにくくなるのがわかる。右図は、縦軸に感染価濃度を対数プロットした際の傾きである、反応定数を初期ファージ濃度に対してプロットした。その結果、吸光度から求めた質量吸収光量のファージ濃度依存性と非常に良く似た傾向を示し、 1×10^8 PFU/ml程度を境に、ファージ液が濃くなると不活化されにくくなった。



波長が異なる場合の質量吸収光量の違い

254nmの場合と同様に、222nmの遠紫外線を照射した場合のバクテリオファージQβに対する質量吸収光量を計算した。254nmの場合よりも吸光度が大きいため、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、254nm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。

265nmでは254nmとほぼ同等であったが、280nm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。

