

コロナウイルスに対する紫外線効果

鎌田雅夫 (光科学研究所)

The death number caused by COVID-19 indicates the important effect of ultraviolet light. Three types of photo-dissociation are also presented: (1) The excitation to anti-bonding state (direct effect). (2) The relaxed excited state reacts with neighbor molecules, producing active radicals or hydrate ions (indirect effect). (3) The virus interacts with its substrate under photo excitation (substrate effect).

1. はじめに

新型コロナウイルス (COVID-19) が世界的に感染を拡大して、多くの人々の生命を奪っている。ここではコロナウイルス対策として紫外線利用を考える参考として、①世界的な新型コロナウイルスの影響による死者数と緯度 (紫外線) の相関を調べた結果を示す。また、②紫外線には殺菌効果があると信じられているが、その基となる基礎的な光励起および光解離 (殺菌) 過程を考える。

2. 新型コロナによる死者数と緯度の相関

図1に、新聞やネットで公表されているコロナによる死亡者 (2020年7月12日現在) を、人口10万人当たりの死亡割合に規格化して、各国の首都の緯度に対して示し、4-6月期に紫外線が強い領域を青色ゾーンで示した。初めてのコロナ数を N_0 として、増殖などを考えないで

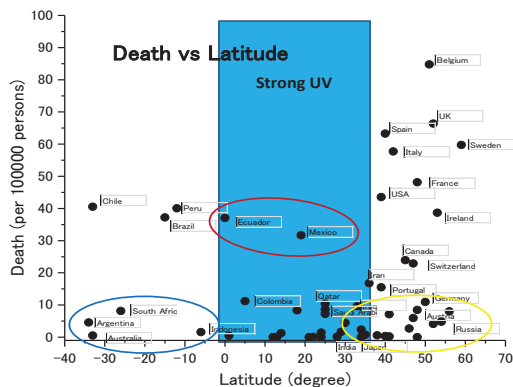


図1. 死亡者割合と緯度の関係

紫外線のみで殺菌されるとすると、緯度 Φ の国の残留コロナの数 $N(\Phi)$ は、 $N_0 - N_0 \cdot I_p \cdot \cos(\Phi) \cdot T$ (I_p は紫外線光子数、 Φ は緯度、 T は照射時間) になるので、緯度が高い国ほどコロナが残存して死亡者割合が高くなると期待され、図1の傾向と合致する。したがって、紫外線がウイルス殺菌に対して有効であり、夏は静まり、冬に再発の恐れありという説の科学的根拠である。

しかし、死者数対緯度の関係は単純ではなく、3種類の例外もある。青で囲った国々 (オーストラリア、アルゼンチンなど) は死亡者割合が少ない。これは南半球の国々であるので、感染が拡大していなかった時期によるのかも知れない。赤く囲った国 (エクアドルやメキシコ) は、紫外線効果の期待に反して、死亡者割合が多い。これは高地などの地理的条件によるものかもしれない。黄色で囲った国々 (ドイツ、ロシアなど) は、高緯度であるにも拘わらず、死亡者割合が少ないので、別の要因による効果と思われる。日本やインドは、この黄色の領域と紫外線効果の強い青色領域の両方にまたがっているので、紫外線および別要因の両方の効果で死亡者割合が少ないと考えられる。

3. 紫外線による殺菌効果

人間の目には見えない紫外線を感じることができる虫達を誘き寄せて、薬剤で殺すような紫外線利用もあるが、ここでは、紫外線の照射自体による効果について考える。

光照射による殺菌効果が生じるには、まずはコロナウイルスによる光吸収が起らなくてはならないが、現時点では新型コロナウイルスの光吸収スペクトルは分かっていない。そこで、一般的な DNA や RNA、アミノ酸などの光吸収スペクトルについての既知情報から推察する。

佐藤¹⁾によると、DNAの光吸収スペクトルは以下のように、260nmにピークを示す。

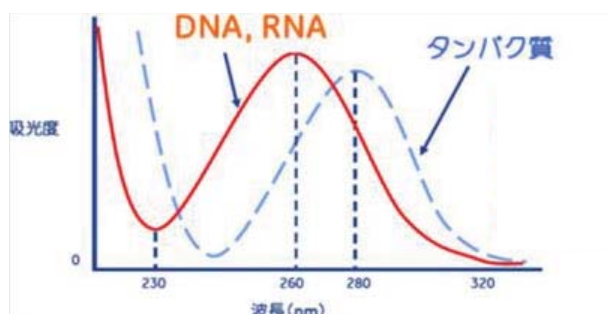


図2. DNA, RNA, タンパク質の光吸収¹⁾

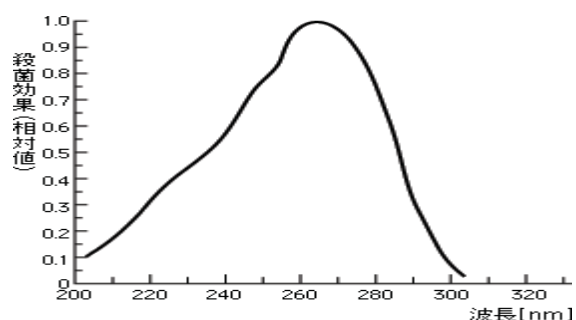


図3. 殺菌作用の分光特性²⁾

岩崎電気²⁾によると、紫外線による一般的な殺菌作用の分光特性は図3のようになっている。両図を比較すると、DNAの光吸収スペクトルのピークである260nmで殺菌効果が高いので、DNAへの光照射効果が殺菌の原因であると考えられる。

4. 光吸収とDNAの切断

DNAやRNAは数百万とも言われる分子で構成されているが、機能を決めているのはそれらの塩基であるので、一般論として、孤立した塩基分子の光解離から検討する。

一番簡単なのは、図4のように励起状態が解離状態(反結合状態)である場合である。例え

ば、光励起されたAB分子は、光励起状態のポテンシャル曲線に従って、結合距離が離れて行き、分解に至る。すなわち、① 紫外光の吸収、② 反結合励起状態の生成、 $AB + h\nu \rightarrow (AB)^*$ ③ ポテンシャル曲線に沿って、分子の結合距離が離れて、分子が解離する、 $(AB)^* \rightarrow A + B + E_{\text{kin}}$ 解離が生じる反結合励起状態は通常高いエネルギーにあるので、この光励起による解離(直接効果)には、紫外線の中でも、より短波長の紫外線が有効になる。

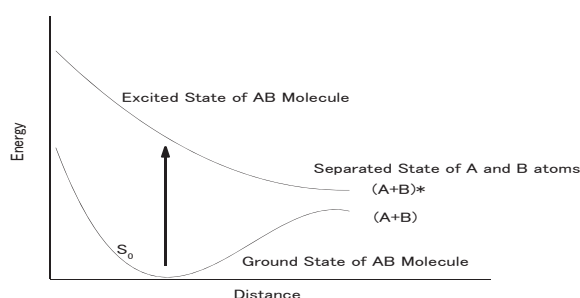


図4. 反結合状態への光励起(直接効果)

吸収が始まる基礎吸収端領域の光励起状態は反結合状態より低エネルギーにあり、緩い結合状態の場合が多いので、そこから解離に至るには、励起状態の緩和過程を考える必要がある。エネルギー緩和過程には様々な過程が存在し、例えば、光励起によって一重項状態が生成される($S_0 + h\nu \rightarrow S_1$)とすると、① 蛍光放出($S_1 \rightarrow S_0 + h\nu$)が考えられるが、これは、基底状態(S_0)に戻るだけなので、分子の解離には繋がらない、② 無輻射遷移で基底状態に戻る($S_1 \rightarrow S_0$)場合も分子は基底状態に戻るだけなので、解離が生じない、③ 一重項状態の下位には三重項状態が通常存在するので、三重項に遷移($S_1 \rightarrow T_1$)して、そこから燐光を放射したり($T_1 \rightarrow S_0 + h\nu$)、無輻射遷移で基底状態に戻る($T_1 \rightarrow S_0$)ことも考えられるが、これらも分子の解離には繋がらない。したがって、孤立した分子の場合には、基礎吸収端領域の光照射だけでは分子解離は生じないことになる。

したがって、分子の解離が生じるには、孤立分子ではなくて、分子集合体あるいは分子の周りに別の分子や物質が存在している必要があると結論される。この場合は、分子が励起三重項状態（励起一重項状態からでも良いが、寿命を考えると三重項状態がはるかに長いので励起三重項状態としておく）に緩和した後、周りの分子と相互作用して化学反応が進行して、分子が解離される。

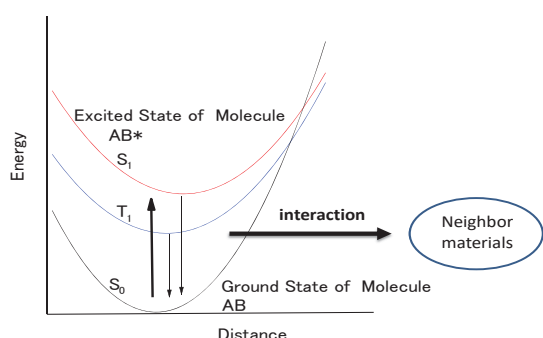


図5. 分子の基底状態 (S_0) と一重項 (S_1) および三重項 (T_1) 励起状態と反応 (間接効果)

例えば、励起AB分子 (AB^*) に近接して水分子が存在する場合は、①電子の移行 ($AB^* + H_2O \Rightarrow AB^- + H_2O^+$)、あるいは②水素の移行 ($AB^* + H_2O \Rightarrow ABH \cdot + OH \cdot$) が生じる。また、酸素分子と反応すれば、②電子の移行 ($AB^* + O_2 \Rightarrow AB^- + O_2^+$) や、励起酸素分子あるいは酸素原子やラジカルの生成 ($AB^* + O_2 \Rightarrow AB + O_2^* \cdot \Rightarrow AB + 2O^* \cdot \Rightarrow AB + 2O \cdot$) が生じる。したがって、DNAの励起状態が周囲の分子と反応して、活性酸素や水酸化物イオンやラジカルを発生させ、それらがDNA自体の結合を切断し、殺菌に到ると考えられる (間接効果)。

5. 基盤効果

コロナに近接して基盤物質 (金属や半導体が良い) があると、コロナの励起状態から基盤物質への電荷移動、あるいは基盤物質の励起状態からコロナへの電荷移動が生じて、コロナを解

離させることも可能であると思われる。我々はアミノ酸システインが銀表面で光誘起相転移を起こすことを見出している³⁾ ので、このような基盤との相互作用によるコロナ殺菌の可能性を提案しておきたい。

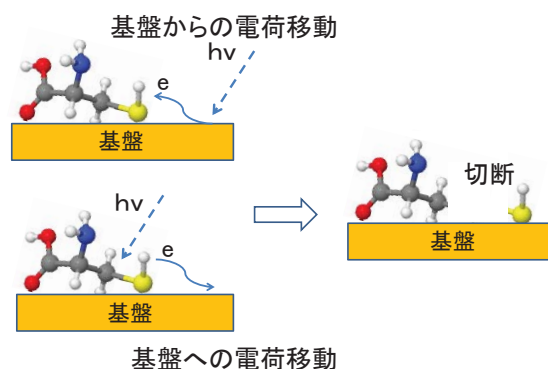


図6. 基盤物質との相互作用 (基盤効果)

なお、光励起が無い状態でもアミノ酸システインは銀基盤との間で互いに電荷をやり取りする反応を起こして、電子状態が変化することを見出している⁴⁾ ので、私達の身の回りの物質を銀コートするだけでもコロナ対策になりうると思われる。

図7は、金属基盤物質とシステイン薄膜の電子状態の関係を示したものである。システインの価電子状態が金属と重なっているので、互いに結合し合って、電荷移動が生じる訳である。

この図7は、システインの電子状態のエネルギー値を示している。バンド間エネルギーが5.8 eVであるので、システイン内部の光励起だと5.8 eV以上の光エネルギーが必要となるが、金属基盤とフェルミ面で電氣的平衡を保つので、金属からシステインに光励起する場合は、4.3 eV以上の光エネルギーで充分となる。

同様のことが金属基盤上のコロナウイルスにも当てはまるとすると、上述したようにウイルス自体の光励起には260nmより短波長の紫外線が必要であるが、基盤からの光励起でウイルスの励起状態を作る過程ならはるかに長波長の光で足りることになり、場合によっては紫や

青の光が利用できる可能性も出てくる。

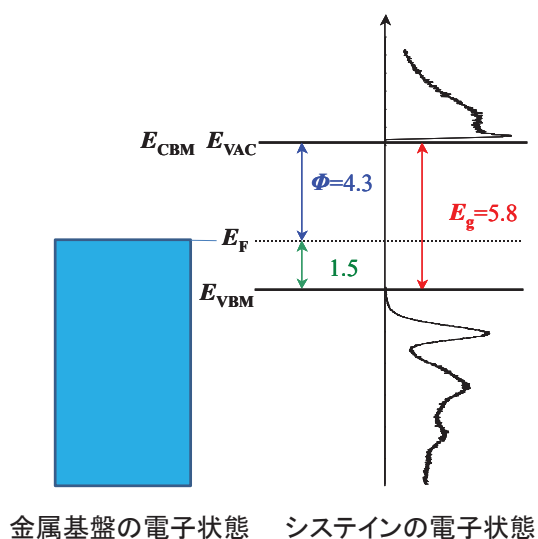


図7. 基盤物質とシステイン薄膜

6. 紫外線殺菌装置の報告

すでに紫外線を用いた新型コロナウイルス殺菌についての装置開発や試用例が幾つか報告されている。

大別すると、(1)DNA や RNA の吸収極大である波長 260nm に合わせたもの^{5,6)}、(2)直接効果に対応する短波長 222nm にしたもの⁷⁾、が存在する。260nm は、水銀の強い輝線 253 nm と近く、紫外線光源として既知の水銀ランプを用いることができるので、紫外線による殺菌を行う上での技術的な障壁は少ないが、人の皮膚や目への障害が懸念されるので、無人状態での使用といった制約がある。一方、222nm は、エキシマーランプを用いており、光子エネルギーが高いので、解離状態に直接励起できる利点がある。短波長の紫外線であるので、人体に危険だと思われがちであるが、高い光子エネルギーでの吸収係数が大きいことが幸いして、ウイルスを照射できて、皮膚や目への障害は起こらないことが実験で確かめられているので、有人状態での使用が可能とのことである。普及が期待される製品価格になることを望む次第である。

7. まとめ

1. コロナ感染による死亡者対緯度の相関から、例外はあるものの、紫外線照射によるコロナ殺菌は有効と思われる。
2. 短波長紫外線は、光励起により直接コロナウイルスを解離できる（直接効果）。
3. 長波長紫外線は、光励起状態と周辺物質との相互作用によりコロナウイルスを解離する（間接効果）。
4. 基盤物質を選べば、コロナから基盤物質、または基盤物質からコロナへの電荷移動が生じて、殺菌効果が期待される（基盤効果）。
5. 実用に当たっては、紫外線の正常細胞への影響を考慮する必要がある。
6. さらなる展開の為に、吸収ならびに作用スペクトルなどの基礎データの情報が必要であり、また安価な光源の開発が望まれる。

参考文献

- 1) 佐藤忍、バイオ計測学特論、
<https://docsplayer.net/170115752/>
- 2) 岩崎電気、<https://www.iwasaki.co.jp/optics/chishiki/uv/02.html>
- 3) T. Tsujibayashi et. al., Appl. Phys. Lett. 106, 173702 (2015).
- 4) K. Ogawa, et. al., J. Appl. Phys. 112, 023715 (2012).
- 5) ニューヨーク、<https://www.news24.jp/articles/2020/05/20/10646538.html>
- 6) テルモ、<https://www.nikkei.com/article/DGXMZ058770440T00C20A5TJC000/>
- 7) ウシオ電機、<https://www.nikkei.com/article/DGXMZ059480000S0A520C2XB0000/>