

紫外線 A 波(UVA)による ウイルス不活性化効果に関する調査研究

八幡 修輝* 香川 直己*

Research study on virus inactivation effect by ultraviolet A wave (UVA)

Syuki YAHATA* Naoki KAGAWA*

ABSTRACT

With the outbreak of coronavirus infection in 2019 and its spread around the world, many devices related to sterilization have begun to exist in our surroundings. Among them, devices using UVC have an immediate effect on sterilization, but they also have negative effects on the human body, so they are often used in places and at times when no one is around. Therefore, we believe that the use of UVA may be effective in terms of safety for the human body, but its bactericidal effect is unknown. Therefore, this paper summarizes the characteristics, examples of use, and effects on the human body of each ultraviolet ray, and discusses the effective use of UVA, referring to previous studies that investigated the relationship between ultraviolet UVA, UVB, and UVC and virus sterilization.

キーワード：紫外線 A 波，ウイルス感染症，新型コロナウイルス，ウイルス不活性化，LED 照明機器

Keywords: Ultraviolet A wave, viral infections, SARS-CoV-2, virus inactivation, LED lighting devices,

1. まえがき

本論文では太陽光に多く含まれる紫外線 A 波 (UVA : ultraviolet A) およびそれを含む照明機器がウイルス不活性化に寄与する可能性について調査した結果について述べる。

紫外線は太陽から放出される太陽光線の成分のひとつで、目に見えない「不可視光線」である。紫外線は、可視光線の1つである「紫」の外側に位置することから、ラテン語で「Ultra Violet」の名がついた。また、紫外線は電磁波の1種である。電磁波とは、空間の電場と磁場の変化によって形成される波のことである。エックス線やガンマ線などの放射線、赤外線、可視光線といった光線、テレビやラジオの電波も同じく電磁波である。紫外線の波長は、X線などの放射

線より長く、目に見える光線である可視光線よりも短い 100nm~400nm の範囲である。紫外線の波長は、X線などの放射線より長く、目に見える光線である可視光線よりも短い 100nm~400nm の範囲である。そして、そのなかでも波長の違いによって、UVA、UVB(ultraviolet B)、UVC(ultraviolet C)に分類されている。これらのうち、UVBは日焼け(サンバーン、サンタン)や皮膚の炎症、皮膚がんの原因として、UVCは殺菌効果によりよく知られている[1]。

一方で、UVAは、ほかの二波に比べてエネルギーが小さいため、生活における短期的なインパクトが小さく一般的にはあまり注目されないが、樹脂やインクの硬化、光触媒、分析や計測など産業、製造分野で多く用いられており、そのためのLED光源も製品化されている[2]。また、その波長特性から他の二波に比

べて大気による吸収を受けない。そのため、太陽から届く地上の紫外線の約9割を占めている。また、雲や窓ガラスも透過することから、日中であれば我々が最も照射を受けている紫外線である。

紫外線の有意な利用や効果は、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）をきっかけとして注目されると言え、人体への影響が少ないと言われる222nmや254nm、280~310nmのUVCが新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）の不活性化に作用するという研究報告がされた。特に222nmは新型コロナウイルスのRNAに全域にわたって損傷を与えることでウイルスの不活性化に作用すると結論づけている[3]。

また、米国における日光紫外線量とSARS-CoV-2を含む5種類のヒトコロナウイルスの平均陽性率の間に負の相関があるという研究結果がある(Liwei Tang *et al.*(2021)[4])。さらに、英国における太陽紫外線とSARS-CoV-2ウイルス不活性化の関係性に着目した研究では、4月、5月のUVAがSARS-CoV-2ウイルスの不活性化に寄与する可能性を示すものの、10月から3月の大部分においては不活性化に有意な影響を与える可能性は低いという結論を述べている(Rebecca Rendell, *et al.*[5])。これらの研究結果は、UVAがウイルス不活性化効果に有意に寄与する可能性を示唆していると言える。後者の研究結果の否定的な結論は自然界の太陽光強度に起因するものであり、安定かつ強度調整可能な人工照明であれば、有意な効果を維持できることを示唆するものと言える。

ただし、UVAにおいても、透過性の高さから長期被ばくによる真皮からの光老化の要因となるとも言われ、適切な照射量を見積もる必要があるが、太陽光紫外線の安全性の指標に関しては、地上に到達するUVA、UVB双方の効果を含むUVインデックス、紅斑紫外線量、UV-B量があるものの、人体に対するUVA単独の影響に関する指標はない。

そこで、本論文では皮膚の老化の一因と言われる光老化に関する研究結果に着目し、UVA照射に対する正常ヒト繊維芽細胞(NB1細胞)の石灰化およびそれを誘発すると言われる細胞内アルカリフォスファターゼ(ALP)の活性の変化に関する研究結果を参照して、UVAの照射量限度を見積もったので報告するとともに、UVA光源の有効な使用法について提案する。

2. 紫外線の分類と作用

2. 1 紫外線の分類 [1]

ここでは、太陽光に含まれる紫外線の分類について整理しておく。波長の長い方からUVA、UVB、UVCと分類される。

<UVA (315-400 nm)>

UVAは他の二長に比べて波長が長いので、大気による吸収の影響も他の二波よりも小さくなるため、地上に届く紫外線全体の約9割を占めている。太陽からの日射に占める割合は数%程度である。生物に与える影響はUVBと比較すると小さいとされる。

<UVB (280-315 nm)>

UVBは成層圏オゾンにより大部分が吸収され、残りが地表に到達する。太陽から届く紫外線全体の1割程度であり、太陽光線全体の0.1%の量である。生物に大きな影響を与える。

<UVC (100-280 nm)>

UVCは成層圏及びそれよりも上空のオゾンと酸素分子によって全て吸収され、地表には到達しない。ただし、オゾン層破壊により地上まで届くリスクが心配されている。

2. 2 紫外線の人の肌への作用 [6]

地表に届く紫外線は、UVAとUVBの2種類であり、それぞれ違った作用をする。そこで、以下にUVAおよびUVB個々の作用について述べる。なお、UVCは地上に到達しないためここでは触れない。

2. 2-1 UVAの作用

地上に到達する紫外線の約9割を占めるUVAは、紫外線A波や生活紫外線とも呼ばれる。エネルギーは後述するUVBより小さいため、同一期間の照射では肌の損傷はUVBより小さいがUVAが蓄積されると肌に大きな損傷を与える。また、通常のガラスは透過するため室内においても肌に影響を与える。UVAは、肌の奥の真皮まで到達し、そこにあるエラスチンやコラーゲンを変性させることになりしわが生じやすくなる。更に、メラノサイトを活性化することでメラニンをつくり(遅延黒化)、既にあるメラニンを酸化させて黒くする(即時黒化)作用も及ぼす。

2. 2-2 UVBの作用

UVBは、表皮を中心にダメージを与え、肌に炎症を起こし、日焼け(肌色を黒くする作用)もある。また、角化を早めて肌荒れも起こしやすくなる。UVBはガラスを透過しないので、室内では、その影響が少ない。

以上のように、UVA、UVB、UVCの3つは、地上への到達率や肌に与える影響が異なる。これは、それぞれの波長の違いで散乱・屈折・反射のレベルが異なることに起因する。

3. UVAの除菌・殺菌効果に対する先行研究調査

UVAを放出するLED光源は、概ね産業用として開

発されているが、その LED 発光素子を用いた常時空間除菌を目的としたドーム型の LED 灯 (LED 除菌脱臭灯) も開発されている [7]。この照明装置の光度は光源から 240mm 離れた位置の照度が日常屋外で受ける太陽光と同程度になるよう設計されている。このことに基づいて、照射量 (UV 露光量=積算光量) を単純に見積もると、240nm の距離で 8 時間照射が屋外での太陽光の 30 分間の照射に相当するものになる。その除菌効果であるが、スマートフォンなどの表面に存在するすべての生命体の死滅効果を ATP (アデニン三リン酸) 測定法を用いて検証しており、直管型の UVA 除菌灯からの 300mm 程度離れた距離からの 10 分間照射で約 77%、30 分間照射で約 93% ATP 値が減ったことを提示している。また、この光源のヒトコロナウイルス (新型コロナウイルス SARS-CoV-2 ではない。) に対する不活性化効果を民間の試験期間で調べ、その試験結果通知を得ている [7]。

この照明システムの開発の根拠となったのが、Ratnesar-Shumate *et al.* (2020) [8] の研究結果である。この論文では、COVID-19 の潜在的な感染経路の 1 つであるエアロゾルに注目した。エアロゾル感染が起こるには、エアロゾル内のウイルスが生成されてから感受性の高い宿主に入る間、感染力を維持する必要がある。この間に感染力が失われると、エアロゾル感染が低くなる。先行研究から環境条件である相対湿度と太陽光が減衰速度に影響を与えることが示されている。しかし、持続性については明らかにされていないため、この研究では、エアロゾル中の SARS-CoV-2 の安定性に対する模擬太陽光、相対湿度、および懸濁液マトリックスの影響を検討した。材料は、培養したウイルスを用意し、模擬太陽光はソーラーシミュレーターで生成されたスペクトルは、直径 2 インチの積分球受光器 (IS-270 ; Gooch & Housego) を用い波長が 280nm~400nm を想定している。そして、試験は相対湿度レベル (20%, 45%, 70%) および太陽光の強さは (暗黒, 中強度, 高強度) の範囲において実施する。その結果、相対湿度のみでは、不活性化に影響がなく、模擬太陽光はエアロゾル中のウイルスを急速に不活性化し、試験したすべての模擬太陽光レベルにおいて半減期は 6 分未満、ウイルスの 90% を 20 分未満の時間で不活性化されたことが明らかになった。また、模擬太陽光の強さが増すにつれて不活性化が進むことも明らかになった。そして、UVC がウイルスを不活性化することはこれまで報告されていたが、この実験で使用した太陽光の波長が 280nm~400nm は紫外線 UVA および UVB レベルの波長であった。

さらに、前書きで触れた Liwei Tang *et al.* (2021) Rebecca Rendell *et al.* (2021) の研究も UVA の SARS-

CoV-2 不活性化の効果を示唆するものと言える。

これまでの文献調査において、直接 SARS-CoV-2 ウイルスへの UVA および UVC の併用または分離照射に対する感受性も検討結果についても見出すことができた (Christiane Silke Heilingloh PhD *et al.* 2020) [9]。この論文では、培養した SARS-CoV-2 ウイルスに対して最大 30 分間 UV 照射を行った結果、当該ウイルスは UV 照射に対し高い感受性を示したことを示している。図 1 は 5×10^6 (TCID₅₀/ml) の SARS-CoV-2 ウイルスに紫外線を照射した結果を示している。TCID₅₀ とは、50% 組織培養感染量 (50% Tissue Culture Infective Dose) と呼ばれ、組織培養細胞の 50% の細胞変性を生むのに必要なウイルスの量を定量するものである。図中 C を見てみると、UVA 照射量 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ のとき SARS-CoV-2 の生存数が約 10^5 (TCID₅₀/ml) に対して、D を見てみると UVC 照射量 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ のとき生存数が約 10^3 (TCID₅₀/ml) になっている。このことから UVA は UVC には及ばないが、UVC の約 1/100 の効果で SARS-CoV-2 ウイルスを不活性化させていることになる。

4. UVA が人体に及ぼす影響の調査

UVC は除菌効果と人体への影響をまとめた指標が存在するが、UVA については、これまでの調査では見つかっていない。そこで、本研究では肌の光老化に着目し、UVA 照射の指標を定めることを試みた。

山田・柴田他 (2017) [10] は、UVA が皮膚の真皮にまで達する事とともに、真皮の細胞外マトリックス (線維成分と基質) の生産を担う線維芽細胞 (正常ヒト由来培養線維芽細胞 (NB1 細胞)) に UVA を照射して光老化の一大因子である石灰化を誘発するかを調べ、石灰化との相関性が高い細胞内アルカリフォスファターゼ (ALP) 活性の状況も併せて調査した。図 2 は、NB1 細胞に異なる照射量の UVA を照射した後一晩培養し、細胞活性を調べた結果であり、図 3 は同じ条件の下で石灰化度を調べた結果である。細胞活性は UVA の照射量に逆相関して低下し、 $0.4\text{--}0.8\text{J}/\text{cm}^2$ の照射量の範囲において照射量依存的に石灰化度の上昇が認められ $0.8\text{J}/\text{cm}^2$ 以上では、飽和している。UVA 照射が石灰化を促すアルカリフォスファターゼ (ALP) 活性に及ぼす影響については、 $0.8\text{J}/\text{cm}^2$ UVA 照射後、2 時間培養した NB1 細胞は UVA 未照射で培養した細胞に比べて細胞内 ALP 活性の上昇が認められ、4 時間後には細胞内 ALP 活性は有意 ($p < 0.05$) に上昇して最高値を示す。その後高い ALP 活性は培養 6 時間後まで持続するが、7 時間後には低下し始め、8 時間後には未照射の細胞内 ALP 活性との差異が消失することが分かった。

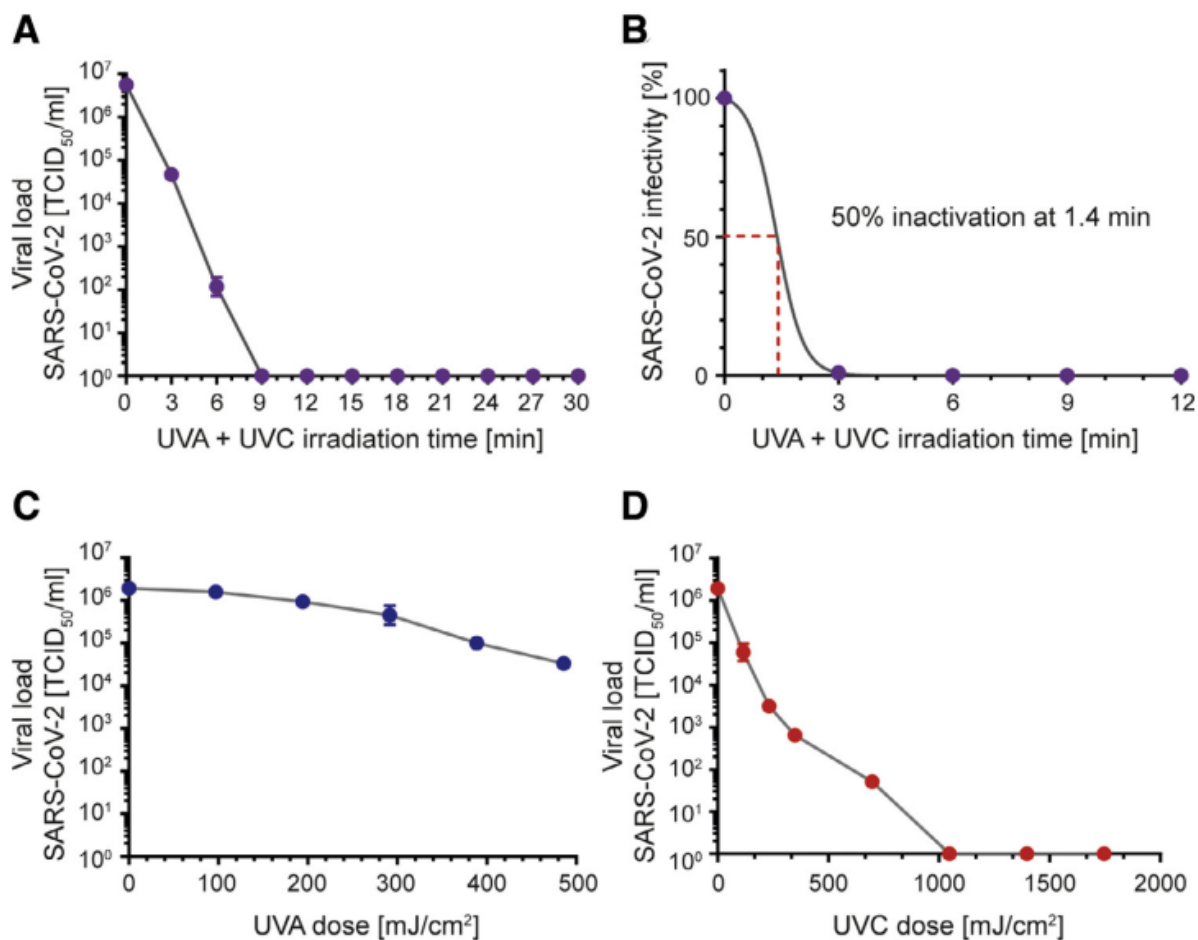


図 1 紫外線 A 波照射による SARS-CoV-2 の不活性化 [9]
Fig.1 Inactivation of SARS-CoV-2 by UVA irradiation.[9]

さらに、山田・柴田他 (2019) [11] においては正常ヒト皮膚由来培養線維芽細胞 (NHDF) に対しても、0.8 J/cm² の UVA を照射し文献 [10] と同じ観察をした結果、細胞質にカルシウム塩の凝集、Ca²⁺の増加が明瞭に確認された。これらの結果は、これまで皮膚に対する紫外線の影響について著述されている多くの知見とも合致し、NHDF が UVA 照射によって酸化ストレスの負荷や炎症惹起という強いダメージを受けたことを示唆するものであるとしている。

5. 妥当な UVA 照射量の検討

これまでの調査結果を踏まえて、適正な照射量を検討する。

図 4 は、図 1 C で示した UVA 照射量に対する SARS-CoV-2 ウイルスの活性化率 (×印)、参考文献 [7] に示されているコロナ 229E ウイルスの活性化率 (▲印) を、図 2 および図 3 で示した山田・柴田他 (2017) [10] の正常ヒト由来線維芽細胞 (NB1) の活性化率 (■印)、相対石灰化発現量を率に換算した

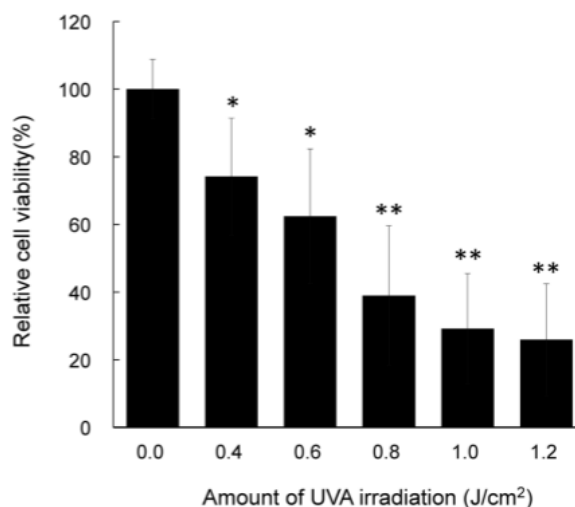


図 2 UVA 照射量と NB1 細胞の活性化率[10]
Fig.2 Effect of UVA irradiation on cell viability of NB1 cell.[10].

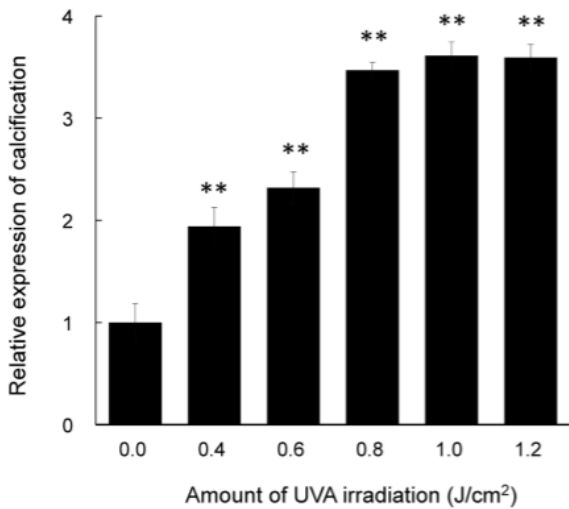


図3 UVA 照射量と NB1 細胞の石灰化の相対発現量 [10]

Fig.3 Effect of UVA irradiation on the calcification of NB1 cell.[10]

結果 (◇印) を重ねた結果である。

図 5 に示す国土交通省気象庁の示す日積算紅斑紫外線量の月平均値グラフ [12] を参考にすると、「つくば」の参照値 (1994~2008 年の月別類年平均値) の

値は 0.4J/cm²未満となっていることから、日本における自然界から UVA 照射量はこの値以内に収めるのが一つの目安であると考え。

上限値とした 0.4J/cm² の照射量で見た場合, SARS-CoV-2 ウイルスの活性化率は 4%であり, それに対して線維芽細胞 (NB1 細胞) の活性化率は 75%を保っており, 石灰化も 40%未満に収まっている. 図 1 における UVA と UVC を照射したときの SARS-CoV-2 の生存数 (それぞれ C および D) を比較すると照射量 0.4J/cm²の時 UVA は UVC の約 1/100 の効果で SARS-CoV-2 ウイルスを不活性化している.

図 5 の日積算紅斑紫外線量の月平均値グラフを月別で見ると冬期 (11 月~2 月) にかけては, 照射量が 0.1 J/cm²を下回るため SARS-CoV-2 ウイルスの不活性化には大きく寄与できない事が予測でき, これは, 前述の英国における研究結果 [5] を裏付けるものになっている. 一方で, 夏季に屋外で観測される 1 時間の照射量 (=積算光量) は 0.3J/cm² を上回ることが多いため, 屋外では自然光による SARS-CoV-2 ウイルスの不活性化効果も期待できる. しかしながら一方で, 近年酷暑になることが多く, 日中に外出することが困難になることが多くなっている. このことも夏季においても COVID-19 が収束しなかった一因である可能性

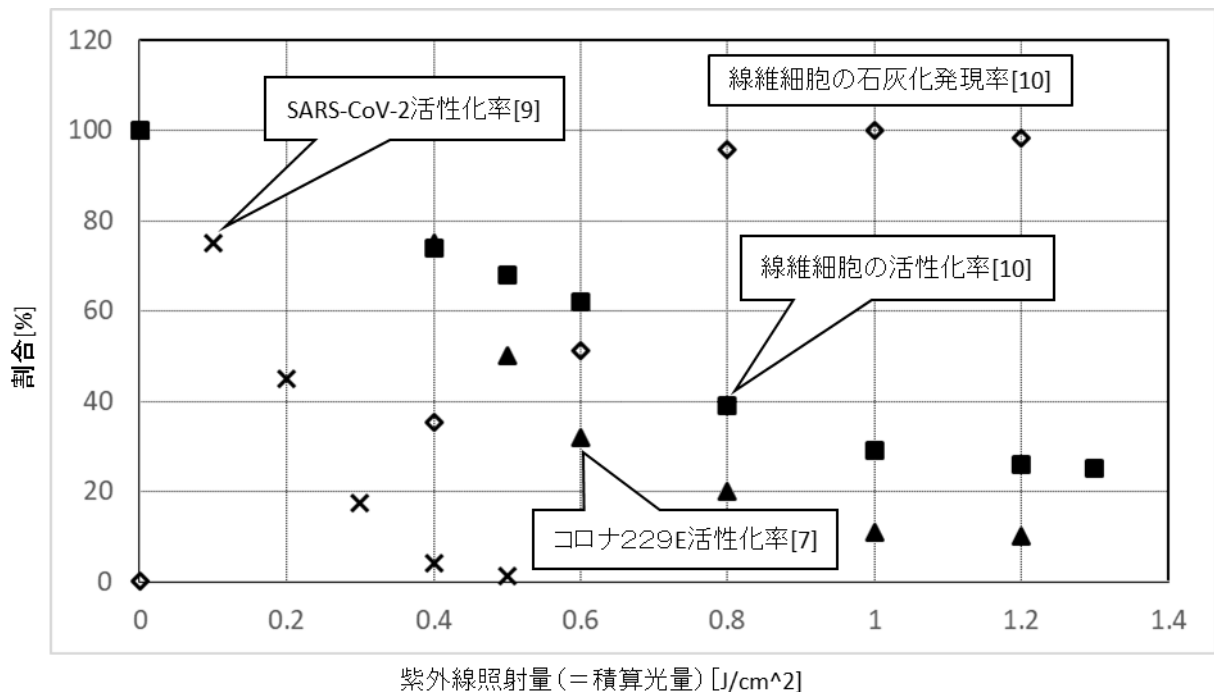


図4 調査文献に基づき作成した UVA 照射量に対する SARS-CoV-2 ウイルス活性化率 [9] (×印), コロナ 229E ウイルス活性化率 [7] (▲印), 正常ヒト由来培養線維芽細胞 (NB1 細胞) 活性化率 [10] (■印) と同線維芽細胞の石灰化発現率 [10] (◇印) .

Fig. 4 SARS-CoV-2 virus activation rate [9] (marked with X), corona 229E virus activation rate [7] (marked with ▲), normal human-derived cultured fibroblasts (NB1 cells) activation rate [10] (marked with ■) and calcification development rate of the same fibroblasts [10] (marked with ◇) against UVA dose, based on the survey literature.

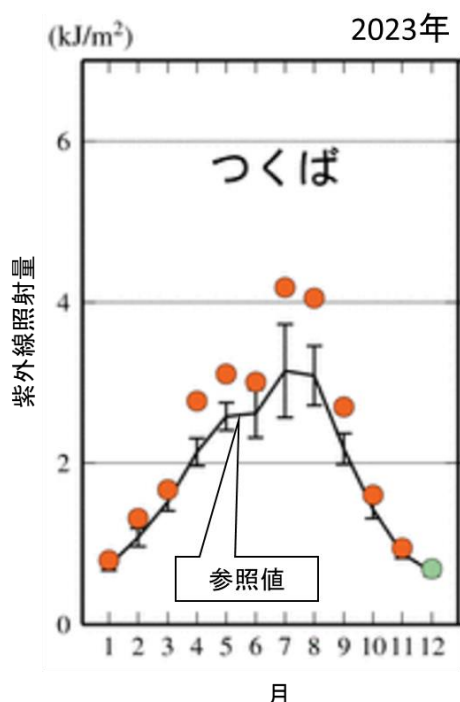


図5 2023年の日積算紅斑紫外線量の月平均グラフ

Fig.5 Monthly average graph of daily integrated erythemal UV dose in 2023

がある。もし、この仮説が正しければコントロールされた適切な照射量のUVAを年間を通じて継続的に照射することでSARS-CoV-2ウイルスだけでなく、その他ウイルスの不活性化を図ることが期待できる。

6. まとめ

本論文では太陽光に多く含まれるUVAおよびそれを含む照明機器がウイルス不活性化に寄与する可能性について調査した結果について述べた。本稿で示した参考文献は調査論文の一部にすぎず、これらの研究結果以外にも、UVAがウイルス不活性化効果に有意に寄与する可能性を示唆しているものがある。一方で、UVAの人体に対する影響も無視できないことから、皮膚の老化の一因と言われる光老化に関する研究結果に着目し、UVA照射に対する正常ヒト繊維芽細胞(NB1細胞)の石灰化およびそれを誘発すると言われる細胞内アルカリフォスファターゼ(ALP)の活性の変化に関する研究結果を参照して、UVAの照射量を見積もった。

調査の結果、UVAはUVCのように即効性はないが、UVCの1/100の効果でSARS-CoV-2ウイルスを不活性化でき、照射量(=積算光量)0.4J/cm²程度であれば、照射光度や照射時間をコントロールすることで人体に悪影響を与えずにSARS-CoV-2ウイルス等を不活性化できる可能性がある。

我々の屋内活動において不可欠である照明機器において広く普及してきているLEDは、強度、照射時間のICT制御が極めて容易でありIoT化しやすいという利点がある。他の波長との調合も可能であることから、自然光の恩恵を再現した安全安心な生活環境を支える照明機器になり得ると言える。

参考文献

- [1] 国土交通省, 気象庁 データ資料 <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- [2] 日亜化学 LED/LD ウェブサイト, https://led-ld.nichia.co.jp/jp/product/uv_uva.html
- [3] 紫外線照射による新型コロナウイルス不活性化のメカニズム, 理化学研究所ウェブサイト, https://www.riken.jp/press/2021/20210705_3/index.html
- [4] Liwei Tang, Min Liu *et al.*, "Sunlight ultraviolet radiation dose is negatively correlated with the percent positive of SARS-CoV-2 and four other common human coronaviruses in the US", *Science of the Total Environment* 751. 2021
- [5] Rebecca Rendll, Marina Khazova *et al.*, "Impact of High Solar UV Radiant Exposures in Sprong 2020 on SARS-CoV-2 Viral Inactivation in the UK", *Photochemistry and Photobiology*, 97;542-548. 2021
- [6] 例えば, "紫外線の影響", 花王スキンケアナビウェブサイト, <https://www.kao.com/jp/skincare/>
- [7] 株式会社カネヒロデンシウェブサイト, LED 除菌脱臭灯, <http://kanehirodenshi.co.jp/>
- [8] Ratnesar-Shumate *et al.*, "Airborne SARS-CoV-2 Is Rapidly Inactivated by Simulated Sunlight", *The Journal of Infection Diseases* on pages214-22. 2020
- [9] Christiane Silke Heilingloh PhD, Ulrich Wilhelm Aufderhorst, *et al.*, "Susceptibility of SARS-Cov-2 to UV irradiation", *American Journal of Infection Control* 48, 1273-1275. 2020
- [10] 山田勝久, 柴田雄次, 野村道康, 今田千秋, "UVA 照射により誘導される正常ヒト線維芽細胞の石灰化に対する 海洋深層水の抑制効果", *Deep Ocean Water Research*, 18(1), 1-7, 2017
- [11] 山田勝久, 柴田雄次, 山本 樹, 野村道康, 今田千秋, "培養ヒト皮膚由来線維芽細胞の石灰化に対する UVA の影響", *日本化粧品学会誌* Vol.43, No.4, pp. 303-308, 2019.
- [12] "日積算紅斑紫外線量の月平均値グラフ", 国土交通省ウェブサイト, 各種データ・資料, https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/cie_graph_monthave.html