

2022 年 3 月 18 日
国立大学法人東京大学
国立研究開発法人情報通信研究機構

高出力深紫外 LED (265nm 帯) により エアロゾル中の新型コロナウイルスの高速不活性化に成功

1. 発表者：

河岡 義裕（東京大学医科学研究所 ウイルス感染部門 特任教授）
井上 振一郎（国立研究開発法人情報通信研究機構 未来 ICT 研究所
神戸フロンティア研究センター 深紫外光 ICT 研究室 室長）

2. 発表のポイント：

- ◆小型・高出力、発光波長 265nm 帯の深紫外 LED（注 1）が、液体中ならびにエアロゾル中の新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）を極めて短い照射時間で不活性化できることを定量的に明らかにしました。
- ◆深紫外 LED 照射によるエアロゾル中の SARS-CoV-2 に対する不活性化効果は、液体中に比べて約 9 倍高いことが明らかとなりました。
- ◆小型・高出力の 265nm 帯 深紫外 LED が、SARS-CoV-2 のエアロゾル感染による感染拡大を抑制するための有効かつ実用的なツールとして役立つことが期待されます。

3. 発表概要：

東京大学医科学研究所ウイルス感染部門の河岡義裕特任教授ならびに国立研究開発法人情報通信研究機構の井上振一郎室長らの研究グループは、小型・高出力、発光波長 265nm 帯の深紫外発光ダイオード（DUV-LED）を用いることで液体中ならびにエアロゾル中の新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）を迅速に不活性化できることを実証しました。

SARS-CoV-2 によって引き起こされる新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界規模での流行が続いています。COVID-19 の感染経路の一つとして、エアロゾル感染の存在が明らかになってきていますが、エアロゾル化したウイルスに対しては液体薬剤の使用が有効ではないため、感染対策上、大きな課題が残されていました。このような状況であるため、深紫外 LED 照射によるウイルスの不活性化に大きな期待が寄せられています。しかしながら、従来の深紫外 LED の光出力は数十 mW 程度と小さく、迅速に高い不活性化率を達成するには不十分でした。また、SARS-CoV-2 エアロゾルに対する深紫外 LED の定量的な照射効果についても明らかにされていませんでした。

本研究グループは今回、ピーク発光波長 265 nm で光出力 500 mW（世界最高出力）のシングルチップ小型深紫外 LED 照射光源を開発し、液体（試験皿内のウイルス懸濁液）およびエアロゾル中の SARS-CoV-2 に対する不活性化効果を定量的に評価しました。その結果、高出力深紫外 LED は、液体中の SARS-CoV-2 の感染力を極めて短い照射時間（0.4 秒以下）で 10 万分の 1 未満に減少させることが可能であることを明らかにしました。また、エアロゾル中の SARS-CoV-2 に対する深紫外 LED の不活性化効果は、液体中に比べて約 9 倍効率的であるこ

とを示しました。本研究成果から、小型・高出力の 265nm 帯 深紫外 LED が SARS-CoV-2 の拡散を抑制するための極めて有効かつ実用的なツールになり得ることが示されました。

本研究成果は、2022 年 3 月 17 日に米国科学雑誌「*mSphere*」のオンライン速報版で公開されました。なお本研究は、東京大学と情報通信研究機構が共同で行ったものです。本研究成果は、総務省令和 2 年度補正予算事業、令和 2 年度厚生労働科学研究「新興・再興感染症のリスク評価と危機管理機能の実装のための研究」、日本医療研究開発機構（AMED）の新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業と新興・再興感染症研究基盤創生事業（海外拠点研究領域）、並びに日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業の一環として得られました。

4. 発表内容：

COVID-19 の感染経路の一つとして、エアロゾル感染の存在が明らかになってきています。エタノールなどの液体薬剤は SARS-CoV-2 に対して顕著な不活性化効果を示すことから、物体表面の除染等に広く使用されています。しかし、液体薬剤を使用することができない条件や SARS-CoV-2 エアロゾルに関しては有効な不活性化方法が確立されておらず、感染対策上の課題として残されています。

深紫外（DUV）半導体発光ダイオード（LED）を用いた光照射は化学物質を使わずにウイルスや微生物を不活性化する技術として注目されています。ウイルスや微生物の光不活性化には UV-C と呼ばれる 100～280nm の波長域の光照射が効果的であり、特に、DNA や RNA の吸収極大波長とほぼ重なる 265nm 付近の光照射が最も高い効果が得られます。LED は、水銀ランプなどのガス放電型紫外線ランプに比べて、発光波長の調整性が高く、小型、シングルピークでの発光、低駆動電圧、ウォームアップ時間が不要、水銀不使用による環境負荷が少ないなどの多くの利点があります。

これまで紫外線光源として産業的には主に水銀ランプが用いられてきましたが、水銀廃絶に向け 2017 年に「水銀に関する水俣条約」が発効し、その代替光源として DUV-LED が期待されています。しかし、従来の DUV-LED の光出力は、水銀ランプに比べて非常に弱く、市販されている 265nm 帯 DUV-LED の出力（約 50mW）では、SARS-CoV-2 に対する不活性化効果は認められるものの実用に十分な効率とは言えませんでした。また、これまで光照射技術を用いた SARS-CoV-2 に対する不活性化効果の評価については、試験皿内のウイルス懸濁液を用いた条件に限られており、DUV-LED による SARS-CoV-2 エアロゾルに対する不活性化効果ならびに定量的評価についても行われていませんでした。

本研究では、波長 265nm の発光ピークを示す高出力な窒化アルミニウムガリウム（AlGaIn）系 DUV-LED を開発し、液体中ならびにエアロゾル中の SARS-CoV-2 に対する光不活性化効果を定量的に検証しました。従来の AlGaIn 系 DUV-LED の低出力の主な原因であった極めて低い光取出し効率の問題を改善するために、井上らが以前に実証した窒化アルミニウム（AlN）基板上 LED に対するナノフォトニック光取出し技術をさらに発展させ、シングルチップ LED あたりの光出力を増加させることで高出力 265nm 帯 DUV-LED の開発に成功しました（図 1）。作製した DUV-LED は、室温・連続駆動の条件下で従来市販 DUV-LED の約 10 倍の 500 mW を超える出力が観測され、これまでに報告されているシングルチップの UV-C 領域の DUV-LED において最も高い出力を示しました。

液体中の SARS-CoV-2 に対する DUV-LED の不活性化効果を調べるため、スライドガラスの上に SARS-CoV-2 懸濁液（注 2）を円形に広げ、真上から DUV-LED 光を照度 54mW/cm² で照射しました。ウイルス懸濁液を回収しプラークアッセイ（注 3）を用いてウイルス力価を

測定すると、ウイルスの感染力は照射 0.167 秒後に 1/1000、0.270 秒後に 1/10000、0.387 秒後に 1/100000 に減少しました。各タイムポイントにおける照射光量は、それぞれ 9.02 mJ/cm², 14.58 mJ/cm² および 20.90 mJ/cm² であり、DUV-LED 光による SARS-CoV-2 懸濁液の D_{99.9} (注 4) は 9.02 mJ/cm² でした(図 2、表 1)。

続いて SARS-CoV-2 エアロゾルに対する DUV-LED の効果を調べるため、バイオセーフティレベル 3 施設の安全キャビネット内にウイルスエアロゾルの解析が可能な試験チャンバーを設置しました。試験チャンバー内にはネブライザーを用いて SARS-CoV-2 を含むエアロゾル (94.9%以上の粒子が直径 2 μm 未満) を生成し、DUV 領域の光透過性の極めて高い合成石英で作製された管を介してエアロゾルをエアサンプラーで採取しました。DUV-LED 照射システムは合成石英管内を通過するエアロゾルを石英管の外側から光照射できるように設置され、エアサンプラーの吸引流量を調整することでエアロゾルが照射領域を通過する時間 (照射線量) を制御しました。エアロゾル化した SARS-CoV-2 は、DUV-LED 照射により、0.0043 秒 (0.23 mJ/cm²) 後に 1/10、0.0074 秒 (0.40 mJ/cm²) 後に 1/100、そして 0.019 秒 (1.04 mJ/cm²) 後に 1/1000 にまで急速に不活性化されました(図 3、表 1)。SARS-CoV-2 エアロゾルの D_{99.9} に必要な総線量は 1.04 mJ/cm² であり、DUV-LED 照射は、ウイルスエアロゾルに対しては、ウイルス懸濁液に比して約 9 倍有効であることが示されました。

本研究では高出力 DUV-LED の照射効果を定量的に検証するために、石英管の内径サイズ (20mm) と同じ、直径約 20mm の範囲で光照射量が均一になるように LED・レンズ光学系を調整し、試験サンプルと光学系との距離 (ワーキングディスタンス) を 550mm で固定して実験を実施しました。LED 光源の照射範囲ならびに照射距離については DUV-LED のチップ数、出力、照射時間等を調整することで、使用用途に応じた最適化が可能です。DUV-LED のウイルス不活性化用途における実用化の際には、人体への安全性を確保するために、皮膚や目への直接の照射を避ける運用が必要となります。ウイルスエアロゾルの不活性化に対しては、空気清浄機やエアコン等の内部に組み込むなど、安全な遮蔽機構を有する製品を開発し利用していくことが有望です。

本研究により、波長 265nm 帯のシングルチップ 500mW 高出力 DUV-LED 照射システムを用いることで液体中およびエアロゾル中の SARS-CoV-2 を迅速に不活性化できることが実証されました。265nm 高出力 DUV-LED は、低コスト・高効率に物体表面の殺菌に利用できるほか、空気清浄機やエアコンに組み込むことで、エアロゾル中の SARS-CoV-2 の迅速な不活性化を実現し、感染拡大の防止や公衆衛生の向上に寄与することが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：*mSphere* (3 月 17 日オンライン版)

論文タイトル：A 265-Nanometer High-Power Deep-UV Light-Emitting Diode
Rapidly Inactivates SARS-CoV-2 Aerosols

著者：Hiroshi Ueki, Mutsumi Ito, Yuri Furusawa, Seiya Yamayoshi, Shin-ichiro Inoue*, and
Yoshihiro Kawaoka*

DOI：10.1128/msphere.00941-21

URL：<https://doi.org/10.1128/msphere.00941-21>

6. 問い合わせ先：

<研究に関するお問い合わせ>

東京大学医科学研究所

ウイルス感染部門

特任教授 河岡 義裕（かわおか よしひろ）

E-mail : kawaoka@ims.u-tokyo.ac.jp

* ウイルスに関連するご質問に関しては
こちらにご連絡ください。

国立研究開発法人情報通信研究機構

未来 ICT 研究所 神戸フロンティア研究センター

深紫外光 ICT 研究室

室長 井上 振一郎（いのうえ しんいちろう）

E-mail : s_inoue@nict.go.jp

* 深紫外 LED に関連するご質問に関しては
こちらにご連絡ください。

<報道に関するお問い合わせ>

東京大学医科学研究所

国際学術連携室（広報）

Tel : 090-9832-9760

E-mail : koho@ims.u-tokyo.ac.jp

国立研究開発法人情報通信研究機構

広報部 報道室

Tel : 042-327-6923

E-mail : publicity@nict.go.jp

7. 用語解説：

（注1）深紫外 LED

概ね 200～300 nm の波長帯（深紫外領域）の光を発する半導体発光ダイオード（LED : light-emitting diode）のこと。

（注2）懸濁液

本研究においては試験ウイルスが浮遊している液体。

（注3）プラークアッセイ

感染性のウイルス数を測定するための手法の一つ。試験培養細胞がウイルスに感染してはがれ落ちたことにより出来た穴（plaque）の数を測定します。

（注4）D_{99.9}

試験ウイルスの 99.9%を不活性化するのに必要な積算光量のこと。

8. 添付資料：

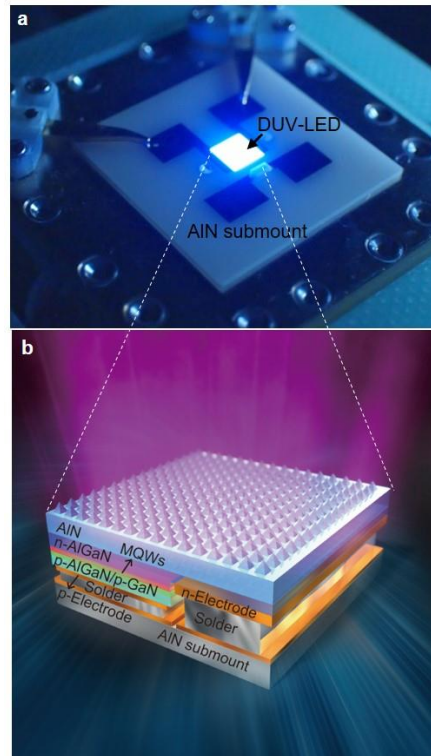


図1 本研究で使用した DUV-LED 照射装置

- (a) AlN サブマウントとヒートシンクに搭載されたシングルチップ DUV-LED の外観写真。
 (b) 大面積 AlN ナノフォトニック光取り出し構造を持つ DUV-LED 層構造の模式図。

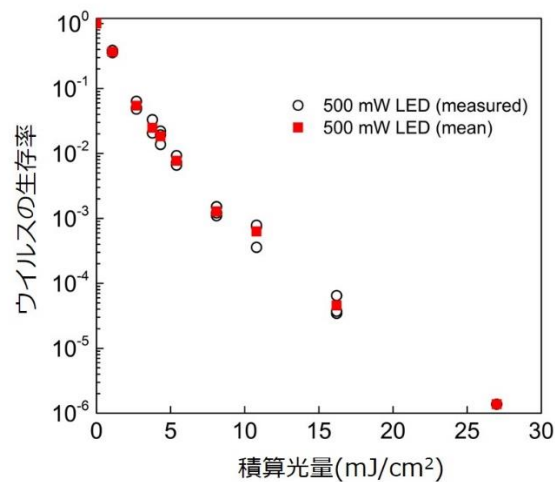


図2 SARS-CoV-2 懸濁液に対する DUV-LED の不活性化効果

SARS-CoV-2 懸濁液をスライドガラス上に円形に広げ、DUV-LED 照射直後に回収し、ウイルス感染価を評価しました。白丸は高出力 500mW DUV-LED を照射した際の各実験の測定値、赤丸は平均値を示します。

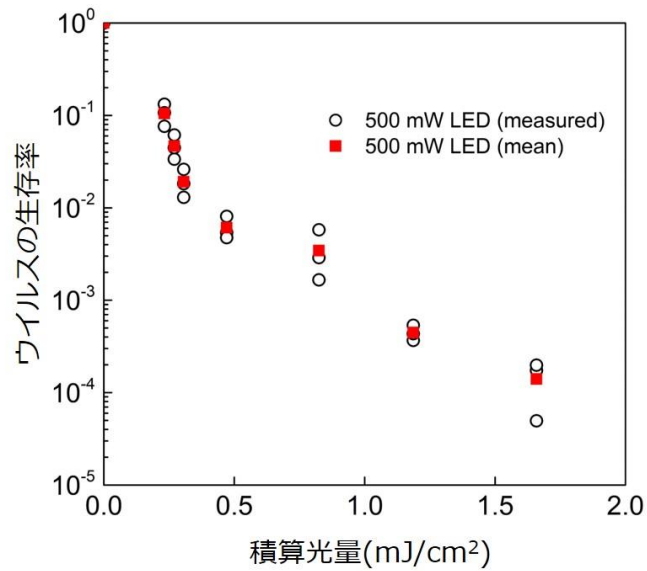


図3 SARS-CoV-2 エアロゾルに対する DUV-LED の不活性化効果

SARS-CoV-2 エアロゾルを BSL3 施設内の試験チャンバー内に生成し、DUV-LED 光を照射しながらエアサンプラーで回収した後、プラークアッセイを用いてウイルスの感染性を評価しました。白丸は高出力 500mW DUV-LED を照射した際の各実験の測定値、赤丸は平均値を示しています。

		ウイルス生存率 (%)				
		10	1	0.1	0.01	0.001
265 nm DUV-LED 照射時間 (s)	懸濁液	0.040	0.094	0.167	0.270	0.387
	エアロゾル	0.0043	0.0074	0.0193	–	–
265 nm DUV-LED 積算光量 (mJ/cm²)	懸濁液	2.16	5.08	9.02	14.58	20.90
	エアロゾル	0.23	0.40	1.04	–	–

表1 SARS-CoV-2 の生存率と DUV-LED の照射時間(秒)ならびに総照射量(mJ/cm²)の関係
図2および図3の実験平均値より算出しました。