

ウイルス不活化技術のためのUV空間照射光量と気流の連成解析 — シミュレーションを活用した開発プロセスの変革 —

Interaction Analysis of Spatial UV Illumination Intensity and Airflow for Virus Inactivation Technology: Development Process Transformation Using Simulation

松本 伸 MATSUMOTO, Noboru

浅田 規 ASADA, Tadashi

大栗 延章 OGURI, Nobuaki

近年、感染症対策のため、換気の重要性が再認識されているが、換気量の増加により、夏季や冬季における空調機器の消費エネルギーが増大する問題が生じている。そこで最近では紫外線が新たなウイルスの不活化手法として注目されている。紫外線を用いた微細なウイルスの不活化効果の検証は時間を要するだけでなく、安全性への配慮も必要である。今回、迅速かつ安全に、ウイルス不活化の性能評価のためのUV空間照射光量と気流の連成解析技術をDXの取組みの一つとして構築した。

Recently infectious disease prevention measures have reminded us of the importance of ventilation with outdoor air. However, the increased amount of ventilation causes the more energy consumption of air conditioning systems in the summer and winter. Ultraviolet light has attracted attention as a new countermeasure to inactivate virus. However, the verification of the inactivation effect of ultraviolet light on microscopic viruses requires not only a lot of time but also to safety consideration. As one of the approaches to DX, we have fast and safely built the interaction analysis of spatial UV illumination intensity and airflow to evaluate the performance of virus inactivation.

1 まえがき

富士電機のDX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）の取組みとして、多様化するお客さまのニーズに迅速に対応するため、製品開発初期のアイデア段階における構想検討や効果検証でシミュレーションの活用を推進している。

富士電機は、喫緊の課題である新型コロナウイルス感染症（COVID-19）対策に貢献するため、ウイルスを不活化する空気清浄機を開発している。この機器の開発において、高精度シミュレーションを積極的に活用してプロトタイプによる検証を必要最小限に留めることにより、製品開発プロセスの短縮と製品仕様の決定を行っている。

本稿では、この開発プロセスで活用するために開発したUV空間照射光量と気流の連成解析技術について述べる。

2 COVID-19をめぐる感染予防とその方法

近年、COVID-19をはじめとした感染症の対策のため、換気の重要性が再認識されている。CDC（アメリカ疫病予防管理センター）による感染予防に関するガイドライン⁽¹⁾によれば、感染病棟（既存施設）は換気回数6回/時間（新築施設：12回/時間）が推奨されている。また、一般的な店舗や飲食店をはじめとする施設において、CO₂濃度を基準とした法定換気量以上の大幅な換気が求められるようになった。しかし、換気量の増加により、夏季や冬季における空調機器の消費エネルギーが増大する問題が生じている。その対策には、換気による室内の空気の入替えではなく、空気清浄機により空気を清浄化することが有効である。浮遊ウイルスを含む空気を清浄化する方法は、大きく二つに分類される。一つはフィルタリングによる浮遊ウ

イルスの除去⁽²⁾であり、もう一つは物理的または化学的作用によるウイルスの不活化（ウイルスが増殖できない状態）である。

浮遊ウイルスの除去には、HEPAフィルタ（High Efficiency Particulate Air Filter）や電気集じん機が使用されている。また、浮遊ウイルスの不活化の手法は、過酸化水素や二酸化塩素の噴霧、オゾンの拡散などが挙げられる。しかし、これらの浮遊ウイルス不活化の手法は人体への悪影響を避けるため濃度や使用条件に制限があり、世界保健機関（WHO）は推奨していない。そこで、最近では殺菌用途で使用され、人体に悪影響を及ぼす物質が残留しない波長100～280nm⁽⁴⁾の紫外線（UV-C：Ultraviolet C）が新たなウイルスの不活化手法として注目されている。図1に示すように、菌やウイルスに対して、共通して波長260～270nm領域で不活化効果が高いことが分かる。すなわち、この波長領域の光源の使用が、UV-Cによる最適不活化手法と言える。なお、図1では最大値を1と

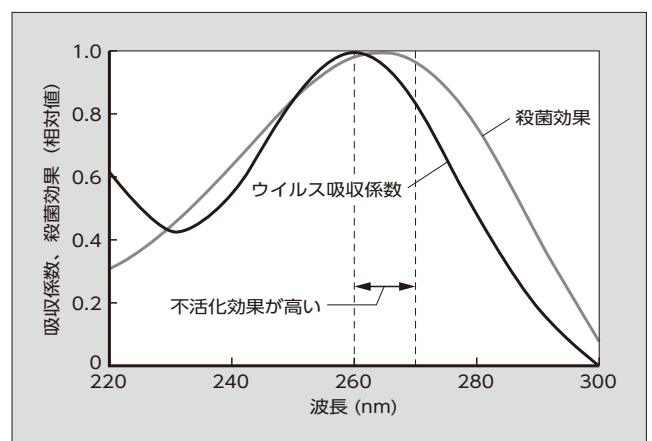


図1 ウイルスの紫外線吸収係数と殺菌効果⁽⁵⁾⁽⁶⁾

して基準化している。

③ COVID-19 ウイルスの不活化の解析評価上の問題

開発に際し、電気集じんによるウイルスの除去の効果は、一般的なフィルタリングの性能評価で確認できる。その一方、UV-C による浮遊ウイルスの不活化の評価は、空気をサンプリングしてウイルスを培養する必要がある。しかし、ウイルスは単体では増殖しないので感染した細胞の観察や PCR 法による DNA を増殖させて観察するなど、時間を要するだけでなく、安全性への配慮も必要である。ところが、UV-C によるウイルス不活化の性能評価を DX 化して行うことは、迅速かつ安全な方法である。

ウイルスの不活化は、ウイルス粒子における UV-C の積算受光量が不活化に十分な量を超えたかどうかで判定できる。すなわち、周囲の空間から空気清浄機内に吸引された微細なウイルス粒子が装置内を移動し、再び周囲の空間に放出されるまでに受けた UV-C の総受光量が重要である。

壁面などに付着したウイルスに UV を照射して不活化する場合、汎用の光学解析ソフトウェアを利用して比較的容易に効果を推定することができる。図 2 に示すように、対象面への照射光量は、光源から発射されたある出力の光線が対象面に到達する光線数と出力の積で算出できる。しかし、空間をランダムに浮遊する微細なウイルスの場合、受光量は位置によって変化すると同時に、UV を全方向から受けるため受光量を単純に算出できない。

その一方、汎用の流体解析ソフトウェアは、乱流によりランダムに動き回る微粒子（仮想粒子を含む）を追跡して流跡を計算できる。流体解析ソフトウェアの中で、輻射（ふくしゃ）（放射）の原理を利用して対象物への照射光量の解析機能を持つものもあるが、光学解析ソフトウェアと同様に対象面の解析しかできない。また、光学解析ソフトウェアに比べて計算時間が長く精度も劣るため、照射光量の解析自体に適していない。

これにより、現時点では単一の汎用ソフトウェアでは浮遊ウイルスの不活化効果を解析できない。

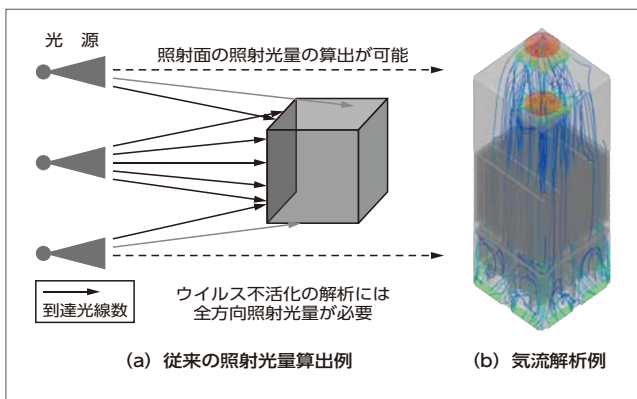


図 2 従来の照射光量算出例と気流解析例

④ 浮遊ウイルスの不活化検証のための課題

ランダムに浮遊するウイルスの不活化検証のためには、個々のウイルス粒子が移動する流跡に沿って、空間の位置（座標）によって変化する全方位からの UV 照射光量を積算（積算受光量）する必要がある。

その実現のためには、連成解析によって次の二つの課題を解決する必要がある。

- (a) 光学解析における、解析空間のあらゆる位置における空間照射光量データの算出（空間を微小立法体に分割し、おのおのの 6 面への照射光量の和を求める）
- (b) 空間照射光量データの流体解析空間への割り付け、および粒子の軌跡に沿った受光量の積算

⑤ UV 空間照射光量と気流の連成解析手法の概要

図 3 に示すウイルスを不活化するための空気清浄機の原理試作機を例に、今回の連成解析について述べる。

図 4 に UV 空間照射光量と気流の連成解析手法の概略のフローを示す。本連成解析では、照射光量の解析には汎用照明解析ソフトウェア LIGHTTOOLS^(注1)を使用し、気流解析には汎用熱流体解析ソフトウェア Ansys Fluent^(注2)を使用した。次に、図 4 の STEP1 から STEP5 について連成解析の手順を述べる。

(1) STEP1

照明解析ソフトウェアで所望の形状データを作成し、光源情報や物性値などの条件設定を行う。

(2) STEP2

面データから空間照射光量データを抽出するため、3 軸方向（幅、奥行き、高さ）に等間隔に多数の立方体を形成

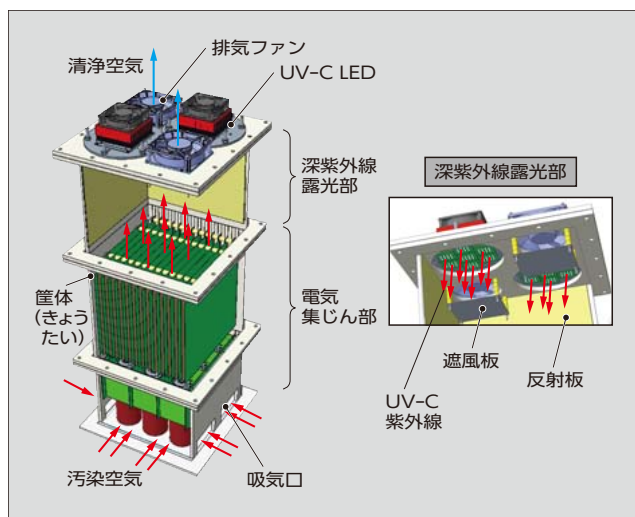


図 3 原理試作機の構成 (UV-C LED を対角配置)

〈注 1〉 LIGHTTOOLS : Synopsys, Inc. の商標または登録商標

〈注 2〉 Ansys Fluent : ANSYS, Inc. の商標または登録商標

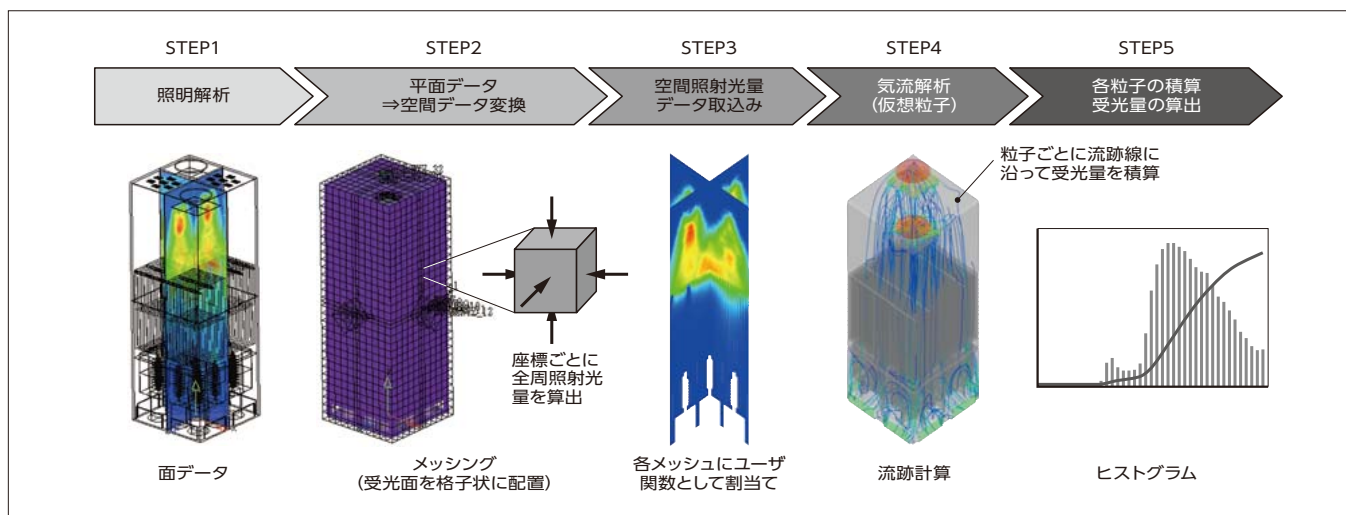


図4 UV空間照射光量と気流の連成解析の流れ

するように受光面を作成する。微粒子のウイルスは、装置壁面の反射光などにより全周方向から受光するため、各立方体の6面の照射光量の総和を取る。

(3) STEP3

流体解析ソフトウェア側では、照明解析と同一の形状モデルでメッシュングを行い、吸気や排気などの基本的な境界条件を設定する。そして、照明解析で抽出した空間照射光量データをユーザ関数として流体解析用メッシュに配置する。

(4) STEP4

吸気口から仮想粒子を発生させて、装置内部の気流解析を行う。今回、仮想粒子の乱流拡散（ランダム性）を考慮した擬似非定常計算を採用し、計算負荷を極力抑制した。

(5) STEP5

おのおのの仮想粒子の照射光量を吸気口から排気口までの流跡に沿って時間で積分し、積算受光量を算出する。算出した積算受光量からヒストグラムを作成することで、どれくらいの割合の粒子（ウイルス）が不活化に必要な光量を受けているか判断できる。

上述した UV 空間照射光量と気流の連成解析により、空間に浮遊するウイルスを不活化するための空気清浄機の構成検討を短期間で完了できるようになった。

6 連成解析結果と実測結果

原理試作機〔LED (Light Emitting Diode) を対角に配置〕において、紫外線 LED の条件を変えた場合の連成解析による不活化効果を図5に示す。狭角配光のLEDと比較し、広角配光のLEDを使って均一に照射することやLEDを高出力とすることによって積算受光量のヒストグラムのピークは高い値になり、不活化効果は向上する。例えば、インフルエンザウイルスの場合、 6.6 mJ/cm^2 ⁽³⁾ (COVID-19のウイルスの場合 5.1 mJ/cm^2)⁽⁷⁾ を超える積算受光量があれば不活化される。このように、全粒子のうち何%が不活化されるかを解析上で検証することができ

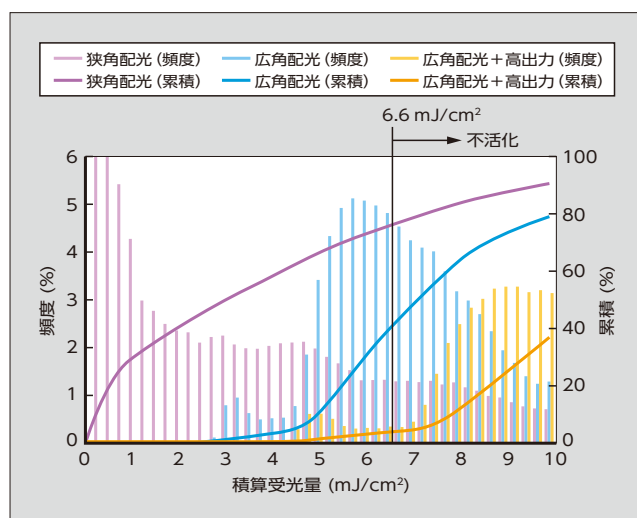


図5 積算受光量の解析例

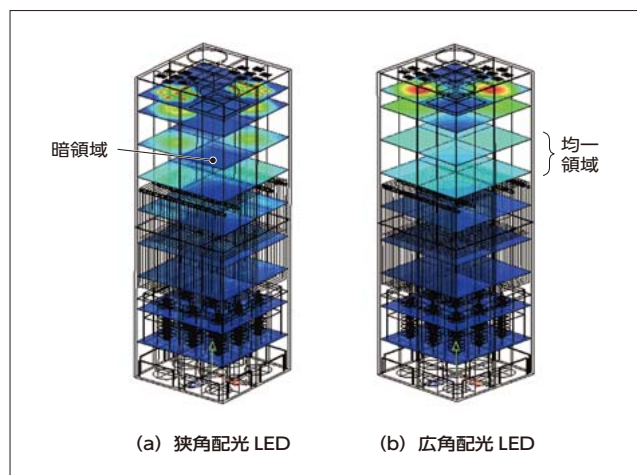


図6 各測定位置における実測と解析の照射光量の比較

る。また、図6に示す照射光量の解析結果から、空間照射光量分布の定性的な良否を判断できるため、開発の初期は照射光量解析だけを使った検討も有用である。

次に、露光部の最遠断面（電気集じん部との境界面）に

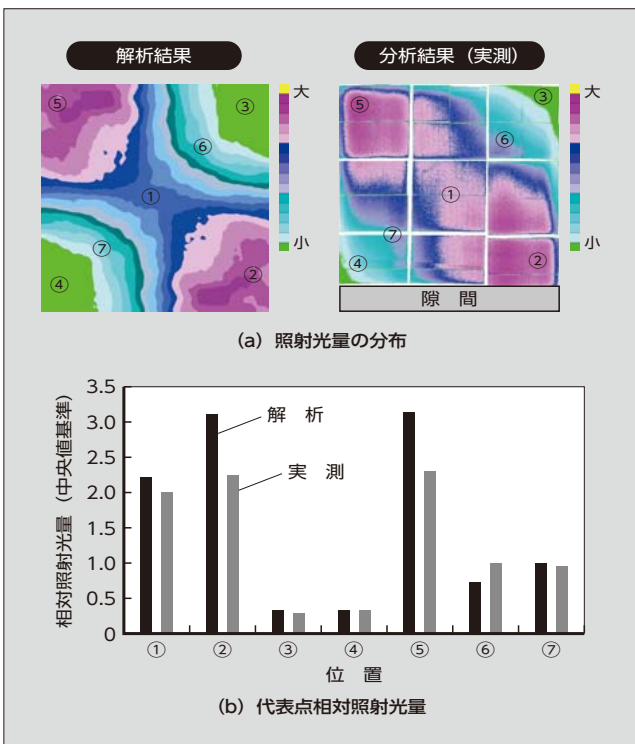


図7 露光部最遠断面の実測と解析の照射光量の比較

おける解析と実測の照射光量分布の比較を図7(a)に示す。実測では、富士フィルム製の UV シートを用いて測定した積算受光量を露光時間で除して照射光量を算出した。この UV シートの感度は波長に依存性があるが、感度補正は加えていない。図7(a)より、照射光量分布は定性的な一致が見られ、全体的によく再現できている。ただし、中央域①の値は解析値の方がくぼんだ分布となった。傾向の詳細比較のため、代表点の照射光量の中央値を1とした相対照射光量を図7(b)に示す。図より、中央域①が小さいのではなく、高照射光量域②、⑤がより大きいことを示している。これは、解析条件（特に LED 出力分布）が理想条件（LED 中央出力が高い）を使用した影響と考えられる。現時点では使用する LED が未決定であり、汎用的な手法を構築することを目的としたので、LED の光量分布は一般的に使用されるランバート配光としている。実際の設計時には、LED の固有特性（光出力、配光）を使用することによって差が軽減できる。

7 製品開発への適用

開発した UV 空間照射光量と気流の連成解析は、さまざまな活用方法がある。空気清浄機を例にとると、電気集じんによるウイルスの捕捉効果と UV-C の露光によるウイルスの不活化効果を考慮した検討や設計が可能となる。従来、平均風速とある特定の断面の平均照射光量から不活化効果を推定していたが、積算受光量で精度よく試算できるため、試作回数を低減し開発期間を短縮できる。空気清浄機の通過空気の清浄化率がシミュレーションできるようになると必要な換気量も算出でき、換気量の削減に貢献で

きる。例えば、空気清浄機は室内空気を直接清浄化するため、換気による空気清浄（換気回数 6 回/時間）と比べて空調機器の省エネルギーが年間 40% 程度可能である。さらに、部屋全体を空気清浄していたものを、感染症患者や疑いのある人と接する機会が多い医療従事者の近傍に直接高清浄空気を供給し、医療従事者への感染を抑制し安全・安心を提供することもできる。

シミュレーションのさらなる活用として、実際の設置環境や顧客ニーズに合わせて、最適な製品構成や室内における設置位置などの検討が考えられる。例えば、異なる 2 種類の空気清浄機のイメージを図 8 に示す。病室や会議室などの比較的狭い空間に手軽に置いて空気清浄したい場合は、原理試作機と同様な自立式が適していることがシミュレーションで明らかになっている。その一方、商業施設など売り場面積や居住空間を広く確保したい場合は、壁面に設置可能な薄型（省スペース）のモジュール式が適していることが分かった。

現状の試作機は自立式で設計、試作を進めている。なお、本製品開発、実証の一部は、環境省“革新的な省 CO₂ 型感染症対策技術等の実用化加速のための実証事業”により実施しており、今後は大腸菌ファージなどを用いた空気清浄性能評価およびフィールド実証などについても実施する予定である。

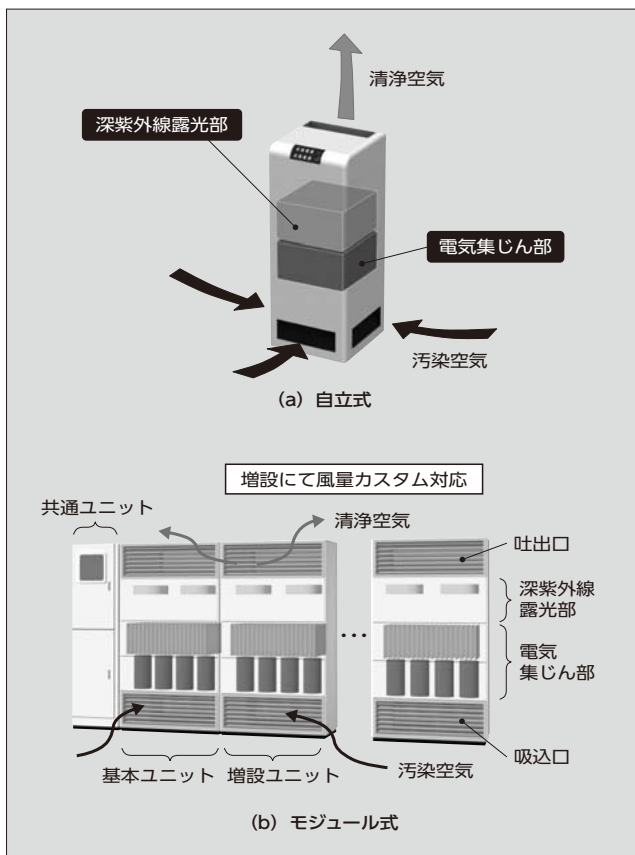


図8 空気清浄機の製品化イメージ

⑧ あとがき

ウイルス不活化技術のための UV 空間照射光量と気流の連成解析について述べた。

富士電機の DX の取組みの一つであるシミュレーションの活用は、製品開発前の技術検証やさまざまなお客さまのニーズへの迅速な対応に貢献している。

今後もシミュレーションをさらに活用して富士電機の DX を推進し、性能が十分に検証された安心して使える製品・サービスを提供していく所存である。

参考文献

- (1) CDC (2003). Guidelines for environmental infection control in health-care facilities. Morbidity and Mortality Weekly Report, 52 (RR-10).
- (2) 南野脩ほか. “小型空気清浄器の性能評価とその応用に関する研究”. 空気調和・衛生工学論文集, no.69, 1998.
- (3) Kaufman, J.E. IES Lighting Handbook 5th Ed. 1972.
- (4) CIE S 017 : 2020 International Lighting Vocabulary, 2nd.
- (5) M. Luckiesh, “Applications of Germicidal”, Erythema, and Infrared Energy. p.115, 1946.
- (6) 柴山祥枝. “核酸 (DNA・RNA) の定量法”. ぶんせき.

no.7, p.268-274, 2018.

- (7) Shimada, H. et al. “Efficacy of 265-nm ultraviolet light in inactivating infectious SARS-CoV-2”. Journal of Photochemistry and Photobiology 7 (2021) 1000050.



松本 伸

店舗省エネルギーシステム技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部主査。日本機械学会会員。



浅田 規

店舗省エネルギーシステム技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部長。日本食品工学会会員。



大栗 延章

光化学を用いた殺菌洗浄技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部主査。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。