

オゾン水ミストを用いた室内浄化処理の定量的検討

Quantitative study of ozone water mist for indoor purification treatment

○錦 善則^{*,**}、内藤博敬^{*,***}、中室克彦^{*,****}

*日本医療・環境オゾン学会、**デノラ・ペルメレック株式会社、

静岡県立農林環境専門職大学、*摂南大学名誉教授

要旨

本報告では、ウイルスを含む飛沫微粒子に対するオゾン水ミストによる不活化について、いくつかの前提条件の下で衝突モデルを提案し定量的に検討した。その結果、ミスト中のオゾン水濃度、サイズおよび個数密度によって不活化を達成する ct 値が大きく依存し、これらを最適な範囲に制御することで不活化が達成されることを見出した。

This paper reports the results of a quantitative study of inactivation by ozone water mist on droplet particles containing viruses by proposing an appropriate convection model under several assumptions and shows that the ct value to achieve inactivation varies with the ozone water concentration, size, and number density in the mist and that inactivation is achieved by controlling these values.

キーワード : Virus inactivation, Ozone water mist, ct value estimation

1. はじめに

COVID-19感染症を引き起こすSARS-CoV-2は、アルコール類、塩素などの酸化剤、フェノール誘導体、第4級アンモニウムなどの化学消毒剤を用いて処理されているが、オゾンによる同ウイルスに対する優れた不活化効果もいくつかの研究機関から報告された¹⁻²⁾ことで、実用的なオゾンの活用方法の確立が期待されている。空気感染源となりうる飛沫微粒子は、環境条件に影響されながら浮遊するため、詳細な解析が行われる³⁻⁴⁾と同時に、これを除去・分解する手段が検討された⁵⁾。

これまでの研究において、SARS-CoV-2のオゾンガスの不活化効率はお水に比較して小さく、その原因としてラジカル経由の分解反応が関与している可能性について、気相と液相の拡散律速モデルを用いて報告した⁶⁾。また、飛沫微粒子に対するオゾンガスによる不活化の可能性について、飛沫に溶解・拡散するオゾンによる不活化モデルを提案し、大きい飛沫ほどその直径の2乗に比例して不活化時間が増大することを報告した⁷⁾。

ミクロンサイズの微粒子は拡散による物質移動が遅いため、空気対流による衝突を前提として検討する必要があり、微粒子サイズ、存在密度における衝突頻度を考慮した上で、実質的に有効な用法、用量の確立が重要である。

ここでは、感染源となりうる飛沫微粒子に対するオゾン水ミストによる不活化の可能性について、いくつかの前提条件において衝突モデルを提案し定量的に検討した。

2. 方法

飛沫微粒子モデル

唾液中に含まれる有機物濃度 C_{org} (mg cm^{-3}) は数 g L^{-1} レベルであり、その総量 Q_{org} (g cm^{-3}) はウイルス由来の有機物量に比較して十分に多い。有機物量が多い場合、特に低濃度の代替消毒物質では、 Q_{org} によるオゾン消耗を想定することは実用的な前提条件といえる。ウイルスは単独ではなく飛沫・飛沫核として浮遊している⁸⁾と仮定し、 C_{org} (mg cm^{-3}) は $2,500 \text{ mg L}^{-1}$ ($=2.5 \text{ mg cm}^{-3}$)、飛沫微粒子密度は $10,000 \text{ 個 L}^{-1}$ ($=10 \text{ 個 cm}^{-3}$) に固定した。解析対象ウイルスの飛沫微粒子径 D_p は $0.1 - 1 (\mu\text{m})$ の範囲（飛沫核として小さい範囲に限定）とした。 Q_{org} は(1)式で与えられる。

$$Q_{org} = C_{org} (4/3) \pi (D_p/2)^3 \quad (1)$$

オゾン水ミストモデル

不活化のためのオゾン水濃度 c は $1 - 10 (\text{mg L}^{-1})$ の範囲とし、オゾン水ミスト密度 d は $10,000, 100,000, 1,000,000 \text{ 個 L}^{-1}$ ($= 10, 100, 1,000 \text{ 個 cm}^{-3}$)、ミスト径 $2r$ は $0.1 - 10(\mu\text{m})$ の範囲で解析した。1 個のミストに存在するオゾン総量 Q_{ozone} (mg cm^{-3}) は(2)式で与えられる。

$$Q_{ozone} = c (4/3) \pi r^3 \quad (2)$$

衝突モデル

衝突断面積 $S(\text{cm}^2)$ は、オゾン水粒子径に基づいて算定した。粒子移動速度 $u(\text{cm s}^{-1})$ は、バルクの対流速度に比例して増加と仮定し 100 cm s^{-1} とした。このときの衝突頻度 $p(\text{s}^{-1})$ は $p = \pi u S d$ で表わされ、衝突時間は $\tau = p^{-1}(\text{s})$ より(3)式で与えられる。

$$\tau = (\pi u S d)^{-1} \quad (3)$$

図 1 に衝突モデルを示した。粒子の衝突はオゾン水粒子、飛沫微粒子とも 1 対 1 で進行すると仮定する。 $n+1$ 回目の衝突時間 τ_{n+1} 、密度 d_{n+1} 、断面積 S_{n+1} は、それぞれの n 回目の値を用いて(4)式で与えられる。

$$\tau_{n+1} = (\pi u S_n d_n)^{-1}, \quad d_{n+1} = d_n/2, \quad S_{n+1} = 2^{2/3} S_n \quad (4)$$

ミスト径 $2r$ が大きい ($S = \pi r^2$) ほど、また、密度 d が大きいほど、 τ は小さくなる。 n 回の衝突により合一したミスト内の Q_{ozone} は、有機物との反応前の段階では n^2 に比例して増加し、(4)式で与えられる。

$$Q_{ozone} = c n^2 (4/3) \pi r^3 \quad (5)$$

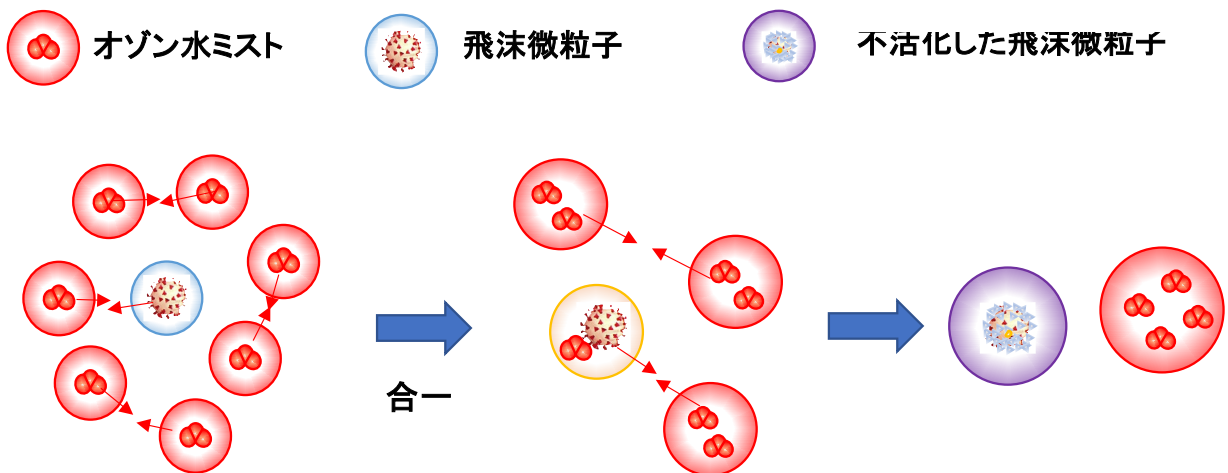


図-1 飛沫微粒子に対するオゾン水ミストの衝突・合一モデル

不活化モデル

今回の反応モデルでは、オゾンミストと飛沫微粒子が衝突し、 Q_{org} と反応・消耗しつつ不活化が進行すると仮定し、ガス量 Q_{ozone} と Q_{org} の比率 R を(6)式で定義する。

$$R = Q_{ozone} / Q_{org} \quad (6)$$

これまで報告されている多くの不活化試験データに基づく、オゾン水による不活化は $R=1$ （重量比）以上であれば達成される⁹⁾。例えば、飛沫微粒子1個に対して、同サイズの 1mg L^{-1} のオゾン水ミストは2,500個（50回分の衝突）、10倍のサイズであれば2.5個（2.5回分の衝突）の合一が必要となる。 $R=1$ が達成するための n を求め、 n 回衝突までの積算時間 $\Sigma \tau = t$ を求め、これに c を掛け ct 値を算定した。

3. 解析結果

図2に R 値に対する ct 値の変化を示した。不活化に十分な $R=1$ より過剰にオゾン水ミストが存在するほど不活化時間が減少する傾向を定量的に示している。図3に $R=1$ におけるオゾン水に対する ct 値の変化を示した。濃度が小さいほど d が増加するため、衝突時間と ct 値が減少するが、 0.5 mg L^{-1} 付近より小さい範囲では衝突回数が増加するため、 ct 値はかえって大きくなる。図4に $R=1$ に固定したときのオゾン粒子サイズ $2r$ による ct 値の変化を示した。増加に伴い ct 値は減少し、濃度依存性があることを示している。

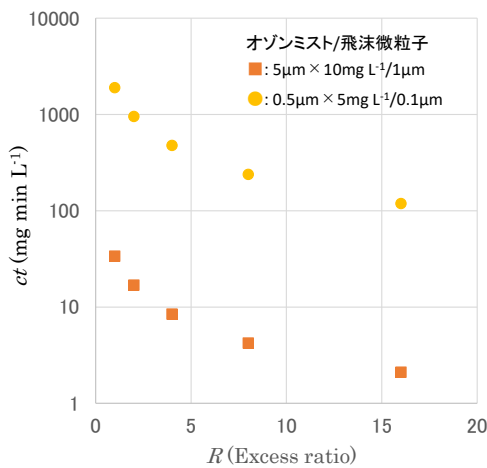


図-2 R 値に対する ct 値の変化

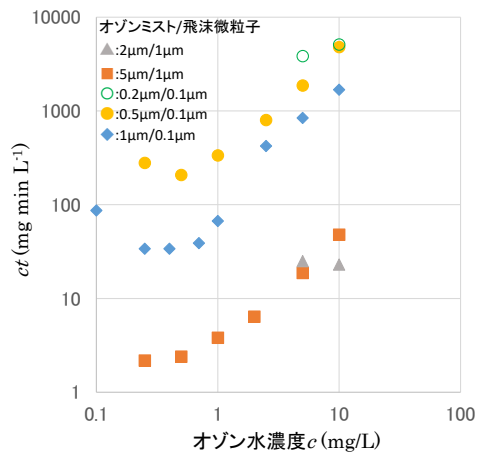


図-3 $R=1$ における c に対する ct 値の変化

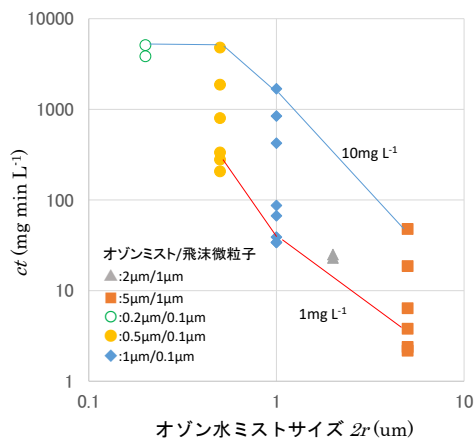


図-4 $R=1$ における $2r$ に対する ct 値の変化

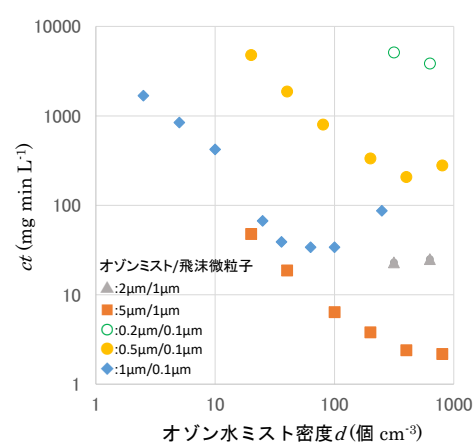


図-5 $R=1$ における d に対する ct 値の変化

図5は $R=1$ に固定したときのミスト個数密度 d に対する ct 値の変化を示した。ミスト密度の増加に伴い衝突時間が短縮することで ct 値は減少するが、密度が大きすぎると濃度が小さい条件が支配的になるため、 ct 値がかえって増加する。

ガスによる不活化結果との比較

同量の有機物を含む $D_p = 1\mu\text{m}$ の飛沫微粒子に対して、 0.05ppmv のガスでの不活化時間 t は 133min であると算定された⁴⁾。 $2r = 5\mu\text{m}$ のオゾン水ミストでの解析結果の一例を図6に示したが、 $R=1$ では 9min 以下、 $R=2$ では 2min 以下となり、ミスト条件により実用的に不活化が達成しうる可能性が示唆された。

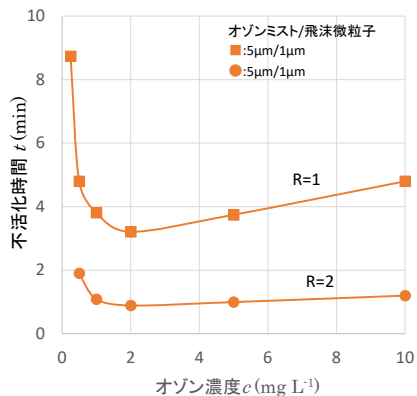


図-6 c に対する不活化時間 t の変化

4. 総括

感染源となりうる飛沫微粒子に対するオゾン水ミストによる不活化について、対流による衝突機構に基づいて ct 値を算定した結果、適切なミスト条件（濃度、サイズおよび個数密度）であれば、達成しうる可能性が示唆された。本解析結果はウイルスに限らず微生物を対象とする室内浄化にも応用可能である。オゾン水を用いた不活化では適切なミスト生成供給を制御することが重要であり、ユーザーが満足する有効性と安全性を担保したオゾンの利用方法、装置仕様が提供されることを期待したい。

参考文献

1. K. Yano, R. Nakano, Y. Suzuki, A. Nakano, K. Kasahara and H. Hosoi, J. Hosp. Infect., 106: 837-838 (2021).
2. K. Nakamuro, H. Naitou, Y. Nishiki, H. Nakata, M. Kanai, and J. Hirotsuji, Ozone, Science & Engineering, 44 (2):1-9 (2022).
3. Murakami M, Miura F, Kitajima M, Fujii K, Yasutaka T, etc., Microbial Risk Analysis, 100162 (2021).
4. 向阪 保雄、野村 俊之、内藤 牧男、J. Soc. Powder Technol., Japan, 57, p.526-529 (2020).
5. 西村秀一、林宏行、浦繁、阪田総一郎、環境感染誌 Vol. 32 No. 5, p.243-249 (2017).
6. Y. Nishiki, T. Imazu, K. Nakamuro, H. Naitou, and K. J. Aoki, Journal Microorg.Control, in submission.
7. 錦善則、第39回オゾン技術に関する講習会要旨、p.31-36 (2022).
8. 内藤博敬、谷幸則、上條章雄、城井康弘、辻むつみ、医療・環境オゾン研究、Vol.24, No.4, p.114-122 (2017).
9. 瀬戸章文、空気中のウイルスの捕集、応用物理学会 HP、https://www.jsap.or.jp/columns-covid19/covid19_1-2-4.