

# 二酸化塩素ガスによる 空間除菌方法について

株式会社 CLO2 Lab  
代表取締役 安部 幸治

## 1. 初めに

2020年1月から今日まで、新型コロナウイルス感染症が拡大しており、世界中の人々の生命・健康を脅かし、経済にも大きなダメージを与えている。一方、日本において、感染者総数は欧米その他諸国より少ないとはされているが、病院内や介護施設内において感染クラスターが多数発生しており、同様に家庭内で感染する割合も高いと報道されている。これら世界の国々の中でも、台湾は流行の初期段階から感染拡大を有意に抑制しており、経済においてもプラス成長を継続している、数少ない国の一つである。その感染拡大を抑制した原因として、初期に海外(中国・武漢)からの流入者をシャットアウトしたことが大きいといわれている。

それ以外にも感染リスク低減施策として、医療センターや病院などの屋内公共スペースに浮遊する微生物飛沫(バイオエアロゾル)の量を規制し、2010年頃から既に殺菌剤を空間に適用。積極的にバイオエアロゾルを不活化する実証研究が進められていることも、一因と考えられる<sup>1)</sup>。

日本においては、感染対策として示されているのはマスクや遮蔽板の設置、換気など、もっぱら防衛的な手段のみであり、台湾のように空間内に浮遊する、バイオエアロゾル内の菌類やウイルスを減少させるという、攻撃的な感染対策は示されていない。

また、経済に最もマイナスとなる、行動制限以外の有効な感染拡大防止策も示されておらず、政府補助金を含む事業規模は100兆円を超え、膨大なものとなっている。本来、不特定多数の人々が交叉する公共施設等においては、空気の衛生度が常に確保されているべきであるが、空間内に浮遊する微生物数(室内空気質の衛生度)に対する法規制はなく、バイオエアロゾル数の発表も行われていない。対策として、唯一推奨しているのは換気のみであるが、バイオエアロゾル数に関する数値的根拠は示されておらず、換気量は施設側の判断に委ねられている。そのため、吸入する空気中の微生物に対するリスクを感じる等、多くの人々が自己防衛のため、空気清浄機などの機器や二酸化塩素を放出成分とする商品等、様々な空間除菌商品を使用している。本稿では、そういった製品の中から、海外で消毒剤としての使用事例もある二酸化塩素に焦点を当て、空間除菌剤として二酸化塩素を使用する際の有効で、かつ安全な条件を示し、それを可能にする二酸化塩素製品に求められる要件を解説する。

## 2. 二酸化塩素ガスとは

### ①製法について

まず、二酸化塩素の製造方法について紹介する。出発原料は食塩と水であるが、そのプロセスは多段階に及ぶ。食塩電解により陰極側に水酸化ナトリウム NaOH と水素 H<sub>2</sub>、陽極側に塩素 Cl<sub>2</sub> を発生させる。水素はガスとして系外に放出され、残った水酸化ナトリウムと塩素から次亜塩素酸ナトリウムと食塩が発生する。この得られた次亜塩素酸ナトリウムに酸を添加して不均化を起こし、塩素酸ナトリウムを生成する。不均化の副生成物である食塩は同様のプロセスをたどり、塩素酸ナトリウムへと酸化され、徐々に塩素酸ナトリウムの濃度を高め、最終的には結晶として取得する。この取得した塩素酸ナトリウムに濃硫酸を反応させることで、二酸化塩素は生成する。

すなわち、コストをかけて酸化力を温和にし、次亜塩素酸ナトリウムの塩素弊害を解消した、人や環境に優しい特性に変換された物質が二酸化塩素ガスである。ただし、二酸化塩素ガスとしては流通が困難であるため、アルカリ溶液中で亜塩素酸イオンに還元し、利用している。

## ②二酸化塩素の特性と産業上の利用

二酸化塩素ガスは、微生物や臭気物質の減少効果に優れていること、有害なトリハロメタン等を生じない酸素系の物質であることが知られている。また、物理特性として水によく溶け込むこと、水溶液からの高い揮発性があることが知られており、水溶液としてもガスとしても利用が可能である。

例えば、食品や紙パルプ等の産業界では塩素に替わる物質として、塩素酸ナトリウムまたは亜塩素酸ナトリウム溶液を酸性化して、溶液中に二酸化塩素ガスを発生させて使用している。空間除菌に二酸化塩素ガスを適用する場合にも、原料となる亜塩素酸ナトリウム溶液を酸性化して有意に二酸化塩素ガスを発生させなければならないが、発生速度と発生濃度の制御による徐放性の確保が必要である。なお、過去に安定化二酸化塩素と称する、亜塩素酸ナトリウム溶液をゲル状に固めただけで酸性化されていないと思われる多くの製品に対し、二酸化塩素ガスが検出されないとの指摘があった(国民生活センター資料)<sup>2)</sup>。

## 3. 二酸化塩素ガス消毒の近年の研究と有効性

2020年11月5日、シュプリンガーネイチャー社出版の雑誌に掲載された論文<sup>3)</sup>によれば、空間消毒において許容値濃度(0.1ppm)の二酸化塩素ガス放散が有効であることが立証された。本稿では、この最新の論文を参照しながら、我々の検討結果も踏まえて、二酸化塩素ガスの有効性について解説する。

### ①屋内環境に浮遊するバイオエアロゾルに関する記述

病院の建物内は、アレルギー、喘息、感染症など多くの医学的疾患の温床となっており、病棟は閉鎖された空間であるため、微生物汚染のリスクが非常に高くなる。同リスクにより、患者、さらには病院職員が危険な状況にさらされている。このリスクを回避するために、米国国立労働安全衛生研究所(NIOSH)および米国産業衛生専門家会議(ACGIH)では、屋内環境のバイオエアロゾル粒子の合計を1000CFU/m<sup>3</sup>未満にする必要があるとしている。

台湾でも同様に、バイオエアロゾルの粒子合計について規制を設けている。年間を通じて温暖で湿度が高く、バイオエアロゾルの成長に非常に適した環境であるため、若干緩和しているものの、屋内公共スペースの細菌濃度は1500CFU/m<sup>3</sup>未満、真菌濃度は1000CFU/m<sup>3</sup>未満としている。これらの室内空気質(IAQ)を満たすための効果的な消毒方法は、解決すべき課題(Issue)として注目されている。

### ②ガス分子として働く二酸化塩素ガスの有用性についての記述

二酸化塩素ガスは、微生物の繁殖による影響を軽減するために、一般的に使用される消毒剤で、バクテリア、孢子、菌類、ウイルス、原生動物など、あらゆる微生物を破壊する能力がある。二酸化塩素は、室温で水に容易に溶解し、気化して環境全体に広がることで強力な消毒効果をもたらす。さらに二酸化塩素分子は、空隙に対して侵入しやすく、非常に徹底した消毒性能を有するとされている。なお、当論文<sup>3)</sup>によれば、「弱酸性次亜塩素酸水も良好な殺菌性を有する理想的な広域消毒剤ではあるが、水と食塩から生成された有効成分は水溶液として作用する」と記述されている。すなわち、揮発ガス分子として作用しないため、微粒子噴霧での使用しかできないということになる。

これに対し二酸化塩素は、ガス分子として水溶液から揮発し、有効濃度から規制値濃度で1m<sup>3</sup>当たり25~250京個という圧倒的多数の分子として空間に拡散される。そのため、微生物との接触効率が極めて高いことは明らかである。

一方の弱酸性次亜水に規制値はないが、揮発性が低く分子として作用しない。そのため拡散性は超音波加湿器等の装置の物理的な能力に依存し、微生物との接触効率は放出される水粒子の数に依存する。弱酸性次亜塩素酸水を噴霧するための超音波加湿器(20 畳用)を例に、1 時間当たりの噴霧粒子数を算出すると、1 時間当たり 980 億個 /m<sup>3</sup> の粒子を発生させていることになる。しかし、これは空間濃度 0.01ppm を維持している場合に、毎時発生している 12 京個 /m<sup>3</sup> の二酸化塩素ガス分子数との比較において、桁違いに少ない約 100 万の 1 であり、拡散性も桁違いに低くならざるを得ない(表 1)。

表1. 二酸化塩素の気相濃度と分子数

濃度	含有量	分子数		備考
		mmol/m <sup>3</sup>	個/m <sup>3</sup>	
0.10	0.28	4.2.E-03	2.50.E+18 (250京)	規制値濃度
0.01	0.03	4.2.E-04	2.5.E+17 (25京)	有効濃度

\*20°Cで測定した場合

### ③台湾で立証された実空間における二酸化塩素ガス消毒の有効性についての記述

当論文<sup>3)</sup>では、「人を退避させることのない許容値濃度(0.1ppm=0.28mg/m<sup>3</sup>)となる量の二酸化塩素ガスを、1日に2回放散することが、台湾 EPA のガイドラインにおける病院の病棟室内の空気質を満たす最も効果的な手段である」と示されている。

具体的には、既存の病院の感染病棟という実使用空間で、汚染された部屋において空間濃度 0.1ppm に相当する二酸化塩素ガスを発生させ、除菌したところ、弱酸性次亜塩素酸を噴霧した場合と比べて、優位に細菌と真菌のコロニー数を減らすことができたこと記載されている。当論文の内容から、人がいる状態の公共施設の空間や一般の居室内で、空気の衛生度の向上に貢献できる二酸化塩素ガスのポテンシャルが読み取れる。またこのことにより、人に許容される濃度でも、浮遊するバイオエアロゾルのみを失活させるという、空間除菌の用途に二酸化塩素ガスを活用できる可能性が示唆されている。

### ④二酸化塩素ガスの特異的な気相と水液相の移動特性について

二酸化塩素は、一般に利用できる酸化剤のうちで、高い揮発性と水溶解性を併せ持つ唯一の化合物である。その物性が、空間に浮遊するバイオエアロゾル内の微生物を失活化できた大きな要因である。

新型コロナウイルス感染症拡大の主な原因は、浮遊するウイルス飛沫を吸い込むことにあると米国疾病対策予防センター(Centers for Disease Control and Prevention : CDC)が発表した<sup>4)</sup>。この点においても、常温の水に多量に溶解する二酸化塩素ガスの特異的な物性が優位に作用する。水に易溶であるその性質により、ウイルスが液体の水に覆われた形状を取っている飛沫内にも、容易に溶け込んで効果を示す(弊社試験を後述)。すなわち、二酸化塩素分子は、ガスとして水に溶け込んだ状態から揮発して気相に飛び出し、元の水溶液より低い濃度の他の液体の水に溶け込む特性がある(図)。繰り返しになるが、この二酸化塩素の揮発性と水溶解性が、飛沫に対して特異的な効果を発揮する要因であり、他のものでは代替できない理由である。酸



図. 二酸化塩素のガス移動

着色指示薬(無色透明→紫色)0.5mL と同液を噴霧した台紙を設置した 10L 容器内に、5ppm の二酸化塩素ガス溶存液 30mL を入れたところ、指示薬・台紙が紫色を呈した。液同士は非接触でも空間を介して二酸化塩素が移動すること、空間に拡散することをそれぞれで確認。

化ガスとして有名なオゾンには水溶性が低く、酸化水溶液として有名な次亜塩素酸は揮発性が低い。

#### 4. 二酸化塩素ガスの安全性を加味した居住空間への適用原理

二酸化塩素ガスを居住空間で、安全かつ浮遊するバイオエアロゾルに有効な量で適用する場合、居室空間の容積(A m<sup>3</sup>)と、建築基準法における同空間での自然換気量(B m<sup>3</sup>/hr)、時間当たりの発生量(C mg/hr)がファクターとなる。一定の発生量で到達する空間濃度(D ppm)は、次の計算で求めることができる(分子量とアボガドロの法則により、常温での二酸化塩素ガスの気相濃度 1ppm=2.8mg/m<sup>3</sup>(20°C)である)。

$$\text{到達濃度： } D [\text{ppm}] = C / (2.8 \times B) [\text{mg/m}^3]$$

$$\text{自然換気量： } B [\text{m}^3/\text{hr}] = A / 2 [\text{m}^3/\text{hr}] \quad (\text{建築基準法}^5) : \text{毎時室内容積の } 1/2)$$

国立医薬品食品衛生研究所(NIHS)の指針値により、許容される室内濃度は 0.1ppm 以下<sup>6)</sup>であり、弊社で複数の抗ウイルス試験データを解析した結果、ウイルスを失活させるに足る供給量は、理論上の室内濃度 0.01ppm が目安である(この根拠は、下記 5. 空間除菌についての提言の項で述べる)。

したがって、室内を許容濃度の 10 分の 1 という、安全性マージンを取った濃度に保つことで、浮遊ウイルスを不活化できるといえる。上記理論を用いて、例えば 10 畳空間での適正な発生量(0.01ppm にする発生量)を求めることができる。

$$10 \text{ 畳空間の容積}^* = 10 \times 0.9 \times 1.8 \times 2.5 = 40 [\text{m}^3]$$

$$\text{換気量} = 0.5 \times 40 = 20 [\text{m}^3/\text{hr}] \quad (\text{建築基準法}^5) : \text{毎時室内容積の } 1/2)$$

$$\text{到達濃度} = 0.01 [\text{ppm}]$$

$$\text{必要発生量} = 0.01 \times 2.8 \times 20 = 0.56 [\text{mg/m}^3]$$

※1 畳が横 0.9m、縦 1.8m とし、高さは 2.5m として算出

上記により、適用畳数に必要な時間発生量が容易に算出できる。空間除菌をうたうには、実測値から算出される時間当たり発生量(C mg/hr)の経日的な検証が必須である。この測定方法については国民生活センターが開しており<sup>2)</sup>、使用する空間の畳数および有効期間は、この測定原理に基づいて測定された 1 時間当たり発生量を根拠に、決定しなければならない。

したがって、居室空間内で、ある成分の濃度を一定に保つためには、所定の量を一度散布すればよいかと言われれば、上記の通りそうではない。

日本政府が勧めている「三密を避ける」の一つとして挙げられた密閉空間であるが、正しくは閉鎖空間という。実は、居室空間は窓を開けなくても自然換気されるように設計されている。2003 年改正の建築基準法により、居住空間では、1 時間で室内容積の 2 分の 1 の空気が換気される構造とするよう義務付けられている<sup>5)</sup>。

したがって、居室内は扉や窓を締め切っても、室内の空気の半分が毎時間入れ替わっている。つまり、この換気量をファクターとして放出量を制御することが、空間濃度の維持において最重要な課題といえる。

#### 5. 空間除菌についての提言

二酸化塩素の有効性と安全性について記述してきたが、ウイルスや菌を目視できないのと同様に、二酸化塩素が本当に効果を発揮しているのかも、目に見えるわけではない。



そこで、本稿では弊社で検討したウイルスへの試験結果と、それらがどの程度の効果を示すことなのかを合わせて解説し、普段の生活で活用していく上で現実的な方法を提唱したい。

### ①二酸化塩素ガスのウイルスへの有効性

これまでに述べてきた通り、二酸化塩素は細菌やウイルスを失活化する。弊社ではその効果レベルを調査すべく、次のような試験を実施している。

10L 密閉試験容器内に、0.2ppm 二酸化塩素ガス溶存液 1.5L とインフルエンザウイルス液 0.5mL を離して設置し、ウイルス感染価の変化を測定した。結果、96%のウイルスを二酸化塩素ガスで失活化した(表 2)。

そこで、本稿では弊社で検討したウイルスへの試験結果と、それらがどの程度の効果を示すことなのかを合わせて解説し、普段の生活で活用していく上で現実的な方法を提唱したい。

本検討で得た知見は 2 つ。①二酸化塩素は 0.2ppm という超希薄溶液からも揮発し、ガスとしてウイルスに作用する。②二酸化塩素の発生量と失活したウイルス数から、ウイルスの失活に必要な二酸化塩素量が予測できる。なお、②の計算は次の通りだ。

作用した二酸化塩素ガス総量 :  $0.20\text{mg/L} \times 1.5\text{L} = 0.3\text{mg}$  ※全量揮発と想定

失活したウイルス量 : 500 万 - 18 万 = 482 万

ウイルス 1 つの失活に必要な量 :  $0.3\text{mg} \div 482 \text{ 万} = 6.2 \times 10^{-8}\text{mg}$

ウイルス 1 つの失活に必要な分子数 :  $6.2 \times 10^{-11}\text{g} \div 67.45 \times 6.022 \times 10^{23} = 5.5 \times 10^{11}$  (5500 億個)

表2. 二酸化塩素ガスによる液中のインフルエンザウイルス失活試験

試料	シャーレ内の試験ウイルス懸濁液0.5ml中の ウイルスの感染価対数値 [PFU]	
	接種直後	24 時間静置後
対照区 (水-微生物用)	7.09 (12,333,333)	6.70 (5,000,000)
試験区 (0.2ppm二酸化塩素水溶液)	-	5.26 (181,667)

\*信州セラミックス(株)ウイルス細菌検査部で実施

### ②我々の行動とウイルス量

コロナウイルス感染症の初期段階の患者は、1 時間当たり数百万の重症急性呼吸器症候群コロナウイルス SARS-CoV-2 を吐き出すとの研究成果が発表されている<sup>7)</sup>。これら人間の活動に対して、空間中の二酸化塩素濃度を理論上 0.01ppm とする量で、二酸化塩素ガスを継続して供給することで、どの程度の効果が期待できるかを示す。

10 畳の空間を二酸化塩素濃度 0.01 ppm にした際、空間内に存在する二酸化塩素の量は 1.12mg である(10 畳=40m<sup>3</sup>、40m<sup>3</sup>×2.8mg/m<sup>3</sup>×0.01=1.12mg)。この二酸化塩素がどの程度のウイルスを不活性化できるかについて言及する。

第三者機関による、二酸化塩素を用いた新型コロナウイルスの失活化試験(表 3)、ならびに弊社の検討より、新型コロナウイルス 1 つを失活化するのに必要な二酸化塩素の量は、0.07ng(10<sup>9</sup>ng=1g)であることが分かった。これを基に考えると、1.12mg の二酸化塩素で約 1600 万個のウイルスを失活化できる。前述の通り、我々の居住空間は 1 時間に 0.5 回の自然換気が行われる閉鎖空間であり、その空間で二酸化塩素濃度を一定に保つためには、常に二酸化塩素を放出し続けることが肝要だ。

10 畳の空間を 0.01ppm の濃度で維持するために、必要な二酸化塩素量は 0.56 mg/hr である。こちらの量は毎時約 800 万のウイルス感染価を失活できる量に相当する。

実空間で同様の効果を発揮できると保証することはできないが、実験データに基づく結果としては自信をもって提示したい。

表3. 二酸化塩素ガスによる液中の新型コロナウイルス失活試験結果

検体		シャーレ内の試験ウイルス懸濁液0.12ml中のウイルス感染価対数値[PFU]	
対照サンプル (精製水)	1時間静置後	5.01	(102,329)
	3時間静置後	4.99	(97,723)
	6時間静置後	4.81	(64,565)
試験サンプル (5ppm二酸化塩素水溶液)	1時間静置後	4.22	(16,595)
	3時間静置後	<1.08	(12未満)
	6時間静置後	<1.08	(12未満)

\*一般財団法人 日本繊維製品品質技術センター 神戸試験センター(QTEC)で実施

### ③現実的な空間除菌のすゝめ

これまで記述してきた通り、空間中の飛沫にも効果を発揮する空間除菌剤という点において、二酸化塩素は唯一無二といえる性能を持っている。では具体的に、どのように利用するのが現実的であろうか。

本稿で取り上げた台湾研究者らの論文では、250ppm の二酸化塩素水溶液を一定量噴霧し、そこから二酸化塩素を放出する形で利用している。この方法であれば、発生した二酸化塩素量＝噴霧した二酸化塩素量となるため、量の管理が非常に容易であり、正確な放出量管理が可能となる。

しかしながら、一定の量を常に噴霧し続ける必要性や、水溶液を常に供給しなければいけないなどの問題がある。そこで弊社として提案したいのは、酸性化した高濃度亜塩素酸塩水溶液から徐々に二酸化塩素を生成し、揮発させるという手法である。

先の方法よりも放出量の安定性は欠くが、十分に安全で有効な二酸化塩素量を放出しつつ、2～3 カ月間メンテナンスフリーで使用することができる。特殊な装置が不要であるため、居住空間だけでなく病院のような感染リスクの高い環境や、バスのような公共交通機関内にも容易に設置でき、汎用性が高いと考えている。

## 6. おわりに

本稿では、空間除菌における二酸化塩素の有効性と安全性、その活用法について解説してきた。繰り返しになるが、空間除菌性能をうたうには、経日的な実測による毎時放出量の検証が必須である。有効量数と有効期間は、この数値を根拠とすべきものであり、それを基に設計された二酸化塩素製品が普及することを期待している。本稿がその一助になれば幸いである。

### 〔参考文献〕

1)Hsu C.-S. et al. ( 2010). Improvement of the air quality in student health centers with chlorine dioxide. International Journal of Environmental Health Research, Volume 20, 2010-Issue 2, 115127.

2)独立行政法人国民生活センター 報道発表資料 平成 22 年 11 月 11 日「二酸化塩素による除菌をうたった商品」

- 3) Lu M.-C. et al. (2021). Disinfection efficiency of hospital infectious disease wards with chlorine dioxide and hypochlorous acid. *Aerobiologia*, 37, 2938.
- 4) CDC: COVID-19 Overview and Infection Prevention and Control Priorities in non-US Healthcare Settings, 2021
- 5) 国土交通省「シックハウス対策にかかる法令等」, 2003
- 6) 国立医薬品食品衛生研究所「急性曝露ガイドライン濃度」および「国際化学物質安全性カード」二酸化塩素
- 7) Ma J. et al. (2020). Coronavirus Disease 2019 Patients in Earlier Stages Exhaled Millions of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Per Hour. *Clinical Infectious Diseases*, doi: 10.1093/cid/ciaa1283. ciaa1283.