

特集

こんなところに
化学工学化学工学を基盤とする
高性能空気浄化装置の開発

白石 文秀

Development of a High-Performance Air Purification System Based on Chemical Engineering

1. はじめに

化学工学は移動現象論を基盤とする学問である。解析、開発などを行うシステムに対して、関係する物理現象や化学反応現象の知識を取り入れた数式モデルを作り、コンピュータシミュレーションを通じて本システムの特徴を深く理解することに努める。これは実験の回数を減らし、目標達成を容易にする。以下では、私が長年にわたって行った空気浄化の研究において、化学工学的手法を取り入れることで浄化度を左右する物理および化学現象を解明し、開発に漕ぎ着けた空気浄化装置について述べたい。

2. 研究・開発の背景

科学の進歩に伴い、様々な化学製品が開発・商品化され、その一部は私たちの住環境中で建材などに活用されるようになった。その結果、私たちは快適な生活を獲得することができたが、一方で1980年代から揮発性有機化合物(VOC)による室内空気汚染が新たな環境問題として浮上した。これに伴い、被害を受けた者の病状を表す、シックビルディング症候群、あるいはシックハウス症候群という言葉がたびたび耳にするようになった。

室内環境汚染問題が深刻化するにつれ、多くの会社がこの領域に市場性があることに気づき、様々な処理方式の空気清浄機を開発・商品化した。しかし、これらのほとんどは厚労省が2000年始めに設定したVOC濃度の室内環境指針値をクリアできない。その理由は、指針値が0.1 ppm前後の極低濃度域にあることによる。1 ppmとは、1 m³の

空気中に1 cm³のVOCガスを均一に混合したときの濃度である。これは、100万個の空気分子中に1個のVOC分子が含まれる状態に相当する。環境指針値はさらにその1/10程度の濃度である。これは10億の人込みに潜む1000人の犯人を探し、100人以下になるまで逮捕しなければならないようなものである。環境指針値をクリアする空気浄化がいかに困難な作業であるかを理解できよう。

実際のところ、VOC濃度を1 ppm程度から低下させることは非常に難しい。たとえば、オゾンで空気中のVOCを普通に処理すると、1 ppm程度から濃度低下が遅くなり、0.5 ppm程度で停止してしまう。空中ではオゾンとVOCが鬼ごっこをしているようなもので、両者の接近のチャンスがあっても、数に勝る空気分子が接触の邪魔をするのだろう。VOC濃度をこれより下げるには、オゾン濃度を有害な20 ppm以上に増加させる必要があった。

空気清浄機の販売では、その処理性能が1 ppm以下の極低濃度域で非常に低い、または皆無であるという事実が消費者に知らされない。私の研究室で10社以上の空気清浄機を手に入れ、極低濃度域での性能試験を行ったところ、満足できる性能を示したものはなかった。空気清浄機の一般的定義は“空気中に浮遊する塵埃や花粉、ハウスダスト等を除去し、汚れた空気を浄化するための装置”である。VOCの処理能力までは問われていない。このことから、私は自分で開発した装置を別物として考えることにし、空気清浄機と呼ばず、単に空気浄化装置としている。

3. 研究の準備

私が空気浄化の研究を始めたのは1990年始めであった。浄化方法について思案していたとき、酸化チタンを用いる光触媒反応法が目にとまった。当時、私は宇宙の閉鎖生態系生命維持システムに関する研究を行っていた。光触媒反応が室温で起こること、触媒活性が長期間安定であることから、この浄化法が生命維持システムでの応用に適していると考えた。しかし、実験を繰り返すうちに、光触媒の活性は期待していたほど高くなく、その処理プロセスの実用化は困難なのではないかと疑問を持つようになった。



Fumihide SHIRAISHI
1984年 九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了 博士(工学)
現在 九州大学名誉教授、化学および生物化学反応を伴うシステムのコンサルタント
E-mail fumimasayuki@gmail.com

2024年4月30日受理

このため、まずは空気浄化現象の解明が必要であると考えた。

一方、住環境中のVOC濃度は1 ppm以下であるにも関わらず、すべての会社の製品カタログにはppmオーダーの処理データだけが示されていた。1 ppm以下のVOCが処理可能な装置開発には、極低濃度域での分解能力の評価が不可欠であると考え、数十ppb (1 ppbは1 ppmの1/1000) 程度まで測定できる分析法の開発も行った。

4. 現象の解明

ガラス管の中心に6 Wブラックライトを挿入して固定し、管の内表面に酸化チタンを被覆したものを反応管とした。そして、管の片方に電気ファンを取り付け、これを0.014 m³の容器内で回転させて、初濃度1 ppmのホルムアルデヒド (HCHO) を含む空気を回分的に処理した¹⁾。その結果、見かけの速度定数は管内を通過する空気の線流速 u_z の増加とともに増大し、 u_z が10 m s⁻¹以上で変化しなくなった (図1)。私は、反応速度の著しい増加が光触媒表面近傍の境膜抵抗に起因するのではないかと推測した。しかし、当時、光触媒反応が境膜抵抗の影響を受けることを指摘する者はいなかった。固体触媒反応では一般に境膜抵抗は無視できるというのが常識であり、その先入観が推測の邪魔をしたのであろう。私は数式モデルを立てて実験データの解析を行い、推測の正しさに確証を得た。併せて、このとき数式モデリングの有用性を再認識した。ちなみに、光触媒反応で境膜拡散抵抗が増大するのは、環境中のVOC濃度が著しく低いからである。光触媒による水処理では、境膜が過酸化水素の生成にも深く関係する^{2,3)}。

しかし、境膜除去だけではVOC濃度をゼロへ向かって低下させることはできなかった。その頃、光源には10 W以上のUVランプを用いるのが一般的であった。これはUVの総量を大きくすれば処理速度が大きくなるだろうと

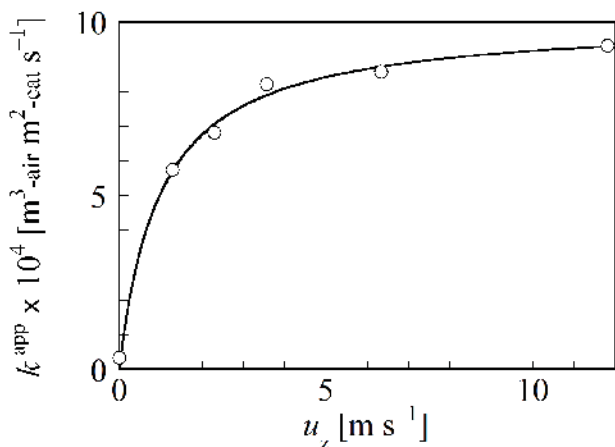


図1 見かけの速度定数と線流速の関係

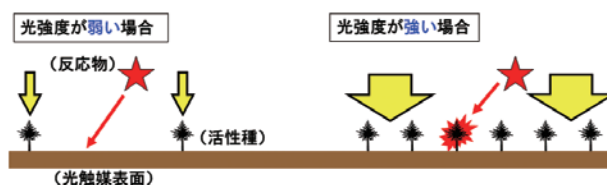


図2 光触媒反応を模した流れ星モデル

いう考えによる。しかし、私は6 Wのブラックライトを使ってみた。すると、VOC濃度が100 ppm以下へ指数関数的に減少するようになった¹⁾。この理由を、ワット数の小さいランプではUV総量は小さいが、単位表面積当たりのUV強度が大きいからではないかと考えた⁴⁾。そこで、砂漠に落ちる流れ星モデル (図2) を作り、現象の説明に努めた⁵⁾。一定間隔で木が並ぶ広い砂漠に、たまに流れ星が落ちてくる。このとき流れ星を木と衝突させるには、木の砂漠表面密度を高くすればよい。ここで流れ星は希薄なVOC分子、木は光触媒表面で生成と消滅を繰り返すラジカルである。木を高密度にするには、すなわちラジカル密度を高くするには、光触媒単位表面積当たりのUV強度を大きくしてやればよい。たとえば、20 Wランプと6 Wランプの管表面積の比率は、ワット数の比率よりも大きい。UV強度は、簡単にはワット数を管表面積で割った値に比例するので、6 Wの方が単位表面積当たりのUV強度が大きくなり、これがVOC濃度の低減に寄与したと言える⁴⁾。

5. 装置の実用化

装置の分解性能を高めるため、光触媒の種類、コーティング液の調製法、光触媒担体、光触媒の固定化法などについて多くの実験を重ねた^{1,4-7)}。一方、6 Wのブラックライト1本だけでは、大量の空気処理に対応できない。そこで、反応管を平行に9本並べた並列管型反応器を製作した^{1,8)}。また、酸化チタンはVOC吸着力が乏しく、空気中に希薄で存在するVOCを迅速に引き寄せることができない。しかも装置の実用化となると、大量の空気を短時間に処理しなければならない。そこで、表面を酸化チタンで完全に被覆した活性炭粒子を円管の内表面に配置した反応管を開発した⁹⁾ (図3)。

6. 性能評価

私が反応場を円管内表面としたのは、環状路とすることで空気の線流速が大きくなり、境膜拡散抵抗の除去が可能となること、光触媒膜表面全体が円筒形の蛍光管から放出される高強度のUVで照射されることによる。10年ほど前にヨーロッパでの国際会議へ出席し、並列管型反応器によ

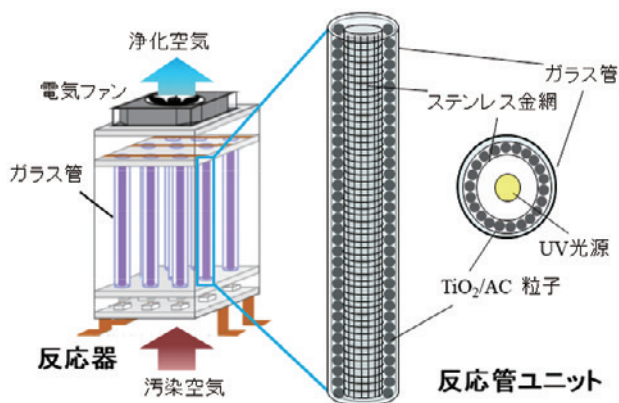


図3 光触媒被覆活性炭粒子を管内壁に配置した並列管型反応器

トルエン分解について講演した。その際、トルエンの副生成物の一つであるベンズアルデヒド (BA) の蓄積により光触媒活性の低下が起こらないのか、という質問を受けた。私の実験では、一つと同じ装置を使って分解実験を繰り返しても顕著な活性低下は起こらなかったことから、帰国後にこの質問に対する解答を求めて検討を行った。

まず、酸化チタンを担持したPETフィルムを平行に並べ、その間に1~3本の6 Wブラックライトを等間隔に配置した平膜型反応器(図4)と、同じ膜面積を持つ光触媒フィルムを管内壁に配置した並列管型反応器によりトルエン分解を繰り返し行った¹⁰⁾。つぎに、光触媒フィルムに蓄積したBAを抽出してその量を測定した(図5)。その結果、平膜では相当量のBAが検出されたが、円管ではまったく検出されなかった。これは、平膜の場合、光源間にUV強度が大きく低下する場所があり、そこにトルエンの最初の酸化反応で生じるBAが蓄積されたことを示す。トルエンからBAへの酸化は低いUV強度で起こるが、BAの分解にはより高い強度のUV照射を必要とする。このように光触媒反応では初期反応物が酸化されても、その後CO₂まで完全分解される保証はないので、トルエン濃度の測定だけで反応装置の性能を評価するのは適切でない。

酸化チタンで完全に被覆した活性炭粒子を円管内表面に充填した反応器を用い、1 m³の空間で初濃度を変えてトルエンの分解実験を行った。併せて、生成するCO₂濃度の

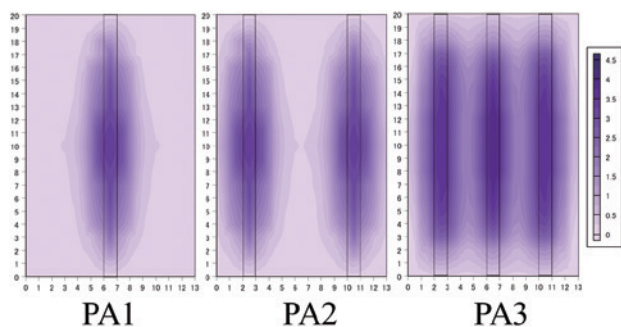


図4 平膜型反応器の光源の配置と光強度

時間変化を観察した(未発表)。この実験の目的は、空气中に低濃度で存在するトルエンが、活性炭の高い吸着力で迅速に引き寄せられた後に、活性炭表面を覆う酸化チタン膜内を拡散する過程でどの程度分解されるのかを明らかにすることであった。実験結果(図6)より、トルエン濃度が1 ppm以下であれば膜内で完全にCO₂まで分解されることがわかった。室内環境では各VOC濃度は通常高くても数百ppbである。よって、管型では活性炭への負荷がかかりにくくなると推測できる。

極低濃度域まで分解処理が可能であるという光触媒反応の特長を利用し、果物が大量に発生するエチレンを分解すれば農産物の鮮度をどの程度保持することが可能かを検討

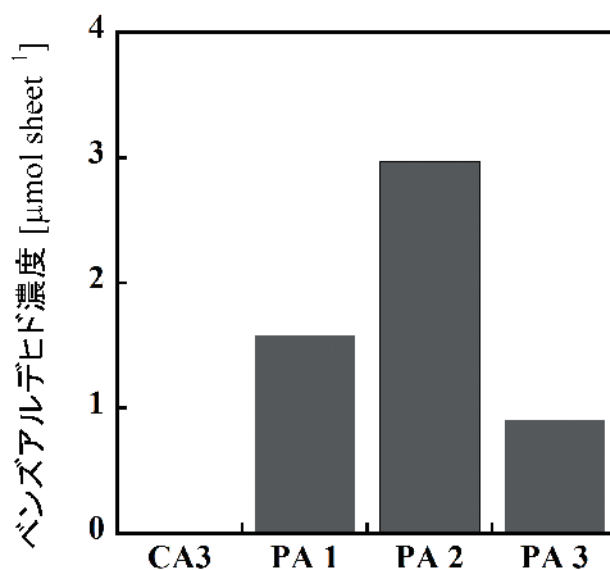


図5 平膜型 (PA1-PA3) と円管型 (CA3) の光触媒反応器によるトルエン分解後のPET膜から抽出したベンズアルデヒド量

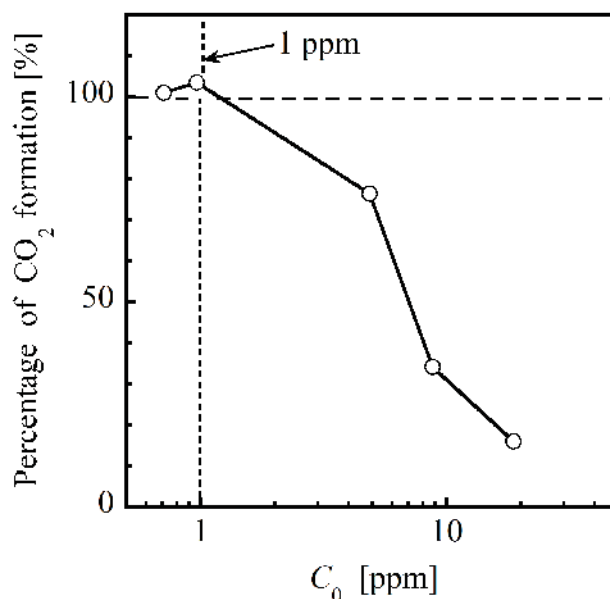


図6 酸化チタン被覆活性炭粒子を充填した反応器によるトルエン含有空気処理において生成したCO₂濃度の最大値とトルエン初濃度の関係

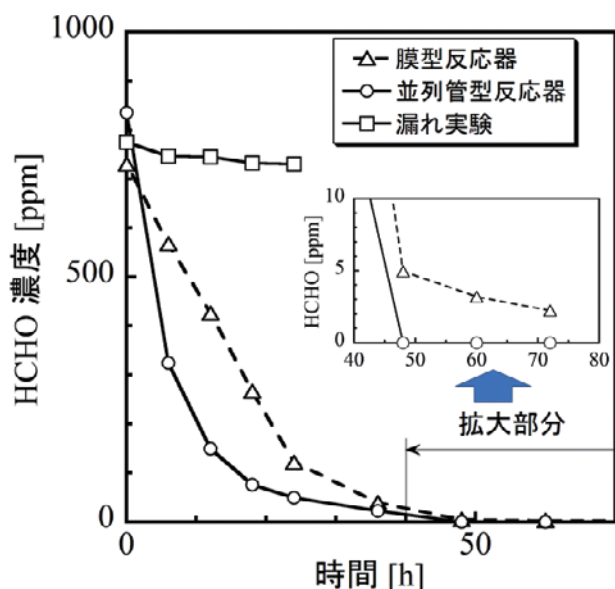


図7 平膜型反応器 (△) と並列管型反応器 (○) による 10 m^3 の空気に含まれる HCHO の分解

した¹¹⁾。このため、新たに蛇管型反応器を製作した。他の研究者によりオゾンの利用が試みられているが、この方法ではエチレン濃度を 1 ppm 以下とするのは難しいようである。エチレン濃度は基本的に 1 ppm からかなり低くする必要があり、 0.1 m^3 の容器内にりんご、バナナ、キュウリ、カボスを静置して実験を行ったところ、エチレン濃度（検出限界は 40 ppb ）は9日にわたって検出されず、エチレンの影響を受けやすいりんご、キュウリが開始時の状態に保たれた。

図7は、 10 m^3 の密閉空間内で発生させた初濃度 $720\text{--}850 \text{ ppm}$ の HCHO を、市販の平膜型光触媒分解装置と、私どもの並列管型装置で分解処理したときの実験結果である（未発表）。初濃度が高いため、どちらの装置でも HCHO が順調に分解したように見える。しかし、低濃度域を拡大すると装置性能の違いが明白である。平膜型の場合、数 ppm で濃度の低下がほぼ停止した。一方、並列管型では HCHO の環境指針値 (80 ppb) 以下まで分解が進んだ。

7. 現状の空気浄化問題

近年、洗剤等への芳香機能付与がブームとなっており、これに伴って化学物質過敏症 (CS) で苦しむ人が急増している^{12,13)}。これには芳香剤ばかりでなく、その保持に使われているマイクロカプセル (ウレタン樹脂) の破壊で放出されるイソシアネート化合物が関わっていることが指摘されている¹⁴⁾。CS で苦しむ潜在者の数は計り知れない。患者には有効な空気浄化装置が必要であるが、満足できるものはほとんどない。この問題への対応装置を販売している会社について少し話をしたい。CS 向け装置の大量生産は困

難である。CS 患者は極微量の化学物質の臭いにも敏感であるため、出荷前に製品の臭い除去に1日以上を費やす。慎重に梱包して発送しても、臭いへの敏感さの度合いが患者ごとに異なり、クレームを受けることが多い。

並列管型反応器に極低濃度の VOC に対して高い分解性能があるといっても、いつでも満足できる空気浄化ができるわけではない。建材などからの VOC 放出速度が高い場合、その濃度低減には限界がある。化学工学を学んだ者であれば、放出速度と分解速度が均衡したところで VOC 濃度の低下が停止することを推測できよう。均衡濃度の低減には、装置のさらなる分解速度向上への注力が必要である。

8. おわりに

ここで紹介した空気浄化装置の開発は、私が機械工作技術や化学試薬を使う反応実験技術ばかりでなく、数式モデリング技術を習得しており、これらの知識を駆使することで極低濃度域での VOC 分解を妨げる原因を特定し、これらを除去したことで可能となった。この成功は、私が数式モデリング技術の重要性を意識した化学工学教育を教授された世代であったことが大きい。今日、関係分野の学生が化学工学の本質を十分理解しないまま社会人になっているケースが多いことに懸念を抱いている。この原因として、大学改組が繰り返され、化学工学を教育する学科の枠組みが曖昧になってしまったこと、現在の関係分野の学科が化学工学的手法を十分に教育されずに育った教員の世代になっていること、さらに化学工学的教育を受けた教員であっても、その興味が新素材の開発などに向けられ、卒業研究や修士研究でシミュレーション技術を含めずに学生教育を行うケースが多くあることなどが挙げられよう。私は数年前に大学を定年退職したが、この問題を深刻に受け止め、現在、数式モデリングに関するユーチューブの動画配信を行い、本技術の啓蒙を図っている¹⁵⁾。わが国において化学工学教育の本来のあり方が再考されることを願うばかりである。

参考文献

- 1) Shiraishi F. et al. : *Chem. Eng. J.*, **114**, 145-151(2005)
- 2) Shiraishi F. et al. : *J. Phys. Chem. A*, **46**, 11072-11081(2003)
- 3) Shiraishi F. et al. : *J. Phys. Chem. A*, **47**, 10494-10496(2004)
- 4) Shiraishi F. et al. : *Chem. Eng. J.*, **114**, 153-159(2005)
- 5) 白石文秀 : 生態工学ハンドブック, pp.316-321, アドスリー(2015)
- 6) Shiraishi F. et al. : *Chem. Eng. J.*, **148**, 234-241(2009)
- 7) Shiraishi F. et al. : *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **86** : 852-857(2011)
- 8) Shiraishi F. et al. : *Chem. Eng. Sci.*, **58**, 929-934(2003)
- 9) Tanoue Y. et al. : *Eco-Eng.*, **29**(2), 39-44(2017)
- 10) Shiraishi F. et al. : *Sep. Purif. Technol.*, **175**, 185-193(2017)
- 11) Shiraishi F. et al. : *Chem. Eng. J. Adv.*, **7**, 100111(2021)
- 12) 水野玲子 : 月刊保国連, No.1366, 26-32(2022)
- 13) 白石文秀 : 計画行政, **46**(2) 21-26(2003)
- 14) 角田和彦 : JEPA ニュース, **119**, 2-5(2019)
- 15) 熊のふーさんチャンネル @user-pt8vn4jp2z