

技 術 論 文

光酸化分解反応の数理モデル化と室内濃度低減性能の数値予測 Numerical Modeling and Prediction of Photocatalytic Decomposition Effect on the Improvement of IAQ



技術開発センター
事業化開発室
山本 清司
Kiyoshi Yamamoto

技術開発センター
光触媒技術開発
リーダー 原賀 久人
Hisato Haraga

技術開発センター
事業化開発室
室長 吉永 宏
Hiroshi Yoshinaga

要 旨

弊社は、本報を含む一連の研究において、光触媒反応を期待して酸化チタン(TiO_2)を組み込んだ空気清浄装置ならびに建築材料の性能評価法を確立すると共に、室内汚染物質濃度の低減性能を数値的に定量評価するための、数理モデル開発に取り組んでいる。その第一報として本報では、室内汚染物質濃度予測の基礎と、 TiO_2 による光酸化分解反応の数理モデルに関して整理した結果を報告すると共に、光触媒による濃度低減効果を実大スケール実験チャンバー(バイオクリーンルーム)で評価するための基礎検討を行った結果を報告している。併せて、光触媒を搭載した空気清浄装置を用い、バイオクリーンルーム内で浮遊菌の濃度減衰試験を実施した結果に加え、対応する数値解析の結果について報告する。

Synopsis:

Photocatalysis and photocatalytic decontamination effect have been investigated in recent decades and building materials coated with a photocatalyst have been used to improve indoor air quality. Photocatalytic decomposition effects on building material surfaces are mainly governed by the mass transfer phenomenon as a function of air velocity and contaminant concentration, and it is important to optimize the position/layout of photocatalytic material in the room to increase the decontamination efficiency of indoor contaminants. Toward this end, a fundamental numerical simulation for the design of a real scale test chamber that conducts detail experiment for evaluating contaminant concentration reduction performance of photocatalytic building materials is carried out in this study and time-dependent/ non-uniform contaminant concentration distribution formed by the convective flow from air purifier set up in a real scale test chamber are also discussed.

1. はじめに

室内環境中には、建築材料、家具・什器などから発生する VOC (揮発性有機化合物)や人体起源ならびに微生物起源の臭気物質といった知覚性物質が多様に存在しており、GC/MS(ガスクロマト重量分析法)による分析によれば、数十から数百種類以上の揮発性有機化合物が検出されることも希では無い。これらの物質は居住者に不快感を与えると共に、MCS(化学物質過敏症)やシックハウス症候群を引き起こす原因の一つになっ

ているとも指摘されており、様々な規制・対策が講じられている。この問題に対する環境工学的対策は、発生源対策ならびに発生後の換気・吸着・分解等の発生後対策の2つに大別することが出来るが、特に後者の対策として、近年では光照射のみで有機化合物を分解する光触媒反応に着目した研究が数多く行われており、室内建材への応用も含め、その結果が報告されている。このような背景のもと、本報を含む一連の研究では、光触媒反応を期待して TiO_2 を組み込んだ建築材料の

性能評価法を確立すると共に、室内濃度の低減性能を数値的に定量評価するための、数理モデル開発に取り組むものである。

2. 光触媒反応の基礎¹⁾²⁾

光触媒反応の歴史は、水を光により分解することを発見した「本多—藤嶋効果」と呼ばれる光電気化学反応を起源とする。水溶液中に TiO₂ 電極と白金(Pt)電極を置き、TiO₂ に紫外線を照射すると、TiO₂ 電極から酸素、Pt 電極から水素が発生し両電極間に電流が流れた現象である。暗所では反応が生じなかったことから、植物系の光合成の過程とよい相関を持つ。この効果は Nature 紙に論文が掲載された後、第1次オイルショックを契機に世界中から注目され、太陽エネルギーとして、また石油代替エネルギーとして水素を利用する期待が高まる契機となり、さらには植物が二酸化炭素を還元して有機化合物を得ていることから、有機合成反応に利用しようという研究も開始された。現在でも精力的に研究は続けられているが、90年代から環境中の有害物質などを分解し環境浄化に利用する試みが始まり、強力な酸化力を活かした有害物質の除去に関する研究開発等に継続的に取り組まれている。

光触媒反応では、触媒自身は反応の前後では変化しない、所謂、触媒反応であり、光を吸収することにより進行する。アナターゼ型 TiO₂ 光触媒反応に利用できる光については、一般に光の波長が 380nm 以下の近紫外線のみであるが、近年、ルチル型の開発が進んでおり、可視光レベルでも一定の反応の進行が確認されている。

ルチル型で約 413nm 以下の光を照射すれば、価電子帯の電子が励起され伝導帯まで引き上げられると同時に伝導帯にあがった電子の個数と同じだけの正孔が価電子帯に生じる。このようにして生じた正孔と伝導電子が表面に移動して、正孔が化学物質に移動して酸化を起こし、伝導電子が化学物質に移動して還元し、光触媒表面で表面化学反応を起こす。

光触媒反応の2つの基本反応として、「酸化分解」「超親水化」が挙げられる。本報を含む一連の研究においては、酸化分解のみを光触媒反応の基本技術として取り組む。

光触媒と呼ばれる材料は、光を照射することにより表面に付着した汚染物質(有機物)を分解する。TiO₂ 表面上では光を照射することにより励起された伝導電子と空气中的酸素が反応して強力な酸化分解力を持つ O₂⁻(スーパーオキシドイオン)を、励起により発生した正孔が空气中的水分と反応して、強力な酸化分解力を持つ・OH(水酸化ラジカル)の2つの活性酸素が生じる。活性酸素により、有機物は酸化分解され、二酸化炭素と水になり自然界へと放出される。この反応は光が照射された量の分だけ生じる(光律速)。通常の燃焼

反応とは異なり、反応による温度上昇はなく室温の状態での反応が進行する。

本報を含む一連の研究では、この TiO₂ を特殊なバインダーを使用しない溶射法を用いて建材表面に光触媒を担持させ、そのパッシブ型の室内濃度低減建材を対象として、その濃度低減性能予測と数理モデル開発に取り組んだ。

3. CFD(計算流体力学)による室内濃度分布予測

化学物質等のスカラ量は(1)式で示される輸送方程式により、その室内空気中での挙動が支配される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial U_j \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} D \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + S' \quad (1)$$

ここで、 ϕ は化学物質等のスカラ量、 D は物質の拡散係数を示す。光触媒による化学物質の分解反応は、所謂、触媒層表面での表面反応であり、室内を想定した場合には、建材表面と室内空気との界面における濃度輸送に着目することとなる。一般に、建材表面の触媒層と近接する空気層の間で化学物質輸送量が保存される。化学物質輸送量はフラックス量保存による。

$$-\rho_{air} \cdot D_c \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{B-} = -\lambda_a \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{B+} \quad (2)$$

上記の(2)式はフラックス保存を示しており、B+は建材側表面、B-は室内空気側表面を示す。また λ_a は空気中の対象とする化学物質の拡散係数 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot (\text{kg}_{\text{voc}}/\text{kg}_{\text{air}})$]を示し、空気密度 ρ_{air} [$\text{kg}_{\text{air}}/\text{m}^3$]で割ったものが動粘性係数 $\nu (= \lambda_a / \rho_{air}, [\text{m}^2/\text{s}])$ となる。

4. 光酸化分解反応の数理モデル

4.1 吸脱着現象のモデル化³⁾

光触媒反応は触媒層での表面反応であることを鑑みれば、室内空気中に存在する化学物質の建材表面までの輸送と、表面での反応効率を分けて検討することが妥当だと思料される。建材表面までの化学物質輸送は(1)式で示す移流・拡散方程式を解くことで数値的に予想することが可能であり、表面反応は、既存の吸脱着モデルのモデル定数を調整することで表現することが可能である。

建材表面の吸着層(ここでは触媒層)に存在する化学物質は、一般に気相とは異なる状態(固相・液相もしくは吸着相)にあると考えられる。そのため、触媒層における反応現象を、吸脱着モデルを基にモデル化するためには、触媒層における濃度と気相における濃度の関係を明確にし、触媒層濃度を気相濃度の関数により表現し、一貫して気相濃度で表現するのが便利である。この触媒層の濃度 C_{ad} と気相濃度 C の関係を表現するモデル関数が吸着モデルにおける吸着等温式と呼ばれるものである。

触媒層のごく近傍では触媒層濃度と平衡状態にある

気相濃度 (平衡気相濃度 C_{eq})が存在する. ここでは, 局所平衡を仮定し, 気相濃度 C と平衡気相濃度 C_{eq} は等しいとしている.

$$C_{eq} = C \quad (3)$$

$$C_{ad} = f(C_{eq}, T) \quad (4)$$

ここで, モデル関数 f は吸着等温式である. 当然の事ながら, (4)式において等温過程においては変数としての温度 T は削除される.

以下, CFD において用いられる代表的な吸着等温式を示す.

Henry 型吸着等温式: (4)式で表現される吸着等温式において, 最も単純なものが触媒層(吸着相)濃度と気相濃度の間に線形関係を仮定したもので, (5)式のように表現される.

$$C_{ad} = k_h \cdot C_{eq} = k_h \cdot C \quad (5)$$

ここで, C_{ad} は吸着相濃度 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{kg}_{\text{solid}}$], C_{eq} は吸着相と平衡する気相濃度 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{kg}_{\text{air}}$], C は気相濃度 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{kg}_{\text{air}}$], k_h は Henry 定数 [-]である. Henry 型の吸着等温式は気中濃度が希薄な場合にのみ成立することが知られている.

Langmuir 型吸着等温式: (5)式で示した Henry 型の吸着等温式は触媒層(吸着相)濃度と気相濃度に線形関係を定義したもので, 気相濃度が上昇した場合, 無限の吸着量をもつことを意味している. しかし, 現実には気相濃度が高くなるにつれ吸着量は増加しなくなり, ある飽和吸着量に達するとそれ以上吸着しなくなる. 吸着物質が吸着面に対し, 単分子層を形成した場合に飽和吸着量に達し, それ以上吸着しない, という仮定の下に導かれた吸着等温式が(6)式に示す Langmuir 型吸着等温式である.

$$C_{ad} = C_{ad0} \cdot k_l \cdot C / (1 + k_l \cdot C) \quad (6)$$

ここで, C_{ad0} は飽和吸着量 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{kg}_{\text{solid}}$]であり, 吸着物質毎に決まる値 (一定値)である. 即ちこれ以上は吸着しないという吸着相側の飽和量を指す. k_l は Langmuir 定数 [$1/(\text{kg}_{\text{voc}}/\text{kg}_{\text{air}})$]である. Langmuir 定数は(7)式で示されるように吸着速度係数と脱着速度係数より成る.

$$k_l = k_a / k_d \quad (7)$$

ここで, k_a は吸着速度係数 [$\text{kg}_{\text{voc}}/(\text{m}^2\text{s}(\text{kg}_{\text{voc}}/\text{kg}_{\text{air}}))$], k_d は脱着速度係数 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{m}^2\text{s}$]である.

Freundlich 型吸着等温式: 実験データを基に統計的手法によりモデル定数を算出した吸着等温式が Freundlich 型吸着等温式であり, (8)式で表現される.

$$C_{ad} = k_f \cdot (C)^{1/n} \quad (8)$$

ここで, k_f 及び n は経験的に算出される Freundlich 定数 [-]である.

Polanyi DR 型吸着等温式: (5)式から(8)式までに示した吸着等温式は等温過程でのみ成立するモデルであるが, Polanyi DR 型吸着等温式は温度効果が陽に組み込まれた形で定式化されており, 温度分布, 温度変化の存在する室内環境を取り扱う場合に便利な吸着等温式である. Polanyi DR 型吸着等温式は, 吸着物質が吸着材表面の微小空間に充填される際に, 吸着ポテンシャル理論による自由エネルギーが最小となるように振る舞うことを前提として導かれたモデルであり, 吸着材と吸着物質はその種類に関わらず特性曲線により表現することが可能である. 特に等温過程においては(9)式のように表現される.

$$C_{ad} = C_{ad0} \cdot \exp\left(-k_p \left(\frac{T}{V_m}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{C_{sat}}{C}\right)^2\right) \quad (9)$$

ここで, C_{sat} は吸着相側でなく, 気相側の飽和気相濃度 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{kg}_{\text{air}}$]を示す. T は絶対温度 [K], k_p は Polanyi 定数 [$(\text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K})^2$], V_m はモル容量 [m^3/mol]を示す.

4.2 表面反応に特化した界面濃度輸送モデル

伊藤・村上³⁴⁾は前述の吸着等温式を CFD 解析に組み込むための一方策として, 建材表面に体積を有する仮想的な沈着層を設定し, この沈着層内での瞬時の吸脱着平衡を仮定することで, 建材表面に特化したスカラ量の界面輸送モデルを提案している. このモデル化をベースに, 建材表面の触媒層を CFD 解析の 1 つの Control Volume (C.V.) と想定し, (2)式のフラックス保存式を C.V.内で体積積分して整理すると, 次式が導出される.

$$-\lambda_a \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{B-} = -\left(\rho_{sol} \frac{\partial C_{ad}}{\partial t}\right) dV/dS = -\rho_{sol} \frac{\partial C_{ad}}{\partial t} = -ads \quad (10)$$

$$\rho_{sol} \dot{V} = \rho_{sol} dV/dS \quad (11)$$

ここで, ads は吸着速度 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{m}^2\text{s}$]であり, 空気中から触媒層に向かう方向を正とする. ρ_{sol} は触媒となる TiO_2 の面密度 [$\text{kg}_{\text{voc}}/\text{m}^2$]を示す.

界面でのフラックス保存式である(10)式を閉じた形とするために, 吸着等温式を導入することになり, 例えば, 前節で示した Linear 型の吸着等温式である Henry 型吸着等温式(5)式を用いた場合, 吸着速度 ads は次式となる.

$$ads = \rho_{sol} \frac{\partial C_{ad}}{\partial t} = \rho_{sol} \cdot k_h \frac{\partial C}{\partial t} \quad (12)$$

また, Langmuir 型吸着等温式((6)式)を用いた場合の吸着速度 ads は次式となる.

$$ads = \rho_{sol} \frac{\partial C_{ad}}{\partial t} = \rho_{sol} \cdot C_{ad0} \cdot k_l / (1 + k_l \cdot C)^2 \cdot \frac{\partial C}{\partial t} \quad (13)$$

Polanyi DR 型吸着等温式((9)式)を用いた場合の吸着

速度 ads は次式となる。

$$\begin{aligned}
 ads &= \rho_{sol}' \frac{\partial C_{ad}}{\partial t} \\
 &= 2 \cdot \rho_{sol}' \cdot k_p \cdot (T/V_m)^2 \cdot C_{ad0} / C \cdot \ln(C_{sat}/C) \\
 &\quad \cdot \exp\left(-k_p \left(\frac{T}{V_m}\right)^2 \ln\left(\frac{C_{sat}}{C}\right)^2\right) \cdot \partial C / \partial t
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

4.3 モデル定数の同定方法

前述した化学物質の触媒層と気相間の界面輸送モデルを実際の CFD 解析に適用するためには各種のモデルパラメータを同定する必要がある。光触媒反応に特化した場合には、触媒層を底面に設置した上で、光源を上部に設定したリアクタを用いて流通式反応装置を組み立てることで実験が実施されることが多い。所謂、一定濃度供給法である。モデルパラメータ同定のためには、供給する対象化学物質濃度を段階的に変化させ、その転化率を計測したデータセットを整備する必要がある。

4.4 モデル化まとめ

本章では、光触媒反応の基礎的な原理と室内の汚染物質濃度予測手法、触媒表面での濃度輸送モデルに吸着等温式を導入した数値モデル化に関して、基礎的な検討と整理を行った。

今後は、光触媒反応に特化した独自の界面輸送モデルの構築を目指し、吸着等温式ベースの数値モデルの改良を進めると共に、小型チャンバーならびに実大スケールの大型チャンバー実験と整合化を図ることで、モデルパラメータ同定を進める計画である。

また本報におけるモデル化では、光照射(波長特性)に関して検討を行っていないが、このモデル化も今後の重要な課題の1つである。

5. バイオクリーンルームの気流性状の数値解析

5.1 バイオクリーンルームの概要

現在、弊社では室内環境中のガス状物質ならびにバイオエアロゾルの空間分布の再現と濃度低減性能評価を可能とする設備として、実大スケール実験チャンバーである 25 m³ のバイオクリーンルームを保有している。このバイオクリーンルームは、実際に菌もしくは VOC ガス等をクリーンルーム内に噴霧させ、対象汚染物質の濃度低減効果のある光触媒反応を担持した建材ならびに空気清浄装置の性能評価(濃度低減効果評価)を実スケールで可能とする設備である。

バイオクリーンルームの平面図を Fig.1 に示す。また、バイオクリーンルームの仕様をまとめて Table 1 に示す。バイオクリーンルームは、室内環境学会の学会規格⁵⁾に準拠するよう配慮して設計されている。本実験施設は実験室バイオセーフティ指針(WHO 第3版)

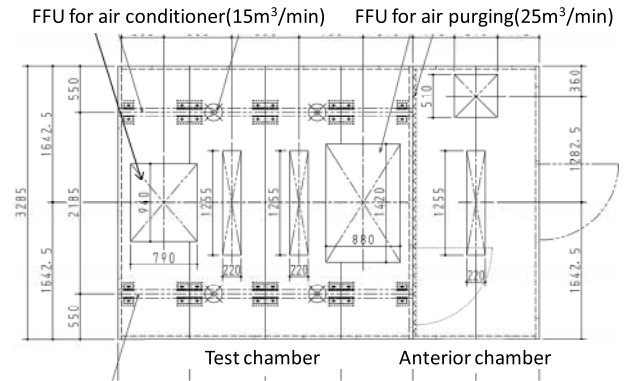


Fig.1 Ground plan of real scale test chamber

Table 1 Specification of real scale test chamber

Material	SUS304
Cleanliness	Class 1000
Temperature [K] (normal test condition)	298±1
Humidity [%] (normal test condition)	50±10
Bacteria available	Virus, bacteria (BSL2)
Gas available	Acetaldehyde, Xylene etc.
Supply airflow rate for FFU	25m ³ /min
Supply airflow rate for PAC with FFU	15m ³ /min
Supply airflow rate for scrubber	10m ³ /min

に規定されたバイオセーフティレベル 2(BSL2)をクリアし、バイオエアロゾル噴霧試験にも BSL2 以下の菌およびウイルスを使用可能な仕様を備えている。バイオクリーンルームのサイズは 3.5m(x)×3.285m(y)×2.4m(z)である。試験室はバイオクリーンルームと前室で構成され、万が一、汚染物質がバイオクリーンルームの入口から漏れた場合でも試験室外の被害を最小限に留めることが可能である。主な仕様として、試験前後のクリーンルーム内の空気清浄度を制御する装置として、HEPA フィルター搭載 FFU(ファンフィルターユニット) (25m³/min)を採用し、給気用は天井面に、排気用は壁面に設置されている。また、空調機用の HEPA フィルター搭載 FFU (15m³/min)も給気用と排気用としてそれぞれ天井面と壁面に設置されている。ガス状物質試験前後の有害物質除去装置として、スクラバー (10m³/min)を備え付けてある。

壁面パネルの表面材は全面 SUS304 を使用しており、サンプリングボード等の一部に、5mm 厚の亚克力板を採用している。また、室内の温度勾配を低減させるため、全てのパネルに断熱加工を施してある。室内の光源は天井部に 40W の可視光の蛍光灯が 4 灯取り付けであり、試験後の安全対策として、殺菌用の 254nm の紫外光ランプを同様に 4 灯設けている。

5.2 試験の流れ

本研究でバイオクリーンルームを用いた試験を行う場合、試験はパーティ・雰囲気温湿度制御、汚染物質噴霧・拡散、汚染物質分解の3段階に分類できる。

パーティ作業は汚染物質を用いる試験前後に行う。対象汚染物質として菌を用いる菌試験時には、試験前に25 m³/minの給排気用FFUを稼働させてクラス1000以下の清浄度を出した後、空調機により温湿度を制御する。一方、ガス試験時には、スクラバーを運転させ、室内のガスを除去した後、空調機により温湿度を調整する。

パーティ作業後の汚染物質噴霧・拡散の段階では、前室に接する壁面にある汚染物質発生位置(1ヶ所)から汚染物質をクリーンルーム内に流入させ、クリーンルーム内に設置した攪拌ファンを用いて、効率よく混合する。

最後に、汚染物質発生を停止した後、光源を供給しクリーンルーム内に設置した光触媒を担持した建材や空気清浄装置による濃度低減効果を評価する。本研究においては、ガス体からエアロゾルまで各種汚染物質を対象にしていることに加えて、空気清浄装置の稼働条件や、光触媒建材の種類や設置箇所を変更すること等により、室内の空気環境を効率よく改善する手法を探索することが目的である。

5.3 数値解析の概要

5.3.1 室内モデル

室内に形成される気流分布ならびに汚染物質濃度分布を把握するため、数値的にバイオクリーンルームを再現し、パーティ作業時を想定して空調機のみを稼働させる条件と、空気清浄装置による汚染物質低減試験を実施する条件の2条件にて、気流場ならびに汚染物質拡散場解析を行った。解析対象空間の形状を Fig. 2 に示す。クリーンルームのサイズ・幾何形状は実形状を忠実に再現しており、空調用の給気口を天井面に、排気口を壁面に、各1ずつ設定した。また室内には空気清浄装置と攪拌ファンを配置した。

5.3.2 解析条件

定常・等温 25℃状態を仮定し、乱流モデルとして RNG $k-\epsilon$ モデルを用いて解析を行った。解析条件を Table 2 にまとめて整理する。流れ場の解析条件は、空調機用 FFU を運転させてクリーンルーム内のパーティ作業を実施する場合の空調機による雰囲気制御時の条件を Case 1、空気清浄装置のみ作動させる空気清浄装置性能試験時の条件を Case 2 とする。解析空間は非構造格子(四面体セル形状)を採用してメッシュ分割しており、約 25m³の容積に対し、総メッシュ数は 2,224,981 である。

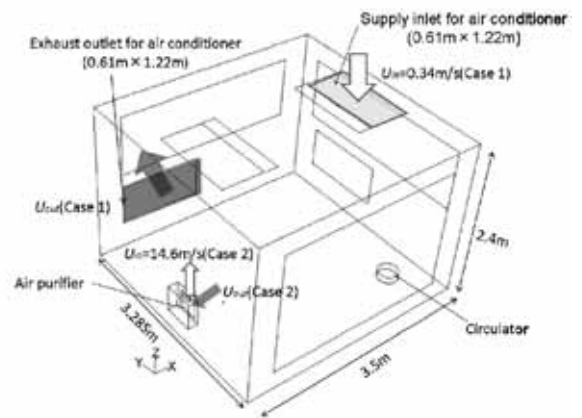


Fig.2 The test chamber model

Table 2 The flow field analysis conditions

Domain	3.5m (x) × 3.285m (y) × 2.4m (z)
Turbulent model	RNG $k-\epsilon$ model
Mesh number	Unstructured grid (Tetra): 2,224,981
algorithm	SIMPLE
Discretization scheme	Second order upwind for advection term
Inflow boundary conditions	Case 1 : $U_{in}=0.34$ [m/s], $Q_{in}=900$ m ³ /h Case 2 : $U_{in}=14.6$ [m/s], $Q_{in}=336$ m ³ /h $k_{in}=3/2 \times (U_{in} \times 0.1)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu}^{3/4} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$, $C_{\mu}=0.09$, $l_{in}=1/7 \times L_{in}$
Outflow boundary conditions	U_{out} = free slip, k_{out} = free slip, ϵ_{out} = free slip
Wall boundary conditions	Velocity: wall function (Generalized log law)

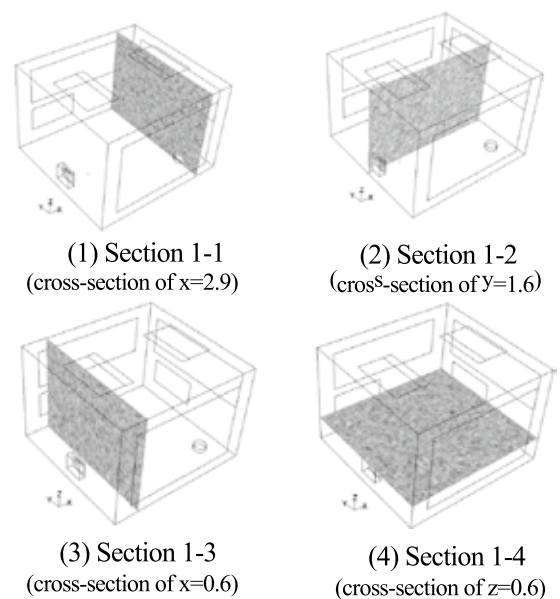


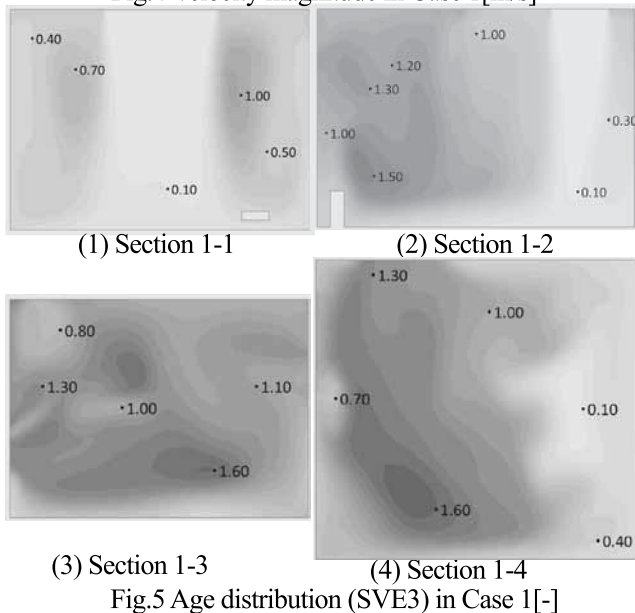
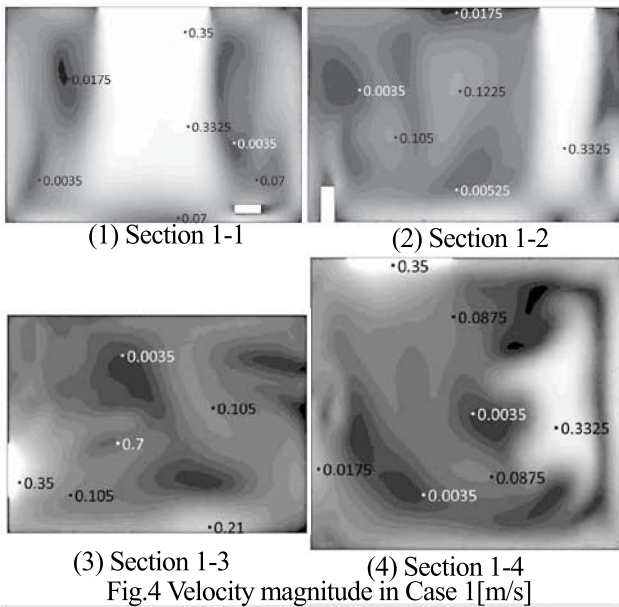
Fig. 3 Section view of analysis results in Case 1

主な解析表示断面を Fig. 3 に示す。Case 1 での空調機用の FFU 給気口と排気口を含む 4 断面を採用した。給気口を含む 2 面を Section 1-1, 1-2, 排気口を含む 2 面を Section 1-3, 1-4 とする。

5.4 解析結果

5.4.1 Case 1 解析結果：空調機運転時

空調機運転条件 Case 1 の風速分布解析結果を Fig. 4 に示す(表示断面は Fig. 3 参照のこと). 室内には 0~0.35m/s の分布が形成されている. 給気口と排気口の位置がクリーンルーム全体に対して非対称であるため, 複雑な流れ場が形成されている. 天井からの吹出噴流が到達しないクリーンルームの中央部には循環流が数か所で形成されていることが確認できる.



空調機運転条件 Case 1 のクリーンルーム内空気齢分布(SVE3)を Fig. 5 に示す. 空気齢分布(SVE3)は室内一様に汚染質が発生する際の各点の濃度及びその分布により, 定義される. この指標は吹き出し空気がその点に到達するまでの時間(行程)が長いほど, 汚染の確率が上昇するという想定に基づき, 以下の式で表される.

$$SVE3(\mathbf{X}) = C_X(\mathbf{X}) / C_s \quad (15)$$

$$\text{ただし, } C_s = q / Q \quad (16)$$

ここに

$SVE3(\mathbf{X})$: \mathbf{X} における換気効率指標(室内一様汚染質発生時の各点濃度を瞬時一様拡散濃度で基準化した無次元濃度)

$C_X(\mathbf{X})$: 室内一様に総量 q の汚染質発生がある場合の \mathbf{X} 点の濃度 [kg/m³]

C_s : 瞬時一様拡散濃度 [kg/m³]

q : 汚染源の汚染室発生量 [kg/s],

Q : 換気量 [m³/s]

第三の換気効率指標である SVE3 は, 主に汚染質の排出を意識した換気効率指標とその分布とは異なり, 室内の任意の点に関し, 吹き出し空気がそこに到達するのに要した平均的な時間(行程)を示すものである. 吹き出し空気が到達するのに要した行程が短ければ短いほど, その到達した空気が汚染されている可能性が小さく, 行程が長くなるほど途中で汚染されている可能性が増すと考えられる.

Case 1 における空気齢は, 新鮮空気が供給される空調機の給気口の SVE3=0 とし, 排気口の SVE3=1.0 とした場合の無次元化されたパラメータで表されている.

Case1 では, クリーンルーム内には 0~1.6 の空気齢分布が形成されることが示された. 室中央の循環流が観察される領域で滞留するため, その領域における空気齢が最大値 1.6 となった.

5.4.2 Case 2 解析結果：空気清浄装置運転時

Fig. 6 に示した通り, 結果の表示は空気清浄装置の吹出, 吸込が含まれる室中央 z-x 平面 (Section 2-1), サンプル箇所濃度比較が可能な z=0.6 の x-y 平面を(Section 2-2)の 2 断面を採用する.

浮遊菌の濃度減衰試験の実施時には, 実験室の空調

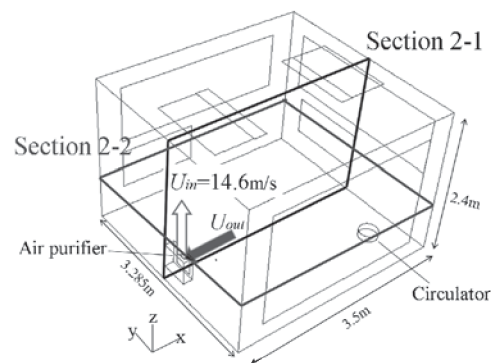


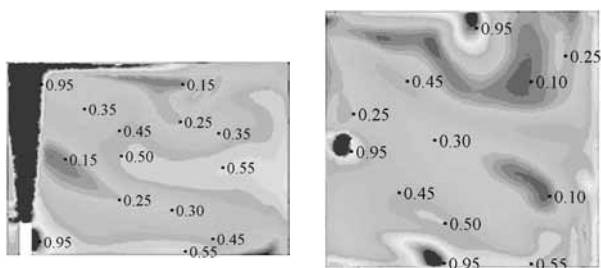
Fig. 6 Section view of analysis results in Case 2

系は停止しており, 空気流動は試験室内に設置された空気清浄装置の稼働によって作り出される. 空気清浄装置を運転させた場合(吹出流量: 5.6m³/min)を想定した風速分布解析結果を Fig. 7 に示す.

空気清浄装置上部にある吹出口(0.04m(x)×0.16m(y))から 14.6m/s の高風速で空気が鉛直方向に吹出される

ため、吹出気流は天井に衝突した後、天井面に沿って流れる様子が確認できる(Section 2-1)。空気清浄装置の吹出噴流の影響が及ぶ領域外では、室全体的に 0.4m/s 程度の滞留期域となる。空気清浄装置の位置は 1 壁面近傍の中央であることからほぼ対称な流れ場が形成される(Section 2-2)。

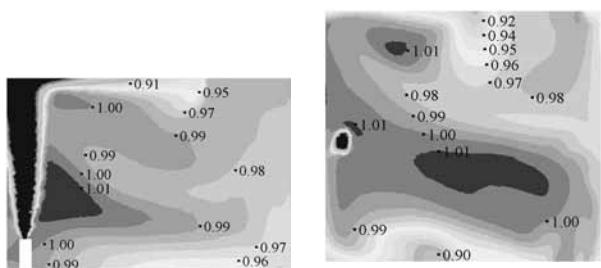
空気清浄装置運転時のクリーンルーム内空気齢分布(SVE3)解析結果を Fig. 8 に示す。ここでは空気清浄装置の吹出口が SVE3=0 であり、空気清浄装置の吸込口で SVE3=1.0 となる条件で解析を実施した。空気清浄装置運転時では室中央部に空気齢の最大値が 1.03 の部分が形成されるものの、室内はほぼ完全混合状態に近い濃度場が形成されている。



(1)Section 2-1

(2)Section 2-2

Fig. 7 Velocity magnitude in Case 2[m/s]



(1)Section 2-1

(2)Section 2-2

Fig. 8 Age distribution (SVE3) in Case 2 [-]

5.5 結論

本章では実大スケール実験チャンバーで評価するための基礎検討として、空調機による雰囲気制御(空調機運転時)における流れ場・拡散場解析を実施し、風速分布と空気齢分布を用いて気流性状について報告した。雰囲気制御時の流れ場では、風速分布では給気口と排気口の位置関係から循環流が室中央域を含む数か所に形成され、空調機の排気口の空気齢に対して空気齢の最大 1.6 倍大きい領域が存在することが示された。

空気清浄装置性能評価試験時の流れ場では、空気清浄装置の吹出噴流域以外の広範囲で、0.4m/s 以下の小さい風速が形成された。その領域では空気清浄装置吸込口での空気齢 1.0 に対して、約 0.94~1.05 の空気齢分布が形成され、現状では空気清浄装置からの吹出空気が効率よく、空気を攪拌させていないことが示唆された。今回の結果を踏まえ、壁面に光触媒建材を設置

した場合の解析を行い、建材表面に汚染物質を効率よく輸送させる流れ場の形成を検討する予定である。

6. 浮遊菌濃度減衰試験

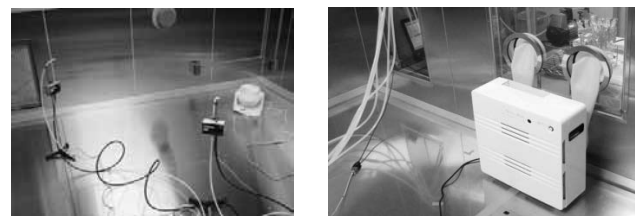
6.1 バイオクリーンルームの概要

本研究では光触媒関連の性能試験、特に微生物関連の濃度低減効果の評価を目指したバイオクリーンルームを使用しており、その試験時の内外観を Fig. 9 に示す。



(1) The front appearance

(2) The side appearance



(3) Sampling equipment

(4) Air purifier

Fig. 9 The appearance in the bio-clean room

6.2 対象浮遊菌と発生・サンプリング方法

前述のとおり本実験施設では BSL2 に対応する各種の菌・ウイルスでの試験が可能であるが、本報では表皮ブドウ球菌を対象とした実験について報告する。

凍結保存した菌液を 37°C、1 時間で解冻し、リン酸生理食塩水で希釈を行い、 10^{10} CFU/mL に調整した懸濁液を 7mL 用意した。その後、懸濁液をネブライザー(オムロン、NE-C29)の先端の噴霧位置に取り付け、0.4mL/min の流量で約 20 分間室内噴霧して浮遊させた。捕集器具として、リン酸生理食塩水を 10mL 入れたミゼットインピンジャーを用いた。1 回の捕集につき、5L/min で 2 分間(計 10L)の試験室内の空気を 3 箇所同時に吸引し、浮遊菌を採取した。

6.3 試験方法

試験に先行して 25 m³/min の給排気用 FFU を稼働させ、試験室内をクラス 1000 以下の清浄度にした後、15m³/min の流量で空調機により温度を 25±1°C、湿度 50±10%に制御する。

試験室内の調整完了後、試験室内の攪拌ファンを稼働させながら菌液を 20 分間噴霧し、5 分間攪拌した後攪拌ファンを停止させ、試験室内の初期条件(t=0)の浮遊菌を捕集した。その後、空気清浄装置を運転し、30、60、90、120 分後に試験室内の浮遊菌を捕集した。

試験終了後、254nm の殺菌用紫外光ランプを 30 分間照射し、試験前と同様に、ページ作業を行い、25 m³/min の給排気用 FFU を稼働させて試験室内をクラス 1000 以下の清浄度にした。

浮遊菌濃度減衰試験の実験条件を Table 3 に示す。

Table 3 The experiment condition of airborne bacteria concentration damping test

Cleanliness	CLASS 1000
Temperature [°C] (at the beginning)	25±1°C
Humidity [%] (at the beginning)	50±10%
Bacteria	Staphylococcus epidermidis (BSL1) [NBRC 12993]
Supply airflow rate for scrubber (Case 2)	5.6m ³ /min
Supply airflow rate for air purifier (Case 3)	6.0m ³ /min

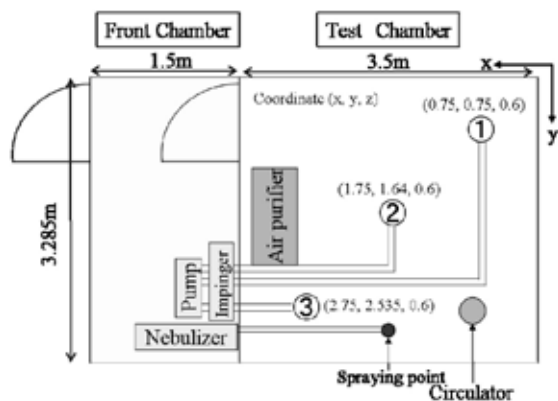


Fig. 10 The sampling point of airborne particle and airborne bacteria

6.4 浮遊菌数のカウントと同定

浮遊菌捕集後のミゼットインピンジャー内の捕集液を試料原液とし、生理食塩液で 10 倍段階希釈液を作製した。その試料原液または希釈液の各 0.1mL を Tryptic Soy Agar (TSA 培地) に平板培養した。また、試料原液の 1mL および残り全量を TSA 培地と混積培養した。これらの培地を 37°C で 48 時間培養後、コロニー数を計測し、空気 10 L あたりの浮遊菌数 CFU を算出した。

また、培養可能な菌数の他、空気中に浮遊する粒子数を計測するため、レーザー式パーティクルカウンター (TSI, Aero Trak 7301-02F) を試験室内に 3 箇所設置し、0.3/0.5/1.0/5.0µm の 4ch で 1 分間おきの浮遊粒子数のモニタリングを行った。サンプリング流量は 2.83L/min/1 台 (ニッタ, LPU-0.1-6-CR) である。

浮遊菌および浮遊粒子のサンプリングは、Fig. 10 に

示すように室中央を含む 3 カ所(全て床上 0.6m(z)位置)で実施した。

6.5 試験条件

本報では室内温湿度を一定条件とし、実験室内に設置した光触媒フィルター組込型の空気清浄装置の稼働の有無を条件として、(1) 自然減衰条件 (Case 1), (2) 空気循環条件 (処理流量 5.6m³/min, 送風機のみ, Case 2), (3) 空気清浄装置運転 (処理流量 6.0m³/min, Case 3), の 3 条件を設定した。自然減衰試験では、空気清浄装置を稼働しない条件での各サンプリングポイントにおける浮遊粒子および浮遊菌数の時間変化の確認に主眼があり、本実験の基本ケースである。空気循環条件は光触媒フィルターを取り除いた状態で空気清浄装置を稼働させ、実験室内に空気循環を作出するケース、空気清浄装置運転条件は光触媒フィルターを組み込んだ空気清浄装置を稼働させるケースである。

6.6 試験結果

実験室内に設置した 3 カ所のサンプリングポイントにおける 1.0µm の浮遊粒子数と浮遊菌数の時間変化を Fig. 11 に示す。浮遊粒子数、浮遊菌数共に実験の初期濃度(t=0)で無次元化して表示している。今回試験に使用した表皮ブドウ球菌は約 1.0µm のサイズを有しているため、1.0µm の浮遊粒子数の時間減衰傾向と浮遊菌数の培養結果には強い相関が確認された。

空気循環を実施した Case 2 では、自然減衰条件 Case1 の結果と比較して浮遊粒子数の減衰が有意に促進されたが、これは移流の増加に伴い壁面や床面等への沈着量が大きくなったことが一因と考えられる。

光触媒フィルターを組み込んだ空気清浄装置を運転した条件 Case 3 では、空気循環のみを作出した Case2 と比較して、120 分経過後では浮遊粒子数を 3 桁以上低減させる結果となっており、浮遊菌 CFU の結果も同様な傾向を示している。光触媒フィルターが浮遊菌濃度低減に与える定量的な効果が確認されたと云える。

6.7 考察

Fig. 11 に示した実験結果では、試験開始後 90 分を経過すると測定箇所によっては浮遊菌と浮遊粒子の結果に乖離が生じている。この一因として、浮遊菌のフィルター沈着や壁面沈着といった物理的除去効果の時間スケールと光触媒反応に伴う不活化の時間スケールが異なることが考えられるものの、試験精度の不確かさの問題も含まれるため、今後の検討が必要である。

実験で得られた浮遊粒子数の濃度変化を 1 次の反応速度 k_1 でモデル化した際の、各条件での速度定数を算出した結果を Table 4 に纏めて示す。各条件において

浮遊粒子の計測を行った3点での速度定数を算出したところ、空気清浄装置を運転させたケースでは、②の地点が他の2点に比べて速度定数が10%程度低く、濃度減衰性状と不均一流れ場の関係が示唆される。

7. 結語

本報では、光触媒反応の性能評価のために開発したバイオクリーンルームを用い、浮遊菌の濃度減衰試験を実施した結果の報告を行った。特に光触媒フィルターを組み込んだ空気清浄装置の性能評価を、チャンバー内に形成される流れ場・汚染物質拡散場形成の視点を踏まえて考察した。

浮遊菌濃度減衰試験では、空気清浄装置内の光触媒フィルターによる濃度低減に与える定量的な効果が示された。

今後は、空気清浄装置による清浄空気供給、浮遊菌除去に加え、光触媒を担持した建材を壁面に併用した場合の室内濃度低減効果に関して、実験を行い、数理モデルの検討を加えていく予定である。

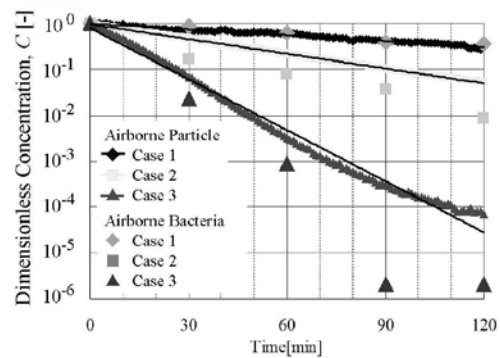
謝辞

本研究は九州大学と共同で行っているものであり、伊藤一秀准教授、Lim Eunsu 特任助教、堂本氏の協力に感謝いたします。

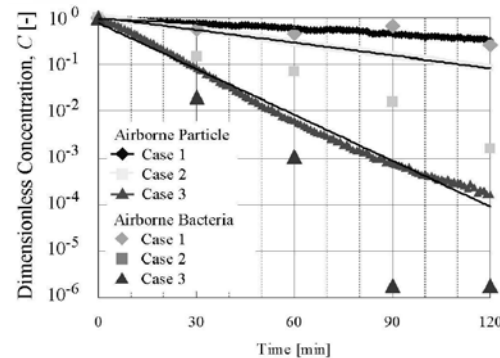
本研究の一部は経済産業省イノベーション拠点立地支援事業先端技術実証・評価設備整備費等補助金の助成を、一部は科学研究費補助金（課題番号24560717）の助成を受けたものである。

参考文献

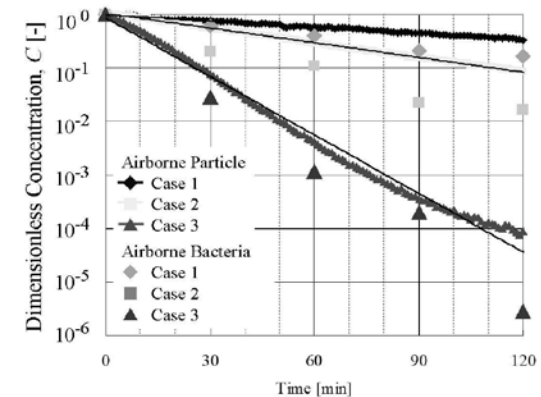
- 1) 橋本和仁, 藤嶋昭: 光触媒のすべて, 工業調査会, 2004年
- 2) 橋本和仁, 藤嶋昭: 酸化チタン光触媒研究動向 1991-1997, シーエムシー出版, 2005年
- 3) Shuzo Murakami, Shinsuke Kato, Kazuhide Ito, Akira Yamamoto, Yasushi Kondo, Junichi Fujimura, : Distribution of Chemical Pollutants in a Room Based on CFD Simulation Coupled with Emission / Sorption Analysis : *ASHRAE transaction* 107, 1., 2001, AT-01-13-3
- 4) Shuzo Murakami, Shinsuke Kato, Kazuhide Ito, Qingyu Zhu, : Modeling and CFD Prediction for Diffusion and Adsorption within Room with Various Adsorption Isotherms : *Indoor Air*, 13 (6), 2003.1, pp20-27
- 5) 室内環境学会 : 室内環境学会標準法 20110001 号 家庭用空気清浄機によるカビ孢子除去性能の評価試験法(2012)



(1) Sampling point ①



(2) Sampling point ②



(3) Sampling point ③

Fig. 11 The number of airborne particle and airborne bacteria

Table 4 The results of reaction rate constant

Test condition	Sampling point	Reaction rate constant, k_I [1/min]
Case 1	①	9.7×10^{-3}
	②	8.5×10^{-3}
	③	8.7×10^{-3}
Case 2	①	24.6×10^{-3}
	②	21.0×10^{-3}
	③	21.1×10^{-3}
Case 3	①	85.2×10^{-3}
	②	75.5×10^{-3}
	③	84.0×10^{-3}