

壁面沈着を考慮した室内ガス濃度場予測に関する研究

原 嶋 寛 住 吉 栄 作

Prediction of Indoor Gas Concentration Considering Wall Surface Deposition

Hiroshi Harashima Eisaku Sumiyoshi

Abstract

The concentrations of gaseous substances in indoor air depends on various factors, including the outdoor concentration, ventilation rate, wall surface deposition, and chemical reactions. In this study, ozone is the target gaseous substance. Although numerous research results concerning the surface removal rate of ozone and its numerical modeling have been published, the discussion on the humidity dependence of a wall surface deposition model for ozone is limited. In this study, the humidity dependences of the deposition velocity and mass accommodation coefficient of ozone are examined based on the experimental results of a previously reported study. Moreover, a revised numerical model incorporating the humidity dependence is proposed.

概 要

室内空気中に存在するガス体物質の濃度は、屋外濃度や換気量、壁面沈着、他の物質との反応等を含め、様々な要因に依存する。ガス体物質は様々あるが、本報ではオゾンを対象とした研究を報告する。オゾンの壁面除去速度やその数値モデル化に関する多くの研究結果が発表されているが、壁面沈着モデルの湿度依存性についての議論は限られていた。そこで、本研究では、オゾンの沈着速度や沈着確率に関して既往の実験結果を基に議論し、湿度依存性を組み込んだ修正数値モデルを提案した。

1. はじめに

2016年6月に労働安全衛生法が改正された¹⁾。特に、これまで安全データシート交付義務とされていた640物質に対して、リスクアセスメントの義務化へと強化された点は大きな改正項目の一つである。薬剤は、汚染物質としての側面がある一方で、例えば除染剤としてその効能を利用する場合もある。ゆえに薬剤ごとにリスクアセスメントを行い、薬剤の効能を安全に活用していくことが今後ますます重要になると予想される。除染剤として利用される物質は様々あるが、例えば、オゾンは、強い酸化力を有しており、環境表面除染や臭気対策等に利用されている。加えて、オゾンは、環境中で自然に酸素へと分解することも大きな特徴の一つである。ただし、オゾンは、健康影響が懸念される物質である。ゆえに、オゾンは、除染剤と有害物質の2面性を有する物質といえる。本報ではオゾンを例に検討を行う。

除染等の室内空気環境設計を行うためには、設計条件に応じた濃度場予測は必須と考えられる。濃度場予測のためには、発生源の把握とモデル化、移流拡散性状の把握に加え、室内の各壁面や什器表面での沈着現象を正しくモデル化し、予測評価モデルへの組み込みを行うことが必要となる。オゾンの発生源、移流拡散、沈着および他の化学物質との反応現象等を考慮した計算流体力学(以下、CFD解析)ベースの数値予測手法のモデリングや

精度検証に関する研究成果も比較的多く報告され、汚染物質としてのオゾン濃度の予測評価手法はある程度研究の方向性が定まりつつあるといえる^{2,3)}。

しかしながら、室内環境中でのオゾン濃度ならびに沈着量の予測モデルに関する一定の研究蓄積はあるものの、特に沈着現象の湿度依存性に関しては、その影響が指摘されているにもかかわらず、具体的なモデル化の方針が示されるには至っていないのが現状である。沈着現象の湿度依存性は、場の濃度予測の精度に影響すると共に、例えば除染効率の評価を行う際にも湿度の影響を評価した上で、濃度場を予測することは重要である^{4,9)}。

ガス体物質が気中から固体表面上へ移動する現象は、沈着または吸着と汎用的に表現される。沈着という表現はエアロゾル相を対象とした場合に用いられることが多いが^{11,12)}、ガス相に対しても用いられる場合がある。これまでのオゾンガスを対象とする場合には「沈着」と表現されることが多く^{2,15)}、本報でもこの表現を踏襲する。

このような背景のもと、本研究では、オゾンの沈着現象を再現する上で重要となる沈着速度や沈着確率の湿度依存性に関して、既往実験結果を参考とした上で、湿度依存性を陽に組み込んだ沈着フラックス(流束)のモデル化に関して議論する。

2. オゾンに関する既往研究の調査

2.1 室内空気環境に関連するオゾンの既往研究

室内空気環境中のオゾンを対象とした研究は、オゾンに有害物質と捉えた研究蓄積が多い。オゾンに対する暴露と疾病率や致死率に正の相関が見られることは多くの研究者によって報告されている¹⁰⁾。

一方、除染剤としてのオゾン利用に関しても、近年盛んに報告されている⁵⁾。医薬品製造および医療分野では、高い清浄環境が要求される空間の除染に、ホルムアルデヒドガスが利用されてきた。しかし、ホルムアルデヒドはシックハウス症候群等の原因物質とされ、それに替わる薬剤や除染法に関する研究が行われている。オゾンガスの他、過酸化水素ガス、二酸化塩素ガスおよび酸化エチレンガス等が代替剤として議論されている⁵⁾。

本節では、有害物質としての疫学的な知見や除染剤としてのオゾンに関する既往研究を簡単に整理した。次節では、除染の評価や濃度場予測に重要となる壁面沈着モデルに関する既往研究について整理する。

2.2 壁面沈着フラックスモデル

これまでのオゾン壁面沈着モデルは、気相側の参照濃度と壁面沈着相濃度のポテンシャル差を駆動力としたモデル化ではなく、気相側参照濃度と流体性状のみを駆動力として表現したモデル化が主流である¹⁵⁾。本研究でもこのモデル化の方針を踏襲する。

壁面表面に形成される濃度境界層外側を参照濃度として用いる場合のオゾン壁面沈着フラックスは(1)式のように記述される。Fig. 1に沈着フラックスモデルに関する概念図を示す。

$$J_d = -v_d \cdot C_\infty \quad (1)$$

ここで、 v_d は沈着速度[m/s]、 C_∞ は濃度境界層外側の参照濃度[ppm]を示す。

沈着速度は、既往研究にてその同定結果が数多く報告されており、本報では、沈着速度は既知のものであるとする¹⁵⁾。沈着速度は表面濃度をゼロとした場合の物質伝達率に相当する。本来、物質伝達率は流れ性状に依存する変数であり、定数扱いとすると濃度場の予測精度の低下を招く可能性が高い。

参照濃度を境界層の外側ではなく、壁面の極近傍、特にオゾン分子の平均自由行程の長さスケールに設定した場合には、分子運動論より、壁面沈着フラックスが次式で定義される¹⁶⁾。

$$J_s = -\gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} C_s \quad (2)$$

ここで、 γ は沈着または反応確率を示す。 C_s は表面近傍の参照濃度[ppm]（厳密に言えば、表面から $2\lambda/3$ の距離での参照濃度、 λ はオゾン分子の平均自由行程）を示す。 $\langle v \rangle$

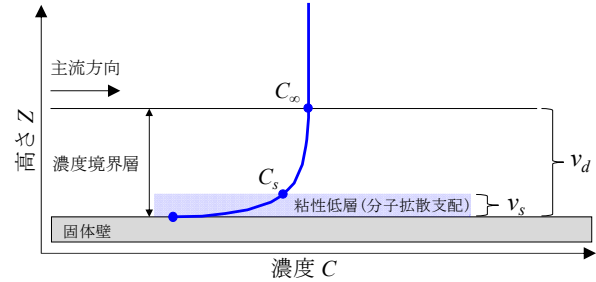


Fig. 1 壁面沈着フラックスモデルの概念図
Conceptual Diagram of Wall Surface Deposition

は、ボルツマン速度[m/s]を示す。室温環境下($T=293[K]$)でのオゾンのボルツマン速度 $\langle v \rangle$ は $360 [m/s]$ 程度である。

(2)式は平均自由行程スケールで成立する為、CFDを用いた解析に適用する場合、流れ場解析で必要とされる長さスケールと大きな相違が生じる。この点は、CFDへ適用するため、粘性底層内での解像を前提とした分子拡散係数による補正方法が提案されている((3)式)^{2,3,16)}。

$$J_s = -\frac{\gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4}}{1 + \gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} \cdot \frac{\Delta y_1}{D_o}} C \Big|_{y=\Delta y_1} \quad (3)$$

ここで、 D_o は気中でのオゾンの分子拡散係数[m²/s]、 Δy_1 は壁面第一セルの定義点距離[m]を示す。

(1)式や(3)式をCFDに組み込んだ上で室内環境中でのオゾン濃度場を評価するためには、適切なパラメータ設定が必要になる。

2.3 壁面沈着速度に関する既往実験結果

既往研究では、各種建材に対するオゾンの沈着速度および沈着確率に関する推定結果が報告されているが、沈着速度の湿度依存性に着目した研究報告は限られている。Grøntoftらは、オゾンの沈着速度の湿度依存性について、既往の知見と自身のチャンバー法による実験結果を踏まえ、建材を中心とした24種類の材料に関する表面極近傍の沈着速度 v_s のデータベースを整備した結果を報告している¹⁷⁾。 v_s の(2)式との関係は以下の通りである。

$$v_s = \gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} \quad (4)$$

Grøntoftらの報告には、室内環境中に存在する建材表面に対するオゾンの表面極近傍の沈着速度および沈着確率の殆どは、相対湿度の上昇に伴い、その値が大きくなる傾向が確認されている¹⁸⁾。

また、オゾンガスを用いた室内環境除染の報告では、相対湿度の上昇に伴い殺滅対象となる微生物またはウイルスの死滅率が高まるという指摘もある^{4,9)}。ただし、これは、相対湿度の上昇に伴う微生物の活性・挙動変化やオゾン由来の活性酸素の発生量の増大等も考えられる。しかしながら、相対湿度の上昇に伴う壁面への沈着フラッ

クスの増大があるとするならば、その影響を定量的に把握することが必要である。そこで次章では、オゾンの沈着現象に関する湿度依存性を考慮した沈着フラックスのモデル化を検討する。

3. 湿度依存性を組み込んだオゾンの壁面沈着モデルの提案とパラメータ同定

本章では、湿度との依存関係を再現する数理モデルを検討すると共に、既往研究を参考に検討した数理モデルのモデルパラメータの同定結果を報告する。

3.1 湿度依存性を考慮したオゾンの壁面沈着モデル

(3)式に示した沈着確率 γ を用いた沈着フラックスのモデル化では、オゾンの熱運動速度の影響を直接考慮している。ゆえに、雰囲気温度が上昇すると、ボルツマン速度($\langle v \rangle$)が大きくなり、比例してオゾンの壁面沈着フラックスが増大する。 γ は壁面で衝突した一定量のオゾンに対する分解除去割合を示し、この場合定数として扱われることが多い。すなわち、(3)式のモデル化をベースとすれば、温度依存性はボルツマン速度の変化で表現されていると仮定し、湿度依存性は γ に負担させるが妥当と考えられる。Grøntoftらは、材料表面に吸着している水分子がオゾンの沈着現象に及ぼす影響に関して、実験結果を基

に考察している¹⁸⁾。本報では、気相側(空気側)の湿度が変化した場合に、材料表面の水分子相が変化する結果として γ が変化すると仮定し、 γ に対する湿度影響による補正を施す。この場合の γ のモデル化を以下に示す。

$$\gamma' = f(\phi) \cdot \gamma \quad (5)$$

ここで、 γ' は湿度依存に関する補正を施した沈着確率[-]、 $f(\phi)$ は補正関数、 ϕ は壁面近傍での局所平衡相対湿度[-]を示す。この補正関数については様々な候補が考えられるが、本研究では既往実験結果への適合性を鑑みて指数関数を仮定する。

$$f(\phi) = \exp[k_{s\phi} \cdot \phi] \quad (6)$$

ここで、 $k_{s\phi}$ は補正係数を示す。また、この補正後の(2)式および(3)式を以下に示す。

$$J_s = -\gamma' \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} C_s \quad (7)$$

$$J_s = -\frac{\gamma' \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} C|_{y=\Delta y_1}}{1 + \gamma' \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} \cdot \frac{\Delta y_1}{D_o}} \quad (8)$$

(8)式の分母は、ガス分子の平均自由行程スケールからCFDスケールへの拡張に関する分子拡散係数を用いた γ

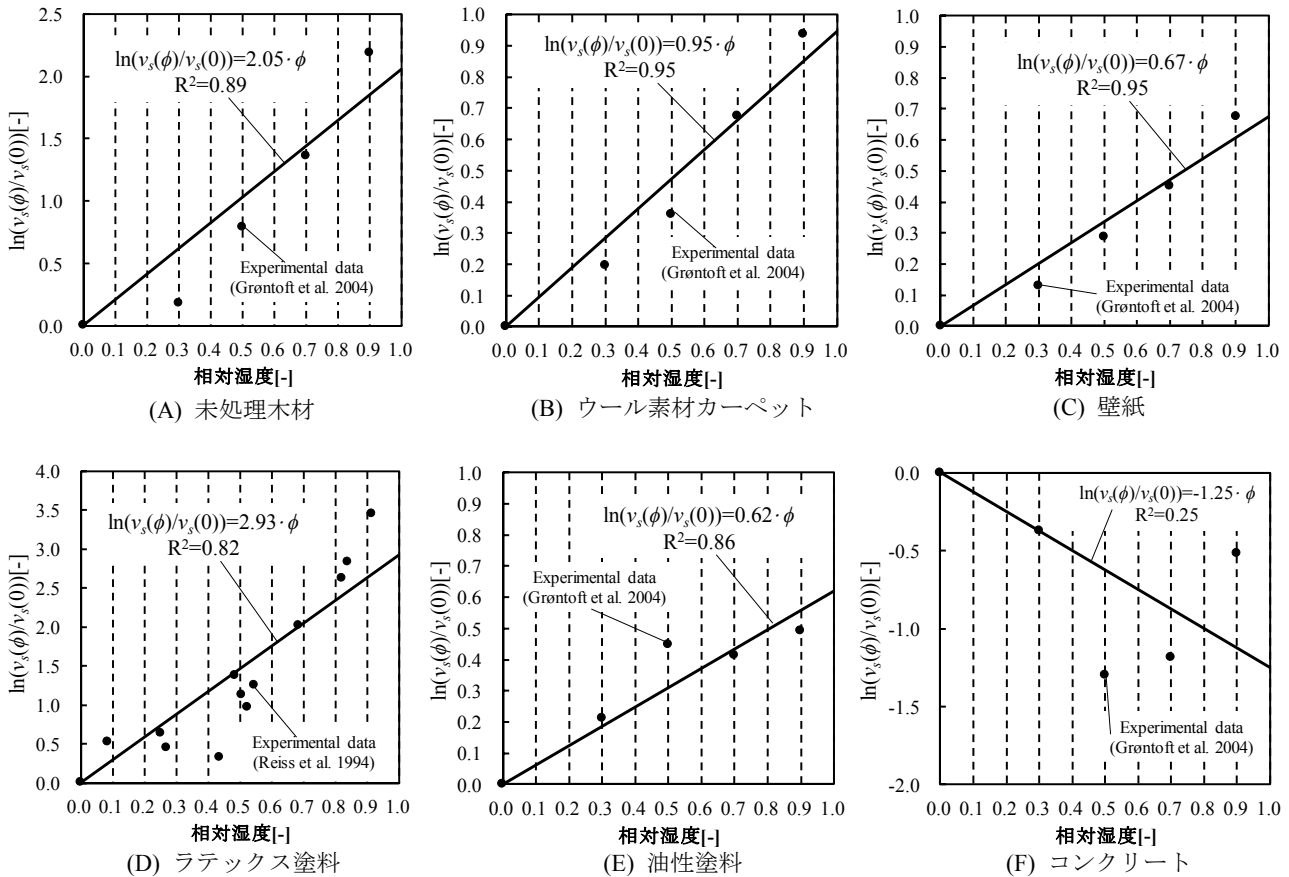


Fig. 2 既往実験結果に基づくモデルパラメータの同定結果
 Results of Model Parameter Identification Based on Experimental Results

の補正を示す。壁面近傍の平均自由行程スケールから粘性低層内のスケール間の拡散移動に対する湿度影響は無視できると判断し、(8)式分母中の γ には湿度依存性補正を施していない。

3.2 湿度依存型モデルのパラメータ同定

本節では、前節で提案した湿度依存性を陽に組み込んだモデルのモデルパラメータ同定を行う。ここでは、Grøntoftら及びReissらの実験結果を対象とする¹⁷⁻¹⁹⁾。Grøntoftらは、空気温度22°C一定の条件下で相対湿度を変化させた場合での v_s の推定結果を報告している。Reissらはラテックス塗料に関する γ の湿度依存性を報告しているが、空気温度条件は明らかにされていない。しかしながら、彼らの報告は室内環境中でのオゾンの沈着現象を対象としており、温度条件も室温環境下を想定して実施されたものと推察される。本報では室内環境中で表面仕上げ材として使用の可能性がある未処理木材、ウール素材カーペット、壁紙、油性ペイント、ラテックス塗料、コンクリートを対象にモデルパラメータの同定を実施する。モデルパラメータの同定のため、(5)および(6)式を以下のように扱う。

$$\ln\left(\frac{\gamma(\phi)}{\gamma(0)}\right) \text{ or } \ln\left(\frac{v_s(\phi)}{v_s(0)}\right) = k_{s\phi} \cdot \phi \quad (9)$$

Fig. 2には、実験結果のプロットに加えて、モデルパラメータ同定結果を重ねて示す。グラフは、縦軸が相対湿度0[-]での沈着確率もしくは表面近傍の沈着速度で各々を無次元化した値(自然対数軸)、横軸が相対湿度[-]を示す。図中のパラメータは、最小二乗法による線形回帰分析により同定した。ラテックス塗料については、相対湿度0.04 [-]での実験値を相対湿度0[-]の値として取り扱った。Fig. 2に示す通り、未処理木材、ウールカーペット、壁紙、ラテックス塗料、油性塗料は、相対湿度の上昇に伴い、沈着確率もしくは表面近傍の沈着速度が増大する傾向が確認され、回帰式の決定係数も比較的高い結果となった。しかし、コンクリート系の材料に関しては、他の材料とは明らかに異なる傾向を示した。コンクリート

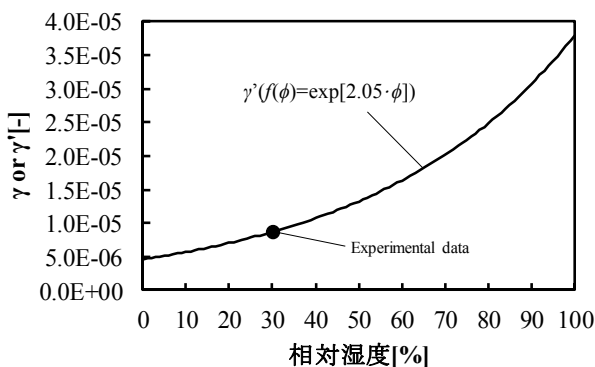


Fig. 3 湿度依存性を考慮した沈着確率の試算結果
Prediction Result of Mass Accommodation Coefficient
of Ozone Considering Humidity Dependence

は、相対湿度が50%で最小となる様相が確認された。また、石系の材料表面に関しても同様の傾向が報告されている^{17,18)}。コンクリートや石系材料に関する表面極近傍の沈着速度の湿度依存性については、知見が十分ではなく、現在でも統一した見解が得られていないのが実情である。

3.3 沈着確率の湿度依存型モデルの試算例

伊藤らは、8種類の建材を対象とした沈着確率の測定結果を報告している^{20,21)}。実験は、空気温度20±0.1°C、相対湿度30±10%の環境下で実施されている。本節では合板(plywood)の実験結果に本研究で作成した補正関数を適用し、湿度依存性を施した沈着確率を試算した(Fig. 3)。合板の沈着確率 γ に対する補正係数は、未処理木材の補正值($k_{s\phi}=2.05$)を用いた。Fig. 3に示す通り、相対湿度0%を基準とした場合、相対湿度が変化することで γ' は7倍程度の範囲で変動する可能性があることが分かる。既往研究で報告されている表面極近傍の沈着速度や沈着確率の推定実験では、相対湿度10-50%の範囲で一定に制御された環境下で実施されていることが多い。オゾンの沈着確率もしくは表面近傍の沈着速度に関する推定結果には、同じ種類の建材においても推定値にばらつきが見られる。オゾンの沈着現象に対する湿度影響は無視し得ない程度に存在することが示唆される。

また、オゾンガスを用いた除染を考えた場合には、高湿度場になるほど殺滅対象の微生物またはウイルスの死滅率が高くなるという知見が報告されている^{4,9)}。殺滅対象が存在する材料表面にオゾンが沈着し、その後、対象との2次反応を仮定するならば、相対湿度の上昇に伴い沈着フラックスが増加し、壁面での沈着相濃度が上昇することで除染効率も上昇する、とのメカニズムが説得性を持つ。

4. 単純モデルルームを対象とした感度解析

本報ではこれまでに整理した湿度依存性を組み込んだ沈着モデルの感度と室内のオゾン濃度分布に与える影響を確認するため、単純なモデル室内を対象としたCFD解析を実施する。今回は、実用性を考慮し、RANSモデルでの検討を行う。解析対象は、単純な2次元気流が再現された縮小室モデルとする³⁾。

4.1 解析空間

本報で対象とした解析空間の概要をFig. 4に示す。解析対象空間は、1500X×300Y×1000Z[mm]の容積を有し、模型奥行き方向(Y方向)には均一となる2次元流れ場(X-Z面)が再現されるように設計されている。

4.2 流れ場解析の概要

境界層粘性底層内の速度プロファイルならびに濃度境界層のプロファイルを詳細に解像するため、低Re型k-εモ

デル(AKNモデル)による解析を実施する。吹出風速は、 $U_{in}=2.0[m/s]$ とし、吹出気流の乱れ強さは実験値に基づき1.5%とする³⁾。メッシュ分割については、壁座標1以内に1メッシュ以上確保している。Table 1に流れ場解析に関する数値解析条件を示す。

4.3 解析ケース

本報では、壁面は断熱断湿条件であるとして定常計算によるオゾン濃度場、温度場及び湿度場の解析を行う。Table 2に感度解析ケースの一覧を示す。

既往研究では、空気温度 $20^{\circ}C$ 、相対湿度(RH) $0.3\pm0.05[-]$ の環境下で実験が実施されているため、この温湿度条件を基準とする。空気温度を $20^{\circ}C$ 一定で相対湿度(RH)を0、0.3および0.8 $[-]$ の3パターンに分け、濃度場に与える影響を把握する。加えて、相対湿度(RH)0 $[-]$ 一定の条件における10から $50^{\circ}C$ の範囲で空気温度を変化させた場合の濃度分布への影響も把握する。解析対象空間の周壁は断熱・断湿条件とし、吹出空气の温湿度を含めて、空間は一樣の温湿度分布になる条件とした。模型周壁に設置する建材は合板とし、オゾンの湿度依存型の沈着モデルは(8)式を適用する。(8)式の分母の γ は、絶乾状態の値とする。 γ について3.3節で検討した値を用いる(Fig. 3)。

4.4 流れ場の解析精度

Fig. 5は流速分布解析結果を、Fig. 6は室内の代表的な測定位置における実験と解析結果の比較を示す。CFDによる流れ場の解析結果は、実験模型内の流れ場をある程度再現できていることが確認できる。本流れ場を対象とし、湿度依存性を組み込んだ沈着モデルによるオゾン濃度場の感度解析結果を次節で報告する。

4.5 オゾン濃度場の感度解析結果と考察

給気口(Supply Inlet)より一定オゾン(1.0ppm)を供給した場合の室内のオゾン濃度分布解析結果をFig. 7に示す。また、実験値と解析値の濃度の比較結果をFig. 8に示す。Fig. 9は解析ケース結果の比較を示し、温度の依存性に関する感度を確認している。

Fig. 7より、室内でのオゾン濃度の低下は壁面に対す

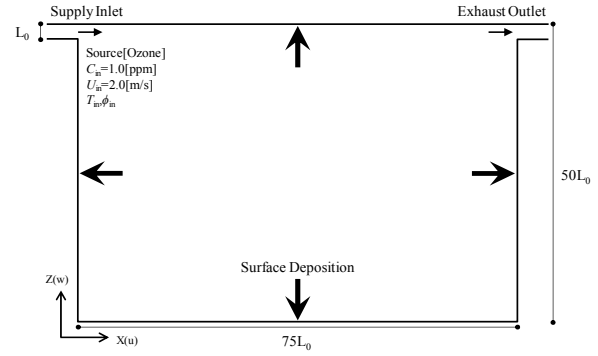


Fig. 4 2次元流れ場実験模型の概要
Outline of 2D Test Room

Table 1 解析および境界条件
Numerical and Boundary Conditions

乱流モデル	Low Re k-ε model (AKN model)
メッシュ	172(X) × 152(Z)
スキーム	Convection term: Quick
流入境界	$U_{in}=2.0 [m/s]$, $k_{in}=3/2 \times (U_{in} \times 0.015)^2 [m^2/s^2]$, $\varepsilon_{in}=C_{\mu} \times k_{in}^{3/2} / l_{in} [m^2/s^2]$, $C_{\mu}=0.09$, $l_{in}=L_0 \times 1/7 [m]$, $L_0=0.02(\text{Slot width})[m]$
流出境界	$U_{out}=\text{free slip}$, その他: free slip
壁境界	Velocity : No slip, その他: No slip

Table 2 感度解析ケース一覧
List of Sensitivity Analysis

Case	Temp. (T_{in})[$^{\circ}C$]	RH (θ_{in}) [-]	γ [-]	C_{in} [ppm]
T20RH0.0	20	0.0	4.70×10^{-5}	1.0
T20RH0.3		0.3	8.70×10^{-5}	
T20RH0.8		0.8	2.42×10^{-4}	
T10RH0.0	10	0.0	4.70×10^{-5}	
T35RH0.0	35		4.70×10^{-5}	
T50RH0.0	50		4.70×10^{-5}	

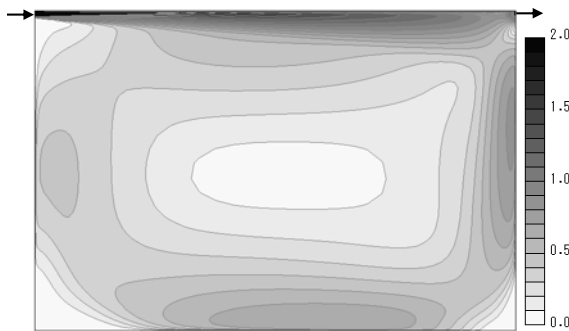
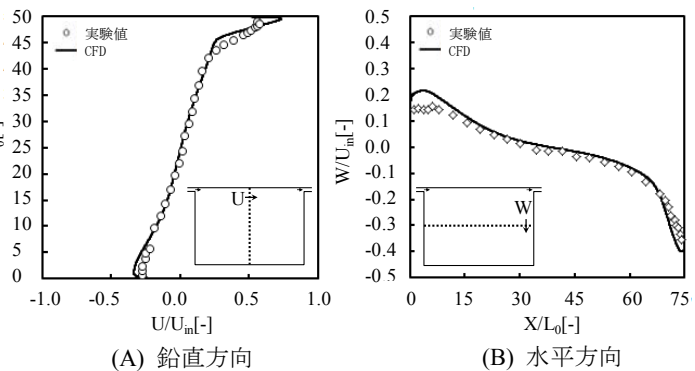
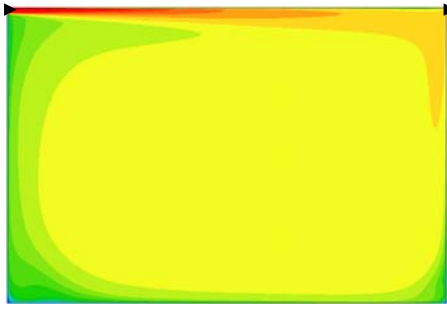
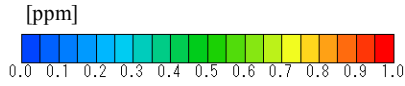


Fig. 5 模型内の流速分布解析結果[m/s]
Velocity Magnitude Distribution in 2D-Test Model

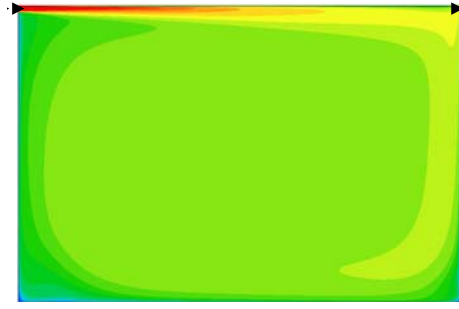


(A) 鉛直方向 (B) 水平方向

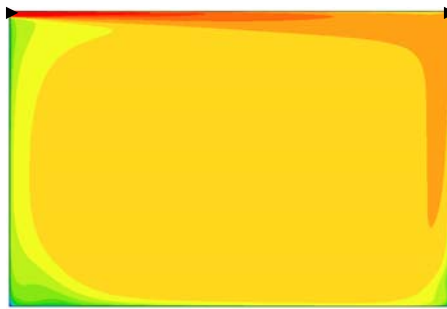
Fig. 6 風速に関する実験値と解析値の比較
Comparison of Air Velocity between CFD and Measurements



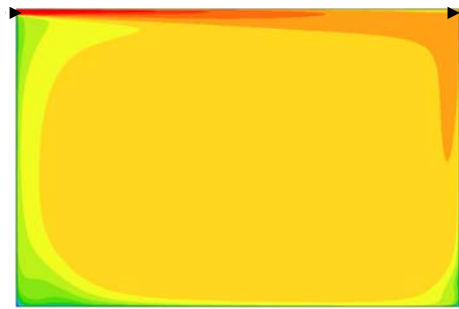
(A) Case T20RH0.3



(B) Case T20RH0.8



(C) Case T10RH0.0



(D) Case T50RH0.0

Fig. 7 オゾン濃度分布
Ozone Concentration Distribution

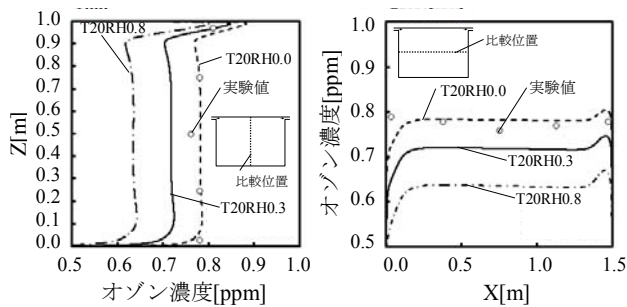


Fig. 8 オゾン濃度分布の実験と解析結果の比較
(Case T20RH0.0, T20RH0.3, T20RH0.8 の比較)
Comparison of Ozone Concentration Profiles between CFD
Results and Measurements

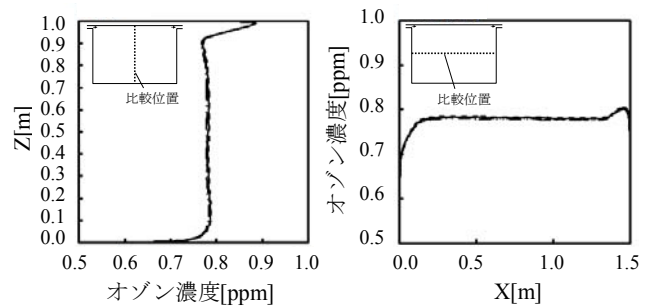


Fig. 9 オゾン濃度分布の解析結果の比較
(Case T10RH0.0, T20RH0.0, T35RH0.0, T50RH0.0 の比較)
Comparison of Ozone Concentration Profiles on CFD Results

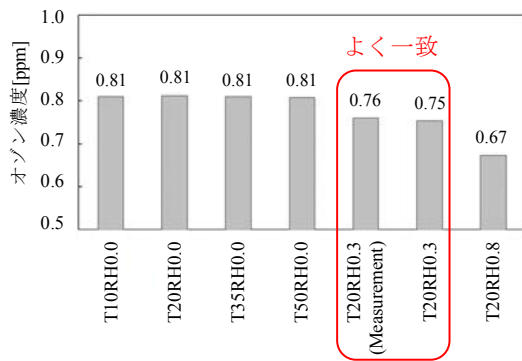


Fig. 10 排気濃度の比較
Comparison of Exhaust Ozone Concentration

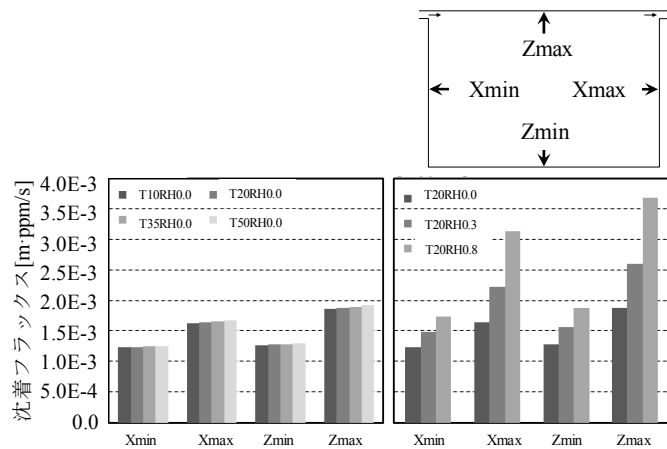


Fig. 11 各壁面に関する沈着フラックスの比較
Comparison of Deposition Flux on Each Wall Surface

る沈着現象のみより生じ、相対湿度(RH)が高いと、供給されたオゾン濃度は、壁面に沈着し、結果として室の平均的なオゾン濃度が低下する様子が確認された。

Fig. 8より、実験条件と同様の温湿度条件下に設定されたCase T20RH0.3と実験値を比較すると、若干の差異が確認されたものの、その差は15%程度の誤差に収まっている。湿度影響は空気温度を20°C一定とし、相対湿度(RH)を0.0、0.3及び0.8[-]の計3ケースで比較した。

Fig. 8に示す通り、湿度に関する濃度場への影響が大きいが確認できる。

温度影響を確認するFig. 9では、相対湿度(RH)0.0[-]で固定し、10、20、35および50°Cの計4ケースで比較した。Fig. 9に示す通り、今回の検討範囲内においては、湿度影響と比較して設定温度が濃度場に与える影響は相対的に小さいといえる。

また、Fig. 10には、排気濃度で各ケースを比較した結果を示す。排気濃度では、実験値が0.76ppmに対して解析値は0.75ppmとよく一致した。実験値と解析値の空間分布には若干の差異は見られるものの、本モデルの再現精度は実用上必要十分であると考えられる。

Fig. 11には、各面に対する沈着フラックスを解析ケースごとに示す。図中の沈着フラックスは、各面に対する平均値を示している。温度に対する沈着フラックスの差はほぼボルツマン速度の変化に対応するが、本報で設定した温度範囲におけるボルツマン速度の変化は数%程度であり、沈着フラックス量の変化に与える影響は非常に小さい。温度に関する沈着フラックスについては、CaseT10RH0.0に対してCaseT50RH0.0を比較すると、最大でも2%程度の増大である。湿度は、CaseT20RH0.0に対してCaseT20RH0.8では、沈着フラックスが最大で196%となり、約2倍増加する結果となった。ゆえに、オゾンの沈着現象に関しては、温度よりも湿度の影響が遥かに大きいといえる。

前述の通り、Fig. 8に示した解析値と実験値の空間分布には、概ね15%程度の差異が確認された。この原因としては、様々考えられるが、例えば、流れ場の解析精度が挙げられる。実験の流れ場は、2次元流れ場が形成される流れ場であるが、実験自体は3次元の室内模型で実施されている。流れ場の高精度化は、課題である。また、壁面沈着現象に関しても今回は定常場を仮定したが、オゾンエイジングによる沈着現象の経時変化を指摘する報告もあり、その影響は無視できない¹⁵⁾。これを考慮したより高精度な濃度場予測は今後の課題である。

5. まとめ

本報では、オゾンの沈着現象を再現する上で重要となる表面極近傍の沈着速度や沈着確率の湿度依存性に関して、既往実験結果を参考とした湿度依存性を陽に組み込んだ沈着フラックスモデルを検討した。加えて、温湿度依存性を組み込んだ沈着フラックスモデルの感度解析を、

単純な室モデルを対象として実施した。本報で得られた知見を整理すると以下となる。

- 1) オゾンの表面極近傍の沈着速度は建材種に対する依存性があると共に、明確な湿度依存性が確認された。
- 2) 建築空間で使用される一般的な建材表面に対する沈着速度の湿度依存性は、指数関数型のモデルでほぼ近似可能である。しかしながら、コンクリートや石材系の材料は相対湿度が50%近辺で反応量が小さくなるとの実験結果が報告されており、反応メカニズムに関する今後の議論が必要である。
- 3) 合板にて囲まれた室モデルを想定し、温湿度影響を組み込んだオゾン沈着フラックスモデルの感度を検討した結果、温度影響はほぼ無視できるものの、湿度影響はオゾン沈着量予測に大きな影響を与えることが確認された。特に相対湿度(RH)0[-]と0.8[-]の条件では、オゾン沈着フラックス量に約2倍の差が確認された。

今後は、リスクアセスメントなどの実環境評価へ本手法を展開していく予定である。

参考文献

- 1) 厚生労働省・都道府県労働局・労働基準監督署：労働災害を防止するためリスクアセスメントを実施しましょう, pp. 1-15, 2015.09
- 2) Dan Nørføft Sørensen et al. : Modeling gas phase reactions in indoor environments using computational fluid dynamics, Atmospheric Environment, Volume 36, Issue 1, pp. 9-18, 2002
- 3) 伊藤一秀, 他：各種建材を設置した居室模型内オゾン気中濃度分布の測定と沈着モデルを組み込んだ数値解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 104, pp. 41-50, 2005.11
- 4) 柳宇, 他：空調システムにおける微生物汚染の実態と対策に関する研究, 第3報オゾンによる殺菌性能に関する基礎的な検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 73, No. 632, pp. 1197-1200, 2008.10
- 5) 新谷英晴：製造環境内微生物の測定、評価及び制御 ⑦環境菌の滅菌剤、防菌防黴, Vol. 36, No. 11, pp. 791-804, 2008
- 6) Meltem Yesilcimen Akbas et al. : Application of gaseous ozone to control populations of Escherichia coli, Bacillus cereus and Bacillus cereus spores in dried figs, Food Microbiology, Volume 25, Issue 2, pp. 386-391, 2008
- 7) Ahmet Aydogan et al. : Application of Gaseous Ozone for Inactivation of Bacillus subtilis Spores, J. Air and Waste Manage. Assoc. 56, pp. 179-185, 2006
- 8) Kozo Ishizaki et al. : Inactivation of Bacillus spores by gaseous ozone, Journal of Applied Bacteriology Volume 60, Issue 1, pp. 67-72, 1986

- 9) Mie Sakurai et al. : Several Factors Affecting Ozone Gas Sterilization, Bio-control Science, Vol. 8, No. 2, pp. 69-76, 2003
- 10) Bell ML. et al. : Ozone and short-term mortality in 95 US urban communities, 1987-2000, JAMA 292, pp. 2372-2378, 2004
- 11) 高橋幹二 : エアロゾル学の基礎, 森北出版, pp. 46-70, 2003
- 12) K. Takahashi et al. : A theoretical study of the equilibrium particle size distribution of aerosols, Atmospheric Environment, vol.2, Pergamon Press, pp. 441-453, 1968
- 13) Matthew F. Vercé et al. : Minimizing Decomposition of Vaporized Hydrogen Peroxide for Biological Decontamination of Galvanized Steel Ducting, Environ. Sci. Technol., 42, pp. 5765-5771, 2008
- 14) 田中郁生, 他 : 過酸化水素 H_2O_2 の室内濃度分布予測と除染効果のモデル化, 第1報壁面吸着分解モデルとモデルパラメータ同定, 日本建築学会環境系論文集, Vol.79, No. 702, pp. 671-680, 2014.8
- 15) D. Poppendieck et al. : Ozone reactions with indoor materials during building disinfection, Atmospheric Environment, Volume 41, Issue 15, pp. 3166-3176, 2007
- 16) Cano-Ruiz, J.A. et al. : Removal of reactive gas-es at indoor surfaces. Combining mass transport and surface kinetics, Atmospheric Environment, Volume 27, Issue 13, pp. 2039-2050, 1993
- 17) T. Grøntoft et al. : Compilation of tables of surface deposition velocities for O₃, NO₂ and SO₂ to a range of indoor surfaces, Atmospheric Environment, Volume 38, pp. 533-544, 2004
- 18) T. Grøntoft et al.: The humidity dependence of ozone deposition onto a variety of building surfaces, Atmospheric Environment, Volume 38, pp. 59-68, 2004
- 19) Reiss Richard et al. : Modeling ozone deposition onto indoor residential surfaces, Environmental Science & Technology, Volume 8, No. 3, 1994
- 20) 伊藤一秀, 他 : ガラス製境界層型テストチャンバーの開発とMass Accommodation Coefficientの推定, 日本建築学会環境系論文集, No. 596, pp. 37-43, 2005.10
- 21) Kazuhide Ito et al. : Measurements of Mass Accommodation Coefficients Using a Flat-Plate Test Chamber, Indoor Air 2005, The Tenth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China, pp. 2335-2339, 2005