

# 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

伊藤 一秀 <sup>\*1</sup>, 加藤 信介 <sup>\*2</sup>

換気により外気を室内に導入することで、外気由来のオゾン [O<sub>3</sub>]が室内に滞留している可能性が指摘されており、また OA 機器等からの発生と相まって室内のオゾン濃度の上昇が懸念されている。また、オゾン自身の毒性の他、強力な酸化力を有することから、室内での主たる化学反応物質としても注目されており、その反応の結果として Free Radical、Hydroperoxides、Aldehydes、Ketones、Organic Acids、Secondary Organic Aerosols 等の不快感を誘発する酸化生成物の 2 次生成が指摘されている。

このような背景のもと、本研究では居室型のスケール模型を用い、各種の建築材料を壁面仕上げに使用した場合の室内オゾン濃度分布形成に与える影響を実験的に検討する。特にオゾン濃度分布を測定することで、数値解析精度検証用のデータを提供する。更に CFD (計算流体力学)に個体表面に対するオゾンの沈着モデルを組み込んだ数値解析を実験と同条件で行うことで、室内のオゾン濃度分布予測に関する数値解析精度の検証を行う。

**キーワード** : オゾン・計算流体力学・居室模型実験・沈着モデル

## 序

筆者らは室内のオゾン濃度分布予測法の開発を目指して一連の研究に取り組んでおり、オゾン濃度分布の測定ならびにオゾン沈着モデリングに関して既報<sup>1,2)</sup>にて報告を行っている。特に SUS 304 ならびにガラスで構成された居室型のスケール模型を対象として、模型内のオゾン濃度分布を詳細に測定すると共に、SUS 304 に対するオゾンの沈着現象に関して濃度依存性の検討を行った結果を報告している<sup>1)</sup>。また別報<sup>2)</sup>では、境界層型のテストチャンバーを用いて合板、壁紙、ペイント等の各種建材表面におけるオゾンの沈着量を測定し、オゾン沈着モデルの支配パラメータである Mass Accommodation Coefficient のデータを蓄積し、その結果を報告している。

本報では、既報<sup>1,2)</sup>で報告した結果に加え、乱流場を対象として、特に各種の固体壁面に対する沈着現象に着目した実験を行う。既報<sup>2)</sup>の境界層型のテストチャンバーを用いた実験では、オゾン沈着モデルの支配パラメータである Mass Accommodation Coefficient を層流条件の下で測定したのに対し、本報では一般室内での乱流場を対象とし、2次元の居室型スケール模型を用いて気中でのオゾン濃度分布の測定を行うものである。特に既報<sup>2)</sup>で測定対象とした 7 種類の建材を居室型スケール模型の壁面仕上げとした場合の、室内オ

ゾン濃度分布形成に与える影響を測定する。さらに居室型スケール模型を用いたオゾン濃度分布測定実験と同条件で CFD(計算流体力学)による室内オゾン濃度場予測を行うことで、乱流場を対象とした場合の沈着モデル精度、ならびに数値解析予測精度の検証を行う。CFD に組み込んだオゾン沈着モデルの支配パラメータ(Mass Accommodation Coefficient)の値は、既報<sup>2)</sup>で報告した値を適用する。

## 1. 居室型スケール模型実験概要

本研究では外気由来のオゾンを想定し、換気により居室模型吹出口から供給されたオゾンの室内濃度分布の測定を行う。本研究で用いた 2 次元の居室型スケール模型を図-1 に示す。模型は一般的な居室を約 1/3 スケールでモデル化したものであり、1500<sup>X</sup>[mm]×300<sup>Y</sup>[mm]×1000<sup>Z</sup>[mm]の空間容積を有する。模型は流れ場が Y 方向に均一になるよう、即ち 2 次元性状が再現されるよう設計されており、キャビティ幅(y 方向)と同幅のスロット状吹出口と吸込口を備える。吹出・吸込口は共に幅(z 方向) 20mm である。天井、床及び左右両壁面は SUS 304 で構成し、その他はガラス製である<sup>注1)</sup>。この模型は、恒温室内に設置され、温度 20°C 一定に制御する。吹出風速は 3.0 m/s (換気回数 144 回/h)および 2.0 m/s (96 回/h) の 2 段階に制御している。模型に対する供給空気は、化学物質除去を意図とした活性炭系フィルタを通過後、HEPA フィ

\*1 東京工芸大学 正会員

\*2 東京大学生産技術研究所 正会員

表-1 実験条件

Room Model Vol.	1500(x)×300(y)×1000(z) [mm]
Air Inlet Velocity	$U_{in} = 2.0 \text{ m/s}$ and $3.0 \text{ m/s}$
Air Change Rate	96 /h and 144 /h
Temperature	$20 \pm 0.1^\circ\text{C}$
Relative Humidity	$30 \pm 5\%$

表-2 実験ケース

Exp. Case	Building Material	$C_{in}$ [Ozone]	$U_{in}$
Case (e1-2)	SUS 304	1.00 ppm	2.0 m/s
Case (e2-2)	Water-based Paint		
Case (e3-2)	Oil-based Paint		
Case (e4-2)	Wall Paper		
Case (e5-2)	Plywood		
Case (e6-2)	SBR Rubber		
Case (e7-2)	Cedar		
Case (e1-3)	SUS 304	3.0 m/s	3.0 m/s
Case (e2-3)	Water-based Paint		
Case (e3-3)	Oil-based Paint		
Case (e4-3)	Wall Paper		
Case (e5-3)	Plywood		
Case (e6-3)	SBR Rubber		
Case (e7-3)	Cedar		

表-3 オゾン分析条件

Ozone Analyzer	UV Photometric Analyzer (SOZ-3300, Seki Electrons)
Meas. Range	0 - 9.999 ppm
Min. Range	0.001 ppm
Sample Flow	1.5 L/min
Average time	10 min

ルタを通過させることで粒子状物質の除去を行う。またオゾンの光化学反応による濃度低下を防ぐため、恒温室は暗室と同条件の設定(床面平均照度 1 lx 以下)としている。実験条件を表-1 にまとめて示す。

### 1.1 流れ場

本実験模型内の流れ場は LDV を用いて測定した平均風速分布の他、各種乱流統計量のデータが蓄積されている<sup>文3)</sup>。図-2 に吹出風速  $U_{in}=3.0 \text{ m/s}$  の場合の平均風速分布の測定結果を示す。天井面に沿って吹出口、対向壁に吸込口を設置している本実験ケースでは、模型内に時計回りの大循環流が生じており、床面隅角部には主流とは逆向きの 2 次渦が観察される。また吹出風速 3.0 m/s と 2.0 m/s の両ケースにおいて流れ場の Reynolds 数依存性が殆ど無く、流れ場はほぼ相似になることが実験的に確認されている<sup>文3)</sup>。

### 1.2 対象化学物質および発生源

本実験では外気由来の汚染源を想定し、吹出口から供給する吹出空気にオゾンを含ませる。オゾンは高純度酸素を使用した空冷式の無声放電式オゾンナイザ(Ozone Generator)を用いて定常発生させる。吹出空気のオゾン濃度は 1.00 ppm 一定に制御した条件で実験を行う。

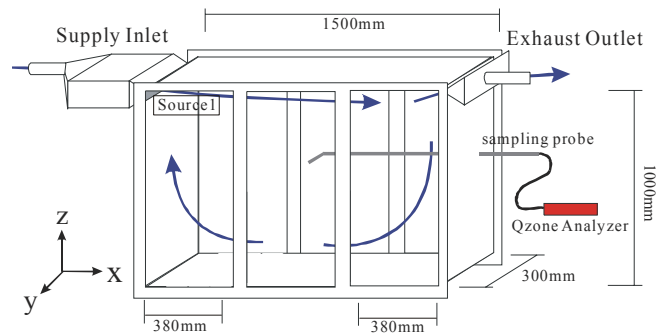


図-1 模型概要

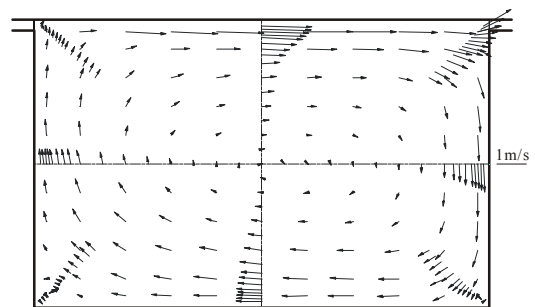


図-2 LDV による流れ場の測定結果<sup>文3)</sup>

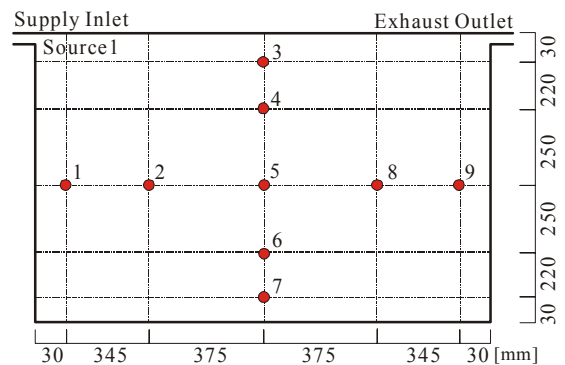


図-3 オゾン濃度測定点

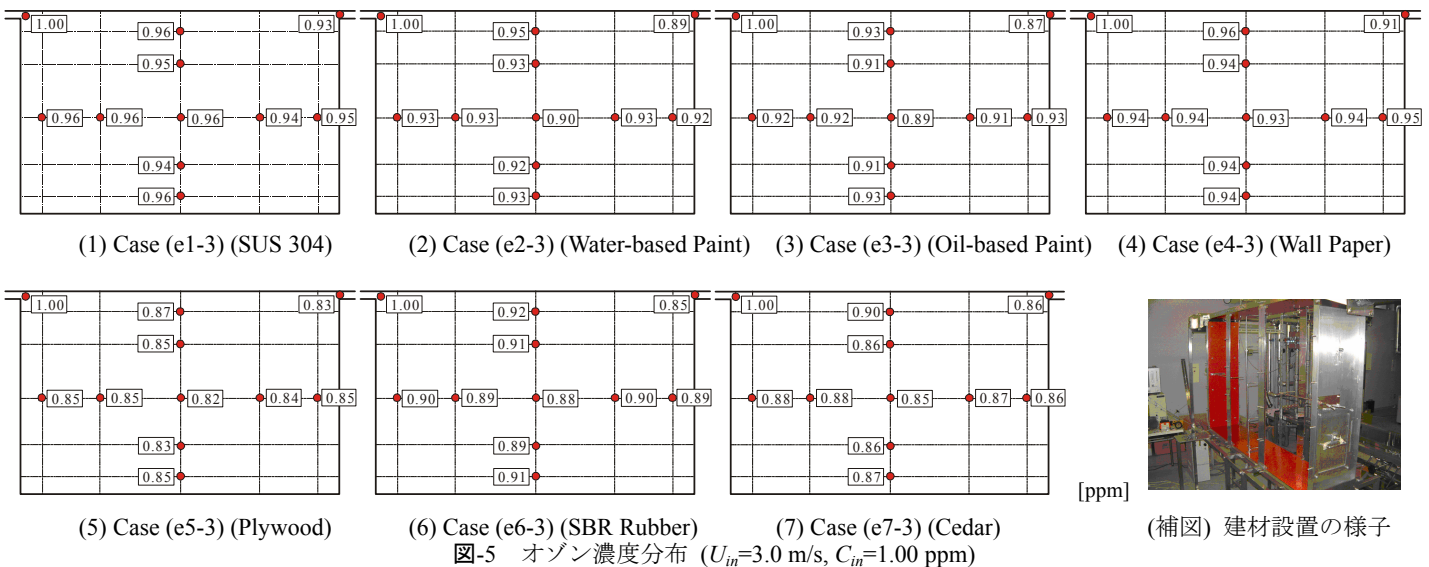
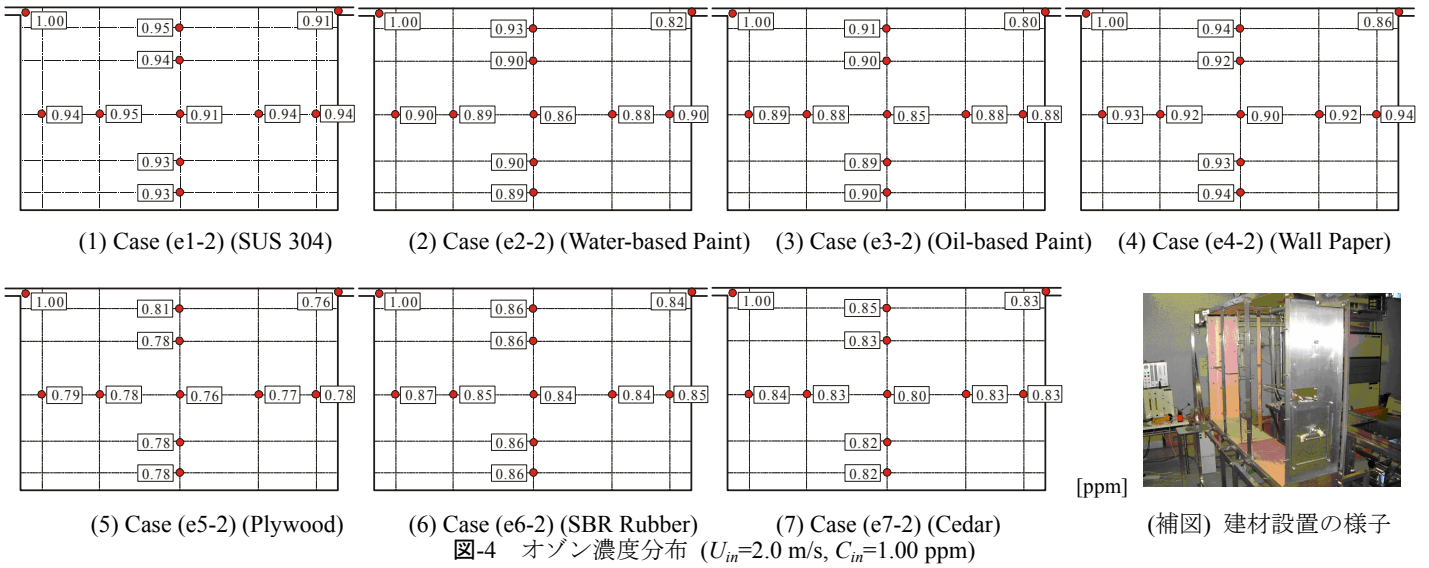
### 1.3 実験ケース

実験ケースを表-2 に示す。対象建材は図-1 に示す居室模型の天井・床・左右両壁面の 4 周全てに設置し、吹出風速は 3.0 m/s (換気回数 144 回/h)および 2.0 m/s (96 回/h)の 2 段階に設定する。全ての実験ケースにおいて供給空気に含まれるオゾンの移流・拡散、壁面への沈着現象を測定対象とする。

吹出空気のオゾン濃度  $C_{in}$  は 1.00 ppm 一定に制御する。実験期間中、 $C_{in}$  はターゲット濃度に対し 2 % 程度の変動に収まっていることを確認している<sup>注2)</sup>。模型は恒温室内に設置し吹出空気を含み  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$  一定に制御した。

### 1.4 サンプルングおよび分析法

模型内には活性炭フィルタならびに HEPA フィルタを通過した清浄空気を温度・湿度を制御し、オゾンのみを混入した状態で供給する。気中のオゾン濃度は模型内に挿入した SUS 304 製のサンプルングチューブを介してオゾン濃度分析装置 (UV Photometric Analyzer)により分析する。オゾン濃



度は定常時の 10 分間の時間平均値として示している<sup>注3)</sup>。オゾンの分析条件を表-3 に示す。

模型内のオゾン濃度測定点を図-3 に示す。吹出口位置ならびに吸込口位置を含め、1 ケース当たり 11 点の濃度測定を行う。また、模型内に挿入した SUS 304 製のサンプリングチューブを介して、Tenax TA により吸着捕集(0.1L/min の速度で全 1.0 L サンプルング)することで、供給空気に含まれるバックグラウンドの化学物質濃度を測定する。分析は加熱脱着の後、GC/MS で行う<sup>注4)</sup>。

## 2. 実験結果

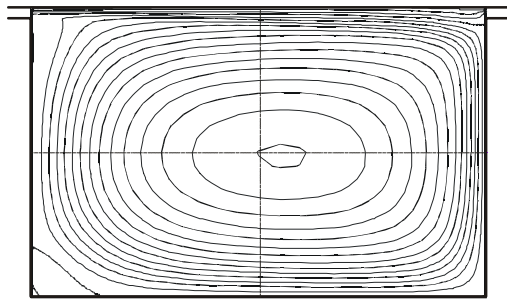
オゾン濃度の測定に先立ち、実験模型は中性洗剤および純水により洗浄している。供給空気ならびに模型内の化学物質濃度の測定を行った結果、TVOC 濃度で  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下であることを確認している。

各ケースのオゾン濃度分布測定結果を図-4 および図-5

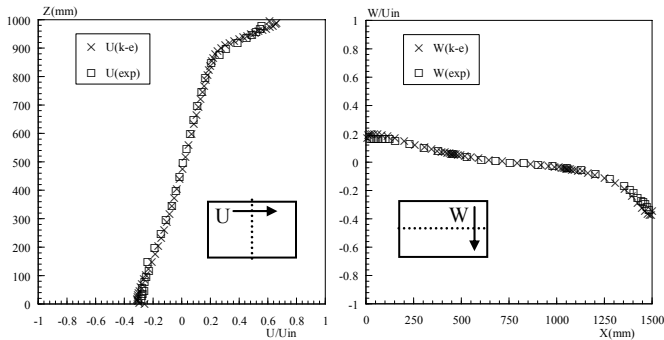
に示す。今回の実験ケースでは、オゾン濃度一定 (1.00 ppm) の空気を供給している。また、供給空気に含まれる TVOC レベルが十分に低レベルであることにより、室内でのオゾン濃度低下は壁面に設置された建材表面に対する沈着が支配的な現象と推察される。排気口位置でのオゾン濃度に着目した場合、吹出風速により若干結果が異なるものの、Case (e5, Plywood)においてオゾン濃度低下が最大となっており、Case (e4, Wall Paper)、Case (e1, SUS304)において濃度低下が小さくなる結果となっている。本実験で得られたオゾン濃度低下は、既報<sup>2)</sup>で報告した Mass Accommodation Coefficient のオーダ(表-5 中の  $\gamma$  値を参照)にほぼ対応した結果となっている。

## 3. 数値解析概要

室内のオゾン濃度を  $C$  [ppm] とした場合、室内空気におけるオゾン濃度の輸送方程式は(1)式で表現される。本研



(1) Stream Line



(2) U/Uin (X=750mm ライン) (3) W/Uin (Z=500mm ライン)  
(図中 k-e は低 Re 型 k-ε model による解析結果を示す)

図-7 流れ場の解析結果

究では RANS モデルによる解析を前提とし、アンサンブル平均された方程式系を示す(オーバーバー(¯)はアンサンブル平均値を示す)。オゾンの固体壁面に対する沈着現象は、既往研究<sup>1)</sup>で報告した沈着フラックス式(2)式を適用する。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( D_o + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) \quad \text{--- (1)}$$

$$J = - \frac{\gamma \cdot \langle v \rangle}{1 + \gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} \cdot \frac{\Delta y_1}{D_o}} \cdot \bar{C} \Big|_{y=\Delta y_1} \quad \text{--- (2)}$$

ここで、 $D_o$ はオゾンの分子拡散係数[m<sup>2</sup>/s]、 $U_j$ は風速[m/s]を示す。また、 $\nu_t$ は渦動粘性係数を、 $\sigma_t$ は乱流 Schmidt 数を示す。 $\langle v \rangle$ は Boltzman 速度[m/s]、 $\gamma$ は Mass Accommodation Coefficient [-]である。また  $\Delta y_1$  は壁面第一セルの定義点距離 ( $y^+$  (Wall Unit)<1 の条件で設定)を示す<sup>注5)</sup>。

### 3.1 流れ場解析概要

居室模型内流れ場は、境界層粘性底層の拡散現象を解明するために低 Re 型 k-ε model (MKC model)により解析する<sup>文4)</sup>。即ち、境界層粘性底層における化学物質濃度勾配の正確な予測が可能となる。吹出風速は実験と同条件で、 $U_{in}=3.0$  [m/s] ならびに 2.0 [m/s]の 2種類とし、吹出気流の乱れの強さは実験値に基づき 1.5%とする<sup>文3)</sup>。解析は模型の y 方向中央断面(図-1 の x-z 面)を対象とし、2次元で行う。メッシュ数は 220(x)×110(z)分割とし、壁座標  $y^+=1$  以内に 1 メッシュ以上確保している。移流項は QUICK、その他は 2 次精度中心差

表-4 計算および解析条件

Turbulence Model	Low Re Type k-ε model (MKC model, 2-Dimensional Cal.)
Mesh	220 (x) × 110(z)
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	$U_{in} = 3.0$ m/s and 2.0 m/s $k_{in} = 3/2 \times (U_{in} \times 0.015)^2$ , $\epsilon_{in} = C_\mu \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_\mu = 0.09$ , $l_{in} = L_0$ (Slot Width: 0.02) × 1/7
Outflow Boundary	$U_{out} =$ free slip $k_{out} =$ free slip, $\epsilon_{out} =$ free slip
Wall Treatment	Velocity; No-slip, $\langle v \rangle = 360$ m/s $k _{wall}$ ; no slip, $\epsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ $\gamma$ は既報 <sup>文2)</sup> の測定データを使用

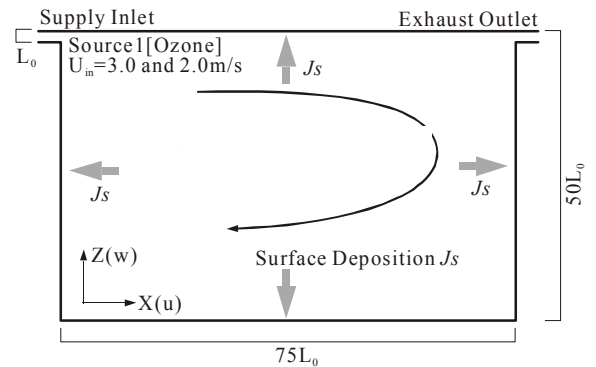
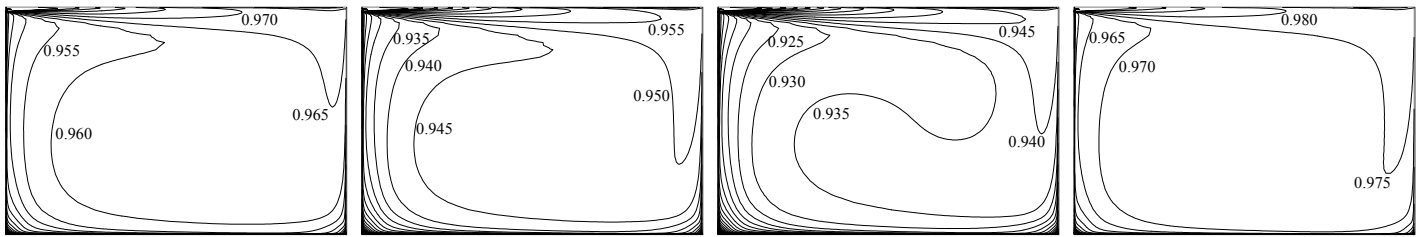


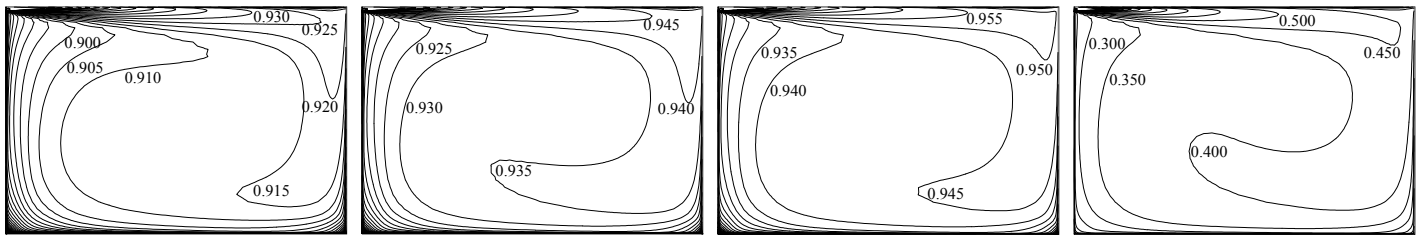
図-6 解析空間

表-5 数値解析ケース

Anal. Case	Building Material	$\gamma^{文2)}$	$C_{in}$	$U_{in}$
Case (a1-2)	SUS 304	3.4e-6	1.00 ppm	2.0 m/s
Case (a2-2)	Water-based Paint	4.9e-6		
Case (a3-2)	Oil-based Paint	6.1e-6		
Case (a4-2)	Wall Paper	2.3e-6		
Case (a5-2)	Plywood	8.7e-5		
Case (a6-2)	SBR Rubber	6.2e-6		
Case (a7-2)	Cedar	5.2e-6		
Case (a8-2)	[-]	1.0e-5		
Case (a9-2)		1.0e-4		
Case (a10-2)		1.0e-3		
Case (a11-2)		1.0e-2		
Case (a12-2)		1.0e-1		
Case (a13-2)		1.0e-0		
Case (a1-3)	SUS 304	3.4e-6	3.0 m/s	
Case (a2-3)	Water-based Paint	4.9e-6		
Case (a3-3)	Oil-based Paint	6.1e-6		
Case (a4-3)	Wall Paper	2.3e-6		
Case (a5-3)	Plywood	8.7e-5		
Case (a6-3)	SBR Rubber	6.2e-6		
Case (a7-3)	Cedar	5.2e-6		
Case (a8-3)	[-]	1.0e-5		
Case (a9-3)		1.0e-4		
Case (a10-3)		1.0e-3		
Case (a11-3)		1.0e-2		
Case (a12-3)		1.0e-1		
Case (a13-3)		1.0e-0		

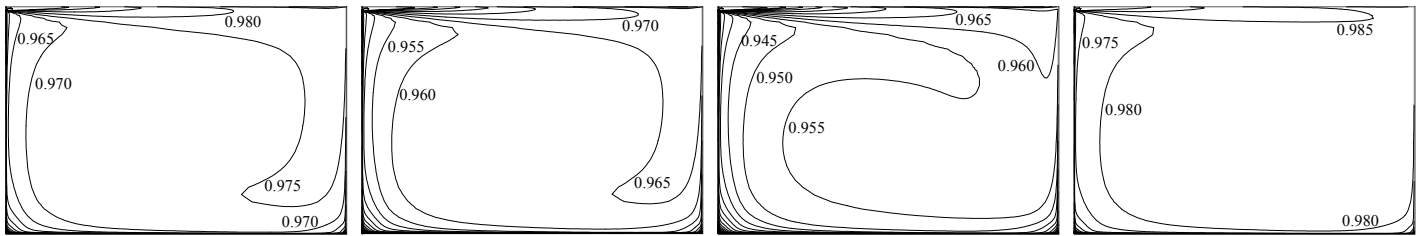


(1) Case (a1-2) (SUS 304) (2) Case (a2-2) (Water-based Paint) (3) Case (a3-2) (Oil-based Paint) (4) Case (a4-2) (Wall Paper)

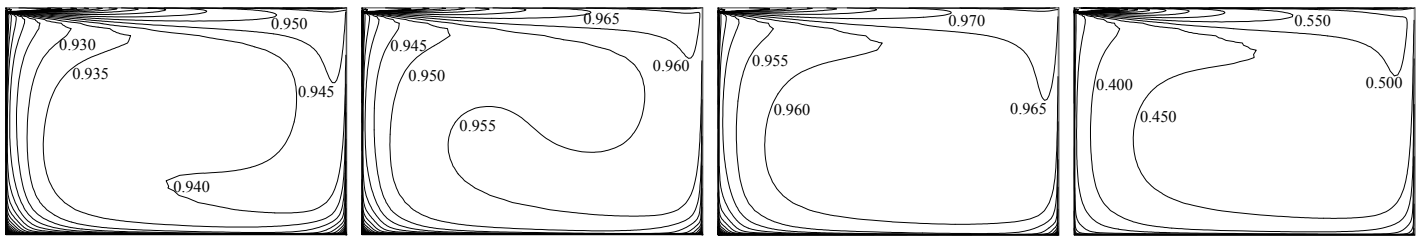


(5) Case (a5-2) (Plywood) (6) Case (a6-2) (SBR Rubber) (7) Case (a7-2) (Cedar) (8) Case (a13-2) ( $\gamma=1.0$ )

図-8 オゾン濃度分布 ( $U_{in}=2.0$  m/s,  $C_{in}=1.00$  ppm), Unit [ppm]



(1) Case (a1-3) (SUS 304) (2) Case (a2-3) (Water-based Paint) (3) Case (a3-3) (Oil-based Paint) (4) Case (a4-3) (Wall Paper)



(5) Case (a5-3) (Plywood) (6) Case (a6-3) (SBR Rubber) (7) Case (a7-3) (Cedar) (8) Case (a13-3) ( $\gamma=1.0$ )

図-9 オゾン濃度分布 ( $U_{in}=3.0$  m/s,  $C_{in}=1.00$  ppm), Unit [ppm]

分を用いる。

### 3.2 オゾン汚染源のモデル化

吹出空気に含まれるオゾンは、吹出口位置で実験値に相当する一定濃度( $C_{in}=1.00$ ppm)を与える。計算・解析条件を表-4に示す。

室内空間中では模型固体壁面でのオゾン沈着効果のみを組み込む。解析で用いる各種建材に対するオゾンの Mass Accommodation Coefficient は既報<sup>2)</sup>にて報告した  $\gamma$  値を用いる(表-5)。

### 3.3 解析ケース

数値解析ケースを表-5に、解析対象の概略を図-6に示す。吹出風速  $U_{in}=3.0$  [m/s]の場合ならびに吹出風速  $U_{in}=2.0$  [m/s]の2種類の吹出気流条件の他、天井面・床面・左右両壁面に設置する建材種類を変化させて解析ケースを設定する。特に実験で使用した建材に対応する解析ケース(Case (a1)~Case

(a7))に加え、Mass Accommodation Coefficient ( $\gamma$ )の値を段階的に変化させた解析ケース(Case (a8)~Case (a13))を設定している。特に Case (a13)は $\gamma$  値が 1.0 であり、すなわち建材表面濃度が常にゼロが担保されている理想の吸着材(沈着面)条件である。

## 4. 数値解析結果

図-7(1)に低 Re 型 k- $\epsilon$  model による流れ場の結果を、図-7(2)および(3)に実験結果と数値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精度良く再現していることが確認できる。

オゾン濃度分布に関する数値解析結果を図-8 および図-9に示す。全ての解析ケースにおいて(2)式で示した沈着フラックスが存在しない場合には、オゾンが室内均一に分布することとなる。

各ケースともに、沈着面である壁面に沿って濃度低下が観

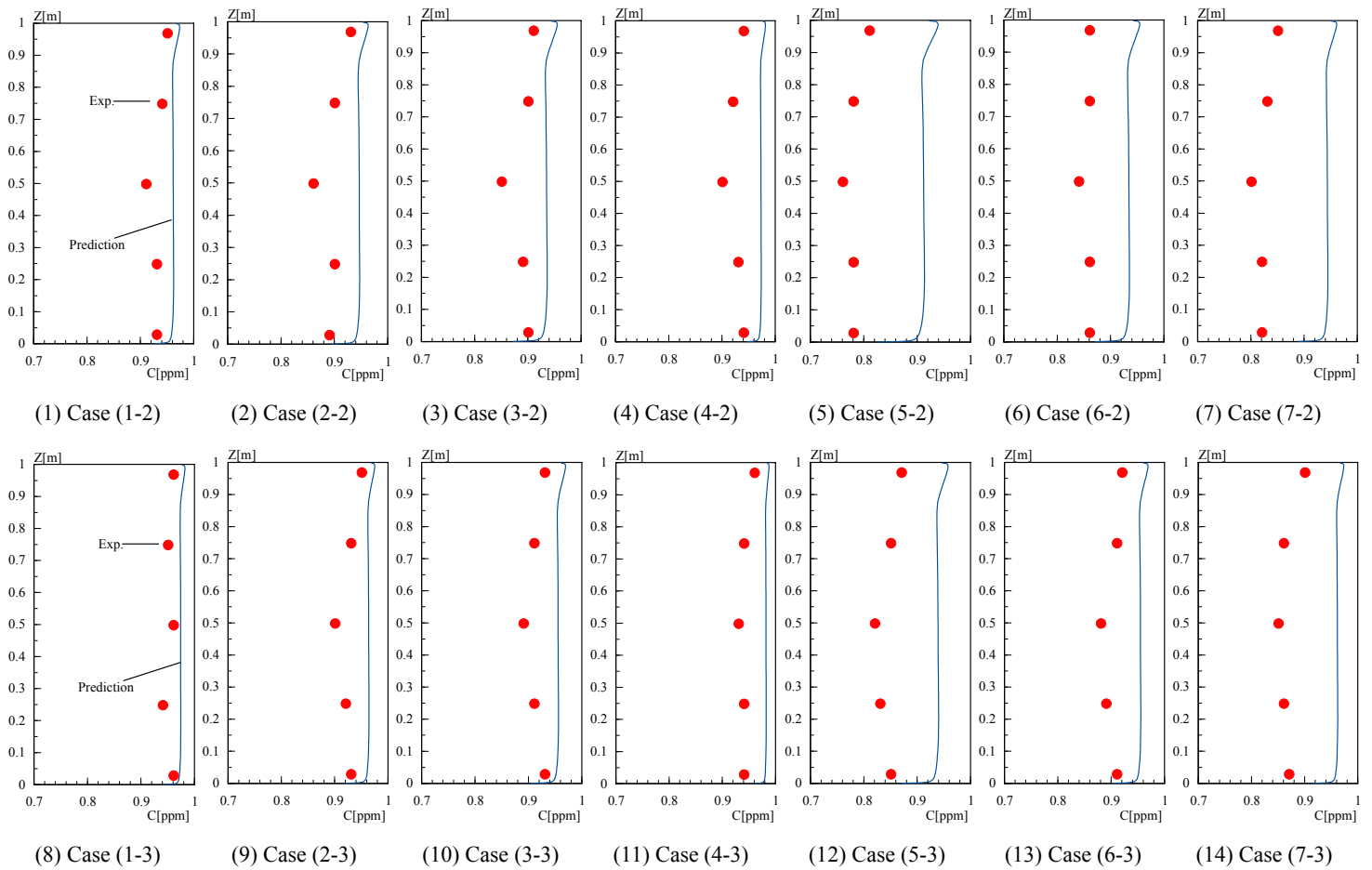


図-10  $x=750\text{mm}$  位置のオゾン濃度  $C_o$  分布比較 ( $z=0\sim 1000\text{mm}$ )

察される。当然の事ながら各ケースの濃度低下量は設定した  $\gamma$  値のオーダーに対応して増減する。

居室型スケール模型中心ライン( $x=750\text{mm}$  位置、 $z=0\sim 1000\text{mm}$ )におけるオゾン濃度測定結果(実験結果)と数値解析結果の比較を図-10に示す。本解析では、実験結果と比較して、数値解析結果がオゾン濃度を5%~10%程度過大評価する傾向となった。特に Case (a5, Plywood)ならびに Case (a7, Ceder)の予測精度が低い結果となった。

数値解析による室平均オゾン濃度、排気口位置でのオゾン濃度の値の他、換気ならびに壁面沈着によるオゾンの除去割合の値を表-6に示す。本解析条件の下では、SUS 304 板を設置した場合に着目すると、吹出風速 2.0 [m/s]の場合、換気による室内からの除去割合が 96.5 %、固体壁面に対する沈着 (Deposition)による除去割合が 3.5 %、吹出風速 3.0 [m/s]の場合、換気による室内からの除去割合が 97.6 %、固体壁面に対する沈着による除去割合が 2.4 %となり、名目換気時間 ( $\tau_n = V/Q$ 、すなわちオゾンの滞在時間)に比例して沈着の効果が大きくなる結果となった。また理想的な沈着面を仮定した Case (a13,  $\gamma=1.0$ )では、吹出風速 2.0 [m/s]の場合、換気による室内からの除去割合が 39.3 %、固体壁面に対する沈着

による除去割合が 60.7 %、吹出風速 3.0 [m/s]の場合、換気による室内からの除去割合が 46.0 %、固体壁面に対する沈着による除去割合が 54.0 %となった。この解析結果は本解析条件において起こりうる最大のオゾン沈着割合となる。

また、(3)式を用いて算出した沈着速度 (Deposition Velocity)  $v_d$  [m/s]の解析結果を表-6に併せて示す。

$$v_d = \frac{|J|}{C_\infty} = \frac{\gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4}}{1 + \gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} \cdot \frac{\Delta y_1}{D_o}} \cdot \frac{\bar{C}|_{y=\Delta y_1}}{C_\infty} \quad (3)$$

ここで  $C_\infty$  は空間の代表濃度 (本解析では吹出濃度  $C_{in}$  を使用)を示す。

表-6に示した結果をまとめ、Mass Accommodation Coefficient ( $\gamma$ )とオゾン沈着量の関係を図-11に、Mass Accommodation Coefficient ( $\gamma$ )と沈着速度  $v_d$  の関係を図-12に示す。図-11より、Mass Accommodation Coefficient ( $\gamma$ )が  $1.0 \times 10^{-3}$  [-]より大きいケースでは解析対象空間内のオゾン沈着量がほぼ一定となっており、同様に図-12より、Mass Accommodation Coefficient ( $\gamma$ )が  $1.0 \times 10^{-3}$  [-]より大きいケースでは沈着速度  $v_d$



表-6 室平均濃度  $C_{ave}$  とオゾンの除去割合

Anal. Case	Building Material	$\gamma$ [-]	排気濃度 $C_{ext}$	平均濃度 $C_{ave}$	除去割合 [%]	$v_d$ [m/s]
Case (a1-2)	SUS 304	3.4e-6	0.965	0.961	Ventilation : 96.5 Deposition : 3.5	2.82e-4
Case (a2-2)	Water-based Paint	4.9e-6	0.951	0.945	Ventilation : 95.1 Deposition : 4.9	3.94e-4
Case (a3-2)	Oil-based Paint	6.1e-6	0.940	0.934	Ventilation : 94.0 Deposition : 6.0	4.79e-4
Case (a4-2)	Wall Paper	2.3e-6	0.976	0.973	Ventilation : 97.6 Deposition : 2.4	1.96e-4
Case (a5-2)	Plywood	8.7e-5	0.919	0.910	Ventilation : 91.9 Deposition : 8.1	6.50e-4
Case (a6-2)	SBR Rubber	6.2e-6	0.939	0.933	Ventilation : 93.9 Deposition : 6.1	4.86e-4
Case (a7-2)	Cedar	5.2e-6	0.948	0.942	Ventilation : 94.8 Deposition : 5.2	4.16e-4
Case (a8-2)	[-]	1.0e-5	0.909	0.899	Ventilation : 90.9 Deposition : 9.1	7.30e-4
Case (a9-2)		1.0e-4	0.631	0.611	Ventilation : 63.1 Deposition : 36.9	2.95e-3
Case (a10-2)		1.0e-3	0.434	0.427	Ventilation : 43.4 Deposition : 56.6	4.53e-3
Case (a11-2)		1.0e-2	0.397	0.395	Ventilation : 39.7 Deposition : 60.3	4.82e-3
Case (a12-2)		1.0e-1	0.393	0.392	Ventilation : 39.3 Deposition : 60.7	4.85e-3
Case (a13-2)		1.0e-0	0.393	0.391	Ventilation : 39.3 Deposition : 60.7	4.86e-3
Case (a1-3)		SUS 304	3.4e-6	0.976	0.973	Ventilation : 97.6 Deposition : 2.4
Case (a2-3)	Water-based Paint	4.9e-6	0.966	0.963	Ventilation : 96.6 Deposition : 3.4	4.03e-4
Case (a3-3)	Oil-based Paint	6.1e-6	0.959	0.954	Ventilation : 95.9 Deposition : 4.1	4.93e-4
Case (a4-3)	Wall Paper	2.3e-6	0.984	0.982	Ventilation : 98.4 Deposition : 1.6	1.97e-4
Case (a5-3)	Plywood	8.7e-5	0.944	0.938	Ventilation : 94.4 Deposition : 5.6	6.77e-4
Case (a6-3)	SBR Rubber	6.2e-6	0.958	0.954	Ventilation : 95.8 Deposition : 4.2	5.00e-4
Case (a7-3)	Cedar	5.2e-6	0.965	0.961	Ventilation : 96.5 Deposition : 3.5	4.26e-4
Case (a8-3)	[-]	1.0e-5	0.936	0.930	Ventilation : 93.6 Deposition : 6.4	7.64e-4
Case (a9-3)		1.0e-4	0.706	0.687	Ventilation : 70.6 Deposition : 29.4	3.53e-3
Case (a10-3)		1.0e-3	0.506	0.496	Ventilation : 50.6 Deposition : 49.4	5.92e-3
Case (a11-3)		1.0e-2	0.465	0.459	Ventilation : 46.5 Deposition : 53.5	6.42e-3
Case (a12-3)		1.0e-1	0.461	0.455	Ventilation : 46.1 Deposition : 53.9	6.47e-3
Case (a13-3)		1.0e-0	0.460	0.454	Ventilation : 46.0 Deposition : 54.0	6.48e-3

も一定となっていることが分かる<sup>注6)</sup>。

沈着速度  $v_d$  の値は、マスバランスモデルや境界層粘性底層までを解析対象とせず、壁関数を用いた数値解析に適用する際に有用となるデータである。

## 5. 考察

図-7 に示したとおり、CFD による流れ場の解析精度は十

分な精度を有していることより、数値解析側に推定誤差要因を求める場合、実験結果との差異は(2)式に示した沈着モデル、ならびに Mass Accommodation Coefficient の推定精度に起因することとなる。図-10 に示した模型中心ライン ( $x=750\text{mm}$  位置、 $z=0\sim 1000\text{ mm}$ )におけるオゾン濃度比較より、計算・実験両者において濃度分布のプロファイルに関して定性的な傾向は一致しているものの、特に空間中心位置

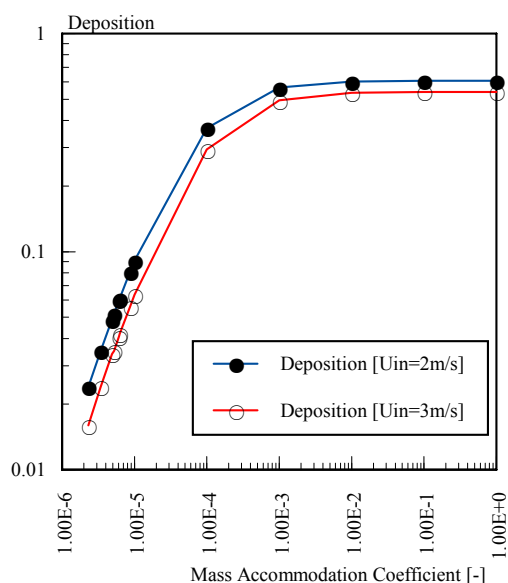


図-11 オゾン沈着割合と Mass Accommodation Coefficient

(図-10の  $z=0.5$  位置近辺)では、実験によるオゾン濃度測定値がより小さくなる傾向が見受けられる。模型中心部では、空間に形成された大循環流内側の滞留域となっており、この領域にてオゾン濃度が低下していることはオゾンの室内滞留時間に比例する濃度低下現象、すなわち空気中における First Order の化学反応(気中での単分子反応等)が生じている可能性が否定できない。本解析条件にて、更に濃度低下をもたらす要素をバックグラウンド環境における空気中でのオゾンの反応に対する速度定数 First Order Rate Constant ( $k_u$ )[1/s]に負担させた場合、(1)式に示したオゾンの輸送方程式左辺に以下の(4)式に示す Sink Term を付加することとなる。

$$S_{u(o)} = -k_u \cdot \bar{C}_o \quad (4)$$

ここで、(4)式はバックグラウンド環境下における空気中でのオゾンの反応(自己分解等)による  $C_o$  の Sink Term を、 $k_u$  は、 $C_o$  の減少速度と濃度レベル  $C_o$  との線形関係を仮定した、バックグラウンド環境における空気中でのオゾンの反応に対する速度定数 First Order Rate Constant [1/s]を示す。

実験結果と今回の数値解析の濃度レベル予測誤差は、模型中央部にて最大で 10%程度(Case 5, Plywood)であり、この影響が全て(4)式に起因すると過程した場合、 $U_{in}=2.0$  m/s のケースにおいては  $k_u=2.7e-3$  [1/s]程度、 $U_{in}=3.0$  m/s のケースにおいては  $k_u=4.0e-3$  [1/s]程度のオーダーと推定される。

供給空気の粒子濃度ならびに有機化合物濃度は十分に無視可能なレベルであることを勘案した場合、バックグラウンド環境下における空気中でのオゾンの反応は、模型内に設置した試験建材に由来する気中への放散物質(微粒子ならびに揮発性有機化合物等)とオゾンの空気中における反応が予想

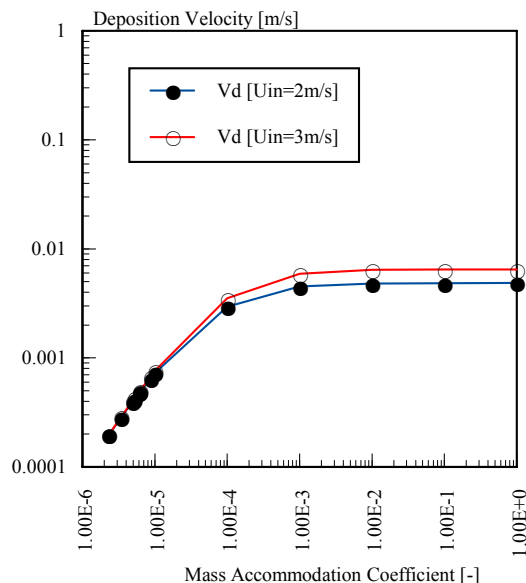


図-12 沈着速度と Mass Accommodation Coefficient

される。この点に関しては、各種の建材を居室型スケール模型内部に設置した場合の空気中での粒状物質濃度測定ならびに化学物質濃度測定等を詳細に行う必要があり、今後の課題としたい。

## 6. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 2次元居室模型を用い、換気により室内に導入されるオゾンを対象として、各種建築材料を壁面仕上げに用いた場合のオゾン濃度低下量ならびに室内オゾン濃度分布の測定を行った。
- (2) オゾン濃度一定で供給した場合、換気量すなわち室内の滞在時間に比例してオゾン反応量が大きくなり、低換気量のケースで室のオゾン濃度低下が大きくなる結果となった。
- (3) 居室実験模型結果を対象として、既報<sup>2)</sup>で測定した $\gamma$ 値を用いた固体壁面に対するオゾン沈着フラックスモデルを組み込んだ数値解析を行い、その解析精度の検証を行った。室中央部では最大で 10%程度の予測誤差となった。
- (4) 数値解析による予測誤差を First Order Rate Constant [1/s]で換算した場合、 $3.0e-3 \sim 4.0e-3$  [1/s]のオーダーと推定された。

## 注

- (1) 既報<sup>2)</sup>よりガラス面に対するオゾンの沈着現象は無視可能なレベルであることを確認している。即ち居室型スケール模型のガラス面に対するオゾン沈着量は相対的にゼロであり、模型内でのオゾン濃度低下はガラス面以外の壁面に対する沈着に起因することとなる。



また、居室型スケール模型実験(1.5m(x)×1.0m(z)、スロット幅 0.02m、吹出風速 3.0m/s)において Reynolds 数一致を条件とした場合には 4.5m(x)×3.0m(z)で吹出風速が 1.0m/s (吹出スロット幅は 0.06m)の空間に対応する。

- (2) 吹出スロット位置では、y 方向ならびに z 方向にオゾン濃度分布の測定を行っており、均一性が確保されていることを確認している。また吹出スロットの中央位置では常時オゾン濃度をモニタリングしており、時間変動も確認している。
- (3) 居室型スケール模型内各点のオゾン濃度測定は、3 回以上繰り返して行っており、再現性を確認している。
- (4) Tenax TA (Gestel, 80/100 mesh)を用いた VOCs のアクティブサンプリングは積算流量計付きポンプにより 100 cc/min の割合で 5L サンプリングし、その後、GC/MS にて定性・定量分析を行っている。GC : HP 6890、加熱脱着装置 : Gestel TDS、加熱脱着温度 : (20°C(5min)→60°C/min→280°C(2min))、CIS 温度 : (-100°C(0.01min)→12°C/sec→300°C(3min))、カラム : HP5 (60m×0.25mm×1 μm)、オープン温度 : (40°C(3min)→10°C/min→220°C(10min))、Split 比 : (100 : 1)、検出器 (MS) : HP5973MSD の条件で分析を行った。
- (5) 固体表面のごく近傍 (固体表面より  $2\lambda/3$  [m] 離れた所) から固体表面に至るオゾンフラックス  $J_d$  は、固体表面のごく近傍におけるオゾン濃度を  $C_o|_{y=2\lambda/3}$  [ppm] とすると、(A1)式で示される<sup>5)</sup>。

$$J_d = -\gamma \cdot \frac{(v)}{4} \cdot C_o|_{y=2\lambda/3} \quad (A1)$$

更に、固体表面に面した数値解析上の離散定義点から固体表面まで(距離  $\Delta y_1$ )のオゾンフラックス  $J$  は、(A1)式に加え、離散定義点から距離  $2\lambda/3$  [m] までのフラックスが分子拡散により定まる場合(その条件として離散定義点において  $y < 1$ )、オゾン沈着フラックスは(2)式となる。

- (6) 図 12 に示す沈着速度 ( $v_d$ )の定常値は、固体表面濃度をゼロと仮定した場合の物質伝達率  $\alpha_m$  [m/s]に一致する。すなわち Mass Accommodation Coefficient ( $\gamma$ )が  $1.0e-3$  [-]より大きい建材を対象としたオゾンの室内濃度場解析を行う際には、建材表面濃度ゼロを仮定し、 $\alpha_m = 4.5 \sim 6.8$  [m/s]程度の値を適用すれば良いことが示唆される。

## 参考文献

- 1) 伊藤一秀、加藤信介 : 居室模型を用いた気中での Ozone 濃度分布の測定と数値解析 : 日本建築学会環境系論文集、No. 577、2004.3、pp 33-40
- 2) Kazuhide Ito, DN. Sørensen, CJ. Weschler, 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, 2005, pp2335-2339
- 3) 伊藤一秀、加藤信介、村上周三 : 換気効率指標の数値解析検証用の 2 次元室内気流実験 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 : 日本建築学会計画系論文集、No. 534、2000.8、pp 49-56
- 4) Shuzo Murakami, Shinsuke Kato, Tomoyuki Chikamoto (1996) New low Reynolds-number k-ε model including damping effect due to buoyancy in a stratified flow field. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **39**, 3483-3496
- 5) Weschler CJ (2000). Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry. *Indoor Air 10* (4), pp. 269-288
- 6) Cano-Ruiz JA, Kong D, Balas RB, Nazaroff WW (1993). Removal of Reactive Gases at Indoor Surfaces: Combining Mass Transport and Surface Kinetics. *Atmospheric Environment* **27A** (13), pp. 2039-2050
- 7) Sørensen DN and Weschler CJ (2002) Modeling gas phase reactions in indoor environments using computational fluid dynamics, *Atmospheric Environment*, **36**(1): 9-18
- 8) Nazaroff WW, and Cass GR (1986). Mathematical Modeling of Chemically Reactive Pollutants in Indoor Air, *Environ. Sci. Technol.* Vol. 20, No. 9, pp.924-934.
- 9) Kleno J G., Clausen P A., Weschler C J., Wolkoff P., (2001) Determination of Ozone Removal Rate by Selected Building Products Using the FLEC Emission Cell, *Environmental Science & Technology*, Vol 35, No. 12, 2548-2553
- 10) Morrison GC and Nazaroff WW (2002). The rate of ozone uptake on carpet: mathematical modeling. *Atmospheric Environment* **36**, pp. 1749-1756

(2005 年 6 月 21 日原稿受付)

# Experimental and CFD Analyses Examining Ozone Distribution in a Model Room with Various Building Materials

By Kazuhide Ito<sup>\*1</sup>, Shinsuke Kato<sup>\*2</sup>

Key Words : *Ozone, CFD, Detailed Model Experiment, Deposition, Diffusion*

**Synopsis** : Recently, it has been confirmed that ozone in room air actively generates various free radicals by reacting with the organic and inorganic compounds existing in the air. The free radicals and other products of chemical reactions are often more irritating than their precursors. In particular, the products of ozone/terpenes reactions cause greater airway irritation in mice than would be predicted based on the known response of mice to ozone or terpenes. Such chemical reactions can significantly alter the concentrations of indoor pollutants. Furthermore, heterogeneous reactions between ozone and various surfaces occur, which further reduce the ozone concentration and must be considered in the ozone balance of indoor environments.

Weschler and Shields (2000) have simulated chemical reactions in indoor air using mass balance models and assuming perfect mixing; these simulations examined the influence of ventilation rates on uni- and bimolecular reactions. Using computational fluid dynamic (CFD) simulations, Sørensen and Weschler (2002) have reported the distribution of chemical compounds resulting

from various indoor chemical reactions. However, there is insufficient data to experimentally verify the two-dimensional or three-dimensional distributions resulting from chemical reactions in indoor air.

Here, we isolate the surface reactions and measure the distribution of ozone within a 2D model room. The analyzed room model had one supply inlet and one exhaust outlet, with a cavity of dimensions 1.5m (x) × 0.3m (y) × 1.0m (z) in which a two-dimensional flow field was developed. A clear re-circulating flow was observed in the room generated by the forced ventilation. In order to discuss the order of chemical reactions or wall surface deposition for ozone, the concentration distributions of ozone in the model room were measured for various building materials.

CFD analysis corresponding to the experimental conditions and with a built-in ozone wall surface deposition model was carried out. The results of CFD prediction were in good agreement with the room model experiment.

(Received June 21, 2005)

---

\*1 Tokyo Polytechnic University, Member

\*2 Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Member