# 平成 26 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野:屋外環境
研究期間:H25 ~ H26 [平成 26 年度で終了]
課題番号:132010
研究課題名(和文): 領域気象モデルと工学モデルを統合した人体暴露濃度のダウンスケーリング予測手法の開発
研究課題名(英文): Downscaling Simulation of Integrated WRF and Engineering CFD for Predicting Personal Exposure Contaminant Concentration
研究代表者:伊藤一秀
交付決定額(当該年度):280,000 円

#### 1. 研究の目的

近年,東アジア域における越境環境汚染の問題が顕在化している.特に,中国大陸起源の光化 学オキシダントや微小粒子状物質 (PM2.5) などが健康被害の観点から大きな社会問題となっ ている.越境大気汚染の問題は、全球スケールから人体スケールまでを対象としたマルチスケ ール,マルチフィジックスの複雑な環境汚染問題であり,また経気道暴露問題として人々に直 接的な健康被害をもたらすため,汚染物質の飛来量・個人暴露量の高精度予測が強く求められ ている.わが国でも九州福岡は,中国を発生源とする越境大気汚染の影響が最も顕著に現れる 場所であり,光化学オキシダント濃度,PM2.5 濃度は環境基準をしばしば超過し,メディア等 でも頻繁に取り上げられることもあり,社会的関心事の高い課題である.

この喫緊の大気汚染問題は,監視,予測,濃度低減対策技術の確立といった各種の視点より研 究を進める必要があるが,本研究では特に都市空間スケールから人体スケールに至る汚染物質 濃度の高精度な予測手法,個人暴露リスクの高精度予測の開発に取り組む.

2. 研究の方法

本研究は以下の2課題を設定しており、主に数値シミュレーション手法の開発に取り組む. (1) 東アジア越境環境汚染予測システムと都市気象モデルを結合した生活圏の PM2.5 濃度予測 技術の開発

WRF をベースとした光化学オキシダント, PM2.5 粒子濃度輸送に関する都市気象予報モデルを 構築し,既存の東アジア域の越境環境汚染予測システムから得られる結果を多段階ネスティン グ手法を用いて境界条件に用いることで,都市空間の光化学オキシダント濃度, PM2.5 粒子濃 度を高精度で予測できるソルバーを開発する.従来型の領域気象モデル WRF と建物周辺気流・ 汚染物質拡散場予測を行う工学 CFD を接続するダウンスケーリング手法や境界条件設定法は 近年研究開発が活発な研究課題であり,ヒートアイランド現象予測にも展開可能な重要な課題 である.

(2) 室内環境モデルと人体モデルを結合した PM2.5 の人体暴露量予測技術の開発

鼻腔・口腔から気道・気管支までの呼吸器系統を数値的に再現した数値人体モデル Virtual Manikin を開発する.都市空間から Virtual Manikin,人体モデルと連動した数値気道モデルまで をシームレスに結合することにより光化学オキシダント,PM2.5 粒子の人体暴露濃度,経気道 暴露濃度を連続的かつ詳細に解析可能な予測フレームを完成させる取り組みは,極めて先駆的 である.また,疫学的知見を参照し,暴露濃度と人体影響に関する Dose- Response モデルを数 値人体モデルに統合し,呼吸濃度,人体摂取量を入力とした人体影響・リスク評価モデルも開発 する.

上記(1)と(2)の研究課題を推進し、その成果を統合することで、都市空間の大気汚染物質拡散予 測モデルから建築スケールを対象とした工学 CFD、数値人体モデル Virtual Manikin、数値気道 モデルまでをシームレスに結合し、東アジア域から建築・人体微気象スケールまでを対象とし た大気汚染物質の人体暴露濃度を連続的かつ詳細に解析可能な予測フレームを完成させること が最終目的である.

3. 研究成果

平成25年度は、主に工学モデルの開発に主眼を置き、建築スケールから室内スケール・人体ス ケールを経由して、人体呼吸器系までを連続して解析する手法を開発した上で、経気道暴露の 高精度予測モデルを構築した. 具体的には、大規模閉鎖空間内に仮想的な汚染物質が流入した条件で室内汚染物質濃度分布解 析から経気道暴露濃度分布解析を連続して実施した.図1に対象閉鎖空間の概要を示す.



図-1 大規模閉鎖空間 (Region 1)

対象空間は床面積 2,020 m<sup>2</sup>で一部,3 層分の吹き抜け(最大天井高 15 m)を有する大空間であ り,南側のホスピタルモール,東側診療スペース,西側診療スペース3ゾーンより構成されて いる.このゾーニングに従い空調系統も3系統ある.解析対象空間全体で79 個の空調吹出口が 設置されている.また 1F に設置されている3カ所の便所空間より排気される計画となってい る.この空間を Region 1 とし図-1 に概要を示す. Region 1 は非構造格子のテトラメッシュにて 空間分割し,そのメッシュ分割数は約 600,000 である.図-1 右上部には y-z 断面の代表的なメッ シュ分割を示す(右側がホスピタルモール空間側).

同空間内に 3.0m(x)×3.0m(z)×3.0m(z) の仮想領域を設定し、中央部に数値人体モデル(Virtual Manikin)を立位状態で設置する. この領域を Region 2 とする. 本解析で使用した成人男性型の Virtual Manikin の概要を含めて図-2 に示す. Virtual Manikin 表面はトリゴンメッシュにより構成 されており、人体表面法線方向に約1 mm 幅で4 メッシュ分のプリズムメッシュ、それ以降は テトラメッシュが配置されている. 空間のメッシュ分割数は 150 万程度であり、本報での境界 条件では、人体表面での Wall Unit y<sup>+</sup>は全ての領域にて1以下に設定している. 本解析で使用した Virtual Manikin の作成方法や詳細データに関しては参考文献<sup>2)</sup>を参照のこと.



図-2 Virtual Manikin を含む Region 2 解析スケール

Virtual Manikin の鼻腔開口部から気管支までの経気道経路を Region 3 とし,その概要を図-3 に示す.鼻腔から気管支までの形状は,健康な成人男性(身長 170cm 程度,体重 70kg 程度の中肉中背)の上半身を対象とした CT(Computed Tomography,コンピュータ断層撮影法)データ

(DICOM データ)より CT 値 150 にて対象箇所を抽出し,その後, Mimics 4.0 (Materialise)にて CT 画像の 3 次元化を行う. 続いて 3-matic (Materialise)にて 3 次元化した STL のスムージングなら びに流体ジオメトリの作成を行い Nastran ファイルとして出力する. 最終的にはこの Nastran ファイルを Gridgen (VINAS)にて読み込むことで最終的なメッシュデータを生成した. Region 3 は非構造格子のテトラメッシュにて空間分割し,そのメッシュ分割数は 100 万程度である. 気 道モデル内壁面での Wall Unit y<sup>+</sup>も全ての領域にて1以下に設定している.





図-4 気道モデルの細部メッシュ分割

この Region 1 から Region 2, Region 3 を一方向ネスティングにより接続し,流れ場の他,空 気感染性汚染物質を対象とした拡散場の解析を行うことで建築スケールでの不均一濃度分布予 測から実質的な吸入による曝露を示す経気道曝露濃度予測を実施する.

### 1 大規模閉鎖空間(Region 1)を対象とした解析

大規模閉鎖空間である Region 1 は, RNG 型 *k*-*ε*モデルを乱流モデルとして流れ場解析を実施 する. 定常等温流れ場の定常解析後, バイオエアロゾルを想定した汚染物質の移流・拡散解析を 実施する. 解析に際して異なるサイズのグリッドデザインにて流れ場解析を実施し, 流れ場の メッシュ依存性が小さいことを確認している. 基本ケースとして Passive Contaminant を仮定し た解析の他, 対象バイオエアロゾルの粒径を 10µm ならびに 50µm の 2 段階に設定し重力沈降 を考慮した解析を行うことで, 建物内(Region 1)の不均一濃度場を予測する. バイオエアロゾル は空間全体で瞬時一様発生させた条件の他, 受付・待合いスペース空間を対象とした空調系統 1 に属する 16箇所の吹出口から 2時間定常発生しその後に汚染物質発生が停止する条件を設定す る. この濃度発生条件は空調機から吹出口に至る途中のダクト内に発生源が設置された場合を 想定したケースであり, 現実には考えにくい境界条件であり, 一種のテロ発生時を想定してい る. また室内から排気された汚染物質のレターンは考慮していない.

本報で対象とする粒径は粒子密度1g/cm<sup>3</sup>を仮定した空気動力学径を想定している.

## 2 Virtual Manikin 周辺領域(Region 2)を対象とした呼吸域濃度解析

Virtual Manikin を中心とした 3.0m×3.0m×3.0m の空間を Region 2 とし, Region 1 内で流れの様 相が異なる 2 カ所に設定する(図-1 参照). 設定した Region 2 (A)ならびに(B)の 2 カ所とも Region 1 の天井高さは 3m であり, Region 2 の解析対象高さと一致する.また解析対象となる天井部分 に空調吹出口等は無い. Region 1 ならびに Region 2 は天井面と床面が共有されているため,ネ スティング対称面は Virtual Manikin を取り囲む周囲 4 面の立面のみとなる.

Region 1 と Virtual Manikin 周辺空間である Region 2 の接続面では, Region 1 で解析した平均

風速データ,乱流統計量(kならびにɛ)を Region 2のメッシュ分割に整合するよう,線形補完し て入力データとする.空気感染性汚染物質を想定したスカラ量はメッシュ補完と共に非定常デ ータとして Region 2の境界条件として受け渡す. Region 2の流れ場は低 Re型 k-ɛモデル(Abe Kondoh Nagano model)を乱流モデルとして用い,定常解析した結果を用いるが,汚染物質濃度 場は定常流れ場を用いた非定常解析を行う.

#### 表-1 数值解析条件

(a) 大規模閉鎖空間スケール(Region 1)

Turbulence Model	RNG $k$ - $\varepsilon$ model (3-dimensional Cal.)			
Scheme	Convection Term: QUICK			
Inflow Boundary	$U_{in} = 0.5 \text{ m/s}$ , $k_{in} = 3/2 \times (U_{in} \times 0.1)^2$ , $\varepsilon_{in} = C_{\mu}^{3/4} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_{\mu} = 0.09$ , $l_{in} = 0.03 \text{ m}$			
Outflow Boundary	$U_{out}$ = free slip, $k_{out}$ = free slip, $\varepsilon_{out}$ = free slip,			
Wall Treatment	Velocity; generalized log low			
(b) Virtual Manikin スケール(Region 2)				
Turbulence Model	Low Re Type $k$ - $\varepsilon$ model (Abe-Ngano model, 3-dimensional Cal.)			
Scheme	Convection Term: QUICK			
Inflow Boundary	$U_{in}$ : Region 1 Data , $k_{in}$ : Region 1 Data, $\varepsilon_{in}$ : Region 1 Data			
Wall Treatment	Velocity; No-slip, $k _{wall}$ ; no slip, $\varepsilon _{wall} = 2\nu (\partial \sqrt{k} / \partial y)^2$			
Manikin Surface	Velocity; No-slip, $k _{wall}$ ; no slip, $\varepsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$			
(c) 気道スケール(Region 3)				
Turbulence Model	Low Re Type $k$ - $\varepsilon$ model (Abe-Ngano model, 3-dimensional Cal.)			
Scheme	Convection Term: QUICK			
Inflow Boundary	$U_{in} = 0.92 \text{ m/s}, k_{in} = 3/2 \times (U_{in} \times 0.1)^2, \varepsilon_{in} = C_{\mu}^{3/4} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}, C_{\mu} = 0.09, l_{in} = 10^{-3} \text{ m}$			
Outflow Boundary	$U_{out}$ = free slip, $k_{out}$ = free slip, $\varepsilon_{out}$ = free slip			
Wall Treatment	Velocity; No-slip, $k _{wall}$ ; no slip, $\varepsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$			

#### 3 経気道曝露解析 (Region 3)

鼻腔開口から気管支(最大4分岐まで)までの経気道空間を対象とした Region 3 では,経気道 内での空気感染性汚染物質の沈着分布予測を主目的としている. Region 2 での解析では人体モ デルの呼吸サイクルを再現していないが,鼻腔開口面での流入風速は人体周辺微気象性状とは ほぼ独立に生理的な呼吸プロセスにて決定される. そのため, Region 2 と Region 3 の接続面と なる鼻腔開口(鼻の穴)の流入境界は Region 2 の解析結果とは独立して与えることとし,本解析 では定常吸込を仮定して解析を行う. 定常吸気流量は 14.4 L/min とし,流量は左右の鼻で同量 とした(鼻腔開口面積:1.3cm<sup>2</sup>). Region 2 と同様に気道モデル内の流れ場は低 Re型 k-*e*モデル(Abe Kondoh Nagano moderl)にて解析を実施する.

また濃度分布予測には Lagrange モデルによる粒子トラッキングを行う. 呼吸サイクルを再現 しない Virtual Manikin を対象として非定常の呼吸域濃度解析を行った結果としての最高濃度を 気中分散粒子 10,000 個と仮定し, 鼻腔開口部にて瞬時発生させる境界条件にて解析を実施する. Region 2 の汚染物質濃度場は Euler 型にて解析しているため, Region 3 の Lagrange 型の解析と は濃度の境界条件を整合させることが困難なため, Region 3 の解析では統計的に十分な粒子数 を発生させることで解析を行い, 結果を無次元化することで議論を行う.

本報での解析では、呼吸に伴う形状変化は考慮せず、固体の no-slip 壁として境界条件を与える.また、Region 2 と同様にバイオエアロゾルの壁面条件として完全捕集を仮定した<sup>注3)</sup>.

Region 1 から Region3 の解析条件を各々表-1 に纏めて示す.また Lagrange 的な基準で記述された気中分散粒子輸送に関する支配方程式を表-3 に示す.本解析では単位粒子質量当たりの抗力の他,重力項を考慮する(表-3(1)式).また,気中分散粒子の乱流分散を再現するため,確率論的変動であるランダムウォークモデルを適用する(表-3(4)~(6)式).

表-2 解析ケース一覧

解析ケース	温度条件	汚染物質発生位置	対象粒径			
Case 1 (R1)	等温	受付・待合スペース系統の 吹出口(空調系統 1)	Passive Contaminant (Gas)			
Case 5 (R1)			$D_p=10\mu m$			
Case 7 (R1)			$D_p=50\mu m$			
Case 11 (R1)		受付・待合スペース空間で	Passive Contaminant (Gas)			
		瞬時一様発生				
(b) Virtual Manikin スケール(Region 2)						
解析	ケース	Region 1 解析条件	VM 設置位置	衣服沈着		
Case 1	(R2)B	Case 1(R1)	B(図-1参照)	無		
Case 2 (R2)B		Case 5 (R1)	В	無		
Case 3 (R2)B		Case 7 (R1)	В	無		
Case 4 (R2)A Case 5 (R2)B		Case 11 (R1)	A(図-1参照)	Perfect Sink		
			В	無		
(c) 気道スケール(Region 3)						
解析ケース		Region 2 解析条件	気道モデル			
Case	1 (R3)	Case 1 (R2)B, $D_p=10\mu m$	鼻腔開口部に粒子 10,000 個			
Case 2 (R3)		Case 2 (R2)A, $D_p=50\mu m$	を瞬時発生させ、Lagrange			
			解析を実施.			

(a) 大規模閉鎖空間スケール(Region 1)

表-3 Lagrange 表記による粒子輸送とランダムウォークモデル

$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D \left( u - u_p \right) + F_g$		(1)
$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D Re_p}{24} \qquad (2)$	$Re_{p} = \frac{\rho  u_{p} - u  d_{p}}{\mu}$	(3)
$F_g = \frac{\left(\rho_p - \rho\right)}{\rho_p}g$		(4)
$u = \overline{u} + u' \tag{5}$	$\sigma = \sqrt{\frac{2k}{3}}$	(6)
$G(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{{u'}^2}{2\sigma^2}\right)$		(7)

## 4 解析ケース

本報では大規模閉鎖空間スケールを対象とした Region 1 から気道スケールの Region 3 まで 3 段階の一方向(One- way)ネスティングによる解析を行う.病院スケール Region 1 では既報(第 1 報)<sup>1)</sup>の解析ケースの中で等温条件での流れ場解析結果を使用して,対象汚染物質の発生位置ならびに粒径を変化させて代表的な 4 ケースを設定する.また,Passive Contaminant を仮定した 濃度場解析結果と粒径 10µm を仮定し重力沈降を考慮した濃度場解析結果に有意な差異が見られなかったため,Virtual Manikin 周囲空間を対象とした Region 2 の解析では,Case 5 (R1), Case 7 (R1), Case 11 (R1)の流れ場・濃度場解析結果の各々に2種類の Virtual Manikin 設置位置を考慮 して解析ケースを設定した.

気道モデルを対象とした Region 3 では気道内での汚染物質沈着量分布の差異を検討するため, 対象粒径の異なる 2 ケースを設定した.全体の解析ケース一覧を表-2 に纏めて示す.

ここから、代表的な流れ場、汚染物質濃度場解析結果を中心に結果を報告する.

図-5 に Case 1 (R1)の呼吸域高さにおけるスカラ風速分布解析 (定常解析)結果ならびに無次 元濃度分布解析結果を示す.本報での流れ場解析条件は1種であり, Region 1 の全解析ケース で同一である(解析ケースの差異は対象汚染物質の発生位置ならびに粒径).

天井に設置された空調吹出口から供給された吹出気流の到達域で相対的に風速が大きくなっており、また排気口を仮定した便所位置で風速値が大きくなっているものの、空間全体的には低風速の滞留した風速分布となっている.また、図-5(b)に示す濃度分布は、受付・待合スペースを対象とした空調系統の吹出口より2時間、Passive Contaminantを定常発生させた場合の解析開始後2時間の時点での濃度分布を示しており、ゾーニングに従って受付・待合スペースで高濃度分布が形成されている.詳細は前報(第1報)<sup>10</sup>を参照のこと.



(a) 流れ場解析結果 [m/s]



(b) 汚染物質 無次元濃度分布 (t=2h)
 図-5 Case 1 (R1) 流れ場ならびに汚染物質濃度場の解析例 (Region 1)



(a) Region 2 (A) (b) Region 2 (B) 図-6 Case 1 (R1) Region 2 の流れ場解析結果 (建物北側から見た *x-z* 断面)

図-6 にネスティング領域のスカラ風速分布(建物北側から見た x-z 断面)を示す.待合いスペース中央位置に近い Region 2 (A)(図-1 中の A 位置)では 0.1m/s 以下の静穏な流れ場となっており 領域内に明確な風速分布は形成されていない.図-6(a)からは判断出来ないが,ホスピタルモー ルから待合スペースへ向かう流れ場が形成されている. Region 2 (B)(図-1 中の B 位置)では便所 を想定した排気口に近いため,相対的に風速が大きくなっており,上下方向に分布が確認でき る.

Virtual Manikin は建物東側を正面方向として設置する.

図-7 に Virtual Manikin 周囲領域である Region 2 の汚染物質無次元濃度分布解析結果を示す. 本報での濃度解析結果は,空調系統1から汚染物質を発生させるケースでは吹出口濃度にて, ロビー空間にて瞬時一様発生させるケースでは空間初期濃度にて無次元化している.図-7 (a) には受付・待合いスペースの空調系統より定常的に Passive Contaminant を発生させた場合の解 析開始より 2 時間経過後の B 領域における無次元濃度分布を示す.また図-7(e)は受付・待合ス ペース空間で瞬時一様発生させた場合の解析開始より 10 分経過後の A 領域における無次元濃 度分布を,図-7(f)は B 領域の無次元濃度分布示す.両図ともに Region 1 を対象とした病院空間 全体の解析結果より人体周辺の Region 2 の該当断面を表示したものである.



(e)Case 11 (R1)A(t=10min)

(f)Case 11 (R1)B(t=10min)

(g)Case 4 (R2)A(t=10min)

(h)Case 5 (R2)B(t=10min)

図-7 汚染物質 無次元濃度分布図 x=1.5m

(Virtual Manikin 中央断面, Region 1 or 2, 建物北側から見た x-z 断面)

図-7(a)から(d)は Region 2 のネスティング領域として図-1 中の B を設定した場合の Virtual Manikin 周囲の濃度分布解析結果を示したもので,図-7(b)は Passive Contaminant,図-7(c)は粒径 10µm,図-7(d)は粒径 50µm のケースを示す. Virtual Manikin が存在することで流れ場が影響を受け,それ故濃度分布も複雑となる(本解析では Virtual Manikin の発熱は模擬しておらず,また表面での汚染物質沈着は無視して解析を行った).対象汚染物質を Passive から 10µm,50µm と変化させることで重力沈降の影響が明確となり,Virtual Manikin 呼吸域周辺の無次元濃度値も大きく異なることが確認できる.

図-7(g)はA領域に設置した Virtual Manikin 表面を完全沈着面と仮定した場合の解析結果を示 す. Virtual Manikin が汚染物質のシンクとなるため, Region 2の濃度分布が大きく変化する. また図-7(h)ではB領域に衣服沈着の無い Virtual Manikin を設置した場合の解析結果を示すが, 人体モデルの無い図-7(f)と比較して,濃度分布が複雑になっており,特に人体呼吸域周囲での 濃度分布に差異が確認できる.

図-8 には、呼吸域平均濃度ならびに吸入量  $p\Sigma\phi(\phi$ 呼吸域濃度,t:曝露時間,p:呼吸量)の時間履歴を示す.本解析では呼吸量  $p \ge 1.67 \times 10^4 \text{ m}^3$ /s と想定する.また、本検討での呼吸域を鼻直下の  $4 \text{cm}(x) \times 4.6 \text{cm}(y) \times 2.6 \text{cm}(z)$ の局所領域と定義する. Region 1 の換気回数は 4.36 h<sup>-1</sup> であるため、空間で瞬時一様発生した Passive Contaminant は数十分後には初期濃度の 1/10 程度まで低下する.

図-8(a)に示す Case 1 (R2)B の条件では、受付・待合いスペースの空調系統より定常的に Passive Contaminant を供給するため、解析開始より急激に呼吸域濃度が上昇し定常濃度に到達する.2 時間後に汚染物質発生を停止する条件のため、呼吸域濃度も汚染物質発生の停止と共に濃度減衰する.呼吸域濃度の時間変化に対応して総吸入量も変化する(図-8(d)).

図-8(b)ならびに図-8(c)には、Passive Contaminant を瞬時一様発生させた条件である Case 4 (R2) の A 領域ならびに B 領域の呼吸域濃度履歴を示す. Region 1 の病院内には不均一・非定常な濃度分布が形成されているため、Virtual Manikin の設置位置が異なる場合には曝露濃度も異なる. 図-8(b)と図-8(c)で濃度減衰曲線の勾配ならびに無次元濃度の値(縦軸の値)が異なる理由は建物空間内の不均一濃度分布の他、Case 4 (R2)A では Virtual Manikin 表面で完全沈着を仮定したのに対し、Case 5 (R2)B では沈着を無視した境界条件となっていることに起因する. 衣服での完全沈着を仮定し且つ建物全体の排気口(ここでは便所)から一定の距離がある A 領域では相対的に濃度減衰が早い. 建物全体の排気口近傍の B 領域では、A 領域と比して濃度減衰が遅くなっており、完全混合の場合のザイデル減衰式による濃度変化に近い値となっている. 図-8(e)ならびに図-8(f)には対応する総吸入量の時間変化を示す.人体表面での沈着を仮定した Case 4 (R2)A では、人体全体での曝露濃度(吸着量)は大きくなるものの、呼吸域の濃度が低下するため、それ故総吸入量も少なくなる.



図-8 呼吸域濃度ならびに吸入量の時間履歴

図-9 に鼻腔から気管支までの経気道内の流線図,スカラ風速分布,ベクトル図ならびに粒径 10µm ならびに 50µm の粒子を対象とした Lagrange 追跡の結果を示す.本解析で用いた気道モ デルは実人体の CT データより作成しており,解析空間は非常に複雑な空間形状となっている. そのため,鼻腔から咽頭,気官,気管支へと至る流線も複雑な様相を示しており,部位により 風速スケールも多様となる.

粒径 10µm の粒子を鼻穴面にて瞬時に発生させ,粒子トラッキングを行った結果(図-9(d))より, 粒径 10µm の粒子は鼻腔を通過し,解析領域末端の気管支 3 分岐位置まで到達する.完全沈着 を仮定した壁面境界条件を用いた場合の鼻腔内沈着量は総発生量の 66%となり,残りは咽頭を 経由して気管支まで到達する.

粒径 50µm の場合(図-9(e))では、粒子流跡線が鼻腔の開口(鼻穴)近傍に集中している. 粒径が 大きくなると鼻腔内沈着量が 100%となり、気管支まで輸送されない. 一般に、呼吸器系に対する粒系別の健康影響として、µm オーダ以上の粒子は上気道沈着、 0.1µm 以下の粒子は肺深部まで到達すると云われているが、本報での解析では粒径 10µm の粒 子の鼻腔内沈着量は 66%であり、条件によっては 10µm の粒子であっても下気道から気管支ま で到達する可能性が示唆された. Schroeter, J D らの研究によれば、MRI データより作成する CFD 用の気道モデルの表面粗度形状の再現程度によって、粒子沈着量予測結果に大きな影響を与え ることが報告されている。例えば、気道内の粗度形状を最も詳細に再現したモデルでは、粒径 10µm 粒子の鼻腔内沈着量を 91%と予測したのに対し、スムージングを行い気道内表面の粗度 を再現しない場合には 47%沈着量となった結果が報告されている。気道モデルの形状に関して は、使用する CT や MRI データの基になる個人データの差異に加え、スムージングによる形状 再現精度が支配的な影響を与える。



(d) 粒子の流跡線図 [10μm]
 (e) 粒子の流跡線図 [50μm]
 図-9 気道内の流れ場,濃度場等解析結果 (Region 3)

また、粒径 50µm 粒子を対象として、軌道内壁面の完全沈着を仮定した条件では、過半の汚 染物質は鼻腔内壁に沈着し、気管支まで到達しない結果となった.しかし、例えば J.K Gupta らの非定常呼吸サイクル<sup>12,13)</sup>を再現すると副鼻腔の流入最大風速は1.7 m/s程度と高風速になる ため、汚染物質の気道モデル内での到達域は長くなると考えられる.沈着現象に影響を与える 各種の因子(鼻毛や粘膜、湿度、呼吸サイクル)の再現は重要な課題である.

また呼吸器系では,鼻腔内の(1)鼻毛,(2)鼻腔内粘膜・線毛,(3)くしゃみ反射,咽頭での(4) Waldeyer咽頭輪,気管支での(5)気管支粘膜・線毛,(6)咳嗽反射,肺での(7)肺胞マクロファージ,の7種の異物除去機構がある.吸入汚染物質の種類と気道内沈着部位が定量的に評価可能 となれば,生体内部位別曝露濃度と生理メカニズムを連成して評価可能となり,より高精度の 健康影響評価が可能となる.

平成 26 年度は WRF をベースとした都市気象モデルとの統合解析手法,ダウンスケーリング手 法に関する検討を行った.特に,エルサルバドルを想定して,数 100km スケールのメソスケー ル(中規模)解析から数 100m の小規模スケール解析を多段階ネスティングにて解析し,CFD に よる大規模建物を対象とした解析のための境界条件整備を実施した.

エルサルバドルは国土面積は 21,040km<sup>2</sup>と四国よりやや大きい程度である. WRF による解析では、メキシコと南米大陸を含む領域を Domain 1 として、段階的に解析領域を小さくし、Domain 3 がほぼエルサルバドルの国土領域に相当させている. 図-10 には解析対象とした中央アメリカ中部と Domain を示す.また、図-11 にはエルサルバドルの国土領域に相当する Domain 3 の拡

大図を示す.

200 km



**図**-11 解析対象空間 (Domain 3)

建築スケール CFD 解析へと接続するための予備解析として,2012 年 8 月の気象データ(ラニー ニャ現象ならびにエルニーニョ現象の観測されていない年)をターゲットとして WRF にて数値 解析を実施する.

ここではエルサルバドル首都郊外に建設された染色工場(Complejo Industrial Regina, Bulevar del Ejército Km 7 1/2. Nave No. 2. El Salvador.)を対象とした換気通風シミュレーションと工場内での 化学物質暴露濃度予測シミュレーションのための広域流れ場データの準備を目的とする. 染色工場位置での温度ならびに湿度の解析結果を図-12 に示す.また,地上 2m 位置での温度な らびに風速ベクトルの解析結果一例を図-13 に,風配図を図-14 に示す.

本年度は、この流れ場情報を用いて 200m 四方スケールの工場周辺 CFD 解析のための境界条件 整備までを実施した.



図-13 地上 2m 位置での温度ならびに風速ベクトル(12:00, 30 日平均値)



4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

査読付き論文

- [1] <u>Yunqing Fan</u> and <u>Kazuhide Ito</u>: Integrated Building Energy-Computational Fluid Dynamics simulation for estimating the energy-saving effect of energy recovery ventilator with CO<sub>2</sub> demand-controlled ventilation system in office space : *Indoor and Built Environment*, 2014; 23 (6) pp 785-803
- [2] Yunqing Fan, Keiji Kameishi, Shigeki Onishi and <u>Kazuhide Ito</u>: Field-based Study on Energy saving effects of CO<sub>2</sub> demand controlled ventilation in office with application of energy recovery ventilators : *Energy and Buildings* 68 (2014) 412-422
- [3] <u>Kazuhide Ito</u>: Integrated Numerical Approach of CFD and Epidemiological Model for Multi-scale Transmission Analysis in Indoor Spaces : *Indoor and Built Environment*, 2014; 23 (7) pp 1029-1049
- [4] <u>Kazuhide Ito</u> and Yasuyuki Shiraishi : Comprehensive Field Measurement of Indoor air and thermal Quality in Naturally Ventilated Office Building with Double-Skin Façade: *International Journal of High-Rise Buildings*, December 2013, Vol.2, No.4, pp293-314
- [5] <u>Cong Li</u> and <u>Kazuhide Ito</u>: Numerical and Experimental Estimation of Convective Heat Transfer Coefficient of Human Body under strong forced convective flow : *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 126, pp107-117, Feb. 2014
- [6] <u>Yunqing Fan</u> and <u>Kazuhide Ito</u>: Optimization of Indoor Environmental Quality and Ventilation Load in Office Space by Multilevel Coupling with BES and CFD : *International Journal of Building Simulation*, 7, pp649-659, 2014
- [7] <u>Kazuhide Ito</u>: Micro- and Macro-Scale Measurement of Fungal Growth under Various Temperature and Humidity Conditions : *Evergreen - Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, Volume 01, Issue 01, March 2014, pp32- 39
- [8] Cong Li and <u>Kazuhide Ito</u>: Performance Evaluation of Industrial Air-shower System in Removal of Gas- and Liquid-phase Contaminants from Human Body: *Evergreen - Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, Volume 01, Issue 01, March 2014, pp40- 47
- [9] <u>Eunsu Lim, Kazuhide Ito</u> and Mats Sandberg : Performance evaluation of contaminant removal and air quality control for local ventilation systems using the ventilation index Net Escape Velocity : *Building and Environment*, 79, 2014, pp78-89
- [10] <u>Cong Li</u> and <u>Kazuhide Ito</u>: Performance Evaluation of Wind Decontamination System by Computational Fluid Dynamics: *Evergreen - Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, Volume 01, Issue 02, September 2014, pp12-17
- [11] Hisahiro Einaga, Junnya Tokura, Yasutake Teraoka, <u>Kazuhide Ito</u>: Kinetic Analaysis for TiO<sub>2</sub>-Catalyzed Heterogeneous Photocatalytic Oxidation Processes for Ethylene using Computational Fluid Dynamics : *Chemical Engineering Journal*, 263, 2015, pp325-335
- [12] 浅沼宏亮, <u>伊藤一秀</u>: 病院空間を対象とした非定常不均一濃度分布と数理疫学モデルの連成解析に よる感染伝播予測:日本建築学会環境系論文集, Vol.78, No. 688, 2013.06, pp481-487
- [13] 李丛, Eunsu Lim, 戸次貴裕, <u>伊藤一秀</u>:風除染システム開発研究 (第3報) 風除染ユニットを用 いた人体付着汚染物質の除染効率測定:空気調和衛生工学会論文集, No.196, 2013.07, pp19-25
- [14] 菊本英紀,大岡龍三,林鍾衍, <u>伊藤一秀</u>: Large-eddy simulation における解析格子解像度下での濃度 分散評価手法の検討 マイクロスケール大気汚染予測システムの開発 その4:日本建築学会環境系 論文集, Vol.78, No. 689, 2013.07, pp579-588
- [15] <u>李丛</u>, Zhang Chi, <u>Eunsu Lim</u>, <u>伊藤一秀</u>:風除染システム開発研究 (第4報) CFD 解析によるプロトタイプ風除染装置内の吹出口環境形成寄与率解析:空気調和衛生工学会論文集, No.198, 2013.09, pp11-18
- [16] 亀石圭司,戸田悠太,大西茂樹, <u>伊藤一秀</u>: CO2 デマンド制御型換気装置との連動を意図した簡易 入退室計測システムの開発:空気調和衛生工学会論文集(技術論文), No.199, 2013.10, pp29-36
- [17] Eunsu Lim, 伊藤一秀: 換気効率指標 Net Escape Velocity を用いた不均一空気環境の形成構造に関す る研究 (第3報) 各種の局所換気装置を対象とした空気質制御問題への NEV 適用:空気調和衛生 工学会論文集, No.204, 2014.03, pp25-34
- [18] <u>Nguyen Lu Phuong</u>, 平瀬公太, 荒巻森一朗, <u>伊藤一秀</u>: アクリル製詳細モデルを用いた気道内流れ 場の PIV 計測と CFD 解析結果の精度検証:空気調和衛生工学会論文集, No.207, 2014.06, pp1-7
- [19] 田中郁生, 辻勇, 洞田浩文, 伊藤一秀: 過酸化水素 H2O2 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, 2014.08, pp671-680

- [20] 亀石圭司,戸田悠太,<u>范芸青</u>,<u>伊藤一秀</u>: CO<sub>2</sub>デマンド制御型換気装置のセンシング時間遅れに関する基礎実験と CFD 解析による検証:空気調和衛生工学会論文集(技術論文), No.211, 2014.10, pp7-13
- [21] Sung-Jun Yoo, <u>伊藤一秀</u>: 数値気道モデル内の対流熱伝達解析による人体熱モデルの改良 気道モデルを統合した数値人体モデルの開発 第1報,日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No. 709, 2015.03, pp229-238
- [22] 亀石圭司,戸田悠太,<u>伊藤一秀</u>: CO<sub>2</sub> デマンド制御を組み込んだ全熱交換器の性能検証 (第 1 報) 大学研究室を対象とした夏期冷房時の換気負荷削減効果:空気調和・衛生工学会論文集,No.226, 2015.03, pp1-10

国際会議プロシーディングス

- [1] <u>Cong Li, Eunsu Lim</u> and <u>Kazuhide Ito</u>: Removal of Gas- and Liquid-phase Contaminant from Human Body by Forced Convective Flow : CLIMA 2013, Praha, Czech Republic, PaperID 958 total 7pp
- [2] <u>Eunsu Lim, Kazuhide Ito</u> and Mats Sandberg : Evaluation of the Photocatalytic Decomposition Effect on the Improvement of IAQ by New Ventilation Index - Net Escape Velocity : CLIMA 2013, Praha, Czech Republic, PaperID 994 total 10pp
- [3] Toshiki Matsuo, Sung-Jun Yoo, Nguyen Lu Phuong, Kazuhide Ito : Development of Computer Simulated Person with Numerical Airway model, Part 1 Analysis of Breathing Contaminant Concentration and Respiratory Exposure : *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0532
- [4] Sung-Jun Yoo, Toshiki Matsuo, Nguyen Lu Phuong, Kazuhide Ito : Development of Computer Simulated Person with Numerical Airway model, Part 2 Improved Thermo-Regulation Model with Heat and Moisture Transfer Detail Analysis in Respiratory Tract : *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0541
- [5] <u>Kazuhide Ito, Eunsu Lim</u>, Kiyoshi Yamamoto : Small Test Chamber Experiment and Modeling of Photocatalytic Oxidation of VOCs under Indoor Environmental Conditions : *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0330
- [6] Isamu Tsuji, Hirofumi Horata, <u>Kazuhide Ito</u>: Experimental and Numerical Study for Developing Decompositon Model of Hydrpgen Peroxide on Building Materials: *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0535
- [7] Masato Yamashita, <u>Nguyen Lu Phuong</u>, Kota Hirase, <u>Kazuhide Ito</u>: Numerical Simulation of Airflow, Heat and Particle Transfer in Human Respiratory System : *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0534
- [8] Keiji Kameishi, Yuta Toda, <u>Yunqing Fan, Kazuhide Ito</u>: Field Measurement and CFD Simulation of Residual Life Time of CO2 for Developing Demand Controlled Energy Recovery Ventilator : *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0635
- [9] Kota Hirase, Nguyen Lu Phuong, Shin-ichiro Aramaki, <u>Kazuhide Ito</u>: Visualization of Air Flow Pattern in Human Respiratory Tract by Particle Image Velocimetry : *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0533
- [10] Kiyoshi Yamamoto, <u>Eunsu Lim</u>, <u>Kazuhide Ito :</u> Performance Evaluation of VOCs Concentration Reduction by Photocatalytic Building Materials in Real Scale Chamber : *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0289
- [11] Yuta Toda, Keiji Kameishi, <u>Kazuhide Ito</u>: Long-Term Field Measurement and Performance Assessment of CO2 Demand Controlled Energy Recovery Ventilator: *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0542
- [12] Yosuke Kadota, Toshiki Matsuo, Sung-Jun Yoo, Nguyen Lu Phuong, Kazuhide Ito: Development of Computer Simulated Person with Numerical Airway model, Part 3 Breathing Air Quality Prediction by Improved Unsteady Breathing Flow Model: *Indoor Air 2014*, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, July 7-12, 2014, Paper ID: HP0732
- [13] Sung-Jun Yoo and <u>Kauzhide Ito</u>: Development of Computer Simulated Person Integrated Thermo-Regulation and Respiratory Air Tract Models for IEQ Assessment: 10th International Symposium on Novel Carbon

Resource Sciences, Desember 2nd, 2013

- [14] Ikuo Tanaka, Isamu Tsuji, Hirofumi Horata and <u>Kazuhide Ito</u>: Modeling of Hydrogen Peroxide Decomposition on Building Materials and Experimental Identification of Model Parameters: *YSRIM 2014* Proc. of the Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environment and Energy 2014, February 16-18, Pusan, Korea, pp41-52
- [15] Sung-Jun Yoo, Toshiyuki Matsuo, Nguyen Lu Phuong and Kazuhide Ito: Development of Computer Simulated Person with Thermo-Regulation and Numerical Airway Model: *YSRIM 2014* Proc. of the Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environment and Energy 2014, February 16-18, Pusan, Korea, pp68-78
- [16] Yunqing Fan, Keiji Kameishi, Yuta Toda and <u>Kazuhide Ito</u>: Numerical and Experimental Investigation of Residual Lifetime for CO2 in Space for Development of Demand-Controlled Energy Recovery Ventilator : *YSRIM 2014* Proc. of the Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environment and Energy 2014, February 16-18, Pusan, Korea, pp87-94

国内学会発表

- Eunsu Lim, <u>伊藤一秀</u>:新たな換気効率指標 Net Escape Velocity による室内換気性能評価に関する研究(第4報) Net Escape Velocity による吸着建材の汚染物質濃度低減性能評価:日本建築学会大会学術 講演梗概集, 2013.8, D-2, pp665-666
- [2] <u>Kazuhide Ito</u>: Application of Integrated BES-CFD technique to optimize CO<sub>2</sub> Demand Controlled Ventilation System through Energy Recovery Ventilator:日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013.8, D-2, pp569-570
- [3] <u>Yunqing Fan</u>, <u>Kazuhide Ito</u>, Tetsuo Hayashi: Integration of Dynamic Airflow and Energy Simulation for optimized ventilation design, 空気調和・衛生工学会九州支部学術研究発表会, 2013.6, pp53-58
- [4] <u>Cong Li</u>, <u>Kazuhide Ito</u>, Tetsuo Hayashi: Heat and Mass Transfer from Human Body Surface in Forced Convective Flow, 空気調和, 衛生工学会九州支部学術研究発表会, 2013.6, pp71-76
- [5] 辻勇, <u>伊藤一秀</u>: ナノ・マイクロスケール粒子を対象とした壁面沈着に関する基礎実験: 空気調和 衛生工学会講演論文集, 2013.9, pp125-128
- [6] 山本清司, 堂本昇嗣朗, Eunsu Lim, 伊藤一秀: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 (第3報) バイオクリーンルーム内での浮遊菌減衰試験と数値解析:空気調和衛生工学 会講演論文集, 2013.9, pp81-84
- [7] Kota Hirase, <u>Nguyen Lu Phuong</u>, Shin-ichiro Aramaki, <u>Kazuhide Ito</u>: Experiment and Numerical studyof Fluid Flow in an Idealized Geometry Model Mimicking the Human Respiratory System:空気調和衛生工学 会講演論文集, 2013.9, pp133-136
- [8] <u>Nguyen Lu Phuong</u>, <u>Kazuhide Ito</u>: Convective flow and heat transfer in the Human Respiratory System A Computational fluid dynamics approach:空気調和衛生工学会講演論文集, 2013.9, pp137-140
- [9] 松尾俊紀, Nguyen Lu Phuong, 伊藤一秀:室内熱・空気環境に起因する健康リスクの総合評価を可能 とする数値人体モデルの開発(第2報)呼吸モデルを組み込んだ Virtual Manikin による呼吸域・気道 内空気質予測:空気調和衛生工学会講演論文集, 2013.9, pp129-132
- [10] 亀石圭司,戸田悠太,大西茂樹, <u>伊藤一秀</u>: CO<sub>2</sub>デマンド制御を組み込んだ熱交換型換気システムの性能評価 (第4報) 人員密度把握のための簡易入退室計測システムの開発の精度検証:空気調和衛 生工学会講演論文集, 2013.9, pp117-180
- [11] 戸田悠太, 亀石圭司, 伊藤一秀: CO2 デマンド制御を組み込んだ熱交換型換気システムの性能評価(第 5報)大学研究室スペースを対象とした年間を通じた実測調査:空気調和衛生工学会講演論文集, 2013.9, pp181-184
- [12] 伊藤一秀: 九州における PM2.5 を中心とした越境大気汚染の現状: 空気シンポジウム, 2013.8, pp5-10
- [13] <u>伊藤一秀</u>, Nguyen Lu Phuong, 平瀬公太, 荒巻森一朗:気道内流れ場の PIV 計測と CFD, 可視化情報シンポジウム, 可視化情報全国講演会 2013 会津, 2013.9
- [14] <u>Nguyen Lu Phuong</u>, <u>Kazuhide Ito</u>: Investigation of Flow in a Model of Human Respiratory Tract using PIV technique:室内環境学会学術大会講演集, 2013.12, pp146-147
- [15] <u>Nguyen Lu Phuong</u>, <u>Kazuhide Ito</u>: Numerical Study of Flow in Models of Human Respiratory Tract: 室内 環境学会学術大会講演集, 2013.12, pp148-149
- [16] <u>Cong Li, Kazuhide Ito</u>: Eulerian-Lagrangian Modeling of Particle Resuspension/ Detachment from Duct Surface based on Large Eddy Simulation: 室内環境学会学術大会講演集, 2013.12, pp70-71
- [17] Cong Li, Kazuhide Ito: Use of CFD to Analyze Contribution Ratio of Supply Opening in Wind

Decontamination System:室内環境学会学術大会講演集, 2013.12, pp72-73

- [18] <u>Eunsu Lim</u>, <u>伊藤一秀</u>: 換気効率指標 Net Escape Velocity による厨房排気フードの汚染物質制御効率 評価: 室内環境学会学術大会講演集, 2013.12, pp164-165
- [19] <u>Eunsu Lim</u>, 伊藤一秀: 換気効率指標 Net Escape Velocity を用いた Push-Pull 型換気装置の汚染物質除 去性能評価: 室内環境学会学術大会講演集, 2013.12, pp166-167
- [20] <u>伊藤一秀</u>: ISO/TC146/SC6 (Indoor Air)における換気・空気質関連標準化の動向:第5回空気環境シン ポジウム, 2014.03, pp9-12
- [21] 酒井孝司,小野浩己, 伊藤一秀, 倉渕隆:室内 CFD 解析における室容積と解析格子数の関係に関す る文献調査:日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.9, D-2, pp679-680
- [22] <u>Eunsu Lim</u>,山本清司, <u>伊藤一秀</u>: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 (第 4報) 20L チャンバーによる可視光応答型光触媒担保建材のトルエン濃度減衰性能試験:日本建築 学会大会学術講演梗概集, 2014.9, D-2, pp955-956
- [23] 劉 城準, 伊藤一秀: 気道内対流熱伝達率解析結果を用いた数値人体熱モデルの改良, 空気調和・衛 生工学会九州支部学術研究発表会, 2014.5, pp71-74
- [24] 亀石圭司,戸田悠太, Yunqing Fan, 伊藤一秀: CO2 デマンド制御を組み込んだ熱交換型換気システムの性能評価 (第6報) CO2 濃度センシングの時間遅れに関する基礎実験:空気調和衛生工学会講 演論文集, 2014.9, pp169-172
- [25] 戸田悠太, 亀石圭司, Yunqing Fan, 伊藤一秀: CO2 デマンド制御を組み込んだ熱交換型換気システムの性能評価 (第7報) CO2 濃度センシングの時間遅れ検証実験に対応した CFD 解析: 空気調和衛生工学会講演論文集, 2014.9, pp173-176
- [26] 山本清司, Eunsu Lim, 伊藤一秀: 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 (第 5報) 実大実験チャンバーによる光触媒建材のトルエン濃度減衰試験と数値解析: 空気調和衛生工学 会講演論文集, 2014.9, pp45-48
- [27] 劉 城準, 伊藤一秀: 気道モデルを統合した数値人体モデルの開発 気道内対流熱伝達率解析による 人体熱モデルの改良:空気調和衛生工学会講演論文集, 2014.9, pp129-132
- [29] Eunsu Lim, <u>伊藤一秀</u>: 可視光応答型光触媒担持建材の吸着・光酸化分解反応の数理モデル化-直方 体 20L 小型チャンバーによる VOC 濃度減衰試験:室内環境学会学術大会講演集, 2014.12, pp56-57
- [29] 辻勇,洞田浩文,<u>伊藤一秀</u>:居室スケール実験室内の VHP 濃度分布測定と CFD 解析:日本建築学 会九州支部研究発表会・研究報告,2015.3, pp229-232
- [30] <u>伊藤一秀</u>:経気道暴露を前提とした PBPK-CFD 手法による健康リスク予測に関する現状と展望:日本建築学会九州支部研究発表会・研究報告, 2015.3, pp225-228
- [31] 亀石圭司,戸田悠太, 伊藤一秀: CO2 デマンド制御を組み込んだ熱交換型換気システムの性能評価 (第8報)大学研究室スペースを対象とした夏期調査結果:日本建築学会九州支部研究発表会・研究報 告, 2015.3, pp173-176
- [32] 戸田悠太, 亀石圭司, 伊藤一秀: CO2 デマンド制御を組み込んだ熱交換型換気システムの性能評価 (第9報) 大学研究室スペースを対象とした冬期調査結果:日本建築学会九州支部研究発表会・研究報 告, 2015.3, pp177-180
- [33] 住吉栄作、山口貴大、山本清司、<u>Eunsu Lim</u>、伊藤一秀: Langmuir-Hinshelwood 型光酸化分解反応モデルとパラメータ同定 20L 小型チャンバーによる基礎実験:日本建築学会九州支部研究発表会・研究報告, 2015.3, pp227-280
- [34] 山下真登, Sung-Jun Yoo, <u>伊藤一秀</u>: 2 種類の数値気道モデルを対象とした流れ場・温度場解析と気 道内対流熱伝達率分布予測:日本建築学会九州支部研究発表会・研究報告, 2015.3, pp281-284
- [35] 光宗航基,山下真登,平瀬公太, Sung-Jun Yoo, 伊藤一秀: 齧歯類を対象とした数値気道モデル開発 と鼻腔内流れの数値解析:日本建築学会九州支部研究発表会・研究報告, 2015.3, pp285-288

〔雑誌論文〕(計 22 件)
〔学会発表〕(計 51 件)
〔図書〕(計 0 件)
〔その他〕
ホームページ:www.phe-kyudai.jp

5. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤一秀(九州大学)

(2)研究分担者 義江龍一郎(東京工芸大学)
Kim Taeyon (Yonsei University, Korea)
Eunsu Lim (九州大学・総合理工学研究院)
Nguyen Lu Phuong (九州大学・総合理工学研究院)
Cong Li (九州大学・総合理工学研究院)
Yunqing Fan (九州大学・総合理工学研究院)
Kazukiyo Kumagai (CDPH, USA)