

# CFD と疫学モデルの連成解析による経気道曝露・感染伝播の数値予測 Infectious Risk Assessment by Coupled Numerical Analysis of CFD and Epidemiological Model

伊藤 一秀／九州大学 総合理工学研究院 エネルギー環境共生工学部門／准教授／博士(工学)

Keywords ; 計算流体力学, 疫学モデル, 室内環境, ネスティング, 数値解析  
CFD, Epidemiological Model, Indoor Environment, Nesting, Numerical Simulation

## 1. 序

室内環境中に存在する各種のバイオエアロゾルによる健康影響問題の中で、特に室内空気を介した感染・影響経路が社会的に大きな関心を集めている。例えば、2009 年度にはインフルエンザ A(H1N1) のパンデミック様相を示す世界的な流行が大きな社会的・公衆衛生的問題となったが、これは空气中に放出されたウイルスの吸入(経気道)曝露問題であり、室内流れ場と感染リスクに強い相関がある。また、我が国では結核罹患率が先進国中でも極めて高い水準であるとされるが、結核は咳等により気中放散された結核菌による空気感染が主要経路とされており、流れ場を含めた室内環境が曝露リスク・感染伝播の程度に大きな影響を与える。

本稿では、室内環境中に存在する、もしくは意図的に放出された空気感染性汚染物質(バイオエアロゾル)を想定して、(i) CFD(計算流体力学)による室内濃度分布予測、(ii) SIR 型疫学モデルとの連成解析事例、(iii) 多段階ネスティングによる呼吸域濃度、経気道曝露シミュレーション、の事例を紹介する。

## 2. 病院待合スペースを対象とした感染伝播予測

### 2.1 解析対象空間

本稿では大学病院 1F の待合スペース(ロビー空間)を対象として室内環境中に空気感染性汚染物質が放出された場合の感染伝播、曝露濃度予測シミュレーションの結果を紹介する。解析対象である大学病院 1F の待合スペース空間の概略を図 1 に示す。対象空間は床面積 2020 [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る。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。診療スペースはドアが常時閉であり、空調系統も独立していることから、本解析の対象からは除外し、主に受付・待合スペース空間、ホスピタルモール空間を解析対象とする。待合スペースならびにホスピタルモール空間には温調のために FCU が複数設置されている。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。

解析空間の幾何形状、空調吹出口位置・形状等は、空間全体の流れ場に支配的な影響を与えぬ程度に簡略化してモデル化している。

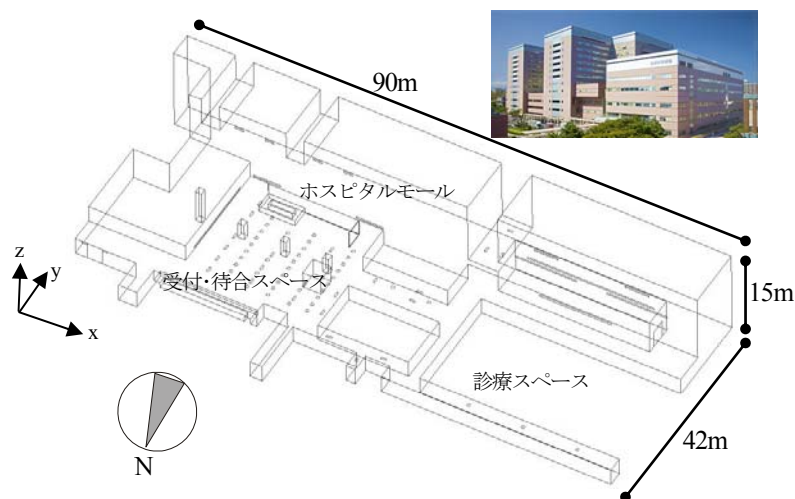


図 1 病院待合スペース概略

### 2.2 数値解析概要

流れ場は RNG 型 k-ε モデルを乱流モデルとして用い、定常解析を実施する。流れ場解析の後、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。本報では基本ケースとして Passive Contaminant を仮定した解析を行う。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、空調系統 1 に属する 16 箇所の吹出口から一定時間発生する条件の 2 条件を設定する。CFD 解析は比較的短い時間スケールでの不均一場予測を得意とするのに対し、後述す

る SIR 型疫学モデルは数週間から数ヶ月といった長期スケールでの感染伝播予測に用いられることが多い。本感度解析では、非常に感染力の強いバイオエアロゾルが室内発生した条件を想定し、濃度場解析は実時間で6時間解析を実施する。バイオエアロゾルは換気のみにより濃度減衰している拡散場を想定するため、流れ場が異なるケースとして、等温ケースと人体発熱を考慮した非等温ケースの2種類を設定した。また、スカラ輸送の際の壁面条件は勾配ゼロを与えた。数値解析条件を表1、解析ケース一覧を表2に示す(後述する疫学モデルとの連成解析ケースも含む)。

表1 数値解析条件

Turbulence Model	RNG k-ε model (3-dimensional Cal.)
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	$U_{in}=0.5$ [m/s] for $n=4.36$ [h <sup>-1</sup> ], $T_{in}=296.75$ [K] $k_{in}=3/2 \times (U_{in} \times 0.1)^2$ , $\epsilon_{in}=C_{\mu}^{3/4} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_{\mu}=0.09$ , $l_{in}=0.03$ [m]
Outflow Boundary	$U_{out}$ = free slip, $k_{out}$ = free slip, $\epsilon_{out}$ = free slip
Wall Treatment	Velocity: generalized log law / 14.85 W/m <sup>2</sup> (heat generation at floor)
Contaminant	Passive Contaminant
SIR Model	$S_0=0.15$ [population/m <sup>2</sup> ], $I_0=5.0^{-4}$ [population/m <sup>2</sup> ], $p=1.67 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> /s], $\Delta=0.25$ [m <sup>2</sup> ], $\mu=2.8 \times 10^{-4}$ [1/s]

表2 CFD-SIR 連成解析ケース一覧

解析ケース	発生源	温度場	$R_0$ [-]
Case 1	空調系統 1(sc)	等温	15
Case 2		等温	6
Case 3		非等温	15
Case 4		非等温	6
Case 5	ロビー全体で瞬時一様発生	等温	15
Case 6		等温	6
Case 7		非等温	15
Case 8		非等温	6

### 2.3 流れ場・温度場・汚染質拡散場の解析結果

図2には九大病院1Fの高さ1.6m領域でのxy平面、図3には空調系統1に含まれるアネモ型吹き出し口断面を含むyz平面での各分布図を示す。

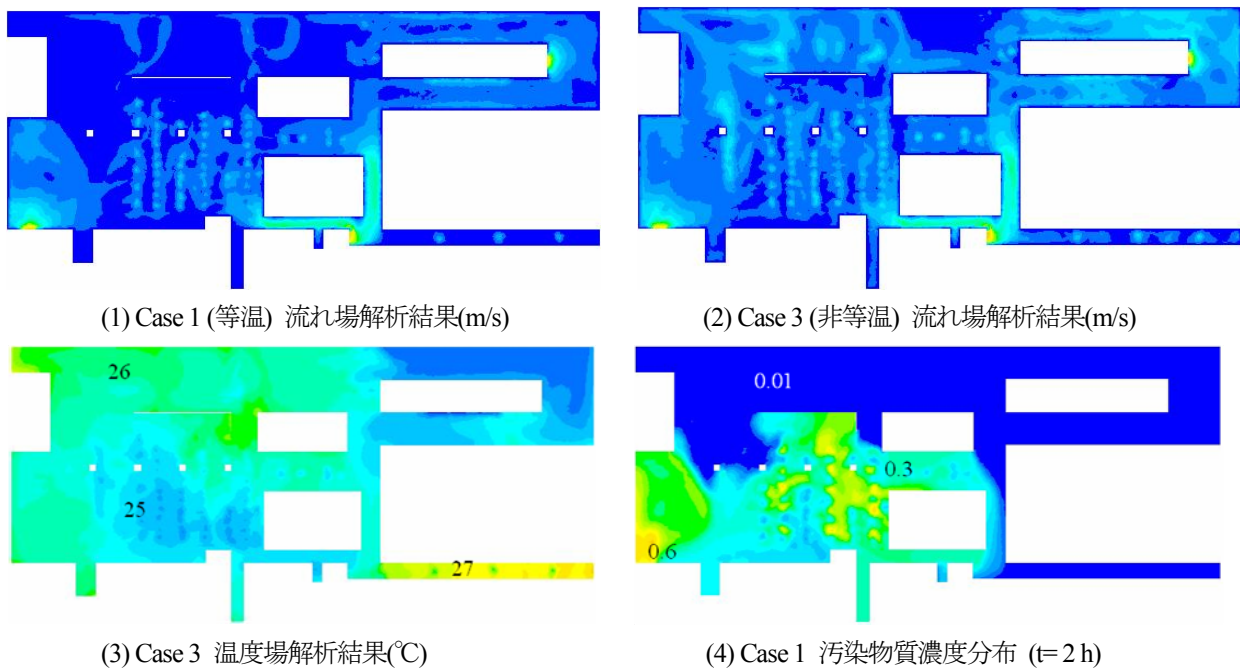


図2 病院1Fを対象とした流れ場・温度場・汚染質拡散場の解析結果(xy平面, y=1.6m高さ)

図2(1)には等温条件での流れ場解析結果(Case 1), 図2(2)には床面に人体発熱(1F空間に300人の人口を仮定し, 14.85[W/m<sup>2</sup>]を一様に設定)を与えることで非等温条件にて流れ場を解析した結果(Case 3)を示す。両ケース共、アネモ

からの吹出風速は 0.5 [m/s] に設定している。等温時では吹出噴流の到達域で相対的に高い風速が観察されるものの、他の領域では滞留域となっている様子が確認される。また排気口周囲でポテンシャルフローが形成されている。床面での人体発熱のみを考慮した非等温時の解析では温度差に起因する浮力効果によって空間全体に対流が生じている様子が観察され、等温場と比較して、相対的に複雑な流れ場を形成している。図 3(3) に Case 3 の xy 平面での温度分布解析結果を示す。空間内に明確な温度分布が形成されている様子が確認できる。受付・待ち合いスペースでの温度が他のスペースと比べ低くなっている。また図 3(2) に xz 断面での温度分布を示す。床面に発熱を与え、天井面に設置された空調吹出より相対的に低温空気を供給するため、室内に緩やかな温度成層の形成が確認できる。

図 3 に示す xz 断面図より、等温条件では、アネモ型吹出しからの吹出しにより、流速が呼吸域高さまで到達していることが分かるが、非等温条件では吹出噴流の方向と温度差による浮力の向きが逆のため、吹出噴流到達域が狭くなっている。



(1) Case 1 (等温) 流れ場解析結果 (2) Case 3 温度場解析結果 (3) Case 1 汚染物質濃度分布

図 4 病院 1F を対象とした流れ場・温度場・汚染質拡散場の解析結果(アネモ型吹出口を含む xz 断面)

### 3. CFD と SIR 型疫学モデルの連成解析

上述の病院待ち合いスペースを対象とした CFD 解析結果を基に、CFD と数理疫学モデルの連成解析事例を紹介する。

#### 3.1 SIR 型数理疫学モデル

本研究では感染伝播を数理的に再現する疫学モデルとして Kermack and McKendrick により提案された SIR モデルに拡散項を付加した拡張モデルを用いる。このモデルは一定の母集団を対象とした感染リスクの伝播を再現するモデルであり、Susceptible (感染可能性を有する人口もしくは密度)、Infective (感染者数もしくはその密度)、Recovered (回復者数もしくはその密度) の頭文字を取ることによって SIR モデルと称される。これら 3 変数の時間変化を示す微分方程式により、表 3 中(1)~(3)式で表される(表 3 中のモデルは拡散項を付加した拡張モデルであるが、Kermack and McKendrick によるオリジナルモデルは拡散項を含まない反応項のみから成る)。式中の  $\beta$  は感染者と非感染者の接触による感染伝播確率 [1/person/s]、 $\gamma$  は回復率 [1/s] を示すが、この  $\beta$  と  $\gamma$  より基本再生産数  $R_0$  が定義され(表 3(5)式)、感染強を示す指標として広く使用されている( $R_0 > 1$  で感染拡大、 $R_0 < 1$  で感染が収束)。ここで、 $S+I+R=N(=S_0)$  が成立する。

表 3 疫学モデル・スカラー輸送方程式と各モデルの関係

[1] SIR モデル (拡散項を付加した拡張型)

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI + \nabla \cdot (D_S \nabla S) \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\gamma I + \beta SI + \nabla \cdot (D_I \nabla I) \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I + \nabla \cdot (D_R \nabla R) \quad (3)$$

$$\beta = p \cdot a \phi \cdot \bar{\Delta} \quad (4)$$

[2] 基本再生産数

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma} S_0 \quad (5)$$

[3] スカラー輸送方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \phi \mathbf{u} = \nabla \cdot (D \nabla \phi) + S_\phi \quad (6)$$

の整合性を検討した結果を報告しており、感染初期段階では SIR モデル中の感染伝播確立  $\beta$  は濃度の関数として表現可能であることを示している。本解析では感染伝播確立  $\beta$  を表 3 中の(4)式の通り、濃度の他、空気感染性汚染物質の感染力と濃度場解析を分離させるために無次元濃度に想定する汚染物質に対応した感染力を示す感染価  $a[-]$  を導入する。また  $S$  ならびに  $I$  の次元として人員密度[population / m<sup>2</sup>]を仮定した解析を実施するため  $\beta$  にはグリッドサイズ補正項  $\bar{\Delta}$  [m<sup>2</sup>]を導入している。

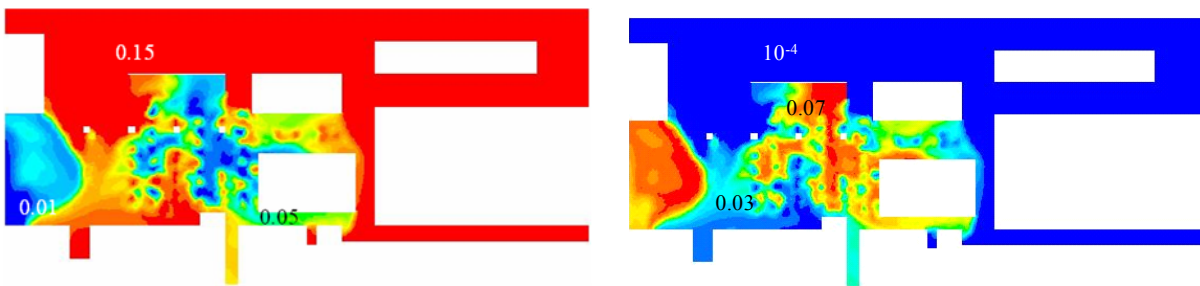
病院待合スペース内の流れ場は CFD 解析によって求め、その流れ場解析結果を基に表 3 中の(6)式に示すスカラ(空気感染汚染物質)輸送方程式を数値的に解くことで、非定常かつ不均一な濃度予測が可能となる。この空間各位置での非定常濃度データより感染伝播確立  $\beta$  の時間変化を求め、(1)~(3)式を解く。仮に感染者  $I$  が新たな汚染物質を放出する場合には、スカラ輸送方程式(6)式中の Source Term  $S_\phi$  へのフィードバックが必要となるが、本報では考慮しない。

### 3.2 数値解析概要

SIR 型の疫学モデルとの連成解析では、空間全体に初期人員として健常者 300 人と仮定し、 $S$  の初期人員密度である  $S_0=0.15$  [population/m<sup>2</sup>]を与える。その他、 $I_0=0.0005$  [population/m<sup>2</sup>]と仮定する。基本再生産数  $R_0=15$  の場合と  $R_0=6$  の解析を実施する。 $R_0=15$  は麻疹、 $R_0=6$  は風疹に相当する基本再生産数である。

### 3.3 感染伝播の数値解析結果

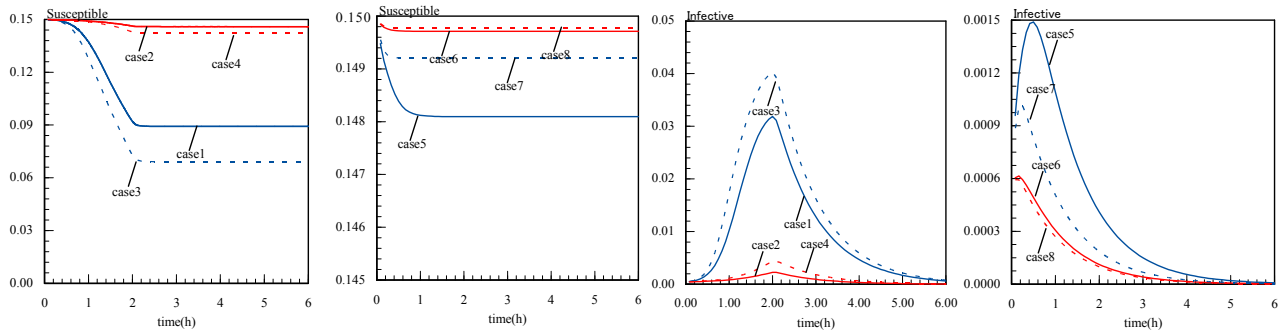
図 5 には Case 1 の解析条件において、汚染物質が空調系統 1 より発生開始後 2 時間経過後の汚染物質、 $S$  ならびに  $I$  の密度分布を示す。同一空調系統に属する吹出口から一定濃度の汚染物質が供給される条件のため、発生源付近で  $S$  が減少し、 $I$  が増加する分布が確認できる。



(1) Case 1 Susceptible (S)の密度分布 (t=2h)

(2) Case 1 Infective (I) 密度分布 (t=2 h)

図 5 病院 1F を対象とした Susceptible (S)・Infective (I)の密度分布解析結果(xy 平面, y=1.6m 高さ)



(1) Case1~4 : Susceptible

(2)Case5~8 : Susceptible

(3)Case1~4 : Infective

(4)Case5~8 : Infective

図 6 Susceptible (S)ならびに Infective (I)の空間平均値の時間履歴

図 6 には全解析ケースを対象として、Susceptible (S)ならびに Infective (I)の  $z=1.6m$  高さにおける 2 次元平面での平均密度の時間履歴解析結果を示す。Case1 から Case 4 は同一の空調系統 1 から汚染物質を 2 時間発生させその後に汚染物質発生を停止させた条件に加え、等温・非等温の別と基本再生産数  $R_0[-]$  を 15 と 6 の 2 段階で設定した解析ケースである。Case5 から 8 は汚染物質を瞬時にロビー全体で一樣発生させたケースである。当然ながら基本再生産数を大きく設定した Case1, Case 3, Case 5 ならびに Case 7 にて Infective (I)が大きなピークを示し、解析初期に汚染物質暴露に伴い感染者数が増加する様子が確認出来る。Case1 から Case4 では他のケースと比して汚染物質発生量が多いため、空間平均濃度も高くなることで感染伝播確率  $\beta$  の値も大きく、汚染物質が定常発生するケースと比較して瞬時一樣発生のケース(Case5~Case8)では換気効果で汚染物質濃度が急激に低下するため、空間濃度の低下と共に  $\beta$  も急激に小さくなり、感染リスクが低下する。

#### 4. 多段階ネスティングによる経気道曝露予測

病院ロビー空間を Scale1, 数値人体モデル周辺領域を Scale2, さらに人体モデル鼻孔を流入流出境界として鼻腔・気管支までの領域を Scale3 と設定し, Scale1~3 を多段階ネスティングによってシームレスに境界条件( $U_b, k, \varepsilon, \phi$ )を接続し, 大規模室内空間の濃度分布解析から気道内の汚染物質沈着量予測までを解析した事例を紹介する.

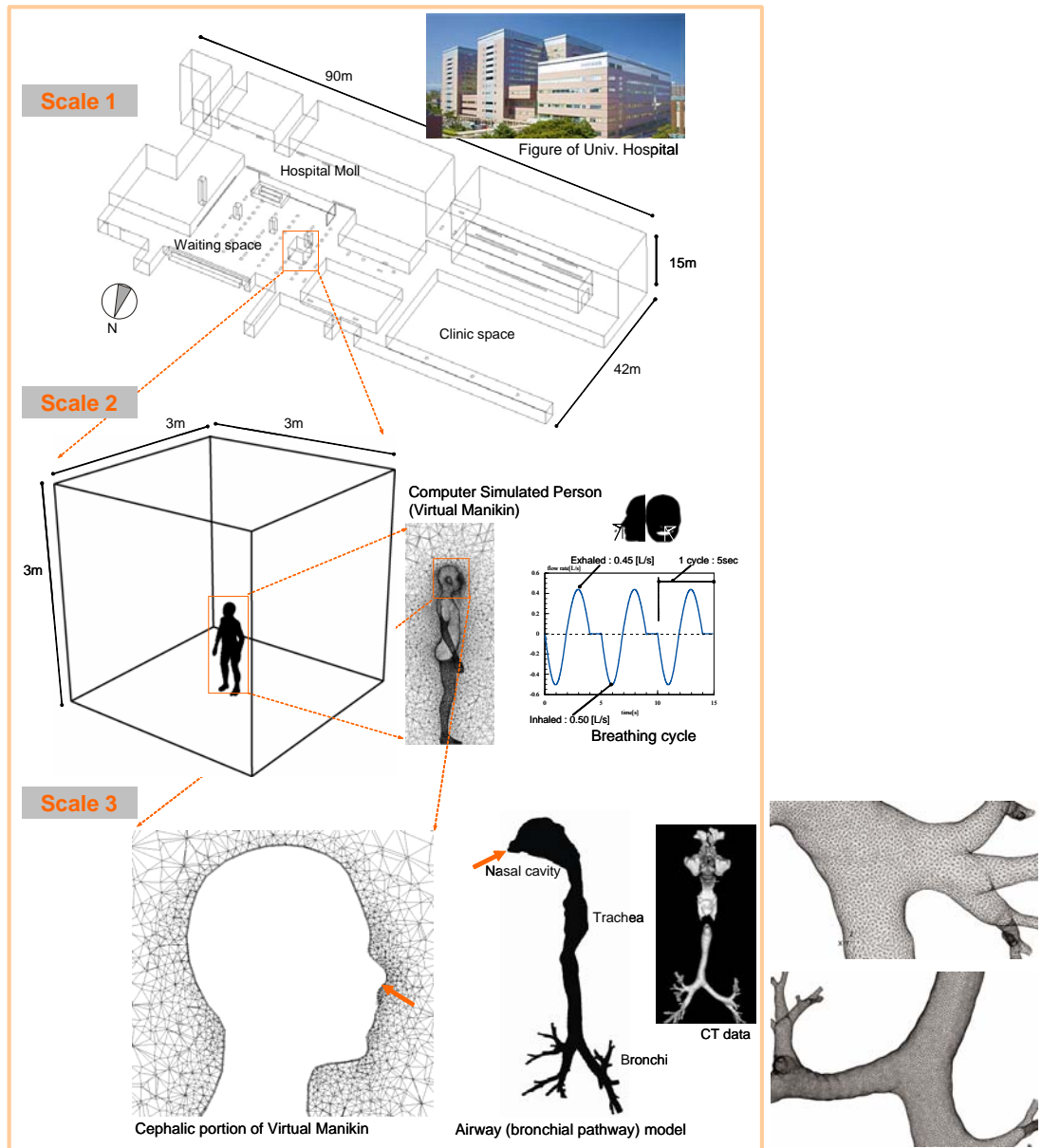


図7 建築スケールから人体スケール, 経気道スケールへの多段階ネスティング概要

##### 4.1 解析対象空間の概要

前述した大学病院 1F の待合スペースを解析対象空間とする. この空間を Scale 1 とし図 7 に概要を示す. Scale 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 50 万程度である.

同空間内に 3.0m(x)×3.0m(y)×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 Scale 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 7 中に示す. 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, 人体表面での Wall Unit  $y^+$  は概ね 1 以下に設定している.

Virtual Manikin の鼻腔開口部から気管支までの経気道経路を Scale 3 とし, その概要を図 7 に示す. 鼻腔から気管支までの形状は, 健康な成人男性の上半身を対象とした CT(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。Scale 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。

## 4.2 数値解析概要

前述の Scale 1 から Scale 3 を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。ネスティングは大スケールから小スケールへの one way ネスティングとし、小スケールから大スケールへのフィードバックは考慮しない。

病院の待合いスペースの流れ場は RNG 型 k-εモデルを乱流モデルとして用い、定常解析を実施する。流れ場解析の後、バイオエアロゾルを想定した汚染物質の非定常移流・拡散解析を実施する。本解析では Passive Contaminant を仮定したバイオエアロゾルが病院待合いスペースに瞬時一様拡散させた場合を想定する。これは 2 章で紹介した Case1, 2 に対応している。

Scale 2 の天井面は病院と同じ高さに設定しており、床面、天井面からの流入出はない。Virtual Manikin 正面方向は北側(Case1)と南側(Case2)の 2 方向設定する。北側は待合いスペースで受付カウンター側である。Scale 1 と Virtual Manikin 周辺空間である Scale 2 の接続面では、Scale 1 で解析した平均風速データ、乱流統計量(k ならびにε)を Scale 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 Scale 2 の境界条件として与える。Scale 1 の Scale 2 に対する接続面は各々4 分割してあり(計 16 面)、接続面ごとに非定常濃度データを受け渡す。Scale 2 では第 1 報で扱った呼吸サイクルの再現が呼吸域濃度に与える影響は軽微と確認されたため呼吸はしないものとし、流れ場は低 Re 型 k-εモデルを乱流モデルとして用い、定常解析を実施し、濃度場のみ非定常解析する。また、人体表面はバイオエアロゾルの完全沈着面(常に表面濃度ゼロ)と仮定する。

鼻腔から気管支までの経気道空間を対象とした Scale 3 では、経気道内での空気感染性汚染物質の沈着分布を高精度に解析することを主目的とするため、Virtual Manikin を対象として呼吸域濃度解析を行った結果としての最高濃度を鼻腔開口部での境界条件として解析を行う。簡略化のため、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する。(鼻腔開口面積:1.3cm<sup>2</sup>)。Scale 2 と同様に低 Re 型 k-εモデルによる流れ場解析を実施する。本報での解析では、呼吸に伴う形状変化は考慮せず、no-slip 壁として境界条件を与える。また、Scale 2 と同様にバイオエアロゾルの壁面濃度をゼロとし Perfect Sink 条件を仮定した。

表 4 数値解析条件 (九大病院(Scale 1))

Turbulence Model	RNG k-ε model (3-dimensional Cal.)
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	$U_{in}=0.5$ [m/s], $k_{in}=3/2 \times (U_{in} \times 0.1)^2$ , $\epsilon_{in}=C_{\mu}^{3/4} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_{\mu}=0.09$ , $l_{in}=0.03$ [m]
Outflow Boundary	$U_{out}$ = free slip, $k_{out}$ = free slip, $\epsilon_{out}$ = free slip, $\phi_{out}$ = free slip
Wall Treatment	Velocity; generalized log low, $\phi_{wall}$ = free slip

表 5 数値解析条件 (Virtual Manikin(Scale 2))

Turbulence Model	Low Re Type model (Abe-Ngano model, 3-dimensional Cal.)
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	$U_{in}$ : Scale 1 Data, $k_{in}$ : Scale 1 Data, $\epsilon_{in}$ : Scale 1 Data
Wall Treatment	Velocity; No-slip, $k _{wall}$ ; no slip, $\epsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ , $\phi_{wall}$ = free slip
Surface Treatment of Manikin	Velocity; No-slip, $k _{wall}$ ; no slip, $\epsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ , $\phi_{wall}=0$

表 6 数値解析条件 (経気道(Scale 3))

Turbulence Model	Low Re Type k-ε model (Abe-Ngano model, 3-dimensional Cal.)
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	$U_{in}=0.92$ [m/s], $k_{in}=3/2 \times (U_{in} \times 0.1)^2$ , $\epsilon_{in}=C_{\mu}^{3/4} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_{\mu}=0.09$ , $l_{in}=10^{-3}$ [m],
Outflow Boundary	$U_{out}$ = free slip, $k_{out}$ = free slip, $\epsilon_{out}$ = free slip, $\phi_{out}$ = free slip
Wall Treatment	Velocity; No-slip, $k _{wall}$ ; no slip, $\epsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ , $\phi_{wall}=0$

## 4.3 数値解析結果

図 8 に呼吸域高さにおける病院空間ネスティング領域の風速ベクトル図を示す。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。空間で瞬時一様発生したバイオエアロゾルは空間内の換気回数が 4.36[h<sup>-1</sup>]であ

るため、数十分後には初期濃度の 1/10 程度まで低下する。そのため、解析時間は 1h としている。

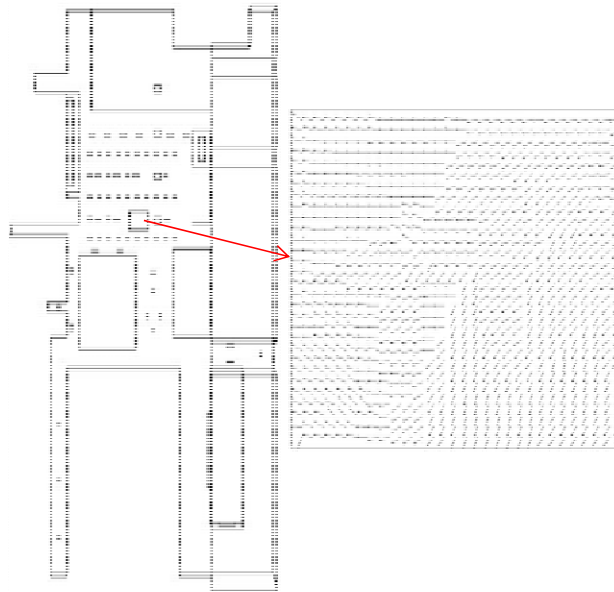


図8 病院ネスティング領域の風速ベクトル図

Virtual Manikin 正面方向を待合いスペース(Case A), ホスপিタルモール(Case B)の2通り設定する。図9に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。呼吸量  $p$  は  $1.67 \times 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]$  とする。ここでの呼吸域とは鼻直下の  $4\text{cm}(x) \times 4.6\text{cm}(y) \times 2.6\text{cm}(z)$  の領域と定義する。Case A では Virtual Manikin 後背から正面への風速ベクトルになるため、呼吸域濃度は雰囲気濃度と比較して低い濃度場を形成している。Case B では Virtual Manikin 立位方向が Case1 と逆向きになるため呼吸域濃度は雰囲気濃度と同等の値になっている。また呼吸域濃度は病院と同様に計算開始より 20 分後には初期濃度の 1/10 まで低下し、それ以降の吸入量は変化しない。Virtual Manikin の方向によって呼吸域濃度ならびに吸入量は大きく異なる。

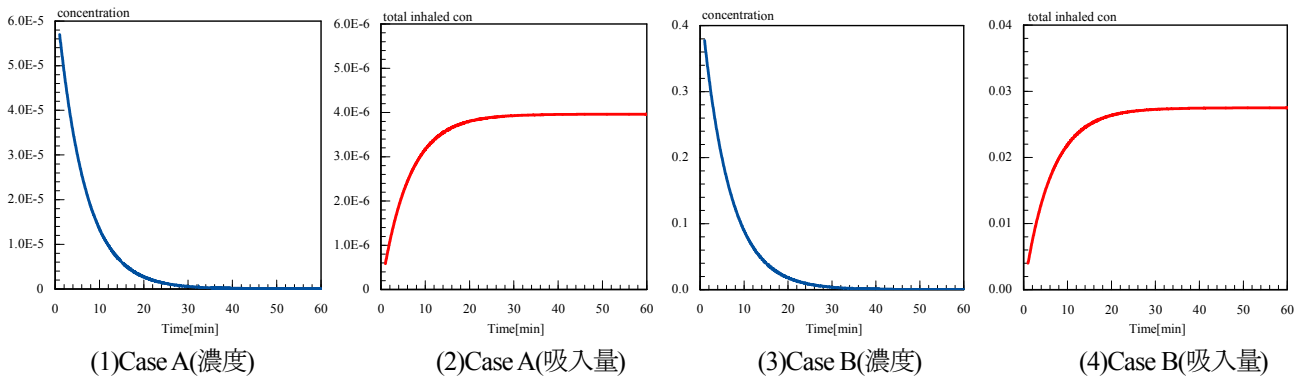
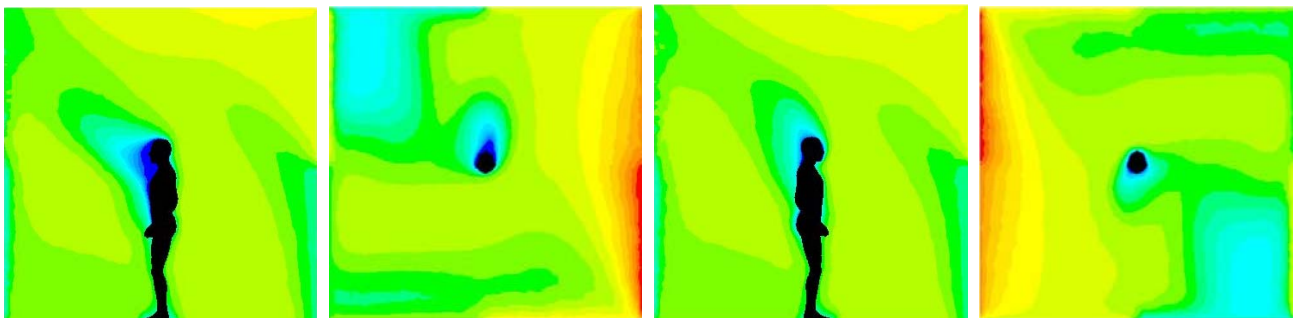


図9 呼吸域平均濃度の時間履歴



(1)Case A( $x=1.5, yz$  平面)      (2) Case A( $y=1.6, xz$  平面)      (3) Case B( $x=1.5, yz$  平面)      (4)Case B( $y=1.6, xz$  平面)

図10 濃度分布図( $t=30\text{min}$ )

図10に Virtual Manikin 正面, 側面の濃度分布図を示す. Case A では Virtual Manikin 正面が, Case B では Virtual Manikin 後背が後流の影響で濃度が低くなっている.

図11に鼻腔から気管支までの経気道内の流跡線図ならびに濃度分布を示す. 鼻腔から気管, 気管支へと流線がのびている. 鼻穴から流入した汚染物質は鼻腔を經由して咽頭部に輸送される様子が観察される. 鼻腔内壁面を完全沈着面と仮定した場合, 大半の流入汚染物質は鼻腔領域で沈着し, 員頭部から気管まで到達する割合はほぼゼロという解析結果となった.

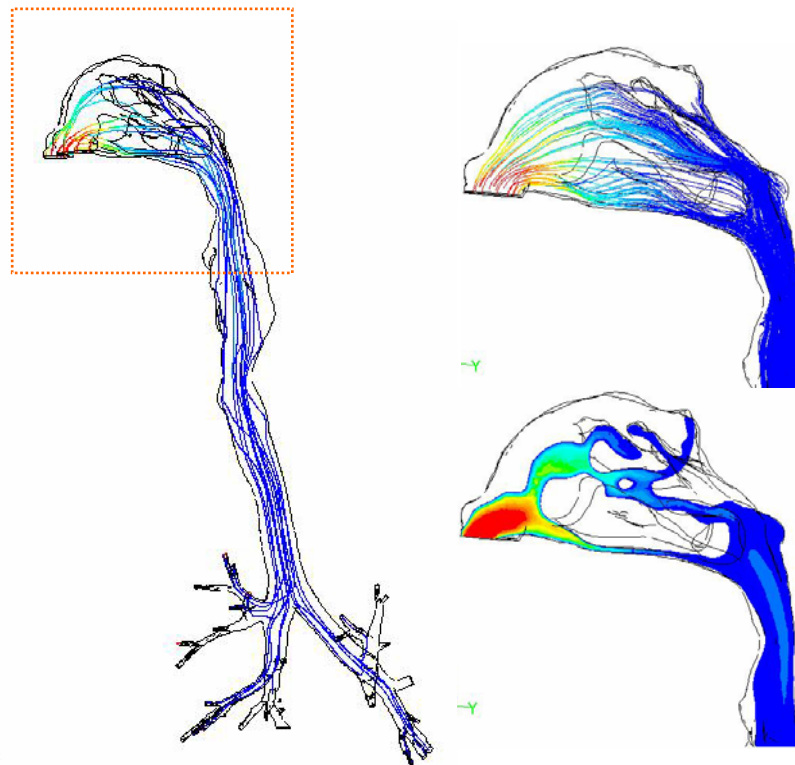


図11 鼻腔から気管支(経気道)までの流跡線ならびに鼻腔内濃度分布

病院の大規模空間スケールから Virtual Manikin へとネスティングを行うことで, 高精度に呼吸域濃度を予測する解析手法を示した. 本報での解析事例では, 流れ場に強く依存する汚染物質濃度場の解析と人体形状を詳細に模擬した Virtual Manikin の解析を連成することでより高い精度の呼吸濃度予測が可能となることが確認された. 特に本解析では Virtual Manikin の設置方向により呼吸域濃度のオーダが全く異なっている. またネスティング領域をアネモ型吹出口の近くの複雑な流れ場に設置したが, ネスティングによる予測精度の検証は今後の課題である.

Virtual Manikin から鼻腔-気管支までの経気道へとネスティングを行った結果, Passive Contaminant の Perfect Sink 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, J.K Gupta, Q. Chen らの非定常呼吸サイクルを再現すると副鼻腔の流入最大風速は 1.7[m/s]程度になるため, バイオエアロゾルの到達域は長くなると考えられる. 呼吸サイクルの再現や生態内壁の沈着モデルの開発も今後の課題である.

## 5. 結語

本稿では, 計算流体力学の応用解析事例として, (i) CFD(計算流体力学)による室内濃度分布予測, (ii) SIR 型疫学モデルとの連成解析事例, (iii) 多段階ネスティングによる呼吸域濃度, 経気道曝露シミュレーション, の事例を紹介した. 空間スケールから生体内までを対象とした汚染物質の輸送シミュレーションを統合して実施することで, 感染リスク低減のための工学的な基礎的知見を提供することが可能となる. さらに, 工学的な枠組みにとどまらず, 経気道内での汚染物質沈着量, 沈着位置を詳細に予測することで, 臨床医学的, 空襲衛生学的な知見を提供することも可能となろう.

研究グループの URL : [www.phe-kyudai.jp](http://www.phe-kyudai.jp)

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金 (課題番号 21676005) の助成を受けたものである. 記して深甚なる謝意を示す.



## 本稿に関する既発表文献

- 1) 伊藤一秀, 堀田太郎(2006)数値解析用 Virtual Manikin の開発とグリッドライブラリ作成:空気調和・衛生工学会論文集, No.113,pp27-34
- 2) 浅沼宏亮, 福岡孝幸, 伊藤一秀:工学—疫学モデルの連成解析と空気感染リスク評価 第一報 呼吸発熱する数値人体モデルを対象とした呼吸空気質解析:日本建築学会大会学術講演梗概集、2010.9、D-2、pp649-650
- 3) 福岡孝幸, 伊藤一秀:工学—疫学モデルの連成解析と空気感染リスク評価 第二報 CFD による非定常濃度予測と SIR モデルの連成:日本建築学会大会学術講演梗概集、2010.9、D-2、pp651-652
- 4) Takayuki Fukuoka and Kazuhide Ito : Exposure Risk Assessment by Coupled Analysis of CFD and SIR model in Enclosed Space : *AIVC 2010*, Low energy and sustainable ventilation, Technologies for green buildings, Seoul, Korea, 1A-3 (17 pp)
- 5) 福岡孝幸, 伊藤一秀:閉鎖空間内の非定常不均一濃度分布と疫学モデル連成解析による曝露リスク評価:日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No. 659, 2011.01, pp25-33
- 6) 浅沼宏亮, 福岡孝幸, 伊藤一秀:工学—疫学モデルの連成解析と空気感染リスク評価 第3報 九大病院ロビー空間を対象とした非定常不均一濃度場解析と SIR 型疫学モデルを用いた感染伝播予測:日本建築学会九州支部研究発表会・研究報告, 2011.3, [投稿中](#)
- 7) 福岡孝幸, 浅沼宏亮, 伊藤一秀:工学—疫学モデルの連成解析と空気感染リスク評価 第4報 建築空間—人体モデル—経気道の多段階ネスティングによる曝露濃度予測シミュレーション:日本建築学会九州支部研究発表会・研究報告, 2011.3, [投稿中](#)