

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年 5月15日現在

機関番号：17102
研究種目：若手研究(S)
研究期間：2009～2013
課題番号：21676005
研究課題名（和文） 公衆衛生工学手法による気中分散粒子系汚染物質の
人体曝露経路予測と制御
研究課題名（英文） Prediction and Control of Human Exposure of Indoor Aerosol Based
on Public Health Engineering Approach
研究代表者
伊藤 一秀 (Ito, Kazuhide)
九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授
研究者番号：20329220
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）48,600,000円、（間接経費）14,580,000円

研究成果の概要（和文）：室内環境の質が居住者の健康に与える影響は甚大である。本研究では、計算流体力学の技術を中心に、室内環境中に存在する気中分散粒子系汚染物質を対象として建築スケールから人体スケールまでを連続して詳細に解析することで、呼吸に伴う人体曝露濃度を高精度に予測する手法を開発した。加えて、この解析手法に数理疫学モデルを連成することで、居住者集団の健康リスク評価を統合して解析する包括的な予測・評価手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：The indoor environment can play a significant role in the transmission of and exposure to various contaminants. In this research project, an analytical procedure for coupling the computational fluid dynamics (CFD)-based prediction of unsteady and non-uniform contaminant concentration distribution with a basic epidemiological model has been developed. Furthermore, an integrated simulation procedure for prediction of exposure concentration of infectious contaminant using a multi-nesting method connecting building space, a micro-climate around human body, and respiratory air tract in human body has been also proposed in order to provide quantitative and qualitative detailed information for estimating contaminant dose of residents.

研究分野： 建築環境工学・公衆衛生工学

科研費の分科・細目： 建築学／建築環境・設備

キーワード： 数値人体モデル、気中分散粒子系汚染物質、計算流体力学、曝露リスク予測

1. 研究開始当初の背景

室内空間にて過半の時間を過ごすといわれる現代社会において、建築により形成される室内空間の良否が Quality of Life (QOL) に与える影響は甚大である。重量比に換算した体内摂取物質量は、実のところ定常的な呼吸による室内空気成分が過半の支配要素となるため、室内空気環境の制御は健康リスクの観点では特に重要な課題である。

室内空気環境に関する問題は様々な汚染物質が相互に影響し合う複合的な環境問題であると云えるが、各種のガス状汚染物質に加えて、近年では気中分散粒子系汚染物質による空気汚染問題が顕在化しており、呼吸器疾患を始めとする各種のアレルギー症状を誘発する要因物質として対策が求められている。室内空気環境の改善のためにはその正確な濃度分布予測と曝露濃度制御に関する

対策技術の確立が急務である。

室内空気汚染問題に対して、公衆衛生学的アプローチである疫学調査手法は一定量の母集団を確保することでマクロな健康リスク評価を可能とするが、実際の呼吸濃度や曝露濃度の評価といった人体周辺の不均一微気象を含めたミクロな解析を考慮に入れた評価はこれまでは対象外とされることが多かった。短期・長期曝露の両者の健康リスク評価の高精度化のためには、ミクロレベルである呼吸濃度の正確な予測から、マクロレベルである居住者集団の健康リスク評価までを統合して扱うことの出来る予測評価フレームが必要であり、このためには、工学と公衆衛生学の融合した新たな研究アプローチが必要となる。

2. 研究の目的

本研究ではこの問題意識のもと、以下に示す3つの具体的な目的を設定する。

- (1) 室内空気環境の気中分散粒子系汚染物質に着目し、その空気力学的・化学的・微生物学的特性を厳密にモデル化した詳細な数値予測手法を開発する。最終的には放散源を含む非定常不均一濃度分布の予測が可能な統合モデルを構築し、人体曝露経路を解明する。(工学的アプローチ)
- (2) 呼吸濃度を入力条件とした健康リスク評価・感染伝播予測のための数理疫学モデルを確立する。数理疫学モデル確立の為に、室内空間を対象とした気中分散粒子系汚染物質の実態調査を行い、時間変動・空間分布に関する詳細データの把握を行うと共に、疫学アンケート調査を同時に実施することで基礎データを蓄積する。(公衆衛生学的アプローチ)
- (3) 旧来の公衆衛生学の研究手法に工学的な手法を併用した新たな研究アプローチを用いて、室内環境中の気中分散粒子系汚染物質を対象とした厳密な数値予測に基づく健康リスク評価手法の確立と空気環境制御法の提案を行う。

最終的には、本研究の推進により新たな研究領域「公衆衛生工学：Public Health Engineering」を開拓・発展させる。

3. 研究の方法

本研究プロジェクトは工学アプローチを担当する研究クラスタ[A]と公衆衛生工学アプローチによる研究クラスタ[B]より構成し、国内外の研究者と有機的な連携関係を構築しながら研究を推進する。

(1) 研究クラスタ [A]

気相化学反応に起因する二次生成エアロゾルと微生物由来のバイオエアロゾルに着目し、人体呼吸器系への沈着作用等を詳細に調査すると共に、基礎実験データを基に粒径別数理モデル(気相化学反応モデル、生成モデル、沈着モデル、帯電凝集モデル、微生物増殖に伴うバイオエアロゾル放散モデル)を開発する。開発した各種数理モデルを計算流体力学(CFD)、数値人体モデル(Virtual Manikin)と連成させることで、非定常・不均一濃度分布の解析に加え、人体曝露経路の解明が可能な予測モデルを構築する。

(2) 研究クラスタ [B]

長期滞在型の住宅を対象として、気中分散粒子系汚染物質の時間変動や空間分布の実態調査を行い、その情報をデータベース化する。疫学的統計手法を併用することで気中分散粒子系汚染物質と健康影響の関係を解明する。気中分散粒子系汚染物質の曝露濃度と健康影響に関する数理疫学モデルを作成す

ると共にモデル定数を同定する。

最終的には、研究クラスタ[A]と[B]の成果を統合し、即ち、気中分散粒子系汚染物質による室内空気汚染問題の解明と対策技術確立のため、工学手法と公衆衛生学手法を統合し、空間の不均一濃度分布の詳細予測を基にした高精度の人体吸気濃度予測から個人曝露・集団曝露による健康リスク評価までを統合したフレームで扱う予測・評価手法を確立する。更にインフルエンザウィルス感染対策や生物剤・化学剤によるNBCテロ対策への活用も視野に入れ、高精度で汎用的な人体曝露経路予測手法を開発する。

4. 研究成果

主たる研究成果を以下に整理する。

(1) CFD 技術を基盤とした室内気中分散粒子系汚染物質の濃度分布予測法の開発

室内環境中には換気により導入される外気由来の気中分散粒子系汚染物質(所謂エアロゾル)の他、室内環境中に存在する特定の化学物質が相互に化学反応を誘発し、その結果として各種の気中分散粒子系汚染物質が生産され、併せて中間生成物としての free radical 等が発生する現象が確認されている。これらは反応前の物質と比較して遙かに大きな人体影響を与える可能性があるとも指摘されている。特に外気やOA機器に由来するオゾンが室内環境中に存在する場合、木質系建材より放散されるテルペン類化学物質と気相反応を誘発することでSOA(Secondary Organic Aerosol, 二次有機エアロゾル)を生成することが確認されており、室内環境中での2次的な空気汚染問題として懸念されている。そのため、オゾンを中心とした酸化環境下における気相化学物質の反応現象、特に室内に存在するオゾンとテルペン類の中でd-Limonene(リモネン)との反応に着目し、移流の存在する条件下にて各化学物質の濃度減衰試験を実施し、反応生成物質であるSOAの濃度履歴、粒径分布履歴を測定した。SOA生成を計測したこの基礎実験結果を対象として、その粒径分布変化を詳細に予測することを目的として、二次反応速度定数を用いたSOA生成モデルに加え、粒子の輸送方程式に区分分割法を用いた解析法を開発した。

本研究では(1)式に示す General Dynamic Equation (GDE)にて気中分散粒子濃度 $n(v,t)$ の室内空気中輸送を記述した上で、区分分割法を用いて粒径を有限個 m の領域に分割し、各領域の積分値 Q_l に関して各々離散式を作成した。

$$\frac{\partial n(v,t)}{\partial t} = -\nabla \mathbf{u} n(v,t) + \nabla \cdot (D(v) \nabla n(v,t)) + S_p + C_a + G_s + E_s \quad (1)$$

$$Q_l(t) = \int_{v_{l-1}}^{v_l} v \cdot n(v,t) dv \quad (l=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

室内環境中でのオゾン-リモネン反応に伴う SOA 生成に関しては、オゾンとリモネン混合初期の瞬間的な SOA 生成とその後の成長過程を分けてモデリングを行う瞬時的凝集核生成モデル(Burst Nucleation Model)を提案し、(3)式に示すモデルパラメータ $Y(v,t)$ を導入した。

$$S_p = Y(v,t) \frac{\partial C_p}{\partial t} = Y(v,t) \cdot k_b \cdot C_1 \cdot C_2 \quad (3)$$

区分分割法による SOA 生成ならびに粒子濃度・粒径変化の予測精度を確認するため、図 1 に示すダクト型実験装置を用いた一定濃度供給実験を行い、対応する境界条件で数値解析も併せて実施した。

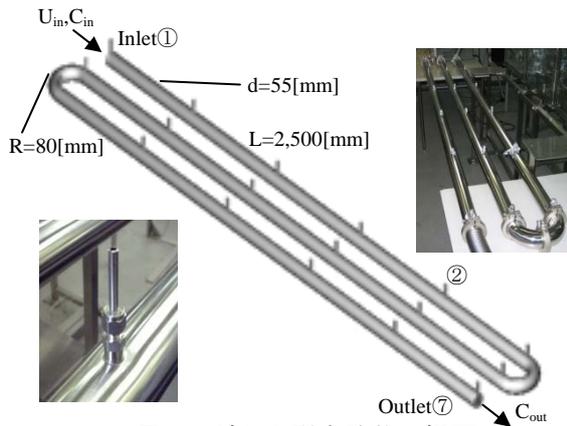
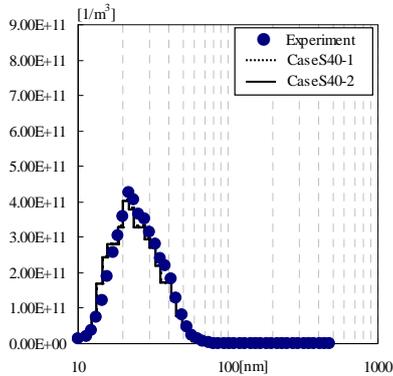
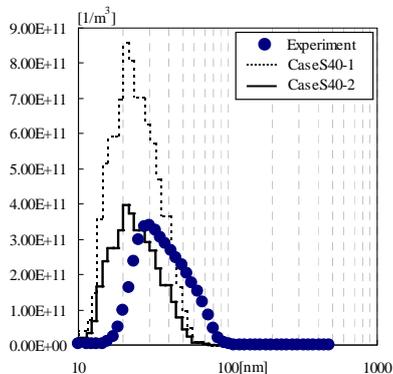


図 1 ダクト型実験装置概要



(1) 測定点①



(2) 測定点⑦

図 2 SOA 粒径分布(実験結果と数値解析)

ダクト型実験装置内での SOA 生成と粒径分布変化に関する実験結果ならびに数値解析結果の一例を図 2 に示す。 $Y(v,t)$ を時間変化せず一定値として設定した解析ケース(Case S40-1)は、初期の SOA 生成量ならびに粒径分布を良く再現するものの、給気口(Inlet)位置から排気口に向かって移流されるに伴い(即ち空気齢の増加と共に)、SOA の生成量が過大評価され、実験結果と大きな相違が見られる結果となった。 $Y(v,t)$ に時間依存性を持たせ Step change させた解析ケース(Case S40-2)では給気口(Inlet)位置から測定点②までの SOA 生成量ならびに粒径分布の予測精度は $Y(v,t)$ を一定値としたケースと同様であり、更に測定点②以降の後流側における粒径分布、濃度ピークの予測精度が大きく改善される結果が得られた。

本研究ではオゾン-リモネン反応に伴う SOA 生成のみに着目したが、瞬時的凝集核生成モデルとそのモデルパラメータ $Y(v,t)$ に時間依存性を加えたモデリング、さらには区分分割法と CFD の連成解析による粒径分布解析手法は、室内環境中に存在する各種気中分散粒子系汚染物質の濃度分布予測に適用できる基礎研究成果である。

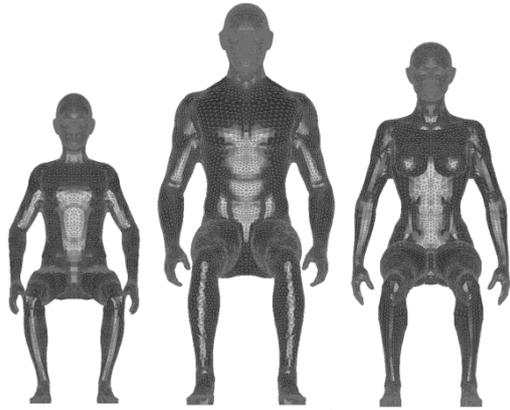
(2) 数値人体モデル・数値気道モデルの開発

正確な呼吸空気質と経気道曝露濃度予測を行うためには人体形状を詳細に再現した数値人体モデルデータ(本研究では Virtual Manikin と呼ぶ)が必須である。本研究では CFD をベースとした室内環境解析に適用が可能な各種の Virtual Manikin のメッシュデータの整備を目指して、児童スケール、成人男性スケールおよび成人女性スケールの 3 種類の人体スケールにおいて、詳細なグリッドデザインを施した Virtual Manikin のメッシュデータ(幾何形状データ)を作成した。

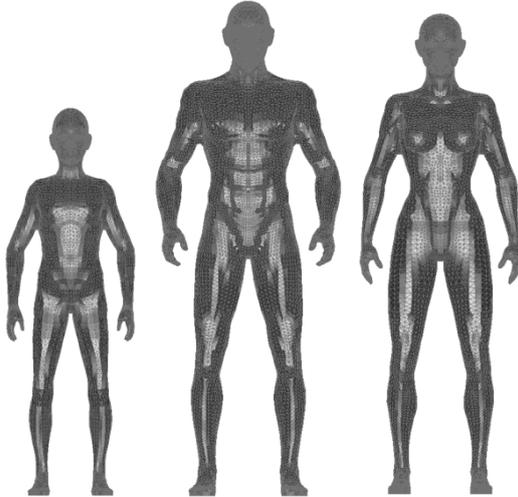
本研究で開発した Virtual Manikin の一例を図 3 に示す。室内環境解析への適用を考慮し、立位型と座位型を作成した。また、本研究で作成する Virtual Manikin は汎用的な CFD コードでの使用を目的として、①人体表面メッシュのみを施したグリッドデー、②人体表面法線方向に約 1mm 幅で 4 メッシュ分のプリズムメッシュを配したグリッドデータ、の 2 種類を用意し、ライブラリ化した。これらのライブラリ化したメッシュデータは研究室 WEB サイト(www.phe-kyudai.jp)を通じて公開している。

また、人体の熱収支に着目した場合、皮膚表面での対流・放射による顕熱・潜熱移動の他、呼吸に伴う顕熱・潜熱損失量を正確に評価することが重要であり、また、健康影響に着目した場合には呼吸器系統へ移流・拡散される汚染物質量の把握が重要となる。この点で数値人体モデルとシームレスに統合可能

なリアルな気道モデル(Virtual Airway)の開発が重要な研究課題となる。



(1) 座位型モデル



(2) 立位型モデル

図3 Virtual Manikin の概要

本研究では、鼻腔・口腔から咽頭、気管を經由して気管支第4分岐までの詳細幾何形状を、健康な成人男性(身長 170cm 程度、体重 70kg 程度の中肉中背、40 歳程度の年齢)の上半身を対象とした CT データを元に作成した。開発した Virtual Airway を図 4 に示す。



図4 数値気道モデルの概要

Virtual Airway ならびに Virtual Manikin の鼻孔ならびに口腔での CFD 流入境界条件を与えるために、人体代謝率を入力条件とした非定常の呼吸サイクルモデルも開発した。

(3) 建築スケールから人体・気道スケールまでを統合した経気道曝露濃度予測に関する数値解析手法の開発

本研究では、多段階ネスティングにより建築空間スケールから人体内の気道スケールまでを接続することで、空間の不均一濃度分布から、直接の曝露濃度である呼吸域濃度、さらには鼻腔から気管支に至る経気道での空気感染性汚染物質の沈着量分布を予測する一連の解析手法を開発した。具体的には、(i)建築空間スケール、(ii)人体周辺スケール(Virtual Manikin を中心とした空間)、(iii)呼吸器スケール (Virtual Airway)、に解析対象空間を分割し、各々の解析空間を多段階ネスティングにて接続する。3 種の空間スケールは大きく異なり、それ故解析に使用するメッシュサイズも異なるが、上位空間(相対的に粗メッシュ)の流れ場・汚染物質濃度場解析結果(平均風速分布の他、乱流統計量と非定常濃度分布)を線形補間して、下位空間(相対的に細メッシュ)にリアルタイムで受け渡すことで一連の解析を達成する。このようなネスティング手法を用いた CFD 解析は、地球環境や都市環境解析などの屋外空間を対象とした解析報告例はあるものの、建築空間から人体内部までを対象として適用した事例は過去に無く、独創的な研究成果である。

開発した数値解析手法を大規模病院空間に適用した事例を図 5 に示す。図中の Region2 が仮想的に Virtual Manikin を設置したネスティング領域を示している。

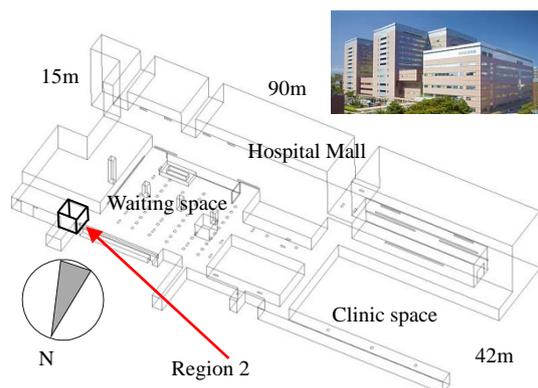


図5 解析対象とした大規模病院

図 6 には建築スケールから人体呼吸器スケールまで連続してダウンスケーリングしながら数値解析を実施する手順を示す。この手法を用いることで数百メートルスケールから気道内の mm スケール以下まで連続して解析が可能となる。

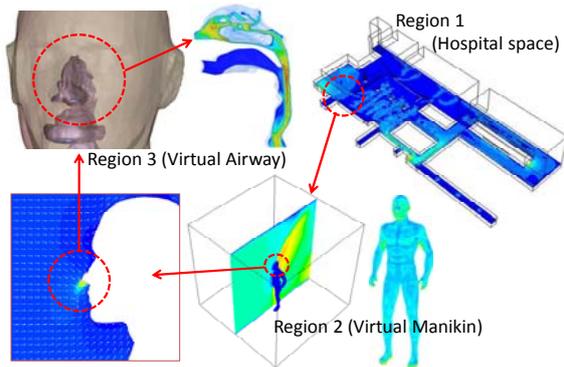
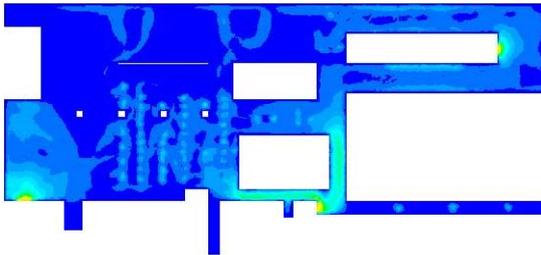
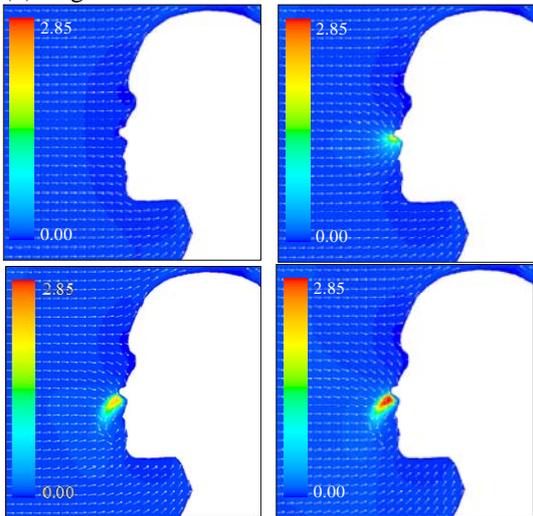


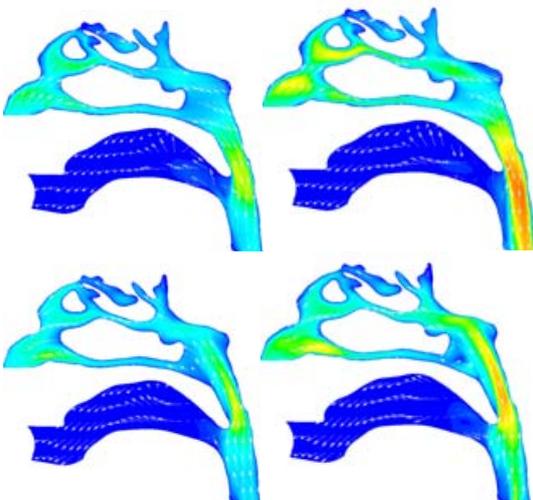
図6 ネスティング手法による解析手順



(1) Region 1 流れ場解析結果



(2) Region 2 流れ場解析結果(非正常呼吸)



(3) Region 3 流れ場解析結果(非正常呼吸)

図7 各領域の流れ場解析結果

図7には病院空間スケール(Region 1)の流れ場解析結果, 人体(Region 2)呼吸域周辺の流れ場解析結果, 気道モデル内(Region 3)流れ場解析結果を示す. 連続解析を行うことで, 相互の解析領域の影響を考慮した詳細な数値予測が可能となる.

ここでは紙面の都合で割愛するが, 汚染物質濃度場を同時に解析することで, 建築スケールの非定常不均一濃度分布から人体周辺の濃度分布, 呼吸空気質, 経気道曝露濃度の不均一分布を高精度に解析可能となることも確認している.

(4) 疫学モデルとCFDを統合した室内感染伝播予測に関する数値解析手法の開発

経気道曝露濃度の評価と室内環境中で感染伝播現象の予測を目指し, 非定常・不均一濃度分布解析と, 居住者の感染伝播を定量的に記述するSIR型疫学モデルを連成して解析する手法を開発した.

本研究では, Kermack and McKendrickにより提案されたオリジナルのSIRモデルに拡散項を付加した拡張モデルを基に, CFD解析で求めた経気道曝露濃度 C を入力条件として経気道曝露による感染確率 β' と, 感染者と非感染者の接触による感染伝播確率 β'' を決定するモデルを以下のとおり提案した.

$$\frac{dS}{dt} = -\beta' S - \beta'' SI + \nabla(D_s \nabla S) \quad (4)$$

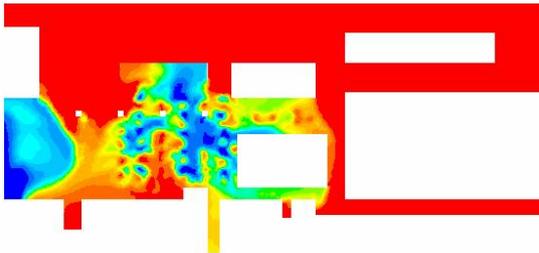
$$\frac{dI}{dt} = -\gamma I + \beta' S + \beta'' SI + \nabla(D_I \nabla I) \quad (5)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I + \nabla(D_R \nabla R) \quad (6)$$

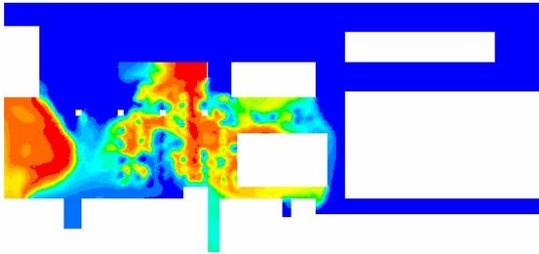
$$\beta' = \frac{q' p}{Q} = pC = p \cdot aC \cdot \bar{\Delta} \quad (7)$$

ここで, S , I , R は健常者, 感染者, 回復者の人員密度を示す. この感染伝播モデルを前節の病院空間に適用して, 仮想的な感染性バイオエアロゾルが室内空間に放出された場合の感染リスク評価シミュレーションを実施した結果を図8に示す. この解析結果は仮想的な感染性バイオエアロゾルが室内放散されて2時間後の人員密度分布を示しており, (4)式から(7)式を連成して時間発展的に解くことで, 感染者数の2次元平面上的変化と時間変化を予測することが出来る. 初期条件として健常者は待合スペースに均等に分布しているが, 時間経過と共に一定の拡散速度でランダムに異動する現象が組み込まれている.

また, この解析モデルでは経気道曝露濃度 C と感染確率 β' と間には感染強度を決定するモデルパラメータ a が導入されており, この値を具体的な感染性汚染物質毎に与えることができれば, 本研究での数値解析の枠組みを用いて室内空間での感染伝播現象を高精度に予測することが出来る.



(1) 健康者 S の密度分布



(2) 感染者 I の密度分布

図 8 S ならびに I の平面分布解析例

(5) 「公衆衛生工学」研究領域の開拓・発展
多段階ネスティング手法を用いた経気道曝露濃度の高精度予測手法と、経気道曝露濃度を入力条件とした数理疫学モデルを連成させた室内環境解析手法を同時に用いることで、気中分散粒子系汚染物質を対象とした人体曝露経路の高精度予測、経気道曝露濃度の高精度予測、感染伝播予測が可能となる。この予測モデルは人体内のミクロスケールから建築レベルのマクロスケールまでを統合した予測モデルであり、また工学的な濃度予測手法と公衆衛生学的な曝露リスク評価・疫学モデルを統合したものである。

本研究プロジェクトによる研究成果を「公衆衛生工学」とのキーワードで整理し、これまでの研究成果と今後の課題を明示することで、流体工学や建築環境工学を基礎とする工学的アプローチと、疫学調査や曝露リスク評価を基礎とする公衆衛生工学アプローチを統合した新しい研究領域の創出に務めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 53 件) (全て査読有)

- ① Kazuhide Ito. Integrated Numerical Approach of CFD and Epidemiological Model for Multi-scale Transmission Analysis in Indoor Spaces. *Indoor and Built Environment*, In Press (Online: Jan 13, 2014) (doi:10.1177/1420326X13516658)
- ② Kazuhide Ito. Integrated Numerical Simulation with Fungal Spore deposition and Subsequent Fungal Growth on Bathroom wall Surface. *Indoor and Built Environment*, 2013; 22 (6) pp 881-896 (doi:10.1177/1420326X12465764)
- ③ Kazuhide Ito and Hiroshi Harashima. Coupled CFD Analysis of size distributions on

indoor secondary organic aerosol derived from ozone / limonene reactions : *Building and Environment*, 46 (3), pp711-718, 2011 (doi:10.1016/j.buildenv.2010.10.003)

〔学会発表〕(計 109 件) (国際会議プロシーディングス 28 件含む)

- ① Kazuhide Ito. Exposure Assessment based on Multi-Nesting Simulation Connecting Virtual Manikin with Respiratory Tract Model : 9th International Meeting for Manikins and Modeling, 21- 24 August 2012, Waseda, Tokyo Japan, (6pp full paper)
- ② Kazuhide Ito and Hiroaki Asanuma. Exposure Concentration Prediction by Multi-Nesting Approach Connecting Building Space-Virtual Manikin- Nasal Airway Model : *AIVC 2011*, Brussels, Belgium, 12-13 October 2011, pp213-216
- ③ Kazuhide Ito and Nguyen Lu Phuong : Fungal growth prediction in bathroom by coupled simulation with CFD and hygrothermal transfer : *ROOMVENT 2011*, The 12th International Conference on Air Distribution in Rooms, Trondheim, Norway, June 19-22, 2011, (8pp full paper)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

研究室ホームページ : (www.phe-kyudai.jp)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 一秀 (Ito Kazuhide)

九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号 : 2 0 3 2 9 2 2 0