

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：27103

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14886

研究課題名（和文）換気用全熱交換器の最適設計に向けた顕熱・潜熱・臭気物質同時移動モデルの開発

研究課題名（英文）Hygrothermal and odor material transfer model for optimal design of energy recovery ventilator

研究代表者

鄭 朱娟（Chung, Juyeon）

福岡女子大学・国際文理学部・助教

研究者番号：70793545

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：全熱交換型換気システムの更なる性能向上を図るため、小型全熱交換エレメントの顕熱・潜熱・臭気物質移動の統合的予測するモデルの開発を行った。代表的な水溶性物質であるアンモニアの拡散係数を平均相対湿度の関数としてモデル化することで、ガス移行現象を十分な精度でのモデル化が可能であることを確認した。構築した数値解析モデルは、境界条件・初期条件、定数同定を行い、予測精度検証を実施し、数値解析モデルの再現性を確認した。また、熱交換効率最大化に向けた最適設計を支援する各種物性値や幾何条件要素の相互関係を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした全熱交換型換気システムの化学反応を考慮した数値解析モデルは、省エネルギーで良質な空気環境を創造するための基本的な設計支援ツールとなるもので、地域、生活に関わる環境配慮設計での貢献が期待できる。全熱交換エレメントの性能改善に寄与する要素のパラメトリック解析は、環境工学分野、建築環境・設備分野で環境・エネルギー装置の高性能化や新規プロセスの開発に異なる相間の物質移動が生じる場合の様々な条件での応用解析が可能となり、数値解析事例を蓄積する点でも大きな波及効果が期待出来る。

研究成果の概要（英文）：We developed a model to comprehensively predict the sensible heat, the latent heat, and the odor material transfer in a compact heat recovery ventilation system to improve the performance of the total heat exchange ventilation system.

We confirmed that the gas transfer phenomena with sufficient accuracy by modeling the diffusion coefficients of ammonia as a function of the relative humidity. We carried out the verification of the prediction accuracy to confirm the numerical analysis model. In addition, we confirmed the correlation between various physical properties and the geometric conditions to improve heat exchange efficiency and the optimal design of the total heat exchange ventilation system.

研究分野：建築環境工学

キーワード：換気用全熱交換器 全熱交換効率 計算流体力学 顕熱・潜熱・臭気物質同時移動モデル

## 1. 研究開始当初の背景

居住者の日常生活が営まれている室内環境中の空気には、人体由来の水蒸気や二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )の他、各種の臭気物質(アンモニア( $\text{NH}_3$ ), 硫化水素( $\text{H}_2\text{S}$ ), メチルメルカプタン( $\text{CH}_3\text{SH}$ )など)、建材や生活用品から発生するホルムアルデヒド( $\text{HCHO}$ )、揮発性有機化合物(VOC)など、多様な汚染物質が偏在している。一般的に二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )濃度を基準値以下に制御することを目的とする全熱換気と比較して、局所換気の場合には、濃度制御対象となる汚染物質が具体化されているケースが過半である。例えば、トイレや病室などは主に室内(局所領域)で発生する臭気物質の濃度制御に主眼が置かれており、限定された局所空間に対する換気量は相対的に多く確保される傾向がある。即ち、換気量の最適化による空調負荷の低減の観点では改善の余地がある。この点で、排気空気中の全熱(顕熱と潜熱、すなわち温度と湿度)を全熱交換エレメント内で交換・回収することで給気中の温湿度調整を行う全熱交換型換気システムは、確実に換気負荷の削減に貢献できることから、一般室内に加えて浴室やトイレなどの局所空間を含む多様な室内環境分野への適用が期待されている。

一方、全熱交換型換気システムは、実質的に顕熱・潜熱の交換を担う全熱交換エレメント部分の性能が換気システム全体の性能を支配する。潜熱交換効率を向上させるためには透湿性能の高い材料が選択されることになるが、この場合には、潜熱交換の促進に伴い、ホルムアルデヒドやVOCを含む各種の汚染物質の移行も促進されることが懸念されている。例えば代表的な水溶性のガス状臭気物質であるアンモニア( $\text{NH}_3$ )に着目した場合、排気中の臭気物質が潜熱交換と共に給気側に移行し室内に戻される可能性が否定できず、トイレなど、臭気物質の適切な排出が必要とされる空間の換気設備として全熱交換型換気システムが導入された事例は殆ど無い。最近ではイオン交換樹脂を吸湿材として使用し、臭気移行を防止する技術も注目されているが、その有効性に関してはまだ十分な検討がなされていない。全熱交換型換気システムの更なる性能向上と多様な室内空間への普及を図るためには、全熱交換エレメント内の顕熱・潜熱交換のメカニズムに加えて臭気物質を含む汚染物質移動メカニズムを十分に理解した上で、最適設計を行うための数値解析手法を確立することが非常に重要な課題である。

## 2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では、材料の物性を同定する基礎実験の実施に加え、費用的・時間的観点で利点の多い数値実験法を導入し、従来の熱・水分同時移動モデルと臭気物質移動を同時に考慮した3成分同時移動現象を再現する数値解析モデルを構築し、モデル定数同定、予測精度検証の一連の研究課題を段階的に推進する。最終的に、全熱交換エレメント内の顕熱、潜熱、臭気物質移動メカニズムを高精度に予測評価する数値解析モデルを構築し、材料や流路形状を変化させたパラメトリック解析を行うことで、確実に熱交換効率向上を達成する全熱交換エレメントの最適設計法を確立する。

## 3. 研究の方法

本研究では大別して、小型全熱交換エレメントの顕熱・潜熱・臭気物質移動の統合的予測と、交換効率最大化に向けた最適設計を支援する数値解析モデルの開発に分類し研究を推進した。

### (1) 小型全熱交換エレメントの顕熱・潜熱・臭気物質移動の統合的予測

材料内の熱・水分同時移動式と臭気物質移動の3成分同時移動式の定式化を行う。全熱交換エレメントを構成する透過膜内の臭気物質移動は、顕熱移動と比較して潜熱(水分)移動の影響を強く受ける。そのため、臭気物質・水分同時移動式を定式化した上で、熱・水分・臭気物質の3成分同時移動モデルを定式化する。


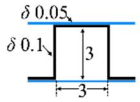
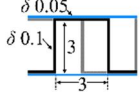
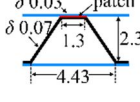
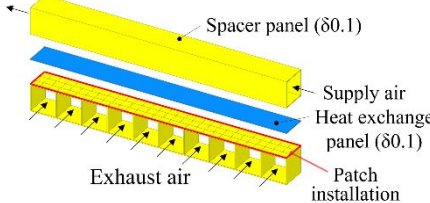




3成分同時移動モデルを定式化のため、小型の全熱交換エレメントを対象とした臭気物質移行率測定する。代表的な水溶性臭気物質としてアンモニア( $\text{NH}_3$ )に着目し、比較のための汚染物質としてホルムアルデヒド( $\text{HCHO}$ )、二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )にも着目した上で、各種の透過膜を対象とした拡散係数(二つの小形チャンバーで材料を挟み込むダブルチャンバー法)、吸着等温線(磁気浮遊式天秤を用いた重量法)の測定を行う。これらは数値解析用の境界条件・初期条件となるよう競争吸着や温度依存性等を考慮して整備する。透過膜・構成材料を用いて小形の全熱交換エレメントのプロトタイプモデルを作成し、風量と温湿度条件、臭気物質濃度条件を変化させて全熱交換効率・臭気物質移行率の測定を行う。

### (2) 交換効率最大化に向けた最適設計を支援する数値解析モデルの開発

数値解析用小型の全熱交換エレメントモデルの作成と解析条件設定する。実機として作成可能な小型の熱交換エレメントの幾何形状を基に、CFD解析を行う流路形状と流路構成材料内部までを高解像度で再現する数値解析モデルを作成する。CFD解析と顕熱・潜熱・臭気物質移動モデルの連成解析手法の確立するため、CFD解析と材料内の熱・水分・臭気物質の3成分同時移動モデルを気相・固相界面でのフラックス保存式を共有させた連成解析モデルとして整備し、作成した全熱交換エレメントモデルに統合する。基礎実験結果と比較することで予測精度を検証し、必要に応じて数値解析モデルの改良を行う。最終的に、性能改善に寄与する空気流量、材料の透湿性能、幾何条件要素、有効全熱交換面積(断熱・断湿面パッチ)の4要素に着目し、物性

値を段階的に変化させた系統的解析を実施し，各種設定条件が交換効率，対流熱伝達率，フィン効率に与える影響を把握する．Table1 に CFD 解析で用いた体系的なモデル条件を示す．

Table 1: Models of heat exchange element (unit : mm)

Models	Configurations	Channel size
(a) 1	Corrugated/ continuous	
(b) 2-1	Squared/ continuous	
(c) 2-2	Squared/ staggered	
(d) 3	Corrugated with patches	
(e) 2-1-ch1		
Patch=0		
Patch=0.11		
Patch=0.33		
Patch=0.66		

#### 4．研究成果

##### (1)小型全熱交換エレメントの顕熱・潜熱・臭気物質移動の統合的予測

全熱交換形換気システムの局所換気への適用と温度ならびに湿度条件が臭気物質交換に与える影響を具体的に検討する目的で，熱水分移動モデルと連成解析することを前提とした臭気移動を予測する透過試験を行った．代表的な水溶性物質であるアンモニアは，空気中の相対湿度上昇に伴い，移行率が急激に上昇することを確認している．材料内のアンモニア拡散係数を平均相対湿度の関数としてモデル化することで，ガス移行現象の工学上十分な精度でのモデル化が可能であることを確認した．

##### (2)交換効率最大化に向けた最適設計を支援する数値解析モデルの開発

構築した数値解析モデルの境界条件・初期条件，定数同定について，予測精度検証を実施し，再現性を確認した．均一な流入条件の2つの Reynolds 数条件( $Re=280, 2800$ )における速度，顕熱及び潜熱のプロファイルの結果から，断熱・断湿パッチ面との境界で顕熱・潜熱境界層の開発が中断されることが確認され，境界で顕熱・潜熱フラックスを促進させ，交換効率向上が期待できることを確認し，性能改善に寄与する要素であることを確認した．しかし，大面積・多数の断熱・断湿パッチ面条件では顕熱・潜熱境界層の変化が小さいことから，顕熱・潜熱フラックスの促進効果は低下されることが予測される．全熱交換エレメントの幾何形状，有効全熱交換面積の特徴と全熱交換効率の関係を局所 Nusselt 数，局所 Sherwood 数の関係で整理した結果では，断熱・断湿面の面積が同一の条件において断熱・断湿面の数が多い条件で局所 Nusselt 数，局所 Sherwood 数が多いことが確認された．高 Reynolds 数条件である都市，室内領域に比べ，低 Reynolds 数条件であるコンパクト熱交換器の場合，スケール効果による断熱表面増加効果が極めて少ないにもかかわらず，熱交換効率向上の可否を確認した．全熱交換器の設計時，断熱・断湿面を広く設置するよりも小さい面を複数設置することで，熱交換効率を高めることができることを確認した．

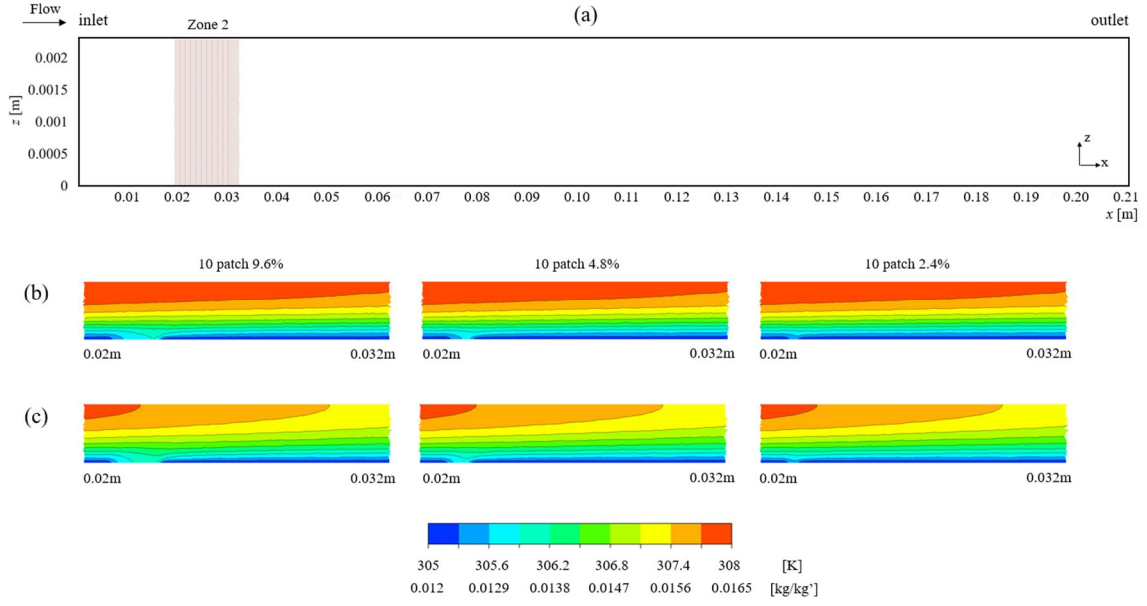


Figure 1 (a) Location of x-z plane of airflow channel model where the profiles were checked. normalized profiles of (b) the sensible heat and (c) the latent heat at  $x = 0.021 \text{ m} \sim 0.029 \text{ m}$ . (10 patch condition results)

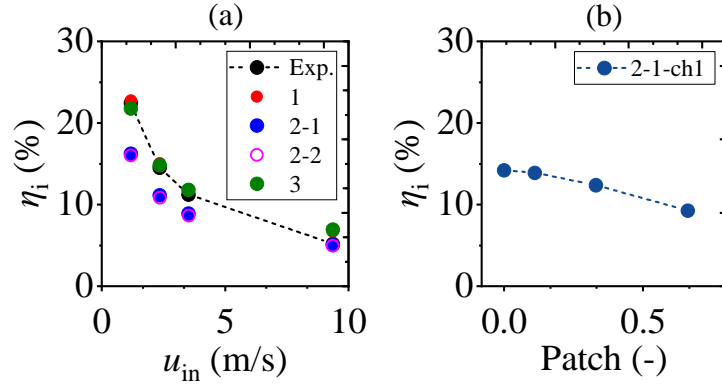


Figure 2: Enthalpy exchange efficiency  $\eta_i$  under (a) the different flow velocities, and (b) the adiabatic patch ratio

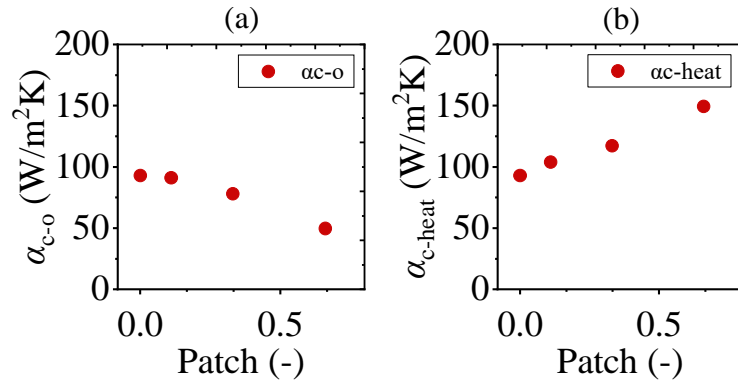


Figure 3: Convective heat transfer coefficient (a) for the whole area  $\alpha_{c-o}$ , and (b) for the heat exchange area  $\alpha_{c-heat}$  for model 2-1-ch1 ( $\alpha_{c-o} = \alpha_{c-heat}(1-\text{Patch})$ )

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1 . 発表者名 Juyeon Chung, Hajime Sotokawa, Sung-Jung Yoo, Kazuhide Ito
2 . 発表標題 Performance Evaluation of Heat Exchange Element by Numerical Model
3 . 学会等名 Indoor Air ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6 . 研究組織

	氏名 ( ローマ字氏名 ) ( 研究者番号 )	所属研究機関・部局・職 ( 機関番号 )	備考
--	-------------------------------	-------------------------	----

7 . 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------