

Numerical Modeling of Hygrothermal : Chemical Transfer in Human Indoor Environment System

姜, 裕珍

<https://hdl.handle.net/2324/4110542>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : KANG Yujin

Name

論 文 名 : Numerical Modeling of Hygrothermal – Chemical Transfer in Human Indoor Environment System

(人間-室内環境系における熱・水分・化学物質輸送に関する数値解析モデル)

Title

区 分 : 甲

Category

論 文 内 容 の 要 旨

Thesis Summary

先進諸国の人々は生活時間の過半を室内環境中で過ごすこととされ、衛生、健康、快適性などの視点で室内空気質 (Indoor Air Quality, IAQ) が居住者に与える影響が懸念されている。特に室内空気中に存在する各種汚染物質が居住者の健康に与える影響は、定常呼吸と長時間の曝露時間(滞在時間)を鑑みれば、非常に重要な公衆衛生学観点での課題である。その一方、室内環境中の汚染物質濃度分布は非線形の流体現象に支配されるため、一般に非常に不均一性の強い。この問題への対処として、これまで計算流体力学 CFD の技術を基盤とした室内化学物質濃度分布予測に関する各種の数値解析モデルが提案されてきた。過半は、対象とする化学物質のみに着目し、流体(空気)による移流・拡散の他、壁面との旧脱着現象、室内環境中での化学反応現象等を扱うモデルであり、その他の物理要素、たとえば熱移動や水分移動と化学物質が同時に輸送される場合の現象に関する議論は非常に希であった。

このような背景のもと、本研究では、人間-室内環境系における熱・水分・化学物質輸送に関する数値解析モデルの開発に取り組む。室内には多様な化学物質が存在するが、本研究では室内環境中に存在する代表的な化学物質としてホルムアルデヒドに着目する。本研究で対象とするホルムアルデヒドは、国際がん研究機関 (International Agency for Research on Cancer; IARC) において発がん性物質として分類されており、世界保健機関 (World Health Organization; WHO) は室内のホルムアルデヒドの平均濃度に関して 0.1 mg/m^3 の室内濃度指針値を示している。一般環境中でのホルムアルデヒド放散源は主に建材や木製什器でありことから、居住者の健康影響評価のためには、建材からのホルムアルデヒド放散、室内環境中での移流・拡散、着衣面を含む人体各部位への吸着と曝露のメカニズムを詳細に予測する必要がある。

本研究は、以下に示す5章構成となっており、各章の内容を以下に要約する。

第1章では、序論として、研究背景と研究目的と整理している。特に、室内環境中に存在する化学物質を対象とした濃度分布予測のための数値解析モデルを、放散源モデルと移流・拡散モデルに分けて論じた上で、本研究で着目するホルムアルデヒドに関し、計算流体力学 CFD を用いた数値解析手法を中心に、①建材のホルムアルデヒド放散メカニズム及び水分を考慮した3成分系拡散係数モデル開発の必要性、②熱輸送・乱流拡散を再現した室内空間でのホルムアルデヒドの濃度分布予測モデルの必要性、③精緻な曝露濃度予測のためには、衣服を再現した数値人体モデル (Computer Simulated Person) を適用した解析が必要であり、特に衣服へのホルムアルデヒド吸着と拡散予測が人体経皮曝露評価に重要となること、を簡潔に整理した上で、本研究の重要性、必要性を明確にしている。

第2章では、建築材料からのホルムアルデヒド放散現象に関し、建材表面からホルムアルデヒド放散が建材内部の拡散速度で律速される内部拡散支配型放散と、空気側の輸送抵抗のみで放散フラックスが決定する蒸散支配型放散のメカニズムを概説した上で、室内環境中でのホルムアルデヒド放散メカニズムを、気中のホルムアルデヒド・水蒸気・乾燥空気の混合気体と仮定し、モル分率に応じた3成分系混合系の拡散係数を用いることで非定常濃度分布を解析するための基礎方程式系を整理している。加えて、親水性のホルムアルデヒドが室内環境中に存在する水を吸着剤として捕集されることから、液相でのホルムアルデヒドの分子拡散係数算定方に関しても整理している。

蒸散支配型建材と内部拡散支配型建材による室内ホルムアルデヒド濃度分布形成の相違を議論するため、第3章では、JISで規定されたホルムアルデヒド放散量測定法であるデシケーター法に着目し、放散フラックスを調整した合板を対象とした基礎実験を行うと共に、JISデシケーター法を厳密に再現した数値解析を実施することで、密閉系デシケーター内に形成されるホルムアルデヒド濃度分布、吸着剤である水中への吸着・拡散現象を詳細に解析した結果を整理している。デシケーター内部の幾何形状がホルムアルデヒド拡散と分子拡散に及ぼす影響を評価するため、5種類のデシケーター幾何形状を対象として数値解析モデルを作成し、特に、蒸散支配型の建材の場合に等価拡散距離 L_d がアルデヒド放散量測定結果に支配的な影響を与えることを確認している。本解析では、等温・等圧の条件で吸着剤である水から蒸散する水蒸気を考慮した3成分混合系の分子拡散係数を非定常で算定し、ホルムアルデヒド拡散を数値解析している。

前節で議論したデシケーターモデルは密閉系であり移流の無い分子拡散のみの拡散場であり、一般的な室内環境とは大きく異なる条件である。室内空間でのホルムアルデヒド濃度分布を評価するためには、室内での移流・拡散他、温度分布・湿度分布等を再現した総合的な数値解析モデルの構築が必要となる。第4章では、非定常人体熱モデルであるFangerの1-nodeモデルを実装した数値人体モデル(CSP)に着衣モデルを再現し、室内ならびに着衣内での熱・水分・ホルムアルデヒドの3成分混合系の非定常濃度分布解析手法を整理し、解析結果を報告している。本研究では、人体着衣を正確に再現するため、実験用サーマルマネキン衣服を着せた条件で全身詳細幾何形状を3次元レーザー計測し、デジタルモデルを作成している。

第5章では、本論文全体で得られた結果を総括し、学術的・工学的な貢献に関して言及すると共に、今後の課題を整理している。