

室内環境を対象とした化学物質リスクアセスメント 手法の高精度化に向けた数値解析技術の開発研究

牟田, 諒太

<https://hdl.handle.net/2324/5068290>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :



博士学位論文

室内環境を対象とした化学物質リスクアセスメント
手法の高精度化に向けた数値解析技術の開発研究

2022 年 6 月

九州大学大学院
総合理工学府

牟田 諒太

目次

第1章 序章

1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往研究	5
1.2.1 ドラフトチャンバーに関する既往研究（第3章・第4章）	5
1.2.2 MFA-CFD-CSP 解析に関する既往研究（第5章）	5
1.2.3 閉鎖型チャンバー内における VHP 除染に関する既往研究（第6章）	6
[参考文献]	7

第2章 数値解析概要

2.1 序	9
2.2 流れ場の数値解析	9
2.2.1 流体シミュレーションの基礎方程式	9
2.2.2 方程式系の無次元化	10
2.2.3 方程式系の平均化	11
2.2.4 アンサンブル平均による方程式系の平均化	11
2.3 乱流モデル	12
2.3.1 低 Reynolds 数型 $k-\varepsilon$ 型モデル	12
2.3.2 SST $k-\omega$ モデル	13
2.4 Passive scalar 輸送方程式	14
2.5 数値人体モデル（Computer Simulated Person）・数値気道モデルの概要	15
[参考文献]	16

第3章 実使用条件を想定したドラフトチャンバーの捕集性能評価

—不適切使用条件を想定した排気風量低下時のドラフトチャンバーの捕集性能評価—

3.1 序	18
3.2 解析モデル	18
3.3 数値解析概要	20
3.4 数値解析結果	22
3.4.1 ドラフトチャンバー周辺における気流分布	22
3.4.2 ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）における気流分布	23
3.4.3 無次元汚染物質濃度分布	24
3.5 極端な不適切使用を想定した解析	25
3.5.1 極端な不適切使用条件での無次元汚染物質濃度分布	26

3.5.2 極端な不適切使用条件での局所排気性能評価	27
3.6 考察	27
3.7 結語	28
[参考文献]	29
[本章に関連した研究業績]	29
 第4章 実使用条件を想定したドラフトチャンバーの捕集性能評価 —ドラフトチャンバー内に形成される換気効率分布の詳細解析—	
4.1 序	30
4.2 換気効率指標	30
4.2.1 Net Escape Velocity (NEV)	30
4.2.2 Age of Air(SVE3)	32
4.2.3 Local Purging Flow Rate(L-PFR)	32
4.3 解析モデル	33
4.4 数値解析概要	34
4.5 数値解析結果	35
4.5.1 ドラフトチャンバー周辺における気流分布	35
4.5.2 ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）における気流分布	38
4.5.3 無次元汚染物質濃度分布	38
4.5.4 Net Escape Velocity 分布	41
4.5.5 L-PFR 解析結果	44
4.6 考察	46
4.6.1 ドラフトチャンバーと CSP の距離がドラフトチャンバー捕集性能に与える影響	46
4.6.2 ドラフトチャンバー内部の熱源がドラフトチャンバー捕集性能に与える影響	48
4.7 結語	52
[参考文献]	53
[本章に関連した研究業績]	54
 第5章 マテリアルフロー分析と数値流体力学を併用した DEHP 個人曝露量予測	
5.1 序	55
5.2 DEHP について	55
5.3 本研究で検討するフレームワーク	56
5.4 研究手法	56
5.4.1 マテリアルフロー分析（MFA）	56
5.4.1.1 DEHP 出荷量	57
5.4.1.2 DEHP 出荷量用途比率	58

5.4.1.3 DEHP 含有製品別のストック量と廃棄量の推計	60
5.4.1.4 寿命関数	61
5.4.1.5 DEHP 含有製品再生処理	62
5.4.1.6 換算係数	64
5.4.2 マイクロチャンバー放散実験	65
5.4.2.1 測定サンプル	66
5.4.2.2 分析方法	67
5.4.3 DEHP 個人曝露量予測	67
5.4.3.1 数値解析概要	67
5.4.3.2 数値人体モデル CSP と数値気道モデルを用いた曝露解析	69
5.5 解析結果	70
5.5.1 マテリアルフロー分析結果	70
5.5.1.1 再生処理を考慮した出荷量	70
5.5.1.2 最終製品使用段階ストック量（質量ベース）	70
5.5.1.3 最終製品使用段階屋内ストック量（面積ベース）	71
5.5.2 マイクロチャンバー放散実験結果	74
5.5.3 DEHP 個人曝露量予測結果	83
5.6 考察	87
5.6.1 MFA 結果の CFD 境界条件への適用妥当性	87
5.6.2 DEHP 曝露量予測精度	88
5.7 結語	89
[参考文献]	90
[本章に関連した研究業績]	92
第 6 章 過酸化水素を用いた N95 マスク再利用に向けた除染方法の検討	
6.1 序	93
6.2 過酸化水素の数値解析モデル	94
6.2.1 輸送方程式と一次減衰モデル	94
6.2.2 壁面に対する VHP 吸着分解フラックス	94
6.3 解析モデル	95
6.3.1 海上輸送用コンテナモデル	95
6.3.2 マスク設置棚のモデル化	97
6.3.3 VHP 発生装置のモデル化	97
6.4 数値解析条件	97
6.5 数値解析結果	99
6.5.1 コンテナ内流れ場解析結果	99

6.5.2 コンテナ内濃度解析結果	101
6.5.3 コンテナ内 VHP 濃度の時間変化	104
6.6 考察	106
6.7 結語	107
[参考文献]	108
[本章に関連した研究業績]	109

第 7 章 総括

謝辞

第1章 序章

1.1 研究の背景と目的

現代社会において、我々の身の回りには様々な化学物質が存在する。化学物質は、利便性をもたらす一方で、不適切な管理により人体健康影響や環境汚染をもたらす可能性を有している。そのため、化学物質の適切な管理や、使用前の事前評価（リスクアセスメント）が非常に重要になる。日本では2012年以降、印刷会社で洗浄剤として使用されていた1,2-ジクロロプロパンが原因で作業者が胆管癌にかかる事例が多数報告されている。この事例を受けて世界保健機関の国際がん研究機関(IARC)は原因物質の1,2-ジクロロプロパンを発がん性がある「グループ1」と認定し、法規制が進んだ。日本においても、特定化学物質障害予防規則（特化則）の措置対象物質に追加された。これを契機として2016年には、労働安全衛生法が改正され安全データシート(SDS)交付義務対象物質674物質（2021.1.1現在）について、業種・事業規模に関わらず、リスクアセスメントが義務付けられた。九州大学総合理工学研究院においても化学物質リスクアセスメントは毎年講習会が開催され、実験前に使用する化学物質については基本的に全てリスクアセスメントを実施することが徹底されている。

現在の化学物質リスクアセスメントの考え方は、規則による個別的措置義務を中心とした規制となっている。つまり、危険有害性の高いとされる化学物質は特化則などの規則において規制するというものである。使用者側は、これまで使用していた化学物質が規則に追加された場合、危険有害性情報の少ない規制対象外の代替物質を十分なリスクアセスメントを行わずに使用し、その結果、代替化学物質の曝露により健康影響が生じてしまう事例が繰り返し起きており、化学物質リスクアセスメントにおける大きな課題とされている。2021年7月、厚生労働省が公表した「職場における化学物質等の管理のあり方に関する検討会報告書」では、これらの課題を改善するために、これまでの法規制による化学物質個別の具体的な規制から、化学物質使用者側への自律的な管理を基準とする規制への移行を示している¹⁾。国は、化学物質管理のための有害性に関する情報の伝達の仕組みを整備・拡充に重点を置く代わりに、使用者はその情報を基にリスクアセスメントを実施し曝露防止のための措置を自ら選択して実行することを原則とするということである。つまり、今後、化学物質使用側は、リスクアセスメント実施と実施結果を基にした曝露低減措置の検討をより積極的に行う必要が高まってきていることを示している。

また、WHOが2016年に出版した「Preventing disease through healthy environments : a global assessment of the burden of disease from environmental risks」によれば、2012年における調査で、全世界全死亡数の23%は環境に起因しているとされている¹⁻²⁾。ここでの環境要因には、化学物質による空気汚染や、住宅、職場を含む建築環境、化学的リスクを含む職業リスクと労働条件などが含まれている。これら環境要因は合理的に改善できるものであるとされているため、環境要因を改善することが死亡率を減少させる手段になり得る。持続可能な開発目標(SDGs)においても、ゴール3「すべての人に健康と福祉を」、ゴール6「安全な水とトイ

レを世界中に」、ゴール12「つくる責任つかう責任」で化学物質に関連した目標が定められている。具体的なターゲットとして、有害化学物質、大気汚染による死亡件数の大幅な減少や、人の健康や環境への悪影響を最小化するため、化学物質や廃棄物の大気等への放出を大幅に削減すること等が記されている。

これら、化学物質リスクアセスメントや化学物質管理は、化学物質曝露によるリスクを低減するために行うものである。一般的に、化学物質が持つ有害性のことをハザード、その有害性が発現される可能性をリスクと表現する。リスクは次のように定義できる。

$$\text{リスク} = \text{有害性（ハザード）} \times \text{曝露量}$$

例えば、有害性が非常に高い化学物質を使用した場合でも、絶対に漏洩しない環境（曝露量ゼロ）ではリスクはゼロとなる。つまり、化学物質使用者側では、リスク低減のために、適切な化学物質管理とリスクアセスメントにより曝露量低減のための措置をとることでリスクを低減することが可能になる。そのために様々な環境や使用過程に応じた化学物質曝露量予測を行い、曝露防止のための対策を検討していく重要性は高い。

化学物質によるリスク低減対策を検討する際に、対象とする環境における化学物質濃度予測が不可欠になる。しかし、実環境で化学物質を用いた実験による濃度測定や、被験者を用いた曝露測定実験は、時間や費用、倫理的観点からも不可能であると考えられる。一方で、数値流体力学 Computational Fluid Dynamics(CFD)と数値人体モデル Computer Simulated Person(CSP)を用いた解析は室内環境における化学物質濃度場解析や人体への健康影響予測をする際に非常に有効な解析手法の一つである。

そこで、本研究では、3つの異なる室内環境に着目し、各室内環境における化学物質曝露低減のためのリスクアセスメント手法の開発・知見を数値解析により得ることを目的とする。

1つ目の室内環境は、職場における建築環境として大学の実験室に着目する。大学の研究室では数多くの化学物質が使用・管理されている。国立大学は平成16年4月に法人化され、労働安全衛生法の適用となり、化学物質のより確実な管理が求められるようになった。一般的な産業分野では多量少数な化学物質が使用されるため、一度化学物質リスクアセスメントを実施すれば対策を容易にとれるのに対し、大学では少量多数な化学物質が使用されるため、化学物質リスクアセスメントも容易ではない。大学の研究室では、特化則や有機溶剤中毒予防規則（有機則）により規制されている化学物質の使用も多く、リスクアセスメントにより危険性を確認しリスク低減のための措置をとる必要がある。リスク低減措置には、使用する化学物質の変更、保護具の使用、設備の工学的対策等があげられる。化学物質を取り扱う研究室には、リスク低減のために局所排気装置としてドラフトチャンバーが設置されている。ドラフトチャンバーの適切な使用は、有害化学物質発生源の制御により人体曝露を防ぐ非常に重要な装置である。化学物質使用者側が適切なリスクアセスメントを行うためには、ドラフトチャンバー捕集性能に関する定量的なデータの蓄積・使用者側への公表が重要となる。

2つ目の室内環境として、標準的な日本の住宅に着目する。一般住宅においても様々な化学物質による室内空気質汚染が懸念されている。厚生労働省は、現時点で入手可能な毒性にかかわる科学的知見から、ヒトがその濃度の空気を一生涯にわたって摂取しても健康への有害な影響は受けないであろうと判断される値として室内濃度指針値を13種の揮発性有機化合物に対して設けている。これら化学物質の曝露評価を行うためには、室内環境中における化学物質輸送現象の解明と濃度場解析により室内濃度や人の経気道曝露濃度予測が不可欠になる。一般的には、調査対象の住宅を選択し、実測調査により取得した濃度をベースとして間接的に曝露評価を行う。しかし、現地での実測調査は、日本国内すべての室内濃度を経年的に測定することや将来予測などは現実的に不可能である。実測調査のみに基づかず、平均的な一般住宅環境での化学物質濃度を予測する手法の構築が、住宅環境における化学物質曝露予測技術開発や健康的な室内環境設計において重要な課題となる。

3つ目の室内環境として閉鎖型チャンバーに着目する。医療分野ではウイルス等の微生物を指定された菌数レベルまで減少させる除染が行われる。その際に、除染対象によっては閉鎖された空間内で除染剤をガス状で噴霧するケースも考えられる。除染剤には、ホルムアルデヒド、オゾンガス、過酸化水素ガスなどの使用例がある。本研究では特に過酸化水素蒸気(Vaporized Hydrogen Peroxide: VHP)に着目する。2019年に発生が確認された新型コロナウイルスによる感染症(COVID19)は、世界的に非常に深刻な公衆衛生問題を引き起こしているが、医療現場では、感染症対策に必須となる医療用マスクや防護服等の医療物資が深刻な品不足となった。そのような状況の中、海上用輸送コンテナを閉鎖型チャンバーとしVHPを除染剤とした大規模なN95マスクの除染が検討された。VHPは、急性毒性や皮膚刺激性を有しているため、効率的かつ安全な使用に向けたマニュアル作成が、適切な化学物質管理や除染作業者が閉鎖型チャンバーへ入出した際の除染剤曝露量低減のために必要となる。

本研究ではCFD解析をベースに対象とする室内環境や人体周辺の流れ場や温度場計算により各輸送現象を正確に予測する必要がある。第2章で、本研究で実施する数値解析に使用する流れ場の基礎方程式や乱流モデル、スカラ輸送方程式の支配方程式について解説する。また、個人曝露量評価のための数値人体モデルと数値気道モデルの概要について整理する。

第3章では、大学の実験室環境に着目した数値解析を実施する。九州大学総合理工学研究院に存在する実在実験室空間と空調設備、ドラフトチャンバーを工学的な数値流体解析に必要な十分な精度で再現した解析モデルを作成し、ドラフトチャンバー内部の基本的な流れ場と汚染物質輸送現象について解析し、ドラフトチャンバーの局所排気性能に影響を与える要因を定量的に解析した結果を整理する。また不適切な使用条件におけるドラフトチャンバーの局所排気性能について議論する。

第4章では、第3章により得られたドラフトチャンバーの局所排気性能に与える要因を

もとに、より詳細な局所排気性能評価を実施する。具体的には、ドラフトチャンバー周辺環境のみを再現した解析モデルを作成し、作業者の作業姿勢を考慮した際の局所排気性能を定量的に解析する。換気効率指標3種(Age of Air, Net Escape Velocity, Local-Purging Flow Rate)を使用し、ドラフトチャンバー内部、作業開口面における汚染物質の輸送メカニズムを詳細に評価した結果を整理する。

第5章では、一般住宅環境に着目し、実測調査のみに基づかない化学物質による人体曝露を評価するための新たなフレームワークの構築を行う。具体的には、評価対象をフタル酸ジ(2-エチルヘキシル)(DEHP)とし、統計データから経年的な蓄積量を、巨視的な視点から評価することが可能な Material Flow Analysis(MFA)と、室内環境における人体曝露を微視的に定量評価することが可能な Computational Fluid Dynamics(CFD)-Computer Simulated Person(CSP)の連成解析を統合した新たなフレームワーク(MFA-CFD-CSP 解析)の使用可能性について例証的に検討した結果を整理する。

第6章では、閉鎖型チャンバーに着目し、閉鎖型チャンバー内において除染剤 VHP を放出することで、VHP による除染効果の数値予測を行うと同時に、除染作業者がチャンバー内に入出した際の除染剤曝露低減のために、VHP を非定常に放出した際のチャンバー内の VHP 濃度変化予測を行う。チャンバー内での VHP 輸送現象は、移流・拡散と気中での自己減衰の他に、固体表面に対する吸着現象までを再現し、素材に対する VHP の反応確率(Reaction Probability)による除染効率の差を検討した結果を整理する。

第7章では、本博士論文で得られた知見を総括し、研究結果に基づいた今後の課題について整理する。

1.2 既往研究

1.2.1 ドラフトチャンバーに関する既往研究（第3章・第4章）

Ahn らは 1966 年~2016 年に公表されたドラフトチャンバーに関する 43 の研究結果のレビューを行い、ヒュームフードの性能に影響を与える要因を調査した¹⁻³⁾。その結果、多くの研究ではドラフトチャンバー開口面風速測定のみに着目していることを明らかにした。開口面風速が極端に低いケースや高いケース以外は、他の要因がドラフトチャンバーの性能を決定するうえで重要であると述べている。そのため、ドラフトチャンバーの捕集性能評価は、開口面風速測定のみでは不十分であり、実際にドラフトチャンバー前面に作業者を配置した条件での総合的な評価の必要性を述べている。Thomas C.Smith らは、形状や配置場所の異なる実験室ドラフトチャンバー365 台を対象にした性能評価テストを実施した¹⁻⁴⁾。試験は気流可視化実験・開口面風速測定・トレーサガス実験の3つであり、その結果、開口面風速測定のみ合格は51%であったが、全てのテストに合格したのは29%に留まったことから、開口面風速測定のための性能評価は信頼性の低いものであると指摘している。Teseng らは、サッシの開閉やドラフトチャンバー周辺での人の動きが捕集性能に与える影響を気流可視化試験とトレーサガス試験により評価している¹⁻⁵⁾。ドラフトチャンバー開口面における気流の乱れが汚染物質漏洩の一因になる可能性が高いと述べている。Nicholson らは、標準的なドラフトチャンバー内の気流性状について、気流可視化試験とCFD解析を比較することで、ドラフトチャンバー評価ツールとしてCFD解析が有効であることを示している¹⁻⁶⁾。そのうえで、CFD解析より、ドラフトチャンバー内部のbaffle plateがドラフトチャンバー内部の効率的な気流形成に大きく影響を与える重要な構造部分であることを示している。Liu らは、ドラフトチャンバー封じ込め性能を評価するためにCFD解析を実施した¹⁻⁷⁾。ドラフトチャンバー前面に人体が配置し、人体表面温度を31℃に固定し、ドラフトチャンバー開口面風速を0.3~0.9m/sに変化させる数値解析を行った。その結果、開口面風速が0.4m/s以下の場合、人体発熱による熱プルームにより開口面に影響を与えることを示した。また、この熱プルームが人体の顎と胸の間に滞留域を形成し、漏洩した汚染物質が滞留する危険性を指摘している。これまでの既往研究では、ドラフトチャンバー前面の人体を考慮した解析が少なく、人体が存在するケースでも作業姿勢の変化までを考慮した解析は存在しない。また、複数の換気効率（Age of air, Net escape velocity, Local purging flow rate）を用い、総合的にドラフトチャンバー開口面や内部の汚染物質輸送メカニズムを解析するまでは至っていない。このような背景のもと、ドラフトチャンバー周辺環境における汚染物質輸送メカニズムの詳細な解析は、ドラフトチャンバー設計側のみならず使用者側へ新たな知見を提供することが可能になるため、労働安全衛生分野におけるリスクアセスメントに関する知見としての必要性は高いと考えられる。

1.2.2 MFA-CFD-CSP 解析に関する既往研究（第5章）

統計データから化学物質の蓄積量を巨視的に評価するMFAと、室内環境における人体曝

露を微視的に評価する CFD-CSP 解析を統合させることで、一般的な住宅環境のような室内環境中での個人曝露量を推計している例はこれまでに存在しない。

本研究の評価対象である DEHP の MFA は、2005 年に産業技術総合研究所（以下、産総研）が実施しており詳細リスク評価書として公表している¹⁻⁸⁾。また、小山田らは産総研の MFA 結果をベースとし、塩ビ製品使用段階からの DEHP 大気排出量の推計を実施した¹⁻⁹⁾。主に屋外大気中への排出量の推計を行っており、DEHP 含有製品の内、農業用ビニルによる寄与率が大きいと報告しているが、ヒト健康リスク評価までは至っておらず、室内環境中への排出量推計も詳細に行われていない。また、Muchangos らは、日本における DEHP 含有製品の MFA を実施した¹⁻¹⁰⁾。MFA の流入データとなる出荷量は、1992 年~2003 年までの統計データを使用し、それ前後の年は指数関数的な成長に基づくと仮定して推計している。MFA 結果を用いて、DEHP による健康リスクと環境リスクを 1,4-dichlorobenzene 当量と障害調整生命年（DALY）を用いたライフサイクル影響評価（LCIA）で評価している。LCIA は MFA 結果を特定の環境カテゴリーや指標に変換することで潜在的な影響の大きさを広域的に評価できる手法である。

本研究の評価対象物質である DEHP を含む準揮発性有機化合物（SVOCs）は蒸気圧が低く、ハウスダストへの吸着性が高い特徴がある。Wescheler と Nazaroff は室内環境における SVOC のガス態-粒子態間の分配動態モデルをまとめている。また、経皮曝露による SVOC 室内曝露を推定するためのモデルを開発し、粒子や粉塵が経皮曝露に与える影響を明らかにした^{1-11),1-12)}。Shi と Zhao らは、空気中 SVOC の曝露経路を吸入及び経皮曝露とし曝露評価モデルを確立している¹⁻¹³⁾。しかし、室内空気汚染に関する課題である SVOC による健康リスクを包括的に理解するためには、SVOC 含有製品の製造プロセスを理解し、その後、室内環境で使用される際に排出される濃度推定が最も重要な要素となる。一般的には、現場実測は精度が高く、他の手法では精度が低いとされるが現地実測は制約が多い。そのため、現場実測を必要としない室内濃度予測手法を開発し、室内空気汚染による健康リスクを定量的に評価する手法の構築が必要になる。

1.2.3 閉鎖型チャンバー内における VHP 除染に関する既往研究（第6章）

本研究は、一般的な海上輸送コンテナを N95 マスク除染用の閉鎖型チャンバーとして利用することを想定する。室内空間スケールを対象とした VHP の空間濃度分布解析に関する既往研究は非常に限定的である。伊藤らは VHP による室内除染効率評価のための数値計算法の開発を行った^{1-14),1-15),1-16)}。Chen らは旅客機客室を対象とした解析を実施している¹⁻¹⁷⁾。CFD 解析により定常流れ場解析結果を基に VHP 輸送方程式により空気中濃度予測を行ったが、VHP の自己減衰モデルのみ組み込まれており、壁面吸着分解を含めたその他の減少のモデル化には至っていない。本研究では、VHP の自己減衰モデルの他、吸着分解モデルも再現しており、室内環境スケールにおける VHP 濃度分布解析の応用解析事例として新規性がある。また、COVID19 が世界的に深刻な公衆衛生問題を引き起こしている現在において、

N95 マスクの大規模除染方法に関するガイドライン作成のための情報蓄積を行うことは、社会的意義が高いと考えられる。

[参考文献]

- 1-1) 職場における化学物質等の管理のあり方に関する検討会報告書～化学物質への理解を高め自律的な管理を基本とする仕組みへ～, 厚生労働省労働基準局安全衛生部, 2021.7.
<https://www.mhlw.go.jp/content/11303000/000807679.pdf> (assessed 2 December 2021)
- 1-2) Preventing disease through healthy environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks: WHO, Air quality and health, Environment, Climate Change and Health, ISBN: 9789241565196
- 1-3) K Ahn, S Woskie, L Diberardinis and M Ellenbecker. A review of published quantitative experimental studies on factors affecting laboratory fume hood performance. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2008; 5 (11): 735-753
- 1-4) TC Smith and SM Crooks. Implementing a laboratory ventilation management program: this tool can help you meet regulatory and consensus standards while ensuring adequate protection of laboratory personnel. *Chemical Health & Safety* 1996; 12-16
- 1-5) L Tseng, R Huang, C Chen and C Chang. Effect of sash movement and walk-bys on aerodynamics and contaminant leakage of laboratory fume cupboards. *Industrial Health* 2007; 45: 199-208
- 1-6) GP Nicholson, RP Clark and ML Calcina-goff. Computational fluid dynamics as a method for assessing fume cupboard performance. *British Occupational Hygiene Society* 2000; Vol.44, No.3: 203-217
- 1-7) D Liu, C Meng, J Chen and L Li. The effect of the thermal plume generated by body heat dissipation on the containment of fume hood. *Indoor and Built Environment* 2020; 0 (0): 1-11
- 1-8) 産業技術総合研究所:詳細リスク評価書 フタル酸ジ (2-エチルヘキシル) ,2005
- 1-9) 小山田 花子, 手口 直美, 内藤 航, 吉田 喜久雄:軟質塩ビ製品使用段階からのフタル酸ジ(2-エチルヘキシル)の大気排出量推定,環境科学会誌,18(6),583-593,2005
- 1-10) Dos Muchangos L, Xue M, Zhou L, Kojima N, Machimura T, and Tokai A. Flows, stocks, and emissions of DEHP products in Japan. *Science of the Total Environment* 2019; 650: 1007–1018.
- 1-11) Weschler CJ, and Nazaroff WW. SVOC partitioning between the gas phase and settled dust indoors. *Atmospheric Environment* 2010; 44: 3609–3620.
- 1-12) Weschler CJ, and Nazaroff WW. SVOC exposure indoors: fresh look at dermal pathways. *Indoor Air* 2012; 22: 356–377.
- 1-13) Shi S, and Zhao B. Modeled exposure assessment via inhalation and dermal pathways to airborne semi-volatile organic compounds (SVOCs) in residences. *Environmental Science and Technology* 2014; 48: 5691–5699.
- 1-14) 田中郁生, 辻勇, 洞田浩文, 伊藤一秀:壁面吸着分解モデルとモデルパラメータ同定 過

酸化水素 H_2O_2 の室内濃度分布予測と除染効果のモデル化 第 1 報, 日本建築学会環境系論文集, 2014.8,79 巻,702 号,671-680

- 1-15) 辻勇, 洞田浩文, 伊藤一秀:居室スケール実験室内の H_2O_2 濃度分布測定と CFD による濃度分布予測 過酸化水素 H_2O_2 の室内濃度分布予測と除染効果のモデル化 第 2 報, 日本建築学会環境系論文集, 2015.9,80 巻,715 号,767-774
- 1-16) K Ito, SJ Yoo, and H,Horata. Identification of model parameters of vaporized hydrogen peroxide decomposition flux on building materials for computational fluid dynamics. Journal of Environmental Protection 2016, 7: 212-229
- 1-17) Chen X and Chen Q. Comparison of different decontaminant delivery for sterilizing unoccupied airliner cabins. Building and Environment, 45, 2010, 2027-2034

第2章 数値解析概要

2.1 序

本研究では、室内環境に形成される不均一な流れ場及び汚染物質濃度場を正確に予測することで、ドラフトチャンバーの局所排気性能評価や各室内環境における人体への化学物質曝露評価を行う必要がある。本研究では、正確な数値予測のために商用 CFD ソフトである ANSYS FLUENT を使用する²⁻¹⁾。本章では、流れ場や汚染物質濃度場を計算するために必要とされる流体基礎方程式及び汚染物質を Passive scalar と仮定したスカラ量輸送方程式に関して整理する。

2.2 流れ場の数値解析

2.2.1 流体シミュレーションの基礎方程式

非圧縮性の流体现象は(2-1)式に示す連続の式と(2-2)式に示す Navier-Stokes 方程式により定義される。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad \cdots \cdots (2-1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - g_i \beta \theta \quad \cdots \cdots (2-2)$$

ここで、 U_i は瞬時風速の各成分、 P は圧力、 ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数、 θ は温度（もしくは絶対零度との温度差）、 g_i は重力加速度ベクトルの各成分、 β は膨張率を示す。(2-1)式の連続の式は質量保存則（非圧縮性流体の場合は、密度変化を無視するために(2-1)式に示すように体積保存則となる）により導かれる。(2-2)式の Navier-Stokes 方程式は運動量保存則を表すが、この式は Newton の第2法則に基づき導かれ、浮力の効果を考慮している。

非等温流れ場においては、温度場は、(2-3)式に示す熱エネルギー輸送方程式により定義される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial U_j \theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_j} + S \quad \cdots \cdots (2-3)$$

ここで、 α は温度拡散係数（ $=\lambda/C_p \rho$ ）、 S は発生項（熱源）である。この熱エネルギー輸送方程式はエネルギーの保存則を示しており、Fourier の法則に基づき導かれる。

また、(2-3)式で示した熱エネルギー輸送方程式と同様に、湿気、汚染物質等のスカラ量は(2-4)式で示す輸送方程式によりその輸送現象を定義することができる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial U_j \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} D \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + S' \quad \cdots \cdots (2-4)$$

ここで、 ϕ は汚染物質等のスカラー量、 D は対象物質の拡散係数である。(2-1)式～(2-4)式を連成させて解析することで、非圧縮性流体と流体内のスカラー輸送現象を把握することができる。(2-1)式～(2-4)式は、計算負荷削減などから以下に示す無次元化や平均化をおこなった上で解かれる。

2.2.2 方程式系の無次元化

(2-1)式～(2-4)式に示した方程式系の無次元化を行う。(2-2)式に示した Navier-Stokes 方程式を、対象空間の代表長さ L_0 (流入境界面のサイズ等)、代表風速 U_0 (吹出風速等) を用いて無次元化すると(2-5)式となる。

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial t^*} + U_j^* \cdot \frac{\partial U_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\frac{\partial U_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial U_j^*}{\partial x_i^*} \right) - \text{Ar} \quad \dots\dots(2-5)$$

ここで、添字*は無次元量を示し、 $U_i^* = U_i/U_0$ 、 $x_i^* = x_i/L_0$ 、 $t^* = t/t_0 = t/(L_0/U_0)$ 、 $P^* = P/P_0 = P/U_0^2$ 、を示す。また、 Re 及び Ar に関しては(2-6)、(2-7)式に示されるように流れ場及び温度場の相似性を支配するパラメータとなる。

$$\text{Re} = \frac{U_0 L_0}{\nu} \quad \dots\dots(2-6)$$

$$\text{Ar} = \frac{g_i \cdot \beta \cdot \theta \cdot L_0}{U_0^2} \quad \dots\dots(2-7)$$

(2-6)式は Reynolds Number (Re 数と略記)、(2-7)式は Archimedes Number (Ar 数と略記)と呼ばれる無次元パラメータである。(2-5)式において、 Re 数と Ar 数の値が等しい場合、各流れ場において流れ性状が同一になることが予測できる。

(2-5)式より、 Re 数が増加すると拡散項(粘性項)が減少し、移流項が相対的に大きくなるため流れの不安定性が高まる。また、十分に Re 数が大きい場合、移流項に対して拡散項が相対的に無視できるほど減少するため、 Re 数に関係なく流れ場を相似と見なすことが可能となる。この Re 数を Critical Reynolds Number と呼ぶ。

(2-3)式に示した熱エネルギーの輸送方程式も同様に無次元化すると次式となる。

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} + \frac{\partial U_j^* \theta^*}{\partial x_j^*} = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{\text{Pr}} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial x_j^*} \right) + S^* \quad \dots\dots(2-8)$$

ここで、 $\theta^* = \theta/T_0$ であり、 Pr は温度拡散係数 α ($=\lambda/C_p\rho$) と分子拡散係数 ν の比を示す無次

元数で Prandtl Number (Pr 数と略記) と呼ぶ.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad \cdots(2-9)$$

同様の方法で(2-4)式に示されるスカラ量の輸送方程式も無次元化すると次式となる.

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial t^*} + \frac{\partial U_j^* \phi^*}{\partial x_j^*} = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{\text{Sc}} \cdot \frac{\partial \phi^*}{\partial x_j^*} \right) + S^* \quad \cdots(2-10)$$

ここで, $\phi^* = \phi / \phi_0$ である. Sc は物質拡散係数 D と分子拡散係数 ν の比を示す無次元数で Schmitt Number (Sc 数と略記) と呼ぶ.

$$\text{Sc} = \frac{\nu}{D} \quad \cdots(2-11)$$

(2-10)式より $\text{Re} \times \text{Sc}$ の値が同一である場合, スカラ量の分布性状は相似となる. また, (2-5)式と同様に, Re 数が十分に大きい場合, 拡散項の効果が移流項に対して相対的に小さくなるために, スカラ量の分布性状は相似となる.

2.2.3 方程式系の平均化

(2-1)式～(2-4)式に示した方程式系は全て瞬時の物理量を対象としている. この瞬時の方程式系を直接解くことが可能になれば完全な流体现象を把握することができる. しかし, (2-2)式に示す Navier-Stokes 方程式は, 移流項などの非線形項を含んでおり, 非常に複雑であるために直接計算により解を求めることは不可能である. そのため, 時間的, 空間的に連続する物理量を有限量に離散化して近似を行うことで解を求める. 各種の平均化操作が存在するが, 本研究ではアンサンブル平均(2-12)式を行った方程式を用いて流れ場解析を行う.

$$\overline{f_k(x_i, t)}_E = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_i(x, t) \right) \quad \cdots(2-12)$$

$$\overline{f(x_i)}_F = \iiint_{-\infty}^{\infty} \left(\prod_{i=1}^3 G(x_i - x'_i) \right) \cdot f(x'_i) dx'_i \quad \cdots(2-13)$$

ここで, 添字 E はアンサンブル平均, 添字 F は空間平均(Filtering)を示す.

2.2.4 アンサンブル平均による方程式系の平均化

(2-1)式～(2-3)式に示した方程式系において, 瞬時値を平均値と変動量に分離しアンサンブル平均を施すと次式を得る.

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \cdots \cdots (2-14)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \cdot \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i u_j} - g_i \beta \bar{\theta} \quad \cdots \cdots (2-15)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \alpha \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_j \theta} \quad \cdots \cdots (2-16)$$

ここで、 U_i , P , θ は平均量, u_i , θ' は変動量を示し, オーバーバーはアンサンブル平均を示す. (2-15)式の右辺 $\overline{u_i u_j}$ は Reynolds 応力であり, (2-16)式の右辺 $\overline{u_j \theta}$ は温度 Flux である.

(2-15)式は Reynolds 方程式と呼ばれ, (2-14)式～(2-16)式は Reynolds 応力と温度 Flux を除けば平均量のみで表現されるため, 平均流れ場を求めることができるが, そのためには Reynolds 応力や温度 Flux を平均流れ場から見積もるための乱流モデルを導入する必要がある.

2.3 乱流モデル

アンサンブル平均された Navier-Stokes 方程式を出発点とする乱流モデル RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)モデルのうち, 代表的な低 Reynolds 数型 $k-\varepsilon$ モデルと, 幅広い工学分野で適用されるようになっている SST $k-\omega$ モデルについて説明する.

2.3.1 低 Reynolds 数型 $k-\varepsilon$ 型モデル

標準 $k-\varepsilon$ モデルは, 乱流エネルギー k と粘性散逸率 ε に関する輸送方程式を解くが, Re 数が十分に大きく, 等方的な流れ場を対象とした乱流モデルであり, 非等方性の強い流れ場や壁面近くの粘性低層の Re 数が小さい場合には正確な解を得ることが困難になる. また, 標準 $k-\varepsilon$ モデルは壁面近傍の粘性の影響の強い領域に関しては解析対象としないことが多く, 壁面と流体側第1セルの間に壁関数を仮定し, 壁面境界条件を与える必要がある. このような問題を改善するために, 壁面近傍での低 Re 数効果まで取り扱えるように修正したモデルが低 Reynolds 数型 $k-\varepsilon$ 型モデルである²⁻²⁾. このモデルは, 渦動粘性係数 ν_t を算出する際に壁座標 $y^+ (= u_\tau y / \nu, u_\tau$ は壁面摩擦速度, y は壁面からの距離), 乱流レイノルズ数 Re_t 等をパラメータとする減衰関数 f_μ を導入している点, ε 方程式中の生産項及び消散項に関してモデル関数 f_1, f_2 を導入している点, 壁面近傍領域ではメッシュを十分に細かく分割し, no-slip 境界条件を用いる点などの改善が施され, 壁面近傍の乱流挙動, 低 Re 数効果, 乱れが減衰し疑似層流化する流れ場等の再現性に関して実績を上げている. 最も一般的な低 Re 型 $k-\varepsilon$

モデルの基礎方程式を以下に示す.

$$\nu_t = C_\mu \cdot f_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \cdots(2-17)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{U}_j}{\partial x_j} = P_k + D_k - (\bar{\varepsilon} + D) \quad \cdots(2-18)$$

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\varepsilon} \bar{U}_j}{\partial x_j} = D_\varepsilon + \frac{\bar{\varepsilon}}{k} \cdot (C_{\varepsilon 1} \cdot f_1 \cdot P_k - C_{\varepsilon 2} \cdot f_2 \cdot \bar{\varepsilon}) + E \quad \cdots(2-19)$$

$$P_k = -\overline{u_i' u_j'} \cdot \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad \cdots(2-20)$$

$$D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad \cdots(2-21)$$

$$D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} \right) \quad \cdots(2-22)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_k} \right)^2 \quad \cdots(2-23)$$

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

f_μ 及び f_1, f_2 はモデル関数を示しており, D 及び E は, $\bar{\varepsilon}$ を用いる場合の付加項である. $f_\mu = f_1 = f_2 = 0$ とし, さらに $D = E = 0, \bar{\varepsilon} = \varepsilon$ と仮定すると通常の標準型 $k-\varepsilon$ モデルとなる.

2.3.2 SST $k-\omega$ モデル

二方程式モデルの $k-\omega$ モデルは, 乱流エネルギー k 方程式と乱れの周期 ω に関する輸送方程式を解く. 代表的なモデルは次式の通りである.

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad \cdots(2-24)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{U}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k^*} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* \omega k \quad \dots\dots(2-25)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega \bar{U}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 \quad \dots\dots(2-26)$$

ここで、 $\alpha=5/9$ 、 $\beta=3/40$ 、 $\beta^*=0.09$ 、 $\sigma_k^*=2$ 、 $\sigma_\omega=2$ である。

$k-\omega$ モデルを壁近傍に適用すると、 k の壁への漸近挙動を正しく再現せず、減衰を過大に評価することが知られている。しかし、この傾向がちょうど低 Re 型 $k-\varepsilon$ モデルの渦動粘性係数を評価する際の(2-17)式に現れる減衰関数 f_μ と同様の効果があるため、低 Re 数流れへの適用にはモデル方程式に補正が不要なことが知られている。

また、逆圧力勾配のある境界層流れに適用すると、標準 $k-\varepsilon$ モデルより離れを正確に予測するが、境界層から離れた自由流れ部分では流入境界での ω の設定値に解が依存する不都合が生じる。

この問題を解決するために、Menter は壁近傍では $k-\omega$ モデルを、壁から離れた領域では $k-\varepsilon$ モデルを用いる SST $k-\omega$ モデルを提案した。SST $k-\omega$ モデルは(2-26)式を修正した次式で示される²⁻³⁾²⁻⁴⁾。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega \bar{U}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 + 2(1-F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad \dots\dots(2-27)$$

(2-27)式と(2-26)式を比較すると、右辺第4項が追加されている。この項のオンオフは関数 F_1 で調整され、 $F_1=1$ で $k-\omega$ モデル、 $F_1=0$ で $k-\varepsilon$ モデルにスイッチされるようになっている。つまり、第4項をオンとすることにより、 ε 方程式を解くのと等価な効果がある。(2-27)式がどちらのモデルになっているかにより、計算定数もそれぞれのモデルに適した値を選択する。

2.4 Passive scalar 輸送方程式

ドラフトチャンバー捕集性能評価のために、ドラフトチャンバー内部で汚染物質を発生させる。その際の、対象とする汚染物質は Passive Contaminant と仮定する。Passive Contaminant とは対象とする汚染物質は空気と全く同質のものであると仮定したものであり、即ち Sc 数が1である仮想的な物質を示す。例えば、アンサンブル平均されたスカラ量 ϕ の輸送方程式

において Prandtl 数が $\sigma=1.0$ と仮定され、乱流拡散を含む拡散係数は空気の場合と同様に $(\nu + \nu_t)$ を用いて解くことが可能であるため、室内の流れ場解析結果を得ることができれば、その流れ場の情報より、濃度分布を解析することができる。(2-4)式に示したスカラ量の輸送方程式に勾配拡散近似を行った方程式を(2-28)式に示す。

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{\phi}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(D + \frac{\nu_t}{\sigma} \right) \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \right\} + S \quad \dots\dots(2-28)$$

2.5 数値人体モデル (Computer Simulated Person) ・数値気道モデルの概要

本研究では、CFD 解析により室内環境における化学物質個人曝露量評価を行う。室内に形成される不均一な環境中における曝露量評価するための数値人体モデルの概要を図 2-1、数値気道モデルの概要を図 2-2 に示す。数値人体モデルは、伊藤らにより開発されている Computer simulated person (CSP) を使用する^{2-5)~2-7)}。数値気道モデルは、鼻腔口腔から咽頭、気管を経由して気管支第4分岐までの幾何形状を再現している^{2-8)~2-9)}。健全な成人男性を対象とした CT スキャンデータをもとに作成している。生体情報は、マルチスライス CT を用い、画像データ (DICOM データ) より、CT 値 150 にて対象箇所を抽出している。その後、医療用画像処理ソフト Mimics4.0(Materialise)を用いて、CT 画像の3次元化と STL ファイル形式での出力を行い、CAD と生体工学用ソフト 3-matic(Materialise)にて気道の表面幾何形状のスモーthing処理と流体ジオメトリの作成を実施している。最後に、流体解析用のメッシュ生成ソフト Gridgen(VINAS)にて読み込み、数値流体解析用のメッシュデータを生成している²⁻⁸⁾。数値気道モデルは、気道内壁面第一メッシュを壁座標 $y^+ < 1$ を満たすように設定した上で、テトラメッシュを用いて約 750 万メッシュで分割しておりテトラメッシュ最大要素長は 1mm 以下である。気道モデル内流れ場を対象としたメッシュ依存性の検討結果、流れ場予備解析は実施されている^{2-10)~2-11)}。

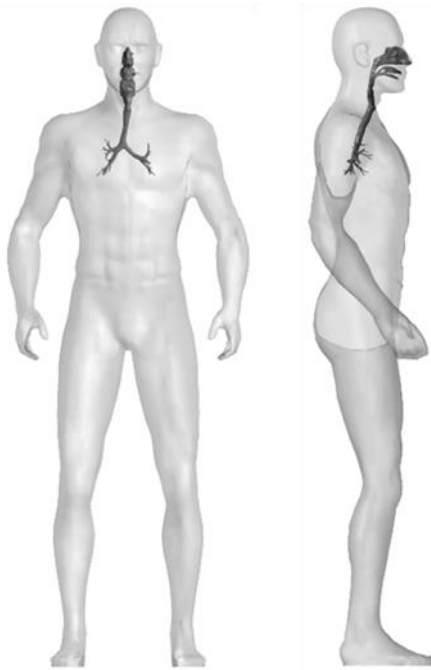


図 2-1 数値人体モデル

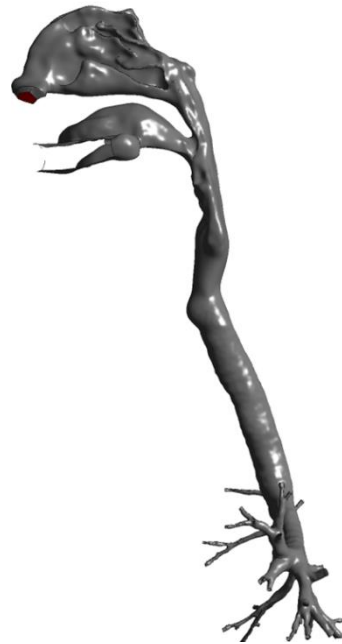


図 2-2 数値気道モデル

[参考文献]

- 2-1) ANSYS/Fluent ver.19.0, User Manual, 2018
- 2-2) Murakami S, Kato S, Chikamoto T, Laurence D, and Blay D. “New Low-ReynoldsNumber $k-\epsilon$ model including damping effect due to Buoyancy in a stratified Flow Field”. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 16, pp. 3483–3496, 1996.
- 2-3) FR Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA J 1994; 32: 1598–1605.
- 2-4) FR Menter, M Kuntz and R Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 2003; 625–632.
- 2-5) K Ito. Toward the development of an in silico human model for indoor environmental design. Proceedings of the Japan Academy- Series B 2016; 92 (7):85-203.
- 2-6) S Yoo and K Ito. Numerical Prediction of Tissue Dosimetry in Respiratory Tract using Computer Simulated Person integrated with physiologically based pharmacokinetic (PBPK)-computational fluid dynamics (CFD) Hybrid Analysis. Indoor and Built Environment 2018; 27(7): 877–888.
- 2-7) S Yoo and K Ito. Assessment of Transient Inhalation Exposure using in silico Human Model integrated with PBPK - CFD Hybrid Analysis. Sustainable Cities and Society 2018; 40: 317–325.
- 2-8) Nguyen Lu Phuong, 伊藤一秀：数値気道モデルの開発と気道内対流熱伝達・粒子拡散予測：空気調和衛生工学会論文集，No.190,pp31-39,2013.01
- 2-9) Nguyen Lu Phuong, 平瀬公太，荒巻森一朗，伊藤一秀：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,pp1-7,2014.06

- 2-10) Phuong NL, Ito K. Investigation of flow pattern in a realistic replica model of human respiratory tract using PIV. Build Environ. 2015;94:504-515.
- 2-11) Phuong NL, Yamashita M, Yoo SJ, Ito K. Prediction of convective heat transfer coefficient of human upper and lower airway surfaces in steady and unsteady breathing conditions. Build Environ. 2016;100:172-185.

第3章 実使用条件を想定したドラフトチャンバーの捕集性能評価

—不適切使用条件を想定した排気風量低下時のドラフトチャンバーの捕集性能評価—

3.1 序

実験室や工場などで特定化学物質や有機溶剤等の有害物質を取り扱う際には、作業者の安全を配慮するため、局所排気装置等の設置が義務付けられている。代表的な局所排気装置としてドラフトチャンバーが汎用的に使用されている。特定化学物質等障害予防規則ではドラフトチャンバーの基本的な性能を規定するために、開口面での制御風速が定められており、ガス状化学物質を対象とした場合の制御風速は最低風速 0.5m/s 以上、粒子状物質に対しては最低風速 1.0m/s 以上とされている。有機溶剤中毒予防規則では最低風速 0.4m/s 以上と定められている。これらの規則で規定された制御風速は局所排気装置のすべてのフードを解放した場合の開口面風速として定められており、定期的な性能確認も義務付けられている。

わが国で一般的に使用されているドラフトチャンバーには各種タイプが存在しており、給排気機能を備え付けたものから防火性能を備え付けたものまで非常に多様であるが、市場流通している汎用型のドラフトチャンバーは排気性能のみを有しており、ドラフトチャンバーに対する給気は設置された室空気を取り入れる設計が過半である。この場合、局所排気装置としてのドラフトチャンバーの捕集性能は、設置された室の環境条件に一定の影響を受けることが予想される。しかし、ドラフトチャンバーの性能試験法として、設置された室の環境条件が厳密に定められておらず、その定量的な影響に関しても十分な設計資料が整備されていない、もしくは使用者側に十分に公開されていないのが現状である。

このような背景のもと、本研究ではドラフトチャンバーが設置された実在実験室空間を数値解析モデルとして再現し、室環境要素の変化がドラフトチャンバーの捕集性能に与える影響を定量的に解析したうえで、総合的な設計資料作成のための基礎データの蓄積を行う。具体的には、九州大学総合理工学研究院に存在するドラフトチャンバーモデル、換気空調システム、作業者を再現した数値解析モデルを作成し、ドラフトチャンバー前面の数値人体モデル CSP(Computer Simulated Person)の有無、ドラフトチャンバーの排気風量、実験室の換気条件がドラフトチャンバーの局所排気性能、汚染物質の捕集効率に与える影響を定量的に解析する。

3.2 解析モデル

ドラフトチャンバーが設置された実験室を想定した解析モデルを図 3-1 に、ドラフトチャンバーモデルを図 3-2 に、数値人体モデル CSP を図 3-3 に示す。九州大学総合理工学研究院に実際に存在する実験室空間と空調設備、ドラフトチャンバーを工学的な数値流体解析に必要な十分な精度で再現した。本解析のドラフトチャンバーモデルはヤマト科学社製ドラフトチャンバー (LDS-150) を対象とした。実験室に対する換気空気の流入口として室内入口扉のドアガラリ (幅 0.55m×高さ 0.58m) を 2 か所設定し、第三種機械換気の排気口 (換気

扇:幅 0.39m×高さ 0.39m) を再現した上で、室内据え置き型の空調装置の幾何形状を再現し、空調設備の吹出口(幅 0.49m×高さ 0.28m)と吸込口(幅 0.54m×高さ 0.56m)を設定した。なお、作業者を考慮するケースでは、筆者らの既往研究で作成した呼吸器モデルまでを再現した数値人体モデル CSP を用い、ドラフトチャンバー前面から 10cm 離れた位置に配置した 3-1,3-2,3-3)。

また、解析対象とするドラフトチャンバーモデルは、作業面となる前面開口高さは最大 0.737m (全開条件)であり、開口高さ 0.42m が通常のドラフトチャンバー使用時の開口高さに相当するとした。ドラフトチャンバー2 台再現しているが、本解析では入り口側に設置されたドラフトチャンバー1 台のみを作動させる条件で実施した。

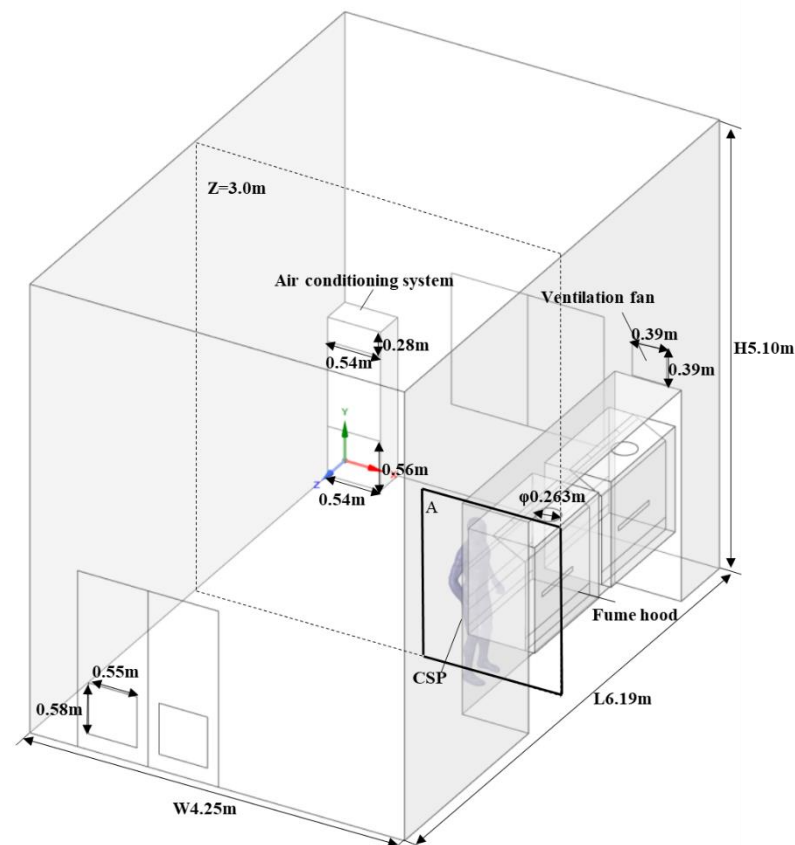


図 3-1 解析モデル

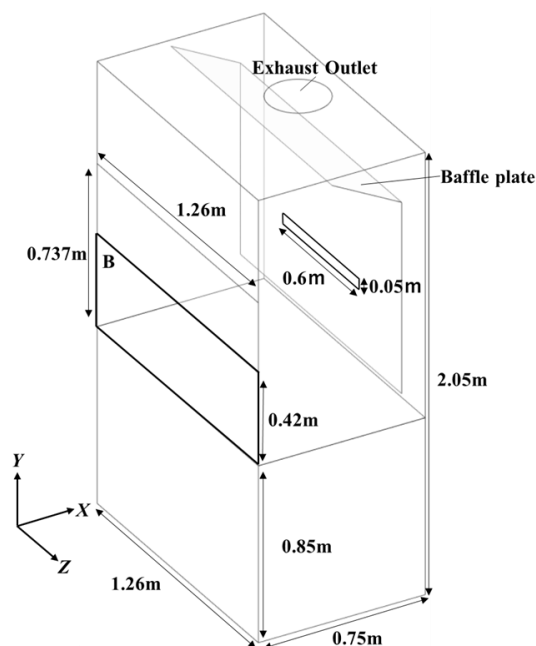


図 3-2 ドラフトチャンバーモデル

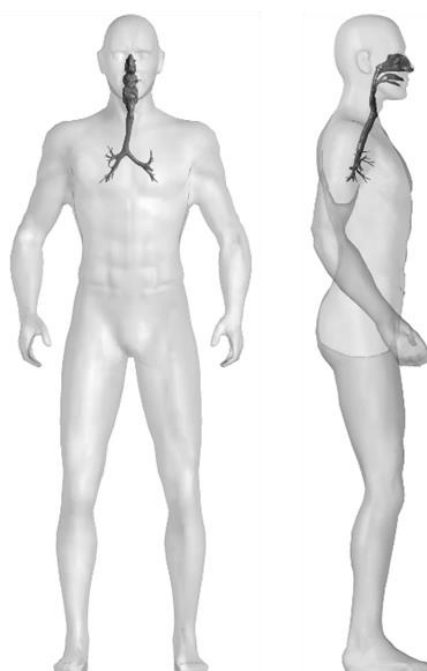


図 3-3 数値人体モデル (CSP)

3.3 数値解析概要

本研究では、ドラフトチャンバー前面の開口率を一定条件（同一の開口面積）とした状態で、排気設備のみが組み込まれたドラフトチャンバーの排気風量を変化させ、ドラフトチャンバー開口面風速（開口面の平均風速）を3段階設定した。そのうえで、ドラフトチャンバー前面の作業者 CSP の有無、実験室の環境条件（実験室の空調システムの稼働条件）を変化させることで合計 12 ケースを基礎解析ケースとして設定した。詳細条件設定を表 3-1 に整理して示す。数値解析条件ならびに境界条件を表 3-2 に示す。数値人体モデル CSP は代謝に伴う生理発熱を簡易的に再現するため、式(3-1)に示す Fanger による熱モデル(1-Node Model:頭熱のみ)を組み込む²⁻⁴⁾。

$$T_{sk} = 309.4 - (0.054 + R_{cl})Q_t \quad \cdots \cdots (3-1)$$

ここで、 T_{sk} [K]は皮膚表面温度、 Q_t [W/m²]は頭熱放散量、 R_{cl} [m²K/W]は衣服による熱伝熱量を示す。本研究では 1clo に相当する $R_{cl}=0.155$ [m²K/W]を与えて解析を実施した。空調システム運転条件は夏季冷房条件を想定し、ガラリから流入する外気は 27℃とした。また、空調システムと換気システムは各々独立した設定であり、空調システムに対する流入・流出条件は密閉系の完全再循環を仮定した。換気システムを稼働させた条件での外気導入量は換気回数 0.5 回/h とした。

ドラフトチャンバー内で発生した汚染物質の漏洩やチャンバー内分布を確認するため、空気の物性と同一条件となる Passive Contaminant を仮定し、ドラフトチャンバーの内部空間全体で一様発生させる条件にて濃度分布解析を実施した。すべて定常状態を仮定した。

表 3-1 解析ケース

Case		Aporetural area	Area averaged air velocity(m/s)	Air flow rate(m³/s)	CSP	Ventilation fan	Air conditioning system
1	1-1	1.26m × 0.420m	0.50	0.265	×	×	×
	1-2				○	×	×
	1-3				×	○	○
	1-4				○	○	○
2	2-1	1.26m × 0.420m	0.30	0.159	×	×	×
	2-2				○	×	×
	2-3				×	○	○
	2-4				○	○	○
3	3-1	1.26m × 0.420m	0.10	0.053	×	×	×
	3-2				○	×	×
	3-3				×	○	○
	3-4				○	○	○

表 3-2 数値解析条件・境界条件

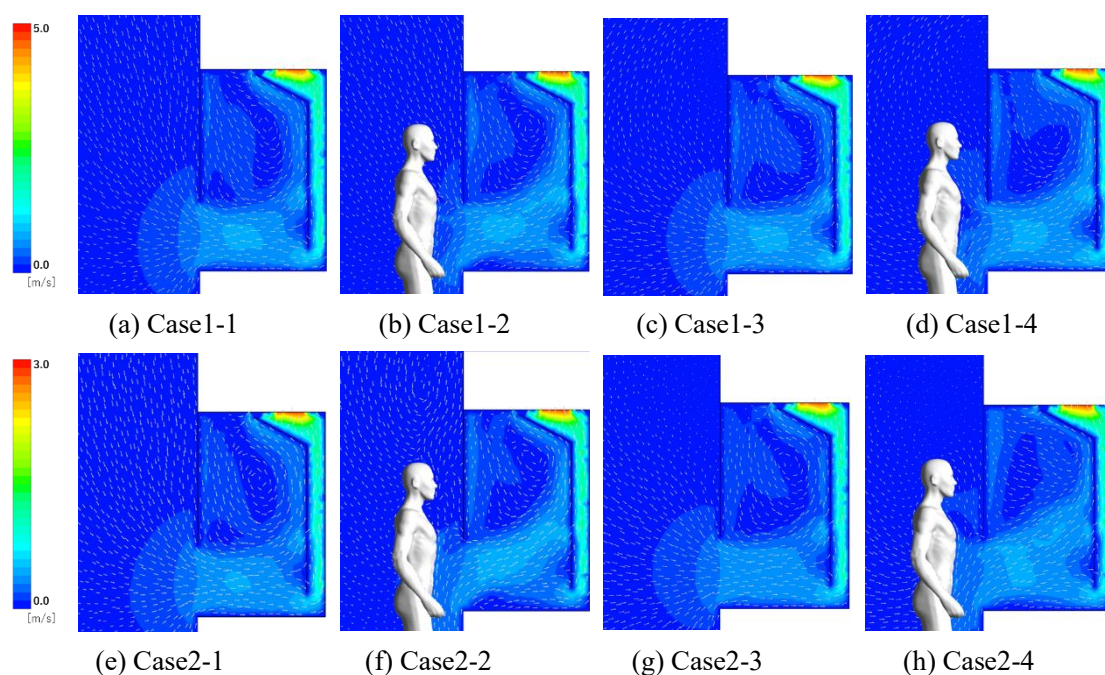
Mesh	Case1-1 1-3 2-1 2-3 3-1 3-3 : 329,605
	Case1-2 1-4 2-2 2-4 3-2 3-4 : 927,794
Turbulence Model	SST k- ω model
Scheme	Convection Term : Second order upwind
Inflow Boundary	Area : 0.55(m)×0.58(m)×2 U_{in} : Pressure inlet, T_{in} : 300K $TI = 0.1$, $k_{in} = 3/2(U_{in} \times TI)^2$
Outflow Boundary	Area _{fume hood} : ϕ 0.263(m) $U_{fume hood}$: 表 3-1 Area _{ventilation fan} : 0.39(m) × 0.39(m) $U_{ventilation fan} = 0.117\text{m/s}$
Wall treatment (Room)	Velocity : no slip Temperature : adiabatic
Skin surface treatment (CSP)	Velocity : no slip Temperature : calculated by 1-node model
Air conditioning system	Recirculation
Contaminant (Fume hood)	Passive Contaminant

3.4 数値解析結果

3.4.1 ドラフトチャンバー周辺における気流分布

ドラフトチャンバー内部並びにドラフトチャンバー周辺空間に着目した各ケースの流れ場解析結果を図 3-4 に示す。図中の表示断面は図 3-1 中に示した断面 A 位置($Z=3.0\text{m}$)である。数値人体モデル CSP の有無や室内側の空調条件にかかわらず、全ての解析ケースにおいてドラフトチャンバー前面開口部から実験室内空気がドラフトチャンバー内部に流入し、チャンバー上部隙間とバッフルプレートにある隙間を抜け、チャンバーの排気ダクトに向かう流れが確認できる。

また、ドラフトチャンバー内部の上部空間、すなわち前面扉とチャンバー天井面、側面で囲まれた上部空間では、比較的大きな循環流の形成が確認できる。CSP が設置されたケースでは、ドラフトチャンバー開口部近傍に設置された CSP に流入外気が衝突し、CSP とドラフトチャンバー間の領域で複雑な流れを形成している。ドラフトチャンバーの排気風量が小さくなるとともに、CSP の発熱に伴う CSP 周辺の熱上昇流形成が明確になる。本研究で対象とした全てのケースにおいて、室内側からドラフトチャンバー側に向かう流れが確保されていることも確認した。



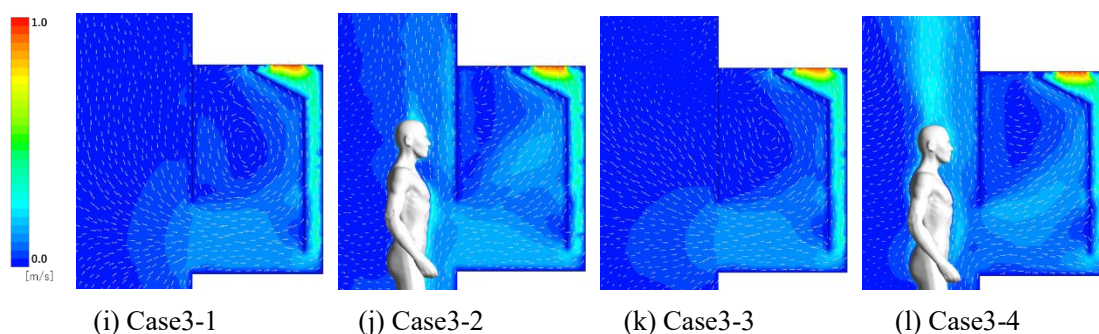


図 3-4 流れ場解析結果

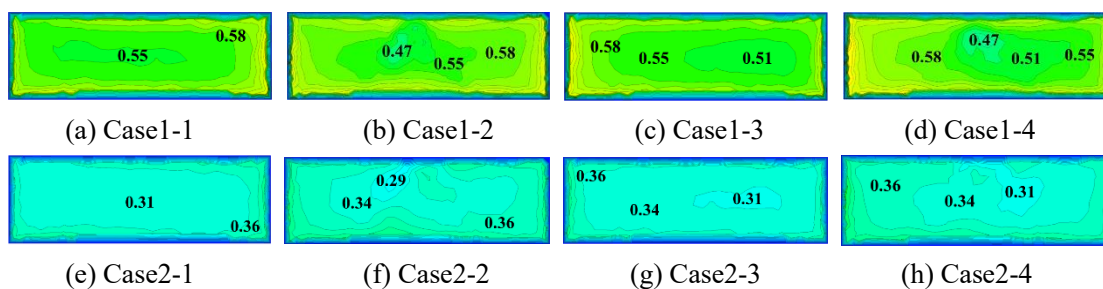
3.4.2 ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）における気流分布

各ケースにおける、ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）の気流分布を図 3-5 に示す。図中に示した表示断面は図 3-2 中に示した断面 B 位置である。人体モデル CSP 無し・空調システムを停止した条件で平均面風速 0.5m/s となるように排気風量を設定した Case1-1 では、作業開口面全域でほぼ均一の風速分布となった。同条件で面風速を 0.3m/s とした Case2-1 においてもほぼ同様の結果となった。面風速 0.1m/s まで低下させた条件である Case3-1 では、Case1-1 と Case2-1 の面風速分布とは異なるものの、ほぼ均一の作業面風速分布であることを確認した。

CSP 無し・空調システムを稼働させた条件で面風速を 0.5m/s とした Case1-3 においても、ほぼ均一の作業面風速分布が再現された。同条件で面風速を 0.3m/s とした Case2-3、面風速を 0.1m/s とした Case3-3 においても面風速分布に若干の相違が観察されるものの、ほぼ均一の作業面風速分布であることを確認した。

CSP 有り・空調システムを停止した条件で面風速を 0.5m/s となる排気風量を与えた Case1-2 では、CSP 前面付近の作業面風速が最も低くなり不均一性の高い分布が形成された。同条件で平均面風速を 0.3m/s とした Case2-2 においてもほぼ同様の結果となったが、平均面風速を 0.1m/s とした Case3-2 では CSP 前面付近の面風速が高くなった。

CSP 有り・空調システムを稼働させた条件で面風速を 0.5m/s とした Case1-4 では、CSP 前面の作業面風速が小さくなり不均一性の高い分布となった。同条件で面風速を 0.3m/s とした Case2-4、同条件で 0.1m/s とした Case3-4 においても、CSP 前面付近の作業面風速が最も低い分布となった。



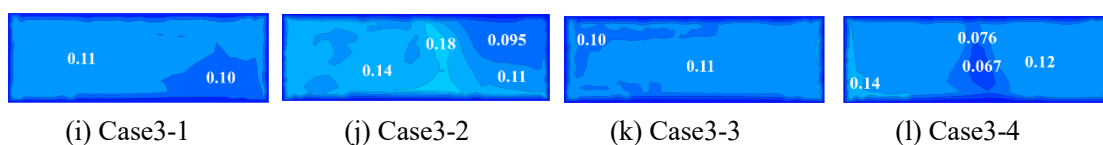
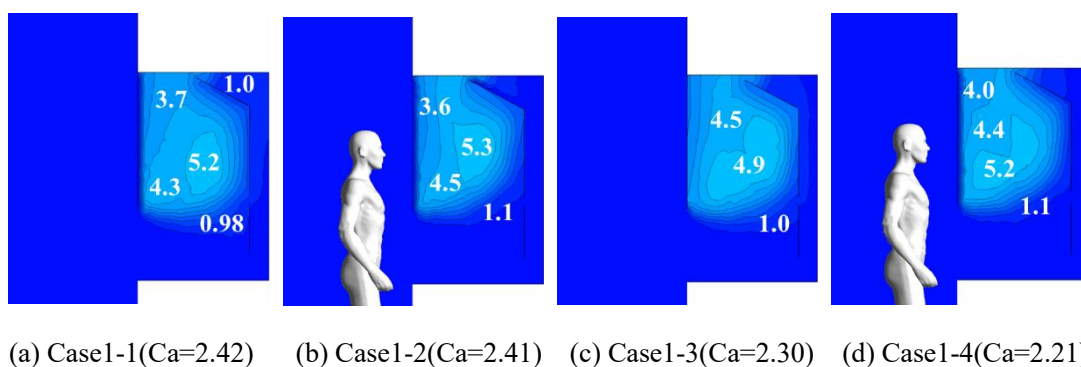


図 3-5 ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）の気流分布

3.4.3 無次元汚染物質濃度分布

各ケースにおける無次元汚染質濃度分布図を図 3-6 に示す．図中に示した Ca 値はドラフトチャンバー内体積平均汚染質濃度を示す．Case1 から Case3 の全てのドラフトチャンバー内汚染質濃度は Case1 のドラフトチャンバー排気ダクトでの完全混合濃度を用いて基準化している．

ドラフトチャンバー内で定常一様発生させる汚染物質量を一定条件としているため，ドラフトチャンバーの排気風量が低下するにつれ，チャンバー内の体積平均濃度 Ca が大きくなる．チャンバー排気風量を変化させることで，ドラフトチャンバー内濃度分布に明確な差が確認できる．排気風量の大きい Case1（作業面平均風速 0.5m/s 条件）では，人体モデル CSP 有無や空調システム稼働条件に関わらず，ドラフトチャンバー上部に生じる循環流によって封じ込まれ，ドラフトチャンバー内下部の作業領域では非常に低濃度場となる．排気風量を 3/5 に低減した Case2（作業面平均風速 0.3m/s 条件）においても Case1 とほぼ同様の結果となった．一方で，排気風量の最小設定条件である Case3 では，チャンバー内の汚染物質濃度分布に明確な差が現れ，相対的な高濃度場がチャンバー下部領域まで広がる．作業者のいる実験室側に汚染物質が漏洩することはないものの，チャンバー内での封じ込め性能が低下している様子が確認できる．特に，CSP 有り・空調システムを停止した条件の Case3-2 では，チャンバー内の汚染物質が広く分布し，高濃度域がチャンバー下部領域まで広がっている．本解析条件では，全てのケースにおいてドラフトチャンバー内に一様発生させた汚染物質がドラフトチャンバー外へ漏洩することはないものの，ドラフトチャンバー排気風量の設定条件がチャンバー内濃度分布に明確な影響を与えることが確認された．



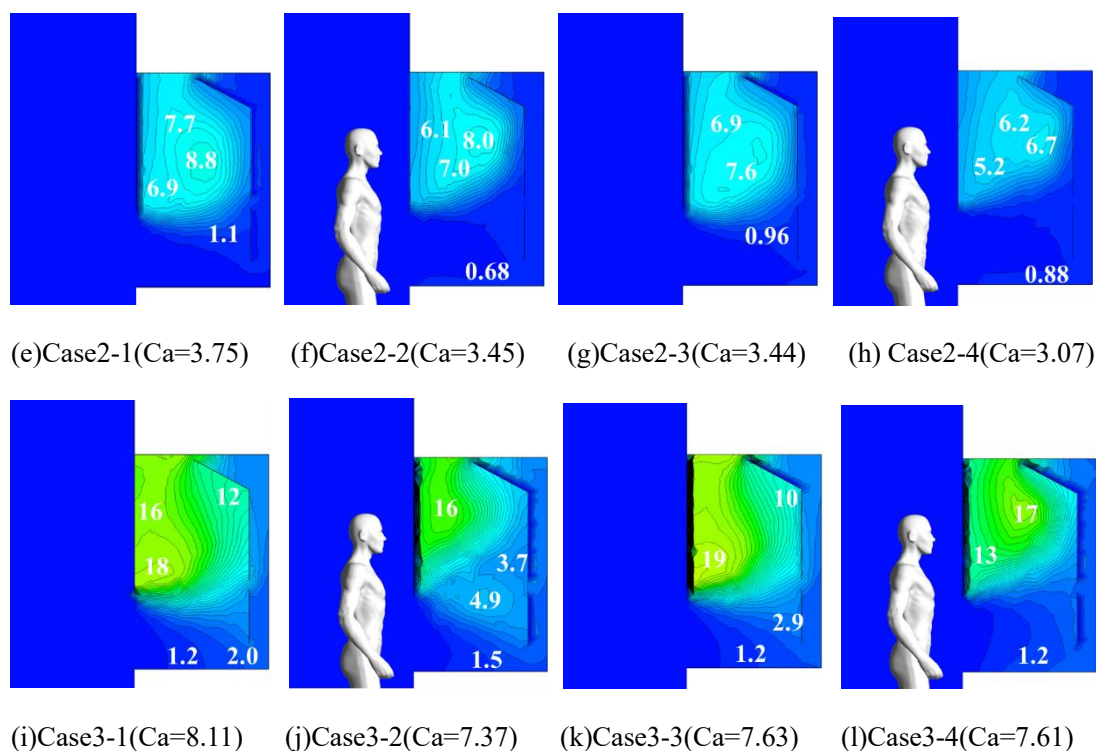


図 3-6 無次元汚染質濃度分布図

3.5 極端な不適切使用を想定した解析

これまでの解析条件では最小排気風量設定の Case3 においてもドラフトチャンバー内発生汚染物質の実験室側への漏洩は無く、ドラフトチャンバーの非常に高い捕集性能が示された。

本節では、さらに極端なドラフトチャンバーの不適切条件を想定した解析を行う。実際の実験室環境においても、チャンバーの排気口にキムワイプがつまることで局所排気が正常に行えていない事例も存在する。そのような条件も想定した解析を実施する。本解析モデルでは、空調システム稼働の有無によるドラフトチャンバーの捕集性能への影響が小さいと確認したため、空調システムは稼働しない条件のみを検討するものとし、不適切条件解析ケースを表 3-3 に示す。Case4-1,4-2,4-3 では、前節で報告した Case1-2,2-2,3-2（人体モデル有・空調システムを停止したケース）の条件に対し、排気風量一定条件にてドラフトチャンバー開口部高さを 0.42m から 0.737m（全面開口）に変更したケースである。Case4-4,4-5,4-6 は、開口部高さ 0.42m を維持した条件で、ドラフトチャンバーの排気風量を極限まで低下させたケースとする。

表 3-3 極端な不適切使用を想定した解析ケース

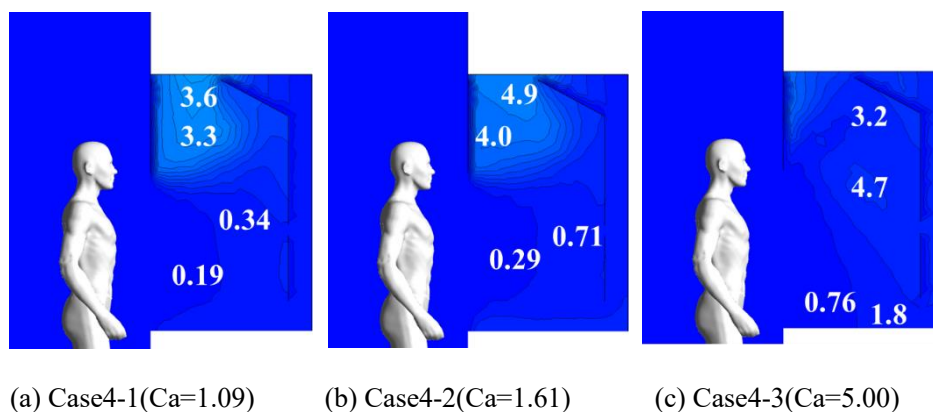
Case		Apretural area	Area averaged air velocity (m/s)	Air flow rate (m ³ /s)	CSP	Ventilation fan	Air conditioning system
4	4-1	1.26m	0.285	0.265	○	×	×
	4-2	×	0.171	0.159	○	×	×
	4-3	0.737m	0.0570	0.053	○	×	×
	4-4	1.26m	0.05	0.026	○	×	×
	4-5	×	0.03	0.016	○	×	×
	4-6	0.420m	0.01	0.005	○	×	×

3.5.1 極端な不適切使用条件での無次元汚染物質濃度分布

各ケースにおける断面 A (図 3-1 参照) の無次元汚染物質濃度ならびにドラフトチャンバー内体積平均汚染物質濃度 Ca を図 3-7 に示す。前節の結果と同様に、排気風量の低下に伴いドラフトチャンバー内の体積平均濃度 Ca が大きくなる結果となった。

ドラフトチャンバー開口部高さを 0.42m から全開の 0.737m に変更した条件で作業面風速 0.285m/s となった Case4-1 と面風速 0.171m/s となった Case4-2 では、どちらの条件においてもドラフトチャンバー内部の上部空間に高濃度域が形成されており、一定の汚染物質封じ込め効果が確認できる。一方で面風速 0.0570m/s まで低下した Case4-3 の条件では、ドラフトチャンバー内部に循環流が形成されず、ドラフトチャンバー内濃度の不均一性が弱まりより一様分布に近づく。

ドラフトチャンバー開口部高さを通常使用の 0.42m とし、面風速を 0.05m/s まで低下した Case4-4、面風速を 0.03m/s まで低下した Case4-5、面風速 0.01m/s と、ほぼ排気装置を停止した条件である Case4-6 では、ドラフトチャンバー内部に循環流は形成されず、発生汚染物質濃度分布がドラフトチャンバー内部に広く一様に広がる。特に Case4-6 条件では、作業者である CSP の前面から汚染物質が実験室側へ漏洩することが確認された。



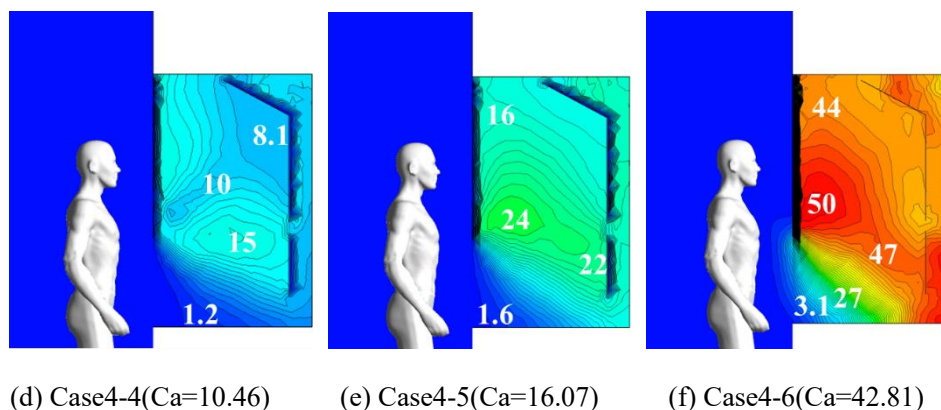


図 3-7 不適切使用時の無次元汚染質濃度場解析結果

3.5.2 極端な不適切使用条件での局所排気性能評価

Case4-4, 4-5, 4-6 の条件では, 実験室側へ濃度分布が広がっており, 発生汚染物質の漏洩が確認された. 図 3-8 には室内側への漏洩が顕著となる断面での濃度分布を示している. ドラフトチャンバーの排気風量設定を Pull 装置と想定すれば, 作業開口面では実験室からチャンバー内部に向けたポテンシャルフローが形成される. この流れは, 排気風量の低下もしくは開口面積の増加に伴い弱くなり, また開口面での不均一性も強くなる. そのため, 一部の局所領域において汚染物質の室内漏洩が確認されたものの, 室内側へ広く拡散することは無い. 例外的に, ほぼ排気装置を停止した条件に近い CASE4-6 では, 漏洩した汚染物質が実験室の天井方向に向かって広く拡散していることが確認された.

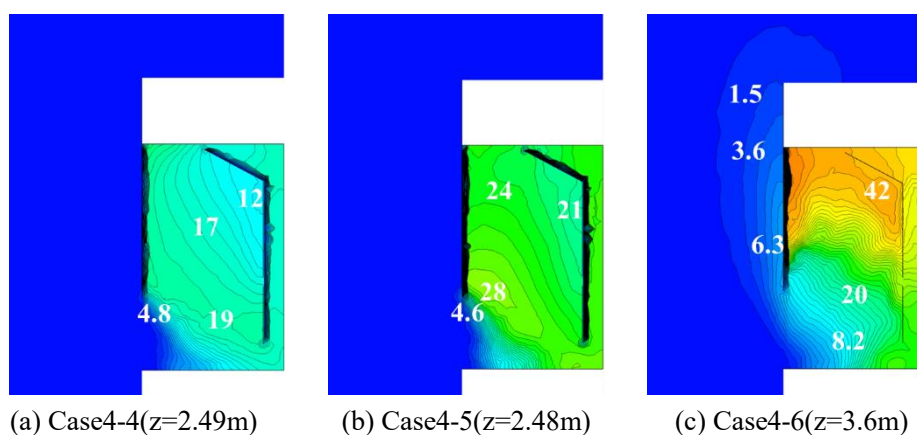


図 3-8 最も汚染物質が漏出した位置の濃度場分布

3.6 考察

ドラフトチャンバーの使用条件が, 特定化学物質等障害予防規則で規定されている面風速 0.5m/s を満たしている場合, 作業者を想定した人体モデル CSP の設置の有無や実験室側の空調システム条件に依存しないことが確認された. また, チャンバー内上部に形成される

循環流の大きさと有無が発生汚染物質の封じ込め性能に大きく寄与していることが確認された。本解析では、ドラフトチャンバー前面に作業者を想定した CSP を配置することで、気流障害物としての効果を検討したが、CSP は静止直立状態である。作業者がドラフトチャンバー内で実験操作を行う場合、作業開口面からのドラフトチャンバー内部に挿入された腕による気流の攪拌効果に加え、開口面での均一な風速分布形成を阻害する要素となる。この点で、本解析条件は安全側の設定条件とはなっておらず、汚染物質の室内漏洩が確認されなかった条件においても、実使用時には作業者の汚染物質曝露が懸念される条件もあり得ると推察されるので注意が必要である。

3.7 結語

本研究では、実験室に設置されたドラフトチャンバーの局所排気性能を定量的に評価するため、CFD 解析用の数値解析モデルを作成し、ドラフトチャンバーの排気風量条件と実験室側の環境設定条件を変化させた系統的な数値解析を実施した。

本章で得られた知見を整理し以下に示す。

- 1) ドラフトチャンバーは、チャンバー内部に形成される循環流が汚染物質の封じ込め性能に大きく寄与しており、これら循環流形成を阻害する要素が、ドラフトチャンバー捕集性能に影響を大きく与える可能性を示した。
- 2) ドラフトチャンバーの前面に作業者がいる場合、作業者とドラフトチャンバー間の領域で複雑な流れ場が形成される。特にドラフトチャンバーの排気風量が小さくなると、作業者の生理発熱に伴う熱上昇流形成が明確になる。また、作業者が存在することでドラフトチャンバー作業面風速分布の不均一性に一定の影響を与えることも確認した。しかし、ドラフトチャンバーの局所排気性能へ及ぼす影響は非常に小さい。
- 3) 実験室側の空調システムは、面風速が 0.3m/s 以上となる排気風量条件ではドラフトチャンバー作業面風速分布の不均一性に与える影響は皆無であった。作業者が存在し面風速が 0.1m/s となる排気風量条件では、作業面風速の不均一性に一定の影響は与えたが、局所排気性能へ及ぼす影響は非常に小さい。
- 4) チャンバー内での汚染物質定常一様発生を仮定した条件下では、面風速が 0.03m/s 条件となる排気風量まで処理風量を低下させても、実験室側へ漏洩しないことを確認した。意図せず排気風量が低下した場合において、ドラフトチャンバーの高い封じ込め性能が維持されていることを確認した。
- 5) 作業面風速が 0.01m/s と、排気風量がほぼゼロに近い不適切な使用条件においては、チャ

ンバー内で発生した汚染物質の実験室側への明確な漏洩を確認した。漏洩した汚染物質は、チャンバー開口部上部の壁面に沿って実験室天井側へ拡散し、作業者の呼吸域に向けた濃度分布形成となることを確認した。

[参考文献]

- 3-1) Kazuhide Ito: Toward the development of an in silico human model for indoor environmental design, Proceedings of the Japan Academy- Series B, Vol.92, No.7, 2016, pp 185-203
- 3-2) Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito, Numerical Prediction of Tissue Dosimetry in Respiratory Tract using Computer Simulated Person integrated with physiologically based pharmacokinetic (PBPK)-computational fluid dynamics (CFD) Hybrid Analysis, Indoor and Built Environment, 2018, Vol. 27(7) 877–88
- 3-3) Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito, Assessment of Transient Inhalation Exposure using in silico Human Model integrated with PBPK - CFD Hybrid Analysis, Sustainable Cities and Society, 40 (2018) pp 317–325
- 3-4) Tanabe S, et al. 1994. Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature. ASHRAE transactions, 100 part 1, 41

[本章に関連した研究業績]

・査読論文

牟田諒太, 劉城準, 伊藤一秀: 実使用条件を想定しドラフトチャンバーの捕集性能評価 第1報 不適切使用条件を想定した排気風量低下時のドラフトチャンバーの捕集性能評価: 空気調和・衛生工学会論文集, No.281, pp.19-26, 2020.8

・国際会議

Ryota Muta, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito: Inhalation exposure risk assessment associated with inappropriate use of fume hood: Indoor Air, South Korea, 2020.11

・国内学会

牟田諒太, 劉城準, 伊藤一秀: ドラフトチャンバー不適切使用条件を想定した排気風量低下時の捕集性能評価: 空気調和衛生工学会大会, 2020.9

第4章 実使用条件を想定したドラフトチャンバーの捕集性能評価 —ドラフトチャンバー内に形成される換気効率分布の詳細解析—

4.1 序

第3章では、ドラフトチャンバーモデルの他、ドラフトチャンバーが設置された実験室の換気空調システム、作業員 CSP を再現した数値解析モデルを作成し、ドラフトチャンバー前面に直立した状態の CSP の有無、ドラフトチャンバーの排気風量、実験室の換気空調システム条件がドラフトチャンバーの局所排気性能、汚染物質の捕集効率に与える影響を定量的に解析した結果を報告した³⁻¹⁾。

第4章では、ドラフトチャンバー前面に立つ作業員 CSP の作業姿勢、特にドラフトチャンバー内に腕を挿入して作業する状況の再現や作業位置の変化が、ドラフトチャンバー内で発生した汚染物質の封じ込め性能に与える影響を数値解析にて定量的に解析する。また、濃度分布解析結果を基に、各種の換気効率指標の解析を行うことで、特に開口部での汚染物質輸送メカニズムを詳細に解析する。

4.2 換気効率指標

本研究を含む一連の研究は数値解析によりドラフトチャンバーの換気性能を評価することを目的としている。本研究では、計算流体力学 CFD による流れ場解析に加え、(4-1)式に示す汚染物質輸送方程式を解くことで濃度分布を解析する。

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j \bar{\phi}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) + S_{\phi} \quad \dots\dots(4-1)$$

$$D_{eff} = D + \frac{v_t}{\sigma_t} \quad \dots\dots(4-2)$$

ここで、 ϕ は対象とするコントロール・ボリューム CV での汚染物質濃度(体積平均濃度) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]を示す。RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)モデルによる解析では、これらの式に示す汚染物質濃度 ϕ はアンサンブル平均量 $\bar{\phi}$ を用いることになる。また σ_t は乱流シュミット数を示す。

本章では、ドラフトチャンバー内に形成される汚染物質濃度場の構造を定量的に理解するため、以下に示す3種類の換気効率指標を用いて解析を行う。

4.2.1 Net Escape Velocity (NEV)

CFD 解析による最小解像スケールであるコントロールボリューム (CV) を対象とした汚染物質の平均濃度を決定する速度スケールとして、Net Escape Velocity (NEV)が提案されて

いる．(4-1)式において定常状態を仮定すると(4-3)式となる．

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots(4-3)$$

ここで，対象領域に対する流入フラックスである移流フラックスと拡散スラックスの和を汚染物質発生と仮定すると，図 4-1 に示す CV 内で(4-1)式を体積積分すると(4-4)式が導かれる．最終的に離散化をし，対象汚染物質の CV 内での Mass Balance 式として(4-5)式が導かれる．

$$\iint \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{u} \bar{\phi} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right) dx dy + \iint \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v} \bar{\phi} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right) dx dy = \iint S_{\phi} dx dy \quad \dots\dots(4-4)$$

$$\Delta y \left(\bar{u}_w \bar{\phi}_w - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \Big|_w \right) + \Delta x \left(\bar{v}_s \bar{\phi}_s - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \Big|_s \right) + S_{\phi} \Delta x \Delta y = \Delta y \left(\bar{u}_e \bar{\phi}_e - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \Big|_e \right) + \Delta x \left(\bar{v}_n \bar{\phi}_n - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \Big|_n \right) \quad \dots\dots(4-5)$$

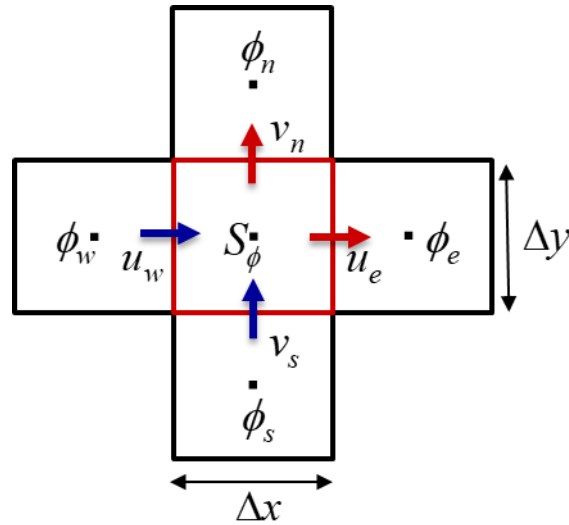


図 4-1 CFD 解析最小解像単位の CV

この場合 CV に対する流出フラックスのみに着目し定義すると(4-6)式となる．ここでは一次元モデル(x 方向のみ)で構造格子系の CV を想定して定義している^{4-2)~4-6)}．

$$NEV_x = \frac{1}{\bar{\phi}_{CV}} \left(\bar{u} \bar{\phi} \Big|_{out} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \Big|_{out} \right) = \frac{F_{outflow,x}}{\bar{\phi}_{CV}} \quad \dots\dots(4-6)$$

ここで、 $\bar{\phi}_{cv}$ は対象とする CV での汚染物質濃度(体積平均濃度) [kg/m³]を示す。RANS モデルによる解析では、(4-1)式に示すとおり汚染物質濃度 $\bar{\phi}_{cv}$ はアンサンブル平均量を用いることになる。この定式化では、CV に対する再循環分も含めた全成分の実質的な排出効率を示す。(4-6)式の定義から明かであるが、NEV は CV の移流風速 U とは異なり、乱流拡散に伴う汚染物質輸送速度を重ね合わせた実質的な汚染物質輸送速度スケールを示す。本研究では、ドラフトチャンバー開口面(即ち室空間とドラフトチャンバー内部空間の境界面)における NEV 分布を算出する。

4.2.2 Age of Air(SVE3)

ドラフトチャンバー開口面から流入した空気によるチャンバー内発生汚染物質の希釈効果を定量的に議論するため、流入空気の到達時間を評価する Age of Air を用いる。Age of Air の概念は Sandberg によって提案されたものであるが、本解析では Kato and Murakami らによって提案された定常数値解析により Age of Air 分布を算出可能な SVE3 を用いる⁴⁻⁷⁾。

$$SVE3(x) = \frac{C(x)}{C_s} \dots\dots(4-7)$$

$$C_s = \frac{q}{Q} \dots\dots(4-8)$$

ここで、 x は空間のある点(座標)を示し、 C_s は完全混合濃度(q はスカラ発生量 [g/s]、 Q は換気量 [m³/s])を示す。本研究では、ドラフトチャンバー内部空間の SVE3 分布を解析することで、流入空気の分配を検討する。

4.2.3 Local Purging Flow Rate(L-PFR)

Purging Flow Rate(以降 PFR)は Zvirin and Shinnar による海洋の汚染質拡散の研究においてその概念が示され、Sandberg and Sjoberg において建築空間の換気性状の評価に適用された概念である⁴⁻⁸⁾。L-PFR は室内局所領域の平均濃度を決定する実質的な空気量を定義する指標であり、(4-9)式で示される。

$$L-PFR = \frac{q_p}{C_p} \dots\dots(4-9)$$

ここで、 q_p は対象とする局所領域内での汚染物質発生量[g/s]、 C_p は対象とする局所領域 p の平均濃度[g/m³]を示す。本研究ではドラフトチャンバー内部空間で汚染物質が一様発生する条件で、L-PFR を解析することで発生汚染物質の実質的な希釈効率を決定する流入流量と平均面風速の差異を検討する。

4.3 解析モデル

ドラフトチャンバーが設置された実験室を想定した解析モデルを対象とする。第3章では、ドラフトチャンバー排気風量を開口面平均風速換算値で基準適合条件(0.5m/s)から非常に小さくなる不適切使用条件(0.05m/s以下)まで段階的に変化させた条件で、ドラフトチャンバー前面に設置した作業者CSPの有無がドラフトチャンバー開口面風速分布に与える影響を検討した。その結果、実験室環境における換気空調システムの運転条件が、ドラフトチャンバーの局所排気性能に与える影響は小さいことを確認した。そのため、本章の解析モデルは、前章の実験室モデルのドラフトチャンバーを含む一部空間のみを再現した。その上で、ドラフトチャンバー前面に設置した作業者がドラフトチャンバー内で作業を行う状況を想定し、CSPの腕の一部がチャンバー内部挿入された環境を再現する^{4-9), 4-10), 4-11)}。本解析モデルを図4-2に、CSPとドラフトチャンバーの相対位置関係を図4-3に、ドラフトチャンバーモデルを図4-4に示す。ドラフトチャンバーモデルはヤマト科学社製LDS-150を対象とし、工学的な流体解析に十分な精度でチャンバー幾何形状並びに排気システム形状を再現した。

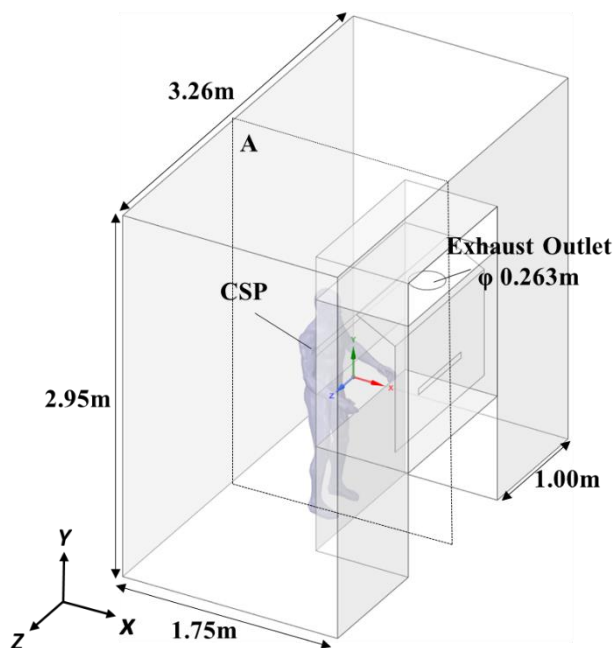


図 4-2 解析モデル

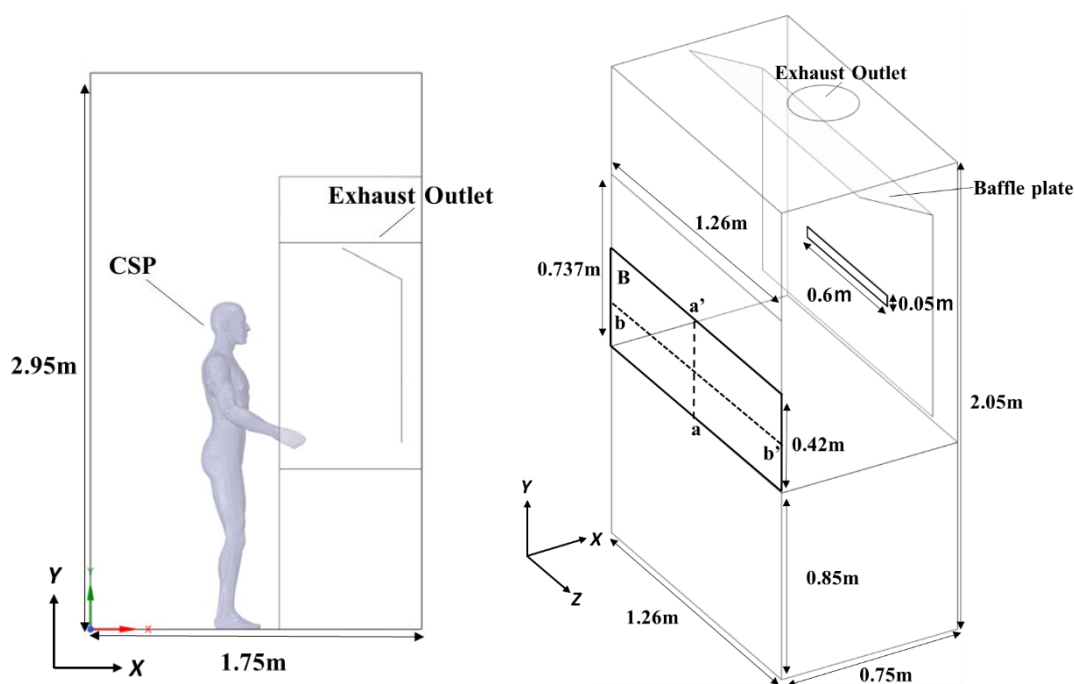


図 4-3 CSP とチャンバーの相対位置関係 図 4-4 ドラフトチャンバーモデル

4.4 数値解析概要

ドラフトチャンバー前面の開口面積一定条件（開口面高さ 0.42m）で、ドラフトチャンバーの排気風量を段階的に変化させる。その上で、ドラフトチャンバー前面の作業者の有無・作業者の姿勢を変化させることで合計 9 ケースの解析ケースを設定する。詳細設定条件を表 4-1 に整理して示す。数値解析条件ならびに境界条件を表 4-2 に示す。数値人体モデル CSP の代謝に伴う生理発熱の再現、ドラフトチャンバー内での汚染物質による濃度分布解析条件は第 3 章と同様とする。ドラフトチャンバー内平均濃度分布、L-PFR ならびに SVE3 の解析では汚染物質をドラフトチャンバー内部空間全体で一様発生させる条件にて解析を行う。NEV 解析では、図 4-4 に示すドラフトチャンバー開口面断面 B(室内空間との境界面に沿った各 CV)で個別に汚染物質を発生させる条件とする。全ての数値解析は定常条件を仮定した。

表 4-1 解析ケース

Case		CSP	Apertural area	Area averaged air velocity (m/s)	Air flow rate (m ³ /s)
1	1-1	-	1.26m ×	0.50	0.265
	1-2			0.30	0.159
	1-3			0.10	0.053
2	2-1	○	0.420m	0.50	0.265
	2-2	Upright		0.30	0.159

3	2-3	○ Bent arm		0.10	0.053
	3-1			0.50	0.265
	3-2			0.30	0.159
	3-3			0.10	0.053

表 4-2 数値解析条件・境界条件

Mesh	Case1-1, Case1-2, Case1-3 303,915 (structured + unstructured) Case2-1, Case2-2, Case2-3 1,768,199 (structured + unstructured) Case3-1, Case3-2, Case3-3 1,753,904 (structured + unstructured)
Turbulence model	SST k- ω model
Inflow boundary	U_{in} : Pressure inlet T_{in} : 300K, $TI = 0.1$, $k_{in} = 3/2(U_{in} \times TI)^2$
Outflow boundary	$Area_{fume\ hood}$: ϕ 0.263(m) $Airflow\ rate_{fume\ hood}$: 0.265, 0.159, 0.053m ³ /s
Wall treatment (Room)	Velocity: no slip Temperature: adiabatic
Skin surface treatment (CSP)	Velocity: no slip Temperature: calculated by 1-node model
Contaminant (Fume hood)	Passive Contaminant

4.5 数値解析結果

4.5.1 ドラフトチャンバー周辺における気流分布

ドラフトチャンバー内部ならびにドラフトチャンバー周辺空間に着目した場合の、各解析ケースの流れ場解析結果を図 4-5 に示す。図中の表示断面は図 4-2 に示した断面 A 位置 (Z=1.63m)である。また、ドラフトチャンバー下部領域(Z-X 断面, Y=0.9m)における流線図を図 4-6 に示す。

ドラフトチャンバー前面作業者 CSP 無しの Case1 では、ドラフトチャンバー前面開口部から室内空気がドラフトチャンバー内部に流入し、バッフルプレートの隙間を抜け、排気ダクトへと向かう流れの形成が確認できる。また、ドラフトチャンバー内部上部空間において大きな循環流形成を確認した。一方の、CSP 有りの Case2 と Case3 では、ドラフトチャンバー開口部近傍に設置された CSP に流入外気が衝突し、CSP とドラフトチャンバー間の領域で複雑な流れを形成している。ドラフトチャンバーの排気風量が小さくなるとともに、CSP

の発熱に伴う CSP 周辺の熱上昇流形成が明確になる。また、作業姿勢による違いを見ると、ドラフトチャンバー内部に腕の一部を挿入している Case3 では、CSP とドラフトチャンバー、さらには CSP の腕の間の領域で複雑な流れを形成している。腕の一部がドラフトチャンバー内に挿入されることで、ドラフトチャンバー内部の下部領域（作業者の腕とドラフトチャンバー内部の作業台との間）において、気流の滞留する領域が形成され、ドラフトチャンバー排気風量が低下すると共に滞留域が拡大することを確認した。

図 4-6 より、実験室側からドラフトチャンバー内部へ流入する気流が CSP に衝突し剥離する様子は観察されなかった。Case2-3 と Case3-3 では、ドラフトチャンバー作業台付近で気流の乱れが確認できる。Case2-3 と Case3-3 では、前述の通りドラフトチャンバー下部領域において滞留域が生じるため、気流の乱れが生じていると考えられる。

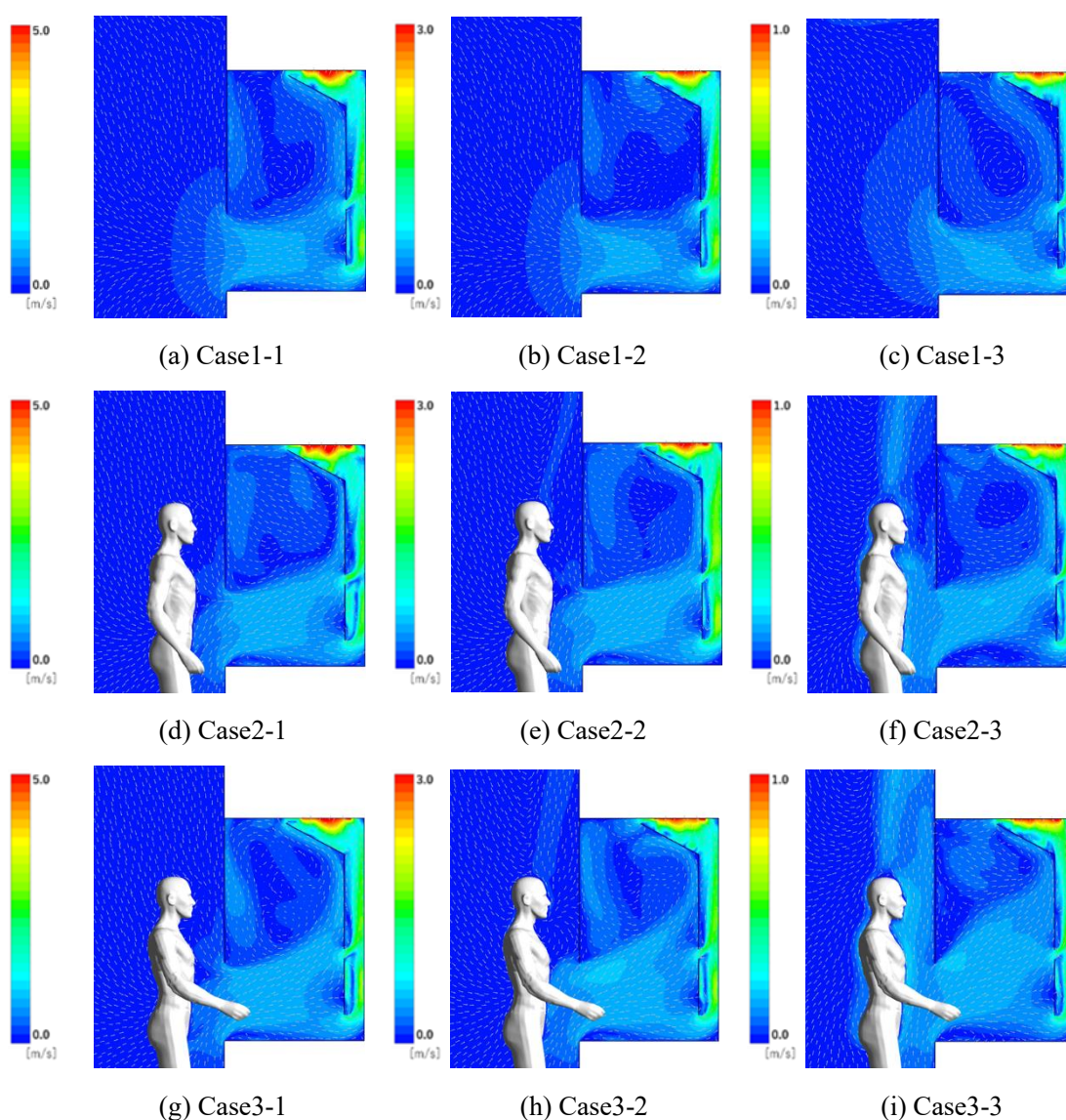
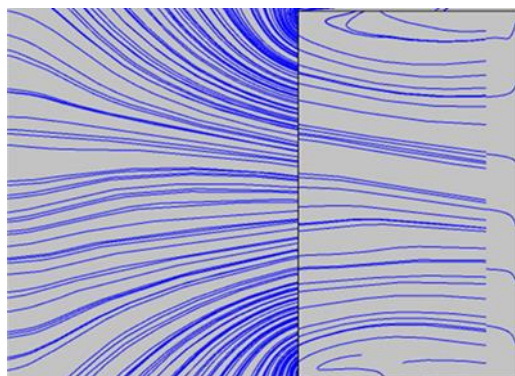
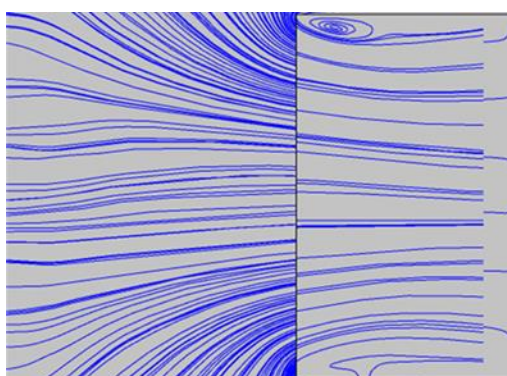


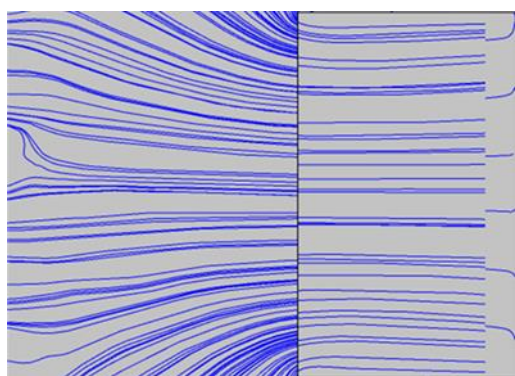
図 4-5 流れ場解析結果



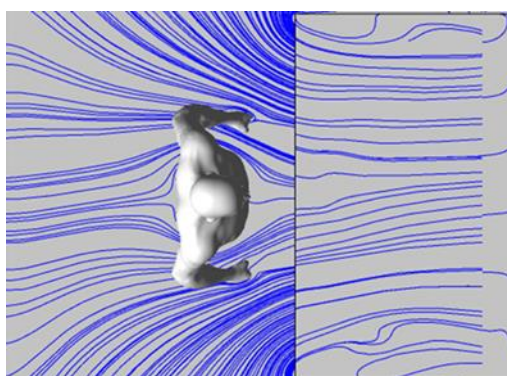
(a) Case1-1



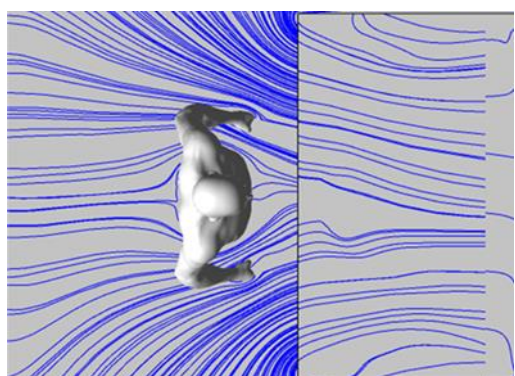
(b) Case1-2



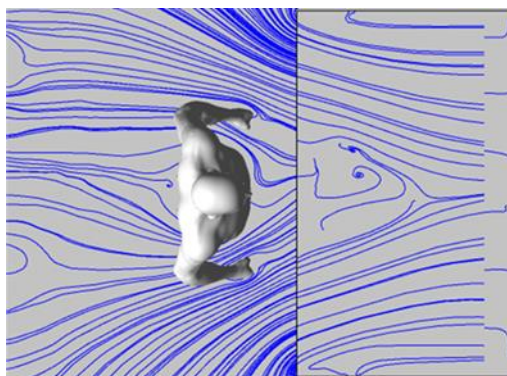
(c) Case1-3



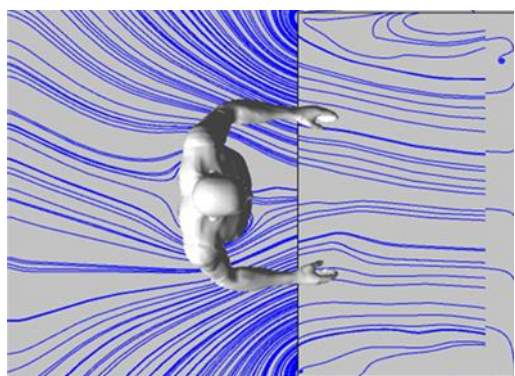
(d) Case2-1



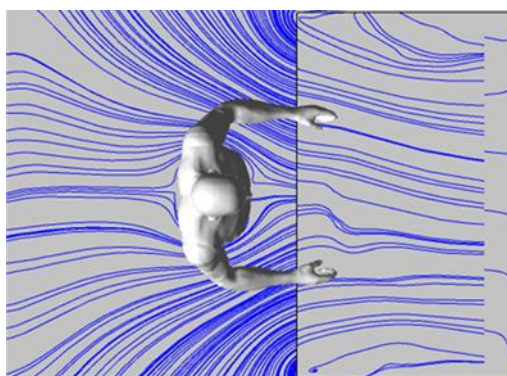
(e) Case2-2



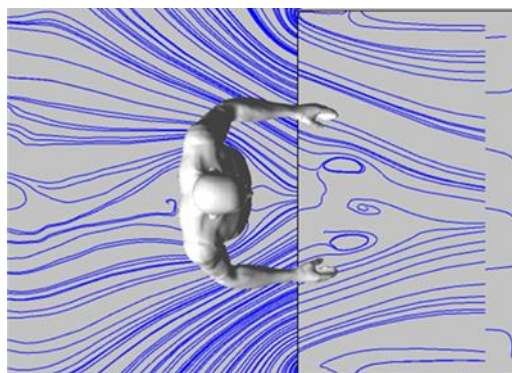
(f) Case2-3



(g) Case3-1



(h) Case3-2



(i) Case3-3

図 4-6 ヒュームフード周辺の流線図(Y=0.90m, ZX 断面)

4.5.2 ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）における気流分布

各ケースにおける、ドラフトチャンバー作業面（全面開口面）の気流分布を図 4-7 に示す。図中の表示断面は、図 4-4 に示した断面 B である。ドラフトチャンバー前面作業者 CSP なし条件の Case1 では、すべてのケースにおいて、ほぼ均一の作業面風速分布であることを確認した。一方で、CSP が存在する Case2 と Case3 では、Case1 と比較して、面風速の大小にかかわらず、全てのケースにおいて作業面平均風速分布の不均一性が強くなることが確認された。また、作業姿勢による違いを見ると、ドラフトチャンバー内部に腕の一部を挿入している Case3 では、不均一性が増す結果となったが、大きな違いは確認できなかった。

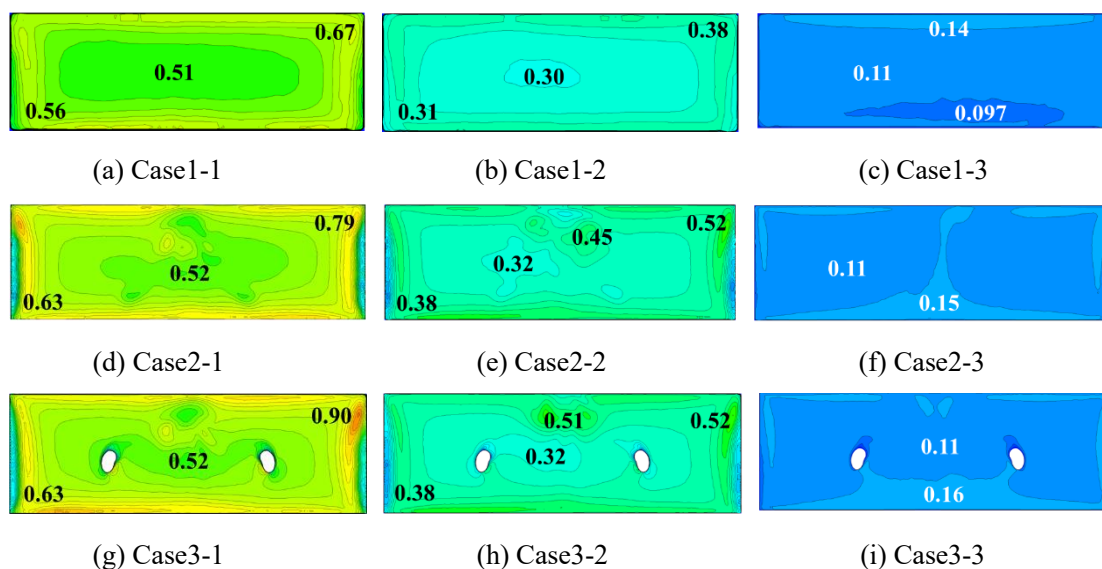


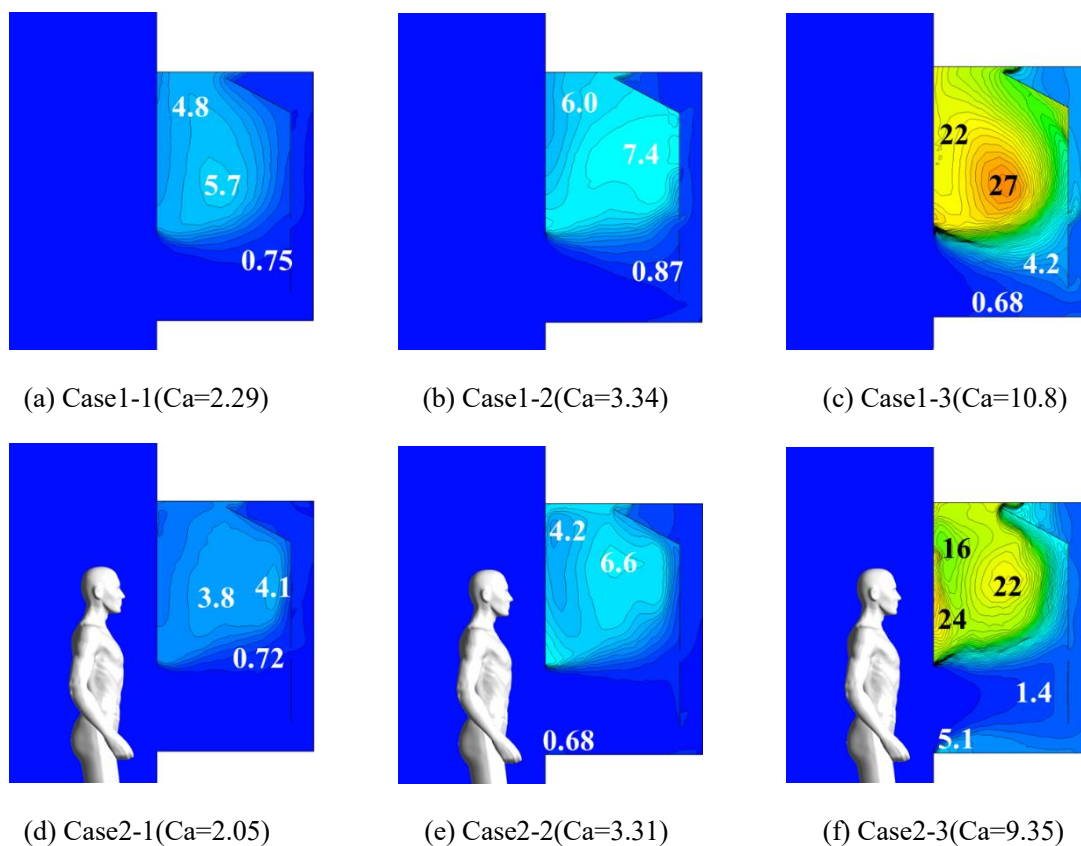
図 4-7 ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）の気流分布

4.5.3 無次元汚染物質濃度分布

各ケースにおける無次元汚染物質濃度分布を図 4-8 に示す。図中に示した Ca 値はドラフトチャンバー内汚染物質濃度である。全てのケースのドラフトチャンバー内汚染物質濃度

は Case1 の排気ダクトでの完全混合濃度を用いて基準化している。全てのケースにおいて、ドラフトチャンバーの排気風量が低下するに従い Ca 値は大きくなる。作業面風速 0.5m/s 条件である Case1-1, Case2-1, Case3-1 ではドラフトチャンバー内上部の循環流によって汚染物質が封じ込められている様子が観察できる。全てのケースで、排気風量が低下すると共に循環流による封じ込め性能が低下し、チャンバー内の汚染物質が広く分布するようになり、高濃度領域がチャンバー内下部まで拡大する。また、ドラフトチャンバー内に作業者の腕の一部を挿入し、作業面平均風速 0.3m/s 条件である Case2-3 と、作業面平均風速 0.1m/s 条件である Case3-3 では、ドラフトチャンバー内部の下部領域に生じる滞留域により汚染物質が効率的に排気されずに滞留し、ドラフトチャンバー内部の下部に高濃度領域が形成された。

図 4-9 にヒュームフード内の作業台表面上から汚染物質を一樣発生させた場合の、ヒュームフード内の無次元汚染質濃度分布図を示す。全てのケースのドラフトチャンバー内汚染物質濃度は Case1 の排気ダクトでの完全混合濃度を用いて基準化している。全てのケースにおいて、作業台上で発生した汚染物質は、ドラフトチャンバー開口面からの気流によって、排気ダクトへと排気される。発生した汚染物質はドラフトチャンバー内に拡散せずに、上部に形成される循環流による封じ込めも確認されなかった。Case2 と Case3 では、作業姿勢に関わらず、作業台の開口部付近で汚染物質が滞留している様子が観察されたが、実験室側へ漏洩することはなかった。



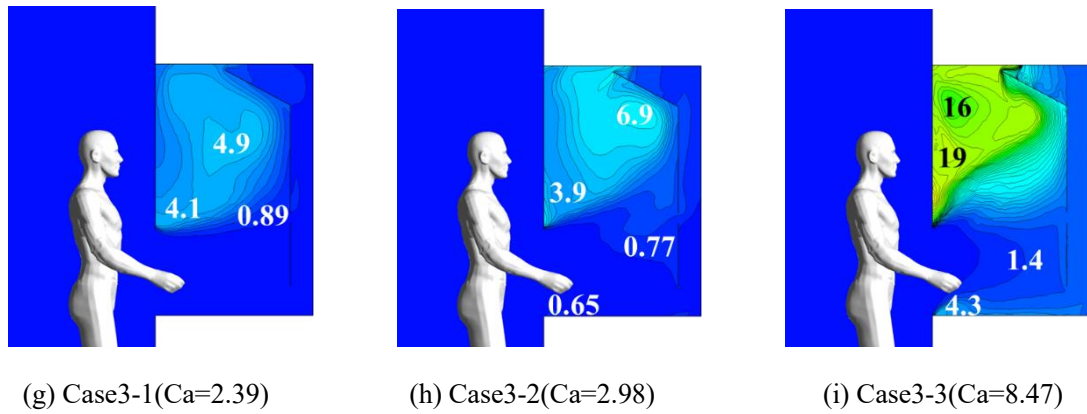
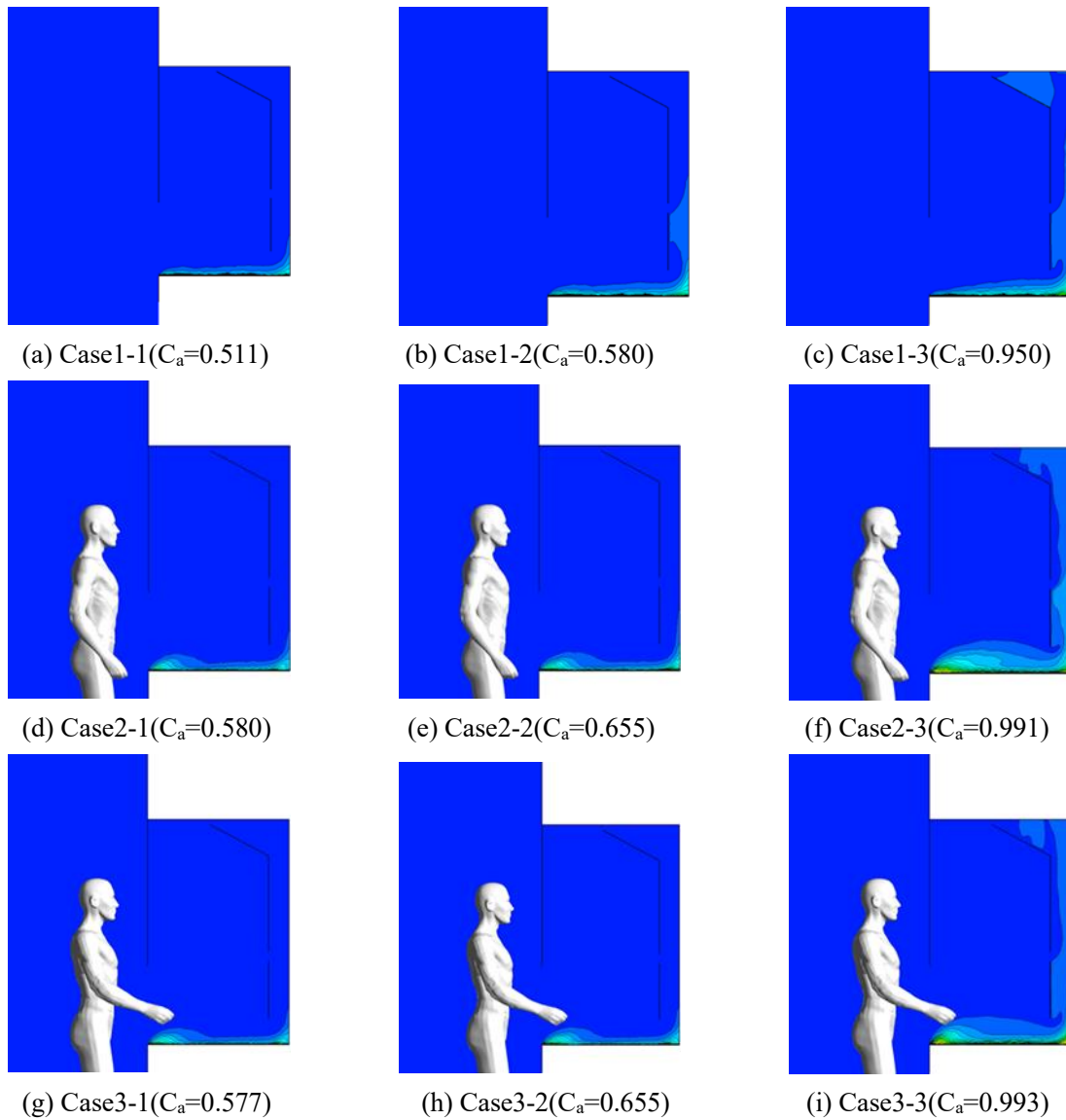


図 4-8 ドラフトチャンバー内部一様発生させた場合の無次元汚染物質濃度分布



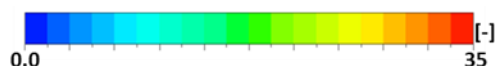


図 4-9 作業台表面から一様発生させた場合の無次元汚染質濃度分布

4.5.4 Net Escape Velocity 分布

ドラフトチャンバー開口面(図 4-4 の断面 B)上の aa'線 ($Z=1.63\text{m}$) の $Y=0.9\text{m}\sim 1.23\text{m}$ における NEV ベクトルと移流風速ベクトルを図 4-10 に, bb'線 ($Y=1.03\text{m}$) の $Z=1.03\text{m}\sim 2.23\text{m}$ における NEV ベクトルと移流風速ベクトルを図 4-11 に示す. 図中の各ベクトルの大きさは, 各開口面風速を用いて基準化している. また, aa'線, bb'線における各 CV の移流速度で基準化した無次元 NEV 値を図 4-12 に示す.

図 4-10 と図 4-11 より, 全てのケースにおいて, 実験室側からドラフトチャンバー内部に流れる一方向流が形成されているために NEV ベクトルと移流風速ベクトルの向きは, ほぼ同方向となった. しかし, ドラフトチャンバー前面の作業者 CSP の有無により違いが生じる結果となった. CSP 無しの Case1 では, NEV ベクトルの大きさは移流風速ベクトルより大きい, CSP 有りの Case2, Case3 では NEV ベクトルと移流風速ベクトルの大きさの差が小さくなった.

NEV は, 移流効果と乱流拡散効果を統合した汚染物質輸送効率を示すものであるため, 図 4-12 に示した無次元 NEV を求めることで, 乱流拡散の影響を評価することができる. 無次元 NEV が 1.0 の場合, 移流速度と NEV が同値であり, 1.0 より大きい場合は移流と拡散の向きが同一である, 1.0 より小さい場合は, 移流と拡散の向きが逆方向であることを示している. 図 4-12 の(a), (d)のように, CSP 無しの Case1 では排気風量による無次元 NEV 値の変化は確認されなかった. また図 4-12 の(b), (e)のように直立した CSP が存在する Case2 では排気風量による無次元 NEV 値は若干変化するものの大きな変化は確認されなかった. 一方で, 図 4-12 の(c), (f)のように開口面に CSP の腕を挿入した Case3 では, 排気風量による無次元 NEV 値の明確な違いが生じた. 面平均風速が 0.5m/s と 0.3m/s になる排気風量条件である Case3-1 と Case3-2 では, aa'線上において 75%以上の点が, 無次元 NEV 値が 1.0 を超えているのに対し, 面平均風速 0.1m/s になる排気風量条件である Case3-3 では, 75%以上の点が, 無次元 NEV 値が 1.0 を下回った. つまり, 低排気風量条件 (面風速 0.1m/s) になると, ドラフトチャンバー開口面に CSP の腕の一部が存在することで移流風速とは逆方向の汚染物質の乱流拡散効果が高くなる結果となった.

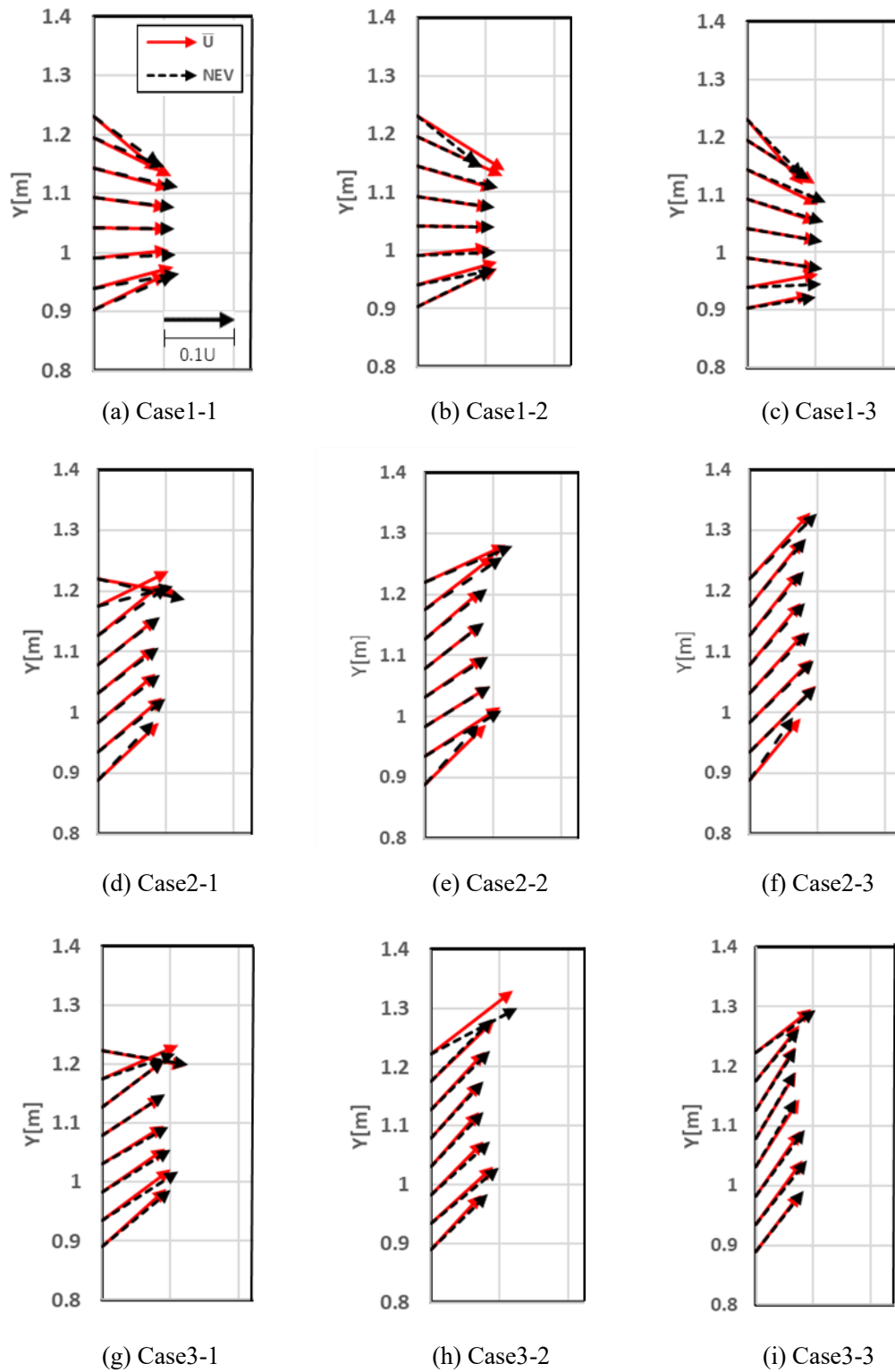


図 4-10 ドラフトチャンバー開口面における移流風速・NEV 分布 (a-a'線, XY 断面)

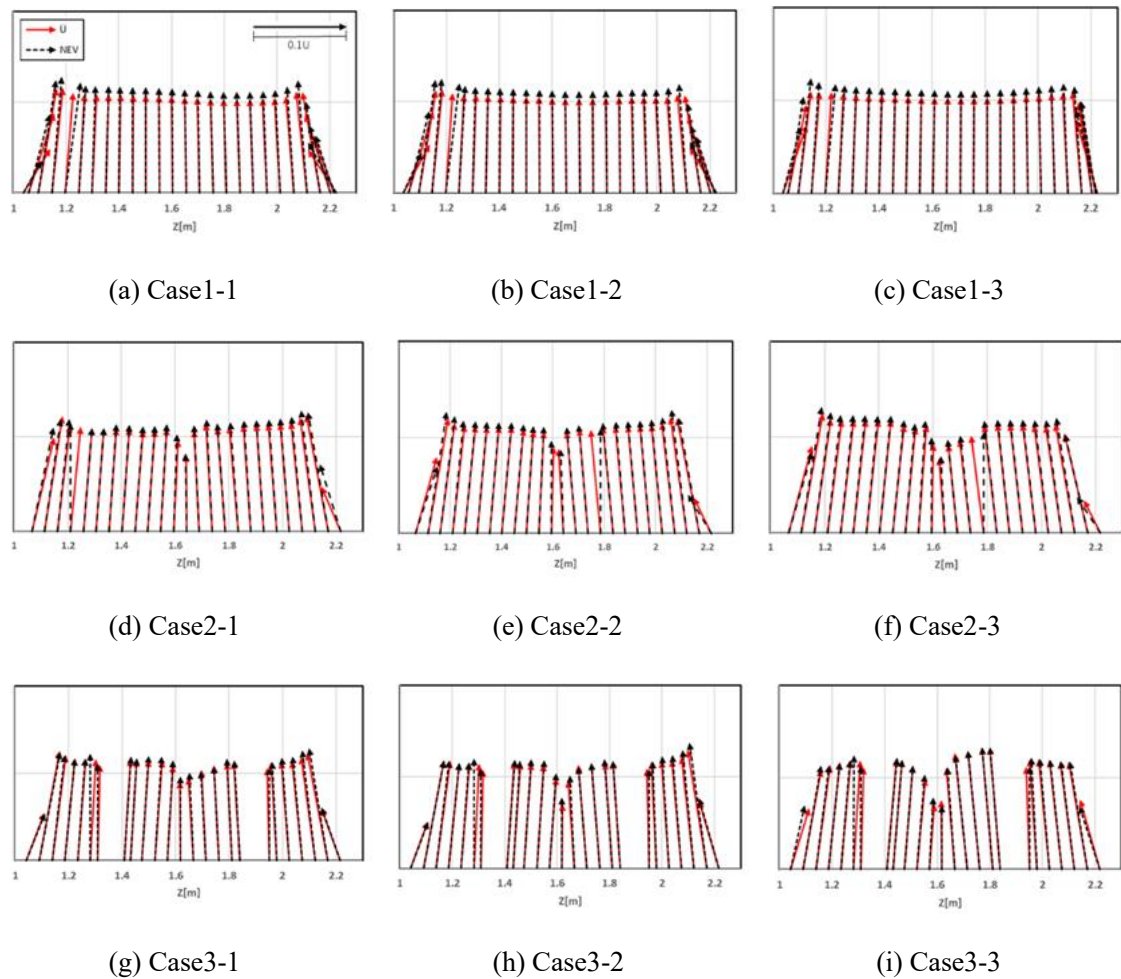
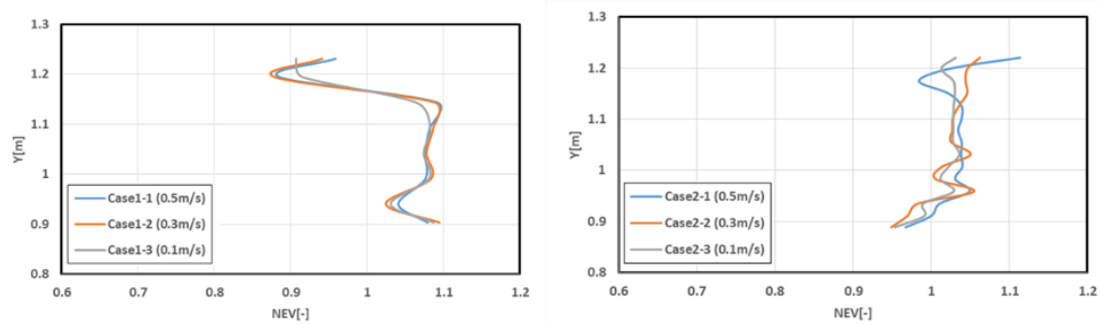


図 4-11 ドラフトチャンバー開口部における移流風速・NEV 分布(b-b' 線, ZX 断面)



(a)作業者 CSP 無し条件(a-a'線)

(b)直立した作業者 CSP 有り条件(a-a'線)

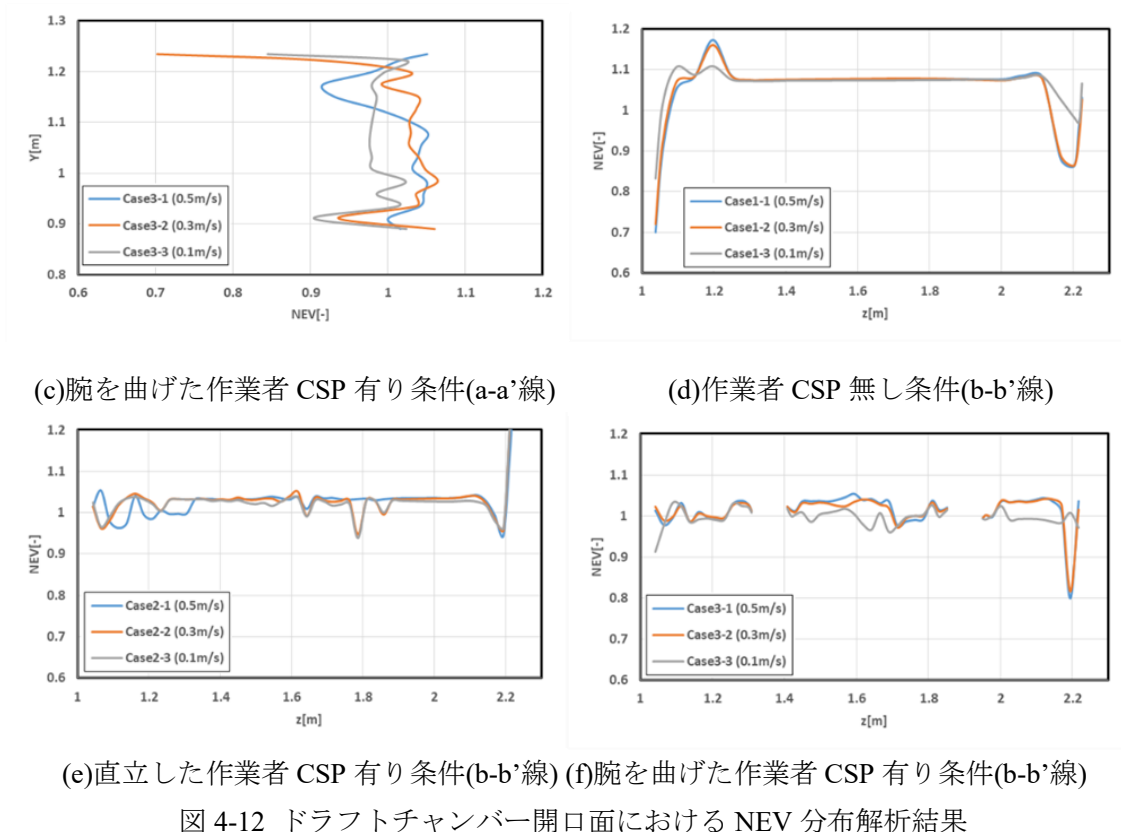


図 4-12 ドラフトチャンバー開口面における NEV 分布解析結果

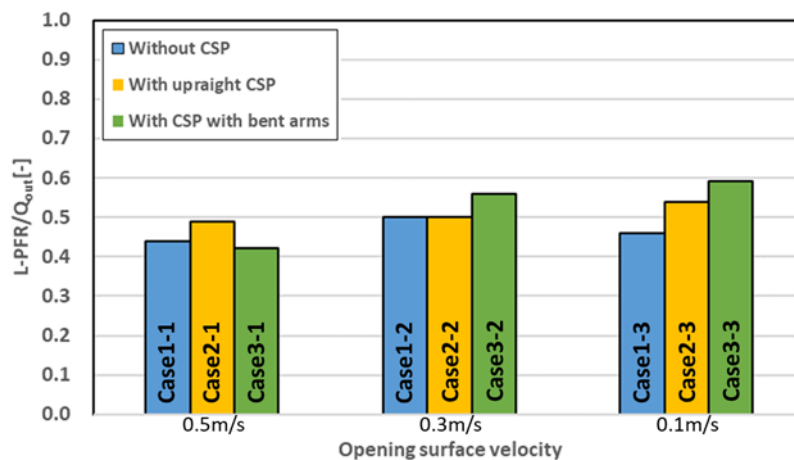
4.5.5 L-PFR 解析結果

各ケースにおけるドラフトチャンバー内で汚染物質を定常一様発生した条件の L-PFR 結果を図 4-13(a)に、ドラフトチャンバー内作業台表面で汚染物質を定常一様発生した条件の L-PFR 結果を図 4-13(b)に示す。これらは、それぞれのドラフトチャンバー排気風量で基準化した値である。

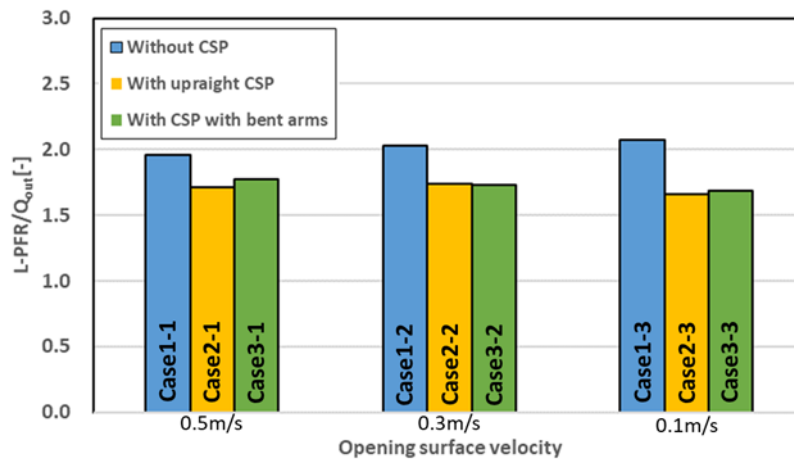
ドラフトチャンバー内で汚染物質を定常一様発生した場合、ドラフトチャンバー作業面平均風速 0.5m/s 条件の Case1-1, Case2-1, Case3-1 では無次元 L-PFR はそれぞれ 0.44, 0.49, 0.42 となった。一方でドラフトチャンバー作業面平均風速 0.1m/s 条件の Case1-3, Case2-3, Case3-3 ではそれぞれ 0.46, 0.54, 0.59 となった。作業者 CSP が存在する Case2 と Case3 において排気風量が低下すると無次元 L-PFR が大きくなる。特に腕の一部を挿入した Case3 では大きな差異が確認された。排気風量が低下すると、ドラフトチャンバー前面に存在する CSP と CSP の腕の一部により、ドラフトチャンバー上部に形成される循環流が乱れるために、汚染物質がドラフトチャンバー下部まで広がる。そのため、上部の高濃度域が小さくなり、汚染物質濃度がチャンバー内に広く拡散し、チャンバー内平均濃度が低下する。下部領域に広がった汚染物質の漏洩を防ぐために、開口面からの流入空気による希釈により、特に Case3-3 では無次元 L-PFR が大きくなった。これら無次元 L-PFR 結果は、完全混合濃度と比較して非常に不均一性の強い汚染物質濃度分布がチャンバー内に形成され、チャンバー内

での汚染物質排出には排気風量の約半分程度の寄与に留まっていることを示している。チャンバー上部に形成される循環流での封じ込めによる高濃度領域形成と、チャンバー下部の低濃度領域形成の、明確なチャンバー内部での換気効率分布を示す結果となった。

ドラフトチャンバー内作業台表面で汚染物質を定常一様発生した場合、全てのケースにおいて無次元 L-PFR は 1.0 より大きくなった。CSP が存在しない Case1 のほうが、Case2 と Case3 と比較して無次元 L-PFR は大きくなったことより、CSP はドラフトチャンバー作業台で発生した汚染物質の希釈に影響を与えることが示された。また、CSP の姿勢の違いによる無次元 L-PFR の有意な差は確認されなかった。



(a) チャンバー内一様発生条件



(b) 作業台表面一様発生条件

図 4-13 無次元 L-PFR 解析結果

4.6 考察

ドラフトチャンバーの使用条件が、特定化学物質等障害予防規則で規定される面風速 0.5m/s 以上を満たしている場合、作業者 CSP の有無や作業姿勢の変化に関わらず、ドラフトチャンバー上部に明確な循環流が形成されることを確認した。つまり適切な使用条件においては、腕の一部がドラフトチャンバーに挿入されても、ドラフトチャンバー内の流れ場に影響を与えず、上部では循環流による汚染物質の封じ込め、下部では開口面からの均一なピストンフローによって低濃度領域を維持していることが示された。また、CSP の存在や作業姿勢の変化は、ドラフトチャンバー内に流入するピストンフローの乱れには影響を与えない。一方で、作業面風速 0.1m/s の排気風量条件において、CSP 有りの Case2-3 と Case3-3 ドラフトチャンバーの捕集性能に変化が生じた。CSP の生理発熱による上昇流や、ドラフトチャンバー内に挿入された腕が、ドラフトチャンバー内の流れ場に影響を与えた。L-PFR 解析では、Case3-3 が 0.59 と最大値となった。つまり、チャンバー内において汚染物質濃度分布が一様に近づき、開口面からのピストンフローにより汚染物質が排気ダクトへ運ばれたことを示している。また NEV 解析においても、Case3-3 は無次元 NEV 値が 1.0 を下回るポイントが多いことから、相対的に乱流拡散による汚染物質輸送が大きくなっていることが示された。

ドラフトチャンバー性能評価においては、面風速分布とともに NEV を含めた換気効率を併用し評価することでより高精度の局所排気性能評価が可能になる。

4.6.1 ドラフトチャンバーと CSP の距離がドラフトチャンバー捕集性能に与える影響

本解析では、ドラフトチャンバーと作業者 CSP の距離を 0.1m として解析を行った。ドラフトチャンバーと CSP の距離が捕集性能に与える影響を解析するために、距離を 0.05m に近づけたケースの追加解析を行う。数値解析条件・境界条件は本解析と同様である。表 4-3 に追加解析のケース設定を示す。

表 4-3 追加解析ケース設定（ドラフトチャンバーと CSP の距離）

Case		CSP (Distance from the fume hood)	Apertural area [m]	Opening surface area averaged air velocity [m/s]	Airflow rate [m³/s]
4	4-1	Upright CSP (0.05m)	1.26 ×	0.5	0.265
	4-2			0.3	0.159
	4-3			0.1	0.053
5	5-1	CSP with bent arm (0.05m)	0.420	0.5	0.265
	5-2			0.3	0.159
	5-3			0.1	0.053

図 4-14 に断面 A (z=1.63m) (図 4-2) におけるドラフトチャンバー周辺の風速分布を示

す。CSP を近づけた全てのケースにおいてもドラフトチャンバー内上部に循環流形成が確認された。しかし、Case4-3 と Case5-3 では、それぞれ同排気風量条件である Case2-3 と Case3-3（ドラフトチャンバーと CSP の距離が 0.1m）と比較して循環流がより乱れる結果となった。図 4-15 に、断面 B（図 4-4）のドラフトチャンバー作業面における風速分布の結果を示す。全てのケースにおいて、本解析と比較して、CSP を近づけると開口面分布の不均一性が増す結果となった。図 4-16 に、断面 A におけるドラフトチャンバー内部無次元汚染物質濃度分布を示す。低排気風量条件である Case4-3 と Case5-3 では、無次元汚染物質濃度 Ca 値が、同排気風量条件である Case2-3 と Case3-3 と比較して、それぞれ低い値となり、ドラフトチャンバー内部の汚染物質濃度は均一に広がることが確認された。しかし、いずれのケースにおいても汚染物質の漏洩は確認されなかった。つまり、CSP とドラフトチャンバーの距離が 0.05m 以上の条件では、CSP とドラフトチャンバーの距離は捕集性能に大きく影響を与えないことが明らかになった。

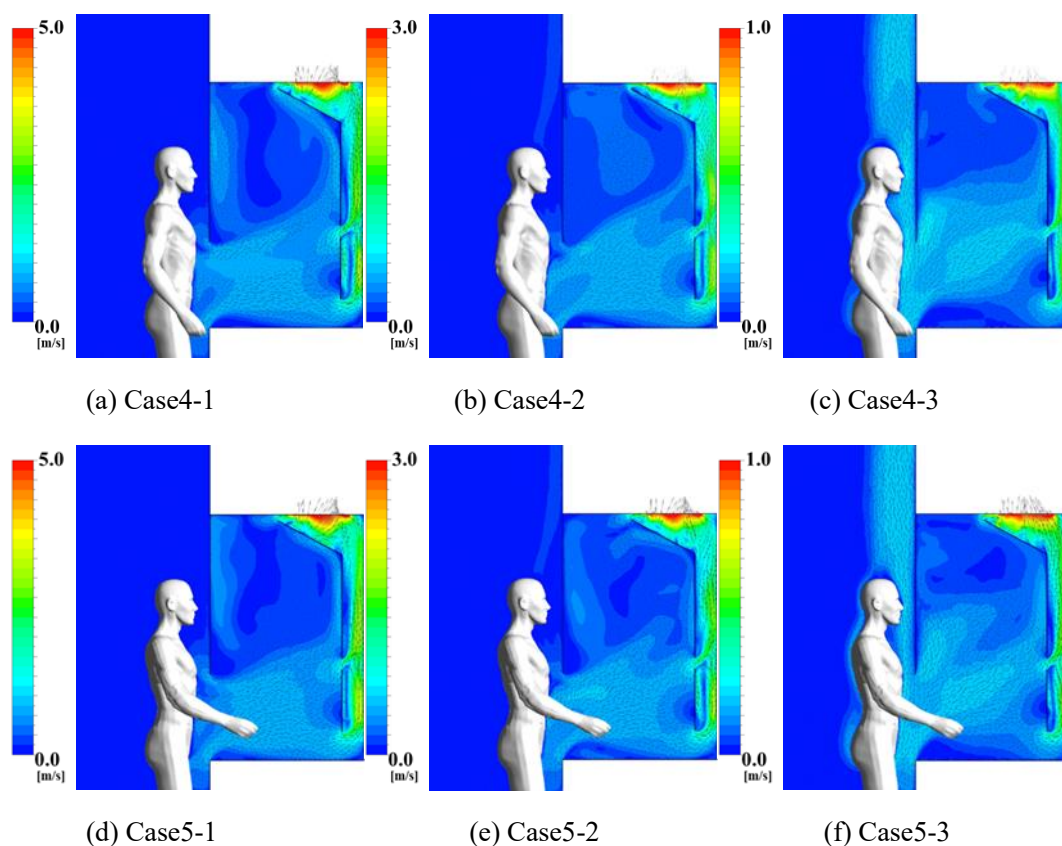
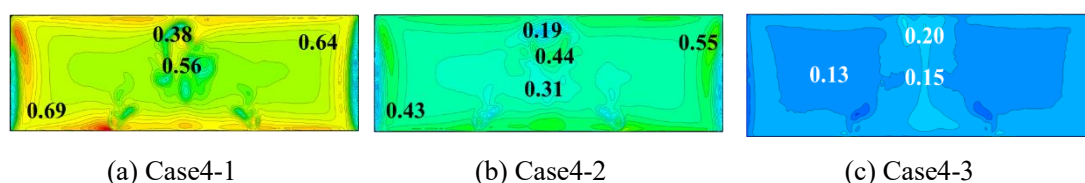
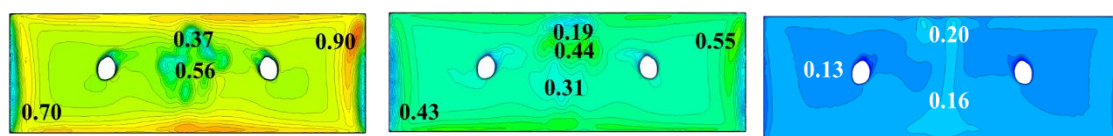


図 4-14 流れ場解析結果



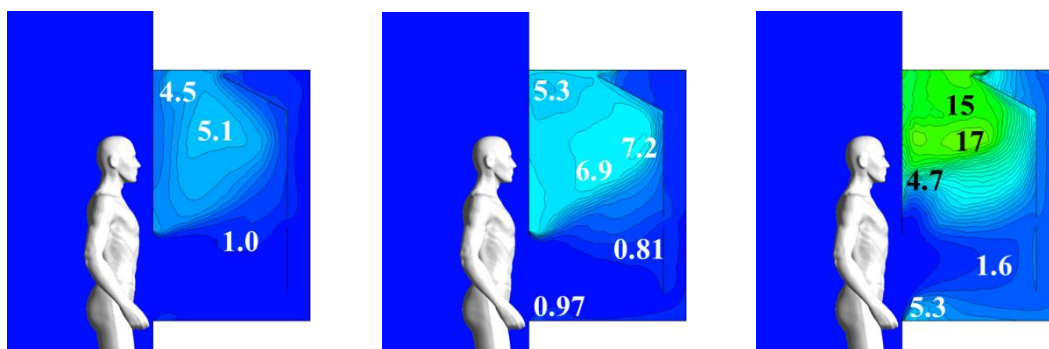


(d) Case5-1

(e) Case5-2

(f) Case5-3

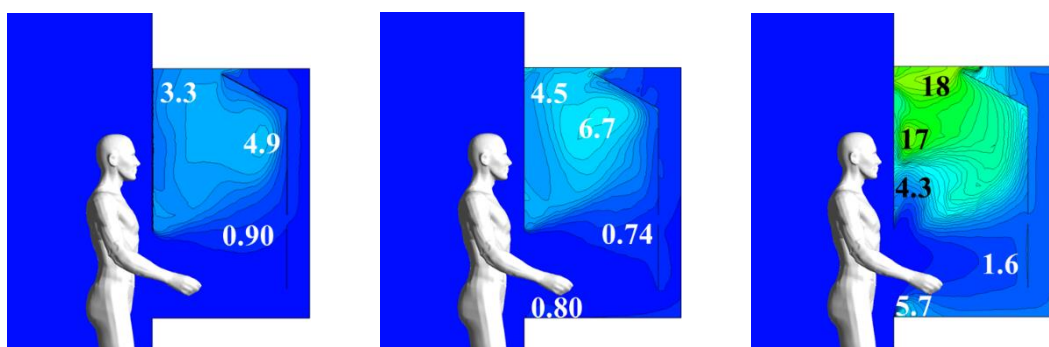
図 4-15 ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）の気流分布



(a) Case4-1 ($Ca=2.11$)

(b) Case4-2 ($Ca=3.34$)

(c) Case4-3 ($Ca=7.87$)



(d) Case5-1 ($Ca=2.26$)

(e) Case5-2 ($Ca=3.05$)

(f) Case5-3 ($Ca=8.05$)

図 4-16 無次元汚染物質濃度分布

4.6.2 ドラフトチャンバー内部の熱源がドラフトチャンバー捕集性能に与える影響

ドラフトチャンバー内部に熱源が存在する場合、ドラフトチャンバー内部の気流に一定の影響を与えることが考えられる。そこで、ドラフトチャンバーと CSP の距離を 0.1m とし、ドラフトチャンバー内部で体積発熱 300W/m^3 を仮定した追加解析を実施する。発熱条件以外の数値解析条件・境界条件は本解析と同様である。表 4-4 に追加解析のケース設定を示す。

表 4-4 追加解析ケース設定（ドラフトチャンバー内部体積発熱）

Case		CSP	Apertural area[m]	Opening surface area averaged air velocity [m/s]	Airflow rate [m³/s]	Volume heat generation[W/m³]
6	6-1	-	1.26 × 0.420	0.5	0.265	300
	6-2			0.3	0.159	
	6-3			0.1	0.053	
7	7-1	Upright CSP		0.5	0.265	
	7-2			0.3	0.159	
	7-3			0.1	0.053	
8	8-1	CSP with bent arm		0.5	0.265	
	8-2			0.3	0.159	
	8-3			0.1	0.053	

図 4-17 に断面 A ($z=1.63\text{m}$) (図 4-2) におけるドラフトチャンバー周辺の風速分布を示す。面風速 0.5m/s 条件においては、全てのケースで、本解析の体積発熱条件なしとほぼ同様の流れ場結果となった。しかし、排気風量が低下するにつれ体積発熱の影響を受ける結果となった。特に、面風速 0.1m/s 条件においては、ドラフトチャンバー周辺気流が大きく乱れ、適切な使用条件で観察されるドラフトチャンバー上部領域の循環流が形成されない。図 4-18 に断面 B (図 4-4) のドラフトチャンバー作業面における風速分布の結果を示す。作業面風速分布については面風速 0.5m/s 条件と 0.3m/s 条件において、全てのケースで、本解析の体積発熱条件なしとほぼ同様の結果となった。しかし、面風速 0.1m/s 条件においては、体積発熱により不均一性が増す結果となった。図 4-19 に断面 A におけるドラフトチャンバー内部無次元汚染物質濃度分布を示す。面風速 0.5m/s 条件と 0.3m/s 条件では、体積発熱の影響を大きく受けずに、ドラフトチャンバー上部の高濃度領域とドラフトチャンバー下部の低濃度領域が形成されていることが確認された。しかし、面風速 0.1m/s 条件では、ドラフトチャンバー内部での汚染物質の不均一性がなくなり均一に近づく結果となった。ドラフトチャンバー捕集性能においては、ドラフトチャンバー内部の汚染物質濃度分布の均一性は、捕集性能の低下を示す。また、Case6-3, Case7-3, Case8-3 では本解析で確認されなかった汚染物質のドラフトチャンバー外への漏洩も確認された。図 4-20 に各ケースで最も漏洩が確認された断面($z=2.15\text{m}$)における無次元汚染物質濃度分布を示す。作業者 CSP の有無や作業姿勢に関わらず同様の漏洩が確認できる。つまり、ドラフトチャンバー前面に CSP が存在しておらずに、不適切な排気風量においてドラフトチャンバー内に発熱源と揮発性の化学物質が放置された状況においても漏洩する危険性が示された。実験室側への漏洩は化学物質を取り扱う作業者のみならず、実験室内で別の作業を行っている作業員への曝露の危険性が示される結果となった。

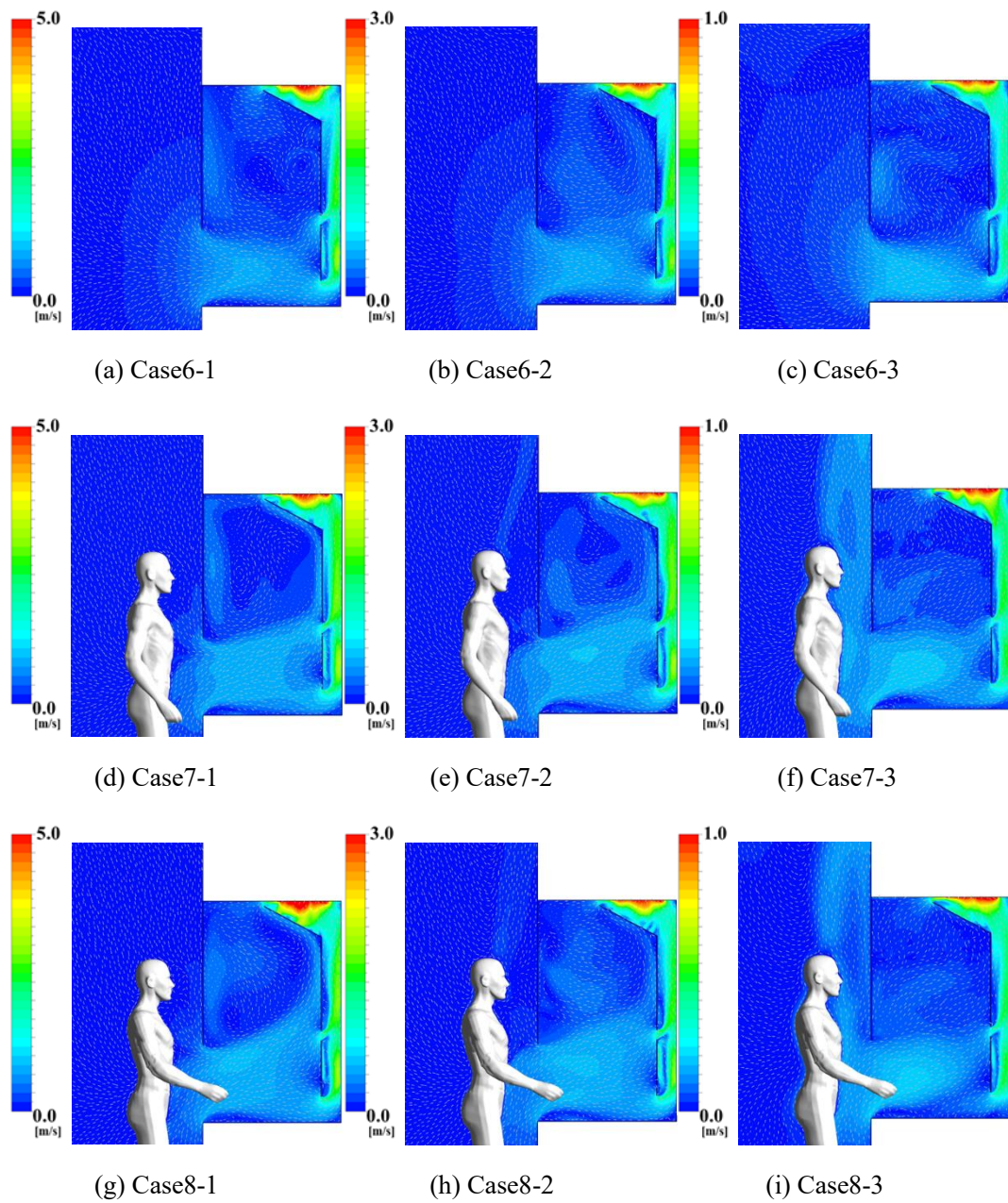
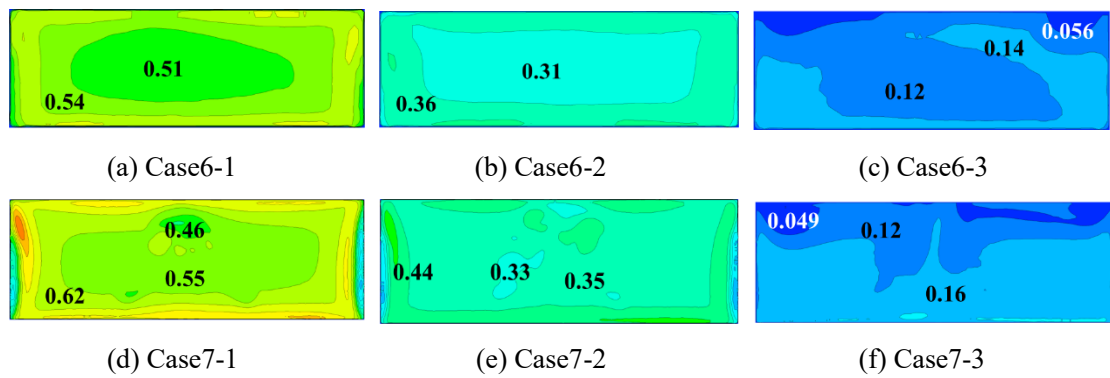


図 4-17 流れ場解析結果



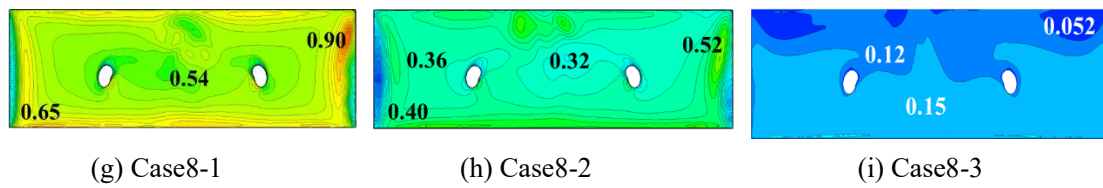


図 4-18 ドラフトチャンバー作業面（前面開口面）の気流分布

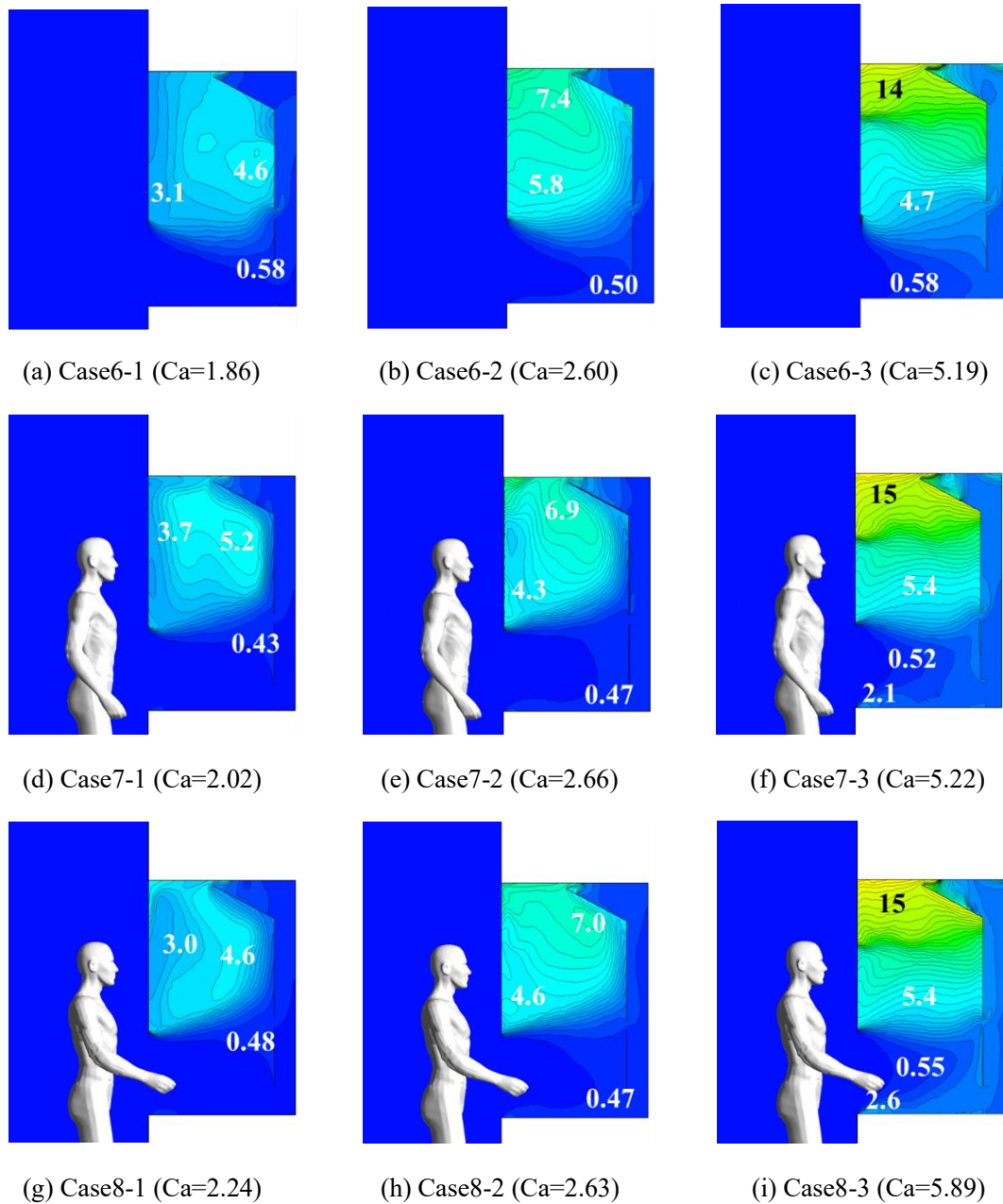


図 4-19 無次元汚染物質濃度分布

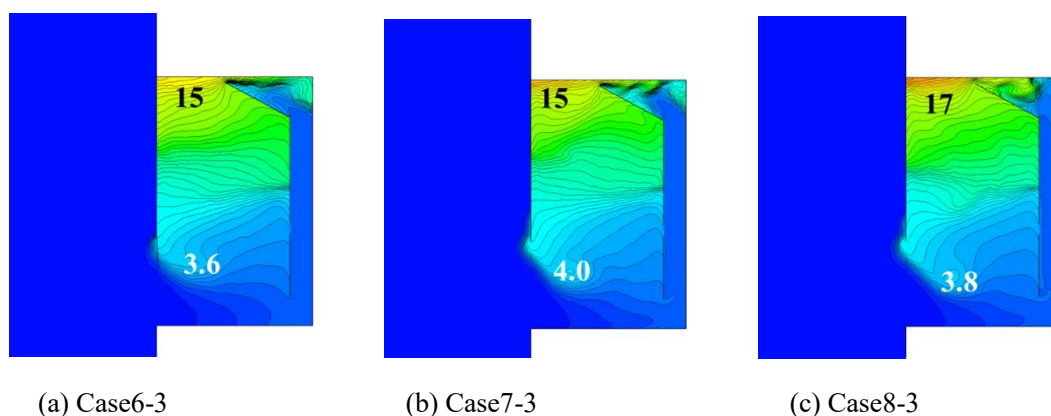


図 4-20 漏洩が確認された断面 ($z=2.15\text{m}$) における無次元汚染物質濃度分布

4.7 結語

本研究では、実験室に配置されたドラフトチャンバーの局所排気性能を定量的に評価するために、ドラフトチャンバー前面に作業者を想定した CSP を設置した CFD 解析モデルを作成し、各種換気効率指標を用いてドラフトチャンバー内に形成される不均一濃度場、換気効率分布を解析した。

本章で得られた知見を整理して以下に示す。

1) 適切な使用条件（作業面平均風速 0.5m/s ）では、ドラフトチャンバー内部に作業者の腕の一部を挿入している場合でも、ドラフトチャンバー内部に形成される循環流による汚染物質の封じ込め性能が機能することを確認した。不適切な使用条件（作業面平均風速 0.1m/s ）では、循環流による封じ込め性能が低下するとともに、作業者の腕の一部とドラフトチャンバー下部の作業台の間の領域に生じる滞留域により、汚染物質がドラフトチャンバー下部作業領域に留まる危険性を確認した。

2) 移流効果に加えて汚染物質の拡散効果の速度スケールも考慮に入れた NEV 解析より、ドラフトチャンバー作業開口面における汚染物質の輸送効率を評価した。ドラフトチャンバー作業開口面に腕の一部を挿入した作業者が存在し作業面平均風速 0.1m/s の条件においても、汚染物質の輸送方向は、移流方向と同様になり、ドラフトチャンバー作業開口面における高い局所排気性能を確認した。しかし、ドラフトチャンバー作業開口面において無次元 NEV 値が 1.0 を下回るポイントが多くなり、移流に対し、逆向きの乱流拡散効果が高くなることが示された。

3) ドラフトチャンバー作業開口面に腕の一部を挿入した作業者が存在し作業面平均風速 0.1m/s の条件において $L\text{-PFR}=0.59$ と最大になった。排気風量が低下するとともに、 $L\text{-PFR}$ は大きくなった。この結果より、ドラフトチャンバー内部空間においては、上部領域と下部

領域における換気性能が明確に分かれていることが確認された。

4) ドラフトチャンバーと作業者の距離を 0.1m と 0.05m に設定しドラフトチャンバー捕集性能を確認したところ、ドラフトチャンバーと作業者の距離は捕集性能に大きく影響を与えないことが確認された。

5) ドラフトチャンバー内部体積発熱条件設定で、熱源によるドラフトチャンバー捕集性能への影響を確認したところ、適切な使用条件（作業面風速 0.5m/s）では大きく影響を与えないことが確認された。しかし、作業面風速 0.1m/s のような低排気風量条件では、熱源の影響を受け汚染物質が実験室側へ漏洩することが確認された。

【参考文献】

- 4-1) 牟田諒太, 劉城準, 伊藤一秀, 実使用条件を想定したドラフトチャンバーの捕集性能評価 第 1 報 不適切使用条件を想定した排気風量低下時のドラフトチャンバーの捕集性能評価, 空気調和衛生工学会論文集, No.281, 2020.08, pp 19-26
- 4-2) Eunsu Lim, Kazuhide Ito and Mats Sandberg, New Ventilation Index for evaluating imperfect mixing condition- Analysis of Net Escape Velocity based on RANS Approach : Building and Environment, 61, pp45-56, March 2013
- 4-3) Eunsu Lim, Kazuhide Ito 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
- 4-4) Juyeon Chung, Eunsu Lim, Mats Sandberg, and Kazuhide Ito, Returning and net escape probabilities of contaminant at a local point in indoor environment, Building and Environment, 125 (2017) 67-76
- 4-5) Eunsu Lim, Juyeon Chung, Mats Sandberg and Kazuhide Ito, Influence of chemical reactions and turbulent diffusion on the formation of local pollutant concentration distributions, Building and Environment, 168 (2020) 106487
- 4-6) Eunsu Lim, Mats Sandberg and Kazuhide Ito, Returning Frequency of Pollutants for Local Domain in the presence of Returning and Recirculating Air Flow in Indoor Environment, Indoor Air, 2021, (doi.org/ 10.1111/ina.12803)
- 4-7) Shinsuke Kato, Kazuhide Ito, Shuzo Murakami, Analysis of Visitation Frequency through Particle Tracking Method based on LES and Model Experiment : Indoor Air, Volume 13, No.2, 2003.6, pp 182-193
- 4-8) M. Sandberg, Ventilation effectiveness and purging flow rate – A review, International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, University of Tokyo (1992)
- 4-9) Kazuhide Ito, Toward the development of an in silico human model for indoor environmental

design, Proceedings of the Japan Academy- Series B, Vol.92, No.7, 2016, pp 185-203

- 4-10) Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito, Numerical Prediction of Tissue Dosimetry in Respiratory Tract using Computer Simulated Person integrated with physiologically based pharmacokinetic (PBPK)-computational fluid dynamics (CFD) Hybrid Analysis, Indoor and Built Environment, 2018, Vol. 27(7) 877–88
- 4-11) Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito, Assessment of Transient Inhalation Exposure using in silico Human Model integrated with PBPK - CFD Hybrid Analysis, Sustainable Cities and Society, 40 (2018) pp 317–325

[本章に関連した研究業績]

・査読論文

牟田諒太, 鄭朱娟, 劉城準, 伊藤一秀 : 実使用条件を想定しドラフトチャンバーの捕集性能評価 第2報 ドラフトチャンバー内に形成される換気効率分布の詳細解析 : 空気調和・衛生工学会論文集, No.294, pp1-10, 2021.09

Ryota Muta, Juyeon Chung, Li Cong, Sung-Jun Yoo, and Kazuhide Ito : Pollutant capture efficiencies in and around the opening-surface of a fume hood under realistic conditions : Indoor and Built Environment, 2022.01

<https://doi.org/10.1177/1420326X211066538>

・国内学会

牟田諒太, 鄭朱娟, 劉城準, 伊藤一秀 : 作業者の作業位置・姿勢の影響を考慮したドラフトチャンバーの捕集性能評価 : 室内環境学会学術大会, 2021.12

第5章 マテリアルフロー分析と数値流体力学を併用した DEHP 個人曝露量予測

5.1 序

近年、室内環境中は、様々な化学物質により室内空気質汚染が懸念されている。厚生労働省は、入手可能な毒性にかかわる化学的知見から、ヒトがその濃度の空気を一生涯にわたって摂取しても、健康への有害な影響は受けないであろうと判断される値として、室内濃度指針値を制定しており、現段階で13種の揮発性有機化合物に対して室内濃度指針値を設けている。一般的に室内環境におけるリスク評価を行うためには濃度測定が不可欠であり、現場実測値を用いて間接的に評価を行う。しかし、実測調査のみで、日本国内全ての室内環境中濃度を経年的に実測することや将来予測などは現実的に不可能であり、実測調査のみに基づかないリスク評価手法の構築の必要性は高い。本研究では、厚生労働省が制定する室内濃度指針値 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ と規制されているフタル酸ジ(2-エチルヘキシル)（以下 DEHP と記す）を評価対象物質とし、実測調査のみに基づかない化学物質個人曝露量評価手法の構築を検討することを目的とする。

5.2 DEHP について

フタル酸エステルと称されるエステル化合物の一種である。1950 年代に DEHP とほぼ成分の同じ DOP の生産が開始された。DEHP は主に、塩化ビニルの可塑剤としてフィルムシート、農業用ビニル、電線被覆材、壁紙、建材等、幅広く使用されている。1998 年に、当時の環境庁が示した「環境ホルモン戦略計画 SPEED'98」の内分泌かく乱作用を有すると疑われる化学物質としてリストアップされたが、行政側のリスク評価の結果、内分泌かく乱化学物質ではないと判断された。しかし、2000 年に市販の弁当から DEHP が検出され、塩ビ製の調理用手袋からの移行が主原因であるとされた。その後、厚生労働省は食品添加物等への基準を一部改正し、DEHP は乳幼児（6 歳未満）が接触する可能性のあるおもちゃ全般を使用禁止とした。このような状況のもと、2005 年に、産業総合技術研究所（以下産総研と記す）により、ヒトの健康と環境中の生物に対する DEHP の詳細リスク評価が公表された。リスク評価書においては、DEHP の有害性エンドポイントをヒト健康リスク評価では精巣毒性と生殖毒性とした場合、日本においては、DEHP によるヒト健康リスクは懸念されるレベルになく、緊急のリスク削減対策を講じる必要はないと判断している。ヒトの健康リスクに関しては、DEHP の曝露はほとんどが食事経由の経口曝露とし、1 歳児の摂取量が最も高く、年齢とともに減少していくとされ、屋内外空气中 DEHP 濃度は寄与しないとされている^{5-1),5-2)}。しかし、DEHP を含む、準揮発性有機化合物 (SVOC) は、蒸気圧が低く、個体表面に吸着しやすい性質を有しており、室内環境中の浮遊粒子表面やハウスダストへの吸着が確認されている⁵⁻³⁾。また、実測により、ハウスダスト中 DEHP 濃度を測定している例もある^{5-4),5-5)}。このような化学的性質より、室内環境中において、DEHP 等の SVOC が原因物質となり、アレルギー症状や肺機能への影響や喘息症状などの報告もされており、室内空气中 DEHP の危険性も無視することはできない⁵⁻⁶⁾。

5.3 本研究で検討するフレームワーク

本研究で検討するフレームワークを図 5-1 に示す。まず、DEHP 含有製品の動的な Material Flow Analysis (MFA) を行う。MFA におけるシステム全体の流入量として用いる DEHP データは、主に、可塑剤工業統計データや可塑剤関連企業へのヒアリングから取得する。MFA より平均的な 1 住宅あたりの DEHP 蓄積量の推計を行う。また、DEHP 含有製品からの DEHP 放散量データを取得するためにマイクロチャンバー法 (JIS A1904) で測定を行う。これら、MFA とマイクロチャンバー放散実験結果を境界条件として用いて、一般住宅内における DEHP 室内濃度予測を行う。個人曝露量予測では、数値人体モデル・数値気道モデルを用いて、経気道・経皮曝露予測を行う。

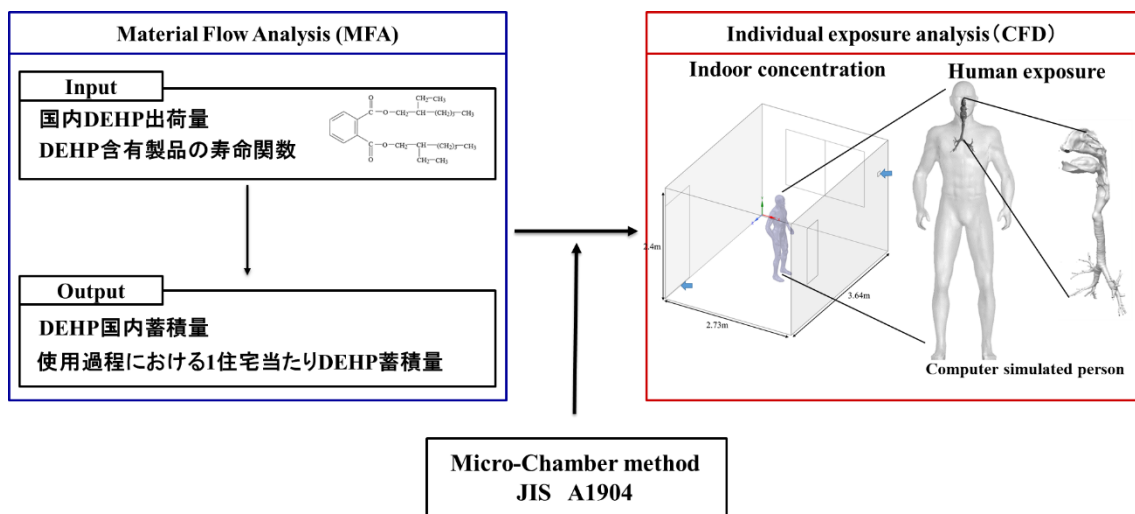


図 5-1 本研究のフレームワーク

5.4 研究手法

5.4.1 マテリアルフロー分析 (MFA)

本研究では、DEHP が可塑剤として使用される製品の、製造・使用・廃棄に至るライフサイクルを図 5-2 のように設定した。DEHP 含有製品は表 5-1 に示す通り、産総研の DEHP 詳細リスク評価書に準拠し 11 品目を想定した。

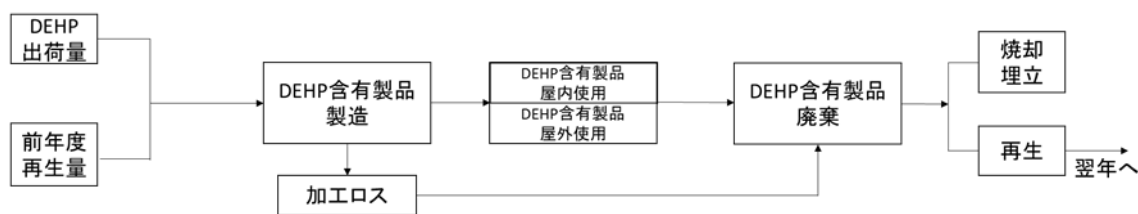


図 5-2 DEHP 含有製品のライフサイクル

表 5-1 DEHP 含有製品

用途	製品
一般フィルムシート	家具・装飾用, 各種カバー用, 玩具用
農業用ビニル	園芸・野菜用, 水稲用
レザー	家具用, 鞆・袋用, 衣料用
工業用原料	コンパウンド
電線被覆	
ホース・ガasket	ホース (ガーデン/農業/工業), ガasket (建築)
壁紙	
建材	床材
塗料・顔料・接着剤	シーリング剤, エマルジョン
履物	サンダル, 靴底
その他	マット, テープ, 手袋, 溶剤

5.4.1.1 DEHP 出荷量

化学工業統計では、可塑剤として DEHP を含むフタル酸ジオクチル (DOP) の統計値が報告されている。DEHP のみのデータは、1976 年以降から可塑剤工業より公表されている。そのため、1955 年～1975 年の DEHP 出荷量は、産総研の詳細リスク評価書 (DEHP) に準拠し DOP の販売量の 94% を DEHP 出荷量と仮定した。1976 年～1991 年の DEHP 出荷量は、産総研の詳細リスク評価書 (DEHP) に準拠した。1992 年～2019 年の DEHP 出荷量は、可塑剤工業へのヒアリング調査を行い、データを取得した (表 5-2)。

表 5-2 DEHP 出荷量の推移

年	出荷量 [t]	年	出荷量 [t]	年	出荷量 [t]	年	出荷量 [t]
1955	5,140	1972	203,699	1989	257,115	2006	177,670
1956	8,270	1973	204,239	1990	275,110	2007	184,349
1957	10,593	1974	167,893	1991	276,258	2008	162,520
1958	11,280	1975	176,893	1992	276,438	2009	123,859
1959	15,700	1976	172,353	1993	258,795	2010	140,389
1960	22,862	1977	190,508	1994	284,903	2011	128,772
1961	27,786	1978	223,740	1995	277,402	2012	130,251
1962	33,793	1979	237,334	1996	285,268	2013	128,793
1963	46,763	1980	224,760	1997	276,908	2014	118,371
1964	59,281	1981	203,854	1998	227,141	2015	120,808

1965	58,303	1982	200,865	1999	223,265	2016	115,936
1966	72,065	1983	207,777	2000	219,272	2017	114,556
1967	69,659	1984	225,084	2001	201,718	2018	103,499
1968	93,655	1985	228,314	2002	194,872	2019	95,410
1969	121,604	1986	239,392	2003	188,988		
1970	141,160	1987	227,907	2004	189,259		
1971	188,166	1988	243,097	2005	184,256		

5.4.1.2 DEHP 出荷量用途比率

DEHP 出荷量用途比率は、1976 年～2001 年のデータは、産総研の詳細リスク評価に準拠した。また、1975 年以前の用途比率のデータは存在しないため、1976 年～1999 年の用途比率の平均値を 1975 年以前の用途比率のデータとして用いた。2002 年～2019 年の用途比率データは、可塑剤工業へヒアリング調査を行い、データを取得した（表 5-3）。

表 5-3 DEHP 出荷量用途比率

	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
一般フィルム	14.9	19.2	14.4	16.9	15.9	14.8	14.8	14.5
農業用ビニル	11.1	9.1	8.1	10.8	11.7	13.3	13.3	11.5
レザー	7.9	11.4	14	10.9	10.2	10.4	10.4	9.8
工業用原料	20.9	21.7	21	23.4	22.5	22.5	22.5	22.9
電線被覆	10.3	11.2	10.6	9.7	10.3	10.4	10.4	10.4
ホース	7.4	7.6	6.6	8.2	8.8	6.9	6.9	7.8
床材	9.8	5.2	5.7	6.8	6.9	7.4	7.4	7.5
壁紙	6.5	3.4	3.8	4.6	4.6	5.0	5.0	5.0
塗料	4.0	3.5	5.7	3.1	3.1	3.4	3.4	3.5
履物	1.7	2.9	4.2	2.2	1.7	1.7	1.7	1.5
その他	5.5	4.8	5.9	3.7	4.3	4.3	4.3	5.6

1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
14.5	14.5	13.7	14	14.6	14.1	14.4	14.5	15.7	14.4	13.4
11.6	12.3	12.4	12.4	11.8	11.2	10.7	10	10.6	11.3	10.8
10.4	10.3	10.2	8.7	7.4	7.1	7.2	7.3	6	6.2	5.5
23.5	22.6	21.4	24	24.9	23.8	23.3	23.3	23.1	22.3	22.6
9.3	9.2	8.2	7.8	7.8	8.6	7.8	8.6	7.4	7.6	8.2
7.9	7.3	9.1	7.9	8.6	7.3	7.6	8.2	7.3	7.7	8
7.9	8.6	8.6	9.1	9.2	10.6	10.9	11.0	11.5	11.7	12.4
5.2	5.7	5.7	6.0	6.2	7.1	7.3	7.4	7.6	7.8	8.2

3.4	3.0	3.3	3.1	3.0	3.4	3.6	3.3	3.7	4	3.9
1.7	1.8	1.5	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0	1.4
4.6	4.7	5.9	6.1	5.7	5.8	6.2	5.4	6.3	6.0	5.8
1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
13.4	14.1	15.7	16	15.6	15.1	14.4	13.8	14.1	14.6	13.8
10.8	9.7	10.6	9.9	10.4	11	10.6	11.6	9.6	8.3	8.9
5.9	5.9	4.2	3.4	3.8	3.6	3.5	3.2	3.1	4.1	3.8
22.2	21.7	12.4	11.6	10.8	10.8	11.1	10.9	20.1	21.2	21.5
7.5	7.5	17.6	16.5	17.4	18.2	16.7	15.9	8.8	7.9	8.4
8	7.9	5.7	5.6	5.6	5.6	5.7	5.3	5	4.1	3.7
12.2	12.8	11.7	12.3	13.7	14.6	16.5	17.1	17.2	21	20
8.2	8.2	8.6	9.0	9.8	8.5	7.6	8.6	9.1	9.6	7.2
4.6	4.0	5.4	6.1	6.0	5.9	5.6	5.4	5.6	4.8	4.2
2.5	2.2	2.0	1.8	1.5	1.6	1.4	1.6	1.2	1.6	1.0
4.7	5.7	5.6	7.0	6.9	6.0	6.0	6.2	5.6	5.2	6.2
2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
13.1	13.5	14	15.2	14.6	14.8	16.2	16.6	17.9	16.1	14.7
9	8.9	7.2	6.8	6.2	6.9	6.3	5.9	6.3	5.5	4.9
3.2	3.1	3.7	3	2.6	2.6	2.4	1.8	1.8	2	1.5
21.3	21.6	19.8	15.4	17.2	16.1	17.4	16	18	16.5	16
9.8	8	8	10.3	10.5	10.5	10.6	40.2	8.9	11.1	11.4
3.2	3.1	3.6	4.8	4	4	4.8	5.4	4	4.4	3.5
19.2	24.4	25.2	24.8	23.6	25.4	22.1	23	24.1	22.7	26.3
11.0	8.5	9.9	10.4	11.5	10.7	12.6	12.6	11.8	14.2	15
3.5	3.0	2.7	3.6	3.9	3.9	3.5	3.3	3.3	2.9	2.4
0.9	0.5	1.0	0.8	1.1	1.1	1.1	1.5	1.4	1.6	1.4
5.8	5.3	4.8	4.8	4.8	3.9	3.1	3.9	2.6	3.1	3.0
2016			2017			2018			2019	
14.9			16.9			16.5			18.1	
5.7			5.3			6.5			6.7	
1.1			3.3			2			1.6	
15.4			15			12.9			12.9	
9.1			5.9			2.3			1.4	
3.4			2.6			4.1			3	
3.4			2.6			4.1			3	

16.4	16.3	18.8	16.8
2.5	2.4	2.0	1.4
1.3	0.8	0.7	0.8
3.6	3.5	3.2	3.5

5.4.1.3 DEHP 含有製品別のストック量と廃棄量の推計

DEHP 含有製品別の DEHP ストック量と耐用年数後に廃棄される DEHP 廃棄量の推計を産総研詳細リスク評価書に準拠して行う。

任意の年である y 年に出荷された製品中 DEHP の x 年後における廃棄量 $Q_{y,x}$ は,

$$Q_{y,x} = P_y f(x) \quad \cdots(5-1)$$

P_y は任意の年である y 年における DEHP 出荷量と $y-1$ 年の再生量の和から y 年の加工ロス量を減じた量であり, $f(x)$ は各 DEHP 含有製品の寿命関数である。

任意の年である z 年における各年に出荷された製品からの DEHP 廃棄量の合計 W_z は,

$$W_z = \sum_{y=1955}^z Q_{y,z-y} \quad \cdots(5-2)$$

任意の年である y 年に出荷された製品中 DEHP の x 年後におけるストック量 $R_{y,x}$ は,

$$R_{y,x} = P_y - \sum_{k=0}^x Q_{y,k} \quad \cdots(5-3)$$

任意の年である z 年における各年に出荷された製品からのストック量合計は,

$$S_z = \sum_{y=1955}^z R_{y,z-y} \quad \cdots(5-4)$$

推計の際には, 以下の仮定をした。

- ・ DEHP は出荷された年にすべて最終製品へ加工し, 出荷される。
- ・ 加工ロス量は他のプラスチック製品と同じ比率であり, 年により比率の変化はない。表 5-4 にプラスチック循環利用協会の統計データより得られる 1996 年～2018 年の加工ロス率を示す⁵⁻⁷⁾。平均値 5.45%が各製品への加工時にロスとして廃棄される。
- ・ 最終製品の廃棄後は, マテリアルリサイクルによる再生製品は翌年に出荷され, 全て国内で使用される。

表 5-4 プラスチック製造時の加工ロス率

年	加工ロス[万 t]	国内樹脂製品消費量 [万 t]	加工ロス率[%]
1996	56	1081	4.9
1997	56	1136	4.7
1998	62	1020	5.7
1999	65	1081	5.7
2000	66	1098	5.7
2001	65	1096	5.6
2002	63	1067	5.6
2003	66	1101	5.7
2004	68	1136	5.6
2005	69	1159	5.6
2006	66	1120	5.6
2007	66	1103	5.6
2008	65	1089	5.6
2009	48	843	5.4
2010	57	970	5.6
2011	57	987	5.5
2012	55	960	5.4
2013	55	966	5.4
2014	55	977	5.3
2015	55	964	5.4
2016	55	980	5.3
2017	57	1012	5.3
2018	57	1029	5.2

5.4.1.4 寿命関数

本研究では寿命関数としてワイブル分布を使用する.

$$f(x) = \left(\frac{u}{v^u}\right) x^{u-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{v}\right)^u\right] \quad \cdots(5-5)$$

耐用年数とワイブル分布のパラメータは, 産総研の詳細リスク評価書に準拠し, 表 5-5 のように設定した.

表 5-5 耐用年数とワイブル分布パラメータ ⁵⁻¹⁾

用途	平均耐用年数	u	v
一般フィルム	1~15	1.5	7.22
農業用ビニル	0.5~2	2.93	1.38
レザー	5~20	2.93	13.8
工業原料	5~20	2.93	13.8
電線被覆	10~30	3.70	22.3
ホース	3~10	3.38	7.23
建材	5~20	2.93	13.8
壁紙	5~20	2.93	13.8
履物	0.5~5	1.77	2.69
塗料	5~20	2.93	13.8

5.4.1.5 DEHP 含有製品再生処理

再生処理された DEHP 含有製品は、用途分類の一般フィルムシート、電線被覆、床材、履物へ再生利用されるとし、各年の再生量の総量を翌年の DEHP 出荷量に按分し、翌年の製造量に上乗せをした。各用途分類の再生率は以下に示す。

- ・一般フィルムシート、工業用原料、加工ロス

プラスチック製品と同様と仮定し、プラスチック循環利用協会データから得られる、1996 年～2018 年のプラスチックマテリアルリサイクル率を採用した ⁵⁻⁷⁾。1995 年以前は、全て 10%のマテリアルリサイクル率とした（表 5-6）。

表 5-6 プラスチックのマテリアルリサイクル率

年	リサイクル率[%]	年	リサイクル率[%]
～1995	10	2007	21
1996	11	2008	21
1997	12	2009	22
1998	12	2010	23
1999	14	2011	22
2000	14	2012	22
2001	14	2013	22
2002	15	2014	22
2003	16	2015	22
2004	18	2016	23

2005	18	2017	23
2006	20	2018	23

・農業用ビニル

農林水産省の園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査より、1983 年～2018 年の再生処理率を算出した。データの存在しない 1982 年以前は、全て 15%の再生処理率とした（表 5-7）。また、農林水産省のデータは、隔年データであるため、データの無い年は、その年の、前年と後年の平均値とした⁵⁻⁸⁾。

表 5-7 農業用ビニルの再生処理率

年	リサイクル率[%]	年	リサイクル率[%]	年	リサイクル率[%]
~1982	15.0	1995	27.7	2008	63.1
1983	19.7	1996	27.8	2009	65.2
1984	17.3	1997	27.9	2010	69.9
1985	14.9	1998	31.4	2011	72.3
1986	16.9	1999	34.8	2012	74.6
1987	19.0	2000	35.8	2013	75.3
1988	20.6	2001	36.7	2014	76.0
1989	22.3	2002	42.4	2015	74.3
1990	22.7	2003	48.1	2016	72.5
1991	23.1	2004	52.5	2017	73.5
1992	24.5	2005	56.9	2018	74.5
1993	25.9	2006	59.0		
1994	26.8	2007	61.0		

・電線被覆

環境省のデカブロモジフェニルエーテル及び短鎖塩素化パラフィンの環境リスク評価より、電線被覆材は、2001 年以前は 43%がマテリアルリサイクルとして再資源化されていたが、2002 年以降は全てエネルギーリカバリーとして再生処理されている。そのため、2001 年以前のマテリアルリサイクル率は 43%、2002 年以降は 0%とした⁵⁻⁹⁾。

・壁紙

日本壁装協会が 2008 年に行った、塩ビ系壁紙マテリアルフロー結果によると、塩ビ系壁紙の廃棄量のうち 2.9%がマテリアルリサイクルされている⁵⁻¹⁰⁾。そのため、本研究では、全て 2.9%として推計を行った。

・ホース、ガスケット

ホース、ガスケットのマテリアルリサイクルデータは見当たらず、日本ビニルホース協会 HP によると、ホースについては、今後マテリアルリサイクルを推進する方向で検討を進めると表記があるため、現段階ではマテリアルリサイクル率 0%と仮定した⁵⁻¹¹⁾。

・床材・レザー

床材・レザーのマテリアルリサイクルのデータは見当たらず、産総研詳細リスク評価でも、床材の再生処理は考慮されていないため、本研究でも、リサイクル率 0%と仮定した。

5.4.1.6 換算係数

本研究では、システム全体の流入量を質量ベースの DEHP 出荷量で推計しており、大気排出量を推計する際には、質量ベースから面積ベースに変換する必要がある。産総研のリスク評価書に準拠し、換算係数を求める。塗料用途に関しては、塩ビ系製品でないため、同様の換算係数算出が困難であり、出荷量も少ないことから、産総研リスク評価書同様、推計を行わない。

質量ベースから面積ベースへの換算には、出荷量が面積ベースのデータで唯一存在する壁紙を基準とする。また、ビニル壁紙には主に DEHP と DINP が可塑剤として使用されている。そのため、本研究では可塑剤は 2 種類と仮定し、DEHP と DINP の国内出荷量の比により、DEHP が可塑剤として使用されているビニル壁紙出荷量を推計する。

ビニル壁紙出荷量は日本壁装協会⁵⁻¹²⁾、DEHP と DINP データ⁵⁻¹³⁾ は可塑剤工業会より、入手可能な 2010～2018 のデータを用いて以下の式で換算係数を算出した（表 5-8）。

換算係数（壁紙）[m²/t]

$$= \text{ビニル壁紙出荷面積}[\text{m}^2] \times \text{DEHP 比率} \div \text{DEHP 出荷量（壁紙）}[\text{t}] \quad \cdots \cdots (5-6)$$

表 5-8 換算係数（壁紙）

年	ビニル壁紙出荷量[m ²]	DEHP 比率[%]	換算係数[m ² /t]
2010	579387971	65	26574
2011	613519945	66	26337
2012	609344866	66	25933
2013	632936363	67	29549
2014	589189882	65	24084
2015	590526176	63	21760
2016	611845492	60	20496
2017	617799135	55	19077
2018	619307519	52	17641

製品用途別では、面積ベースでの出荷量データが取得できるのは壁紙のみであるため、他の製品用途に関しては、厚さと DEHP 含有率を壁紙の値と比較し、以下の式で算出した。

換算係数（用途別） $[\text{m}^2/\text{t}] = \text{換算係数（壁紙）} [\text{m}^2/\text{t}] \times (\text{DEHP 含有率（壁紙）} / \text{DEHP 含有率（用途別）}) \times (\text{厚さ（壁紙）} [\text{mm}] \times \text{厚さ（用途別）} [\text{mm}])$

なお、産総研リスク評価書より各製品用途分類別の製品厚さ、DEHP 含有量と、算出した換算係数を表 5-9 に示す

表 5-9 換算係数（用途別）

用途	厚さ[mm]	DEHP 含有率[%]	換算係数 $[\text{m}^2/\text{t}]$
一般フィルム	0.2	25	13157
農業用ビニル	0.09	28	26105
レザー	1	40	1645
工業用原料	1.5	30	1462
電線被覆材	1	30	2193
ホース	2	30	1096
建材	2.5	20	1316
壁紙	0.14	20	23495
履物	2	40	822

5.4.2 マイクロチャンバー放散実験

マイクロチャンバー放散実験(JIS A1904)より DEHP 含有製品からの放散量測定を行う。実験に用いるマイクロチャンバーは耐熱ガラスで容量 630ml である。放散量測定には放散実験と加熱脱着実験に分けられる。放散実験と加熱脱着実験の概要図は図 5-3 に示す。第 1 段階の放散実験では、DEHP 含有製品から放散される SVOC をチャンバー内部表面に付着させる。試験条件を温度 28℃、相対湿度 50%RH に設定した高温高湿槽で 24 時間行う。チャンバー排気口に TenaxTA 捕集管を装着し測定を行う。24 時間放散実験終了後、マイクロチャンバーに設置したサンプル片を取り除き、マイクロチャンバーを加熱脱着装置に設置し、第 2 段階の加熱脱着実験を行う。室温状態においてマイクロチャンバー内をヘリウムガスで十分にガス置換を行い、加熱脱着装置温度を室温から毎分 10~20℃の速度で昇温し、220℃で 60 分程度保持する。設置した TenaxTA 捕集管への吸引は、換気開始から加熱脱着が十分に終了したと考えられるまで行う。表 5-10 に放散試験条件と加熱脱着試験条件を示す。

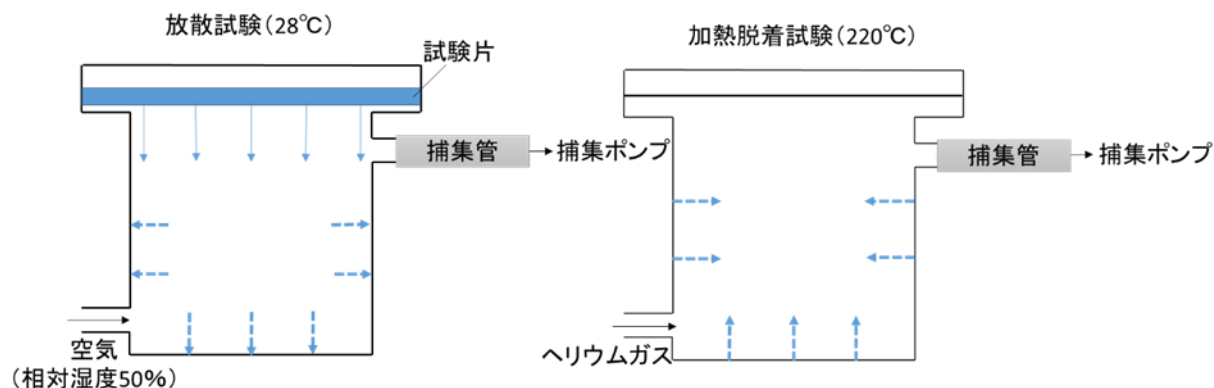


図 5-3 マイクロチャンバー放散実験概要図

表 5-10 放散試験・加熱脱着試験条件

放散試験	温度	28℃
	相対湿度	50%
	換気量	15ml/min
	供給流量	30ml/min
	ベントライン	15ml/min
	サンプリング時間	24 時間
	建材表面積	0.0053m ²
加熱脱着試験	オープン温度	220℃
	供給ガス量（ヘリウム）	90ml/min
	吸引量	60ml/min
	ベントライン	30ml/min
	運転時間	1 時間

5.4.2.1 測定サンプル

JIS A1940 に従い測定できると考えられる DEHP 含有製品を 7 サンプル選定し測定を行う。測定したサンプルは壁紙として PVC 壁紙 2 種、床材として複層ビニルシート 1 種、クッションフロア 1 種、フィルムシートとして窓飾りシート 1 種、レザーとしてレザークロス 1 種、電線被覆材として絶縁テープ 1 種とした（表 5-11）。

表 5-11 サンプル概要

サンプル番号	サンプル種類	DEHP 含有率[%]
①	PVC レザークロス	0.2
②	窓飾りシート（一般フィルム）	-
③	塩ビ壁紙 A	10.1

④	塩ビ壁紙 B	7.0
⑤	クッションフロア (床材)	23.3
⑥	複層ビニルシート (床材)	15.0
⑦	絶縁テープ (電線被覆)	-

5.4.2.2 分析方法

分析対象物質は 2-Ethylhexanol(2EH), Dodecamethylcyclhexasiloxane(D6), Butylated hydroxitoluene(BHT), Diethyl phthalate(DEP), Hexadecene(C16), Tributyl phosphate(TBP), Tris(2-Ethylhexyl)Phosphate(TCEP), Dibutyl adipate(DBA), icosane(C20), Triphenylphosphate(TPP), Diortyl adipate(DOA), Diethyl phthalate(DEHP)である。表 5-12 に GC/MS の分析条件等を示す。

表 5-12 GC/MS の分析条件

使用機器	Agilent Technologies : 6890/5973inert
加熱脱離部 (TD)	GERSTEL : TDS
分析カラム	Agilent Technologies : DB-1MS (30m×0.25mm×0.25μm)
オープン温度	50°C(5min)⇒10°C/min⇒320°C(5min)
MS スキャン条件	30~550
TDS 加熱脱離条件	40°C⇒60°C/min⇒280°C(10min)
Transfer 温度	300°C
2 次トラップ温度	-60°C⇒⇒⇒325°C(5min)

5.4.3 DEHP 個人曝露量予測

5.4.3.1 数値解析概要

フレームワークによる個人曝露量予測のケーススタディを実施することで、DEHP 個人曝露量予測を例証的に示す。解析モデルを図 5-4 に示す。日本建築学会が示す標準住宅モデル内の 1 部屋を想定する。解析モデルに流入する換気の流入口を換気口(0.09m×0.09m)とする。第三種換気を想定し、排気口を入口ドア下部(0.91m×0.015m)とした。

数値解析の詳細条件設定を表 5-13 に示す。Case1 は、MFA で推計される 1 住宅に蓄積していると考えられる DEHP 含有製品が 1 部屋に集中した環境を想定する。つまり、解析モデルの床面・壁面・天井面・すべてに DEHP 含有製品を使用した、本解析で考えられる最もワーストケースを想定する。Case1 では、それぞれの DEHP 放散量は、マイクロチャンバー放散実験結果より得られる放散速度のうち、放散速度の大きいデータを使用する。Case2 と Case3 では、現実的な環境として壁面のみ DEHP 含有製品を使用した環境を想定する。Case2 では、壁面からの DEHP 放散量はマイクロチャンバー放散実験結果の壁紙の最大値を使用する。Case3 では、マイクロチャンバー放散実験結果の壁紙の平均値を使用

する。Case2 と Case3 では、DEHP の吸着性を有する化学的性質を考慮するために、天井面と床面の表面条件を濃度 0（Perfect sink）条件とする。

全てのケースにおいて、換気回数による DEHP 曝露量の変化を考察するために換気回数のみを 3 段階変化させる。

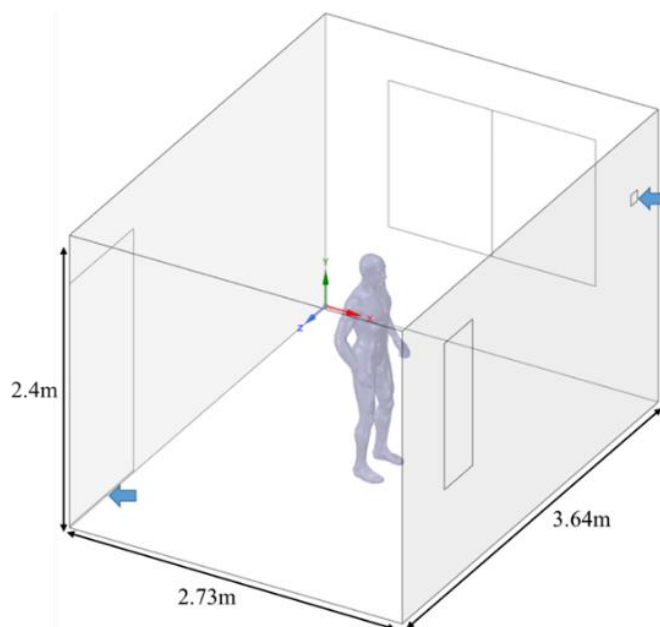


図 5-4 解析モデル

表 5-13 数値解析ケース設定

Case		換気回数 [h]	流入速度 [m/s]	DEHP 放散速度[$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$]		
				床面	壁面	天井面
1	1-1	0.5	0.41	マイクロチャンバー放散実験結果の最大値		
	1-2	1.0	0.82			
	1-3	1.5	1.23			
2	2-1	0.5	0.41	吸着面	マイクロチャンバー放散実験結果の最大値	吸着面
	2-2	1.0	0.82			
	2-3	1.5	1.23			
3	3-1	0.5	0.41	吸着面	マイクロチャンバー放散実験結果の平均値	吸着面
	3-2	1.0	0.82			
	3-3	1.5	1.23			

5.4.3.2 数値人体モデル CSP と数値気道モデルを用いた曝露解析

解析モデル中心に数値人体モデルを配置する^{5-14),5-15),5-16)}。数値人体モデルは、代謝に伴う生理発熱を再現するため Fanger による熱モデル(1-Node Model)を組み込む⁵⁻¹⁷⁾。

$$T_{sk} = 309.4 - (0.054 + R_{cl})Q_t \quad \cdots \cdots (5-6)$$

ここで、 T_{sk} [K]は皮膚表面温度、 Q_t [W/m²]は顕熱放散量、 R_{cl} [m²K/W]は衣服による熱伝達量を示す。本解析では 0.155[m²K/W]とした。

数値気道モデルは、気道内壁面第一メッシュを壁座標 $y^+ < 1$ を満たすように設定した上でテトラメッシュを用いて約 750 万メッシュで分割している。気道モデル内の流れ場を対象としたメッシュ依存性の検討、流れ場予備解析を実施している^{5-17),5-18)}。

本解析では、定常呼吸を仮定し、呼吸器官として鼻を想定する。数値気道モデル解析は、室内濃度解析結果から数値人体モデル鼻腔開口面プロファイルを取得し、数値気道モデルの流入境界条件として与えることで数値気道モデル内の DEHP 曝露解析を実施する。DEHP 化学的性質を考慮するために、数値人体モデル表面・数値気道モデル表面条件を濃度 0 (Perfect sink) 条件とした。数値解析の境界条件を表 5-14、表 5-15 に示す。

表 5-14 解析モデル数値解析条件

Mesh	2,350,148
Turbulence model	SST k- ω model
Scheme	Second order upwind
Inflow Boundary	U_{in} =表 5-13 $T=301K$ $k_{in}=3/2(U_{in} \times 0.1)^2$ Nose Breathing(steady): $Q=7.5L/min$
Outflow Boundary	Pressure outlet
Wall Treatment	Velocity: no slip Temperature: adiabatic
Skin surface Treatment	Velocity: no slip Temperature calculated by 1-node model
DEHP	Diffusion coefficient: $D=3.7 \times 10^{-6} m^2/s$

表 5-15 気道モデル数値解析条件

Mesh	7,510,215
Turbulence Model	Low Re k- ϵ model
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	Nose Breathing(steady): $Q=7.5L/min$ $k_{in}=3/2(U_{in} \times 0.1)^2$

	$\varepsilon_{in}=C_{\mu}^{3/4} k_{in}^{3/2} l_{in}$ Contaminant: C=室内濃度解析結果
Outflow Boundary	$U_{out} k_{out} \varepsilon_{out}=\text{gradient Zero}$
Wall Treatment	Velocity: no slip T=309.8K

5.5 解析結果

5.5.1 マテリアルフロー分析結果

5.5.1.1 再生処理を考慮した出荷量

再生処理まで考慮した DEHP 出荷量の推移を図 5-5 に示す。DEHP 出荷量は、DEHP が出荷され始めた 1950 年代から継続的に増加し、1996 年に最大値の約 294,000 トンとなった。1996 年から 2019 年にかけて約 62%減少した。製品別では、室内環境において DEHP の主な発生源と考えられる壁紙や建材の出荷量は 1996 年から 2019 年にかけて大きな変化はなかった。

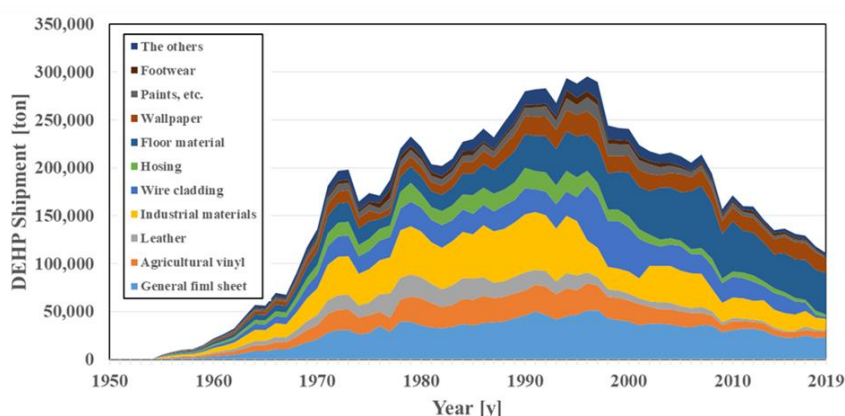


図 5-5 DEHP 出荷量推移

5.5.1.2 最終製品使用段階ストック量（質量ベース）

最終製品使用段階ストック量の計算結果を図 5-6 に示す。1950 年代から増加し、1997 年に約 2,700,000 トンと最大になった。その後、減少し 2019 年には約 1,800,000 トンとなった。しかし、壁紙や建材のストック量に着目すると 1996 年から 2019 年までストック量は減少傾向にない結果となった。

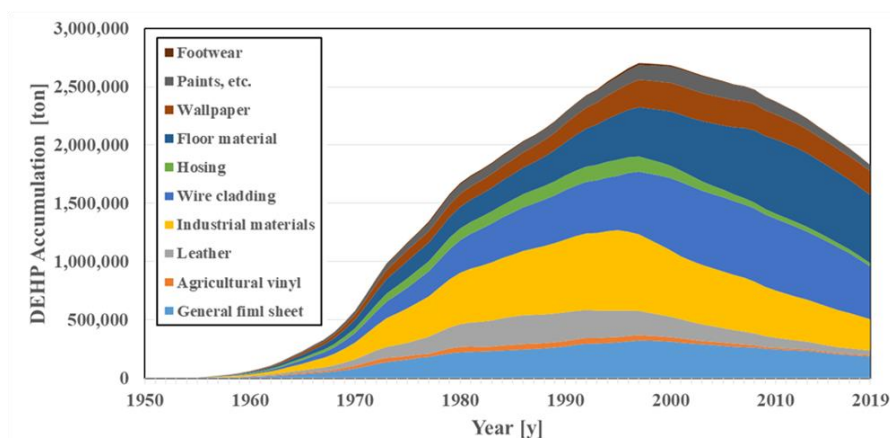


図 5-6 最終製品使用段階ストック量（質量ベース）

5.5.1.3 最終製品使用段階屋内ストック量（面積ベース）

最終製品使用段階での屋内ストック量を，産総研リスク評価書より，屋内外での使用比率(表 5-16)を使用し算出した．それら屋内ストック量（質量ベース）を，表 5-8 に示す換算係数を用いて，屋内ストック量（面積ベース）へと換算した結果を図 5-7 に示す．

2019 年に着目すると壁紙が全体の 53%，一般フィルムが 25%，電線被覆材が 9.2%，建材が 8.4% 占める結果となった．本研究の評価対象である，1 住宅におけるストック量を推計するために，住宅・非住宅使用比率を推計し屋内ストック量（図 5-7）に乗じることで住宅ストック量を算出後，総務省が公開する住宅・土地統計調査より日本における総住宅数を用いることで，1 住宅あたりのストック量推計を行った（本手法を簡易法と呼ぶ）．各製品の住宅使用比率の詳細な算出方法は表 5-17～表 5-19 に示す．しかし，屋内ストック量上位 4 製品のうち，電線被覆材は住宅使用比率が推計不可能であったため壁紙と一般フィルムと建材の 3 製品の推計を行った．日本における総住宅数の最新データ 2018 年に着目すると，1 住宅あたり壁紙が 50.37m²，一般フィルムが 12.99m²，建材が 9.58m² となった．

表 5-16 各製品別の屋内外使用比率⁵⁻¹⁾

用途	屋内使用比率 (%)	屋外使用比率 (%)
一般フィルム	92.5	7.5
農業用ビニル	0.0	100
レザー	100	0.0
工業用原料	81.4	18.6
電線被覆材	84.0	16.0
ホース	78.8	21.2
建材	100	0.0
壁紙	100	0.0
履物	0.0	100

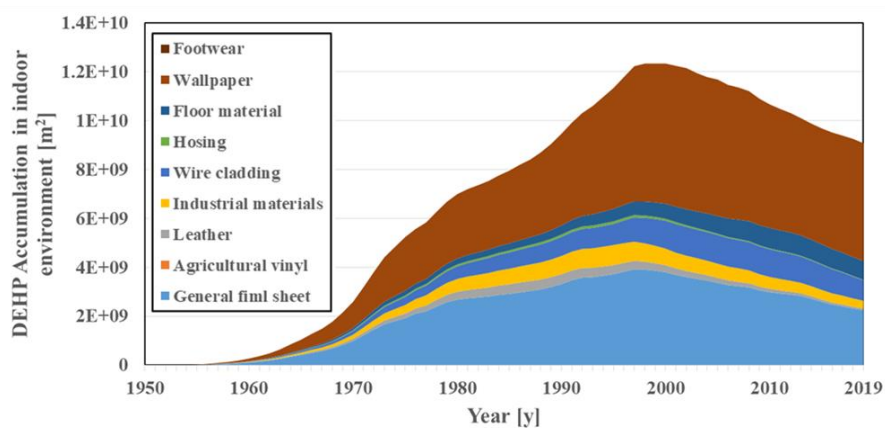


図 5-7 屋内ストック量（面積ベース）

表 5-17 一般フィルム用途塩ビ樹脂需要量⁵⁻¹⁾

用途分類		需要量[レジントン]	使用場所
雑貨用	玩具用	1,390	屋内
	文具用	12,250	屋内
	家具・装飾用	3,830	屋内
	袋物用	10,380	屋内
	その他	17,410	屋内
包装用	ストレッチフィルム	43,840	屋内
	シュリンクフィルム	4,300	屋内
	繊維用	1,960	屋内
	機械機器・弱電用	-	屋内
	肥料袋用	-	屋内
	その他	3,950	屋内
工業用		8,010	屋外
建材用	木材被覆用	6,600	屋内
	金属被覆用	5,810	屋内
	紙・布被覆用	1,450	屋内
	その他	8,330	屋内
その他	ターボリン	10,380	外／内
計		139,890	

※住宅使用は雑貨用のみと仮定し一般フィルム住宅使用比率は 35%とした

表 5-18 塩ビ系壁紙住宅使用比率⁵⁻²⁰⁾

	住宅	非住宅		住宅	非住宅
2003	0.66	0.34	2010	0.69	0.31
2004	0.68	0.32	2011	0.63	0.38
2005	0.70	0.30	2012	0.63	0.37
2006	0.64	0.36	2013	0.63	0.38
2007	0.67	0.33	2014	0.64	0.36
2008	0.64	0.36	2015	0.65	0.35
2009	0.69	0.31			

※2003~2015 の住宅使用比率の平均値 65%とした

表 5-19 ビニル系床材国内出荷実績推移データ(千 m²)⁵⁻²¹⁾

	2008	2009	2010	2011
コンポジッションビ ニル床タイル	5,500	4,200	3,900	3,800
複層ビニル床タイル	4,800	3,900	3,800	4,100
ビニル床シート	7,800	7,300	7,100	6,900
防滑性ビニルシート	9,800	8,600	8,200	8,500
クッションフロア	24,600	22,600	21,600	22,600
インレイドシート	440	410	300	300
その他の塩ビシート	7,200	6,900	7,900	8,600
合計	60,140	53,190	52,800	54,800
	2012	2013	2014	2015
コンポジッションビ ニル床タイル	2,000	3,600	3,400	3,610
複層ビニル床タイル	4,400	4,700	4,800	4,885
ビニル床シート	7,500	7,300	7,100	6,831
防滑性ビニルシート	9,600	9,900	10,100	9,599
クッションフロア	22,300	22,700	22,600	21,421
インレイドシート	400	300	300	154
その他の塩ビシート	10,200	9,500	10,900	11,477
合計	56,400	58,000	59,200	57,977
	2016	2017	2018	2019
コンポジッションビ ニル床タイル	3,781	3,529	3,243	2,706

複層ビニル床タイル	5,525	5,716	5,452	5,617
ビニル床シート	6,279	6,333	5,876	5,646
防滑性ビニルシート	9,258	9,278	8,929	9,111
クッションフロア	21,855	21,216	20,706	20,581
インレイドシート	176	231	174	234
その他の塩ビシート	10,991	11,425	10,549	9,825
合計	57,865	57,728	54,929	53,720

※複層ビニルシート、ビニル床シート、クッションフロア、その他塩ビシートが住宅で使用されると仮定して住宅使用比率は77%とした

5.5.2 マイクロチャンバー放散実験結果

マイクロチャンバー放散実験により得られた放散量結果を表 5-20 に示す。サンプル毎の放散実験の測定量と、加熱脱着実験の測定量を示している。また、※については検量線の範囲を超えているために参考値となる。図 5-8 に全サンプルの GC/MS のクロマトグラムを示す。

DEHP が検出されたサンプル番号①③④⑤⑥では、ほとんどが加熱脱着試験において検出されており、吸着性を有する DEHP の化学的性質を示す結果となった。一般フィルムを想定したサンプル②と、電線被覆材を想定したサンプル⑦は DEHP の検出は確認できなかったため、可塑剤として DINP 等が使用された製品であった可能性が高い。

放散速度は次式により算出し、結果を表 5-21 に示す。

$$\frac{(\text{放散試験放散量} + \text{加熱脱着試験放散量}) - \text{平均ブランク量}}{\text{サンプル表面積} \times \text{測定時間}} \times \frac{1}{1000} \dots\dots(5-7)$$

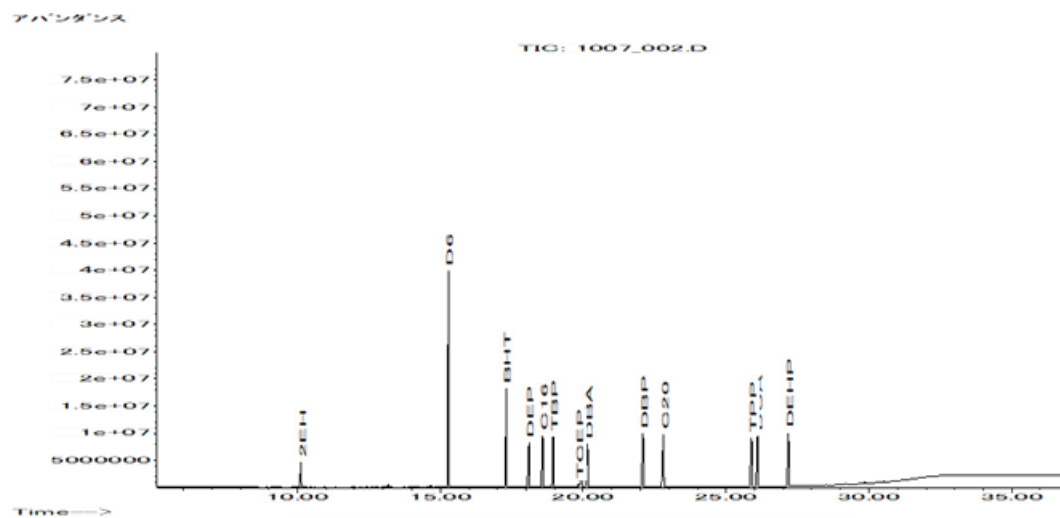
塩ビ壁紙 A（サンプル③）と塩ビ壁紙 B（サンプル④）の放散速度はそれぞれ $6.75\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 、 $19.85\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ となった。建材を想定した、クッションフロア（サンプル⑤）と複層ビニルシート（サンプル⑥）の放散速度はそれぞれ $16.86\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 、 $13.40\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ となった。DEHP 放散速度測定の前研究では、Fujii らは壁紙からの放散速度 $1.2\sim 6.9\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 、建材からの放散速度 $0.79\sim 30\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ と報告している⁵⁻²²⁾。また、Kim らは、建材からの放散速度 $3.39\sim 22.1\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ と報告している⁵⁻²³⁾。本マイクロチャンバー放散実験と前研究の値を比較すると、塩ビ壁紙 B は前研究の値より大きい。塩ビ壁紙 A と建材 2 種の放散速度は前研究の値の範囲内となった。

マイクロチャンバー実験結果と前研究の値より、DEHP 個人曝露量予測の数値解析の境界条件としては、Case1 では、壁面と床面からの放散速度を、それぞれマイクロチャンバー放散実験の最大値 $19.85\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ と $16.86\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ を使用する。Case2 では、壁面からのみ DEHP が発生するものとしマイクロチャンバー放散実験の壁紙の最大値 $19.85\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ を使用する。Case3 も同様に、壁面からのみ DEHP が発生するものとしマイクロチャンバー放

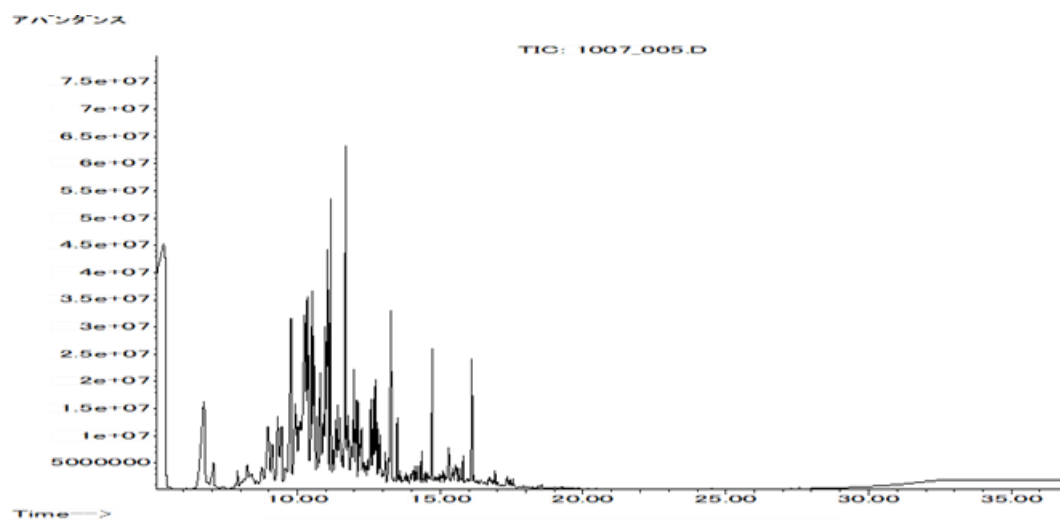
散実験の壁紙の平均値 $13.3\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ を使用する。

表 5-20 マイクロチャンバー放散実験データ(ng)

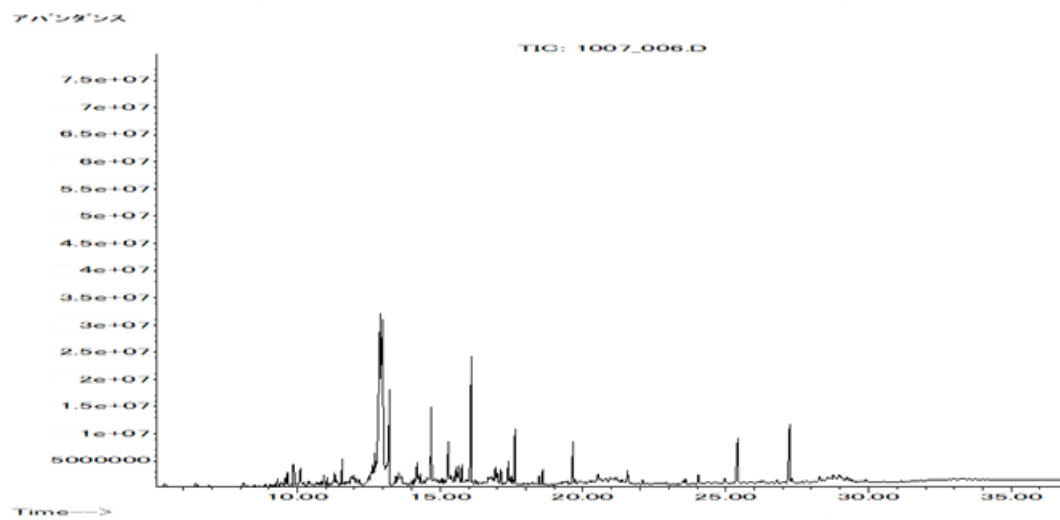
番号	①		②		③		④		⑤	
測定項目	放散	加熱	放散	加熱	放散	加熱	放散	加熱	放散	加熱
2EH	※598	183	17	11	274	329	※1441	73	427	365
D6	11	19	<5	<5	6	<5	5	<5	6	6
BHT	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	8	<5
DEP	<5	<5	<5	<5	8	<5	<5	<5	<5	<5
C16	<5	16	<5	<5	435	※523	7	<5	<5	<5
TBP	<5	<5	<5	<5	11	<5	<5	<5	<5	<5
TCEP	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
DBA	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
DBP	<5	6	<5	<5	<5	18	<5	<5	<5	16
C20	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	24	<5	<5
TPP	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
DOP	<5	<5	<5	<5	<5	8	<5	6	<5	<5
DEHP	<5	118	<5	<5	<5	※862	<5	※2529	<5	※2148
	⑥		⑦		ブランク		ブランク		トラベル	
	放散	加熱	放散	加熱	1-B-A	1-B-H	2-B-A	2-B-H	TB1	TB2
2EH	5	57	20	<5	212	91	275	82	<5	<5
D6	6	6	34	<5	<5	9	7	<5	<5	<5
BHT	<5	<5	15	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
DEP	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
C16	6	14	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
TBP	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
TCEP	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
DBA	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
DBP	<5	12	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
C20	<5	100	<5	<5	<5	<5	<5	76	<5	<5
TPP	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
DOP	<5	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
DEHP	<5	※1708	<5	<5	<5	<5	<5	7	<5	<5



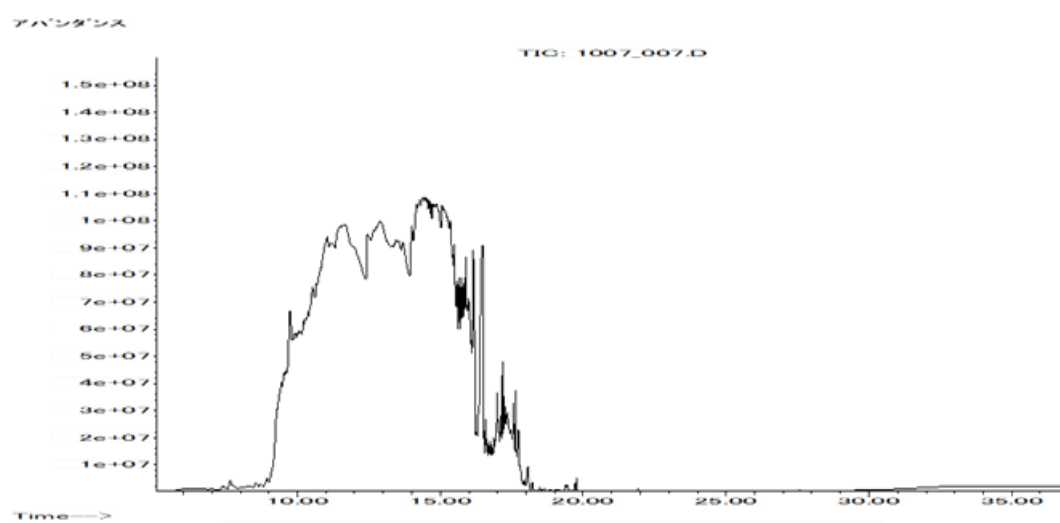
STD



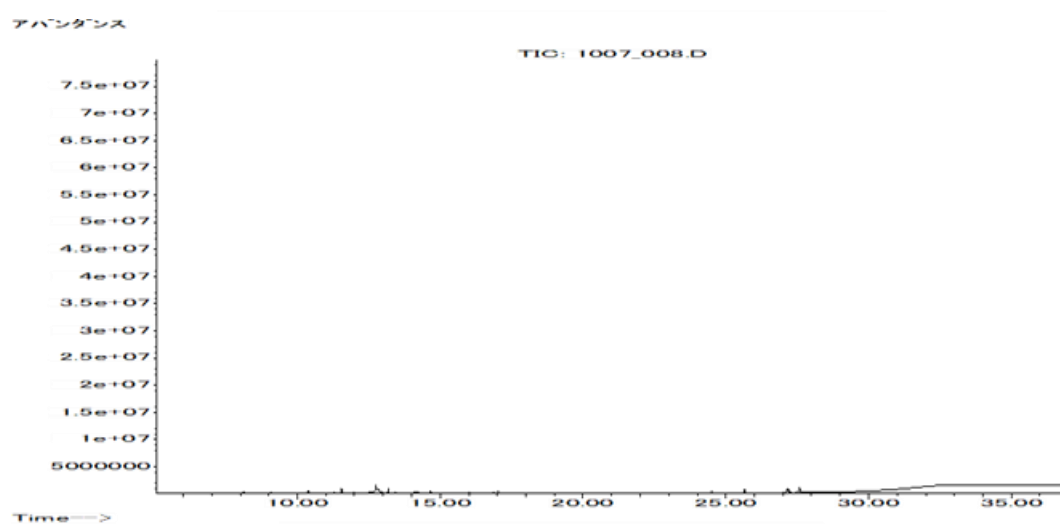
サンプル① 放散試験



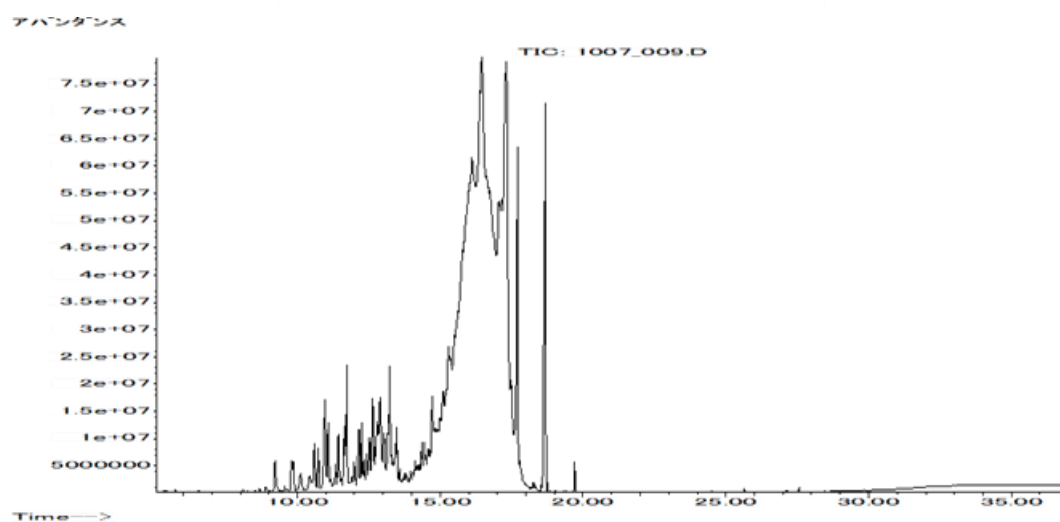
サンプル① 加熱脱着試験



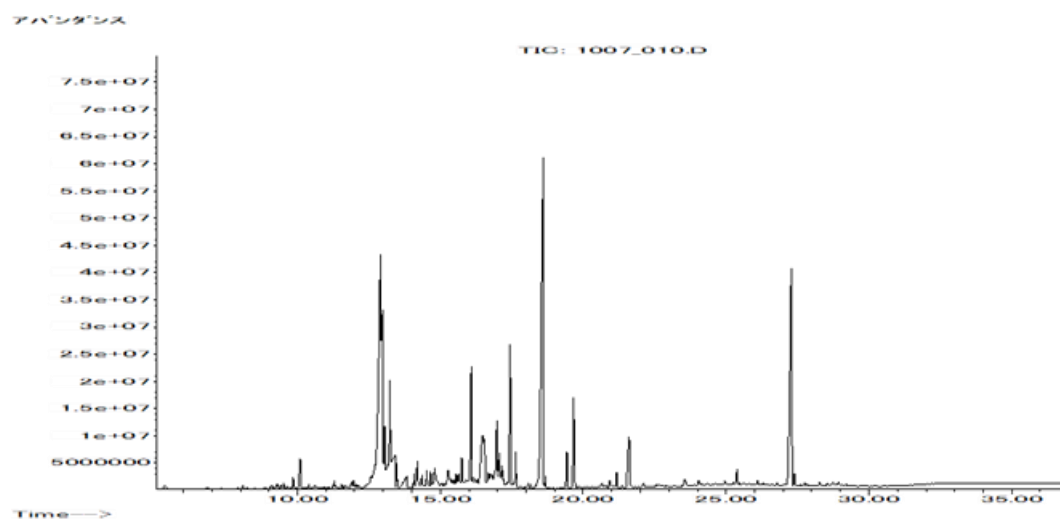
サンプル② 放散試験



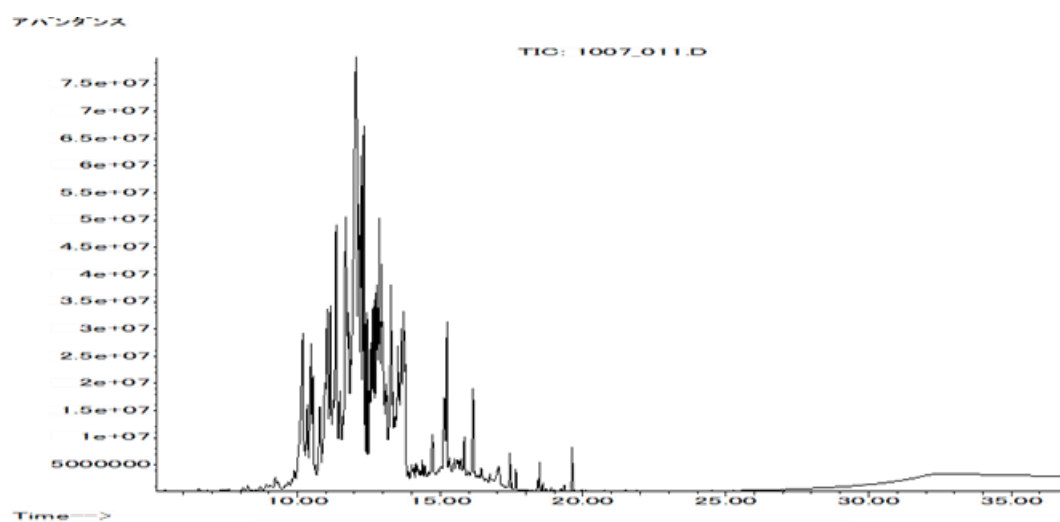
サンプル② 加熱脱着試験



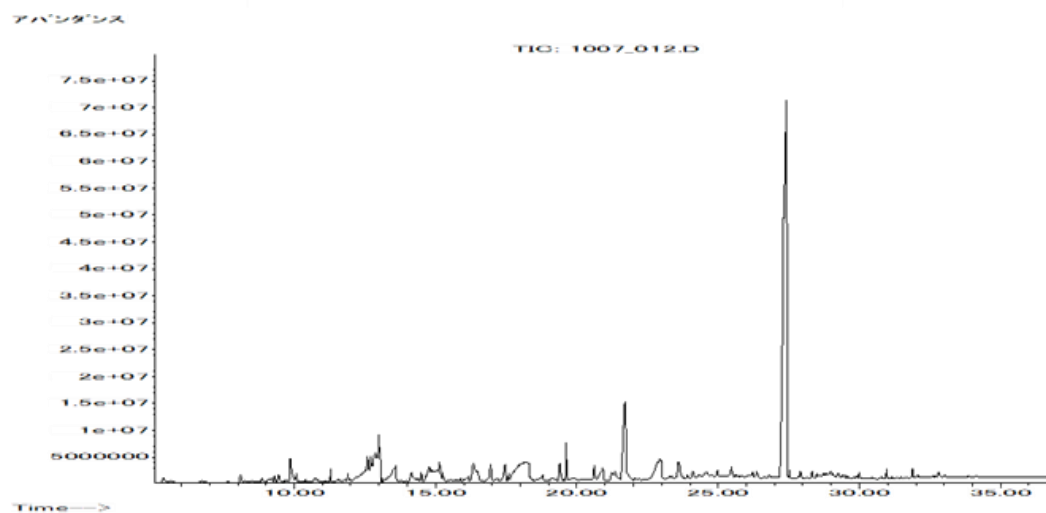
サンプル③ 放散試験



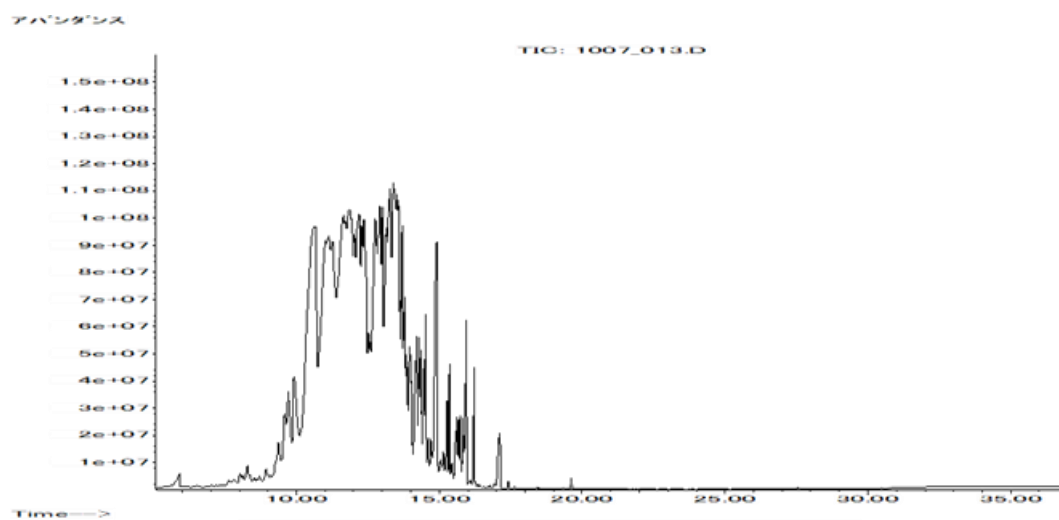
サンプル③ 加熱脱着試験



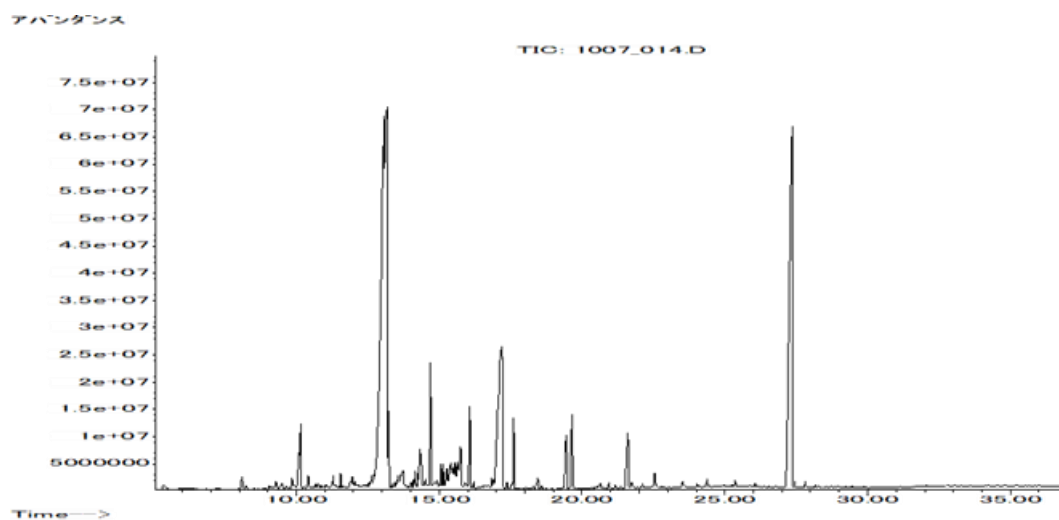
サンプル④ 放散試験



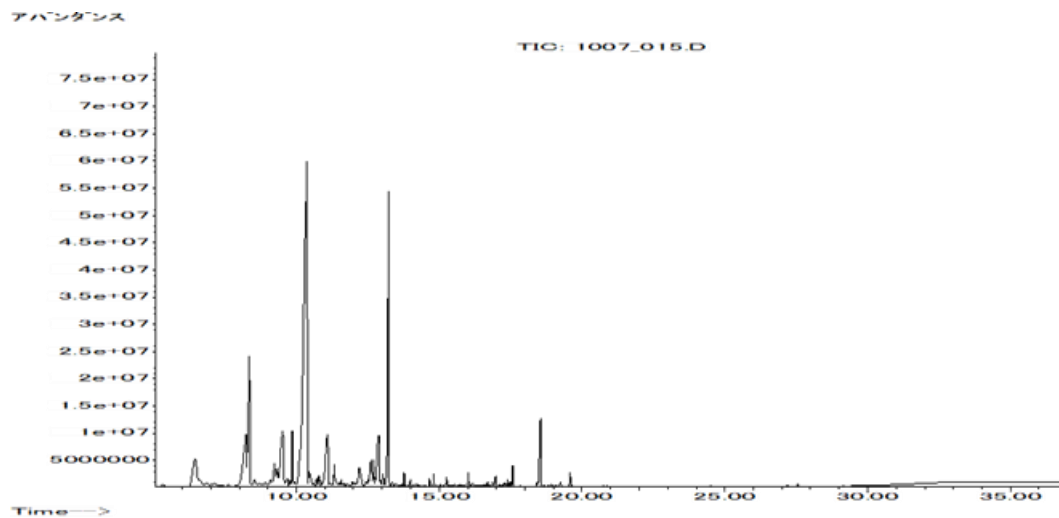
サンプル④ 加熱脱着試験



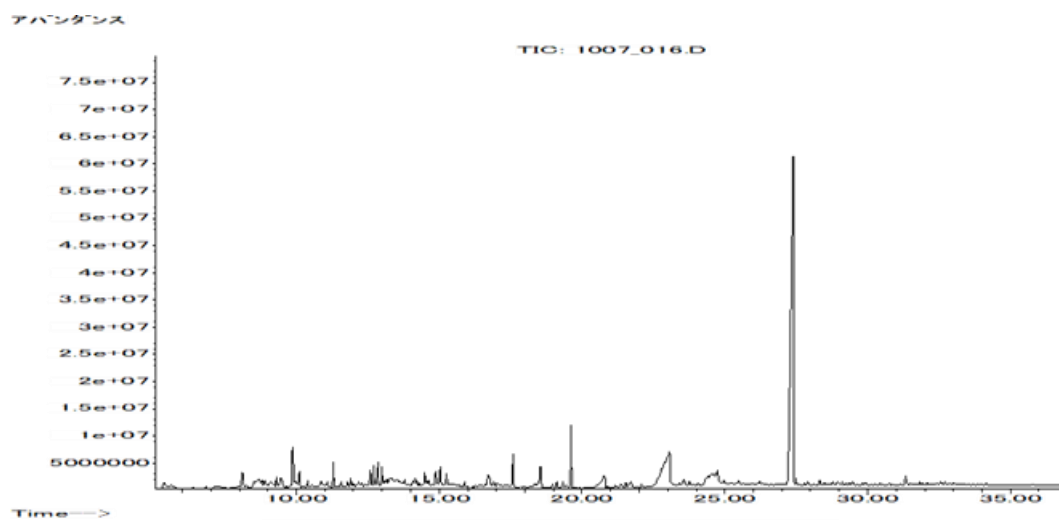
サンプル⑤ 放散試験



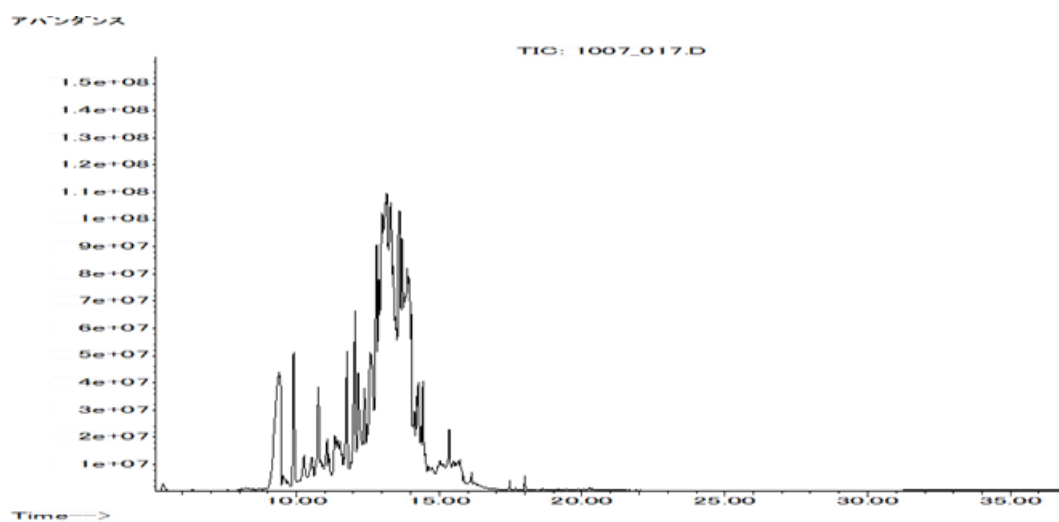
サンプル⑤ 加熱脱着試験



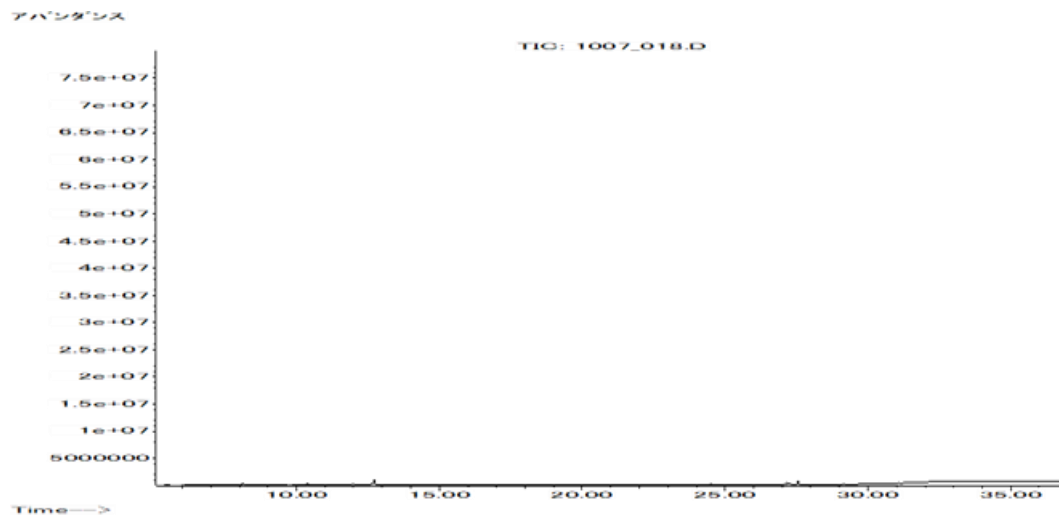
サンプル⑥ 放散試験



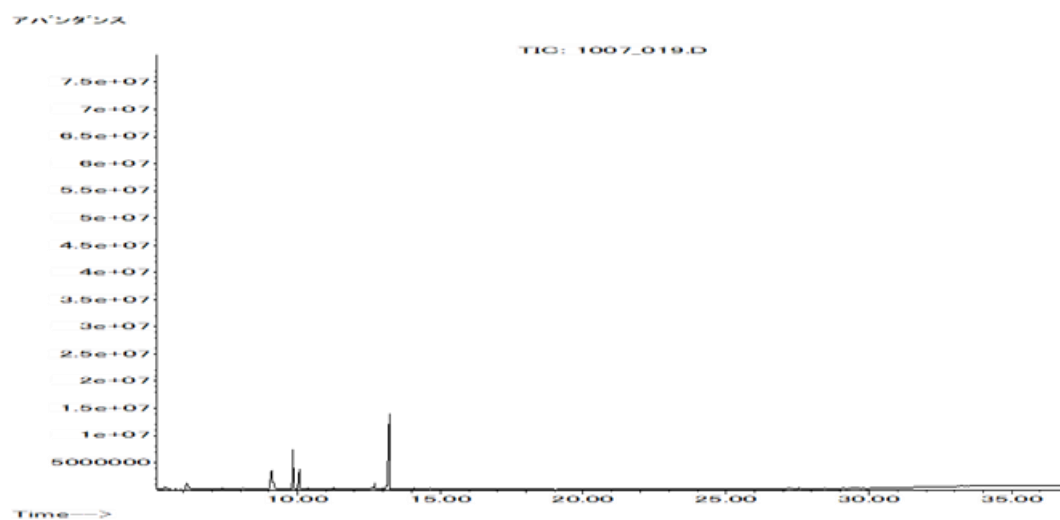
サンプル⑥ 加熱脱着試験



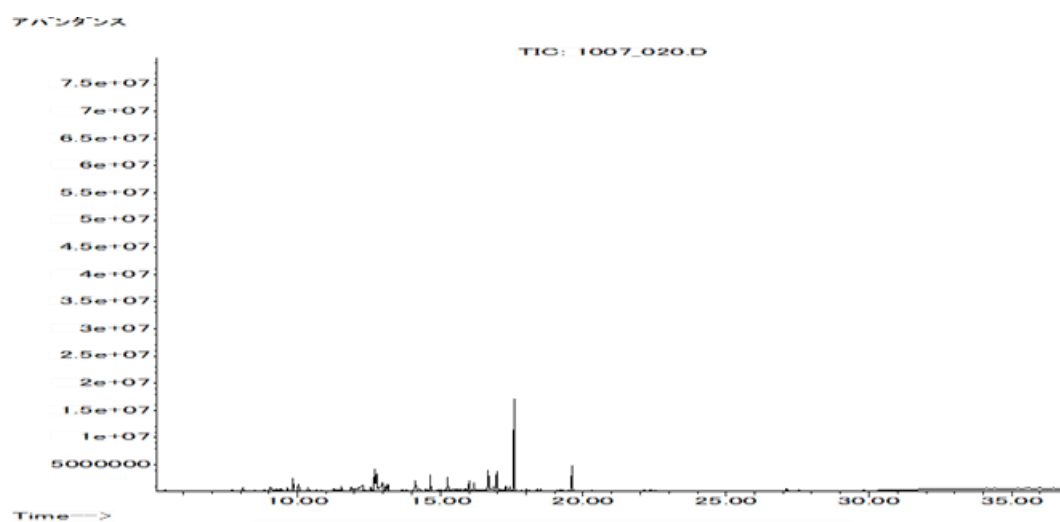
サンプル⑦ 放散試験



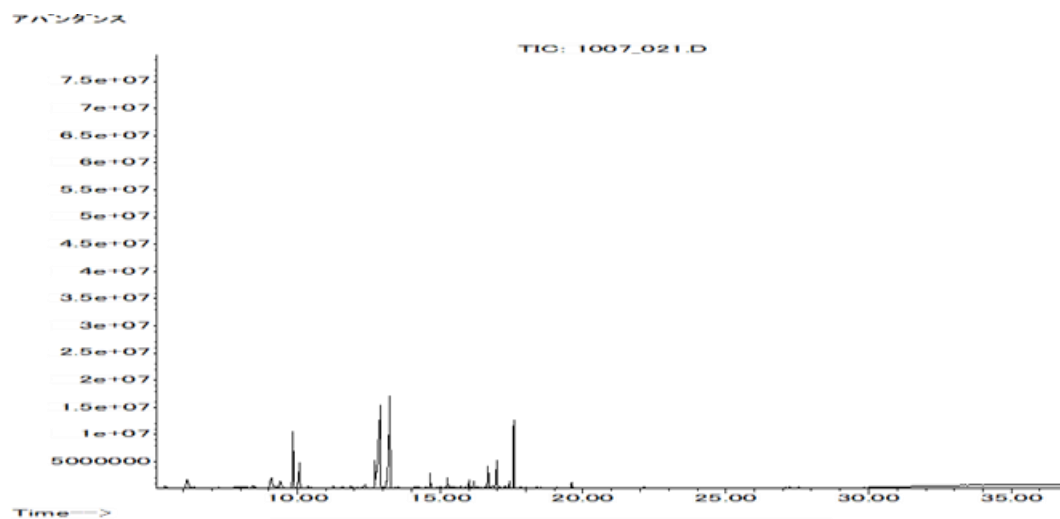
サンプル⑦ 加熱脱着試験



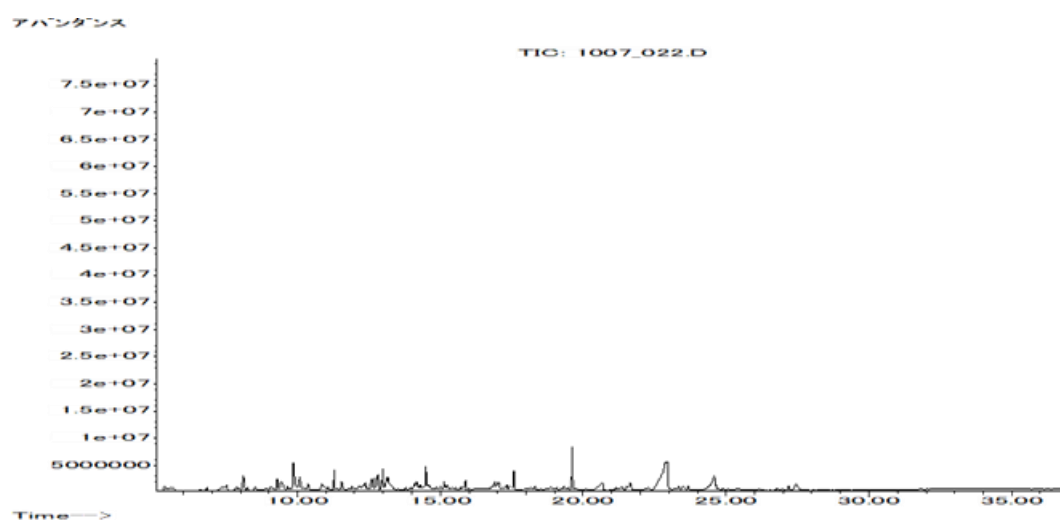
ブランク 1 放散試験



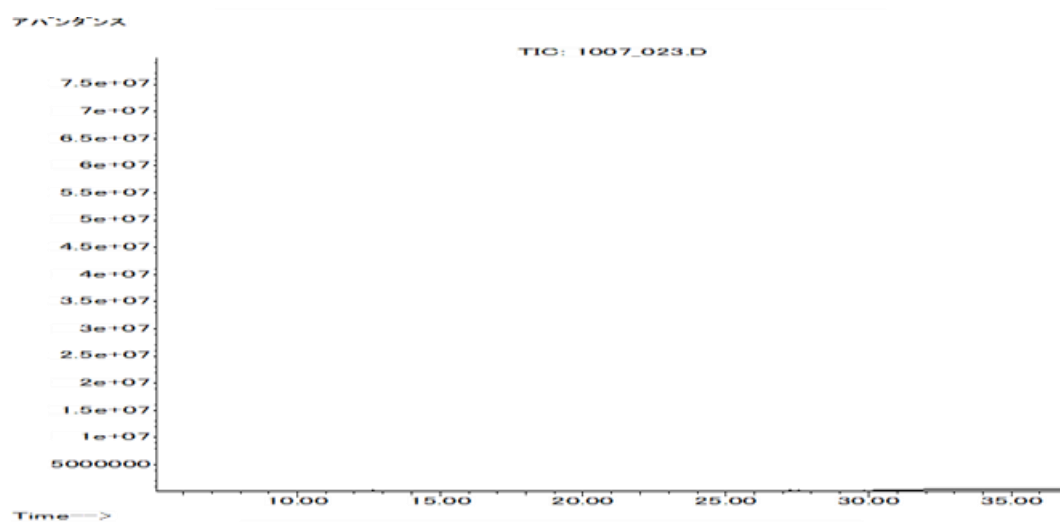
ブランク 1 加熱脱着試験



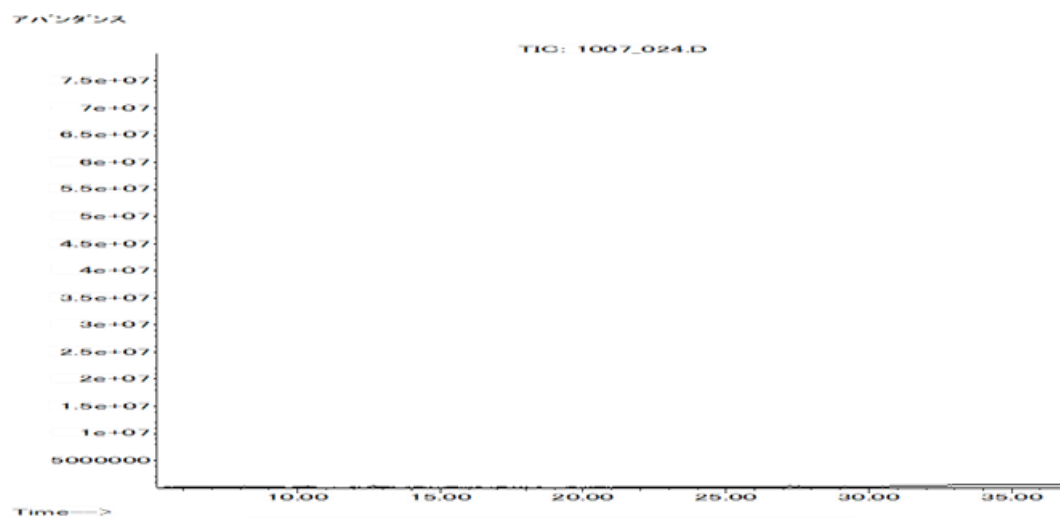
ブランク 2 放散試験



ブランク 2 加熱脱着試験



トラベルブランク 1



トラベルブランク 2

図 5-8 GC/MS クロマトグラム

表 5-21 放散速度($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)

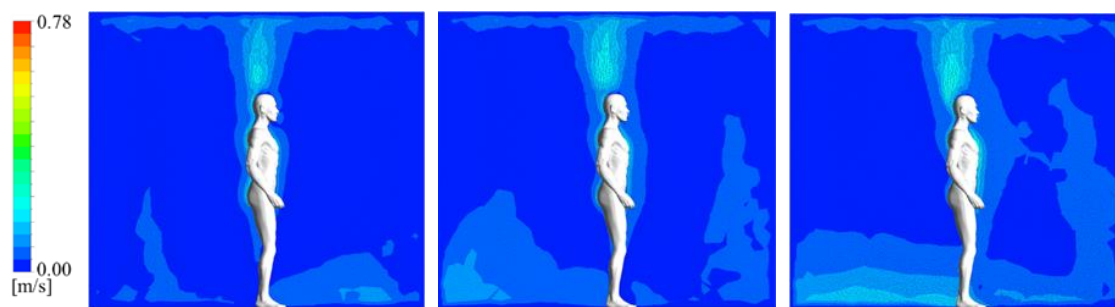
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
2EH	3.55	-	2.15	9.31	3.63	-	-
D6	0.17	-	-	-	0.03	0.03	0.20
BHT	-	-	-	-	0.06	-	0.12
DEP	-	-	0.06	-	-	-	-
C16	0.13	-	7.53	0.06	-	0.16	-
TBP	-	-	0.09	-	-	0.05	-
TCEP	-	-	-	-	-	-	-
DBA	-	-	-	-	-	-	-
DBP	0.05	-	0.14	-	0.13	0.09	-
C20	-	-	-	-	-	0.49	-
TPP	-	-	-	-	-	-	-
DOP	-	-	0.06	0.05	-	0.05	-
DEHP	0.90	-	6.75	19.85	16.86	13.40	-

5.5.3 DEHP 個人曝露量予測結果

図 5-9 に各ケースの流れ場解析結果，図 5-10 に各ケースの温度場解析結果，図 5-11 に各ケースの DEHP 濃度場解析結果を示す．全て解析モデルの $z=1.82\text{m}$ の位置の断面図である．全てのケースにおいて CSP の代謝による人体発熱により熱プルームが CSP 上部に形成された．Case1 では吸着面が CSP 表面のみあるためほぼ均一の濃度分布となった．また換気回数を増加させることで室内平均濃度・吸入平均濃度ともに大きく減少することが確認された．Case2,3 では CSP 表面と床面・天井面を吸着面としたため不均一な濃度分布となった．換気回数を増加させた場合の有意な差は確認できなかった．

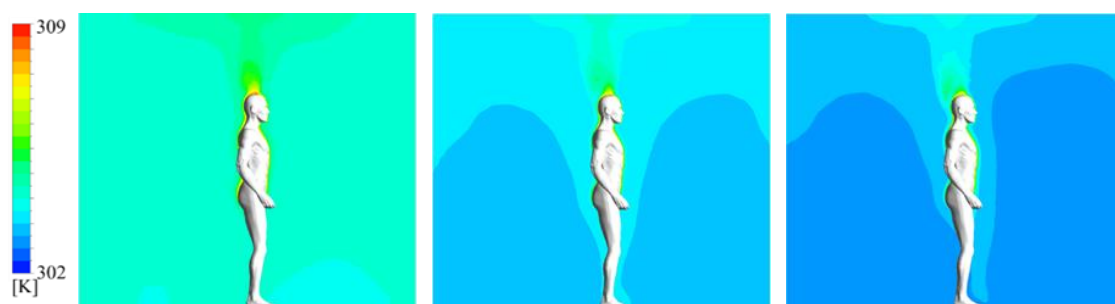
図 5-12 に CSP 表面への DEHP 吸着分布図，図 5-13 に経気道内での DEHP 吸着分布図，表 5-22 に全てのケースにおける吸着 Flux 量を示す．定常呼吸を再現しているため，鼻腔付近で呼吸による速度ポテンシャルにより吸着 Flux が比較的多い様子が観察された．経気道モデル内においては鼻腔付近に吸着するのみで咽頭付近での吸着は確認されなかった．Case1 では換気量の増加に伴い，CSP と経気道内の吸着 Flux 量が減少することが確認されたが，Case2,3 では換気量による吸着 Flux の有意な差はなかった．

Case1 では換気回数を 0.5 回から 1.5 回に変更することで約 51%の曝露量減少となった．Case1 の環境を新築であると仮定すると，新築における個人 DEHP 曝露量を低減するためには，換気回数の増加が有効であることが示された．



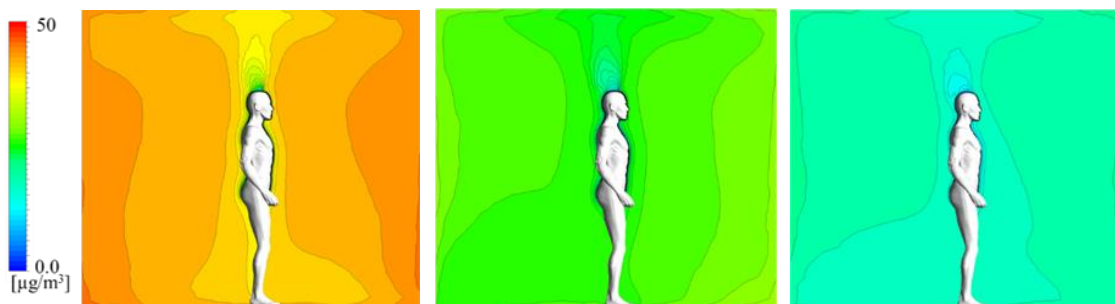
(a)Case1-1,Case2-1,Case3-1 (b)Case1-2,Case2-2,Case3-2 (c)Case1-3,Case2-3,Case3-3

図 5-9 流れ場解析結果(z=1.82m)

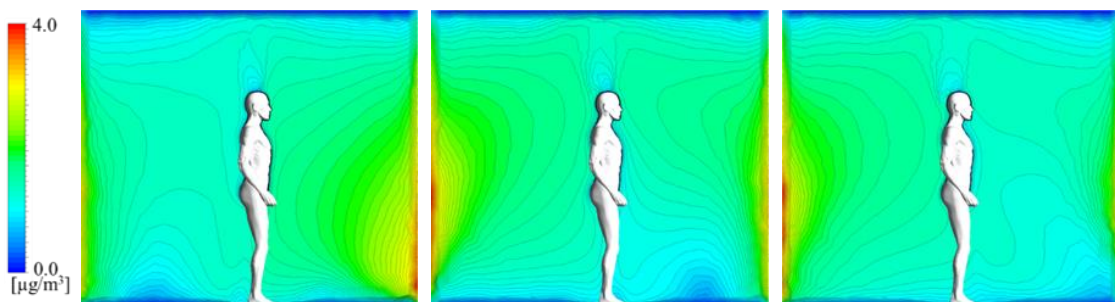


(a) Case1-1,Case2-1,Case3-1 (b) Case1-2,Case2-2,Case3-2 (c) Case1-3,Case2-3,Case3-3

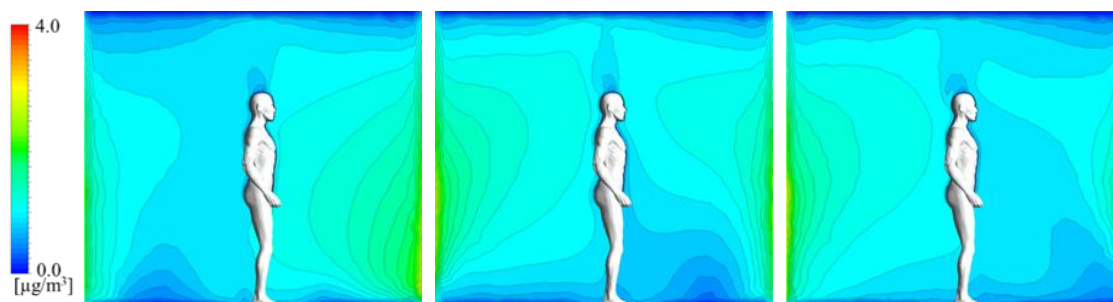
図 5-10 温度場解析結果(z=1.82m)



(a)Case1-1 $C_a=43.3$ $C_b=36.5$ (b)Case1-2 $C_a=27.2$ $C_b=22.8$ (c)Case1-3 $C_a=19.0$ $C_b=15.6$



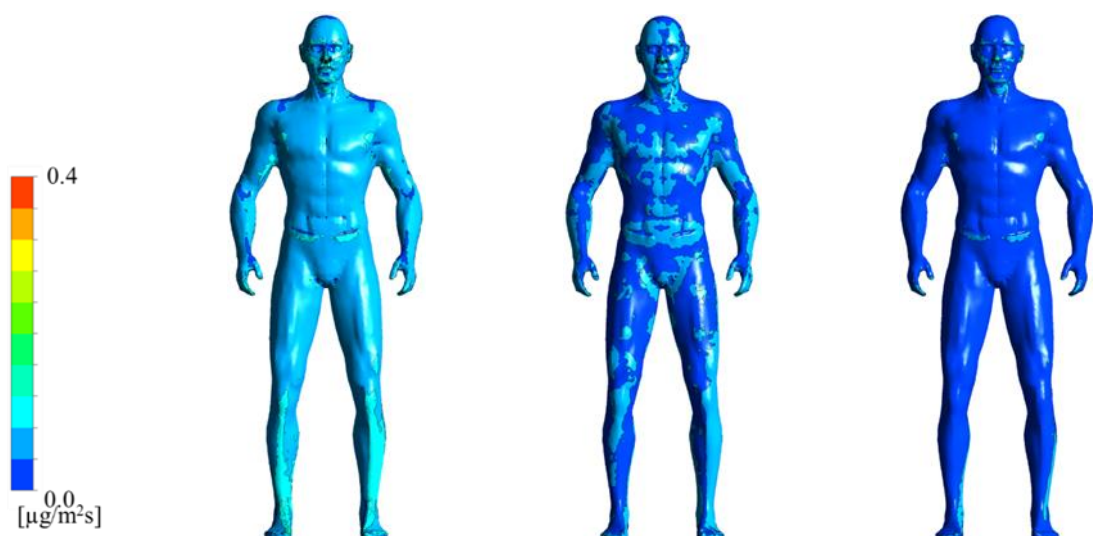
(d)Case2-1 $C_a=1.52$ $C_b=1.38$ (e)Case2-2 $C_a=1.58$ $C_b=1.29$ (f)Case2-3 $C_a=1.47$ $C_b=1.18$



(g)Case3-1 $C_a=1.01$ $C_b=0.915$ (h)Case3-2 $C_a=1.06$ $C_b=0.864$ (i)Case3-3 $C_a=0.982$ $C_b=0.791$

図 5-11 濃度場解析結果($z=1.82\text{m}$)

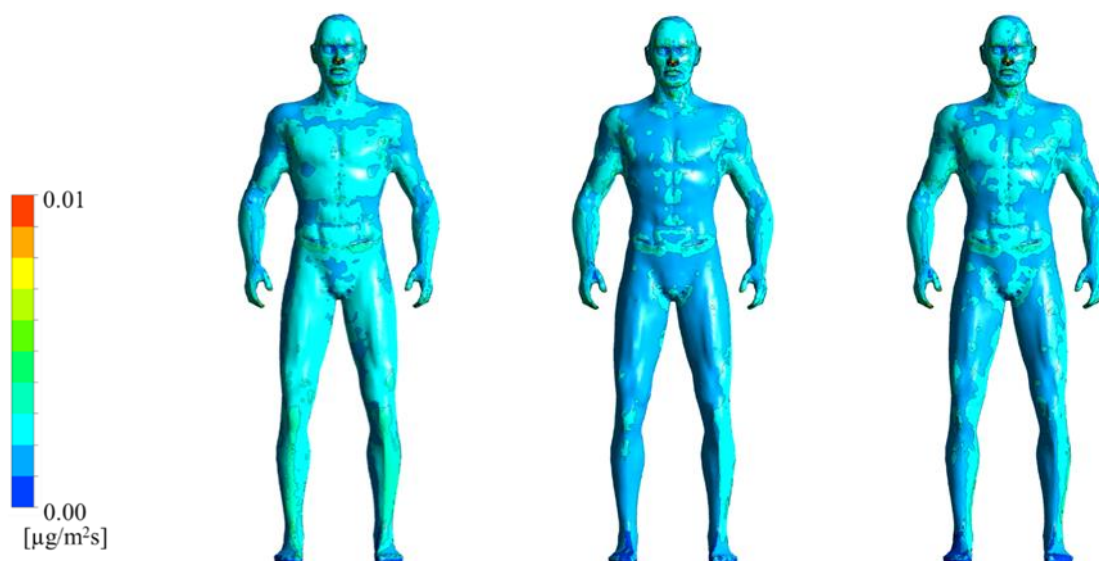
(C_a : average indoor concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); C_b : average inhalation concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))



(a)Case1-1

(b)Case1-2

(c)Case1-3



(d)Case2-1

(e)Case2-2

(f)Case2-3

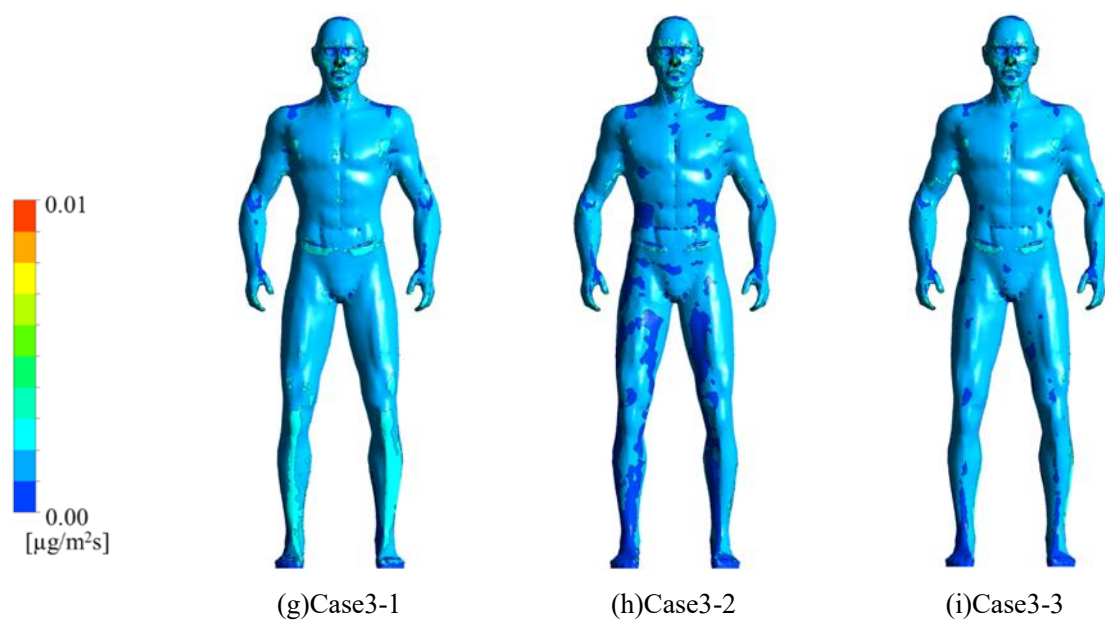
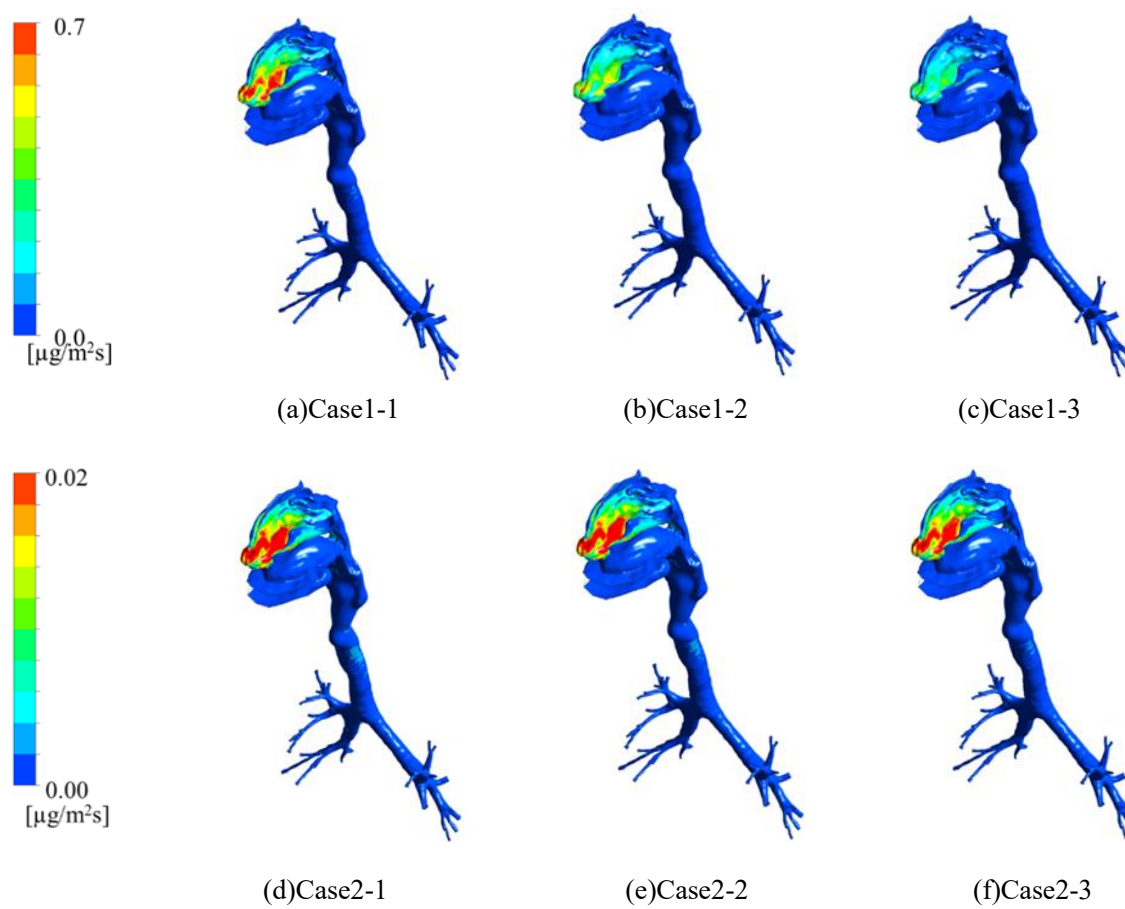


図 5-12 DEHP 吸着フラックス分布(CSP)



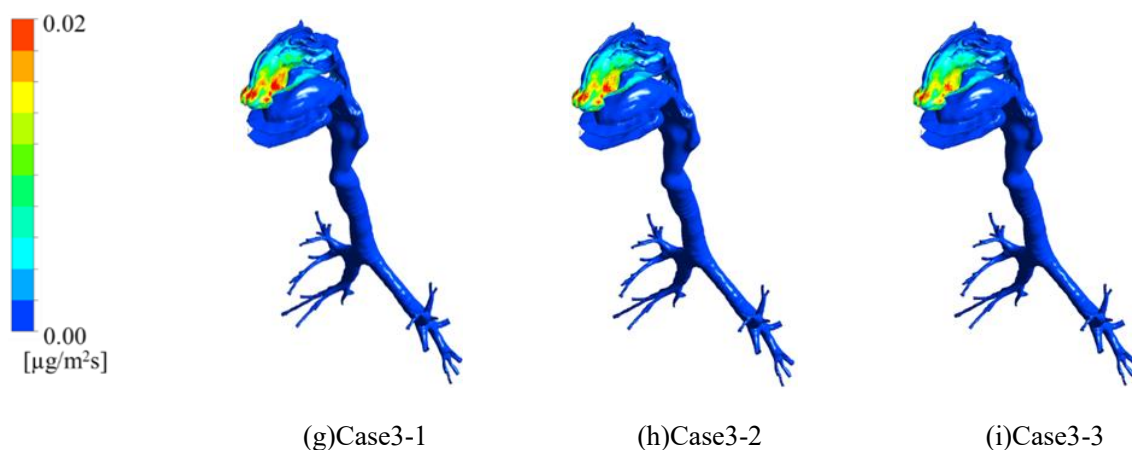


図 5-13 DEHP 吸着フラックス分布（経気道モデル）

表 5-22 DEHP 日曝露量

	人体吸着 Flux[$\mu\text{g/s}$]	経気道吸着 Flux[$\mu\text{g/s}$]	一日曝露量[$\mu\text{g/kg/day}$]
Case1-1	0.098	0.0052	178
Case1-2	0.065	0.0033	118
Case1-3	0.048	0.0023	86.9
Case2-1	0.0033	0.00020	6.10
Case2-2	0.0031	0.00018	5.66
Case2-3	0.0035	0.00020	6.34
Case3-1	0.0024	0.00013	4.29
Case3-2	0.0022	0.00013	3.98
Case3-3	0.0024	0.00012	4.42

5.6 考察

5.6.1 MFA 結果の CFD 境界条件への適用妥当性

本研究では、MFA 結果と日本の総住宅数統計データより、1 住宅あたりの DEHP 含有製品の平均的な蓄積量を算出した（簡易法）。簡易法による CFD 境界条件への適用妥当性について、面積ベースの出荷量統計データの存在する DEHP 含有壁紙で検討を行う。

DEHP 含有壁紙は主に塩ビ系壁紙であり、2018 年の塩ビ系壁紙出荷量は $619,307,519\text{m}^2$ であり⁵⁻¹²⁾、2018 年の可塑剤としての DEHP 出荷率 52%と住宅使用比率 65%を考慮すると、2018 年に住宅用として出荷された DEHP 含有壁紙出荷量は $209,325,942\text{m}^2$ となる。また、2018 年の新築件数は 953,000 戸であるため、新築 1 軒あたりの DEHP 含有壁紙の面積は 219m^2 と推計される。簡易法では算出した 2018 年の 1 住宅当たりの DEHP 含有壁紙面積は 50.37m^2 であり、過小評価となった。しかし、本解析モデルである日本建築学会が示す標準住宅モデル内の 1 部屋の壁面と天井面の合計面積は 36.14m^2 であり、過小評価とな

った 50.37m^2 としても本解析モデルの壁面と天井面を全て DEHP 含有壁紙で覆われることは現実的であり、一定の合理性はある。しかし、統計データから推計される値とは大きくことなっているため、MFA-CFD-CSP 解析の精度向上には、簡易法の精度向上が必要であることが考えられる。

また、数値解析により個人曝露量予測のための室内化学物質濃度を予測するためには、化学物質の放散特性に応じた適切な境界条件を与える必要がある。基本的には実験データに依存するが、建材の使用量や化学物質の放散特性に関するデータセットは十分に整備されていないのが現状である。MFA 結果を CFD 境界条件へ適用するためには、建材中の化学物質含有量データに基づき排出量を推定する方法の開発が必要になり、今後の重要な課題となる。

5.6.2 DEHP 曝露量予測精度

日本の室内環境（一般住宅）における DEHP 気中濃度を実測した既往研究は多数存在する。Kanazawa ら⁵⁻²⁴⁾の札幌の住宅を対象とした実測（サンプル数 41 件、築年数情報なし）では、サンプルの最大値 $1.66\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、最小値 $0.0118\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、中央値 $0.147\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Kim ら⁵⁻²⁵⁾の日本の一般住宅を対象とした実測（サンプル件数 8 件、築年数 3~22 年、平均築年数 13 年）では、最大値 $1.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、最小値 $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、平均値 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、斎藤ら⁵⁻²⁶⁾の東京の住宅を対象とした実測（サンプル件数 46 件、築年数情報なし）では、最大値 $2.38\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、最小値 $0.0516\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、中央値 $0.308\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Takeuchi ら⁵⁻²⁷⁾の日本全国の住宅を対象にした実測（サンプル数 50 件、築年数 3~48 年、平均築年数 13 年）では、最大値 $1.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、中央値 $0.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ と、それぞれ報告されている。

Case1-1 の室内平均濃度は、既往研究の中で最も高い濃度を報告した斎藤らの最大値の約 18 倍過大評価となった。Case1-1 は、MFA-CFD-CSP 解析のフレームワークにおける worst-case であり、曝露濃度の上限値を示したことになる。Case1 では、DEHP 室内平均濃度が 25°C の飽和蒸気圧で計算した表面濃度を超える結果となった。また、DEHP はエンドポイントとして精巢毒性や生殖毒性があげられるが、これらに関する動物実験より得られる無毒性量 (NOAEL) は $3.0\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$ であり、不確実係数 100 を考慮すると DEHP の耐用一日摂取量 (TDI) は $30\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ となる⁵⁻²⁸⁾。本解析の一日曝露量と比較すると Case1 では全ケースで大きく超える結果となった。このような非現実的な結果になった原因は、解析モデルの壁面等や粒子状物質・粉塵への DEHP 吸着を無視した境界条件設定であるためである。さらに、マイクロチャンバー放散実験で測定された放散速度は室内濃度によらず一定放散を仮定していることも原因の一つであると考えられる。DEHP 曝露濃度の正確な予測のためには、建材からの正確な放散モデルの開発と、DEHP 吸着現象のモデル化が必要になり、室内環境における DEHP の放散、拡散、吸着等の包括的な連成解析が課題となる。

5.7 結語

本研究では、マクロなマテリアルフロー分析と CFD-CSP 連成解析を統合させ、定量的に DEHP 個人曝露量予測を行うことで、化学物質の個人曝露量予測のためのフレームワークを例証的に示した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 動的なマテリアルフロー分析により、日本における DEHP 蓄積量の推移を推計した。1997 年に約 270 万トンの最大値となり、以降 2019 年に至るまで減少傾向であった。2019 年の室内蓄積量は壁紙用途が全体の 53%、一般フィルム用途が 25%、電線被覆材用途が 9.2%、床材用途が 8.4%を占める結果となった。
- 2) MFA 結果を CFD 解析の境界条件として使用するための手法（簡易法）を提案した。簡易法により得られた境界条件によるケーススタディの結果、worst-case である Case1-1 の室内平均濃度が既往研究の実測値の約 18 倍と過大評価になった。現実的な環境を想定したケースでは室内平均濃度は既往研究の実測値とほぼ同値となった。建材からの正確な放散モデルの開発と、DEHP 吸着現象のモデル化により、室内環境における DEHP の放散、拡散、吸着等の包括的な連成解析を実施することで MFA-CFD-CSP 解析の精度向上が可能になる。

[参考文献]

- 5-1) 産業技術総合研究所:詳細リスク評価書フタル酸ジ (2-エチルヘキシル) ,2005,
https://unit.aist.go.jp/riss/crm/mainmenu/zantei_0.4/DEHP_0.4.pdf (accessed 25 February 2021)
- 5-2) 可塑剤工業会:可塑剤 50 年史安全性追求の歩み,2007
- 5-3) Weschler, C.J.et al : Semivolatile Organic Compounds in Indoor Environments, Atmos. Environ,Vol42, No.40, pp.9018-9040,2008.12
- 5-4) 金 炫兌,田辺 新一,岡田 厚太郎:日本・韓国の住宅におけるハウスダスト中 DEHP 濃度の測定,日本建築学会環境系論文集,第 75 巻,第 654 号,713-720,2010
- 5-5) 金 炫兌,田辺 新一:住宅における空気・ハウスダスト中 SVOC 濃度測定,日本建築学会環境系論文集,第 81 巻,第 720 号,199-207,2016
- 5-6) 金澤文子,岸玲子:半揮発性有機化合物による室内汚染と健康への影響,日本衛生学雑誌,Vol.64,No.3,pp.672-682,2009
- 5-7) プラスチック循環利用協会:プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況マテリアルフロー図 (1996 年～2018 年) , <http://www.pwmi.or.jp/data.php> (accessed 8 February 2021).
- 5-8) 農林水産省:園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00500502&tstat=000001020843>(accessed 8 February 2021).
- 5-9) 環境省:デカブロモジフェニルエーテル及び短鎖塩素化パラフィンの環境リスク評価 https://www.meti.go.jp/shingikai/kagakubussuitsu/anzen_taisaku/pdf/h29_02_01_s04_00.pdf (accessed 8 February 2021).
- 5-10) 日本壁装協会:塩ビ系壁紙に関する最近の動向, <http://www.wacoa.jp/member/pdf/wacoavec.pdf> (accessed 30 January 2021).
- 5-11) 日本ビニルホース協会 HP, http://www.jvhma.jp/data/2003_10.html (accessed 8 February 2021).
- 5-12) 日本壁装協会:国内壁紙の生産・出荷量推移 (2002～2019), <https://www.wacoa.jp/data/pdf/2002-2019flow.pdf> (accessed 30 January 2021).
- 5-13) 可塑剤工業会:可塑剤国内出荷実績, <http://www.kasozai.gr.jp/wordpress/wp-content/uploads/2020/11/2020%E5%B9%B411%E6%9C%88%E5%8F%AF%E5%A1%91%E5%89%A4%E5%9B%BD%E5%86%85%E5%87%BA%E8%8D%B7%E5%AE%9F%E7%B8%BE%EF%BC%88HP%E7%94%A8%EF%BC%89.pdf> (accessed 30 January 2021).
- 5-14) Kazuhide Ito : Toward the development of an in silico human model for indoor environmental design, Proceedings of the Japan Academy- Series B, Vol.92, No.7, 2016, pp 185-203
- 5-15) Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito, Numerical Prediction of Tissue Dosimetry in Respiratory Tract using Computer Simulated Person integrated with physiologically based pharmacokinetic (PBPK)-computational fluid dynamics (CFD) Hybrid Analysis, Indoor and Built Environment,

2018, Vol. 27(7) 877–88

- 5-16) Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito, Assessment of Transient Inhalation Exposure using in silico Human Model integrated with PBPK - CFD Hybrid Analysis, Sustainable Cities and Society, 40 (2018) pp 317–325
- 5-17) Tanabe S, et al. 1994. Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature. ASHRAE transactions, 100 part 1, 41
- 5-18) Phuong NL, Ito K. Investigation of flow pattern in a realistic replica model of human respiratory tract using PIV. Build Environ. 2015;94:504 - 515.
- 5-19) Phuong NL, Yamashita M, Yoo SJ, Ito K. Prediction of convective heat transfer coefficient of human upper and lower airway surfaces in steady and unsteady breathing conditions. Build Environ. 2016;100:172 - 185.
- 5-20) 壁装研究会出版: 壁装新聞, 第 422 号・第 435 号
- 5-21) インテリアフロア工業会: ビニル系床材国内出荷実績推移, 2008～2019, <http://www.ifa-yukazai.com/pdf/shipment25.pdf> (accessed 10 March 2021)
- 5-22) Fujii M, Shinohara N, Lim A, Otake T, Kumagai K, and Yanagisawa Y. A study on emission of phthalate esters from plastic materials using a passive flux sampler. Atmospheric environment 2003; 37: 5495-5504.
- 5-23) Kim H, Tanabe S, and Koganei M. The emission rate of newly regulated chemical substances from building materials. IOP conference series: Materials Science and Engineering 2019; 609: 042046.
- 5-24) Kanazawa A, Saito I, Araki A, Takeda M, Ma M, Saijo Y, and Kishi R. Association between indoor exposure to semi - volatile organic compounds and building - related symptoms among the occupants of residential dwellings. Indoor Air 2010; 20: 72-84.
- 5-25) Kim H, and Tanabe S. Field measurement of SVOC in indoor air and house dust in residential buildings. Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ) 2016; 81: 199–207 (in Japanese).
- 5-26) Saito I, Onuki A, and Seto H. Determination of Phthalates in Indoor Air. Journal of Society of Indoor Environment, Japan 2002; 5: 13–22 (in Japanese).
- 5-27) Takeuchi S, Tanaka-Kagawa T, Saito I, Kojima H, and Jinno H. Distribution of 58 Semi-Volatile Organic Chemicals in the Gas Phase and Three Particle Sizes in Indoor Air and House Dust in Residential Buildings During the Hot Season in Japan. BPB Reports 2019; 2: 91–98.
- 5-28) 厚生労働省, 室内空気中化学物質の室内濃度指針値について
https://www.mhlw.go.jp/web/t_doc?dataId=00tc3866&dataType=1&pageNo=1
(accessed 11 November 2021).

[本章に関連した研究業績]

• 査読論文

Ryota Muta, Sung-Jun Yoo, Hyuntae Kim, Toru Matsumoto, Kazuhide Ito: Multiscale analysis of material flow and computational fluid dynamics for predicting individual diethyl-hexyl phthalate exposure concentration in indoor: Indoor and Build Environment, 2022.03

<https://doi.org/10.1177/1420326X221092613>

• 国際会議

Ryota Muta, Sung-Jun Yoo, Hyuntae Kim, Toru Matsumoto, Kazuhide Ito: Downscaling from material flow analysis to indoor CFD for health risk assessment associated with DEHP exposure: Healthy Building Europe, Norway, 2021.06

第6章 過酸化水素を用いた N95 マスク再利用に向けた除染方法の検討

6.1 序

2019 年末に中国武漢で発生が確認された新型コロナウイルスによる感染症(COVID19)は世界的に感染拡大し、2020 年 3 月には WHO にてパンデミックであるとの認識が示され、また我が国では 2020 年 4 月 7 日に緊急事態宣言が発令されるなど、非常に深刻な公衆衛生問題となった^{注 6-1)}。2020 年 7 月 10 日の時点で、世界の累積感染者数が 1200 万人を超え、累計死者数も 50 万人を超えるなど、非常に深刻な状況となっている。特に、対策の最前線となる医療機関では感染症対策に必須となる医療用マスクや防護服などの医療資材が深刻な品不足に直面する現実が指摘されている。

空気感染性汚染物質による呼吸器感染リスクを軽減するための医療用マスクとして、米国 NIOSH(米国労働安全衛生研究所)の認定を受けた N95 マスク(3M)が広く使用されているが、パンデミックに起因する世界的な医療用マスクの需要増大に対応可能な供給体制が整っておらず、特に感染者が急増した米国や欧州各国で深刻な品不足となった。医療従事者の COVID-19 対策には N95 マスクは必須であることから、一度使用した N95 マスクの除染を前提とした上で再利用の可能性が検討されており、米国疾病対策予防センターCDC のガイドラインによれば、最大 5 回程度までの再使用の可能性を認めている⁶⁻¹⁾。

前述のとおり、一度使用した医療用マスクは SARS-CoV-2 を含む各種ウイルスが付着している危険性があり、適切な除染が必須である。マスク表面に付着した SARS-CoV-2 の不活化には、加熱処理、UV 処理などの方法が検討された事例があるが、米国 CDC の報告によれば、例えば、エチレンオキシドによる除染は残留ガスの発がん性があること、電離放射線の使用はフィルター性能を劣化させる危険性があること、マイクロ波はマスク本体が溶解しフィット性能が低下すること、高温・蒸気滅菌はフィルター性能が大幅に低下すること、等の理由でこれらの方法を N95 マスクの除染へ使用することを推奨していない。薬剤を使用した除染方法としては、過酸化水素蒸気(Vaporized Hydrogen peroxide: VHP)を用いた除染方法のみ効果(不活化効果)が確認されている⁶⁻¹⁾。

我が国では、厚生労働省が N95 マスク再利用に関する通達を出しており、N95 マスクの例外的取り扱いとして、国家検定規格である使い捨て粉塵マスク DS2 マスクについても N95 マスクと同等に扱っても差し支えないことや、除染方法などに言及されているが、本通達による再利用法の技術的な部分は、全て米国 CDC の報告に準拠しており、我が国独自の技術的な検証は含まれていない⁶⁻²⁾。

このような背景のもと、第6章は、米国 CDC の委託を受け、N95 マスク再利用に向けた過酸化水素による大規模かつ効率的な除染方法を検討するものである。特に、米国 CDC からの委託事項である「数値解析による閉鎖空間内の気中過酸化水素濃度分布を詳細に解析することで、効率的かつ均一な除染方法を確立するためのガイドライン作成に向けた基礎データの蓄積」を主たる目的とする。

本研究では、一般的な海上輸送コンテナを閉鎖型チャンバーとして利用し、コンテナ内に

気化させた過酸化水素(Vaporized Hydrogen Peroxide; VHP)を充満させることで N95 マスクを大量に除染する場合を想定した数値解析を実施する。除染開始から濃度定常までの時間、コンテナ内濃度分布などを予測した上で、効率的な除染方法を決定するための基礎データ蓄積を行った結果を示す。

本研究では、一般的な海上輸送コンテナを N95 マスク除染用のチャンバーとして利用することを想定するが、室内空間スケールを対象にした VHP の空間濃度分布解析に関する既往研究事例は非常に限定されており、筆者らの既報の実大居室スケールの実験チャンバーを対象とした解析の他に、Q Chen らの旅客機客室を対象にした解析が存在するのみである^{6-3),6-4)}。この点で、本研究は VHP 濃度分布解析の応用解析事例として意義を主張できると考えている。

6.2 過酸化水素の数値解析モデル

6.2.1 輸送方程式と一次減衰モデル

空間のある点における VHP 濃度(ガス状過酸化水素濃度)を $\bar{C}$ [g/m³] とすれば、VHP の移流・拡散方程式は(6-1)式となる。本研究では RANS モデルによる解析を前提とし、アンサンブル平均された方程式として示す。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U_j C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) + S_u \quad \cdots \cdots (6-1)$$

ここで、オーバーバー($\bar{}$)はアンサンブル平均値、 D は VHP の分子拡散係数[m²/s]、 U_j は平均風速[m/s]を、 ν_t は渦動粘性係数[m²/s]、 σ_t は乱流シュミット数を示す。

VHP は空気中で一定の濃度変化、即ち自己減衰を示すことが知られており、一次反応モデルとしてモデル化する。

$$S_u = -k_u \cdot \bar{C} \quad \cdots \cdots (6-2)$$

ここで、 k_u は VHP の自己減衰に対する一次反応速度定数[s⁻¹]を示す。(6-2)式(即ち(6-1)式右辺第2項)は空気中での VHP の一次反応(自己減衰)による C の消失を表す。Q. Chen らの既往研究では室内での VHP の濃度半減時間スケールは 30 分程度と概算されている⁶⁻⁴⁾。

6.2.2 壁面に対する VHP 吸着分解フラックス

閉鎖空間内での VHP の輸送現象は、移流・拡散、気中での化学反応(本解析では自己減衰)の他、壁面に対する沈着現象を考慮する必要がある。VHP を対象として気中から 2 次元壁面上への移動を表現する場合、VHP をガス相として捉える場合には吸着、エアロゾル相として捉える場合には沈着と表現することが妥当と推察される。例えばオゾンを対象とした

場合には汎用的に沈着フラックスとの表現が用いられることが多い。本研究では英語表現で汎用的に使用される **Decomposition** に相当する日本語訳として、「吸着分解」を使用することとし、吸着分解フラックスとの表現を用いる。VHP のマスク表面や壁面表面での除染を評価するためには、壁面に対する VHP 吸着分解フラックスとその時間積分値である VHP 吸着分解量の予測が必要となる。既往研究では、沈着現象のモデリング手法の一つに、分子運動論をベースとした沈着フラックス式が提案されており、これを実用的な工学スケールに展開した式を(6-3)式に示す^{6-3),6-5),6-6)}。

$$J = - \frac{\gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4}}{1 + \gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} \cdot \frac{\Delta y_1}{D}} \cdot \bar{C} \Big|_{y=\Delta y_1} \quad \cdots \cdots (6-3)$$

ここで、壁面に衝突した VHP が壁面で減少する割合、即ち反応確率(**Reaction Probability**)を γ 、VHP の平均熱運動速度[m/s]を $\langle v \rangle$ としている。式中の $\bar{C}$ は、壁面近傍の離散定義点における VHP 濃度を示しており、 Δy_1 は壁座標(Wall Unit) $y^+ \leq 1$ の条件で設定された壁面第一セルの定義点距離を表す。

このモデルは所謂、壁面境界条件として吸着分解フラックスを線形モデルとして与えるもので、壁面吸着分解量が壁面表面の VHP 濃度に依存せず、流体側の参照濃度のみに依存する形で定式化されている。吸着分解量が壁面表面濃度と参照濃度にて形成される濃度勾配に依存せず、VHP と壁面表面の反応確率(**Reaction Probability**)が常に一定と仮定できる場合にのみ適用可能なモデル化であるが、既往研究にて一定の予測精度が確認されている⁶⁻³⁾。

6.3 解析モデル

本研究では、除染用チャンバーとして海上輸送用コンテナを使用することを検討する。米国家疾病対策予防センターCDC とカリフォルニア州環境衛生研究所より得た米国の除染戦略の事情によるものである。

6.3.1 海上輸送用コンテナモデル

一般的な海上コンテナは国際基準化機構 ISO で寸法、外形が規格化されている。一般的なシンプルなコンテナはドライコンテナと呼ばれ、40 フィートコンテナと 20 フィートコンテナの 2 種類が存在する。本研究で解析対象とする 40 フィートコンテナを図 6-1 に、20 フィートコンテナを図 6-2 に、過酸化水素発生装置の概要を図 6-3 にそれぞれ示す。VHP を用いた除染に使用するチャンバーとして、気密性の確保と高濃度除染後に外気を取り入れて室内パージの必要性より、断熱材と空調機が組み込まれた冷凍コンテナを対象とする。本研究では、各コンテナサイズを対象に、密閉型コンテナ内に過酸化水素発生装置を設置した上

で、N95 マスクを大量に配置することが可能な仕切り棚を設置する条件を想定する。室内空気循環ならびに高濃度除染後のページには冷凍コンテナに統合されている空調機の吹出口、吸入口からの空気供給を想定する^{注6-2)}。冷凍コンテナに付随する空調機の吹出口は床面に沿って 100mm(H)のスリット型、吸入口は天井に沿って 200mm(H)のスリット型であり、両者ともにコンテナの入口扉の対向壁に設置されている。空調機稼働時の処理風量は 5,000m³/h である。

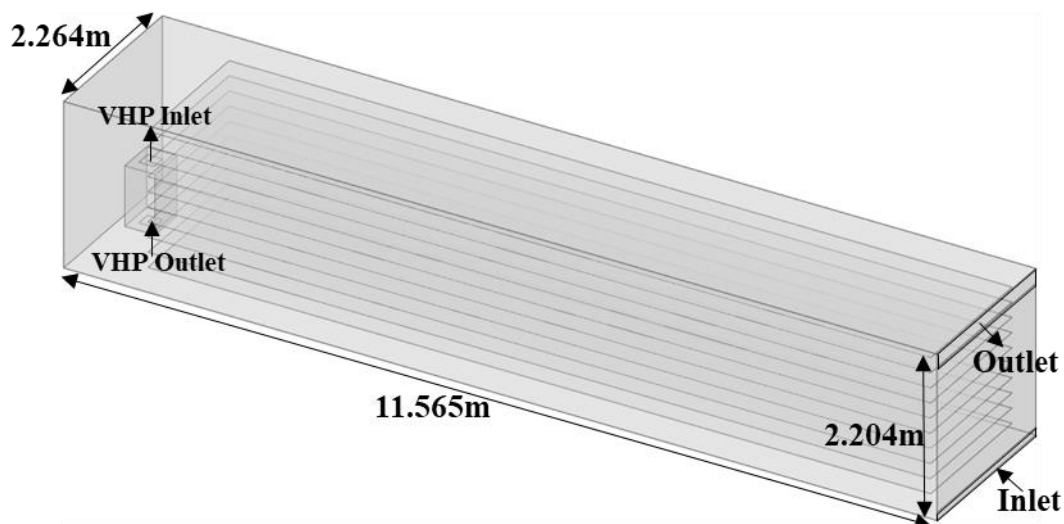


図 6-1 40 フィートコンテナ

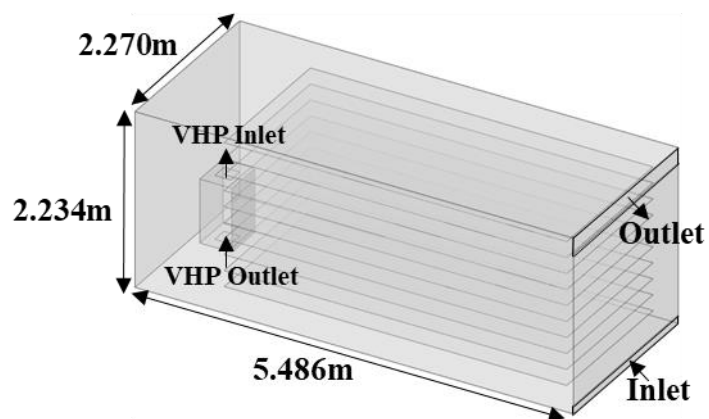


図 6-2 20 フィートコンテナ

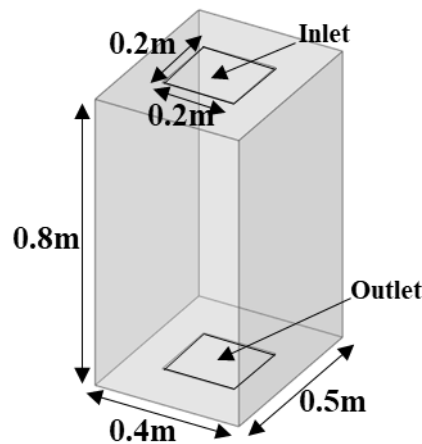


図 6-3 過酸化水素発生装置

6.3.2 マスク設置棚のモデル化

密閉コンテナ内に N95 マスク設置用の仕切り棚を設置する。仕切り棚と周壁に 200mm の隙間を確保し、コンテナ入口側に VHP 発生装置を設置し、作業スペースとして 1,000mm 空間を確保する。仕切り棚は床面位置から高さ方向に 200mm 間隔で合計 10 段設置する。本研究では、N95 マスクは各仕切り棚上に設置するものと仮定する。数値解析上はマスクの幾何形状は再現せずに仕切り棚を VHP ならびに空気が通過しない単純壁面条件とする^{注 6-3)}。

6.3.3 VHP 発生装置のモデル化

本研究では、30wt%過酸化水素水を加熱法で蒸発させることで一定フラックスの VHP を発生させる簡易的な VHP 発生装置を想定する。VHP 発生装置は 400mm(W)×500mm(L)×800mm(H)であり、床面から 200mm 上部に設置する。上面には VHP 発生吹出面 200mm(W)×200mm(L)とし、下面に同面積の吸込面を想定する。稼働時の最大処理風量は 72m³/h、過酸化水素処理量は 7.0ml/min とする⁶⁻³⁾。

6.4 数値解析条件

VHP 発生装置の稼働条件のほか、コンテナ空調システムの稼働条件、コンテナサイズを解析パラメータとして全 8 ケースの解析ケースを設定した。数値解析ケースを表 6-1 に、流れ場解析・VHP 濃度場解析に関する境界条件を表 6-2 に示す。本来は温湿度依存性を再現する必要があるが、本解析では湿度影響を無視し、温度は T=22°C一定条件を仮定する。また、空調機稼働による空調機内での VHP 濃度減衰効果は無いと仮定する^{注 6-5)}。メッシュ分割や乱流モデル、境界条件の設定には先行研究によるベンチマークテスト結果の他、CFD 解析のガイドラインを参照し、数値解析精度の担保に十分に配慮した^{6-8, 6-9), 6-10)}。

本解析では、壁面近傍の境界層内粘性低層まで解像するため乱流モデルとして SST k- ω モデルを採用する⁶⁻⁷⁾。外気導入がゼロの閉鎖空間内で VHP 発生装置の吹出風量

もしくは空調吹出風量に対応する強制移流風速にてコンテナ内が攪拌される条件である。VHP の濃度損失は式(6-2)による自己減衰のほか、式(6-3)の壁面吸着分解にて生じる。

本解析では、VHP 発生装置の稼働時間($t=0$)から濃度場が定常状態となるまで非定常解析を実施することでコンテナ内に形成される非定常濃度場の様相、濃度場定常までの時間スケールを定量的に予測する。そのうえで、仕切り棚表面に対する壁面吸着分解フラックスの平均値、ならびに最大最小値を算出することで除染時間を概算する。コンテナ内壁面は SUS304 とし、SUS304 に対する VHP 反応確率(Reaction Probability) γ は既往研究報告に従い、 $\gamma=1.89 \times 10^{-6}[-]$ を適用する⁶⁻²⁾。N95 マスク素材に対する γ の報告例はないため、本解析では Plywood を対象とした測定値 $\gamma=5.25 \times 10^{-5}[-]$ を適用する^{注 6-4)}。また、比較のために N95 マスク設置棚が SUS304 で構成される解析も追加で実施する。VHP の濃度定常確認後、VHP 発生を停止し、空調吹出口から All Fresh Air(VHP 濃度ゼロ)を供給し、コンテナ内の濃度減衰性状も非定常解析で確認する。

表 6-1 数値解析ケース

	Container size	VHP generator	Air circulation fan	Shelf size	Mesh size (5-prism+Polyhedron)
Case20-1	20-feet 5.486(L)×2.270(W) ×2.234m(H)	ON ($C_{in,r=0}=1$, $U_{in}=0.5m/s$)	OFF	No shelf (Empty)	110,176
Case20-2			ON($U_{in}=6.12m/s$)		
Case20-3			OFF	With shelf (10 Layers)	2,428,848
Case20-4			ON($U_{in}=6.12m/s$)		
Case40-1	40-feet 11.565(L)× 2.264(W)× 2.204m(H)	ON ($C_{in,r=0}=1$, $U_{in}=0.5m/s$)	OFF	No shelf (Empty)	212,357
Case40-2			ON($U_{in}=6.12m/s$)		
Case40-3			OFF	With shelf (10 Layers)	5,091,212
Case40-4			ON($U_{in}=6.12m/s$)		

表 6-2 数値解析条件

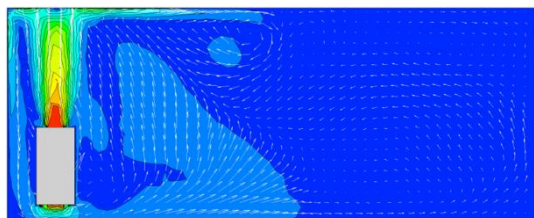
Turbulence Model	SST k- ω model
Scheme	Convection Term: Second order upwind
Inflow Boundary (VHP generator)	$U_{in}=0.5m/s$, $TI=10\%$ $C_{in,r}=C_{out,r} + C_{in,r=0}$ (recirculation with generation) $C_{in,r=0}=1$ (normalized)
Outflow Boundary (VHP generator)	$U_{out}=-0.5m/s$ $C_{out}=\text{gradient zero}$
Inflow Boundary (HVAC system)	$U_{in}=6.12m/s$, $TI=10\%$ $C_{in,f}=C_{out,f}$ (recirculation)

	$C_{in,r=0}=1$ (normalized)
Outflow Boundary (HVAC system)	$U_{out,f}$ =pressure outlet $C_{out,f}$ =gradient zero
Wall Treatment	Velocity: No slip VHP: deposition flux model (eq.6-3) $\gamma=1.89 \times 10^{-6}$ [-] for SUS304 $\gamma=5.25 \times 10^{-5}$ [-] for Shelf
Self-decomposition	VHP: uni-molecular reaction model (eq.6-2) $k_{in}=3.85 \times 10^{-4}$ [1/sec]

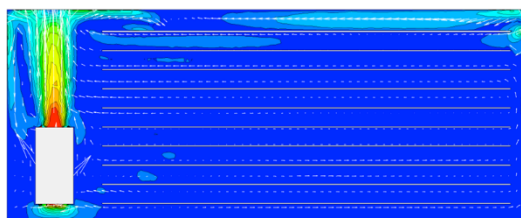
6.5 数値解析結果

6.5.1 コンテナ内流れ場解析結果

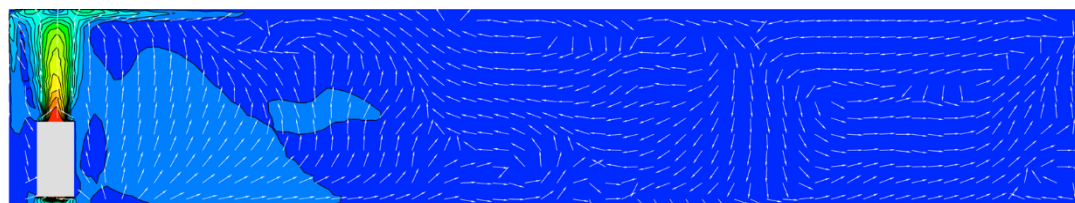
VHP 発生装置のみ稼働条件の流れ場解析結果を図 6-4(A)に、VHP 発生装置とコンテナ空調装置の同時稼働条件の流れ場解析結果を図 6-4(B)に示す。20 フィートコンテナは $z=1.135\text{m}$ の x-y 断面、40 フィートコンテナは $z=1.132\text{m}$ の x-y 断面を示している。VHP 発生装置のみ稼働条件では、VHP 発生装置の吹出噴流到達域周辺のみ明確な気流分布が形成されており、VHP 発生装置から離れた領域（空調機側）ではほぼ滞留域となる。VHP 発生装置とコンテナ空調装置の同時稼働条件では、床面に沿って設置されているコンテナ空調機吹出口より供給された噴流がコアンダ効果によって床面に付着して流れ場を形成し、コンテナ内に大循環流を形成する。



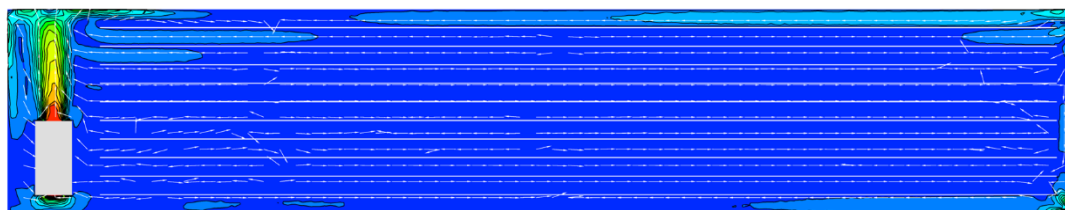
(a) Case20-1 (t=18,000s)



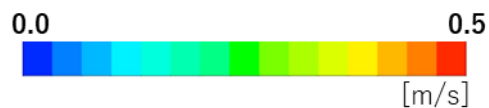
(b) Case20-3 (t=3,600s)



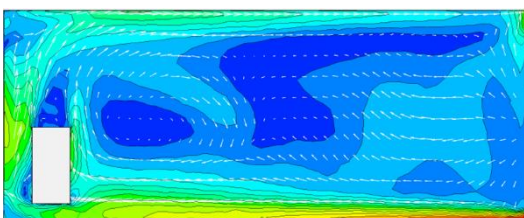
(c) Case40-1 (t=18,000s)



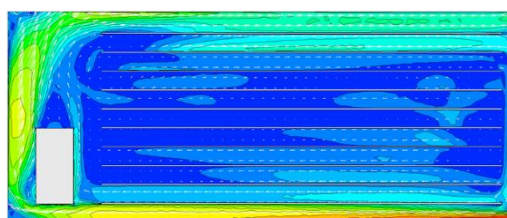
(d) Case40-3 ($t=3,600s$)



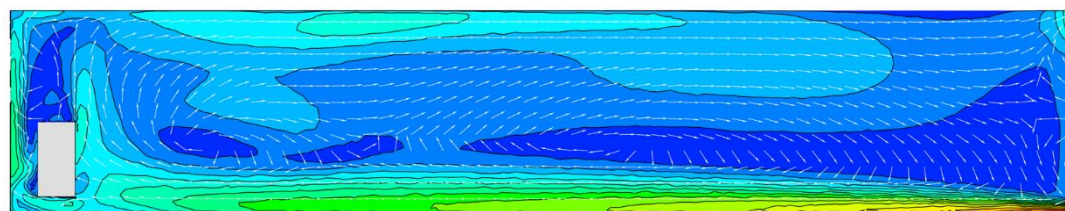
(A) VHP 発生装置のみ稼働条件の流れ場



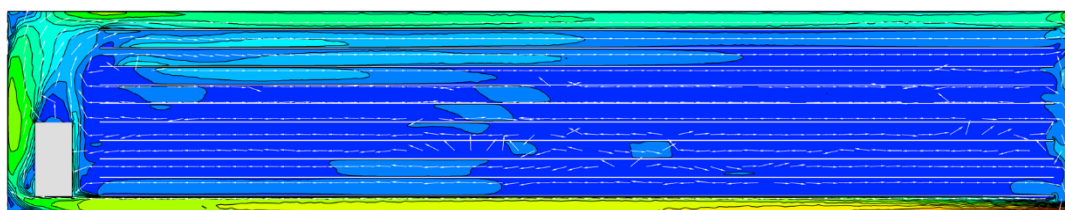
(a) Case20-2($t=18,000s$)



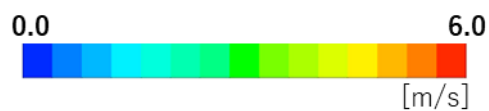
(b) Case20-4 ($t=3,600s$)



(c) Case40-2 ($t=18,000s$)



(d) Case40-4 ($t=3,600s$)



(B) VHP・コンテナ空調装置の同時稼働条件の流れ場

図 6-4 流れ場解析結果

6.5.2 コンテナ内濃度解析結果

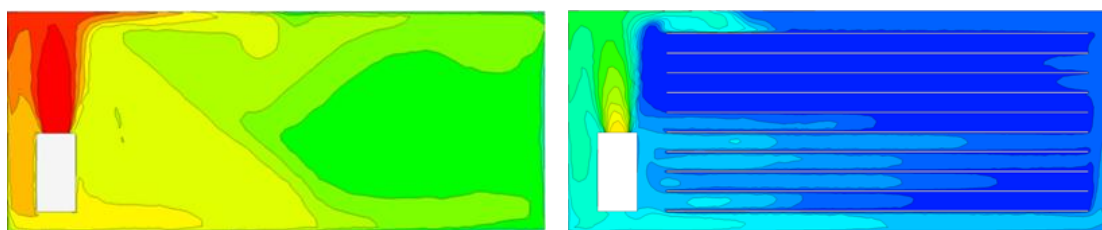
VHP 発生装置のみ稼働条件の濃度場解析結果を図 6-5(A)に、VHP 発生装置とコンテナ空調装置の同時稼働条件の濃度場解析結果を図 6-5(B)に示す。仕切り棚無を想定した Case20-1, Case20-2, Case40-1, Case40-2 では解析開始 (VHP 発生開始を $t=0$ と設定) から 18,000s 程度経過した時点で完全な濃度定常状態となった。N95 マスク設置用の仕切り棚有を想定した Case20-3, Case20-4, Case40-3, Case40-4 では、解析開始から 400s から 1,200s 程度経過した時点で濃度定常状態となった。

VHP 発生装置のみを稼働させた条件では、コンテナ内に明確な VHP 濃度の不均一分布が形成されており、VHP 発生装置周辺で高濃度となるものの、その他の領域では滞留域となるために VHP が効率的に輸送されず低濃度領域が形成される。コンテナ内の VHP はコンテナ壁面での吸着分解の他に、自己分解によって濃度低減する。

一方で、VHP 発生装置とコンテナ空調装置の同時稼働条件では、すべての N95 マスク設置棚の有無に関わらず全ケースにおいてコンテナ内濃度分布がほぼ均一となった。

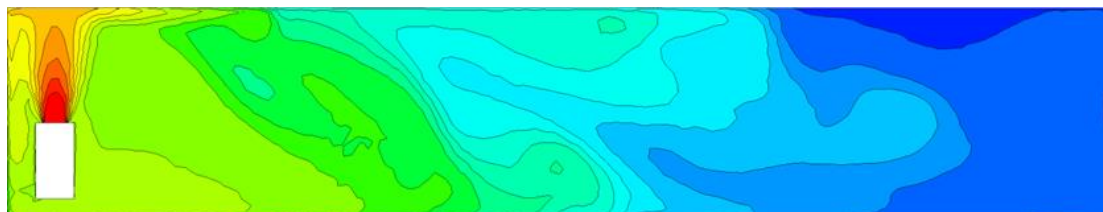
図 6-6 には定常状態におけるコンテナ内の VHP 体積平均濃度と標準偏差、コンテナ内の最大最小濃度を示す。仕切り棚を想定したケースにおいて仕切り棚を Plywood の反応確率 (Reaction Probability) γ 値を採用した条件の他、SUS304 の γ 値を適用した結果も示す。VHP 発生装置のみ稼働条件と VHP 発生条件とコンテナ空調装置の同時稼働条件では、濃度分布に有意な差があることが確認できる。コンテナ空調装置を稼働させることでコンテナ内濃度分布のばらつきを小さくすることが可能であり、均一な濃度分布形成が可能になる。また、仕切り棚有を想定した全てのケースにおいて、仕切り棚 γ 値を Plywood の条件とした場合は、SUS304 の場合と比較して有意に体積平均濃度が低くなる結果となった。特に、VHP 発生装置とコンテナ空調装置の同時稼働条件である Case20-4, Case40-4 では、仕切り棚の種類によって体積平均濃度に大きな違いが生じる結果となった。

本解析では N95 マスクを各仕切り棚上に隙間なく設置していると仮定している。各仕切り棚上での除染効果を定量的に評価するために、定常状態における仕切り棚表面に対する VHP 吸着分解フラックス値を図 6-7 に示す。面積平均値の他、標準偏差、最小最大フラックスの値を示している。図 6-6 同様に、仕切り棚の γ 値を Plywood にした場合と SUS304 にした場合の結果を示している。コンテナ内濃度分布解析結果と同様に、コンテナ空調装置を稼働させることで仕切り棚表面に対する VHP 吸着分解フラックスのばらつきが小さくなり、コンテナ内での一様なフラックス分布となり均一な除染効果が期待できることを確認した。また、全ケースにおいて仕切り棚を Plywood と想定したケースの方が SUS304 を想定したケースより VHP 吸着分解フラックス量の平均値が大きくなる結果となった。

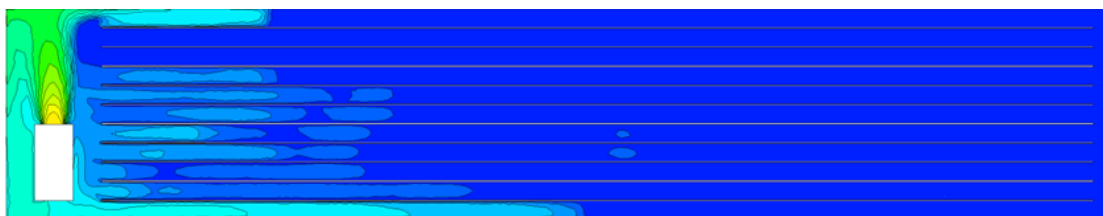


(a) Case20-1 ($t=18,000s$)

(b) Case20-3 ($t=3,600s$)



(c) Case40-1 ($t=18,000s$)



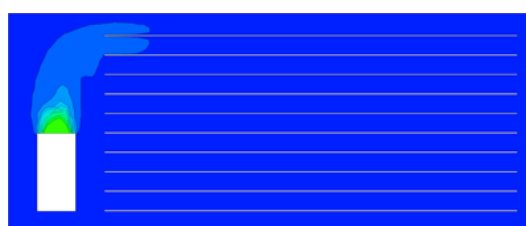
(d) Case40-3 ($t=3,600s$)



(A) VHP 発生装置のみ稼働条件



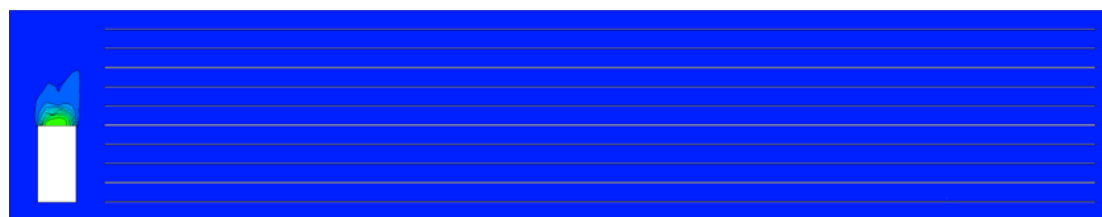
(a) Case20-2 ($t=18,000s$)



(b) Case20-4 ($t=3,600s$)



(c) Case40-2 ($t=18,000s$)

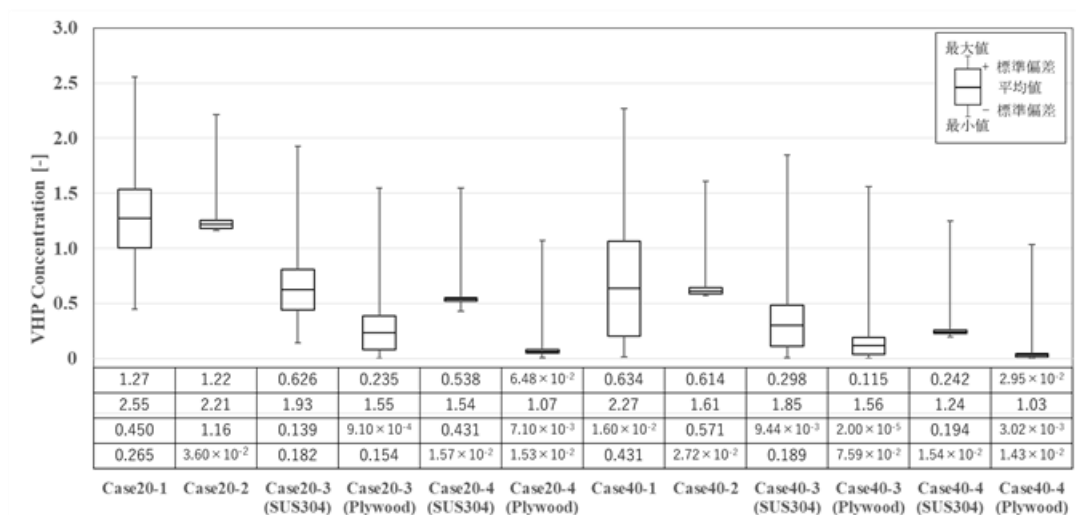


(d) Case40-4 ($t=3,600s$)



(B) VHP・コンテナ空調装置の同時稼働条件

図 6-5 濃度場解析結果



(図中の上より, VHP コンテナ内濃度の平均値[-], 最大値[-], 最小値[-], 標準偏差[-]を示す.)

図 6-6 コンテナ内 VHP 濃度

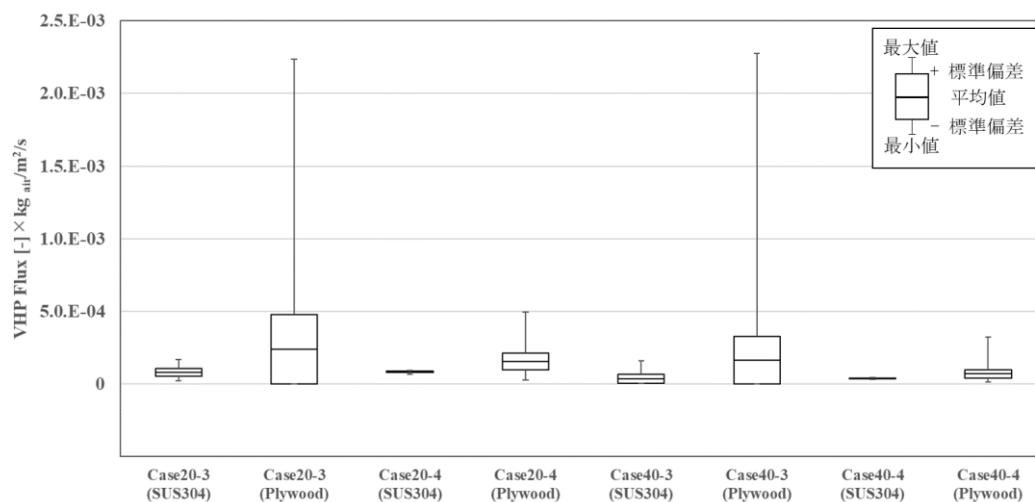


図 6-7 仕切り棚表面における VHP 吸着分解フラックス

6.5.3 コンテナ内 VHP 濃度の時間変化

VHP による除染作業後は、コンテナ内の VHP を排出することで濃度低減させ、作業者のコンテナ内への入室が可能にする必要があるため、その条件を明らかにする。VHP 発生装置稼働開始($t=0$)から十分に濃度場が定常状態となったことを確認した後、コンテナ空調装置の吹出口から外気(VHP 濃度ゼロ)を供給することでコンテナ内の VHP パージを実施することで、濃度減衰解析を実施した。仕切り棚無を想定した Case20-1, Case20-2, Case40-1, Case40-2 の結果を図 6-8 に、仕切り棚有 (Plywood) を想定した Case20-3, Case20-4, Case40-3, Case40-4 の結果を図 6-9 に、仕切り棚有(SUS304)を想定したケースを図 6-10 に示す。解析開始から定常濃度の 95%になる時間を TA_{95} , 99%濃度になる時間を TA_{99} , 濃度場定常状態から VHP パージモードを開始し、パージモード開始時の初期濃度が 95%低下する時間を TB_{95} , 99%低下する時間を TB_{99} とし、それらの結果を表 6-3 に示す。

大量の N95 マスクをコンテナ内に設置したと仮定したケース (仕切り棚(Plywood)有の解析ケース) である Case20-4 と Case40-4 に着目すれば、20 フィートコンテナを対象とし VHP 発生装置とコンテナ内空調装置の同時稼働条件とした場合 (Case20-4) では、VHP 発生から 401s 経過時点で 99%定常状態に到達する。コンテナ内 VHP の 99%パージに必要な時間は 105s であった。同条件での 40 フィートコンテナの場合 (Case40-4) では、VHP 濃度が 99%定常濃度となるまでに 420s を要し、99%パージには 137s 要する結果となった。一方で、仕切り棚を SUS304 と想定した場合、Case20-4 では、VHP 発生から 3,271s 経過時点で 99%に到達する。コンテナ内 VHP の 99%パージに必要な時間は 145s であった。Case40-4 では、VHP 濃度が 99%定常濃度となる時間は 3,123s 要し、99%パージには 211s を要する結果となった。

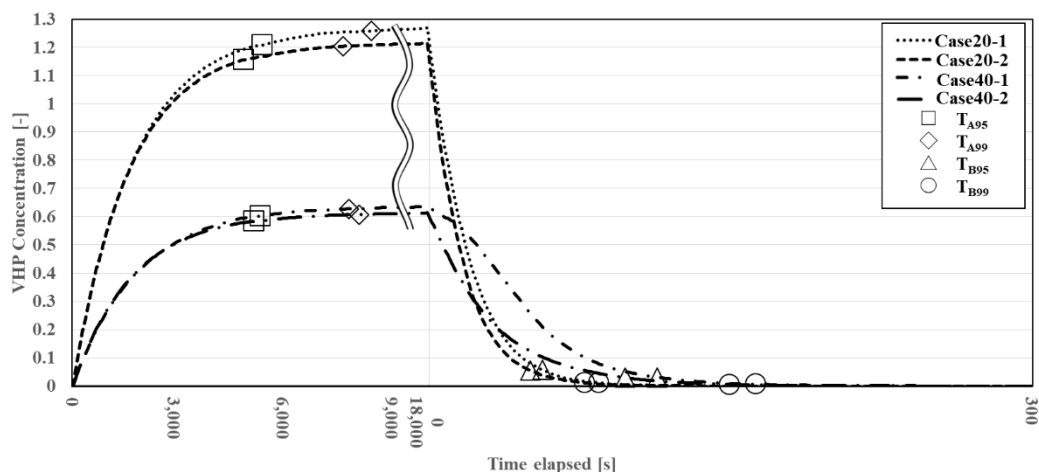


図 6-8 仕切り棚なし条件の空間平均濃度時間変化

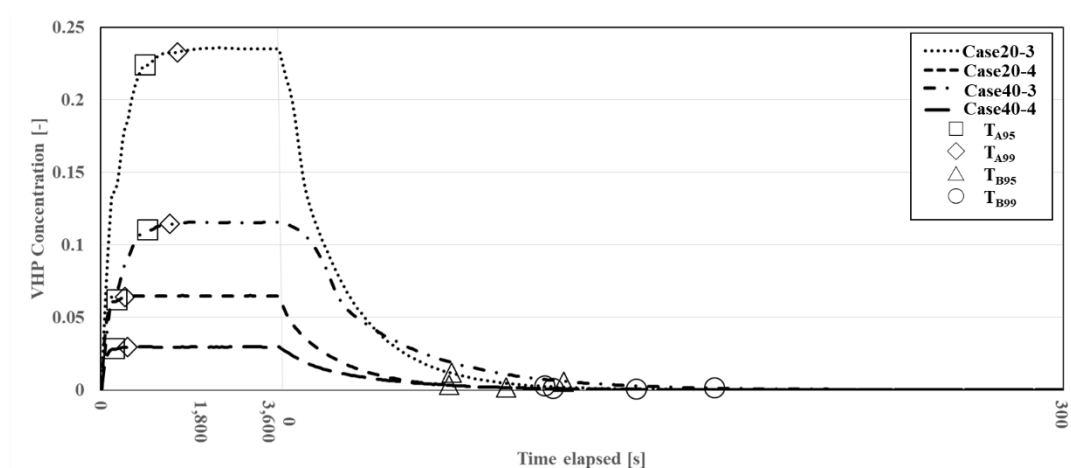


図 6-9 仕切り棚($\gamma=5.25 \times 10^{-5}$ [-])あり条件の空間平均濃度時間変化

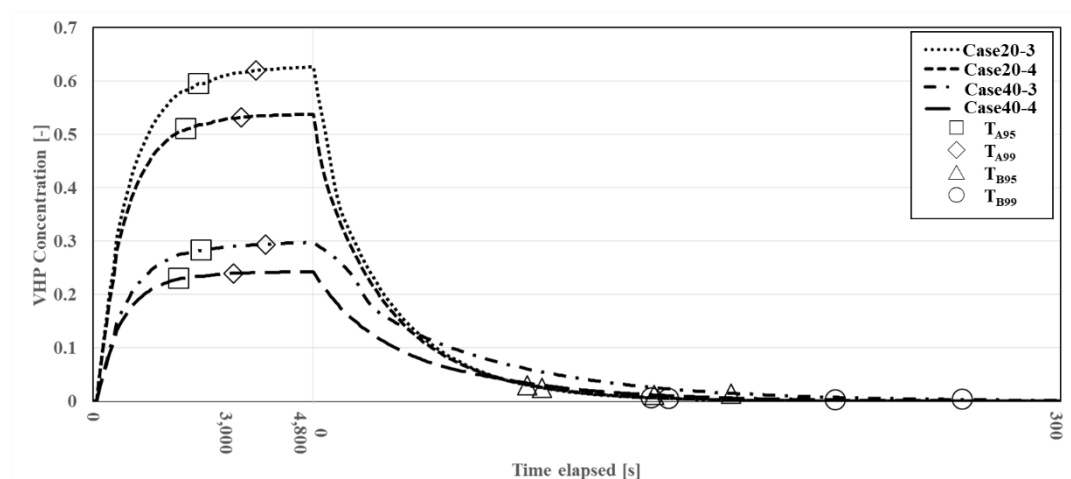


図 6-10 仕切り棚($\gamma=1.89 \times 10^{-6}$ [-])あり条件の空間平均濃度時間変化

表 6-3 濃度時間変化

	Case20-1	Case20-2	Case20-3	Case20-4	Case40-1	Case40-2	Case40-3	Case40-4
TA95[s]	5,414	5,065	784	260	5,407	5,290	798	243
			2,407	2,181			2,410	2,086
TA99[s]	8,447	7,783	1,294	401	7,898	8,139	1,203	420
			3,587	3,271			3,777	3,123
TB95[s]	57	51	66	65	114	98	110	87
			87	93			169	138
TB99[s]	85	78	102	105	163	150	167	137
			137	145			262	211

(仕切り棚を想定した Case20-3, Case20-4, Case40-3, Case40-4 は上段に Plywood, 下段に SUS304 の時間[s]を示す)

6.6 考察

VHP 発生装置稼働時の最大処理風量は $72\text{m}^3/\text{h}$ であることから 20 フィートコンテナ ($V=27.8\text{m}^3$) に対する換気回数は 2.59h^{-1} (名目換気時間 $\tau_n=1,390\text{sec}$), 40 フィートコンテナ ($V=57.7\text{m}^3$) に対する換気回数は 1.25h^{-1} (名目換気時間 $\tau_n=2,885\text{sec}$) となる. VHP 発生装置のみを稼働させた条件では, 完全な濃度定常に到達するまでこの名目換気時間の 3~4 倍程度の時間を要している. また, VHP の自己減衰を再現する一次反応速度定数は濃度半減時間スケールを 30 分として算出した値であり, この濃度の自己減衰の時間スケールが濃度定常までの時間に大きな影響を与える.

VHP による N95 マスクの除染の観点では, コンテナ内の空気中 VHP 濃度の他, N95 マスク表面 (本解析では仕切り棚表面と仮定) における VHP 吸着分解フラックスがガイドライン作成上の重要な情報となる^{注6-6)}.

ここでは, N95 マスクを対象にしたほぼ唯一の基礎実験報告例である FDA レポートに示された除染条件を参考に, 本解析条件での除染効率の考察を行う⁶⁻¹¹⁾. FDA レポートでは, Biological indicator として *G. stearothermophilus* 胞子を使用し, チャンバー310L 内で, VHP 発生後, 100~200ppm の室内濃度に保ちながら 150 分間の除染を行うことで滅菌 (10^{-6} 減少の完全除染) を確認したと報告されている. 例えば, 各ケース解析結果である VHP 無次元濃度を, コンテナ内定常濃度 100ppm を代表濃度として有次元化して議論する. この場合, 20 フィートコンテナに着目すると, Case20-1 (仕切り棚無・空調機稼働無) と Case20-2 (仕切り棚無・空調機稼働有) では, コンテナ内最低濃度は各々 35.4ppm, 95.4ppm となる. そのため, Case20-1 の条件では, FDA 報告の除染時間 (150 分) より, 2.86 倍の除染時間の確保が必要となる. 一方, Case20-2 では, コンテナ内はほぼ完全混合状態であり, 除染時間は 1.05 程度長く確保することで対応できる. また, Case20-3 (仕切り棚(Plywood)有・空調機稼働無) と Case20-4 (仕切り棚(Plywood)有・空調機稼働有) では, 仕切り棚表面での VHP 吸着分解に伴う濃度低下があり, コンテナ内最低濃度は各々 0.387ppm, 11.0ppm となる. そのため, 特に Case20-3 条件では FDA 報告の除染時間より, 258 倍長く除染時間を確保する必要がある, 現実的ではない.

いずれのケースも, 空調機稼働によりコンテナ内が攪拌され, VHP 濃度は均一に近づくが, 除染効率には強い不均一性があることが確認された. コンテナを利用して全てのマスクの完全除染を達成するためには空調機稼働条件においてもターゲット VHP 濃度を FDA 実験条件の 10 倍程度確保する必要がある.

本解析では VHP 発生装置 1 台の設置条件を想定したが, 複数台の VHP 発生装置を設置する最適配置などの更なる検討が必要である. また, 本解析では N95 マスク素材に対する VHP の Reaction Probability として Plywood と SUS304 の値を適用したが, マスク幾何形状の正確な再現に加え, Reaction Probability の同定も重要な課題である.

6.7 結語

使用済み N95 マスクの再利用に向けた除染方法に関する基礎検討として、大量の N95 マスクを汎用コンテナ内に設置した上で、ガス状の過酸化水素 VHP を充満させる方法に関する数値解析を実施した。特にコンテナ内に密閉空間を作出した後に VHP を発生させた場合の非定常の濃度場形成とマスク表面に対する VHP 吸着分解フラックスに関して基礎的な検討を行った。

本章で得られた知見を以下に整理して示す。

1) VHP 発生装置とコンテナ内空調装置の同時稼働条件とすることで、コンテナ内の VHP 濃度分布が均一になり、N95 マスクを配置する仕切り棚上における VHP 吸着分解フラックスのばらつきも小さくなる。コンテナ内で均一な除染を行うためには、コンテナ内空調装置を用いた空気混合が効率的である。

2) 20 フィートコンテナの場合、VHP 発生装置とコンテナ内空調設備を稼働させた条件で、コンテナ内の VHP 体積平均濃度が完全な定常状態となるまでに仕切り棚を Plywood と想定した場合、401s の時間経過を要し、VHP のページ時間は 105s 程度となった。一方で仕切り棚を SUS304 と想定した場合、3,271s の時間経過を要し、VHP ページ時間は 145s 程度となった。

注釈

注 6-1) WHO は新型コロナウイルス感染症の正式名称を COVID-19 と発表している。一方でウイルス名については国際ウイルス分類委員会 (International Committee on Taxonomy of Viruses : ICTV) が SARS (重症急性呼吸器症候群)を引き起こすウイルス(SARS-CoV)の姉妹種であるとして SARS-CoV-2 と名付けている。

注 6-2) 一般的な商用冷凍コンテナに実装されている空調機は循環型であり、外気導入の機能は組み込まれていない。冷凍コンテナを除染に使用する際には、外気導入機能を追加するための改修を行う必要がある。

注 6-3) 本解析のマスク設置については、棚上面に隙間なく均一にマスクを設置している条件を想定しており、計算負荷低減のため、マスク幾何形状は簡略化し、単純な平面を想定するために Shelf 型とした。

注 6-4) N95 マスク素材に対する Reaction Probability γ 値の報告例が無いため、本研究では木質材料(Plywood)を対象とした同定結果⁵⁻²⁾を適用した。その上で、SUS 304 を対象とした γ の値を用いた解析も比較として行うことで γ が異なる場合の影響を検討した。 γ の設定値は除染効果を決定する重要なパラメータであり、今後 N95 マスク実物を対象とした同定実験が必要である。

注 6-5) 空調機を用いた VHP の攪拌(再循環)を行う場合、空調機内での VHP 濃度減衰が生じる可能性があるが、本解析ではこの濃度変化は無視した条件とした。

注 6-6) 仮に VHP 発生装置から基準発生濃度 ($C_{in,r=0}$) を 100ppm とする。20 フィートコンテナを想定した場合、仕切り棚を Plywood, もしくは SUS304 としたとき、仕切り棚表面における VHP 吸着分解フラックスは $1.5 \times 10^{-5} \text{ kg}_{\text{VHP}}/\text{m}^2/\text{s}$, $7.7 \times 10^{-6} \text{ kg}_{\text{VHP}}/\text{m}^2/\text{s}$ となる。

【参考文献】

- 6-1) Centers for Disease Control and Prevention (CDC), Recommended Guidance for Extended Use and Limited Reuse of N95 Filtering Facepiece Respirators in Healthcare Settings
(www.cdc.gov/niosh/topics/hcwcontrols/recommendedguidanceextuse.html)
- 6-2) 厚生労働省通達 N95 マスクの例外的取り扱いについて, 令和 2 年 4 月 10 日
(<https://www.mhlw.go.jp/content/000621007.pdf>)
- 6-3) Kazuhide Ito, Sung-jun Yoo and Hirofumi Horata. Identification of Model Parameters of Vaporized Hydrogen Peroxide Decomposition Flux on Building Materials for Computational Fluid Dynamics, Journal of Environmental Protection, Vol.7 No.2, 2016, pp212-229
- 6-4) Chen X, Chen Q. Comparison of different decontaminant delivery methods for sterilizing unoccupied commercial airliner cabins, Building and Environment, 45, 2010, 2027-2034
- 6-5) Kazuhide Ito. Experimental and CFD Analyses Examining Ozone Distribution in 2D Model Room with Laminar and Turbulent Flow Field. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, vol. 6, no.2, 2007, pp 387-394
- 6-6) Cano-Ruiz JA, Kong D, Balas RB, Nazaroff WW. Removal of reactive gases at indoor surfaces: Combining mass transport and surface kinetics. Atmospheric Environment, 27A, 13, 1993, 2039-2050
- 6-7) Menter, F.R., 1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications 32.
- 6-8) Vercé MF, Jayaraman B, Ford TD, Fisher SE, Gadgil AJ, Carlsen TM. Minimizing decomposition of vaporized hydrogen peroxide for biological decontamination of galvanized steel ducting, Environmental Science and Technology, 42, 2008, 5765-5771
- 6-9) Ito K, Inthavong K, Kurabuchi T, Ueda T, Endo T, Omori T, Ono H, Kato S, Sakai K, Suwa Y, Matsumoto H, Yoshino H, Zhang W, Tu J. CFD Benchmark Tests for Indoor Environmental Problems: Part 1 Isothermal/non-isothermal flow in 2D and 3D room model, International Journal of Architectural Engineering Technology, 2015, Vol.2, No.1, 01-22
- 6-10) Sørensen DN, and Nielsen PV. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments, Indoor air, 13, (1), 2003, 2-17
- 6-11) US Food and Drug Administration, Final Report for the Bioquell Hydrogen Peroxide Vapor (HPV) Decontamination for Reuse of N95 Respirators, 2016,
(<https://www.fda.gov/media/136386/download>)

[本章に関連した研究業績]

・査読論文

牟田諒太，劉城準，熊谷一清，伊藤一秀：過酸化水素を用いた N95 マスク再利用に向けた除染方法の検討 第 1 報—数値解析による除染用コンテナ内の過酸化水素濃度分布解析：空気調和・衛生工学会論文集，No.286，pp.1-10，2021.01

第7章 総括

本論文では、3つの異なる室内環境に着目し、各室内環境における化学物質曝露低減のためのリスクアセスメント手法の開発・リスク低減に向けた知見を計算流体力学 CFD 技術と数値人体モデル CSP を基盤とし取得した。本博士論文に取り纏め、得られた知見を以下に整理する。

第1章では、研究の背景と既往研究調査により、本研究の位置付けを明確にした。

第2章では、数値解析における流れ場の計算に必要な流体基礎方程式や、汚染物質のスカラ輸送方程式、本研究で使用する乱流モデル等に関して整理した。

第3章では、九州大学総合理工学研究院に実在する実験室を解析モデルとして再現し、ドラフトチャンバー捕集性能に影響を与える要因について定量的に評価を行った。ドラフトチャンバーは、ドラフトチャンバー内上部に形成される循環流が汚染物質を効率的に封じ込めることで汚染物質の漏洩を防いでいることが明らかになった。循環流形成には実験室側の空調設備は大きく影響を与えずに、排気風量とドラフトチャンバー前面に存在する作業者が影響を与えることを明らかにした。特に、不適切な使用条件（面風速 0.1m/s ）においては、ドラフトチャンバー前面に存在する作業者の生理発熱に伴う上昇流の影響を受け、ドラフトチャンバー内部の循環流が乱れる。その結果、汚染物質封じ込め性能が低下し、汚染物質がドラフトチャンバー下部の作業領域まで広がることが確認された。

第4章では、第3章で得られた知見を基に、排気風量と作業者の有無、さらには作業者の作業姿勢がドラフトチャンバー捕集性能に与える影響を定量的に評価した。3種の換気効率指標（SVE3, NEV, L-PFR）を用いてドラフトチャンバー内部・開口面の汚染物質輸送メカニズムを詳細に解析することで、ドラフトチャンバー捕集性能を総合的に評価した。SVE3 解析より、低排気風量条件においては作業者の存在がチャンバー内の循環流形成に影響を与え捕集性能が低下することが再度示されたが、作業姿勢の変化は捕集性能に大きく影響を与えないことが示された。NEV 解析では、全てのケースで汚染物質の輸送方向は移流方向と同方向となった。しかし、低排気風量条件（面風速 0.1m/s ）で腕を挿入し作業をしているケースでは、無次元 NEV が 1.0 を下回るポイントが多く、移流方向と逆向きの拡散効果が相対的に高くなることが示された。L-PFR 解析では、適切な排気風量条件（面風速 0.5m/s ）より、低排気風量条件の方が無次元 L-PFR 値が大きくなった。これら複数の換気効率指標を用いた解析により、チャンバー内部は、上部領域の循環流による封じ込めによる高濃度領域形成と、下部領域の開口面からの一方向流による流入空気希釈による低濃度領域形成の明確な換気効率分布が示された。

第5章では、巨視的な評価を行う MFA と微視的な評価を行う CFD-CSP 解析を統合させることで、実測調査に基づかない室内濃度予測・個人曝露量予測のためのフレームワークの開発を行った。フレームワークを用いたケーススタディでは、worst-case で計算された室内平均濃度が既往研究の実測値と比較し約 18 倍の過大評価となった。しかし、現実的な環境を想定したケースでは、既往研究の実測値とほぼ同様の値となり、実測調査のみに基づかないフレームワークの適用可能性が示された。

第6章では、新型コロナウイルス発生を契機に品不足が深刻になった N95 マスクを除染対象とし、閉鎖型チャンバー内で除染剤 (VHP) による効率的な大規模除染方法を数値解析により検討すると同時に、作業者の入出時に VHP 曝露を低減するために重要な知見となる閉鎖型チャンバー内 VHP 濃度変化予測を行った。閉鎖型チャンバーでは、VHP 発生装置とコンテナ内空調を同時稼働することで均一な濃度場が形成され、N95 マスクを配置する仕切り棚上の VHP 吸着分解フラックスのばらつきが小さくなることが定量的に示された。また、仕切り棚を Plywood と想定した場合、20 フィートコンテナ内 VHP 体積平均濃度が定常状態となるまで、401s 要したのに対し、SUS304 である場合、3,271s 要したため、仕切り棚の Reaction Probability により有意な差が確認された。

今後の課題は、本博士論文により得られた知見の実用化である。化学物質を取り扱う大学実験室ではドラフトチャンバーが設置されており、非常に重要な局所排気装置である。第3,4章から、定常状態においてドラフトチャンバーの適切な使用は、化学物質曝露による健康リスクを低減する効果的な対策の 1 つとなることが定量的に示された。ドラフトチャンバー捕集性能を維持するためには、ドラフトチャンバー内部で適切な気流形成が重要であることが明らかになったが、実使用条件を想定すると、ドラフトチャンバー内部に存在する実験機器等の障害物が、ドラフトチャンバー内気流を乱す可能性が考えられる。そのため、これらが捕集性能に与える影響を追加解析する必要がある。様々な実条件におけるドラフトチャンバー捕集性能評価を実施し、ドラフトチャンバー捕集性能の定量的なデータを蓄積することで、化学物質使用者側のリスクアセスメントに大きく貢献できると考えられる。また、第5章の一般住宅を対象に現場実測に基づかない個人曝露量予測のためのフレームワークをより高精度に構築していく必要がある。特に MFA 結果を CFD 解析境界条件へ適用する際に検討した簡易法の精度向上が必要である。また、本研究で評価対象物質とした DEHP の他に、統計データとして出荷量などが公表されている化学物質を対象とした個人曝露量予測を実施するなどして、本フレームワークの使用例を蓄積していくことが精度向上につながると考えられる。また、第6章の閉鎖型チャンバー内における除染効率評価では、除染対象物の幾何形状を再現することや、Reaction Probability を同定することで、より実用的な大規模除染ガイドラインのための基礎データを取得・蓄積することが可能になる。

謝辞

本博士論文は 2015 年度から九州大学大学院総合理工学府に在籍しながら行った研究を基に纏めたものです。

九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻の伊藤一秀教授には、九州大学総合理工学府で技術職員として勤務しながら研究を行う上で、様々なご配慮を頂き大変お世話になりました。私自身が研究を行う上での基礎となる専門知識や論文作成など研究全般において懇切丁寧にご指導いただきました。心より感謝申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府物質理工学専攻の中島英治教授には、ご多忙の中、論文の審査を賜りました。また、技術職員として研究を行うことへの多大なるご配慮を頂きました。心より感謝申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻の宮崎隆彦教授には、貴重な時間を頂き論文の審査を賜り、博士論文作成に関する貴重なご助言を頂きました。記して感謝申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻の渡邊裕章教授には、ご多忙の中論文の審査を賜り、数値流体解析に関する貴重なご助言を頂きました。記して感謝申し上げます。

北九州市立大学大学院国際環境工学研究科の松本亨教授には、研究全般にわたり多くのご助言を頂きました。松本亨教授の多大なるご理解により修士号取得ができ、本博士論文を纏めあげるところまで進めることができました。心より感謝申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻の劉城準准教授には、数値解析に関する基礎から、研究全般にわたって多くのご助言を頂きました。研究を行う上での姿勢や考え方などとても参考になりました。深く感謝申し上げます。

福岡女子大学国際文理学部環境科学科の鄭朱娟助教には、換気効率指標 NEV に関する議論を通じて多くのご助言を頂くと共に、ドラフトチャンバー捕集性能評価の研究に関してサポートを頂きました。深く感謝申し上げます。

山口大学工学部感性デザイン工学科の金炫兌助教には、マイクロチャンバー放散実験に関して多くのサポートを頂きました。深く感謝申し上げます。

最後に、いつも精神的に支えてくれる家族に、この場を借りて深く感謝申し上げます。

2022 年 6 月

牟田諒太