

200738008B

厚生労働科学研究費補助金 地域健康危機管理研究事業

建築物衛生における健康危機管理
のあり方に関する研究
(H17-健康-019)

平成 17～19 年度 総合研究報告書

主任研究者 池田耕一

(国立保健医療科学院 建築衛生部)

平成 20 (2008) 年 3 月

目 次

I. 総合研究報告	
建築物衛生における健康危機管理のあり方に関する研究 (主任研究者 池田耕一)	1
II. 分担研究報告	
(1) 建築物内における健康影響危険物の拡散特性の数値解明に関する研究 (分担研究者 加藤信介)	11
(2) 建築物内における生物化学物テロの対策に関する研究 (分担研究者 柳 宇)	25
(3) 空調機エアフィルタの汚染物質の捕集と発生 (分担研究者 鍵 直樹)	51
(4) エアフィルタ捕集性能の経時変化特性に関する研究 (分担研究者 並木則和)	59
(5) 建築物内給水システムにおける飲料水の安全性確保に関する研究 (分担研究者 伊藤雅喜)	63
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	69

I. 総合研究報告

建築物衛生における健康危機管理のあり方に関する研究

主任研究者 池田耕一 国立保健医療科学院 建築衛生部 部長

研究要旨

近年、建築環境に関連した健康ハザードが頻発している。2003 年中国を中心に発生した重症呼吸器症候群（SARS）、2002 年宮崎県の温泉で発生したレジオネラ症集団感染、1995 年東京地下鉄で起きたサリネテロ事件などはまだ記憶に新しい。これらの集団感染のメカニズムに関連した感染経路、建築物室内への拡散特性、ヒトへの被曝等についてまだ十分な検討が行われておらず、現在においても多くの不明な点が残っている。

そこで、本研究は多数の人が集まる建築物において予測せぬ健康ハザードのような緊急事態が発生した場合の対策をまとめることを目的とし、3 カ年の研究において、その対策を①平常時の備え、②緊急時の対策、③事件後の処置の 3 段階に分類し、それぞれについて詳細な検討を行った。本研究より得られた主な知見を以下に示す。

[1] 平常時の備え

日本のオフィスビルなどで最も多く用いられている中性能エアフィルタは細菌とカビ孢子に対する捕集率が 80%以上であるものの、ウィルスのようなナノサイズの微粒子に対する捕集が期待できない。従って、室内気流計画を含めた検討が必要である。

[2] 緊急時の対策

- ① バイオテロ対策においては、浮遊微生物をリアルタイムで検知するセンサーを設置する必要がある。本研究に用いた計測器 IMD（Instantaneous Microbial Detection：瞬間微生物検知器、β版、BioVigilant 社）は、リアルタイムで浮遊微生物を検知することができ、空調機のエアフィルタの下流側に設置することにより、トリガーセンサーとして利用することが可能である。ただし IMD がトリガーセンサーとして用いられるが、微生物を迅速かつ正確に測定するには他の迅速法（たとえば ATP 法など）を用いる必要がある。
- ② 緊急時（発生時）において、建築物内の避難通路を確保し、建築物内の居住者の被曝量を最小限にするために、適正な気流計画が必要である。
- ③ 建築物内で危険物質が発生した場合において、特定地点に設置したセンサーによる危険物の検知から危険物質の発生源が特定できれば、本研究で開発したマクロ・CFD 複合モデルは健康危険物質拡散の検証が多角的、且つ低コスト、短時間で実現可能である。

[3] 事件後の処置

「暴露強度（オゾン濃度×暴露時間）」を定義し、同じ暴露強度であれば同じ殺菌効果を有することが確認された。従って、本研究で提案した暴露強度を用いれば、現場で得られるオゾン濃度に対する必要な殺菌時間の目安が得られる。

分担研究者

平成 17～19 年度

加藤信介（東京大学生産技術研究所 教授）

柳 宇（国立保健医療科学院 建築衛生部 建築物衛生室長）

鍵 直樹（国立保健医療科学院 建築衛生部 主任研究官）

伊藤雅喜（国立保健医療科学院 水道工学部 水道計画室長）

平成 17 年度

並木則和（金沢大学大学院自然科学研究科助教授）（当時）

A 研究目的

近年、建築環境に関連した健康ハザードが頻発している。2003 年中国を中心に発生した重症呼吸器症候群（SARS）、2002 年宮崎県の温泉で発生したレジオネラ症集団感染、1995 年東京地下鉄で起きたサリントロ事件などはまだ記憶に新しい。これらの集団感染のメカニズムに関連した感染経路、建築物室内への拡散特性、ヒトへの被曝等について十分な検討が行われておらず、現在においても多くの不明な点が残っている。

そこで、本研究は多数の人が集まる建築物において予測せぬ健康ハザードのような緊急事態が発生した場合の対策をまとめることを目的としている。具体的に、本研究では、①平常時の備え、②緊急時時の対策、③事件後の処置の 3 段階に分けてそれぞれの対策方法について検討を行った。

B 研究方法

本研究の 3 ヶ年の流れを図-1 に示す。次に、各分担研究の方法について述べる。

【分担研究者 加藤信介】

H17 年度では、3 次元解析モデルとマクロモデルの連成解析手法及びその応用による建築物の災害予防対策の作成に関し、①マクロモデルに基づく熱・空気解析ソフトの現状調査、②熱・空気解析ソフトの連成による汚染質の建築物内における一次元移流拡散の解析、③ CFD（数値流体解析）に基づく定常流れ場における非定常濃度応答計算法の作成、などに関する研究を行った。

H18 年度では、解析結果の高い信頼性と、不特定の建築に適用できる汎用性をもつ解析コードの開発を目指し、以下のプロセスにより研究を進めた。

イ）現状において一般的に普及しており汎用性の高いソフトウェアによる、生物化学テロ（BC テロ）を想定した危険物質の拡散特性解析に対する適応性の検討を行った。

ロ）BC テロを想定した危険物質の拡散特性を、詳細且つ迅速に解析可能な解析コード開発に必要な諸条件の精査と、開発方向性の検討を行った。

H19 年度では、3 次元シミュレーション（CFD）と同等の精度における計算をリアルタイムに PC にて計算可能なマクロ・CFD 複合モデルを開発・発展させ、大型計算機による 3 次元シミュレーション結果との比較検討により、開発モデルの精度とその実用性について検証を行った。

【分担研究者：柳 宇】

H17 年度では、次年度研究の基礎資料を得るために、①日本政府における BC テロの対策の現状、建築物を対象とした BC テロが起きた緊急時の対応方法、および平常時における BC テロの対策方法についての国内外の文献の調査、②浮遊微生物測定器の性能比較、③微生物測定に用いる培地の比較などの基礎的な研究を行った。

H18 年度では、IMD の適応について、生物粒子と非生物粒子発生に対する応答特性のチャンバ試験および実環境（6 病院、1 オフィス、1 空調システム）下での試験を行い、バイオテロ対策のコア部分である浮遊微生物リアルタイム測定の実用性について検討を行った。

H19 年度、分担研究者鍵直樹と共同で空調システム使用再開のための空調システム内の実用的な滅菌方法をチャンバ実験により検討を行った。

【分担研究者：鍵 直樹】

H17 年度では、①チャンバを用いたエアフィルタからの化学物質の発生・除去特性、②新規装置によるエアフィルタからの発生ガスの特性、③実空調システムにおけるエアフィルタからの化学物質の発生と透過特性、に関する実験的な検討を行った。

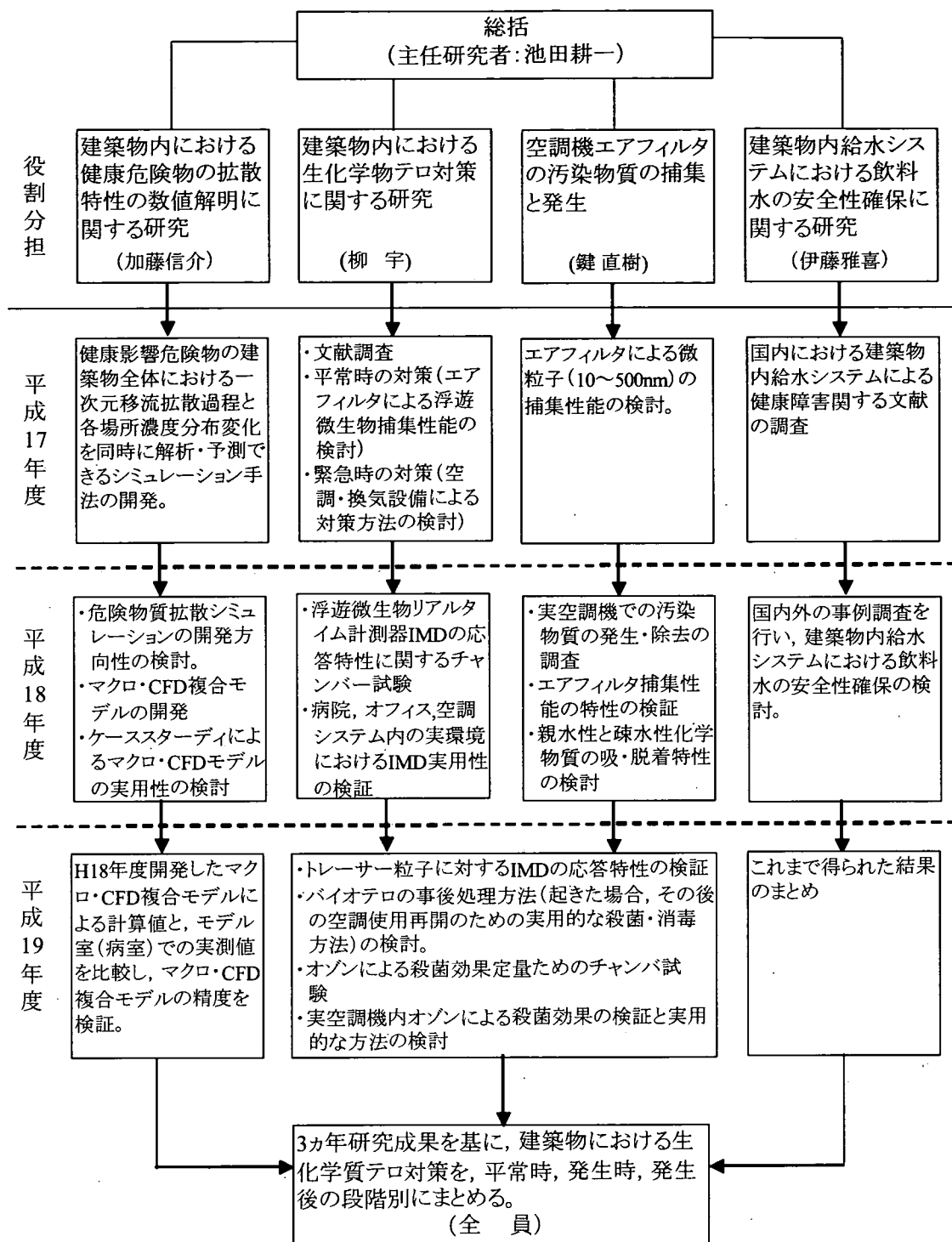


図-1 本研究の流れ

H18年度では、実運転中の空調機エアフィルタからのガス状物質の発生特性とナノサイズ超微粒子に対するエアフィルタのろ過特性について検証を行った。

H19年度、分担研究者柳宇と共同で空調システム使用再開のための空調システム内の実用的な滅菌方法をチャンバ実験により検討を行った。

【分担研究者：伊藤雅喜】

H17年度では、国内におけるクロスコネクション、逆流等の事故事例を調査することにより、屋内給水システムに存在する問題点を抽出した。

H18年度では、WHOで行っている“Water Safety in Building”の作成作業において情報収集を行っているケーススタディの情報を整理し、

建築物内で発生しうる水質事故、感染症などの健康危機の事例およびその原因についてまとめた。

H19年度では、WHOが2006年に出版した(ウェブから入手可能)“Health Aspects of Plumbing”から建築物内給水施設に関するリスク、留意事項を整理した。

C 研究結果

【分担研究者 加藤信介】

「H17年度」 ネットワークモデルによる建築物内の健康影響危険物質の移流拡散解析では、汚染質の一次元移流拡散解析をマクロモデルに基づくネットワークモデルにより行った。COMIS (Conjunction of Multizone Infiltration Specialists, 多数室換気計算プログラム)とTRNSYS (Transient System Simulation Program)をそれぞれマクロモデルの Airflow model と Thermal Model として採用し、その連成解析により建築物内の多数室に発生する熱・空気・汚染質の移流拡散を解明した。また、3室モデルと私立病院モデルの計算結果より、この連成解析手法は汚染物質の建築物全体にわたる移流拡散過程の予測にはかなり有効であることを確認した。定常流れ場における非定常濃度応答計算法の開発では、定常流れ場における濃度の移流・拡散方程式が線形であることを利用して、応答係数法による濃度応答計算法を定式化した。有限な時間幅のパルスに対する応答係数は、流体解析コードを使用して計算し、この応答係数を用いた畳み込み計算によって濃度応答が精度よく計算できることを示した。計算例の結果から、再循環方式から全外気方式への運転切り換えをスムーズに移行できる空調システムを用意すれば、BC テロの対策としてかなり有効であるが明らかになった。

「H18年度」 テロ等の突発的であり微量の拡散により甚大な被害が予測される健康影響危険物質の飛散を想定し、秒単位の危険物質拡散性状を評価することを目的とした解析に対するCOMISの適応性を検討した。検討手法として、室内の不均一な濃度分布を詳細に検証できるCFDによる解析結果との比較を行った。複数室を有する解析ケースにおいて、BC テロを想定し、ある室内にてサリン(分子量:140.9, 致死

量:0.1~0.01ppm)が発生した場合において、別の室における30分間のサリン濃度推移を解析した。CFD解析による結果と比較したCOMISの解析結果から、次の特徴が確認された。

- ① 濃度の立ち上がり性状が緩やかであり、濃度最大値への到達時間が遅い。
- ② 濃度の立ち上がり性状が滑らかである。
- ③ 濃度の最大値が高い。

また、別の室内濃度の上昇性状について詳細な検討を行った結果、流れ場に起因する不均一な危険物質拡散性状の影響を評価できるCFD解析では危険物質発生濃度に追従した空調リターン空気の濃度変化が評価されたことに対し、空間内濃度一様分布を前提とするCOMISでは同様の性状を評価しなかったことが分かる。本解析におけるサリン発生室以外の空調室への主な危険物質拡散経路はダクトであり、サリン発生室の空調リターン空気の濃度上昇性状の違いが、別の室における解析手法の違いによる室内の濃度立ち上がり性状の差異に影響したことが分かった。

「H19年度」 開発した解析手法を用いたシミュレーションによる予測値と実験で求めた実測値との比較を行い、精度の検証を行った。

シミュレーション結果:マクロモデルの解析結果はCFD解析結果と比較し濃度の立ち上がりが緩やかである一方、マクロ・CFD複合モデルの解析結果はCFD解析結果とよく一致している。実計算時間は、検証計算用3次元CFD解析ではクラスタマシンの1ノード(CPU:Pentium4, 3.6GHz, Memory:2GB)を使用し約50時間を要したのに対し、マクロ・CFD複合モデルは応答係数の計算時間を除き、PC(CPU:Pentium4, 3.4GHz, Memory:1GB)を使用して約2秒であった。

また、シミュレーションの精度検証を目的とし、病室(モデルルーム)における室内気流性状の実測を行った。

実測結果:室内気流の速度は換気回数(11回/時間)が比較的に大きいことから多少大きい気流速度が現れた。居住領域の高さ1mでの3分平均風速は、Case1は0.09~0.61[m/s]、Case2は0.09~0.51[m/s]となった。一部の風速は不快感を誘発するおそれのある0.3~0.4[m/s]を超えていた。

【分担研究者 柳 宇】

「H17年度」 建築物におけるBCテロ対策の現状に関する調査では、次の事柄が分かった。①日本政府は米国9・11同時多発テロ事件とその直後に起きた郵便物の炭疽菌混入事件を受けて、緊急な対応を検討し、政府全体、各都道府県行政機関、保健所の健康危機管理体制を構築するとともに、適時に十分な情報を円滑に国民に提供している。しかし、今までのBCテロ対策は必ずしもその発生場所を明確に想定されているものではない。②建築物を対象としたBCテロが起きた緊急時の対応方法は、基本的に病原体または毒性化学物質の拡散を防ぐこと、即ち、空調と個別ファンを止め、居住者の避難通路を確保することであるが、病原体または毒性化学物質を検知できるセンサーが前提となっていることが分かった。細菌をリアルタイムで検知できる簡易センサーが開発されているが、その実用性についての検証が必要である。③平常の対策手法としては、室内気流の適正計画、エアフィルタなどの空気清浄装置の設置と適正な管理のほか、とくに、空調の外気取入れ口の適正な設置と管理（セキュリティ）が重要である。

「H18年度」 前年度の調査結果より、BCテロ対策のコア技術は浮遊微生物粒子をリアルタイムで検知できるセンサーが必要である。そこで、浮遊微生物をリアルタイムで検知するIMDの適用に関する検討を行った。

IMDの測定結果では、試験室（クリーンルーム）内に微量の *Wallemia sebi* 胞子を放出することによる室内濃度の上昇とその後の低減を全て正確に測定できないものの、ほぼ培地法（ゼラチンフィルタを使用）と同程度の濃度が得られ（20CFU/L以下）、微生物粒子に対して応答することが分かった。また、非生物粒子のラテックス粒子に対して、IMDは生物粒子としてカウントすることがなかったことから、IMDは生物系粒子の検知においてその適応の可能性が示唆された。

一方、6病院の待合室及び1オフィスビルの実環境におけるIMDの測定結果は、培地法のMGサンプラーによる室内浮遊細菌濃度の変動特性とほぼ同じ傾向を示したことから、IMDは浮遊細菌濃度の変動をリアルタイムで測定することが示唆された。しかし、IMDがMGサンプラーの約100倍の値を示した。これは、SCD

(Soybean Casein Digest, ソイビーンカゼインダイジェスト) 培地は限られた一部の細菌しか測定できないのに対して、IMDは一部の細菌のみならず、蛍光を放出するほかの生物粒子を測定することも可能であるためと考えられる。この結果は在来言われている“環境微生物のうち人工培地に生育できるものは1%程度である”という報告と整合する。この結果から、バックグランド濃度の高い環境中に極微量の微生物（病原体）が放出された場合におけるIMDの適用が難しいことが分かった。そのため、IMDをバックグランド濃度の低い環境に設置する必要があると考え、空調機のエアフィルタの下流側に設置した場合の応答特性について1週間の連続測定を行った。その結果、空調システムの行為的な外乱（フィルタに振動を与えて、付着微生物を発生させる方法）に対してリアルタイムで応答することが明らかになった。

「H19年度（分担研究者鍵直樹との共同研究）」 前年度では、カビ胞子と非生物粒子に対するIMDの応答特性に関するチャンバ試験、実環境におけるIMDの測定値と在来の培地法の測定値の比較を行った。今年度では、IMDの粒径別測定特性を明らかにするために、トレーサー粒子（粒度分布2~8 μ mの蛍光粒子）に対する応答特性の試験を行った。

CR（クリーンルーム）内にトレーサー粒子50mgをガラス製のチャンバに設置し、圧力空気の加圧より、マネキンの口から瞬間的に吹き出させ（口での速度：約10m/s）、4m以上離れている箇所での浮遊粒子濃度を測定した。蛍光粒子を放出前後の比較から、IMDは蛍光粒子の粒度分布を含めて適当に応答することが明らかになった。

一方、初年度の文献調査の結果から明らかになっているように、バイオテロが起きた後に、空調システムの再開が重要であり、そのための空調システムの殺菌方法とその効果に関する検討が必要である。

殺菌方法には、紫外線照射、ホルムアルデヒド（HCHO）薫蒸、オゾンガスによる殺菌などの方法がある。空調システム内のフィルタ、コイルフィンなどの形状の特性から、紫外線による殺菌はそれが照射していない箇所（フィルタ・フィン内部など）に対して効果がないため、適用ができないと考えられる。また、HCHO

は発がん性物質であり、高濃度の使用はリスクが高くなるばかりではなく、薫蒸後の処理に手間がかかる。そこで、本研究では、オゾンによる空調システム内の殺菌方法に注目した。オゾンは分解後酸素になるため、環境負荷が少ないほか、その後処理も必要としない。今までのオゾンによる殺菌の効果に関しては、断片的な情報があるが、実際の空調システムに応用した場合において、その効果などの詳細について検討を行う必要がある。

そこで、黄色ブドウ球菌 (*Staphylococcus aureus*, NBRC 12732), 大腸菌: *Escherichia coli*, NBRC 3972), クロカビ: *Cladosporium cladosporioides*, NBRC6348), アオカビ: *Penicillium pinophilum*, NBRC 6345), クロウジカビ: *Aspergillus niger*, NBRC 6341) を用いたチャンバ試験を行い、オゾンの殺菌効果を定量した。

【分担研究者 鍵直樹】

「H17年度」 チャンバを用いたエアフィルタの VOCs 発生特性の実験では、新品のフィルタでもそれぞれの物質については検出されているが、使用されたフィルタの方がフィルタの汚れの影響により多く検出されており、この方法で発生量の違いを判明することができることが分かった。

新規装置による発生ガスの特性の実験では、新品フィルタについては、この方法では検出されないレベルであった。また使用済みフィルタに関しての結果は、物質によっては流量が増えることにより発生量としては増加する物質もあった。

実空調システムにおける微粒子のエアフィルタの発生・透過特性の実験では、室内と室外の濃度比 (I/O 値) は 1 を下回り、今回の粒径範囲では微小になるほど低い値、大気よりも濃度が低い傾向となった。一般に粒径 200nm 程度の粒子 (単体ウィルス粒子の大きさ) は、フィルタ及びダクト、室内壁面などに沈着しにくく、空間中に浮遊する傾向にあること、室内への侵入の経路によっても、この粒径前後については、外気の影響を受けやすいことが明らかになった。

「H18年度」 実空調機によるエアフィルタ前後での VOC 濃度の実測については、空調機に流れる空気は外気と多く混合するため、比較

的低濃度であるが、トルエンや TVOC に関しては、若干後流側の濃度が高い傾向となっており、エアフィルタなど空調機による発生が認められた。エアフィルタ前後での微粒子の濃度変化では、エアフィルタの粒子の沈着により、粒径 0.1 μm 前後をピークとして、微小・粗大になると透過率が下がり (除去率が上がり)、粒径 0.1 μm 程度がこの環境下でもフィルタで除去することが困難であることが分かった。

【分担研究者 伊藤雅喜】

「H17年度」 クロスコネクションによる水質異常、マンション内の浴槽水の他の住戸への逆流、受水槽水道におけるクリプトスポリジウムの集団発生の事例について検討し、浴槽水の逆流では逆流防止機器の性能確保の重要性と、適切な場所に適切な逆流防止装置の設置を行うことが必要であることが分かった。

「H18年度」 建築物内で発生しうる水質事故、感染症などの健康危機の事例およびその原因について調査した結果、原因物質としてはレジオネラの報告事例が最も多く、そのほかの原因物質ではクリプトスポリジウム、ジアルジア (*Giardia*) などがあり、ほとんどの事例が微生物によるものであった。

発生場所では病院および療養施設 (nursing home) の事例が最も多く、ついでホテル、高層ビルなどでの事例が報告されている。建築物内の発生箇所では配水系等におけるものが最も多く、そのほかでは貯水槽、冷却塔の事例が複数報告されている。発生原因は多岐にわたりまとめるのは難しいが、冷却塔における微生物汚染、不十分な貯水槽の管理、配管内の滞留、温度管理の不徹底、間欠給水、逆流などが報告されている。

「H19年度」 微生物のほとんどが従属栄養細菌であり、生物膜として微粒子上や管路内表面で水に接触して増殖する。従属栄養細菌は *Aeromonas*, *Flavobacterium*, *Serratia*, *Pseudomonas*, *Klebsiella* 等日和見感染症を引き起こす広範な種を含む。しかしこれらの微生物の飲料水からの摂取による腸管系疾患が一般の人々に起こったという確たる事例はない。一部の深刻な免疫不全患者および病院内環境では問題となる可能性が残っている。ほとんどの従属栄養細菌は健康な人には無害であるが、水道水の異臭味を発

生させ、着色などによる問題を引き起こす可能性がある。

飲料水の化学物質による汚染は地表水、地下水の自然由来の汚染、人為的汚染または浄水処理における汚染（消毒副生成物）、配水中における汚染（腐食）などがある。通常はこれらの汚染物質はごく微量であり、消毒副生成物をのぞき水道水は暴露源の一つに過ぎず、最も重要な汚染源とはなっていない。

D 考察

建築物を対象とした生化学物テロの対策を①平常時、②緊急時（発生時または発生の恐れが高まる時）、③発生後の3段階に分類し、それぞれについて詳細な検討を行った。

（1）平常時

平常時では、室内有害物質濃度を低くするために、室内気流の適正な計画・運用とエアフィルタによる微生物を含めた粒子状物質除去の方法が用いられる。気流計画については、次の（2）部分を参照。ここでは、主として、日本のオフィスビルなどで最も多く使用されている中性能エアフィルタによる微生物粒子と微粒子の除去性能について考察を行う。

エアフィルタは主として慣性衝突、さえぎり、拡散、静電気の機構により、エアフィルタ近傍の浮遊粒子を捕集する。実際の場合、エアフィルタによる粒子の捕集は上記のどれかまたは複数の機構による。粒径によって捕集機構が異なるが、 $0.2\mu\text{m}$ 前後の粒子に対しての捕集率は最も低いことが知られている。本研究では、中性能エアフィルタは浮遊細菌、浮遊真菌に対する捕集率が80%以上であることが明らかになった。一方、ウイルスのようなナノサイズの微粒子に対しての捕集率が低く、 100nm 前後の粒子に対しては殆ど捕集できないことが明らかになっている。以上のことより、中性能エアフィルタは細菌とカビ胞子に対する捕集率が高いものの、ウイルスのような微粒子に対してはその捕集が期待できず、緊急時において、室内気流計画を含めた検討が必要であると考えられる。

（2）緊急時の対策

緊急時の対策の考え方の基本は暴露者数を最小限にすることであり、病原体のような有害物質をいち早く検知すると同時に被暴者を特定す

し、必要な処置を施すことである。そのため、①病原体の有害物質をリアルタイムで検知する。→②空調運転を停止し、全てのダンパと空調機に連動していないファンを止める。→③適正な気流計画を行い、避難通路を確保する。→④被暴者を隔離し、必要な処置を施す、のような対策が考えられる。

上記の②は基本的に、有害物質が検出されたと同時に、空調の自動制御と連動して空調を止めることができるため、技術的にはさほど難しくない。また、上記の④医療機関や行政機関が行う必要があると考えられる。従って、本研究では、上記の①と③について詳細な検討を行った。

微生物リアルタイム計測器 IMD を用いて、数例ではあるが、微生物粒子（カビ胞子）、非生物粒子（標準粉体）、トレーサー粒子（標準蛍光粒子）に対する応答特性をチャンバ試験より確認し、微生物粒子に対して測定が可能で、非生物粒子に対して誤カウントしないことが明らかになった。また、蛍光粒子に対して、粒度分布を含めた応答が得られた。以上のことから、IMD は微生物粒子（または蛍光を放出する粒子）に対して応答できることが分かった。一方、IMD を用いた実環境での検証の結果、在来の培地法と同様な経時変化を示し、リアルタイムで浮遊微生物を検知できることが確認された。また、IMD はバックグラウンド濃度の高い環境でのバイオテロ対策のツールとして難しいため、バックグラウンド濃度の比較的低い空調機のエアフィルタの下流側に設置することにより、その適用の可能性を実証試験より確認した。以上のことを総合して勘案すれば、IMD はリアルタイムで浮遊微生物を検知することが可能で、空調機のエアフィルタの下流側に設置すれば、応答の速いトリガーセンサー（fast trigger sensor）として利用できると思われる。ただし IMD がトリガーセンサーとして用いられるが、微生物を迅速かつ正確に測定するには他の迅速法（たとえば ATP 法など）を用いる必要がある。

一方、前記の③については、外気による階段の加圧を行い、避難通路を確保する方法も考えられるが、その場合の室内の汚染物質の分布によって、高濃度に被暴を受ける居住者がいる可能性がある。そのため、実際に建築物内で危険物質が発生した場合において、特定地点に設置したセンサーによる危険物の検知から危険物質

の発生源を特定し、迅速な拡散抑制対策を実行することが求められる。これらの防止策は、共に建築物内における危険物質の拡散特性を高精度且つ迅速に数値解明する手法を必要とする。

そこで、本研究では、3次元シミュレーション(CFD)と同等の精度における計算をリアルタイムにPCにて計算可能なマクロ・CFD複合モデルを開発・発展させ、その精度の検証も行った。実計算時間は、検証計算用3次元CFD解析ではクラスタマシンの1ノード(CPU:Pentium4, 3.6GHz, Memory: 2GB)を使用し約50時間を要したのに対し、マクロ・CFD複合モデルは応答係数の計算時間を除き、PC(CPU:Pentium4, 3.4GHz, Memory:1GB)を使用して約2秒であることが明らかになった。従って、空調計画時に応答係数の準備計算を行っておくことで、開発したマクロ・CFD複合モデルは3次元の移流・拡散性状の解析をCFD解析と同じ精度を保持し、かつ低い計算コストで実現することが可能となった。また、実測等を通し、マクロ・CFD複合モデルの精度を確保していくことで、健康危険物質拡散の検証が多角的、且つ低コストで実現可能となると考えられる。

(3) 事後の処置

空調システムの特성에応じた殺菌方法を検討した結果、本研究では、環境負荷の少ない、後処理も必要としないオゾンに注目し、その殺菌効果に関する実験的、実環境での検証を行った。オゾンによる殺菌効果は、オゾン濃度、殺菌時間などによって変わる。濃度時間積(濃度×時間)値が高いほど殺菌効果が上がる。本研究の結果、*E.coli*に対する99.9%死滅率を得るには、12(ppm×min)の「暴露強度」での暴露が必要である。また、*A.niger*、*C.cladosporioides*、*P.pinophilum*を全て99%殺滅するのに90(ppm×hr)以上が必要である。

E 結論

本研究は多数の人が集まる建築物において予測せぬ健康ハザードのような緊急事態が発生した場合の対策をまとめることを目的とし、3カ年の研究において、その対策を①平常時の備え、②緊急時の対策、③事件後の処置の3段階に分類し、それぞれについて詳細な検討を行った。

本研究より得られた主な知見を以下に示す。

[1] 平常時の備え

日本のオフィスビルなどで最も多く用いられている中性能エアフィルタは細菌とカビ孢子に対する捕集率が80%以上であるものの、ウィルスのようなナノサイズの微粒子に対する捕集が期待できない。従って、室内気流計画を含めた検討が必要である。

[2] 緊急時の対策

- ① バイオテロ対策においては、浮遊微生物をリアルタイムで検知するセンサーを設置する必要がある。本研究に用いた計測器IMDは、リアルタイムで浮遊微生物を検知することができ、空調機のエアフィルタの下流側に設置することにより、トリガーセンサーとして利用することが可能である。ただしIMDがトリガーセンサーとして用いられるが、微生物を迅速かつ正確に測定するには他の迅速法(たとえばATP法など)を用いる必要がある。
- ② 緊急時(発生時)において、建築物内の避難通路を確保し、建築物内の居住者の被曝量を最小限にするために、適正な気流計画が必要である。
- ③ 建築物内で危険物質が発生した場合において、特定地点に設置したセンサーによる危険物の検知から危険物質の発生源を特定ができれば、本研究で開発したマクロ・CFD複合モデルは健康危険物質拡散の検証が多角的、且つ低コスト、短時間で実現可能である。

[3] 事件後の処置

空調システムの特性を勘案して、ガス状物質を用いることが現実的である。また、環境への負荷と処置後の処理を考慮し、本研究では空調システムの殺菌にオゾンガスを用いた。オゾンガスによる殺菌について詳細な検討を行った結果、*E.coli*に対する99.9%死滅率を得るには、12(ppm×min)の「暴露強度」での暴露が必要である。また、*A.niger*、*C.cladosporioides*、*P.pinophilum*を全て99%殺滅するのに90(ppm×hr)以上が必要である。

F 健康危険情報

なし。

G 研究発表

1 論文 (査読つき)

- (1)Zhu, S.W., Kato, S., Yang, J.H.: Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment, *Building and Environment*. 1-12.
- (2)Zhu, S.W., Kato, S., and Yang, J.H.: Investigation into airborne transport characteristics of airflow due to coughing in a stagnant indoor environment, *2006 ASHRAE Winter Meeting*, 4834, January 21-25, 2006.
- (3)Zhu, S.W., Kato, S., and Yang, J.H.: Investigation of airborne infection through coughing by using numerical analysis, *The 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China*, M0-E2, 320, September 4-9, 2005.
- (4)石田義洋, 加藤信介, 黄弘, 張先権 : 定常流れ場における非定常濃度応答計算法 第1報—非定常濃度応答計算法と再循環のある室内気流場の濃度計算例, 空気調和・衛生工学論文集 No.114, pp.19-28, 2006.09.
- (5)柳 宇, 池田耕一. 空調システムにおける微生物汚染の実態と対策に関する研究, 第2報—エアフィルタによる浮遊微生物粒子の捕集率とその評価. 日本建築学会環境系論文集, Vol.617, 53-56, 2007.07.
- (6)Yanagi U, Yamada K, Ikeda K: A Study on the Filtration Efficiency of an Air Filter over Airborne Bacteria and Fungi vs Elapsed Time. *Proceeding of Healthy buildings 2006*, Nol.4, 479-82, 2006.
- (7)Yamada K, Yanagi U, Kagi N, Ikeda K: A Study about Microbes on the Surface of Air Filter in an Air Conditioning System. *Proceeding of Healthy buildings 2006*, Nol.2, 443-6, 2006.
- (8)Yanagi U, Ikeda K, and Kagi N: Application of the IMD in measurement of airborne microbial particles, *Proceeding of The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings*, 524-7,2007.
- (9) Kagi N., Ikeda K., and Yanagi U: Emission of Volatile Organic Compounds from Air Filter,

Proceeding of The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings, 157-60, 2007.

- (10)樋山恭助, 石田義洋, 加藤信介 : 定常流れ場における非定常濃度応答計算法 第2報—マクロ・ミクロ複合モデルによる複数室空間相互の汚染質輸送解析, 空気調和・衛生工学論文集 No.131, (2008年1月)。

2 学会発表

- (11)朱晟偉, 加藤信介 : 実験と数値解析による咳の吐出空気の拡散の可視化, 日本可視化情報学会全国講演会 (新潟 2005) 講演論文集, Vol.25 Suppl.No.2, 20, A101, 2005年10月.
- (12)朱晟偉, 加藤信介, 黄弘, 奈良昌則 : ネットワークモデルによる建物内の非定常汚染物質移流拡散解析 (その1) 多数室建物内における空気流動と汚染質輸送解析の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.933-934, 2006.
- (13)樋山恭助, 加藤信介, 石田義洋 「建築物内における健康影響危険物質の拡散特性の数値解明に関する研究—RF濃度計算法を用いた汚染質輸送解析—」安全工学シンポジウム, 東京, 2007.
- (14)樋山恭助, 加藤信介, 石田義洋 「ネットワークモデルによる建物内の汚染物質移流拡散の解析 (その2) 多数室建物内における健康危険物質の拡散性状解析手法の比較検討」日本建築学会大会学術講演梗概集, 2007.
- (15)樋山恭助, 加藤信介, 石田義洋 : ネットワークモデルによる建物内の汚染物質移流拡散の解析 (その3) マクロ・ミクロ複合モデルによる複数室空間相互の汚染質輸送解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, (2007年9月仙台), pp.1945-1948.
- (16)柳 宇, 池田耕一, 鍵直樹, 山田花菜 : 柳宇, 池田耕一, 鍵直樹, 山田花菜, 室内環境学会総会講演集, 室内環境学会誌, Vol.8, No.2, 204-5.2005.
- (17)鍵直樹, 柳宇, 池田耕一, 山田花菜, 堀越玲子 : エアフィルタから発生する揮発性有機化合物の測定方法に関する検討, 室内環境学会総会講演集, 室内環境学会誌, Vol.8, No.2, pp.132-133, 2005.
- (18)柳 宇, 山田花菜, 池田耕一 : エアフィルタに

- よる細菌と真菌の捕集特性に関する研究（その1）捕集率の経時変化. 第24回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集. 60-2. 2006.
- (19) 山田花菜, 柳 宇, 鍵 直樹, 池田耕一: エアフィルタによる細菌と真菌の捕集特性に関する研究（その1）エアフィルタに捕集された細菌と真菌について. 第24回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集. 63-5, 2006.
- (20) 鍵直樹, 柳 宇, 池田耕一, 山田花菜, 堀越玲子: 各種チャンバによるエアフィルタから発生する揮発性有機化合物, 第24回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, pp. 270-272, 2006.
- (21) 柳 宇, 山田花菜, 池田耕一: 浮遊真菌の測定における PDA・DG18・M40Y 培地の比較, 日本防菌防霉学会第33回年次大会要旨集. 135, 2006.
- (22) 菅原文子, 吉澤晋, 柳 宇: 空中菌測定器による測定値の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 831-2, 2006.
- (23) 柳 宇: 室内空気中の微生物—細菌・カビ・ウイルス, 平成18年度室内環境学会総会講演集, 32-3, 2006.
- (24) 柳 宇, 池田耕一: 空中浮遊微生物粒子の測定における瞬間微生物計測器の適応に関する研究, その1 オフィス環境でのリアルタイム測定, 平成18年度室内環境学会総会講演集, 128-9, 2006.
- (25) 柳 宇, 池田耕一, 鍵 直樹, 山田花菜: 空中浮遊微生物粒子の測定における瞬間微生物検知器の適用に関する研究（その2）病院環境でのリアルタイム測定, 第25回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, 65-7, 2007.
- (26) 鍵直樹, 池田耕一, 柳 宇: 実建物の空調機エアフィルタからの VOC 発生の調査, 第25回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, 253-5, 2007.
- (27) 柳 宇, 鍵 直樹, 堀越玲子, 池田耕一: 空中浮遊微生物粒子の測定における瞬間微生物検知器の適用に関する研究—居住環境でのリアルタイム測定, 第24回エアロゾル科学・技術研究討論会講演論文集, 3-4, 2007.
- (28) 柳 宇, 池田耕一, 阿部恵子: 空中浮遊微生物粒子の測定における瞬間微生物検知器の適用に関する研究, 第3報 生物粒子と非生物粒子に対する応答特性, 日本建築学会大会学術講演会; 2007.九州. 同梗概集; 2007. 905-6
- (29) 柳 宇: 病院施設と微生物, 平成19年度室内環境学会自由集要旨集, 9-12, 2007.

3 総説・解説

- (30) 鍵直樹, 池田耕一, 柳 宇: エアフィルタから発生する有機化合物の測定, クリーンテクノロジー, Vol.16, No.10, 44-7, 2006.
- (31) 柳 宇: 病院環境と微生物, 臨床環境医学, 第15巻, 第2号, 91-100, 2006.
- (32) 柳 宇. 事務所ビルにおけるバイオエアロゾルの挙動とその制御方法, クリーンロジー, Vol.17, No.5, 44-7, 2007.
- (33) 柳 宇. エアフィルタによる浮遊微生物粒子の捕集性能の評価について. 室内環境, Vol.10, No.1, 23-32. 2007.
- (34) 柳 宇. カビの測定における PDA・DG18・M40Y 培地の比較, クリーンロジー, Vol.17, No.11, 30-3, 2007.
- (35) 柳 宇. 病院環境における微生物汚染の対策, 空気清浄, Vol.45, No.4, 32-9, 2007.

H 知的財産権の出願・登録状況

なし。

II. 分担研究報告

建築物内における健康影響危険物質の拡散特性の数値解明に関する研究

分担研究者 加藤 信介 東京大学生産技術研究所 教授

研究要旨

不特定多数の利用者がある建築物において想定されうる病原性微生物や有害な化学物質の突発的な放出から利用者の健康安全性を確保するためには、健康影響危険物質の拡散の抑制を目的とした具体的な対策を思索する必要がある。危険物質拡散の防止には、建築設計段階における危険物質の拡散を最小限に抑制するプランニングと適切な設備計画はもちろんのこと、実際に建築物内で危険物質が発生した場合において、特定地点に設置したセンサーによる危険物の検知から危険物質の発生源を同定し、迅速な拡散抑制対策を実行することが求められる。これらの防止策は、共に建築物内における危険物質の拡散特性を高精度且つ迅速に数値解明する手法を必要とする。3カ年の研究において、現状における危険物質の拡散特性の数値解明手法をレビューするとともに、マクロモデルと3次元CFD解析を結合することを可能とする非定常濃度応答計算法（以下、RF濃度計算法）を開発し、実際に健康危険物質拡散の検証が多角的、且つ低コスト、短時間で実現可能なマクロ・CFD複合モデルの開発を行った。

本研究により得られた知見を以下に示す。

- [1] 現状のマクロモデルによる1次元換気シミュレーションは、多数室発生する熱・空気・汚染質の移流拡散を解明が可能であり、Toluene等の長期的な暴露量を予測するにはかなり有効であることが確認された。
- [2] しかしながら、マクロモデルは、空間間の物質輸送性状を解明することを目的としており、空間内の流れ場による危険物質の不均一分布を考慮しない。そのため、生物化学テロのように、瞬間的な濃度の予測が必要であり、各空間における危険物質濃度の立ち上がり特性等の詳細データが必要なケースにおいては、同モデルにより適切な解析を行う事は難しい。
- [3] 生物化学テロといった突発的であり少量の飛散により甚大な被害が予測される危険物質の拡散性状をシミュレーションにて詳細に評価する場合、CFD等の流れ場を考慮したシミュレーションの適用が求められる。しかしながら、最適解探索プロセス等の多数ケースの計算が必要とされる検討においては、計算コストの高い3次元CFD解析をそのまま用いることは現実的でなく、マクロモデルシミュレーションと同様の計算コストの低い解析手法が求められる。
- [4] 定常な流れ場における濃度の移流・拡散方程式は線形な偏微分方程式と見なしうるため、3次元の流れ場における汚染質輸送に起因した流れ場内の観測点における濃度変化は、発生した汚染質の時系列応答を表す係数列（応答係数）を用いて線形系統的に表現することが可能である。この事実を用い、数回のワークステーションによる準備計算（3次元CFD解析）のみによって、PCレベルのCPUによっても非常に短い計算時間で、3次元CFD解析とほぼ同精度の解が算出可能であるRF濃度応答計算法により定常流れ場における非定常濃度計算の計算コストを低減することが可能となる。

[5] 一般的に建築内部空間は、複数の空間がダクトや開口部により接続された回路網的な構造となっている。そこで、室相互の空気の輸送量はマクロモデル（換気回路網計算）で算出し、各室の3次元非定常濃度分布と流出入空気の汚染質濃度はRF濃度計算法を用いた線形システム的なアルゴリズムにより計算することで、建物内部空間の汚染質の輸送を包括的に解析する“マクロ・CFD複合モデル”を構築した。

[6] 開発したマクロ・CFD複合モデルを3次元CFD解析のみの解析結果と比較した。結果、3次元CFD解析のみの解析よりも格段に低い計算コストにおいて、3次元CFD解析とほぼ同精度の解が算出可能であり、マクロ・CFD複合モデルによれば、建物内部空間の包括的な気流・濃度数値解析がCFDと同じ精度を保持し、かつ低い計算コストにより可能となったと言える。

[7] 本研究で開発したマクロ・CFD複合モデルは、CFD解析と同等の精度を有するといえ、この手法の実現象への対応を検討するには、今回研究対象としている病室等におけるCFD解析と実現象との対応を検討する必要がある、この検討を可能にするべく実測を通してCFD解析の評価データを整備した。

A 研究目的

一般的に複雑な換気経路を持つ大規模な地下街や超高層ビルなどの狭域市街地においては、局所にて発生した汚染質がその複雑な換気経路により市街地内広域にわたって拡散する危険性が高い。そのため、病原性微生物の飛散や生物化学（BC）テロが発生した場合に被害を最小限に抑制するためには、換気経路を介した危険物質の拡散を抑制する適切な危険物質排気システムの計画が求められる。しかしながら、一般的な二酸化炭素や臭気といった空気汚染物質と異なり、病原性微生物や生物化学テロにより発生する健康影響危険物質は微量の吸引により重大な健康被害をもたらす危険性を持ち、適切な危険物質排気システムを計画した場合においても、設備の作動条件の設定ミスにより大規模な災展する可能性がある。そこで、危険物質排気システムの性能評価の一環として、事前に建築物空間全体における危険物質の移流拡散及び各場所における濃度分布を評価する事の有用性は高い。

また、危険物質拡散の防止には、建築設計段階における危険物質の拡散を最小限に抑制するプランニングと適切な設備計画はもちろんのこと、実際に建築物内で危険物質が発生した場合において、特定地点に設置したセンサーによる危険物の検知から危険物質の発生源を同定し、迅速な拡散抑制対策を実行することが求められる。

これらの防止策は、共に建築物内における危

険物質の拡散特性を高精度且つ迅速に数値解明する手法を必要とする。本研究では、建築プランニングにおいて建物内の危険物質の拡散性状を評価できるのみでなく、将来的には突発的な危険物質発生に対して迅速な拡散抑制対策を実行するために必要な解析コードの開発を目指す。

B 研究方法

本モデルの開発にあたり、以下のプロセスにより研究を進めた。

[1] マクロモデルに基づく熱・空気解析ソフトの現状調査を行うとともに、熱・空気解析ソフトの連成による汚染質の建築物内における一次元移流拡散の解析を行い、現状におけるソフトの性能を検証した。

[2] マクロモデルの基づく現状のソフトの健康影響危険物質の拡散特性の数値解明における適応性を3次元CFD解析と比較することで検討した。

[3] 定常流れ場における非定常濃度計算の計算コストを低減することを目標とし、線形システムに基づく非定常濃度応答計算法（RF濃度計算法）を開発した。

[4] RF濃度計算法を用いてマクロモデルとCFD解析の結果を複合した解析を行うための解析フローを検討した。

[5] ケーススタディにより本モデルの具体的な利用を示し、マクロモデルや3次元CFD解析のみを用いた解析と比較し、本モデルの有

用性を示した。

[6]病室など、本研究が対象とする空間における本開発モデルの適用性能を評価するための実測データを整備した。

C 研究成果

C-1 現状のマクロモデルによる汚染質輸送の解析

建物を包括した汚染質の輸送解析は、マクロモデルにより行われることが現状では一般的である。そこで、本研究が対象とする健康危険物質の拡散が起こりうる、病院を対象として、一般的なマクロモデルを用いた汚染質輸送の解析を行い、その性能を検証した。

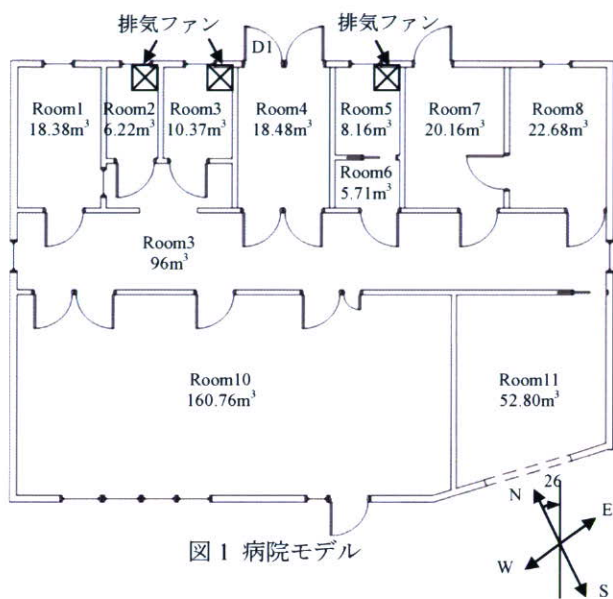


図1 病院モデル

C-1.1 解析対象と解析条件

図1は私立病院の一階を想定してモデル化したものである。建物は北から東へ26°振れて位置される。Room1と8は北側にあり、Room10と11は南側にあり、Room9は各部屋を連結する廊下である。Room2,3,5はそれぞれ男女化粧室と浴室であり、排気ファンを設置する。Room4,8,9を倉庫と仮定する。検査室Room1、廊下Room9、診察室Room10、受付室Room10は在室者がいるため、本解析において検討対象とされる。なお、汚染質(Toluene)はRoom7から5~6時に8.3mg/s、6~10時に16.6mg/s、10~11時に8.3mg/s発生するものとする。本解析では、人の出入りに伴うドアの開閉の影響を無視する。なお、気象条件は2006年2月2日の名古屋標準気象条件を用いる。

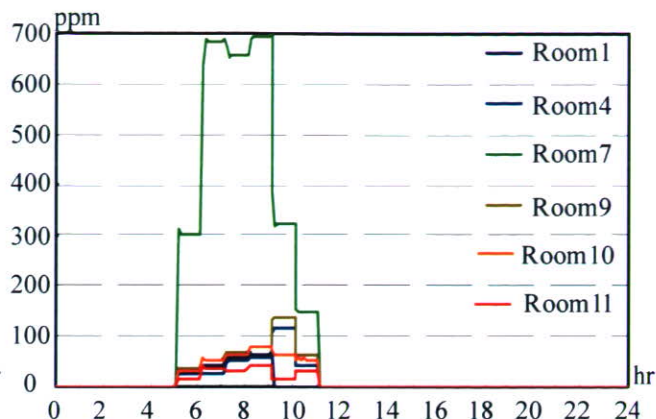


図2 各室のToluene濃度の時間変化

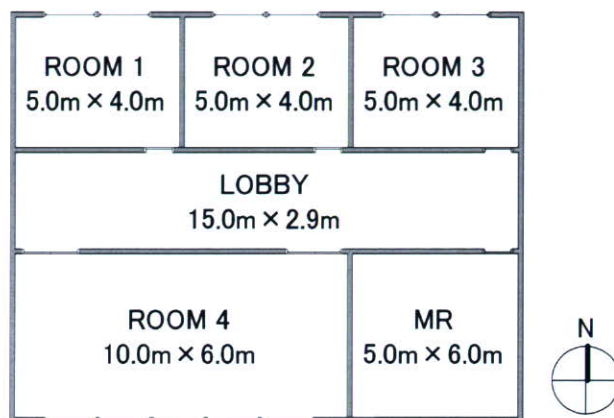


図3 対象建築平面

C-1.2 解析結果

図2に各部屋のToluene濃度の時間変化を示す。5~11時の間に、Room7からTolueneが発生すると仮定し、この濃度は5:30~10:30の間に約700ppm。自然換気によってTolueneが各部屋に拡散する。9時から、Room2とRoom3に設置した排気ファンが運転し始めてから、一番西側にあるRoom1での濃度がゼロとなる。現状のマクロモデルによる1次元換気シミュレーションは、多数室で発生する熱・空気・汚染質の移流拡散の解明が可能であり、Toluene等の長期的な暴露量を予測するにはある程度の有効性があることが確認された。

C-2 マクロモデルによる健康危険物質の拡散解析の評価

マクロモデルは、空間間の物質輸送性状を解明することを目的としており、空間内の流れ場による危険物質の不均一分布を考慮しない。そのため、生物化学テロのように、瞬間的な濃度の予測が必要であり、各空間における危険物質濃度の立ち上がり特性等の詳細データが必要なケースにおけるマクロモデルの適用性を、危険

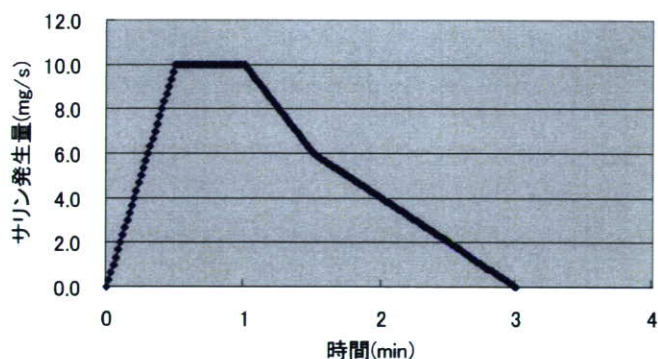


図4 サリン発生スケジュール

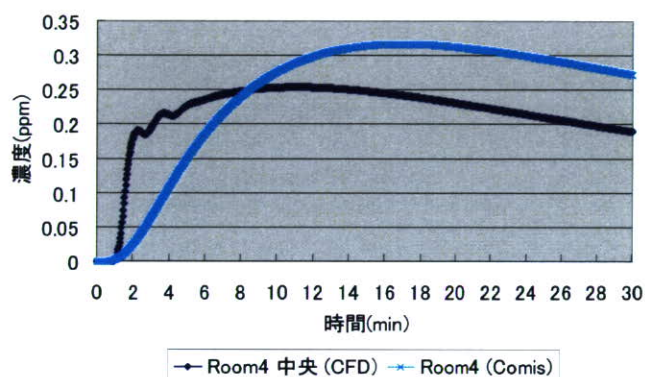


図5 Room4におけるサリン濃度推移

物質の不均一分布を考慮可能である3次元CFD解析と比較することで評価した。

C-2.1 解析対象と解析条件

複数の室空間により構成された単層の建築空間を想定する。図3に対象建築空間の平面を示す。天井高さは一律2.6[m]とした。空調は単一ダクト方式とし、MRに設置した単一の空調機によりMRを除く全室の空調が行われていると設定した。各空調室は第1種機械換気方式とする。空調換気回数は10回/hとし、空調機において(1- α)の割合で再循環空気が外気と交換される設定とした。ここで α を再循環風量率と呼び、本解析では0.9とした。

C-2.2 解析ケース

生物化学(BC)テロを想定し、Room3においてサリン(分子量:140.9, 致死量:0.1~0.01ppm)が図4のスケジュールにより発生したケースにおいて、Room4における30分間のサリン濃度推移を解析した。時間ステップは、COMISでは最小時間ステップ単位 $\Delta t=1[s]$ を用い、CFD解析ではクーラン数を考慮して

$\Delta t=0.02[s]$ とした。

C-2.3 解析結果

図5にRoom4におけるサリン濃度の時系列推移を示す。ここでRoom4の濃度とは、室内空気を1質点で代表するCOMISにおいては室内平均濃度、空間内の濃度分布を詳細に評価できるCFD解析では室内中心位置における濃度となる。CFD解析による結果と比較したCOMISの解析結果から、以下の特徴が確認できる。

- ① 濃度の立ち上がり性状が緩やかであり、濃度最大値への到達時間が遅い。
- ② 濃度の立ち上がり性状が滑らかである。
- ③ 濃度の最大値が高い。

濃度の瞬時値の予測が必要であり、各空間における危険物質濃度の立ち上がり特性等の詳細データが必要な生物化学テロ等、本研究の研究対象においては、マクロモデルによる計算では十分な解明が困難であることが判明した。

C-3 非定常濃度応答計算法(RF濃度計算法)の開発

生物化学テロといった突発的であり少量の飛散により甚大な被害が予測される危険物質の拡散性状をシミュレーションにより詳細に評価する場合、CFD等の流れ場を考慮したシミュレーションの適用が求められる。しかしながら、最適解探索プロセス等の多数ケースの計算が必要とされる検討においては、計算コストの高い3次元CFD解析をそのまま用いることは現実的でない。そこで、数回のワークステーションによる準備計算(3次元CFD解析)のみによって、PCレベルのCPUによっても非常に短い計算時間で、3次元CFD解析とほぼ同精度の解が算出可能であるRF濃度応答計算法により定常流れ場における非定常濃度計算の計算コストを低減することを試みた。

C-3.1 計算法

室内における定常な流れ場においては、移流・拡散方程式が線形であることから、有限な時間幅のパルスに対する応答係数を用いて、畳み込み計算によって非定常濃度応答を計算することができる。流れ場をセルに分割して流体数

値解析コードを適用すれば、任意のセルで発生した汚染質パルスに対して、容易に各セル毎の応答係数を計算することができる。

図6に室内汚染質発生モデルを、表1にモデルの概要を示す。空調モデルは、吸い込み口直後からレタダクトを通して再循環し、 αQ だけの風量が吹出口に戻り、外気風量 $(1-\alpha)$ と混合して吹出し風量 Q を吹出している。ここでは α を再循環風量率と呼ぶ。

流体解析コードによる気流数値解析は、この室を11(x方向)×11(y方向)×10(z方向)に分割して行い、図7に定義する応答係数 ${}^{SC}F^n$ を算出する。

図6の汚染質発生点SCで単位の二等辺三角波(頂点値1kg/s)の汚染質を発生した場合の各汚染質計算点の濃度計算結果を図8に示す。図中の二等辺三角波の太線がこの場合の汚染質発生時系列 ${}^{SC}q^n$ である。計算結果から、3000ステップ毎($\Delta T=3000 \times \Delta t=300s$, $\Delta t=0.1s$)に濃度値を採取して各計算点 $cell$ の応答係数 ${}^{SC}F^n$ とする。

室内のある位置 $cell$ の濃度は、ある位置SCの時点 n の発生汚染質 ${}^{SC}q^n$ (吹出し口からの汚染質放出も含む)と応答係数 ${}^{SC}F^n$ による畳み込み計算によって計算される。

この場合、 ${}^{SC}A_{n-1}^{k+1}$ は過去に発生した汚染質からの伝達による(時点 $(n-1+k+1)=(n+k)$ に、位置 $cell$ に残存する)ここで、 ${}^{SC}A_{n-1}^{k+1}$ は過去に発生した汚染質からの伝達蓄積濃度の時系列、 ${}^{SC}A_n^k$ は、さらに現時点の発生汚染質量 ${}^{SC}q^n$ からの伝達を取り込んだ時点 $(n+k)$ の $cell$ における蓄積濃度

$${}^{SC}A_n^k = {}^{SC}A_{n-1}^{k+1} + {}^{SC}q^n \times {}^{SC}F^n \quad (k=0 \sim N-1) \quad (a)$$

$${}^{SC}A_n^N = {}^{SC}A_{n-1}^N \times {}^{SC}R + {}^{SC}q^n \times {}^{SC}F^n \quad (k=N) \quad (b)$$

ここで、 ${}^{SC}A_{n-1}^{k+1}$ は過去に発生した汚染質からの伝達による(時点 $(n-1+k+1)=(n+k)$ に、位置 $cell$ に残存する)ここで、 ${}^{SC}A_{n-1}^{k+1}$ は過去に発生した汚染質からの伝達蓄積濃度の時系列、 ${}^{SC}A_n^k$ は、さらに現時点の発生汚染質量 ${}^{SC}q^n$ からの伝達を取り込んだ時点 $(n+k)$ の $cell$ における蓄積濃度

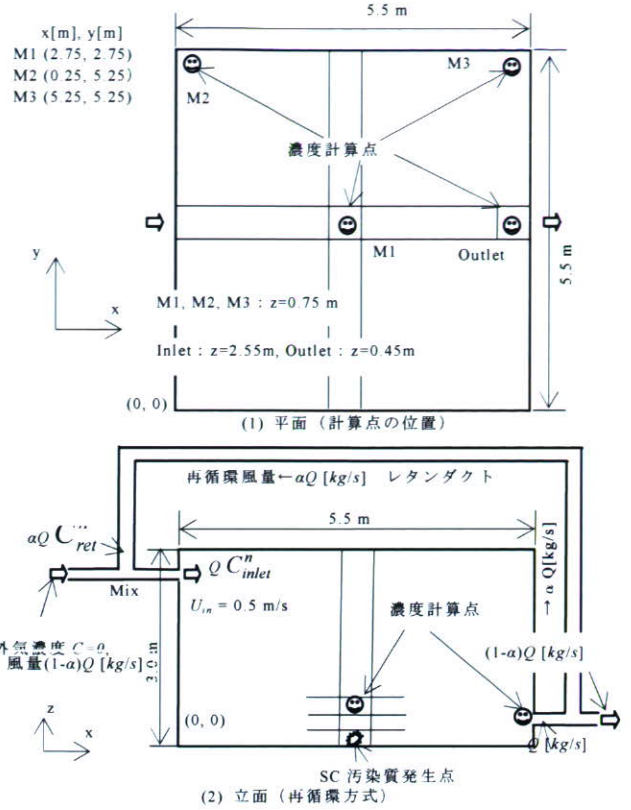


図6 室内汚染質発生モデル (吹出し風量一定、再循環風量率 α 変化)

表1 室内汚染質発生モデルの概要

①1 回換気時間=20.17min	②吹出風量 $G=\rho F=1.225\text{kg/m}^3 \times 0.075 \text{ m}^3/\text{s}=0.09189 \text{ kg/s}$, $F=0.075 \text{ m}^3/\text{s}$, 密度 $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$	③室形状, 容積 $V=5.5(x \text{ 方向})\text{m} \times 5.5(y \text{ 方向})\text{m} \times 3.0(z \text{ 方向})\text{m} = 90.75 \text{ m}^3$
-------------------	--	--

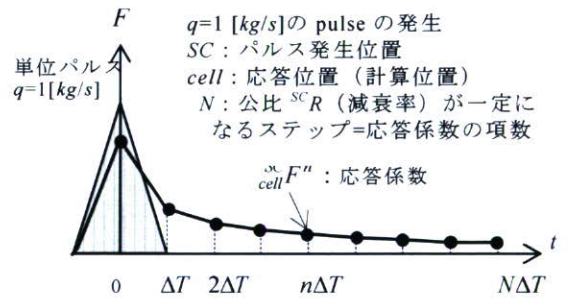


図7 Pulse発生とそれに対する応答係数

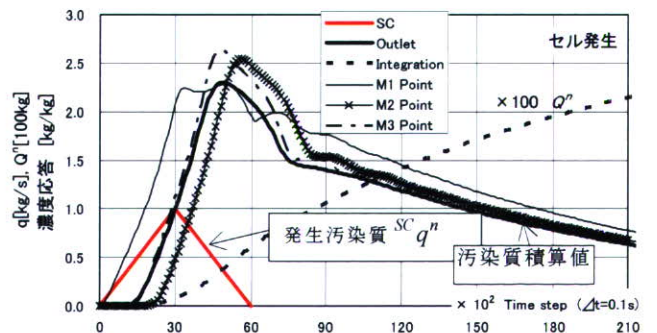
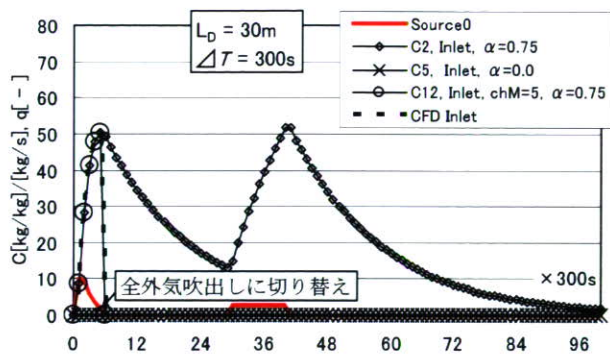
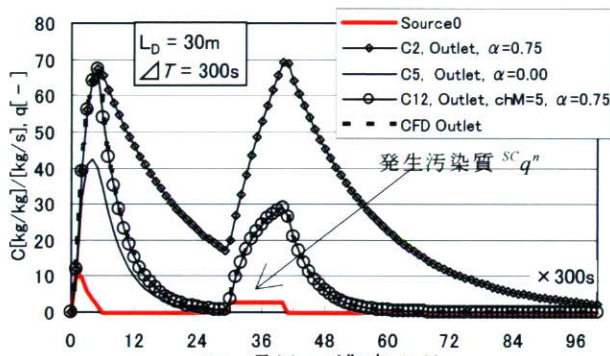


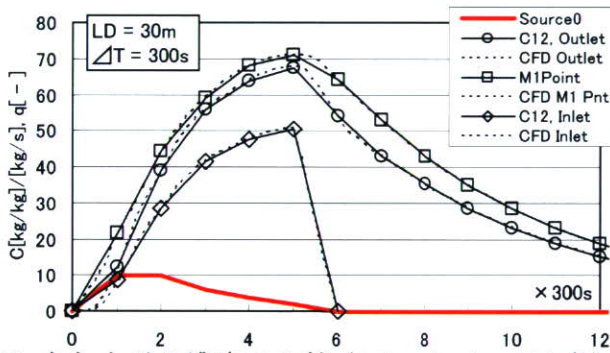
図8 各計算点の濃度応答



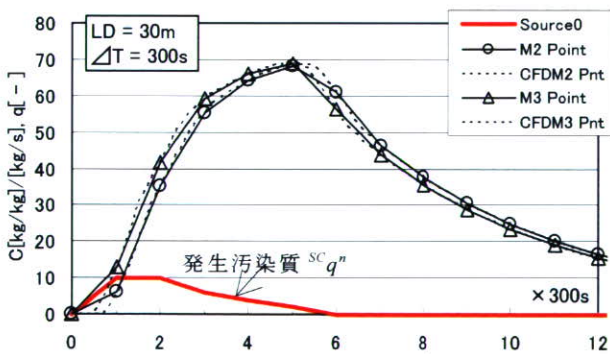
(1) 吹出口濃度の比



(2) 吸込口濃度の比



(3) 立ち上がり濃度の比較 (Inlet, Outlet, M1 点)



(4) 立ち上がり濃度の比較

図9 流体解析コードによる計算結果の検証

の時系列である ($k=0 \sim N$)。 $SC_{cell} A_n^0$ は現時点 n でその位置 $cell$ の空気が蓄積している汚染質濃度である。 N は応答係数の項数, k は項番号, $SC R$ は公比, n は時間ステップである。

式(a), (b)の計算を毎ステップ進めてゆけば,

あるセルのある時刻 n における濃度は, 全ての発生源 SC からの汚染質の伝達の合計 (重ね合わせ) として得られる。

C-3.2 計算結果

CFD による計算結果と本手法による結果を図9に示す。計算条件が同一となるようにCFDの計算条件を調整してある。図中の太線が汚染質発生パターン $SC q^n$ である。ケース12 (C12) は, 汚染質発生後5ステップで, 再循環風量率 $\alpha=0.75$ から全外気吹出しに切り換えたケースである。

図9(1)は吹出口濃度を比較したものである。本手法で計算した再循環風量率0.75のケース2 (\diamond , 吹出し濃度大), ケース5 (\times , 吹出し濃度0)の吹出口濃度も共に示す。パルスのステップ5まで, ケース5と同じ吹出口濃度であったケース12の濃度は, ステップ6で全外気運転に切り換わるので吹出口濃度が0になる。この変化がCFD (太い破線) と本手法 (\circ) でよく一致していることが分かる。

図9(2)は吸込口濃度の比較であり, ケース2, 5と共に示してある。これも再循環風量率0.75からステップ6で全外気運転に切り換わり, ケース2の吸込口濃度からケース5の吸込口濃度に移行してゆく。運転切り換えにより濃度が速やかに低下することが分かる。吸込口濃度はCFD (太い破線) と本手法 (\circ) で十分に一致している。

図9(3), (4)は, 汚染発生時の濃度の立ち上がり応答を比較するものである。CFDの細かい時間刻みに基づく滑らかな応答 (破線) からは, 応答係数法の計算結果 (\circ, \square, \diamond) を結ぶ線分は少しずれているが, パルスの各ステップの値 (\circ, \square, \diamond) においては, CFDと本手法の結果はほとんど完全に一致していることが確認できる。

応答係数の定義から, 本手法の結果とCFDの結果は, 公比を有限の項数以降で一定としたことによる誤差, 再循環空気濃度の線形補間近似による誤差, 数値計算の丸め誤差を併せた誤差の範囲内で同じ精度の結果が得られることは明らかである。検証計算の結果はこれが実際の計算によって検証されたことを示す。

本手法の計算時間が少ないのは, 計算位置を特定のセルに絞ったことも大きな要因である。