

200738008A

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 19 年度 総括・分担研究報告書

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) 5

(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・鍵直樹) 19

(3) 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) 29

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

今年度は今までの研究成果を踏まえて、①CFD 複合モデルの開発と精度検証、②バイオテロが起きた後の空調システムの消毒方法の検討などの研究を行い、以下の知見を得た。

(1) 微生物のリアルタイムの検知

[1] 粒度分布が分かる標準蛍光粒子を空中発生させる実験では、IMD (Instantaneous Microbial Detection, 瞬間微生物検知器) (β 版) がその粒度分布を適正に測定している。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) 気流計画

[1] 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。

[2] そこで、流れ場の変化が空調の ON/OFF のみに起因し、流れ場の定常性が仮定できる本研究では、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マクロ・CFD 複合モデルを用いた解析コードを開発した。結果、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。

[3] また、本検討では観測点における各汚染質発生源からの濃度応答の感度を分析することが可能であった。すなわち、本研究で開発したマクロ・CFD 複合モデルの基盤となる RF (濃度応答) 計算法は、建物内部における汚染質の移流・拡散性状の特徴を分析するツールとしても、有用性の高い手法であることが確認された。

(3) 空調システムの消毒方法—オゾンの殺菌性能

[1] 「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。

[2] *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.coli* を用いた 30%, 50%, 70% の比較実験の結果、相対湿度が低いほうが若干高い死滅率を示している。

[3] 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。

(4) 飲料水の安全性

リスクには微生物リスク、化学的リスクの他、水温のように通常の水道水では考慮しないリスクが存在する。また、配管工事等に伴うクロスコンタクトは広範な健康被害をもたらすおそれがあり、水質だけでなく、施設の設計、維持管理も重要な課題である。

分担研究者

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 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 室長）

A 研究目的

本研究は多数の人が集まる建築物における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検討し、平常時と緊急時の対策を検討することを目的としている。

B 研究方法

平成 17 年度では、生物化学物テロ対策に関する研究報告および日本の健康危機管理に関する行政対応の資料のレビューを行い、建築物を対象とした生化学物質テロが起きた場合の対応のあり方に関して取り込むべき課題を明確にした。すなわち、建築物におけるバイオテロ対策の重要なポイントは、いち早く微生物（病原体）や毒性化学物質の発生（放出）を検知し、適正な室内、室間の気流計画を行い、居住者の避難通路を確保し、建築物と空調システム使用を早く再開するに於ける対策を施すことであることが明らかになった。

今年度では、昨年度の成果を踏まえた上で、以下に示す研究を行った。

- ① 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—CFD・複合モデルの完成
（分担研究者：加藤信介）
- 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—空調システムの消毒におけるオゾンの殺菌性能の検証
（分担研究者：柳 宇，鍵直樹）
- ③ 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）

分担研究者の加藤信介は、昨年度に示したマクロ・CFD 複合モデルの開発必要性に基づき、平成 17・18 年度に示した非定常濃度応答計算法（以下、RF 濃度計算法）とマクロモデルとしての換気回路網計算を複合したマクロ・CFD 複合モデルの開発

を行った。具体的に、RF 濃度計算法を用いた汎用的な建物内環境予測ツールとしてのマクロ・CFD 複合モデルを開発することを目的とし、複数室により構成される建物内の汚染質輸送解析を、3 次元の移流・拡散性状に関し CFD と同じ精度を保持し、かつ低い計算コストで実現する解析コードの開発を行った。また、この複合モデルは室相互の空気の輸送量は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非定常濃度応答計算法を用いることで、建物内部空間の汚染質の輸送を包括的に解析した。

分担研究者の柳宇・鍵直樹は、引き続き微生物リアルタイム計測器 IMD（Instantaneous Microbial Detection, 瞬間微生物検知器）に対する検証、②バイオテロが起きた場合を想定し、その後の処理としてのオゾンによる殺菌効果と方法の検討を行った。IMD の検証にクリーンルーム内に標準蛍光粒子を発生させた後の空中濃度に対する IMD の感度の検証を行った。また、オゾンによる殺菌性能に関しては、試験チャンバを用い、*S.aureus*, *E.coli*, *C.cladosporioides*, *P.pinophilum*, *A.niger*, 5 種類の微生物に対するオゾンの殺菌効果についての詳細な検討を行った。

分担研究者の伊藤雅喜は、本年度は昨年と同じく 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

（1）分担研究者 加藤信介

建築物内にサリンを放出した場合、CFD, COMIS, RF の解析手法別におけるほかの観測室（OP）内（ROOM4）のサリン濃度の時系列推移を求めた。ここで ROOM4 の濃度とは、室内空気を節点で代表する COMIS においては室内平均濃度とし、空間内の濃度分布を評価できる CFD と RF 法では室内中心位置 OP における濃度とする。RF 法解析結果は CFD 解析結果とよく一致している一方、COMIS 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。

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、RF 法ではクラスタマシンを使用した 3 次元 CFD 解析による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。なお、3次元CFD解析による応答係数算出の計算時間はクラスタマシンの1ノード(CPU:Pentium4, 3.6GHz, Memory:2GB)を使用し約35時間であった。

(2) 分担研究者 柳 宇・鍵直樹

IMDについては、標準蛍光粒子の粒径範囲2~8 μm においてIMDが的確に応答していることが分かった。

オゾンの殺菌性能については、「暴露強度(オゾン濃度 \times 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*E.coli*を用いた実験より確認された。また、*E.coli*に対する99.9%死滅率を得るには、12(ppm \times min)、*A.niger*、*C.cladosporioides*、*P.pinophilum*を全て99%殺滅するのに90(ppm \times hr)以上の「暴露強度」が必要であることが明らかになった。また、相対湿度によるオゾン殺菌性能の影響について検討をした結果、相対湿度が低いほうが若干高い死滅率を示していることがわかった。

(3) 分担研究者 伊藤雅喜

屋内給水におけるリスクには、微生物リスク、化学物質リスク、その他のリスクがある。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ことがある。レジオネラ属菌を防ぐためと子供のやけど防止の観点から湯温を50~55 $^{\circ}\text{C}$ に保つ必要があることが分かった。

また、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

COMISと比較しCFDとRF法ではある室内(Room3)に汚染質を発生させた直後に空調機システムの濃度上昇が急激な立ち上がりで高いピーク値を有しており、Room3において発生した汚染質が高濃度のままダクトを介して観測室Room4に移流したことがわかる。なお、マクロモデルは室内に物質の完全混合の仮定を設け室内空気を1節点として扱うため、空調吸込口の汚染質濃度は室

内空気の平均濃度となる。これより、室内空気を1節点で代表するマクロモデル(COMIS)ではRoom3において一様に希釈された汚染空気がs吸込口を介して空調機に流入するのに対し、CFDではRoom3において発生した汚染質が一様に希釈される以前に高濃度のまま空調機に流入することがわかる。観測室Room4におけるサリン濃度推移の解析手法による差異は、空調機系統における濃度推移の差異に起因したと考えられる。

一方、IMDの適応については、昨年の結果を含めて考えると一般環境における空中浮遊微生物の変動をリアルタイムで測定できることが分かった。しかし、実際のバイオテロのツールとして使用する場合において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。

バイオテロが起きた後の空調システム再開のための殺菌を考える場合、高濃度かつ短時間は現実的な手法である。細菌のみならず、*A.niger*、*C.cladosporioides*、*P.pinophilum*を99%殺菌したい場合、少なくとも90(ppm \times hr)以上が必要になる。例えば、20ppmが得られる現場では4.5時間の処理で殺菌することが可能になる。

E 結論

建築物におけるバイオテロ対策の初期段階において、最も重要なポイントはいち早く微生物(病原体など)の発生(放出)を検知し、適正な室内、室間の気流計画を行い、非難回路を確保することである。

空中微生物濃度をリアルタイムで検知する計測器IMDを用いた諸環境での検証を行い、その適応の可能性と限界が明らかになった。

気流計画については、RF濃度計算法を組み込んだ”マクロ・CFD複合モデル”を開発した。本モデルと三次元CFDの計算結果の定量的な比較により、本モデルは、数回のワークステーションによる準備計算のみによって、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ことを示した。

一方、建築物内給水システムにおける飲料水の安全性においては、リスクには微生物リスク、化学的リスクの他、水温のように通常の水道水では考慮しないリスクが存在する。また、配管工事等に伴うクロスコネクションは広範な健康被害をも

たらずおそれがあり、水質だけでなく、施設の設計、維持管理も重要な課題である。

F 健康危険情報

なし。

G 研究発表

1. 論文（査読つき）

- (1)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.
- (2)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.
- (3) 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.
- (4)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

- (5)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—R F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年7月。
- (6)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年8月福岡)。
- (7)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・衛生工学学会大会学術講演論文集, (2007年9月仙台), pp.1945-1948.

(8)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, 65-7,2007.04.

(9)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, 2007.4.

(10)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.

(11)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

(12)柳 宇: 病院施設と微生物, 平成19年度室内環境学会自由集会要旨集, 9-12, 2007.

3. 総説・解説

(13) 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, 2007.05.

(14) 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. 2007.06.

(15) 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.

(16) 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, 2007.11.

H 知的財産権の出願・登録状況

なし。

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為には、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。本年度は、昨年度に示したマクロ・CFD複合モデルの開発必要性に基づき、平成17・18年度に示した非常濃度応答計算法（以下、RF濃度計算法）とマクロモデルとしての換気回路網計算を複合したマクロ・CFD複合モデルの開発を行い、以下の知見を得た。

- [1] マクロモデルによる1次元換気シミュレーションは、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。その為、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。
- [2] 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。
- [3] そこで流れ場の変化が空調のON/OFFのみに起因し、流れ場の定常性が仮定できる本研究では、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マクロ・CFD複合モデルを用いた解析コードを開発した。結果、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。
- [4] また、本検討では観測点における各汚染質発生源からの濃度応答の感度を分析することが可能であった。すなわち、本研究で開発したマクロ・CFD複合モデルの基盤となるRF濃度計算法は、建物内部における汚染質の移流・拡散性状の特徴を分析するツールとしても、有用性の高い手法であることが確認された。

[5] 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り、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集めた。

A 研究目的

平成17年度には、空調負荷計算におけるレスポンスファクタ法^{1), 2), 3), 4), 5)}にならい、CFD解析を適用する定常流れ場において、流れ場の任意の位置のセルからの二等辺三角波形の汚染質、もしくは濃度発生に対し、任意の位置のセルの濃度応答係数を定義し、定常流れ場における一般的な非定常濃度応答計算法（以降、RF濃度計算法）を定義した。これはいかなる定常流れ場に対しても適用可能な手法である。第一段階として、再循環のある流れ場に適用し、PCレベルのCPUによっても非常に短い計算時間で、CFDと同精度の解が得られることを示した。平成18年度には、マクロモデルによる1次元換気シミュレーションの限界を示したうえで、マクロ・CFD複合モデルの必要性和開発方向性を示した。

そこで本年度は、このRF濃度計算法を用いた汎用的な建物内環境予測ツールとしてのマクロ・CFD複合モデルを開発することを目的とし、複数室により構成される建物内の汚染質輸送解析を、3次元の移流・拡散性状に関しCFDと同じ精度を保持し、かつ低い計算コストで実現する解析コードの開発を行った。この複合モデルは室相互の空気の輸送量は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非定常濃度応答計算法を用いることで、建物内部空間の汚染質の輸送を包括的に解析する。

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]マクロモデルと3次元CFD解析を総括したうえで、本年度に開発したマクロ・CFD複合モデルの開発概要を示した。

[2]RF濃度計算法を用いてマクロモデルとマイクロモデル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。

[3]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。

[4]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. マクロ・CFD 複合モデルの概要

C-1.1 従来の解析手法による汚染質輸送解析

一般的に建築内空間における汚染質輸送解析手法は、マクロモデルとマイクロモデルに大別することが可能である。いわゆる回路網解析ソフト“COMIS”⁶⁾に代表されるマクロモデルシミュレーションは、室内に物質の完全混合の仮定を設け室内空気を1節点^{註1)}としてマクロに扱い、各節点をダクトや開口部等の結合要素を用いて接続した解析モデルである。これは、一般的な建築空間であれば、適度な数の空間と結合要素により解析が可能であるため、PCを使用してもわずかな計算時間で解の得られる汎用性の高い解析モデルである。しかしながら、室内に物質の完全混合の仮定を設けているため、当然ながら室内気流の3次元性に依存する空間内の汚染質の移流・拡散分布は考慮されていない。従って、空気質の不均一分布が発生しやすい空間における解析や、生物化学テロによる危険物質の散布やバイオハザード等の微量の吸引により重大な健康被害を及ぼす汚染質の拡散等、詳細な解析結果が求められるケースに対する適応性は低いと考えられる。

上記のようなマクロモデルの適応性が低いケースの

解析を行うには、3次元CFD解析を用いたマイクロな解析が必要となる。しかしながら、マクロモデルと比較し、計算時間、計算に必要なリソース、データ作成等に要するマンパワーを含めた意味合いにおける計算コストは非常に高く、建物内環境の年間性能評価や設計における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、計算コストの大きなマイクロモデルをそのまま用いることは現実的ではない。

C-1.2 マクロ・CFD複合モデルによる汚染質輸送解析

空調室内の流れ場は、多くの場合は空調に起因する強制対流場により支配される定常流れ場であると仮定することが可能である。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）を用いて線形システム⁷⁾ ^{注2)}的に表現することが可能である。

本研究で提案する“マクロ・CFD複合モデル”は、まず、時間的に一定な各室の吹出し風量と室間の開口（隙間）からの空間相互の風量を、換気回路網計算により定める。

次に、濃度観測点や空調吸込口、隙間開口位置等における応答係数を、3次元CFD解析により定める。

これらの応答係数と空間相互の風量を使用して、空調系統と開口における汚染質の流出入量を計算し、これと濃度応答係数との畳み込み計算により、各室の濃度を定める。

すなわち、観測点だけではあるが 応答係数を用いた室内の3次元濃度分布の計算（CFD解析）と換気回路網解析（マクロ解析）を組み合わせた“マクロ・CFD複合モデル”により、建物内の汚染質輸送解析を行う。

これにより、室内気流の3次元性に依存する空間内の汚染質の3次元分布に基づいた建物内の汚染質輸送解析が、計算負荷の軽い線形システム的なアルゴリズムを用いて計算可能となり、マイクロモデルの3次元性

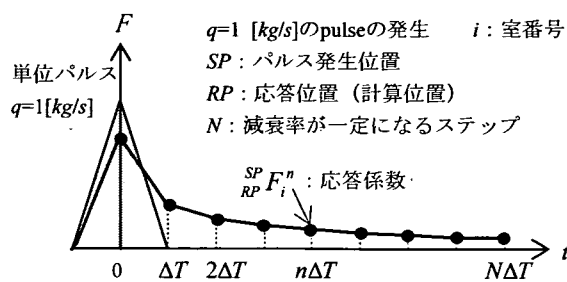


図-1 Pulse発生とそれに対する応答係数の定義

と、マクロモデルの汎用性を兼ね合わせたモデルの構築が可能となる。

C-2. マクロ・CFD複合モデルの計算法

C-2.1 各空間相互の空気輸送量の解析

まず、建物内を室単位の複数の空間に分割し、換気回路網計算により各空間相互の空気輸送量を解析し、以下の諸量を得る。換気回路網計算の詳細は参考文献8)を参照されたい。 i は室番号、 j は開口部の番号とする。

$$\begin{aligned} \text{outlet } Q_i &: \text{吹出口からROOM}_i \text{ への流入風量} && [\text{m}^3/\text{s}] \\ \text{inlet } Q_i &: \text{吸込口へのROOM}_i \text{ からの流出風量} && [\text{m}^3/\text{s}] \\ j Q_i &: \text{開口 OPEN}_j \text{ から空間ROOM}_i \text{ への流入風量} && [\text{m}^3/\text{s}] \end{aligned}$$

C-2.2 応答係数の算出

3次元CFD解析を用いて、各汚染質発生・流入位置から各汚染質観測位置への各応答係数 $\frac{SP}{RP} F_i^n$ を求める。ここに、濃度応答係数 $\frac{SP}{RP} F_i^n$ を図-1に示すように定義する^{注3)}。添え字は、あるステップでROOM _{i} において単位パルスが任意の汚染質発生・流入位置SPで発生したときに、 n ステップ後に任意の汚染質観測位置RPに到達する濃度を表す（図-1の●）。例えば $\frac{\text{outlet}}{\text{inlet}} F_i^n$ は、ROOM _{i} での空調吹出口outletから放出された単位濃度パルスに対する n ステップ後の吸込口inletの濃度応答である。

なお、応答係数の単位は $\left[\frac{\text{kg/kg}}{\text{kg/s}} \right]$ である。

3次元CFD解析は換気回路網計算において分割した室単位の空間でそれぞれ行う。まず、換気回路網計算から得られた吹出し風量と室間相互の風量を境界条件として、ほぼ定常と見なしうる速度分布が得られるまで気流計算を行う。その後、速度分布を固定し、汚染質発生・流入位置SPから頂点の汚染質濃度が 1kg/s の二等辺三角波の有限パルスが発生させた場合の非定常濃度計算を、それぞれの汚染質発生・流入位置SPを対象にして行う。

各々の解析ケースにおいて、汚染質観測位置RPの汚染質濃度の時系列応答をSP毎に出力し、これらから応答係数を採取する。

C-2.3 空調機系統の汚染質輸送量の算出

ダクトを空調空気が通過するには一定の時間を必要とする。ここで、ダクトの入り口と出口に一般性を持たせてIN, OUTと添え字で表記する。空調系統では、ダクト出口OUTにおいて観測されるステップnにおける汚染質濃度 ${}_{OUT}C^n$ [kg/kg]は、ダクト入口INにおいて観測される汚染質濃度 ${}_{IN}C^n$ [kg/kg]を連続する過去の2ステップ間で線形補間して式(1)のように表すことができる。ここで、ダクトを空調空気が通過するのに要する時間を ${}_{OUT}lag$ [s]とし、式(2)に示すように定める。ダクトの長さを ${}_{OUT}L$ [m]、ダクトの面積を ${}_{OUT}S$ [m²]、ダクト通過風量を ${}_{OUT}Q$ [m³/s]とする。

${}_{OUT}lag$ を濃度応答係数(列)の時間間隔 ΔT で除した量を ${}_{OUT}r$ とし、式(3)に示すように定め、 ${}_{OUT}w$ を ${}_{OUT}r$ の整数部、 ${}_{OUT}d$ を ${}_{OUT}r$ の小数部とする。

$${}_{OUT}C^n = \frac{{}_{OUT}d \cdot {}_{IN}C^{n-{}_{OUT}w-1} + (1-{}_{OUT}d) \cdot {}_{IN}C^{n-{}_{OUT}w}}{...} \quad \dots(1)$$

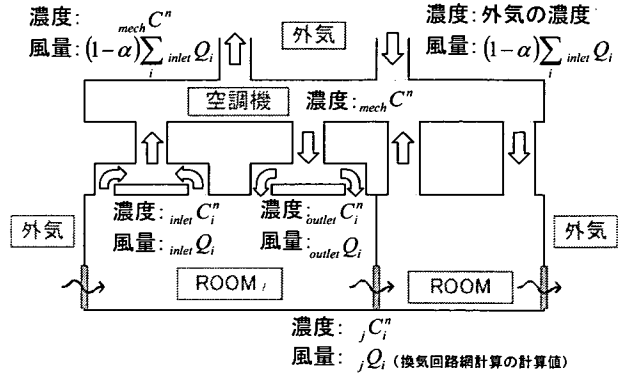


図-2 単一ダクト方式における空調系統概念図

$$\text{ただし, } {}_{OUT}lag = \frac{{}_{OUT}L \cdot {}_{OUT}S}{{}_{OUT}Q} \quad \dots(2)$$

$${}_{OUT}r = \frac{{}_{OUT}lag}{\Delta T} = {}_{OUT}w + {}_{OUT}d \quad \dots(3)$$

本報では、後述のように ${}_{OUT}w \geq 1$ の場合を考える。

まず、図-2に示すように複数の空調室 (ROOM_i | i=1,...,m) が単一の空調機により空調されている単一ダクト方式の場合に関して記述する。ROOM_iにおける吹出し口、吸込み口は、それぞれ単一のダクトに接続しているものとし、空調機内の汚染質濃度 ${}_{mech}C^n$ は各室からの還気が一様に混合した空気の濃度とする。 ${}_{mech}C^n$ は、式(1)の ${}_{IN}C^n$ に各空調室ROOM_iにおける吸込口汚染質濃度 ${}_{inlet}C_i^n$ を代入し求めた各ダクトからの汚染質濃度を風量により加重平均することで求める。(w, dの添え字は省略)

$${}_{mech}C^n = \frac{\sum_i \{d \cdot {}_{inlet}C_i^{n-w-1} + (1-d) \cdot {}_{inlet}C_i^{n-w}\} \times {}_{inlet}Q_i}{\sum_i {}_{inlet}Q_i} \quad \dots(4)$$

$$\text{ただし, } \frac{{}_{inlet}lag_i}{\Delta T} = w + d \quad \dots(5)$$

ROOM_iの空調吹出口における汚染質濃度 ${}_{outlet}C_i^n$ は、式(1)の ${}_{IN}C^n$ に空調機内の汚染質濃度 ${}_{mech}C^n$ を代入し、再循環風量率⁹⁾ α を乗じた式(6)により求める。ここで、再循環風量率とは、空調機において α : (1- α) の

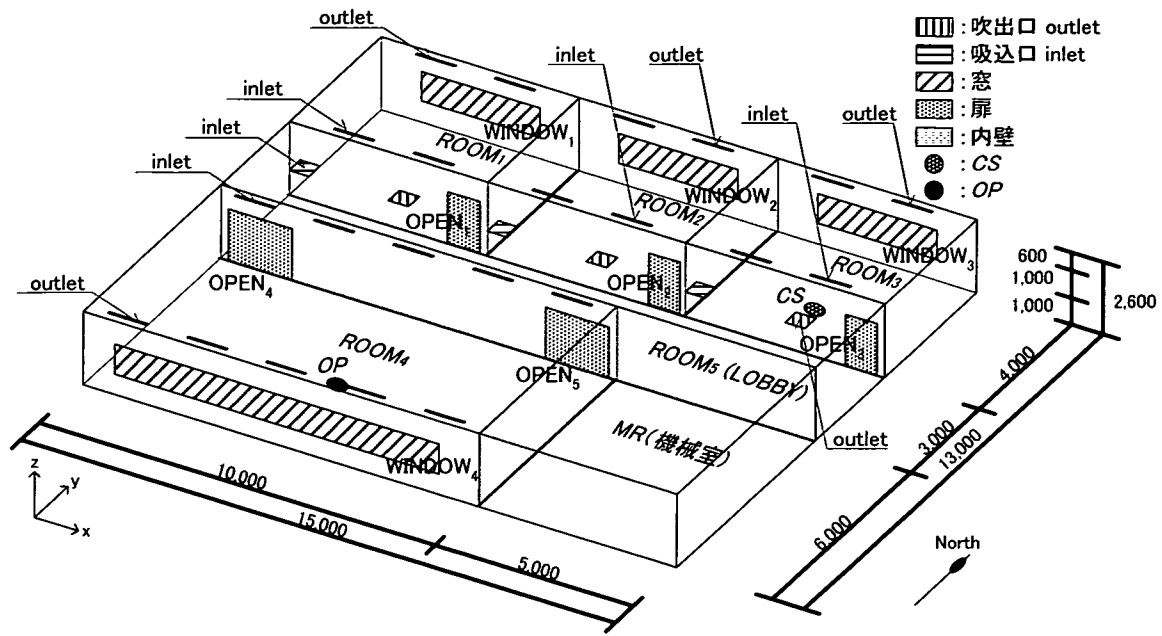


図-3 解析対象モデル

割合で空調循環空気と外気が混合する値とする。(w, d の添え字は省略)

$$outlet C_i^n = \alpha d \cdot mech C_i^{n-w-1} + \alpha(1-d) \cdot mech C_i^{n-w} \quad \dots(6)$$

$$ただし, \frac{mech}{outlet} r_i = \frac{mech_i lag_i}{\Delta T} = w + d \quad \dots(7)$$

空調方式が個別分散方式の場合は、空調機における混合を考慮する必要がなくなるため、ROOM_i の空調吹出口における汚染質濃度 $outlet C_i^n$ は、 $inlet C_i^n$ を用いて、式(8)より求めることができる。(w, d の添え字は省略)

$$outlet C_i^n = \alpha d \cdot inlet C_i^{n-w-1} + \alpha(1-d) \cdot inlet C_i^{n-w} \quad \dots(8)$$

$$ただし, \frac{inlet}{outlet} r_i = \frac{inlet lag_i}{\Delta T} = w + d \quad \dots(9)$$

C-2.4 各計算位置の蓄積濃度の算出^{注4)}

本研究では、壁体からの汚染質の吸放出は考慮しないため、壁は濃度を蓄えないとする。一方、室容積(室内気流)は汚染質を輸送し、蓄積し、観測点で放出している。これは壁体の非定常熱伝道における壁体の貫流、蓄熱、壁の反対側からの放熱現象に対応する物質移動現象である。よって本手法では、室容積が汚染質を蓄積していると考え、汚染質観測位置RPの蓄

積濃度とその計算法を式(10), (11)で定義する。

$$\frac{SP}{RP} A_i^{n,k} = \frac{SP}{RP} A_i^{n-1,k+1} + \frac{SP}{RP} q_i^n \times \frac{SP}{RP} F_i^k \quad (k=0 \sim N-1) \quad \dots(10)$$

$$\frac{SP}{RP} A_i^{n,N} = \frac{SP}{RP} A_i^{n-1,N} \times \frac{SP}{RP} R_i + \frac{SP}{RP} q_i^n \times \frac{SP}{RP} F_i^N \quad (k=N) \quad \dots(11)$$

$\frac{SP}{RP} A_i^{n,k}$: ROOM_i において過去からステップnまでに汚染質発生・流入位置SPから放出された複数の濃度パルスに対する汚染質観測位置RPにおける複数の応答のステップ(n+k)における濃度応答値の重ね合わせ [kg/kg]

$\frac{SP}{RP} q_i^n$: ROOM_i においてステップnにおける汚染質発生・流入位置SPからの汚染質発生量 [kg/s]

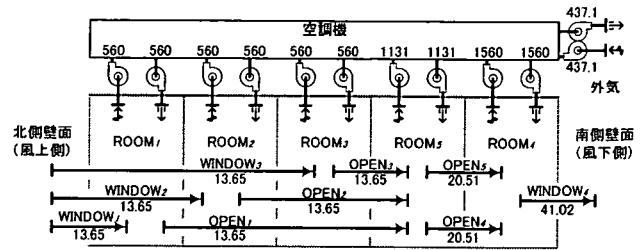
N : 減衰の割合がそのステップ付近以降で一定と見なせるステップ

$\frac{SP}{RP} R_i$: ステップN以降の $\frac{SP}{RP} F_i^n$ の公比⁹⁾ [-]

ROOM_i 内において、汚染質発生・流入位置SPは汚染質発生源CS、空調吹出口outletと空間相互を接続する開口部 OPEN_j となる。汚染質発生源CSからの汚染

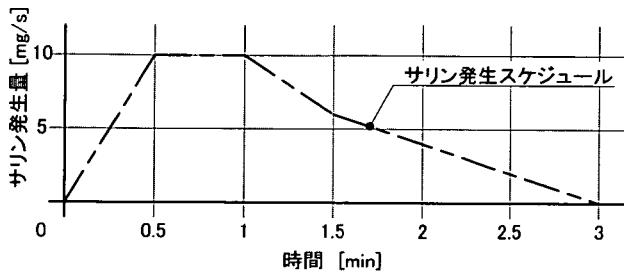
表-1 室条件と開口条件

	ROOM ₁	ROOM ₂	ROOM ₃	ROOM ₄	ROOM ₅	
床面積 [m ²]	20.0	20.0	20.0	60.0	43.5	
室容積 [m ³]	52.0	52.0	52.0	156.0	113.1	
窓 WINDOW _i	表記	WINDOW ₁	WINDOW ₂	WINDOW ₃	WINDOW ₄	
	形式	引違い	引違い	引違い	引違い	
	寸法 [m ²]	3.2×1.0	3.2×1.0	3.2×1.0	8.0×1.0	
扉 OPEN _j	表記	OPEN ₁	OPEN ₂	OPEN ₃	OPEN ₄	OPEN ₅
	風下側	ROOM ₃	ROOM ₃	ROOM ₂	ROOM ₄	ROOM ₄
	風上側	ROOM ₁	ROOM ₂	ROOM ₃	ROOM ₃	ROOM ₅
	形式	片開き	片開き	片開き	両開き	両開き
	寸法 [m ²]	0.8×2.0	0.8×2.0	0.8×2.0	1.6×2.0	1.6×2.0



注 表中の数字は空気輸送量[m³/h]を示し、矢印は流れの向きを示す。

図-5 空気輸送経路の系統図



注 RF濃度計算法では、二等辺三角波の有限パルス（間隔： ΔT ）により汚染質発生スケジュールを構成する。

図-4 サリン発生スケジュール

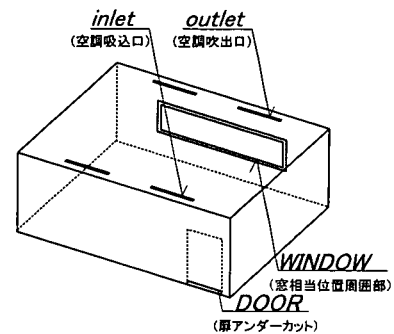


図-6 CFD解析におけるROOM3の境界位置

質発生量^{CS} q_i^n は計算条件により決定し、空調吹出口 *outlet* と空間相互を接続する開口部 OPEN_j からの ROOM_i への汚染質流入量は式(12)、(13)により求まる。ここで、 ρ [kg/m³]は空気の密度とする。

$${}_{outlet} q_i^n = {}_{outlet} C_i^n \times {}_{outlet} Q_i \times \rho \quad \dots(12)$$

$${}^j q_i^n = {}^j C_i^n \times {}^j Q_i \times \rho \quad \dots(13)$$

式(10)に $k=0$ を代入したものが、RPにおける汚染質発生・流入位置SP別の n 時点の蓄積濃度となり、式(14)を用いてこれらを重ね合わせた（加算した）量が ROOM_i における各RPの n 時点の濃度 ${}_{RP} C_i^n$ [kg/kg] となる。

$${}_{RP} C_i^n = \sum_{SP} {}_{RP} A_i^{n,0} = {}_{RP} A_i^{n,0} + {}_{outlet} A_i^{n,0} + \sum_j {}^j A_i^{n,0} \quad \dots(14)$$

上述の計算により、各空間の汚染質観測位置（汚染質観測点OP、空調吸込口 *inlet*、開口部 OPEN_j）にお

ける汚染質濃度を逐次計算し、換気回路網計算で求めた室相互の空気輸送量を用いて室相互の汚染質輸送量を導き、建物内部の汚染質輸送を包括的に解析する。

C-3. 濃度計算例

C-3.1 解析対象

図-3に示す複数室空間により構成された単層の建築空間を想定する。空調は単一ダクト方式とし、機械室に設置した単一の空調機により機械室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、再循環風量率 α を0.9とした。

C-3.2 解析ケース

生物化学（BC）テロを想定し、図-3に示すROOM₃中央のCSにおいてサリンを図-4のスケジュールを用いて発生させ、ROOM₄中央のOPにおける1時間の濃度推移を解析した。なお、外気は汚染質を含まないものとした。

表-2 境界条件

		ROOM ₁	ROOM ₂	ROOM ₃	ROOM ₄	ROOM ₅
空調風量 Q_i [m ³ /h]		560	560	560	1560	1131
吹出口	境界種別	流入境界				
	形式	ライン型	ライン型	ライン型	ライン型	角型アネモ
	サイズ S_i [m ²]	1.0×0.1	1.0×0.1	1.0×0.1	1.0×0.1	0.5×0.5
	設置個数 N_i [箇所]	2	2	2	5	3
	吹出風速 V_i [m/s]	$Q_i / (3600 \times S_i \times N_i)$				
	乱流強度 I	0.1				
	乱れの長さスケール l [m]	0.03				
吸入口	境界種別	流出境界				
	形式	ライン型	ライン型	ライン型	ライン型	角型アネモ
	サイズ S_i [m ²]	1.0×0.1	1.0×0.1	1.0×0.1	1.0×0.1	0.5×0.5
	設置個数 N_i [箇所]	2	2	2	5	3
	吸込風速 V_i [m/s]	$Q_i / (3600 \times S_i \times N_i)$				
	乱流強度 I	0.1				
	乱れの長さスケール l [m]	0.03				
窓	表記	WINDOW ₁	WINDOW ₂	WINDOW ₃	WINDOW ₄	
	境界種別	流入境界			流出境界	
	窓相当位置 (境界面) の合計面積 A_i [m ²]	0.8	0.8	0.8	1.76	
	隙間風量 $A_i Q_i$ [m ³ /h]	COMIS計算値				流量配分
	吹出風速 V_i [m/s]	$A_i Q_i / (3600 \times A_i S_i)$				
	乱流強度 I	0.1				
	乱れの長さスケール l [m]	0.03				
扉	表記	OPEN ₁	OPEN ₂	OPEN ₃	OPEN ₄	OPEN ₅
	境界種別	流出境界			流入境界	
	風下側空間 (流入側)	ROOM ₅	ROOM ₅	ROOM ₂	ROOM ₄	ROOM ₄
	風上側空間 (流出側)	ROOM ₁	ROOM ₂	ROOM ₃	ROOM ₅	ROOM ₅
	アンダーカット相当面の合計面積 A_i [m ²]	0.08	0.08	0.08	0.16	0.16
	隙間風量 $A_i Q_i$ [m ³ /h]	流量配分			COMIS計算値	
	吹出風速 V_i [m/s]				$A_i Q_i / (3600 \times A_i S_i)$	
	乱流強度 I	0.1				
	乱れの長さスケール l [m]	0.03				

C-3.3 換気回路網計算の概要

表-1に空間と開口部の概要を示す。隙間長さ1mあたりの通気量は、窓：0.079 dm³・s⁻¹・m⁻¹・Pa^{-0.6}、扉：1.1 dm³・s⁻¹・m⁻¹・Pa^{-0.6}とした¹⁰⁾。空調機と各空調室間のリターンダクトサイズは、国土交通省の建築設備設計基準(平成14年版)に従いダクト通過圧力損失を1.0～1.5Pa/mとして決定し、ダクトの長さ L_i [m]および空調空気が通過するのに要する時間 t_{lag_i} [s]はそれぞれ、ROOM₁: 37.5m, 9.6s, ROOM₂: 30.0m, 7.7s, ROOM₃: 22.5m, 5.8s, ROOM₄: 22.5m, 4.7s, ROOM₅ (Lobby): 30.0m, 6.0s とした。サプライダクトはリターンダクトと同一条件とした。各空調室と空調機間のリターンダクトとサプライダクトにそれぞれファンを設置し、空調換気回数が10回/hとなる給排気風量を設定した。解析対象層レベルにおける屋外風速は6.0m/s^{注5)}とし、風向は北からの定風向とした。風圧係数は北側壁面(風上壁面)を0.8, 南側壁面(風下壁面)を-0.55と設定した。なお、室内外温度差による換気駆動力は考慮しなかった。解析ソフトウェアは”COMIS”を使用し、時間ステップは $\Delta t = 1s$ を用いた。図-5に解析対象

の系統図と解析結果を示す。

C-3.4 応答係数算出用3次元CFD解析の概要

濃度応答係数を算出することを目的として、解析対象を室単位に分割して3次元CFD解析を行った。一カ所の濃度観測位置に対する濃度応答係数は、汚染質発生・流入位置毎に求める必要があるため、1室において行う濃度応答係数算出のための3次元CFD解析の解析ケース数は汚染質発生・流入位置の数と同数となり、ROOM₃においては、CS及びoutletからパルスを発生させた2ケース、ROOM₄においてはoutlet, OPEN₄, OPEN₅からの3ケース、ROOM₅においてはoutlet, OPEN₁, OPEN₂, OPEN₃からの4ケース行った。ROOM₁およびROOM₂はROOM₃と同条件のため、outletからの濃度応答係数はROOM₃における数値を使用することとし、計算は省略した。屋外および他室からの空気の流入は、換気回路網計算により得られた値を窓は窓相対位置周囲の壁面にスリットを設定し、扉は扉相当位置下部にアンダーカットとして境界条件を与えることでモデル化した。

以上に対応したCFDの境界条件を表-2に、ROOM₃における境界位置を図-6に示す。壁面境界条件は一般化対数則(定数E=9)とした。解析には商用ソフト: Star-CDを使用し、乱流モデルは標準k-εモデルを用いた。メッシュ分割(x×y×z)はそれぞれ、ROOM₃: 50×21×16, ROOM₄: 100×31×16, ROOM₅ (LOBBY): 150×17×16とした。

応答係数算出用の非定常3次元CFD解析は時間刻み Δt : 0.02sとして、応答係数の減衰の割合(公比)をほぼ一定と見なせる75,000ステップ(1,500s)まで行った。

濃度応答係数(列)の時間間隔(発生パルス間隔) ΔT は2sとした。なお、公比がそのステップ付近以降で一定と見なせる時間ステップNは750とした。

C-3.5 マクロ・CFD複合モデルによる汚染質輸送解析の概要

回路網解析で各空間相互の空気輸送量 Q_{outlet} , Q_{inlet}

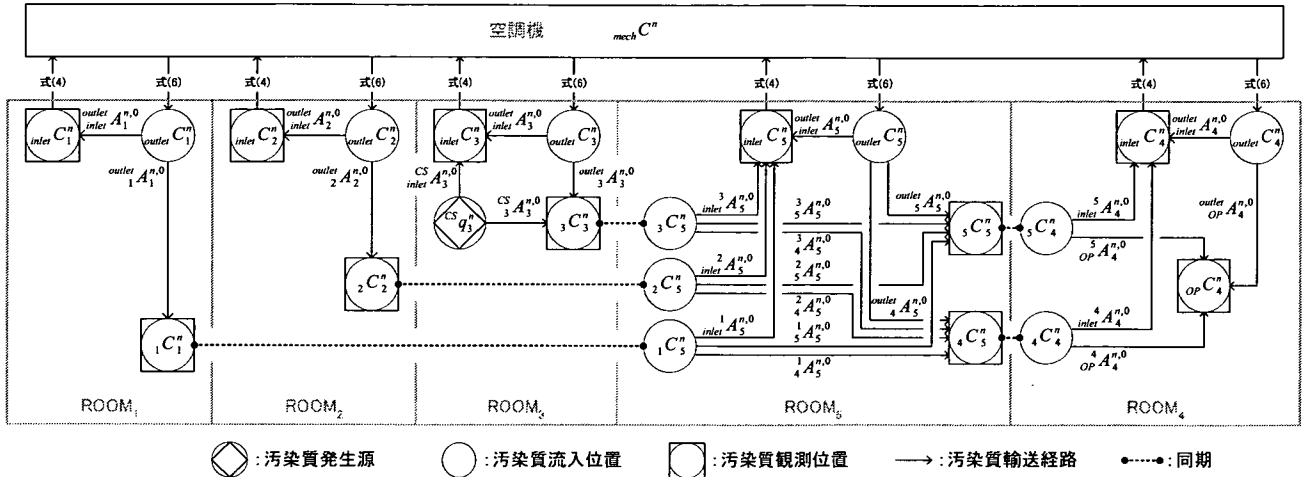


図-7 汚染質輸送系統図

Q_i が得られ、3次元CFD解析で濃度応答係数 $SP F_i^n$ が得られる。これらを用いて式(4)~(7), (10)~(14)により、時間間隔 ΔT おきの汚染質観測位置（汚染質観測点OP, 空調吸込口inlet, 開口部OPEN $_j$ ）における汚染質濃度を計算した。汚染質発生・流入位置（汚染質発生源CS, 空調吹出口outlet, 開口部OPEN $_j$ ）、汚染質観測位置（汚染質観測点OP, 空調吸込口inlet, 開口部OPEN $_j$ ）及び空調機間の汚染質輸送系統を図-7に示す。本解析では、ダクト風速、パルス間隔 ΔT に対しダクトが十分に長く、式(3)の $\frac{IN}{OUT} w$ が1以上となるため、ステップ n における各汚染質観測位置における汚染質濃度は、ステップ n の汚染質発生源CSにおける汚染質発生量と、ステップ $(n-1)$ 以前の各汚染質発生（流入）位置における汚染質発生量（濃度）から一意的に求められる⁹⁾。

C-3.6 検証計算用3次元CFD解析の概要

本研究において提案するマクロ・CFD複合モデルの解析精度を3次元CFD解析結果と比較するため、図-3に示す全空間を対象にした3次元CFD解析を行った。ROOM間の気流経路は扉相当位置下部に設けたアンダーカットとした⁶⁾。

空調吹出口の汚染質濃度は以下の式により求めた。

ここで、 $\frac{IN}{OUT} lag_i$ はC-3.3における換気回路網計算条件

と同じ値とする。なお、3次元CFD解析では lag に対して Δt が十分に小さいため、小数部は打ち切り z を整数として扱う。

$$mech C^n = \frac{\sum_i \{ inlet C_i^{n-inlet mech z_i} \} \times inlet Q_i}{\sum_i inlet Q_i} \quad \dots(16)$$

$$outlet C_i^n = \alpha mech C^{n-outlet z_i} \quad \dots(17)$$

ただし、 $\frac{inlet}{mech} z_i = \left\lfloor \frac{inlet mech lag_i}{\Delta t} \right\rfloor$ (小数点以下打ち切り)

... (18)

$$mech outlet z_i = \left\lfloor \frac{mech outlet lag_i}{\Delta t} \right\rfloor$$
 (小数点以下打ち切り)

... (19)

非定常3次元CFD解析は時間刻み Δt : 0.02sにおいて180,000ステップ (3,600s) 行った。メッシュ分割($x \times y \times z$)は $150 \times 65 \times 16$ ⁷⁾とした。その他の計算条件は3.4と同様である。

C-4. 解析結果

マクロモデルを用いた換気回路網解析（以降、COMIS）、建物全体の包括的な3次元CFD解析（以降、CFD）と本研究により提案するマクロ・CFD複合モデル（以降、RF法）の解析結果を比較する。

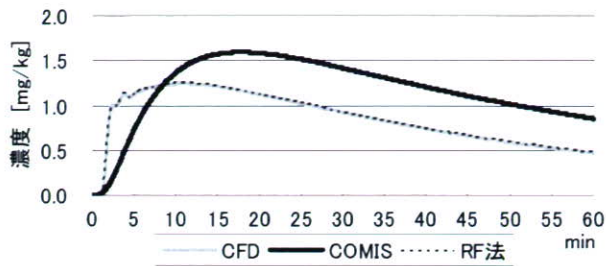


図-8 ROOM₄におけるサリン濃度推移

図-8に解析手法別の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、室内空気を節点で代表するCOMISにおいては室内平均濃度とし、空間内の濃度分布を評価できるCFDとRF法では室内中心位置OPにおける濃度とする。RF法解析結果はCFD解析結果とよく一致している^(注8)一方、COMIS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。

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、RF法ではクラスタマシンを使用した3次元CFD解析によ

る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。なお、3次元CFD解析による応答係数算出の計算時間はクラスタマシンの1ノード (CPU:Pentium4, 3.6GHz, Memory:2GB)を使用し約35時間であった。

C-5. 病室における実測

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り、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集めた

C-5.1 測定概要

図-9に実測の対象とした4床病室 (モデルルーム)を示す。室内寸法は6m(W)×5.4m(L)×2.6m(H)である。空調は天井付きとし、廊下の空気を吸込、冷却後に室内に供給する。空調換気回数 of 設計値は

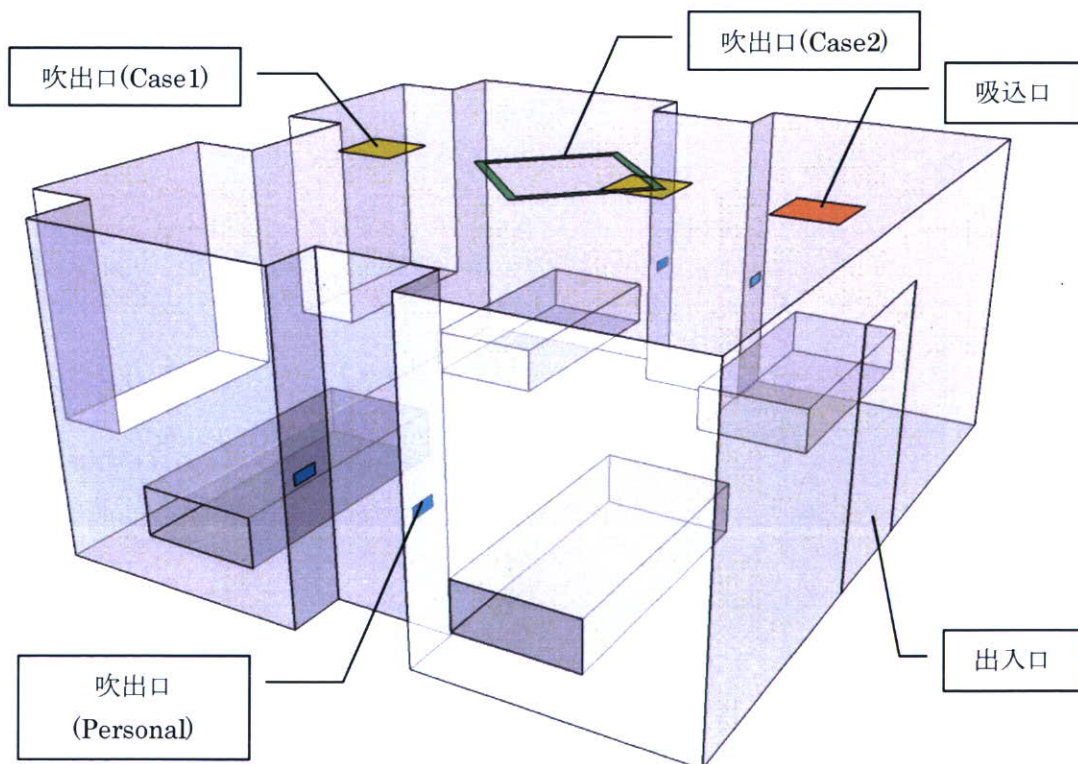


図-9 測定対象モデルルーム



(a) Case 1

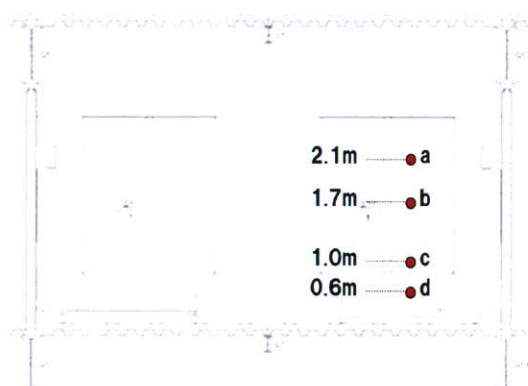


(b) Case 2

写真-1 病室及び天井面



(a) 平面



(b) 断面

図-10 測定点

表-3 測定ポイントごとの平均風速及び乱流強度 (Case1, 3分)

区分	高さ [m]	測定ポイント											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均 速度 [m/s]	2.1			0.09	0.14	0.34	0.21	0.05	0.10	0.17	0.16	0.20	0.08
	1	0.60	0.61	0.37	0.11	0.18	0.14	0.09	0.15	0.11	0.16	0.17	0.23
乱流 強度 [-]	2.1			0.59	0.36	0.22	0.40	0.50	0.59	0.33	0.52	0.44	0.46
	1	0.21	0.20	0.20	0.40	0.32	0.42	0.43	0.33	0.41	0.41	0.42	0.34

表-4 測定ポイントごとの平均風速及び乱流強度 (Case2, 3分)

区分	高さ [m]	測定ポイント											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均 速度 [m/s]	2.1			0.23	0.11	0.04	0.09	0.30	0.11	0.11	0.08	0.15	0.20
	1	0.09	0.18	0.51	0.06	0.15	0.24	0.28	0.22	0.07	0.12	0.10	0.16
乱流 強度 [-]	2.1			0.19	0.46	0.64	0.61	0.18	0.48	0.42	0.49	0.46	0.37
	1	0.58	0.60	0.11	0.58	0.39	0.25	0.41	0.35	0.49	0.42	0.42	0.25

11回/hである。給気口を2ヶ所としたCASE1(写真1(a))と1ヶ所としたCASE2(写真1(b))の2ケースにおいて気流を測定した。測定空間は、室内を対称と想定し、片側のみを対象とする。図-10に示すように、主に患者が横になっているベット周辺(12ヶ所)を高さごと(4ヶ所)に42ヶ所の測定点を設定した。

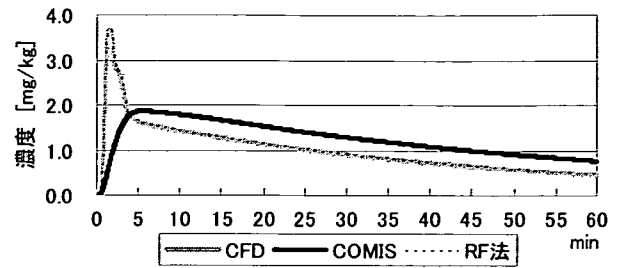


図-11 空調機におけるサリン濃度推移

C-5.2 測定結果

表-3,4にCASE毎の室内気流の測定結果を示す。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]となり、一部の風速が0.3~0.4[m/s]を超え不快感を与えられる。吹出口を調節して居住領域での風速を減らす必要がある。そして、気流の乱れを示す乱流強度は、居住領域の高さ1mでCase1は0.20~0.43、Case2は0.11~0.58となり、場所によって不快感を起こす可能性があると予想される。室内空気環境のため病室の場合、換気回数として6[回/時間]以上が推薦されている。一般建物に比べ比較的に高い換気回数を設ける際は、気流による不快感を起こさないよう注意する必要がある。

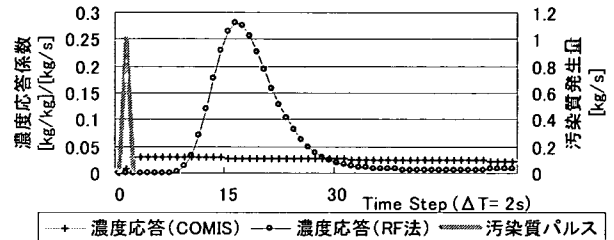


図-12 ROOM3のinletにおけるCSからの濃度応答係数

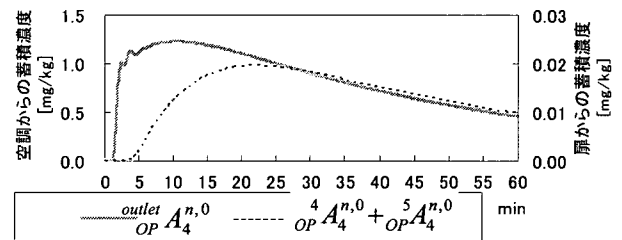


図-13 ROOM4のOPにおける発生源別蓄積濃度

D 考察

D-1 マクロ・CFD複合モデルと他のシミュレーションモデルにおける差異

図-11に空調機におけるサリン濃度推移を示す。COMISと比較しCFDとRF法では汚染質発生直後に空調機系統の濃度上昇が急激な立ち上がりで高いピーク値を示しており、ROOM3において発生した汚染質が高濃度のままダクトを介してROOM4に移流したことがわかる。

図-12にROOM3の中央のCSにおいて発生させた単位パルスに対するROOM3のinletにおける濃度応答係数

F_{inlet}^{SC} とマクロモデルを用いて、CSより同様の二等辺三角波の汚染質有限パルスが発生させた場合の空調吸込口における濃度応答を示す。なお、マクロモデルは

室内に物質の完全混合の仮定を設け室内空気を1節点として扱うため、空調吸込口の汚染質濃度は室内空気の平均濃度となる。これより、室内空気を1節点で代表するマクロモデル (COMIS) ではROOM3において一様に希釈された汚染空気がinletを介して空調機に流入するのに対し、CFDではROOM3において発生した汚染質が一様に希釈される以前に高濃度のまま空調機に流入することがわかる。ROOM4 (図-8) におけるサリン濃度推移の解析手法による差異は、図-11, 12で示した空調機系統における濃度推移の差異に起因したと考えられる。

D-2 マクロ・CFD複合モデルの活用可能性

図-13にROOM4の中央のOPにおけるoutletからの蓄積

濃度 ${}_{OP}^{outlet} A_4^{n,0}$ と $ROOM_5$ から $OPEN_4$ と $OPEN_5$ を介して流入する蓄積濃度の合計値 $({}_{OP}^4 A_4^{n,0} + {}_{OP}^5 A_4^{n,0})$ を示す。扉からの蓄積濃度 $({}_{OP}^4 A_4^{n,0} + {}_{OP}^5 A_4^{n,0})$ は右縦軸でプロットしてある。右縦軸の目盛りは左縦軸の目盛りの50倍である。二つの曲線がほぼ同じ高さにあるから $({}_{OP}^4 A_4^{n,0} + {}_{OP}^5 A_4^{n,0})$ は ${}_{OP}^{outlet} A_4^{n,0}$ の2%程度であり、OPにおけるサリンの濃度上昇のほとんどが空調系統からの汚染質流入に起因していることがわかる。また、 ${}_{OP}^{outlet} A_4^{n,0}$ の濃度上昇は $({}_{OP}^4 A_4^{n,0} + {}_{OP}^5 A_4^{n,0})$ と比較し急激に立ち上がっている。これは、 ${}_{OP}^{outlet} A_4^{n,0}$ では図-11に示すパルス変動を見せる空調機内の濃度が気流に輸送されて吹出し口から $ROOM_4$ に直接供給されているのに対し、 $({}_{OP}^4 A_4^{n,0} + {}_{OP}^5 A_4^{n,0})$ では隣の $ROOM_5$ で吹出された濃度のパルス変動を含む気流が、隣室内で輸送・混合された後に隙間開口を經由して $ROOM_4$ の隙間開口 $OPEN_4$ 、 $OPEN_5$ に達しているために ${}_{OP}^{outlet} A_4^{n,0}$ より濃度の立ち上がり鈍くなっているのである。このように、重ね合わせ計算であるRF濃度計算法では各要素を離散した計算が可能であり、観測点に対する要素別の寄与率等を解析後に調査することも可能な手法であるといえる。

E 結論

汚染物質拡散性状を詳細に評価するには、室内気流分布の3次元性を考慮したマイクロな解析を用いる必要がある。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、計算コストの高いマイクロモデルシミュレーション(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。

本研究では、この目的でRF濃度計算法を組み込んだ”マクロ・CFD複合モデル”を開発した。本モデルと三

次元CFDの計算結果の定量的な比較により、本モデルは、数回のワークステーションによる準備計算のみによって、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ことを示した。

すなわち、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である。

また、本検討では観測点における各汚染質発生源からの濃度応答の感度を分析することが可能である。すなわち、RF濃度計算法は、建物内部における汚染質の移流・拡散性状の特徴を分析するツールとしても、有用性の高い手法であることが確認された。

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考えられるため、この手法の実現象への対応を検討するには、CFD解析と実現象との対応を検討する必要がある。今回は、研究対象としている病室等における実測により、このCFD解析評価のための気流分布のデータを収集した。

注釈

- 1) まず空間を周囲の壁・床等を含まない空気みの領域と定義する。環境変数を代表する座標点として、環境変数の一次モーメントの空間積分が0となる点と定義する。環境変数によって代表点異なる可能性がある。一般には、この代表点に環境変数のゼロ次モーメントの空間平均値を空間体積で除した値、すなわち空間平均値が存在するものとして取り扱う¹⁾。本報で定義するマクロモデルは、物質の完全混合の仮定を課しているため、環境変数の空間分布を計算していない。空間分布を一定として一次モーメントの空間積分が0となる点を求めると、これは空間の幾何学的重心と一致する。本報のマクロモデルでは、特に計算に空間の座標を必要としていないので、大まかに空間、すなわち室の中心にある、もしくは室の位置は考えずに、室内は一定の環境変数が分布していると

考えればよい。

- 2) 線形システムとは、入力に対して、出力が伝達関数を通して一意的に定まり、出力が入力に対して線形に変化する、つまり入力を定数倍すれば出力も定数倍、あるいは重ね合わせた入力に対し、出力も重ねあわせた値になるシステムである。
- 3) 文献 9)では吹出口濃度に対する濃度応答係数を定義し使用したが、本報では、吹出口において吹き出した（発生した）汚染質量に対する濃度応答係数を使用している。
- 4) 文献 9)において報告されている内容であるが、複数室に対応するために変数の添え字が変更・追加され多少複雑になっているので改めて解説する。
- 5) 本ケーススタディは BC テロを想定しているため、汚染質が他の部屋に輸送されやすい状況を安全側の解析結果として判断する。解析条件は解析結果が安全側となり得るものとする必要があることから、外部風速は、各室間の空気輸送量が多い（安全側の）値をとるように、一般的に隙間風量が多くなる（安全側の）計算を行う空調負荷計算時に用いられる隙間風算出用の外部風速¹²⁾を用いる。
- 6) Star-CD では、式(A1)に示す圧力降下量を特定のセルに付与することが可能である。ここで、 ξ_i ($i=1,2,3$)は直交座標、 γ_i , β_i は抵抗係数、 u_i は ξ_i 方向の表面速度とする。なお、この場合、指定セル内では質量保存式は解くが、運動量方程式を解かない。
$$\frac{\partial p}{\partial \xi_i} = -(\gamma_i + \beta_i |u_i|) \cdot u_i \quad \dots(A1)$$
実際のアンダーカット（数 cm 程度）を表現するためには、CFD 解析において、非常に細かいメッシュ分割が必要となる。そこで本解析では、アン

ダーカット相当位置のセル ($x \times y \times z$: $10\text{cm} \times 5\text{cm} \times 10\text{cm}$)の扉面垂線方向に上述の抵抗係数を設定し、アンダーカット通過気流の圧力損失を CFD 解析上で計算する。ここで、扉の抵抗係数 γ_i , β_i は隙間前後の圧力差 ΔP が 1Pa と 4Pa の場合の隙間風量の¹⁾ 1Q , ${}^4Q[\text{m}^3/\text{s}]$ を用いた式(A2),(A3)を連立して求める¹⁰⁾。ここで、 $W[\text{m}]$ をアンダーカットの幅、 $H[\text{m}]$ をアンダーカットの高さとする。 1Q , 4Q は換気回路網計算において設定した扉通気量の係数 $1.1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-0.6}$ を用いた経験式(A4)により算出する。

$$\Delta P = \left(\gamma_i + \beta_i \frac{{}^1Q}{WH} \right) \frac{{}^1Q}{WH} = 1 \quad \dots(A2)$$

$$\Delta P = \left(\gamma_i + \beta_i \frac{{}^4Q}{WH} \right) \frac{{}^4Q}{WH} = 4 \quad \dots(A3)$$

$$Q = \frac{1.1}{1000} W \Delta P^{0.6} \quad \dots(A4)$$

本解析において $\gamma_i=39$, $\beta_i=4700$ となる。

- 7) 検証計算用の建物全体のメッシュサイズは、C-3.4における各室のメッシュサイズに対応している。
- 8) 参考文献 9)で報告されている内容であるが、RF濃度計算法は、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、及び数値計算の丸め誤差を併せた誤差の範囲内で、3次元 CFD 解析と同じ精度の結果が得られる。

本報告のマクロ・CFD 複合モデルでは、実際には勾配がある隙間風の濃度情報を平均化した節点情報としてモデル化しているため、本ケーススタディにおける解析結果には、このモデル化に起因する誤差が含まれる。しかしながら、空調系統における濃度輸送と比較し隙間風に起因する濃度輸送が極めて小さく、この誤差が解析結果に及ぼす影響も極めて小さくなっていると考えられる。

参考文献

- 1) 空調設備基準委員会第 2 小委員会負荷計算法分科
会報告：電算機による動的空調負荷計算法，空気
調和・衛生工学第 46 巻第 3 号，（1972 年 3 月），
pp1～38
- 2) 松尾陽：日射熱取得の算法，空気調和と冷凍，
10[3],1970 年 3 月
- 3) 石田義洋，田中授，稲沼実：レスポンスファクタの
時間々隔及び波形の相違による冷暖房負荷の検討
（第 1 報），日本建築学会大会学術講演梗概集
（近畿），（1980 年 9 月），pp527
- 4) 石田義洋，早川真，戸河里敏，荒井良延：換気計算
機能を付加した多室空調負荷計算プログラム，日
本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），
（1986 年 8 月），pp743
- 5) 空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧，
第 12 版，（2001 年），第 5 編 2 章
- 6) Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)
:Technical Note AIVC 29 Fundamentals of Multizone
Air Flow Model – COMIS,（1990 年 5 月）
- 7) 日野幹雄：スペクトル解析，（1977 年），pp122, 朝倉
書店
- 8) 空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧，
第 13 版，（2002 年），第 1 編 5 章
- 9) 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,（2006 年
9 月），pp.19-28
- 10) Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC):
Technical Note AIVC 44 Numerical Data for Air
Infiltration & Natural Ventilation Calculations,（1998
年）
- 11) 村上周三，加藤信介：新たな換気効率指標と
三次元乱流数値シミュレーションによる算出法—
換気効率の評価モデルに関する研究—，空気調和
・衛生工学論文集 No.32,（1986 年 10 月），pp.91-

101

- 12) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備課監修：
建築設備設計基準 平成十四年版，（2002 年），
pp243

F 健康危険情報

なし。

G 研究発表

1. 論文発表

- 1) 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2
月）

2. 学会発表

- 2) 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 —R F 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年7月
- 3) 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年8月福岡）
- 4) 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・マイ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

H 知的財産権の出願・登録状況

なし。