

図 10 Pulse 発生とそれに対する応答係数の定義

さらに定常流れ場の濃度分布の線形性を利用して、効率的な非定常計算（畳み込み計算，Computation of convolution）を行ったためである。なお、応答係数の算出のために、流体解析コードによる気流・濃度数値解析が 2 回以上必要であることを強調しておく。

C-4 マクロ・CFD モデルの開発

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、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に基づく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-4.1 マクロ・CFD 複合モデルの計算法

C-4.1.1 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。 i は室番号、 j は開口部の番号とする。

$outlet Q_i$: 吹出口から ROOM $_i$ への流入風量
[m³/s]

$inlet Q_i$: 吸込口への ROOM $_i$ からの流出風量
[m³/s]

$j Q_i$: 開口 OPEN $_j$ から空間 ROOM $_i$ への流入風量
[m³/s]

C-4.1.2 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

$F_{RP}^{SP} F_i^n$ を求める。ここに、濃度応答係数 $F_{RP}^{SP} F_i^n$ を

図-10 に示すように定義する。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-10の●)。例えば $outlet F_{inlet}^{SP} F_i^n$ 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を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-4.1.3 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。

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

ただし、

$${}_{OUT}lag = \frac{{}_{OUT}L}{{}_{OUT}Q} \quad (2)$$

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

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

まず、図-11 に示すように複数の空調室 (ROOM_{*i*} | $i=1, \dots, m$) 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、

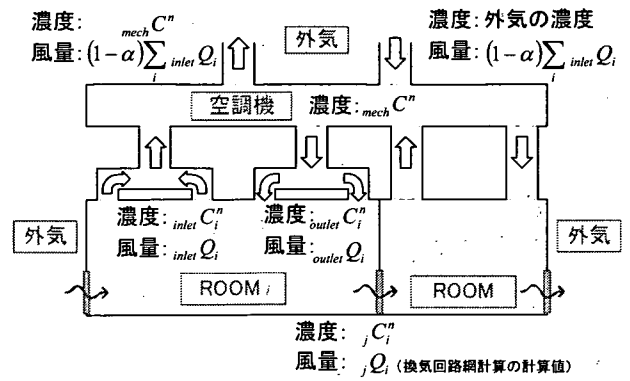


図-11 単一ダクト方式における空調系統概念図

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と求める。(w, d の添え字は省略)

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

ただし、

$${}_{mech}r_i = \frac{{}_{inlet}lag_i}{\Delta T} = w + d \quad \dots(5)$$

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 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 $\alpha : (1-\alpha)$ の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)

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

ただし、

$${}_{outlet}r_i = \frac{{}_{outlet}lag_i}{\Delta T} = w + d \quad (7)$$

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、

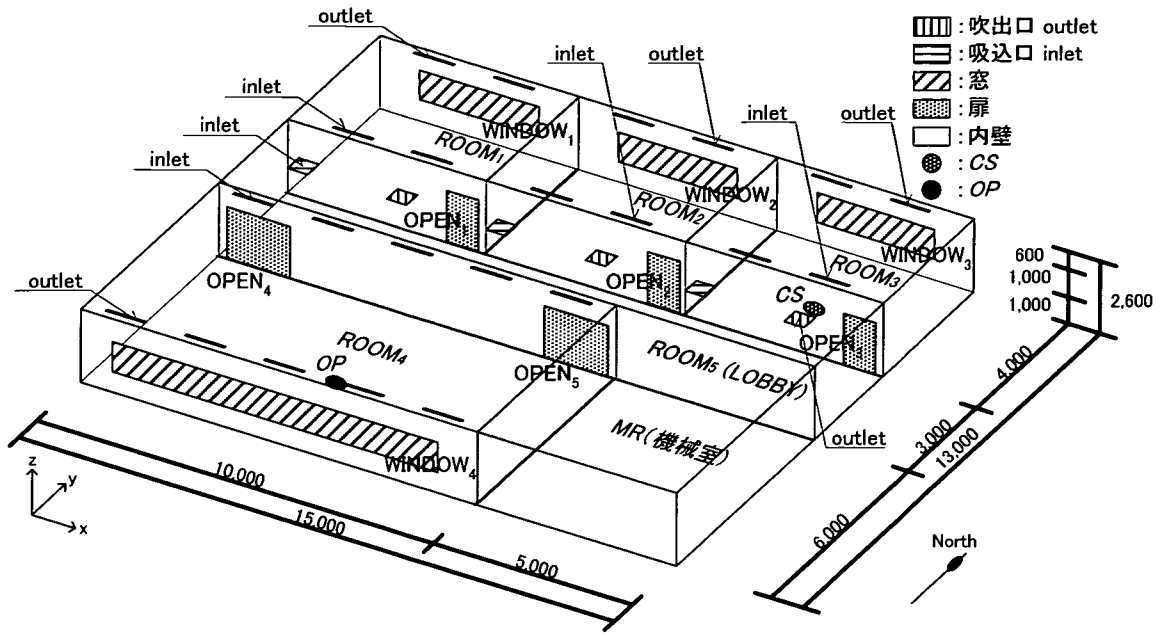


図-12 解析対象モデル

ROOM_i の空調吹出口における汚染質濃度 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)

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

ただし、

$$\frac{inlet R_i}{outlet R_i} = \frac{inlet lag_i}{\Delta T} = w + d \dots (9)$$

C-4.1.4 各計算位置の蓄積濃度の算出

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。

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

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

${}_{RP}^{SP} A_i^{n,k}$: 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]

${}_{SP}^{SP} q_i^n$: 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

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

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 からの汚染質発生量 ${}_{CS}^{SP} q_i^n$ 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]は空気密度とする。

$$outlet q_i^n = outlet C_i^n \times outlet Q_i \times \rho \dots (12)$$

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

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

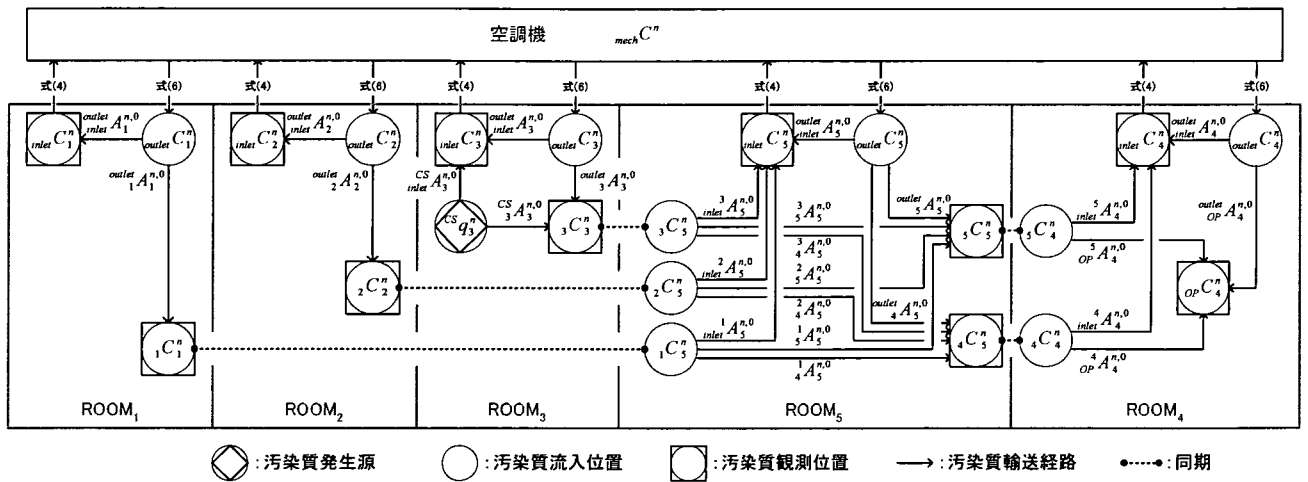
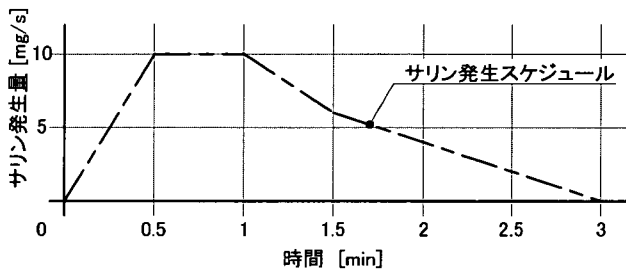


図-15 汚染質輸送系統図



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-13 サリン発生スケジュール

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。

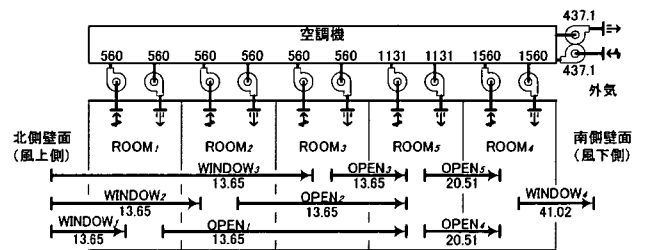
$$RP C_i^n = \sum_{SP} SP A_i^{n,0} = CS A_i^{n,0} + \sum_{RP} RP A_i^{n,0} + \sum_j RP A_i^{n,0} \quad \dots(14)$$

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-4.2 濃度計算例

C-4.2.1 解析対象

図-12 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



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-14 空気輸送経路の系統図

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-4.2.2 解析ケース

生物化学 (BC) テロを想定し、図-12 に示す $ROOM_3$ 中央の CS においてサリンを図-13 のスケジュールを用いて発生させ、 $ROOM_4$ 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。解析は、本研究で開発したマクロ・CFD 複合モデルと、比較のためにマクロモデルのみの解析と、CFD 解析のみの解析を行った。

図-14 に解析対象のマクロモデルの系統図と解析結果を、図-15 にマクロ・CFD 複合モデルの汚染質発生・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示す。

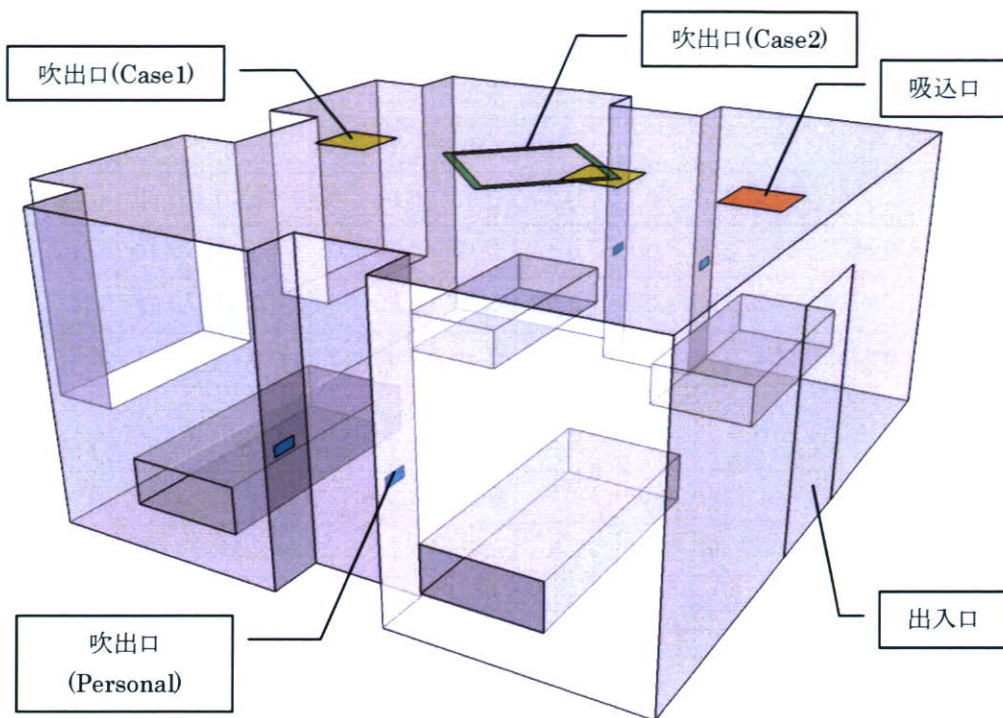


図-17 測定対象モデルルーム

C-4.2.3 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-16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。

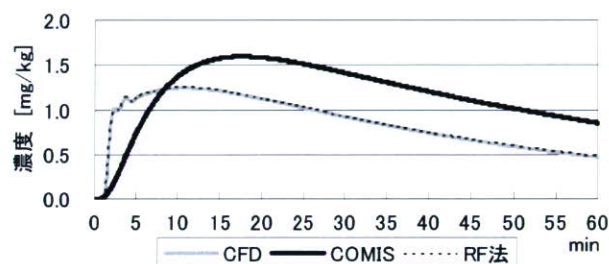


図-16 ROOM₄におけるサリン濃度推移

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集めた

C-5.1 測定概要

図-17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(設計値)は11回/hである。給気口を2ヶ所としたCASE1と1ヶ所としたCASE2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, 片側のみを対象とし, 主

表-2 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-3 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

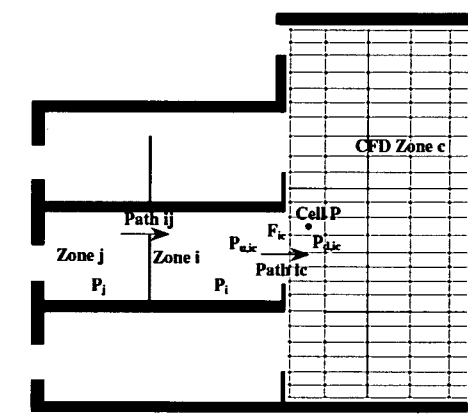
に患者が横になっているベッド周辺 (12ヶ所) を高さごと (4ヶ所) に42ヶ所の測定点を設定した。

C-5.2 測定結果

表-2,3 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。

D 考察

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



(Wang, L. and Q.Chen, 2007)

図-18 一般的な開発モデルの概念図

散性状をシミュレーションにて評価する場合,流れ場の影響を考慮した詳細な解析が必要であり,COMIS等のマクロモデルによるシミュレーションのみにて解析することは難しい。しかしながら,テロといったように突発的であり特定の条件が想定不可能な場合において,CFDを用いて多ケースの検証を行うことによる計算コストは非常に高い。そこで,計算コストの低いマクロモデルと,詳細な解析が可能なCFDを複合させ,両モデルの短所を補完した複合モデルを開発する事が,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おいて効果的で

あると考えられる。

一般的には図-18 に示すようなマクロモデルをベースとし、大空間といった空気流動により室内に大きな環境分布ができる空間のみ CFD 解析により解くモデルの開発による研究アプローチがなされる。このモデルでは、最小限の空間のみを CFD 解析することで建物全体の解析が可能となる。居住域における温熱快適性を含めた熱負荷シミュレーションや、避難経路における煙流動の検討を含めた火災シミュレーションといったように、建物内の特定箇所においてのみ流れ場を考慮した解析が必要な場合、このモデルを用いて計算負荷を軽減することの有用性は高い。しかしながら、特定箇所とはいえ、1 ケースの解析につき1回の CFD 解析が必要となるため、年間シミュレーションといった繰り返し計算が必要な場合においては計算コストの増加は避けられない。また、生物化学テロといった不確定箇所における危険物質散布が想定でき、流れ場の解析箇所を限定できない解析ケースにおいては、このモデルにより計算負荷を軽減することは難しい。

そこで、本研究では、建築分野の非定常伝熱計算にて汎用されているレスポンスファクタ法を、物質の移流解析に応用する手法である RF 濃度計算法を利用し、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 複合モデルにより建物内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、ケーススタディを通してその有用性を示すことができた。

本モデルを用いるにあたり考慮すべき計算負荷の増大要因は、応答係数算出のための CFD 解析が挙げられる。応答係数は流れ場と相関性を持ち、流れ場が変化する場合においては応答係数も変化する。この場合、流れ場と同回数に応答係数算出用 CFD 解析を行う必要があり、計算コストの増加は避けられない。しかしながら、本研究では流れ場の変化は空調の ON/OFF に起因する2ケースのみと設定することが可能なため、本モデルを導入し計算負荷の低減を図ることの有用性は高い。

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。

F 健康危険情報

なし。

G 研究発表

1 論文発表

- (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.
- (2)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
- (3)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・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・衛生工学論文集 No.131, (2008年1月)

2 学会発表

- (1)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.
- (2)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.

(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)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, 2006.09

(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 - 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・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。

建築物内における生化学物テロの対策に関する研究

分担研究者 柳 宇 国立保健医療科学院 建築衛生部 室長

研究要旨

建築物を対象としたバイオテロが起きた時の対応方法は、①その病原体をいち早く検知し、②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する。また、③事件後の空調システム再開のための対策を施すことである。

本研究では、国内外におけるバイオテロの対策の現状に関する研究成果を調査し、上記の①と③について詳細な検討を行い、以下のことが明らかになった。

(1) 国内外の研究

- 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、現状では、バイオテロの対策は、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 海外では、アメリカを中心に建築物を対象としたバイオテロの対策について国、大学、学会、民間など各方面から研究が行われている。アメリカ国防省の DARPA が 4 年間をかけて“免疫ビル技術”の研究を行い、基礎から応用までについて検討が行われたが、バイオテロ対策の前提は微生物のリアルタイムを検知することであると指摘している。

(2) 浮遊微生物のリアルタイムの測定

- ① 実環境における IMD を用いた測定結果は培地法計測器での測定結果との間に有意な相関関係 ($p < 0.01$) が認められたことから、室内浮遊微生物濃度のモニターとして使用できるが示唆された。
- ② IMD は数 CFU/L の濃度レベルの浮遊微生物 (*Wallemia sebi* 孢子) の測定が可能で、なおかつ非生物粒子 (ラテックス粒子) を生物粒子としてカウントしない (誤認知しない) ことから、バイオテロ対策のツールとしての可能性が示された。この場合においては、センサーを空調用エアフィルタの下流の給気中に設置する必要がある。
- ③ 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。

(3) 空調システムの消毒方法

- ① 空調システム内の微生物の消毒にオゾンを注目し、「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。
- ③ 本研究の結果を用いれば、現場で得られるオゾン濃度に対する必要殺菌時間の目安が得られる。

研究 1 建築物における生化学物テロ対策の現状に関する調査

A 研究目的

在来、微生物、化学物質に関わる室内環境の問題についての取り込みは主として汚染実態の調査およびその濃度の低減方法に関するものであった。しかし、9・11 アメリカ同時多発テロ事件後、微生物、化学物質に係る空気汚染の問題については、平常時のみならず、生化学物テロが起きた緊急時においてもその対策が求められている。

本研究では、まず、日本政府における生化学物テロの対策の現状を調査し、本研究の対象である建築物における生化学物テロの対策の位置付けを明確にする。また、アメリカにおける建築物を対象とした生化学物テロの対策（緊急時）、及び今までの微生物汚染の対策方法（平常時）を調査し、次年度の実験的な検討において必要な基礎資料を得る。

B 研究方法

B-1 日本政府における生化学物テロ対策の現状

厚生労働省のホームページで公開された情報のほか、健康危機管理研修会などの資料を中心とした調査を行った。

B-2 建築物を対象とした生化学物テロの対策－緊急時

アメリカから出版された関連図書^{[1]～[3]}等の他、下記機関のホームページを検索し、必要な関連情報を入手した。

- ① U.S. Army Corps of Engineers
- ② Centers for Disease Control and Prevention (CDC)
- ③ Department of Defense
- ④ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)
- ⑤ National Air Filtration Association (NAFA)
- ⑥ National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)
- ⑦ LBNL:Lawrence Berkeley National Laboratory
- ⑧ Environmental Protection Agency (EPA)
- ⑨ World Health Organization (WHO)

B-3 建築物を対象とした生化学物テロ対策－平常時

平常時の対策方法は基本的に病原体（微生物）と毒性化学物質汚染濃度を低減することである。化学物質を除去するのに、特殊なフィルタ（ケミカルフィルタ）が必要になり、そのようなフィルタが一般のオフィスビルなどで設置されていない。一方、浮遊微生物粒子を含めた粒子状物質の除去にエアフィルタが有効であることは知られているが、微生物粒子に対する除去性能の特性については必ずしも明確にされていない。ここでは、エアフィルタによる微生物粒子の除去について考察を行った。

C. 研究結果

C-1 日本政府における生物テロ対策の現状

9・11 米国同時多発テロ事件を受けて、日本政府が緊急にテロ対策の検討に入り、適時に情報公開を行って来ている。また、政府全体の危機管理においては内閣総理大臣がトップで、一般職定員483名（平成13年）との体制をとっている。

表-1-1 に厚生労働省のホームページで公開されている「国内の緊急テロ対策関係」の情報を示す（2006年3月現在）。厚生労働省が9・11 米国同時多発テロ事件発生後1ヶ月以内に、国内におけるテロ事件発生についての対応に関する情報を公開していることが分かる。また、9・11 事件直後に起きたアメリカの郵便物に炭疽菌の混入事件（2001年10月）を受けて、数回にわたって炭疽菌に関する必要な情報を公開している。その後、感染症（野兔病、ボツリヌス症、天然痘）の診断、治療、および対応について多くの情報を適時に公開している。

炭疽菌のほか、上記のボツリヌス症、天然痘などが生物テロに使用される可能性のある物質として懸念されている。世界保健機構（WHO）では、生物テロに使用される可能性の高い病原体として29例を挙げているが、なかでも、天然痘は特に危険性が高く、優先して対策を立てる必要があるものの一つとしている。日本政府では、平成16年5月14日に「天然痘対応指針（第5版）（厚生労働省健康局結核感染症課）」を公表し、その基本方針は、以下の状況設定と対応を行うことである。

レベル I（平常時）：生物テロ発生の漠然とした危惧はあるものの、国内における発生の蓋然性が具体的にはない状態。現在は、この状況と考えられる。

レベル II（蓋然性上昇時）：生物テロ発生の蓋然

表-1-1 国内の緊急テロ対策関係

掲載日	タイトル
2005/4/5	医療機関、衛生検査所、地方衛生研究所、保健所等における病原性微生物等の管理の強化について
2004/8/5	天然痘対策指針
2003/12/18	国内のテロ事件発生に係る対応について
2003/12/18	病原性微生物等の管理の強化について
2003/12/16	国内のテロ事件発生に係る対応について
2003/3/20	国内のテロ事件発生に係る対応について
2002/11/6	感染症の診断・治療ガイドライオンの追補改訂版の送付について(平成14年8月29日通知)
2002/10/31	国内のテロ事件発生に備えたテロ対策の再点検等について(平成14年10月29日科発第1029003号等通知)
2002/10/31	国内のテロ事件発生に備えたテロ対策の再点検等について(平成14年10月29日科発第1029003号-2, 3)
2002/6/3	感染症の診断・治療ガイドライオンの追補改訂版の送付について
2002/6/3	厚生科学審議会感染症分科会感染症部会 大規模感染症事前対応専門委員会報告書～生物テロに対する厚生労働省の対応について～
2002/1/11	炭疽菌等の汚染のおそれのある場合の対応について
2001/12/27	感染症の診断・治療ガイドラインの追補改訂版の送付について
2001/11/16	炭疽菌感染症に係る治療薬の健康保険制度上の取り扱いについて(平成13年11月16日保医発第271号通知)
2001/10/26	第2回緊急テロ対策本部会議終了後報告メモについて
2001/10/26	炭素が疑われる患者の診断のポイント
2001/10/19	福島県内郵便局で発見された不審な郵便物に対する厚生労働省の対応
2001/10/18	炭疽菌等の汚染のおそれのある郵便物等の取扱いについて(検査を含めた対応の流れ)(平成13年10月18日科発第467号等通知)
2001/10/18	炭疽に関する意見書(社団法人 日本感染症学会)について
2001/10/18	炭疽菌の検査法に関する講習会の開催について(平成13年10月17日通知)
2001/10/16	病原性微生物等の管理の強化について(平成13年10月15日科発第456号通知)
2001/10/15	生物兵器テロの可能性が高い感染症について
2001/10/15	「米国の同時多発テロ」における炭疽菌等の汚染のおそれのある封筒の取扱い方法について
2001/10/12	国内における生物テロ事件発生を想定した対応について(平成13年10月11日通知)
2001/10/9	「米国の同時多発テロ」を契機とする国内におけるテロ事件発生に関する対応について(平成13年10月8日科発第443号通知)
2001/10/5	「米国の同時多発テロ」を契機とする国内におけるテロ事件発生に関する対応について(平成13年10月4日科発第438号通知)

性が高いと判断されるに至った場合。

レベルⅢ（国内患者発生時）：国内において異常な感染症の発生動向を察知し、生物テロの発生が強く疑われる場合。

また、上記の各状況レベルに対してその対応も示されている。レベルⅠに対する対応は、通常の感染症対策の充実・強化、体制構築、医薬品の確保などである。レベルⅡに対する対応は、感染症発生動向の調査、特定職種に対する感染症予防措置、国民への十分な情報提供などである。レベルⅢに対する対応は、必要な医薬品の円滑な供給と配分、医療の提供、まん延の防止措置などである。

日本政府は2006年3月10日の閣議で、「感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律等の一部を改正する法律案（感染症法改正案）」を決定、国会に提出した。改正案の柱の一つは“生物テロや事故による感染症の発生・まん延を防止するための病原体等管理体制の確立”である。

以上の調査結果より、日本政府が9・11米国同時多発テロ事件を受けて、緊急に必要な対策を検討し、健康危機管理体制を構築すると同時に、適時に生化学物テロの対策に関する情報を公開していることが分かった。

C-2 建築物を対象とした生化学物テロの対策－緊急時

現代の殆ど全ての建築物に空調システムが備えられている。その空調システムは居住者に快適、清浄な空気を供給するためのものであるが、生化学物テロを企んでいるテロリストにとって、病原体や毒性化学物質などをばら撒く道具にもなりうる。

建築物を生化学物テロの対象とされた場合、病原体や毒性化学物質を図-1-1に2箇所、即ち外気取入口①と室内②に放出される可能性がある。外気取入れ口に病原体を放出された場合、空調機のエアフィルタを透過する病原体、または毒性化学物質が各室内に侵入する。室内に放出された場合、その病原体または化学物質が還気（RA）口、還気ダクトを介して再び空調機に入り、エアフィルタを透過した病原体はその空調システムが受け持つ各室に拡散する。粒径の大きい病原体は空調システムのダクトなどの各パーツに沈着したり、一部がエアフィルタによって除去されたりするが、ウィルスのような小さい粒子、とくにガス状の毒性化学物質に対して、一般オフィスビルなどで設置されている

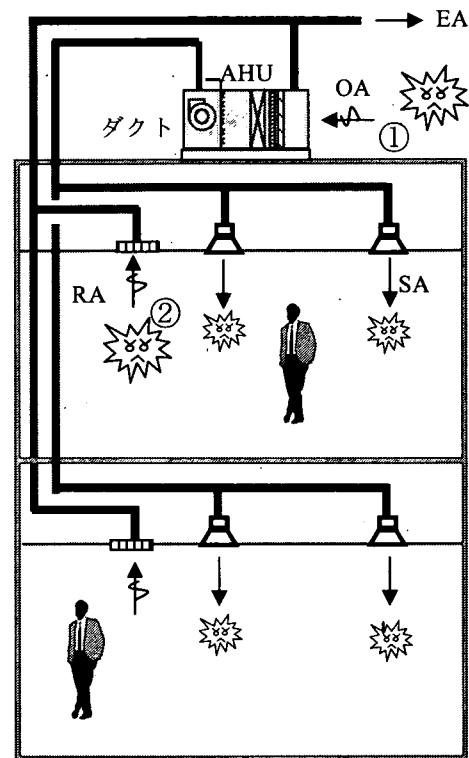


図-1-1 建築物における生化学物テロのイメージ

中性能エアフィルタによる捕集が殆ど期待できない。LBNLの研究報告では、生化学物テロを受けた場合の対策を以下のように推奨している⁽⁴⁾。

- ① 暴露者数を最小限にする：被暴露者を特定し、必要な処置を施す。
- ② 空調運転を停止する。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 外気による階段の加圧を行い、避難通路を確保する。
- ④ 被暴露者を隔離する。

C-3 建築物を対象とした生化学物テロの対策－平常時

平常の対策は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ある。気流計画については、分担研究報告書（分担研究者：加藤信介教授）を参照されたい。ここでは、主として、エアフィルタによる微生物粒子の除去のメカニズムとその現状について考察を行う。

(1) エアフィルタによる浮遊粒子除去のメカニズム

エアフィルタは主として慣性衝突、さえぎり、

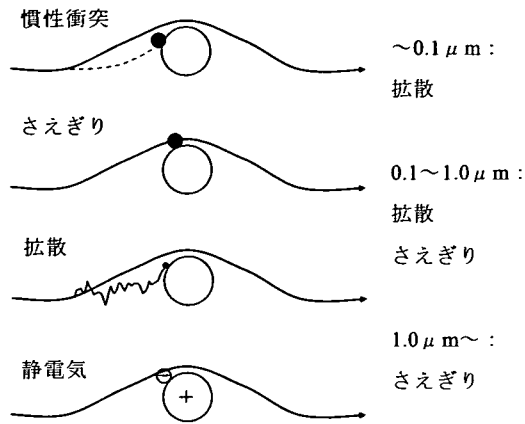


図-1-2 フィルタによる浮遊粒子捕集の機構

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。図-1-2 にその概要を示す。

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。例えば機械式のエアフィルタは図-1-2 に示す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。

(2) 浮遊微生物粒子に対するエアフィルタの除去性能

① 空中における微生物粒子の挙動

微生物はウイルス ($0.02 \sim 0.3 \mu\text{m}$)，細菌 ($0.5 \sim 10 \mu\text{m}$)，真菌 ($3 \sim 100 \mu\text{m}$) に大別される。空中での微生物粒子の挙動は，その粒子の密度のほか，大きさ（空気力学径）に深く関係する。例えば，黄色ブドウ球菌の大きさが約 $0.8 \mu\text{m}$ とされているが，それは単体（裸）の幾何径を指している。実際に，微生物粒子が単体で空中を浮遊することがないわけではないが，今までの共通認識として，多くの微生物が粒子に付着して空中を浮遊するとされている。従って，付着する粒子径によって，空中での微生物粒子（微生物+粒子）の挙動が大きく異なる。このことは筆者らが行った測定結果，即ち，フィルタの上流空中，表面，下流空中，またはアンダーセンサンプラの違う捕集ステージに同じ種類の *Cladosporium* などが検出されることよりも説明できる。また，例えば SARS ウィルスの大きさが $80 \sim 160\text{nm}$ と小さいが，保菌者の咳で吐き出されるものが，その SARS ウィルスの単体よりも，水滴を含めたウィルスのかたまりと考えられ，飛沫感染が主な感染源であること

もその根拠を裏付けている。飛沫の大きさに関して，Rao ら^[5] は被験者 5 人が咳をした際に放出された粒子の大きさを測定し， $0.6 \mu\text{m}$ 以下から $2.5 \mu\text{m}$ 以上の 6 段階の粒径において全て検出されたと報告している。

以上のように，微生物に対する生物学の見方と環境工学の見地が大きく異なっており，室内環境中の微生物の挙動についてまだ分からないことが多い。

② エアフィルタによる浮遊微生物粒子の除去

エアフィルタによる浮遊微生物の除去性能を予測するには，浮遊粒子の大きさ別に関するエアフィルタの捕集率を知る必要がある。日本では，エアフィルタの種類によって，その捕集率をテストする方法が異なる。JIS においては，高性能，超高性能フィルタは計数法，中性能フィルタは比色法，粗塵用フィルタは重量法によってその捕集率の試験法が定められている。従って，今まで高性能，超高性能フィルタによる粒径別捕集率に関するデータが多く発表されているが，中，低性能エアフィルタに関しては，その情報がない。筆者ら^[6] が，オフィスビルなどに多く使用されている中，低性能エアフィルタによる浮遊微生物粒子の捕集率を把握するために，オフィスビル A~D を対象に実証試験を行った。図-1-3 に中，低性能エアフィルタによる粒径別浮遊粒子の捕集率，図-1-4 に浮遊粒子に対する捕集率と浮遊微生物粒

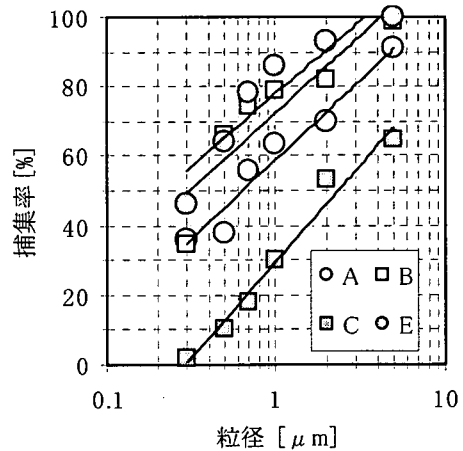


図-1-3 粒径別に対するエアフィルタの捕集率

子に対する捕集率の関係を示す。

浮遊黄色ブドウ球菌，浮遊総菌，浮遊真菌に対する捕集率はそれぞれ $1 \mu\text{m}$ ， $2 \mu\text{m}$ ， $5 \mu\text{m}$ 以上の浮遊粒子に対する捕集率とほぼ等しいことを見出

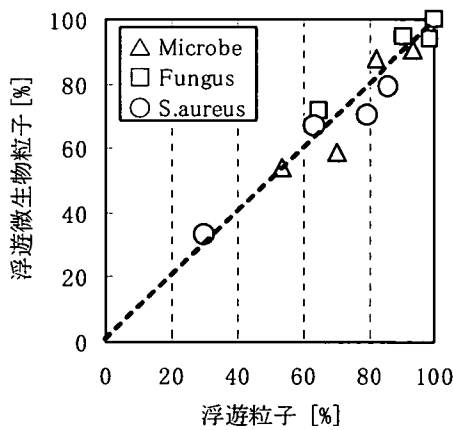


図-1-4 浮遊粒子と浮遊微生物粒子
に対する捕集率の関係

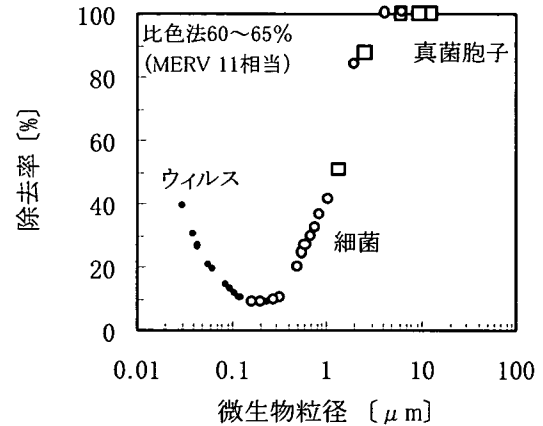


図-1-5 中性能フィルタによる微生物の除去率

した。筆者らの実験は微生物に関わる室内空気清浄度を設計、管理するために行ったものであり、各種の微生物というよりも、空中を浮遊する微生物を粒子状物質として扱っている。

各種の微生物粒子に対するエアフィルタの捕集性能については、アメリカからいくつかの研究成果が発表されている。表-1-2 に数種類の微生物に対するエアフィルタの捕集率を示す⁽⁷⁾。なお、表-1-2 に示す捕集率はフィルタメーカーから提示された捕集性能に基づいた予測値である。同じ状態のフィルタであっても図面風速によってその捕集率が異なることに注意を払う必要がある。

図-1-5 に中性能フィルタによるウイルス、細菌、真菌胞子の除去率の予測値を示す。フィルタの捕集率が最も低い $0.2\mu\text{m}$ 前後において、浮遊微生物の捕集率も低くなっている。

前述の通り、微生物単体で空中を浮遊することが稀であるため、エアロゾルとして見た微生物粒子はその単体の幾何径より大きくなっている。従って、図-1-5 を基に微生物の除去性能を予測する場合、細菌、真菌胞子が安全側（実際に空中を浮遊している微生物粒子が大きいため）、ウイルスが危険側（粒径が大きくなっても $1\mu\text{m}$ 以下の場合）になりうることに注意を要する。

D 考察

D-1 日本政府における生化学物テロ対策の現状

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、適時に十分な情報を円滑に国民に提供していることが分かった。危機管理体制として、政府全体（内閣総理大臣がトップ）、各

表-1-2 微生物粒子に対するフィルタの予測捕集率

	平均径 μm	MERV6	MERV8	MERV10	MERV13	MERV15	MERV16
炭疽菌	1.118	15.5	36.7	39.2	96.3	99.979	99.981
結核菌	0.637	7.4	18.1	19.5	78.6	98	98.1
天然痘	0.224	3.7	7.4	7.9	39.6	68	70.6
ボツリヌス毒素	2.24	34.6	69.9	76.3	99.986	100	100
インフルエンザ	0.098	6.2	11.2	12.0	46.229	71	76

注1: MERV: Minimum Efficiency Reporting Value

注2: ANSI/ASHRAE Standard 52.2-1999では、エアフィルタの捕集性能の試験法を計数法に1本化し、エアフィルタの捕集性能をMERV1~MERV20の20段に分類した。

都道府県行政機関、保健所のネットワークの構築に精力を入れている。しかし、例えば、「天然痘対応指針」に示されている各状況レベルの設定と対応からも分かるように、今までの生化学物テロに対する行政の対応は、主として病原体の管理、検査、及びその予防措置などを施すことである。言い換えれば、生化学物テロが行われる場所について必ずしも明確に想定していないのは現状である。従って、建築物を対象とした生化学物テロの対策に関する本研究成果は、生化学物テロ対策の行政対応において極めて必要である。

D-2 建築物を対象とした生化学物テロの対策－緊急時

調査結果からも分かるように、今までアメリカを中心とした建築物における生化学物テロの対策は生化学物の放出が分かったことを前提としている。実際の場合、即ち、建築物のどこで何を放出されたかが分からない場合においては、その対策が非常に難しい。この場合においては、現状では2つの方法が考えられる。

1つは病原体または毒性化学物質を検知できるセンサーを設置し、そのセンサーから急激な濃度上昇（化学物質または病原体）を検知し、素早く、空調を止めると同時に生化学物テロ発生の警報を関連部門に出す方法である。病原体の場合、在来の方法は、病原体を捕集して一定の温湿度条件で長時間培養するプロセスが必要になるため、緊急時の対応に適さないものとされている。最近では、アメリカの BioVigilant 社は、米国軍とホームランドセキュリティのために 0.3~7 μ m の粒径の浮遊細菌を検知する技術を開発したと報告されている。その測定メカニズムは在来の培養法と異なり、細菌より発光した蛍光を測定することによって細菌を間接に測定するものである。現段階では、その感度などを含めた実用性について検証が行われている。本研究においては、次年度その実用性に関する検証を行う予定である。

もう1つの方法は被暴者に対する臨床上的の検査といった医療行為を施し、早急に生化学物テロの原因究明を務めることである。しかし、下記のように、毒性化学物質と病原体の臨床上的の特徴がかなり異なるため、生物テロへの対応がまだ難しい。

毒性化学物の質暴露を受けた場合、被暴者は以下のひとつまたは複数の症状が見られる⁽⁴⁾。

- ・ 瞳孔収縮
- ・ 瞳孔膨張（一部の化学物質）
- ・ 眩暈
- ・ 鼻水
- ・ 呼吸困難
- ・ 吐き気、嘔吐
- ・ 視覚低下または失明

1995年東京で起きた地下鉄サリン事件は典型的な化学物テロであった。当日朝 8:30 頃咽喉痛、目の痛みを訴える患者（乗客）が見られた。8:40 最初の救急車の搬送が行われた。その時に二つ典型的な症状、すなわち、結膜の充血と縮腫が見られた。前者は刺激性ガスの暴露、後者は有機リン系中毒によるものと考えられたため、9:15 に硫酸アトロピン投与が開始した。また、警視庁が 11:00 定例記者会見で原因物質はサリンであることを発表した。

上記の事例からも分かるように、毒性化学物質であるため、その症状が早く現れたことと、現場担当者が化学知識を持っていることは早急に原因物質の特定につながった。しかし、微生物（病原体）の暴露を受けた場合、被暴者に症状が現れるまで、毒性化学物質よりかなり長い時間を要する。例えば、感染力の強い天然痘の暴露を受けた場合、発症するまで約2週間かかることがある⁽⁸⁾。

以上のように、現段階では、毒性化学物または病原体に対する感度のよいセンサーが開発され、実用化されることが期待されている一方、生化学物テロが発生直後の対応についてさらなる検討が必要である。

D-3 建築物を対象とした生物テロの対策－平常時

平常時の対策として、室内気流の適正な計画、空調システムの適正な維持管理などが重要であるほか、外気取入れ口の適正な設置が重要である。写真-1-1 は外気取入れ口を道路の横の地上に設置されている例である。この場合、テロリストが容易に毒性化学物または病原体を外気取入れ口に投入することができる。従って、外気取入れ口を屋上などの高いところに設置し、しかも関係者以外が立ち入りすることができないように施錠する必要がある。

近年、日本の多くのビルの空調が中央方式より各階方式、さらに、各階方式でもゾーンニングし



写真-1-1 空調の外気取入れ口不適切な設置例

て空調の細分化が進んでいる。この場合や、個別空調方式の場合などは、生化学物テロの対策の視点からリスク分散の役割にもなっている。

E 結論

本研究では、日本政府における生化学物テロの対策の現状、建築物を対象とした生化学物テロが起きた緊急時の対応方法、および平常時における生化学物テロの対策についての文献調査およびインターネットの検索を行った結果、以下の結論が得られた。

- [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、現状では生化学物テロの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生化学物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検証する必要がある。

- [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）。

参考文献

- [1] NIOSH, 2003. Guidance for Filtration and Air-Cleaning Systems to Protect Building Environments
- [2] NAFA, 2001. NAFA Guide to Air Filtration (Third edition).
- [3] Kowalski, W.J. 2002. Immune Building System Technology.
- [4] LBNL/PUB-51959, 2003. Protecting Buildings From a Biological or Chemical Attack: actions to take before or during a release.
- [5] Rao S. Papineni, Frank S. Rosenthal, 1997. The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. *J Aerosol Med.* 1997 Summer; 10(2):105-16
- [6] Yanagi U, Ikeda K. In Situ Tests about Removal Performance of Airborne Microbe Particules by an Air Filter. The 10rd International Conference on Indoor Air Quility and Climate; 2005; China. Pceeding of the 10rd International Conference on Indoor Air Quility and Climate. 3000-4.
- [7] Kowalski W. J. 2003. Immune-building technology and bioterrorism defense. *HPAC Engineering*, 57-62.
- [8] しのびよる病原体 感染症ファイル：竹内書店、2000.

研究 2 建築物における生化学物テロ対策の現状に関する調査

A 研究目的

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の使用を早く再開することに関する対策を施すことである。この一連の対応は、病原体などをリアルタイムで検知できることが前提となっている。微生物をリアルで検知できる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。

そこで、本年度ではアメリカで開発されたバイオセンサー技術を活用した IMD（Instantaneous Microbial Detection, 瞬間微生物検知器）（β版）を用い、①微生物粒子に対する感度の実験、②非生物粒子に対する応答特性の実験、及び③一般環境（6 病院の待合室、1 オフィスビル室内、1 執務室の空調給気）における培地法での測定結果と比較し、IMD の適応について検討を行った。

B 研究方法

B-1 IMD の測定原理

IMD は BioVigilant 社より開発された、 $0.5\ \mu\text{m}$ から $16\ \mu\text{m}$ 以上の 33 粒径範囲（ $0.5\ \mu\text{m}$ 間隔）における粒径別浮遊粒子と浮遊微生物粒子数を測定するものである。細菌、真菌のような微生物に特定波長の紫外線を照射すると、細胞の代謝物、即ち蛍光物質（蛍光を放射する全ての分子の総称、ニコチンジアミドアデニンネクレオチド NADH とリボフラビンなど）を放出することが知られている^[1]。IMD はこの原理を応用したものであり、蛍光を計測する検知部、Mie 散乱理論に基づく在来のパーティクルカウンター、微生物と非生物粒

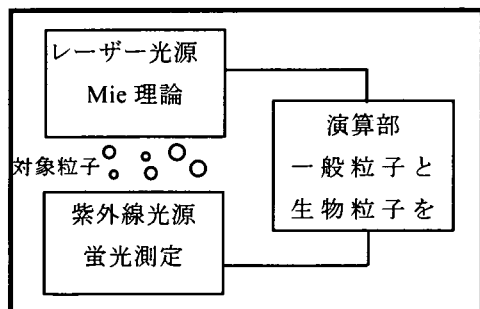


図-2-1 IMD の概要

子を区別する演算部から構成されている。（図-2-1）

B-2 微生物粒子に対する感度の試験

特定できる微生物粒子が放出された場合における IMD の応答特性（感度）を確認するために検証試験を行った。

（1）試験室

試験に用いたのは $3\text{m} \times 3\text{m} \times 2.2\text{m}$ （容積約 20m^3 ）、HEPA フィルタ（High Efficiency Particulate Air Filter, 高性能エアフィルタ）が備えられている試験室である。

（2）試験菌とその発生方法

試験にトレース菌としてカビの 1 種である *Wallemia sebi* の胞子を用いた。予め培養した *W. sebi* 胞子を、超音波発生器にて発生させ、同時に大気基準圧 0.25kgf/cm^2 の加圧空気計 25L（5L/分 × 5 分）を試験室内に送り込んだ。*W. sebi* 胞子を送り込む前に試験室内をクリーンアップ運転を行った。試験室内の胞子濃度が均一になるように攪拌ファンで攪拌を行った。なお、*W. sebi* の発生は 5 分とした。

（3）測定方法

カビ胞子放出 10 分前から放出終了 45 分後の間において、IMD を用いた 1 分間隔の連続測定を行った。また、*W. sebi* 胞子を放出終了 3 分後、33 分後においてゼラチンフィルタを用いたフィルタ法での測定を行った。なお、上記の実験を 3 回繰り返し行った。

1 回目は胞子を送り込んだ後、何にもせずに測定を行った。2、3 回はカビ胞子発生後試験室内に空気清浄機 30 分間の運転を行い、濃度の低下をはかった状態で行った。なお、空気清浄機運転の有無による試験室内浮遊微生物濃度の差に関しては別途の研究であるため、ここではその詳細を省略する。

B-3 非生物粒子に対する IMD の応答特性

非生物粒子に対する IMD の応答特性を把握するために図-2-2 と写真-2-1 に示す計測システムを用いた。

標準粒子（ラテックス粒子、中位径 $0.835\ \mu\text{m}$ ）をネブライザー法の発生装置（PG-102LB, 柴田科学製）から発生し、その粒子をチューブ介して円

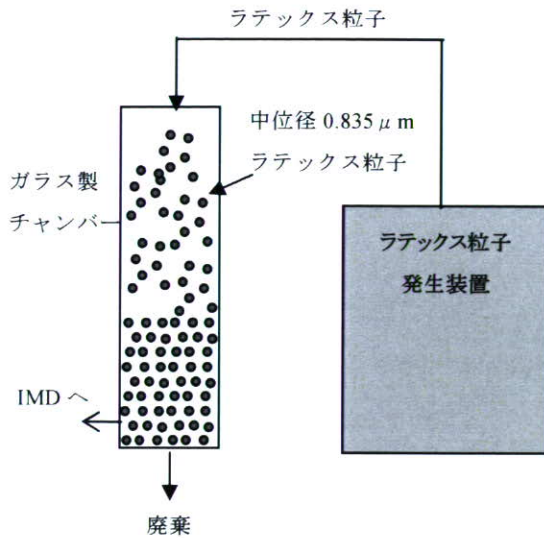


図-2-2 計測システムの概要



図-2-3 標準蛍光粒子発生装置

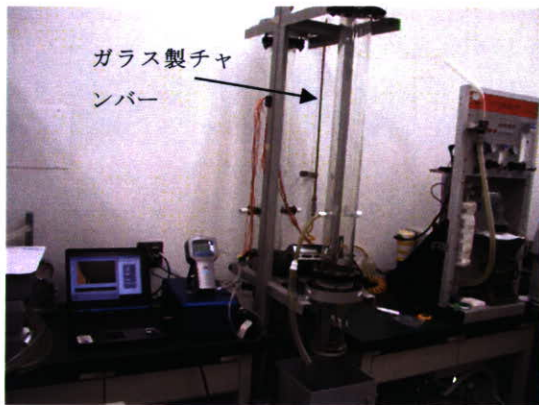


写真-2-1 測定風景

柱型のガラスチャンバの上部から導入した。チャンバ内のラテックス粒子が整流されながら下部の出口より排出される。また、チャンバの下部に設けられている測定口から IMD の測定チューブにつなぎ、ラテックス粒子発生前と発生中の浮遊粒子と浮遊微生物粒子濃度の連続測定を行った。

B-4 蛍光粒子に対する IMD の応答特性試験

本研究では、蛍光粒子に対する IMD の応答特性を把握するために国立保健医療科学院建築衛生部の CR (クリーンルーム) を用いて行った。蛍光粒子 50mg をガラス製チャンバ内に設置し、加圧空気より蛍光粒子をチューブを介してマネキンの口から放出した (図-2-3)。マネキンの口での風速を 10m/s に設定し、4.3m 離れている箇所に IMD

を設置し連続測定を行った。

B-5 病院環境における IMD の検証

測定対象病院の概要を表-2-1、測定対象の待合室の空調設備概要を表-2-2 に示す。

各測定対象室において、10:00~16:00 の間に MG サンプラー (MATTSON-GARVIN 社製) を用いた浮遊細菌の連続測定、IMD を用いた 1 分間隔の連続測定を行った。

MG サンプラーに使用する培地を SCD (Soybean Casein Digest, ソイビーンカゼインダイジェスト) とし、その培養条件を 32°C、2 日間とした。

B-6 オフィス環境における IMD の検証

単一ダクト空調方式を有する都内にあるオフィスの 1 室を対象に、就業時間中の 9:30~17:30 において IMD を用いた 1 分間隔の連続測定を行った。また、IMD の測定期間中に培地法の MG サンプラーを用いた連続測定も行った。

MG サンプラーに使用する培地を SCD とし、その培養条件を 32°C、2 日間とした。

B-7 空調の給気中における IMD の連続測定

2007 年 1 月 10~16 日の間において、図-2-4 に示す空調システムを有する執務室の空調給気中の浮遊粒子と浮遊微生物粒子濃度を、IMD を用いた 1 分間隔の連続測定を行った。なお、空調機に使用されているエアフィルタは日本の一般オフィスビルなどで最も多く用いられるものである。

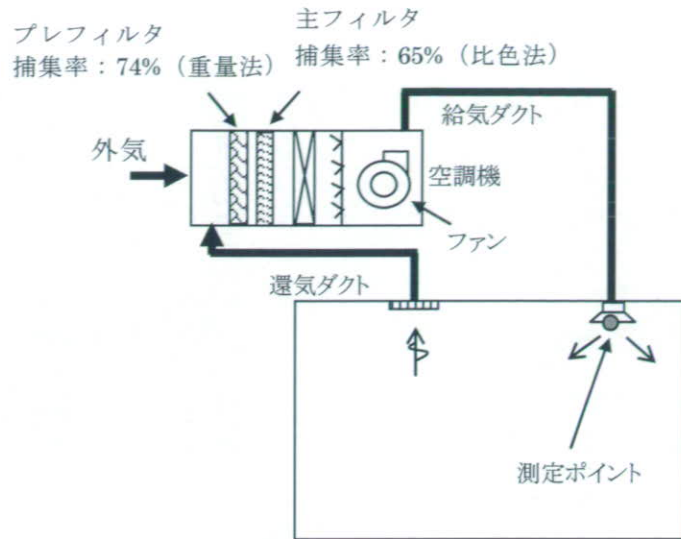


図-2-4 測定対象執務室の概要

表-2-1 対象病院の概要

病院名	所在地	延べ床面積[m ²]	一般病床数
A	港区	28,549	535
C	和光市	24,426	350
E	青梅市	3,732	120
F	日立市	58,196	563
G	大阪市	30,288	487
I	守口市	29,123	359

表-2-2 対象待合室の空調設備概要

病院名	空調方式 ¹⁾	エアフィルタ捕集率 ²⁾	
		前段	後段
A	AHU+ダクト	70%	なし
C	FCU		なし
E	FCU		なし
F	AHU+ダクト+FCU	なし	90%
G	AHU		[-]
I	AHU+ダクト+FCU	70%	90%

1) AHU:エアハンドリングユニット, OAHU:外調機, FCU:ファンコイルユニット

2) 前段:重量法, 後段:比色法

C 研究結果

C-1 生物粒子に対する IMD の応答特性

図 2-5～図 2-7 に IMD とゼラチンフィルタの測定結果を示す。*W.sebi* 胞子の発生時間帯を網掛けで示している。IMD の測定結果においては、ゼラチンフィルタ法と同程度の値 (実験 1 の胞子放出

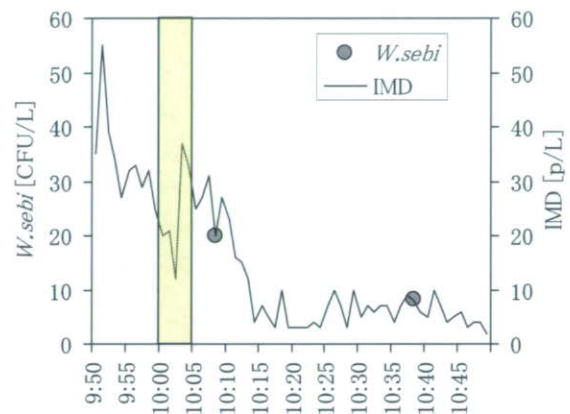


図-2-5 実験 1 の結果

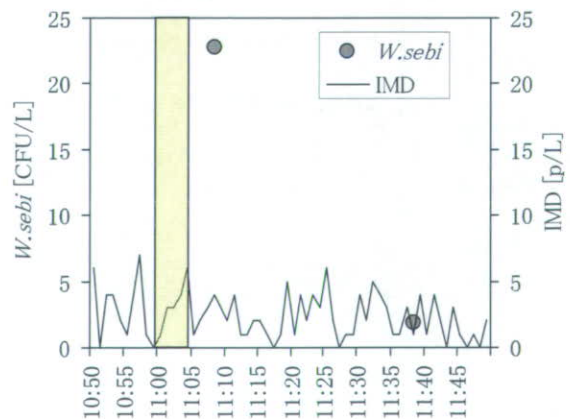


図-2-6 実験 2 の結果

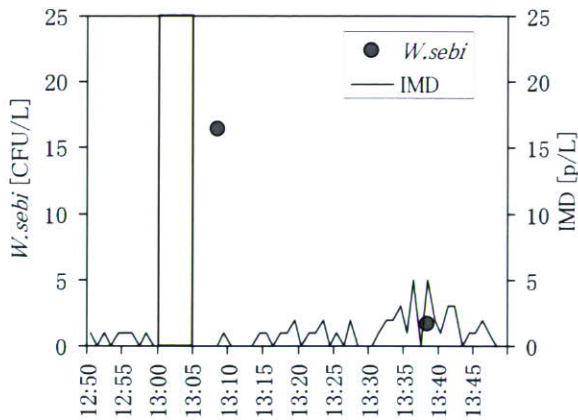


図-2-7 実験 3 の結果

3分後と33分後、実験2と3の胞子放出33分後)を示す一方、異なる値を示すものもあった(実験2と3の胞子放出3分後)。

C-2 非生物粒子に対する IMD の応答特性

図-2-8にIMDの測定結果から求めた0.5-1 μ m, 1-2 μ m, 2-5 μ m, 5 μ m-の粒径別濃度の経時変化を示す。ラテックス粒子の発生に伴い5 μ m以下の粒径別濃度の上昇が見られた。ラテックス粒子の中位径0.835 μ mの入っている粒径範囲の濃度が最も高く、IMDの分粒特性が確認された。一方、生物粒子のカウント数は0のままで推移していた。一例として写真-2にラテックス粒子発生2分後のPC画面を示す。棒グラフの横軸は粒径、縦軸はカウント数である。非生物粒子は黄色い棒、生物粒子は赤い棒で表示することになっているが、写真-2-2に示している通り、赤い棒の表示はなかった。

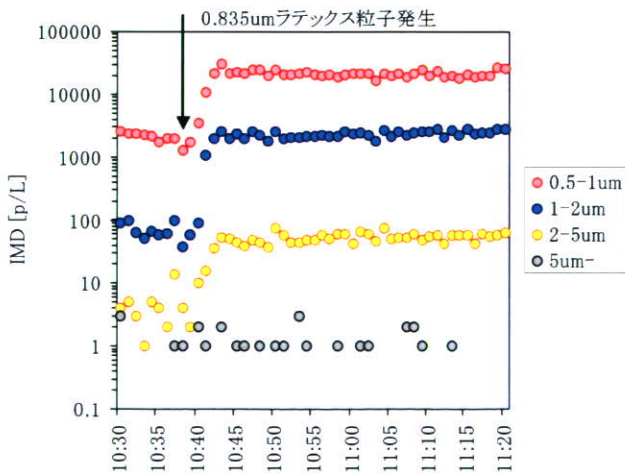


図-2-8 IMD の測定結果 (非生物粒子)

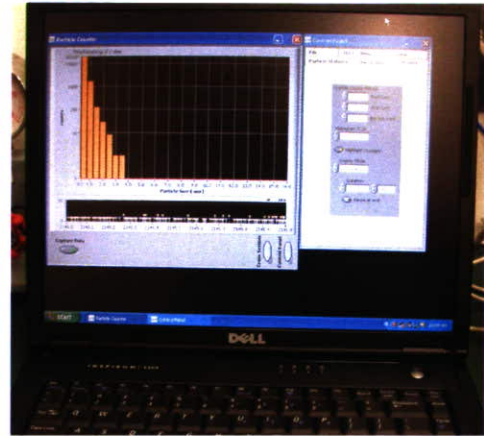


写真-2-2 ラテックス粒子放出2分後のPC画面

以上の結果より、IMDはラテックス粒子を生物粒子としてカウントしていないことが確認された。

C-3 蛍光粒子に対する IMD の応答特性

図-2-9にIMDによる蛍光粒子発生前後の粒度分布を示す。なお、ここで示しているのは蛍光粒子の測定結果である。標準粒子の粒径範囲3~8 μ mにおいてIMDが応答していることが分かった。また、8 μ m以上の大きい粒子も約半分が検出されたが、これは発生した粒子は単体のもののほか、いくつかの粒子が付着して一つの大きい粒子になっていると思われる。

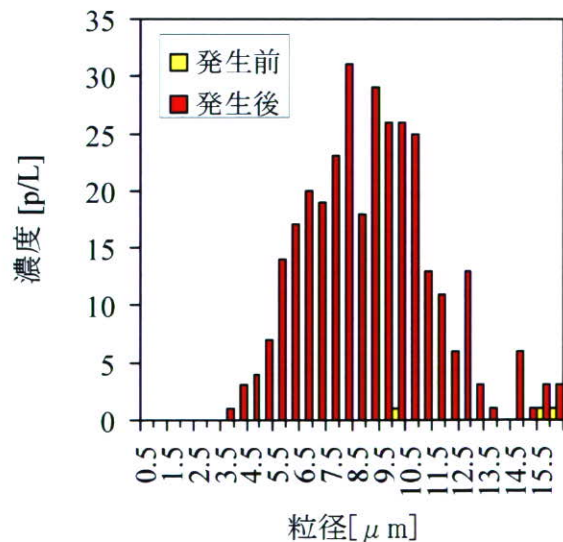


図-2-9 蛍光粒子発生前後の粒度分布