

C-4 病院環境における IMD の検証結果

(1) 浮遊微生物濃度の経時変化

図-2-10 に各病院の待合室内における浮遊細菌濃度 (MG サンプラー) と浮遊微生物粒子濃度の測定結果 (IMD) を示す。MG サンプラーの結果は 5 分間隔で計数したものである。また。MG

サンプラーの結果と比較するために、IMD での測定結果から各 5 分間の平均値を求めた。

図-2-10 に示しているように総じて両計測器から得られた経時変化のパターンは同様であり、G 病院を除いた他の病院では両者間に有意な相関関係が認められた ( $p < 0.01$ )。

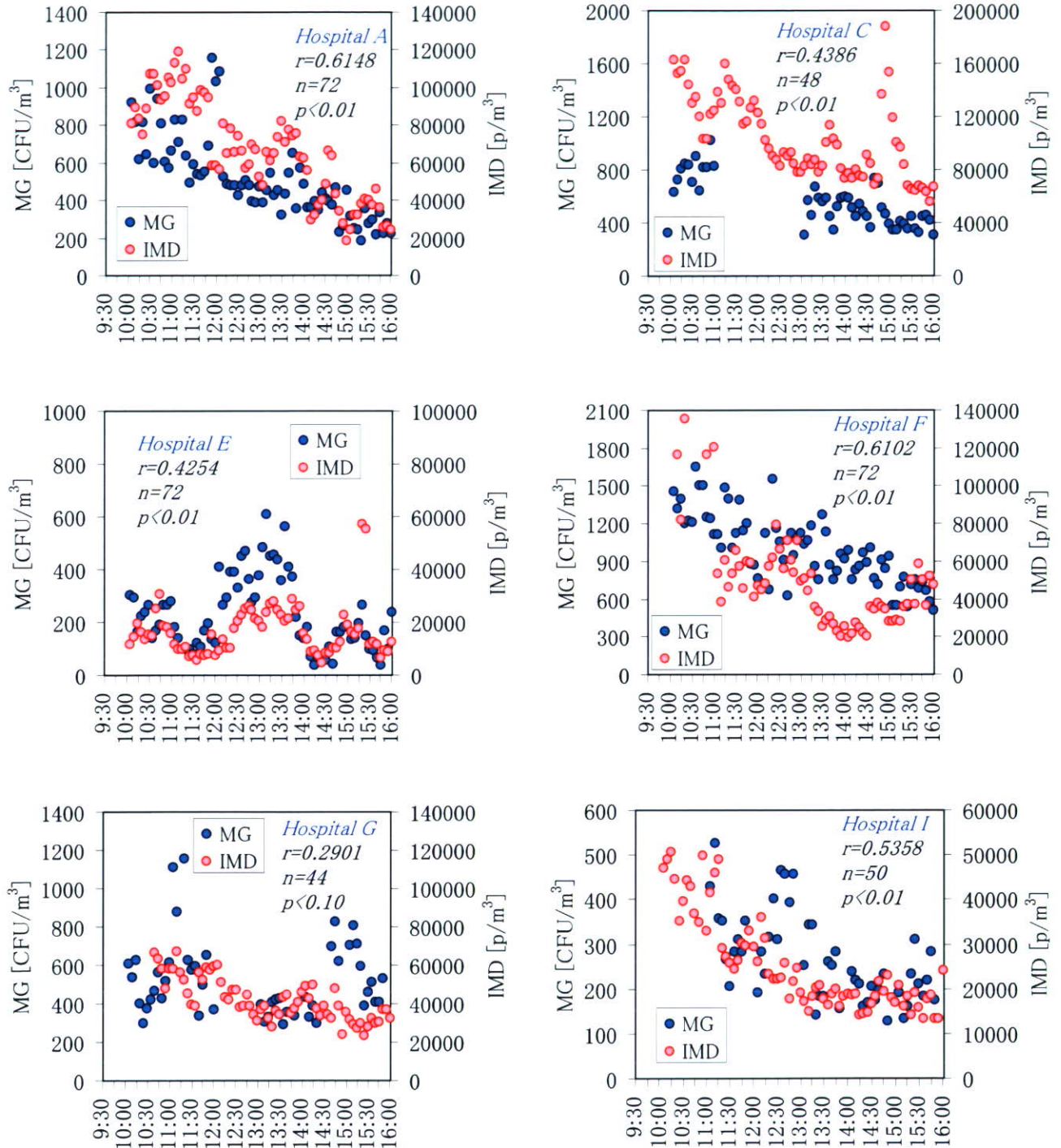


図-2-10 各病院の待合室における浮遊細菌濃度と微生物数の経時変化

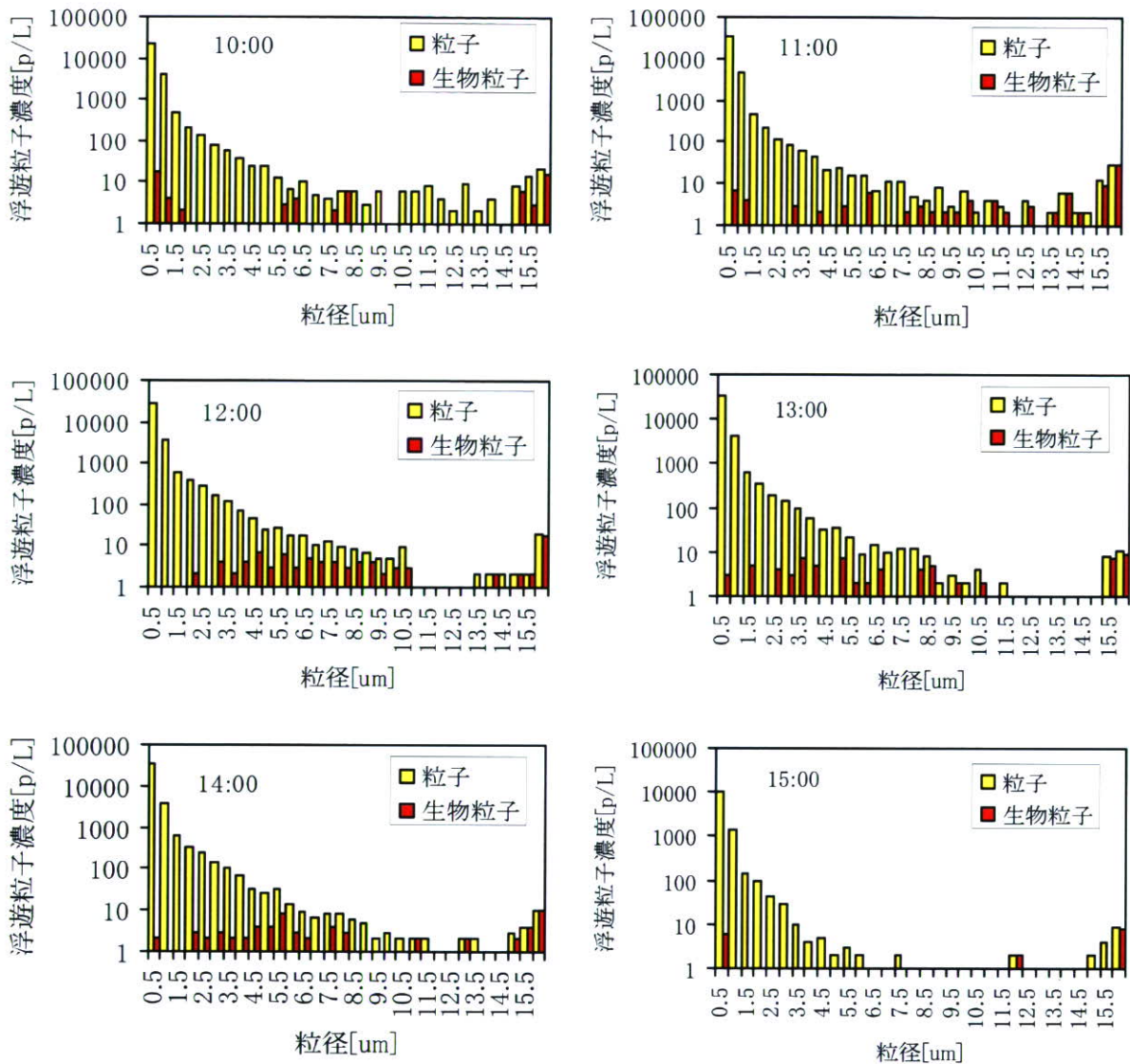


図-2-11 A病院における浮遊粒子と浮遊微生物粒子の粒度分布

(2) 浮遊粒子の粒度分布

一例として、A病院における10:00～15:00の毎正時の浮遊粒子と浮遊微生物粒子の粒度分布を図-2-11に示す。浮遊細菌濃度の比較的高い午前中（図-2-10参照）では各粒径範囲の粒子が検出されたのに対して、濃度の比較的低い午後、とくに15:00では大きい粒子の濃度が低くなった。また、10  $\mu\text{m}$ 以上の大きい粒子の殆どは微生物粒子であることが図-2-11からも読み取れる。

(3) 浮遊微生物粒子との浮遊粒子の関係

図-2-12に各病院の測定結果から求めた浮遊微生物粒子と浮遊粒子の粒径別濃度の相関係数を示す。全体的に粒径が大きいほど相関係数は高くなる。1  $\mu\text{m}$ 以上の粒子については、殆ど全てにお

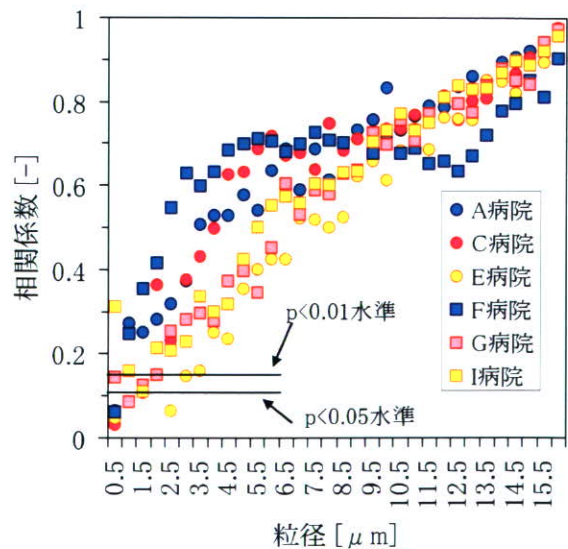


図-2-12 浮遊微生物粒子と浮遊粒子の相関係数

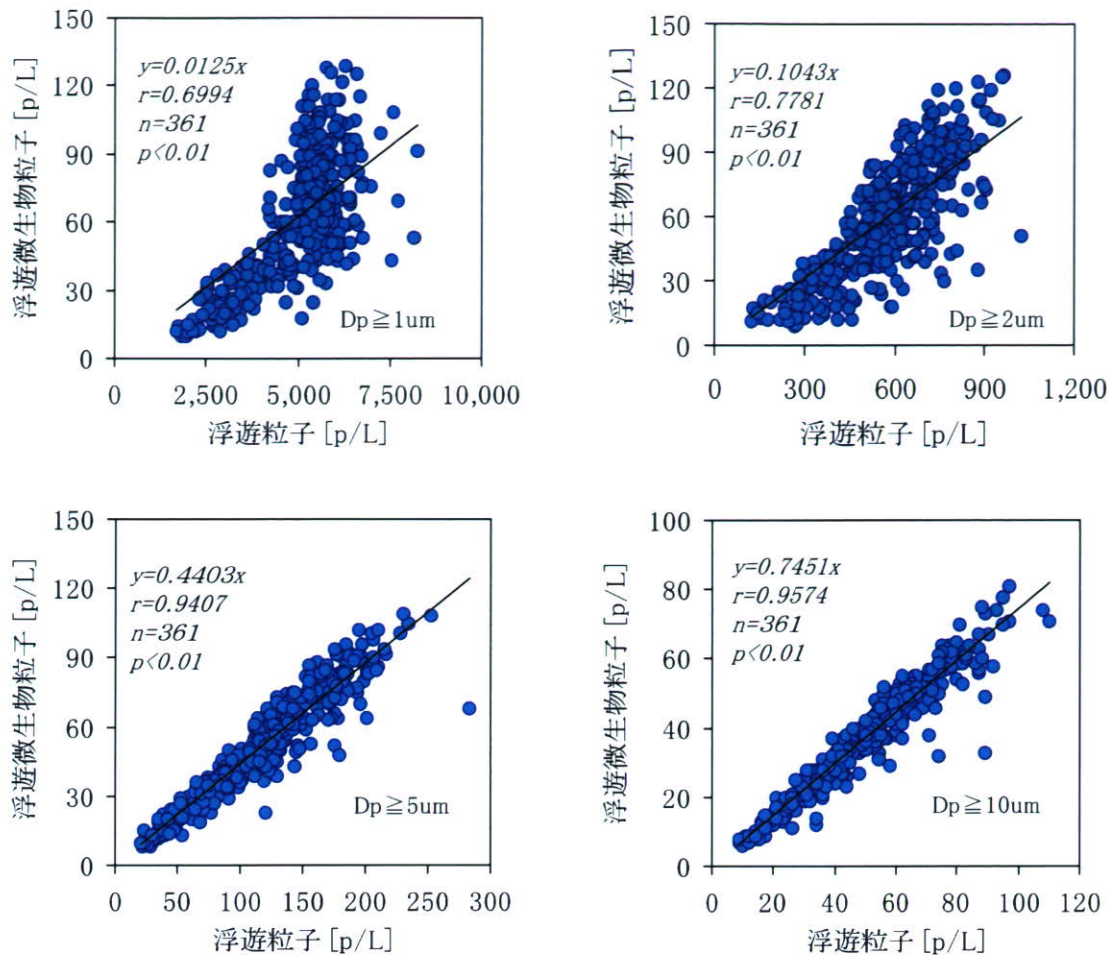


図-2-13 浮遊粒子と浮遊微生物粒子の関係

いて両者間に有意な相関関係が認められた ( $p<0.01$ )。

また、一例として A 病院における  $1\mu\text{m}$  以上、 $2\mu\text{m}$  以上、 $5\mu\text{m}$  以上、及び  $10\mu\text{m}$  以上の浮遊粒子濃度と微生物粒子濃度の関係を図-2-13に示す。何れにおいても両者間に有意な相関関係が認められた ( $p<0.01$ )。また、 $1\mu\text{m}$  以上、 $2\mu\text{m}$  以上、 $5\mu\text{m}$  以上、及び  $10\mu\text{m}$  以上の浮遊粒子に占める微生物粒子の割合がそれぞれ 1%、10%、44%、75% であり、粒径が大きいほど、微生物粒子の占める割合は高くなることが分かった。

C-5 オフィス環境における IMD の適応に関する 検証

(1) 浮遊細菌濃度の経時変化

図-2-14 に IMD と MG サンプラーでの測定結果を示す。MG サンプラーの結果は、5 分間間隔で計数したものである。また、MG サンプラーの結果と比較するために、IMD での測定結果から各 5 分間の平均値を

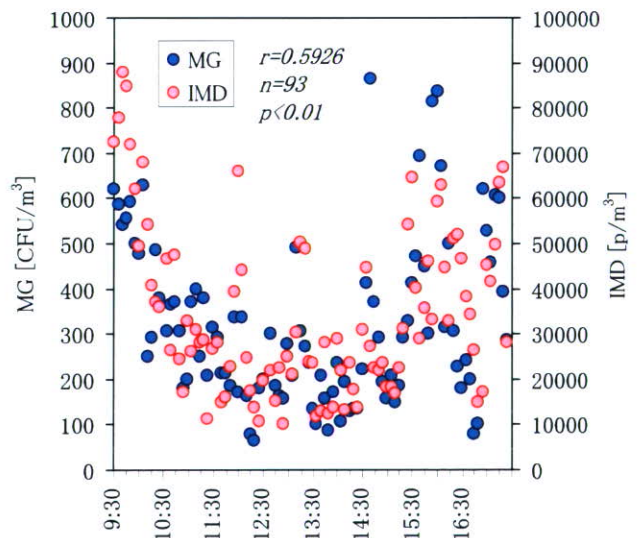


図-2-14 オフィス室内浮遊細菌濃度と微生物数の経時変化

求めた。図-2-14 に示しているように総じて両計測器から得られた経時変化のパターンは同様であっ

た。即ち、IMDの結果はMGサンプラーの濃度と同じように経時的に上下する。また、MGサンプラーに比べ、IMDは約100倍の値を示した。

(2) 浮遊微生物粒子と浮遊粒子の関係

図-2-15にIMDの測定結果から求めた各粒径範囲における浮遊粒子濃度と浮遊微生物粒子濃度の相関係数を示す。2μm以上になると、両者間の相関係数が次第に大きくなり、5μm以上になると両者間に0.70以上の強い相関関係が示された。

図-2-16に1μm上、2μm以上、5μm以上、及び10μm以上の浮遊粒子濃度と微生物粒子濃度の関係を示す。両者間に有意な相関関係が認められ、1μm以上、2μm以上、5μm以上、10μm以上の浮遊粒子に占める微生物粒子の割合がそれぞれ3%、14%、45%、73%であり、前記の病院での測定結果と同様に粒径の大きいほど、微生物粒子の占め

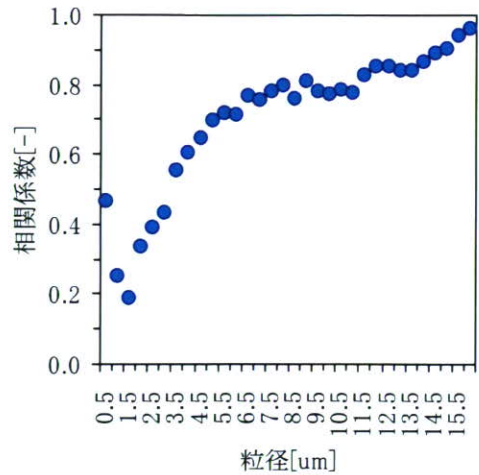


図-2-15 粒径別粒子と微生物粒子の相関係数

る割合が高くなることが明らかになった。

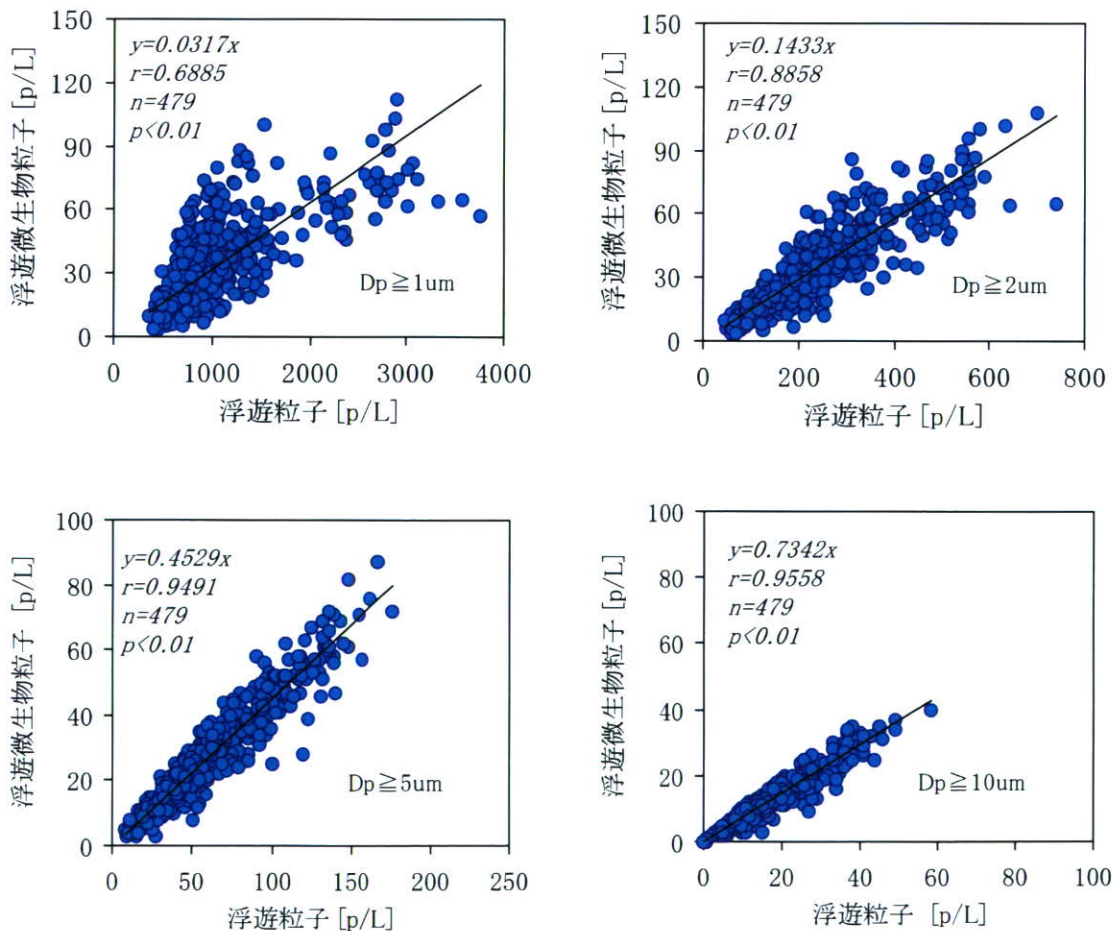


図-2-16 浮遊粒子と浮遊微生物粒子の関係

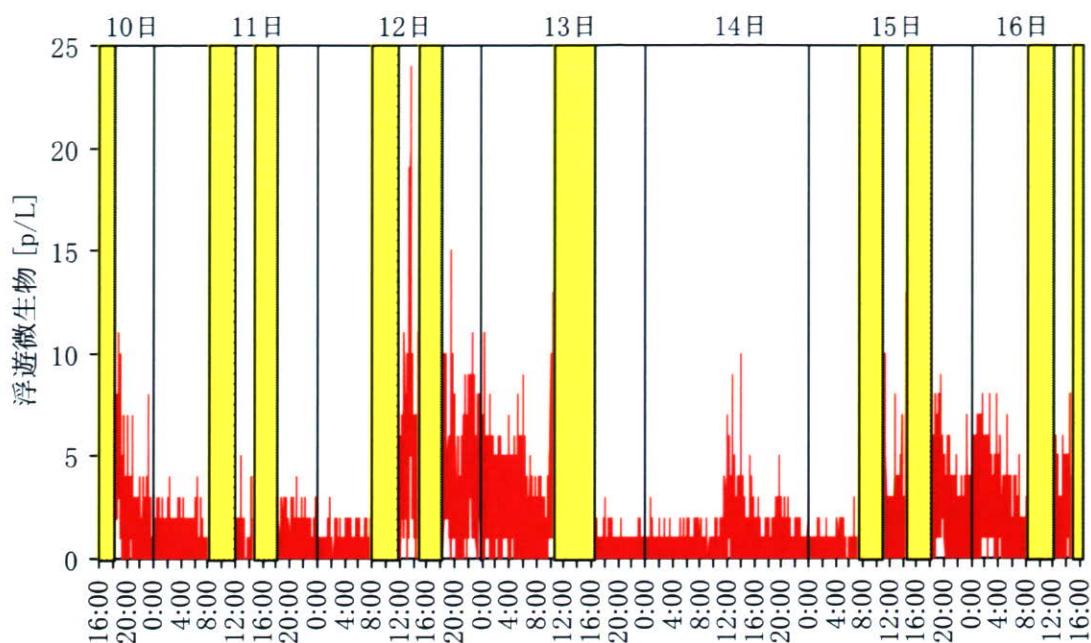


図-2-17 給気中浮遊微生物粒子濃度の連続測定結果

#### C-6 執務室給気濃度の連続測定結果

図-2-17 に執務室空調給気中の浮遊微生物粒子濃度の連続測定結果を示す。空調運転時間帯を網掛けで示している。

15日の午前では空調機の点検口を開閉するなどの乱し行為を行った結果、給気中の濃度の上昇が見られたが、全体的に空調運転時の給気中浮遊微生物粒子濃度が高くて20p/L程度であった。

#### D 考察

##### D-1 微生物粒子・非生物粒子・蛍光粒子に対する応答特性

IMDの測定結果では、試験室(クリーンルーム)内に *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下を全て正確に測定できないものの、ほぼゼラチンフィルタを用いた培地法と同じオーダーの濃度が得られ、その濃度は20p/L以下であった。一方、非生物粒子であるラテックス粒子に対して、IMDはそれを生物粒子としてカウントすることはなく、蛍光粒子に対して粒度分布を含めて適当に応答している。以上の結果から、生物系粒子のバックグラウンド濃度の低い環境への適応が可能であることが示唆された。

##### D-2 一般環境におけるIMDの適応について

6病院的待合室及び1オフィスビルにおける

IMDの測定結果は、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でき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<sup>12)</sup>と整合する。

以上の結果から、室内浮遊微生物濃度のモニターとして使用できることが示唆された。

##### D-3 IMDの適応について

室内浮遊微生物粒子濃度をリアルタイムで計測するには、以下に示す性能を有する必要があると考えられる。

- ① 低濃度の浮遊微生物粒子の測定が可能であること。
- ② 非生物粒子に対して、生物粒子としてカウントしないこと。
- ③ 室内浮遊微生物濃度とその変動をリアルタイムで測定できること。

上記の①と②については試験室およびチャンバ

試験の結果から IMD の可能性が示唆された。また、上記の③については、実環境における検証を行った結果、IMD の測定値は培地法での結果とほぼ比例していることが分かった。即ち、室内空中微生物濃度のモニタリングという意味で IMD は使用可能であることが分かった。

一方、バイオテロ対策のツールとして用いる場合においては、低濃度での正確な検知が必要となる。今回の測定対象である病院の待合室やオフィスなどの室内環境においては、バックグラウンド濃度は数百 p/L であり、1L 当たり数個の生物粒子の上昇を正確に検知することが難しいと思われる。

しかし、中性能エアフィルタを備えられている空調の給気中の濃度が高くても 20p/L であり、このレベルでは IMD での検知が可能であることが試験室を用いた実験の結果より確認された。

## E 結論

IMD 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結果、以下のことがらが明らかになった。

### 研究 3 空調システムにおけるオゾンの殺菌効果とその評価

#### A 研究目的

本年度では今までの研究成果を踏まえて、以下の検討を行った。

- ① IMD に対する更なるの検証：標準蛍光粒子に対する IMD の応答特性の把握。
- ② 事件後空調再開のための消毒方法の検討。

#### B 研究方法

##### B-1 気中オゾンによる殺菌に関する既往の研究

一般的な殺菌方法には、紫外線照射、ホルムアルデヒド (HCHO) とオゾンガス (O<sub>3</sub>) による殺菌などの方法がある。紫外線による殺菌はそれが照射していない箇所に対して効果がないため、空調システム内においてはフィルタ、コイルフィンなどの形状の特性からその適用が難しいと考えられる。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、殺菌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。オゾンにおいて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特徴がある。なお、殺菌とは文字通り微生物を殺すことで、微生物の生活力を失わせることである。また、場合により、殺カビ・殺ウィルス・殺芽胞などの語も用いられる<sup>1)</sup>。

オゾンはその強い酸化力、殺菌力から上・下水道水処理などに利用されて来ており、その殺菌効果に関しても多くの成果が発表されている。また、オゾンは気相中に比べて液相中の方が殺菌作用が強いことが知られている。それは、液相中では、オゾンの分解の際により酸化力の強い活性酸素 (O) やラジカル (OH) が生成されるためである。一方、気相中のオゾンによる殺菌のメカニズムが次のように考えられている。オゾンガスが微生物に対してマルチポイントで攻撃によって微生物の膜タンパク質を酸化させ、細胞膜破壊が起こるとともにオゾンが膜を浸透する。一方、細胞内からは細胞質成分が漏出し、タンパク質の酸化的変性や DNA の酸化的切断が起こる。これらの細胞の総合的な機能破壊によって微生物が死滅することになる<sup>2)</sup>。

気相中のオゾンによる殺菌効果については、山崎らがオゾン発生灯を組み込んだ実験装置で実験

を行い、枯草菌、大腸菌に対してオゾン発生 10 分後 (オゾン濃度：約 30ppm) と 20 分後 (オゾン濃度約 40ppm) の殺菌効果を確認している<sup>3)</sup>。また、日本医療・環境オゾン研究会では、2004 年度までに公表された 30 文献 696 のデータ (気相中) をオゾン濃度別、対象菌種別、温湿度別のデータを同じ図上にプロットした結果、微生物に対する殺菌効果と濃度・時間との間に明確な関係を見出せないとしている<sup>4)</sup>。オゾンによる殺菌性能は、菌種、暴露時間、温湿度条件、担体などの要因に影響されることがある。上記の 696 データは、ある特定の温度、湿度、濃度、暴露時間の条件下で得られたものであるため、互いの比較が難しく、汎用性に乏しいものであると考えられる。

そこで、本研究では、空調システム内微生物汚染の対策を確立することを目的とし、まず、気相中のオゾンの殺菌効果に関する基礎的な実験を行い、オゾンの殺菌性能に関する汎用性のある指標、とりわけ「暴露強度 (= 暴露時間 × 暴露濃度)」を提案し、それについて検討を行った。次に、現場でのオゾン殺菌を用いる場合その殺菌効果に及ぼす担体、空気湿度の影響について実験的な検討を行った。なお、本研究で提案する「暴露強度」を応用すれば、オゾンによる殺菌を施す場合、その場で得られる任意なオゾン濃度の条件での殺菌時間の目安を得ることが可能になる。

##### B-2 オゾンによる殺菌の試験

###### B-2-1 培地上の微生物の殺菌性能

この基礎実験はオゾンの濃度、暴露時間などによる微生物の殺菌性能を定量するために行った。

###### (1) 試験菌

本実験では、細菌にグラム陰性の大腸菌とグラム陽性の黄色ブドウ球菌、カビに一般環境中に最も検出頻度の高いクロカビ、アオカビ、コウジカビを用いた。なお、試験に使用した菌株を以下に示す。

- ① 黄色ブドウ球菌  
*Staphylococcus aureus*, NBRC 12732
- ② 大腸菌  
*Escherichia coli*, NBRC 3972
- ③ クロカビ  
*Cladosporium cladosporioides*, NBRC6348
- ④ アオカビ  
*Penicillium pinophilum*, NBRC 6345

⑤ コウジカビ

*Aspergillus niger*, NBRC 6341

細菌は、Tryptic Soy Agar (Difco) にて、35℃で24時間培養し、カビは、ポテトデキストロース寒天培地(日水)にて、27℃で1週間(③と④は2週間)培養した後、細菌はイオン交換水、真菌は0.005%エーロゾルOTに懸濁し、菌数(真菌は孢子数)を調整した。

(2) 実験方法

測定システムは図-3-1と写真-3-1に示す通り、国立保健医療科学院建築衛生部に設置されている2,150(W)×1,900(D)×2,200(H)の実験室(恒温恒湿のクリーンルーム)、実験室内に設置されている270(W)×270(D)×300(H)のガラス製チャンバ、オゾン発生器(MODEL OES-10A, Dylec製)、オゾンモニター(MODEL1200, Dylec製)、温湿度自動記録計(MODEL RS-11, Escop製)から構成される。実験は、室内温度25℃、相対湿度50%の条件で行った(1例として図-3-2に実験中の温湿度を示す)。

クリーンベンチ内に設置されているスパイラルプレーター(MODEL EDDY JET, GSIクリオス製)で調整した菌液50μLを塗布した培地をガラス製チャンバ内に設置した後、実験に用いた。実験終了後、一旦ガラス製チャンバをドラフトチャンバに移し、蓋を開けチャンバ内のオゾン濃度が零



写真-3-1 実験の風景

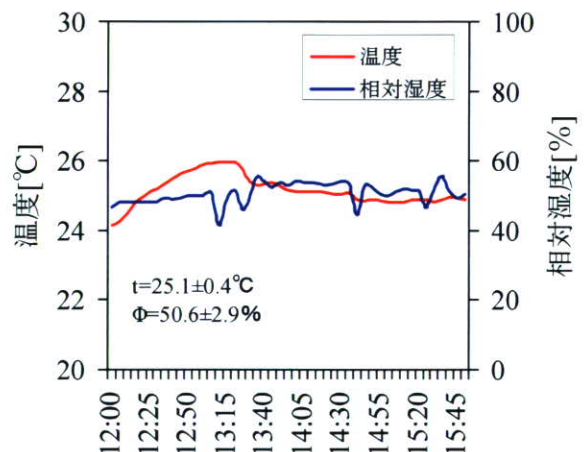
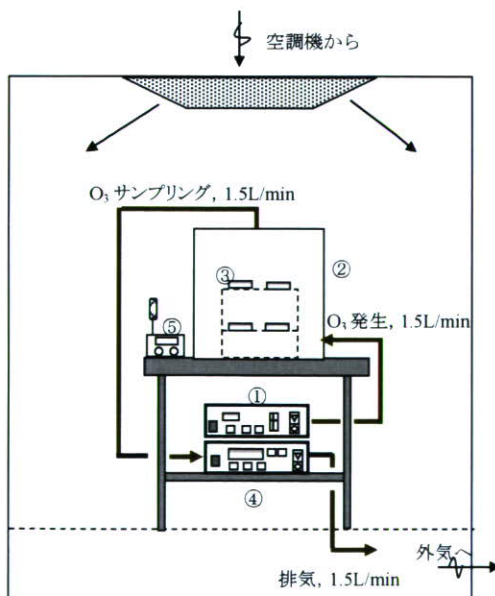


図-3-2 実験室内の温湿度(50%)



- ① オゾン発生器、②ガラス製チャンバー、③試験菌
- ④ オゾン測定器、⑤温湿度計

図-3-1 オゾン殺菌実験装置の概要

気の濃度になった時点で再び蓋を閉め、クリーンベンチに移し試験菌の入っているシャーレの蓋をし、恒温恒湿槽にて培養を行った。

実験に用いたオゾン濃度については、数時間程度の殺菌を前提とした予備実験で得られた結果により、細菌 2ppm、カビ 10ppm とした。なお、本研究において高濃度のオゾンを用いたのは、空調システム内の微生物汚染の対策の確立を目的とし、週末、休日、或いは集団感染後のような居住者が居ない環境への適用を想定しているためである。

また、1実験につき、同種類の菌を4枚の培地に塗布し、2枚は暴露実験、残りの2枚はコントロールとした。細菌にはSCD培地、カビにはCP



加 PDA を用いた。細菌と真菌の培養条件はそれぞれ 32℃×2 日間と 25℃×3 日間以上とした。

### B-3-2 フィルタ上の微生物の殺菌実験

前記の実験の基礎実験はオゾン殺菌性能を定量するために行ったもので、実験のしやすさから培地を用いた。実際の空調システム内の殺菌の場合、微生物がコイルやフィルタなどの表面に付着している。そのため、実際の状態での殺菌性能を検討するためにフィルタを用いた実験を行った。

#### (1) 試験菌

細菌よりカビ孢子に対するオゾンの殺菌性能が劣っていることが前記の基礎実験より確認した。そこで、本実験にはカビ *C. cladosporioides* の孢子を用いた。

#### (2) 実験方法

実験は以下に示す 2 段階で行った。

- ① フィルタより *C. cladosporioides* 孢子を捕集する。
- ② 上記の *C. cladosporioides* 孢子を捕集したフィルタを 図-3-1 に示す装置より実験を行った。

(財) 北里環境科学センターに設置されている 1m<sup>3</sup> の試験チャンバ (写真-3-2) 内に予め調整した菌液をネブライザより発生させた。発生終了後、MD8 ポンプ 2 台を 50L/min×24 秒の吸引を行い、浮遊カビ孢子をそれぞれに装着したメンブレン構造を有するゼラチンフィルタ (Satous 製) に *C. cladosporioides* 孢子を捕集させた。同様なサンプリング計 5 回を繰り返した。なお、同時サンプリングを行ったゼラチンフィルタ 2 枚のうち、1 枚をコントロールとし、もう一枚をオゾン暴露実験に用いた。電子顕微鏡で撮ったゼラチンフィルタ表面の *C. cladosporioides* 孢子の付着状況を写真-3-3 に示す。フィルタの表面だけではなく、内部まで *C. cladosporioides* 孢子 (培養前) が捕集されていることが分かる。(写真-3-3)

*C. cladosporioides* 孢子を捕集したゼラチンフィルタを写真-3-2 に示す装置で、前述した培地での実験と同じ方法で暴露試験を行った。なお、実際の再現性を確認するためにフィルタとセットで *C. cladosporioides* 孢子を塗布した培地も暴露を行った。



写真-3-2 ゼラチンフィルタによる *C. cladosporioides* 孢子の捕集実験装置

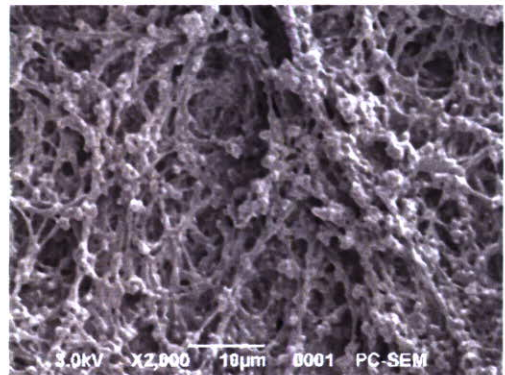


写真-3-3 ゼラチンフィルタに捕集された *C. cladosporioides* 孢子

### B-3-3 オゾンの殺菌効果への湿度の影響

気中オゾンによる殺菌効果に湿度は影響を及ぼすことが報告されている。その影響を確認するための実験を行った。

#### (1) 試験菌

実験に前述した大腸菌 (*Escherichia coli*, NBRC 3972) を用いた。

#### (2) 実験方法

菌液の調整方法と暴露時間は前述した B-2-1 の方法と同じであった。チャンバ内の温湿度条件は以下の通りである。なお、室内温湿度の測定結果を 図-3-3、図-3-4 に示す。

- ① 25℃, 30%
- ② 25℃, 70%

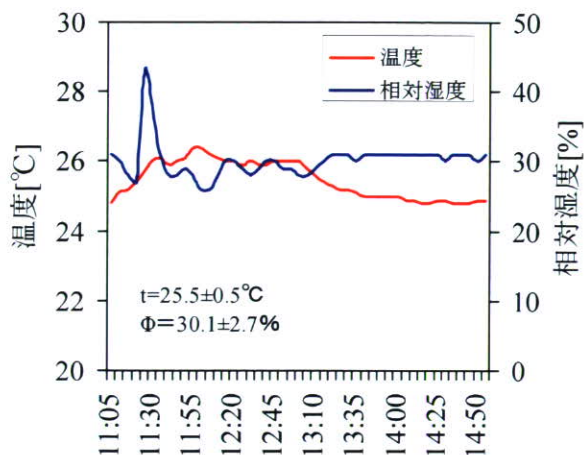


図-3-3 実験室内の温湿度 (30%)

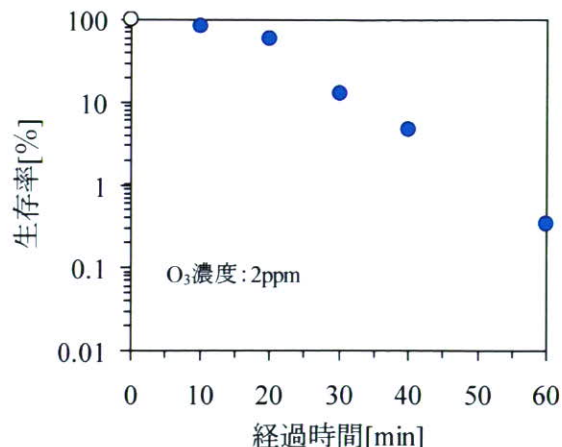


図-3-5 細菌に対するオゾンの殺菌効果

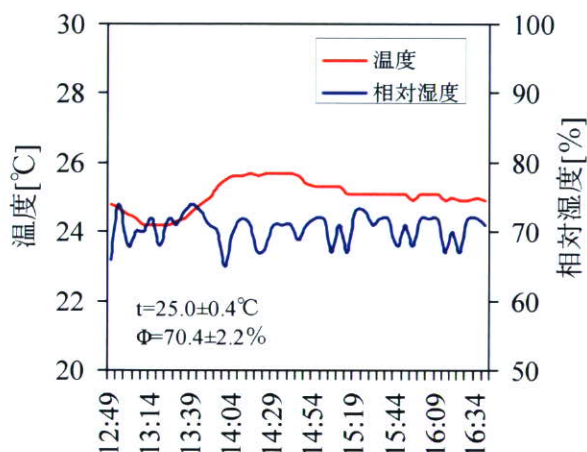


図-3-4 実験室内の温湿度 (70%)

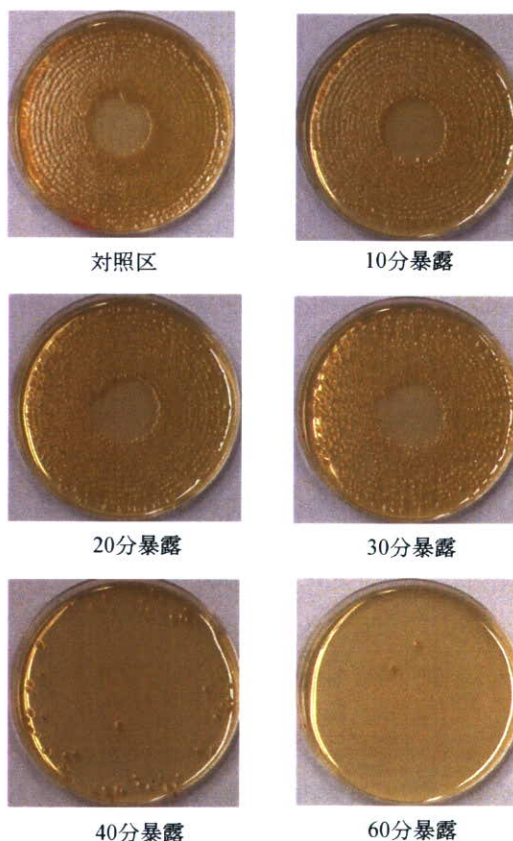


写真-3-4 2ppm 暴露実験の結果 (*E.coli*)

## C 研究結果

### C-1 培地上の微生物の殺菌性能

#### (1) 細菌に対するオゾンの殺菌性能

暴露時間と生存率の関係を把握するために 2ppm の実験を 5 回行い、それぞれの暴露時間を 10 分、20 分、30 分、40 分、60 分とした。図-3-5 に *E.coli* の実験結果、写真-3-4 に *E.coli* のコロニーを示す。*S.aureus* については、10 分間の暴露でその死滅率が 100% になった。

*E.coli* においてはその生存率の減衰が紫外線による殺菌と同様な特性を示すことから、オゾンの殺菌効果には、オゾン濃度とともに暴露時間も重要であることが明らかになった。そこで、本研究では、在来紫外線の殺菌効果に関係する必要な照

射量 ( $\text{mW} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2$ ) の概念をオゾンの殺菌効果に適用し、「オゾン濃度×暴露時間」を「暴露強度」と定義し、図-3-5 に示す「暴露強度 = 2ppm × 60min」と同じ値になるように、濃度と暴露時間を変えた場合、同じ死滅率を示すかの確認実験を *E.coli* を用いて行った。図-3-6 にその結果を示す。同じ暴露強度の 4 条件での死滅率はどれも 99% 以上であることが明らかになった。なお、同じ方法

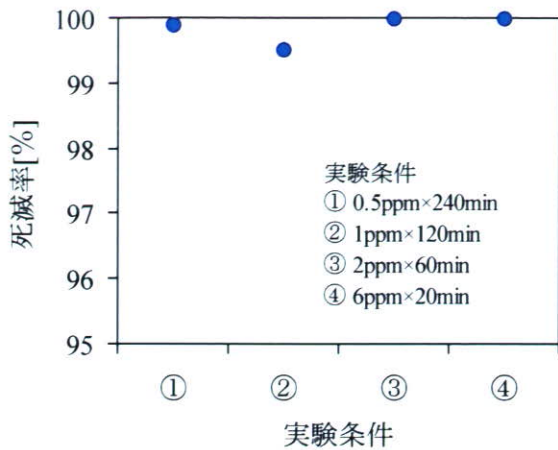


図-3-6 同暴露強度の殺菌効果の比較

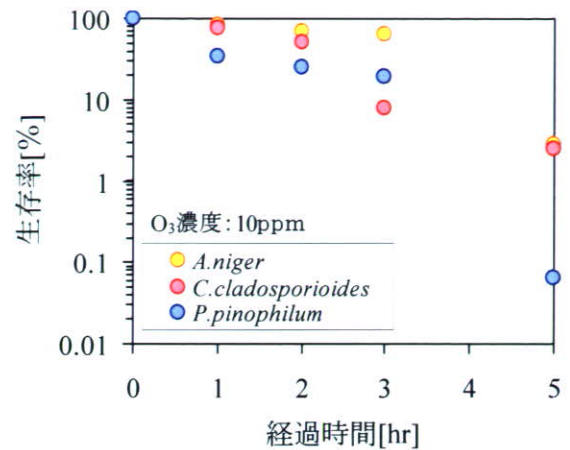


図-3-7 カビに対するオゾンの殺菌効果

でオゾンが発生させない場合の 1hr の暴露では、*E.coli* コロニー数の減少が認められず、上記の効果にオゾンのみが影響を及ぼすことを確認した。

(2) カビに対するオゾンの殺菌効果

カビに対するオゾンの殺菌効果の実験において

は、オゾン濃度を 10ppm、暴露時間を 1hr、2hr、3hr、5hr とした。実験の結果を図-3-7、カビのコロニーを写真-3-5 に示す。細菌と同じように、暴露時間が長くなるほど生存率は指数関数的に低くなっている。

また、細菌に比べカビを殺菌するのに必要な「暴

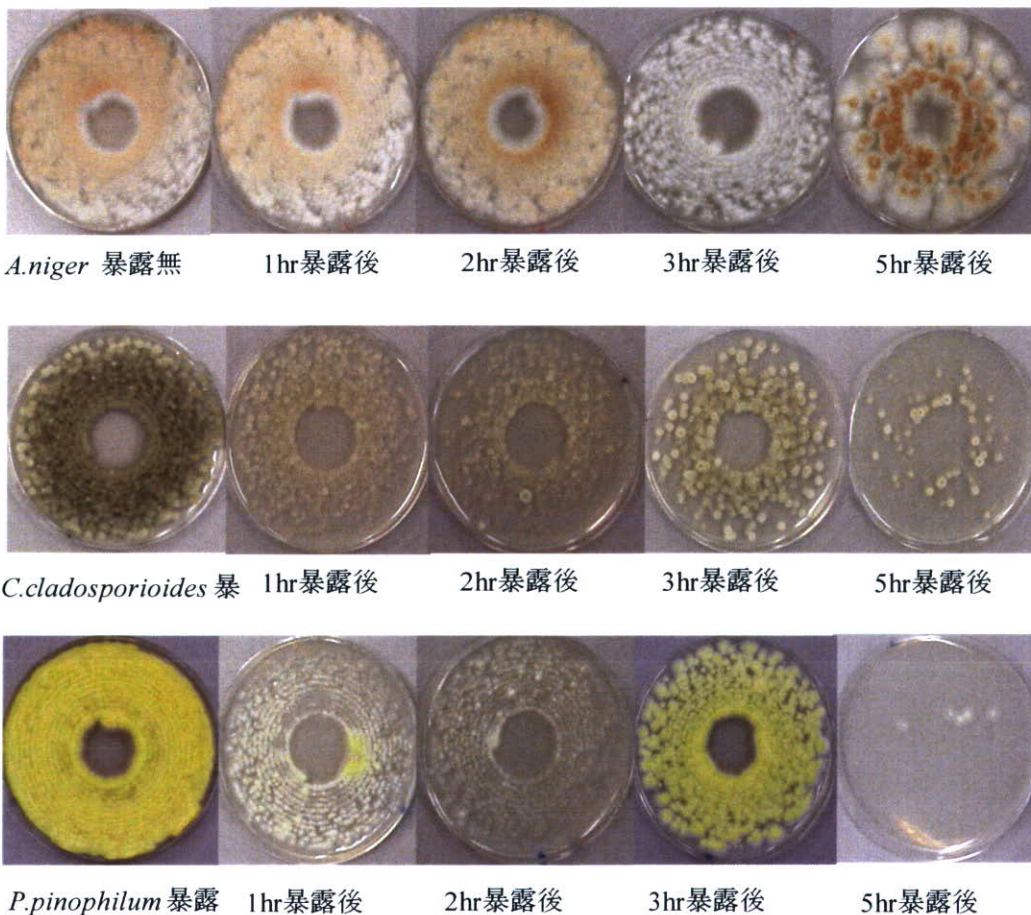


写真-3-5 10ppm 暴露実験の結果 (真菌)

露強度」が大きくなることが分かった。この関係は在来発表された結果<sup>4)</sup>と整合している。一方、本研究に用いた、一般環境で最も高い頻度で検出されるクロカビ、アオカビ、コウジカビにおいては、オゾンによる殺菌効果の間に差が見られた。図-3-7の結果から求めたそれぞれの回帰直線を図-3-8に示す。

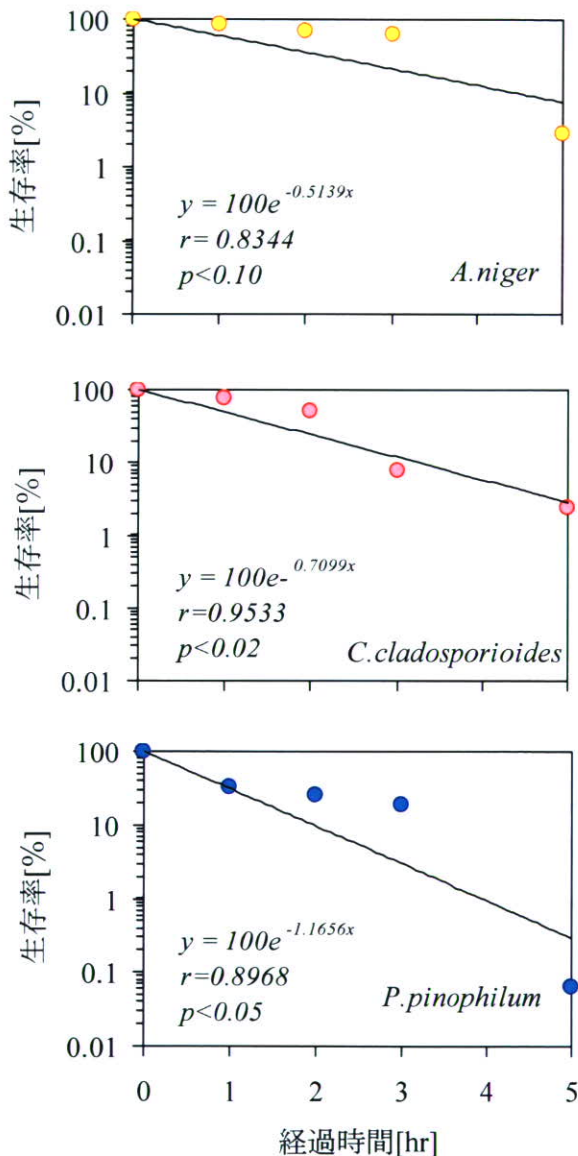


図-3-8 カビに対するオゾンの殺菌効果

### C-2 フィルタ上の微生物の殺菌実験

C. cladosporioides 胞子を捕集したゼラチンフィルタを用いた暴露実験の結果を図-3-9に示す。2時間暴露までの生存率が培地上と同程度であったが、5時間の暴露では高い生存率を示した。なお、3時間暴露したゼラチンフィルタ上の胞子数はコ

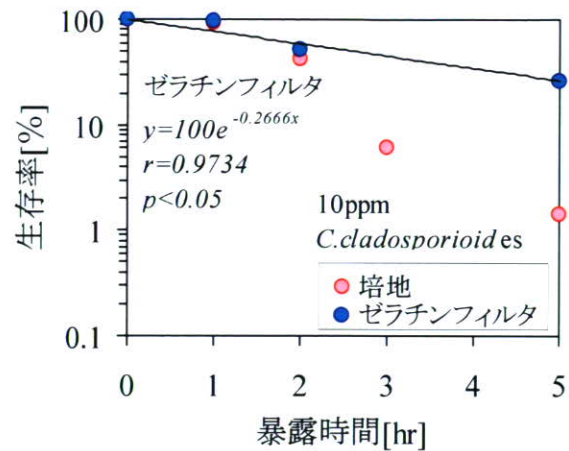


図-3-9 ゼラチンフィルタ上の C.cladosporioides 胞子の暴露実験の結果

ントロールと同じ値を示し、処理に何らかのミスがあったかと思われ、外れ値として除外した。

### C-3 オゾンの殺菌効果における湿度の影響

大腸菌を用いた相対湿度 30%、70%の実験結果と図-6に示す 50%の測定結果を図-3-10に示す。40分までの暴露ではほぼ同程度の生存率を示したが、60分の暴露では生存率の間に差が見られた。これは、実験に細菌の E.coli を用いており、オゾンの殺菌効果に与える相対湿度の影響よりも、1hr 乾燥状態 (30%) の暴露による E.coli のダメージが大きいものと思われる。

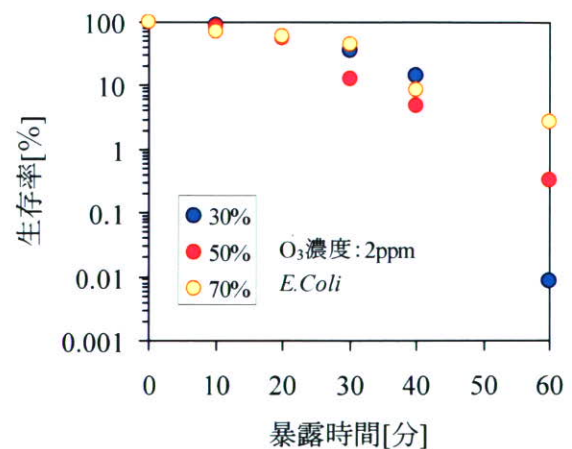


図-3-10 相対湿度別の暴露実験の結果

## D 考察

### D-1 細菌とカビの殺菌性能の差について

本研究の結果では、オゾンによる細菌とカビの殺菌性能の間に差が見られた。それは、真核細胞

を有するカビは、その外壁が原核細胞の細菌に比べて厚いためと考えられる。この点は在来発表された結果<sup>4)</sup>と整合する。また、本研究で得られた5種類菌を99%死滅させるのに必要な暴露強度の強弱の関係は、同じ5種類微生物を用いた紫外線照射による殺菌の実験結果と一致している<sup>6)</sup>。

## D-2 暴露強度について

本研究では、オゾンによる殺菌効果を定量するために、オゾン濃度と時間の積を「暴露強度」として定義し、同じ「暴露強度」において同じ殺菌性能(菌の死滅率)が得られることを確認した。即ち、本研究の成果を用いれば、任意オゾン濃度における必要な暴露時間を求めることができる。例えば、*E.coli*を99%殺菌する場合、現場でオゾン濃度を0.05ppmしか得られなければ、2,400min(40時間)以上の時間が必要になる(図-3-6を参照)。一方、*C.Cladosporioides*を対象とする場合、65ppm・hrの暴露量が必要になり(図-3-8の回帰式より求まる)、1,300時間以上がかかる。また、このことから、一般環境中の空中に低濃度のオゾンガス(関連基準の0.05ppm以下)を放出しても、営業時間中(例えば10hr程度)においてさほど殺菌効果が期待できないことが推察される。

一方、空調機内を殺菌しようとする場合、高濃度×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×hr)以上が必要になり(図-12の回帰直線より求まる)、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

本研究では、空調システム内微生物汚染の対策としてオゾンを用いた場合の殺菌性能に関するチャンバ実験を行った結果、以下の事柄が明らかになった。

- [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がその粒度分布を適正に測定していることが分かった。
- [2] 「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。
- [3] *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。

- [4] 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。

## 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, 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*, No1.4, 479-82, 2006
- (3)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*, No1.2, 443-6, 2006.
- (4)Yanagi U, Ikeda K, and Kagi N: Application of the IMD in measurement of airborne microbial particles, *Proceeding of The 6<sup>th</sup> International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings*, 524-7,2007.
- (5) 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.

### 2 学会発表

- (6)柳 宇, 池田耕一, 鍵直樹, 山田花菜: エアフィルタによる微生物粒子除去に関する考察, 室内環境学会総会講演集, 室内環境学会誌, Vol.8(2), 204-5.2005.
- (7)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, 2005.11

- (8)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
- (9) 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(15)
- (10)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, 2006.4
- (11)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, 日本防菌防黴学会第 33 回年次大会要旨集. 135, 2006
- (12)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
- (13)柳 宇:室内空気中の微生物ー細菌・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
- (14)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
- (15)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
- (16)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
- (17)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ー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.
- (18)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; 2003. 905-6
- (19)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

- (20) 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, 2006.10
- (21) 柳 宇:病院環境と微生物, 臨床環境医学, 第 15 巻, 第 2 号, 91-100, 2006.12
- (22) 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
- (23) 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
- (24) 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, 2007
- (25) 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。

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 国立保健医療科学院 主任研究官

研究要旨

本研究では、新品及び使用したエアフィルタについて、チャンバー及びフィルタ発生ガス測定装置を用いた発生ガス試験を行った。また、そのエアフィルタを含んだ実空調機通過空気の VOCs 及び微小粒子のエアフィルタの発生・透過（除去）率に関する実測を行った。

エアフィルタからの VOCs の発生量の測定には、小形チャンバー法を応用したもの、及び独自に製作したものをを用い測定を行った。使用済みのエアフィルタから VOCs の発生が確認され、面風速の違いにより発生量が異なることを明らかにした。

空調機通過空気の VOCs の測定では、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。また、季節毎の違いの要因については、除湿による結露水及び加湿水への溶解による影響、フィルタ温度の上昇による発生、オゾンなどの酸化性物質によるホルムアルデヒドの生成、フィルタの汚れの堆積による影響が考えられた。また、エアフィルタの微小粒子の透過率について、実空調機での計測を行い、実際の空調機に装備されているエアフィルタについても、

A 研究目的

室内環境中の揮発性有機化合物(VOCs)の発生源として、内装材料などの建築材料からの放散に関する多くの検討が行われている。そして、厚生労働省により室内の濃度指針値が示され、ホルムアルデヒドなどは新築の住宅においては、この指針値を下回るような対策が行われている。また、粒子状物質に関しては、建築物衛生法により 10 $\mu$ m 以下の粒子の重量濃度による規制が行われている。人体に影響のある粒径範囲の粒子は更に微小なものについても影響が懸念され、重量測定ではサブミクロンオーダーの粒子を評価することが困難である。現実的には大気中に、人為的な粒子の生成、ディーゼル排気ガスなど微小粒子が多く存在し、建築物内では換気が行われることにより室内に侵入することで、更に室内での発生がある場合には、これも含めて室内の空気を作り上げているために、微小粒子についても室内における微小粒子の実態を考慮に入れることが重要となる。

また、化学物質に関してはオフィスビルなどの建築物や住宅にも換気が行われることにより、空調機由来の VOCs の発生についても考慮に入

れる必要があると考えられる。特にオフィスビルなどに使用されるエアフィルタについては、外気及び還気空気がエアフィルタを通過し、室内環境中へ供給される。またエアフィルタの機能として、ある粒径の粒子は除去することが可能であるが、ガス状物質については除去されることはない。逆にこれからの発生にも注目する必要があると考えた。

通常、建築物に使用されるエアフィルタは粗じんフィルタ、中性能フィルタなどの組み合わせで、このフィルタは通常ガラス繊維又は高分子樹脂で加工されている素材を接着剤などでつないでフィルタろ材としているため、VOCs の発生が危惧される。また、既往の研究<sup>1-3)</sup>ではダストを捕捉しているエアフィルタから発生する臭気成分について、独自の装置を用いて評価を行っている。

一方、粒子状物質の除去についても、エアフィルタの除去効率は、日本においては重量法又は比色法により行われ、粒径毎の微小粒子の除去率については評価の対象にはなっていないため、人体に影響が大きいとされる微小粒子の粒径分布毎の除去性能について把握する必要があ

る。

そこで本研究では、チャンバー及びフィルタ発生ガス測定装置を用いた新品及び使用したエアフィルタの発生ガス試験について、エアフィルタの発生ガス測定装置の検討及び発生の特性も含めた検討を行うことを目的としている。また、そのエアフィルタを含んだ実空調機通過空気の VOCs 及び微小粒子のエアフィルタの発生・透過（除去）率に関して実空調機において測定を行った。これは、例えば空調機、エアフィルタ前段にガス及び粒子状の汚染物質が投入された際に、現在装備されているフィルタによりどの程度除去することが可能なのかについて、基礎資料となるものと考えられる。

## B 研究方法

### B-1 チャンバーを用いた VOCs 発生量

建築材料から発生する VOCs の放散量の測定には、小形チャンバーを用いることから、本研究でもこれを使用することとした。対象としたエアフィルタは某ビルの4階を受け持つ空調機に使用されている中性能フィルタとし、2005年1月より3ヶ月程度使用したものである。図1に示すように20×50cmに切り出したフィルタを空気が全面に当たるようにステンレスチャンバー(容積：20L、温度28℃、相対湿度：50%)内に配置し、清浄空気で換気(流量：0.33L/min、換気回数：1回/h)を行い1日後に空気の捕集し、その放散量を求めた。ホルムアルデヒド・カルボニル化合物及び VOCs の捕集は DNPH カートリッジ及び Tenax 捕集管により行い、HPLC 及び GC/MS を用いて分析を行った。

この方法では、フィルタろ材に空気が通過するものではないため、フィルタろ材表面のみから放散する物質を対象としていることとなる。よって、エアフィルタのように本来フィルタろ材内部から発生するものをこの方法では測定しているものではない。

エアフィルタからの発生量を求める方法として、上記の方法では、エアフィルタ自体に空気が通過しておらず、実際のエアフィルタの使用状態とは異なる。またエアフィルタを通過した空気の風速の発生量に与える影響も明らかにされていない。そこで、フィルタを通過した空気を対象としてその発生量を求めることを目的として、図2に示すように、フィルタをガラス製

のジグにより挟み込み、フィルタろ材(84mmφ)に清浄空気を通過させた後の空気を測定することとした。試験には先に示した使用済みフィルタを使用し、28℃、50%RHの環境下で行い、流量を1~5L/minとした。フィルタ面の面風速は、5L/minの時に0.015m/s程度である。

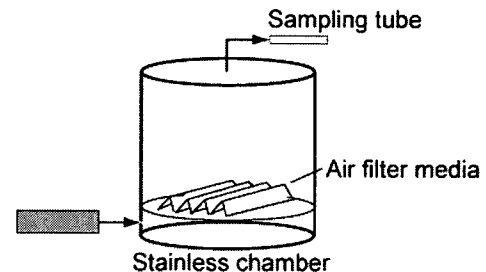


図1 チャンバーを用いた実験概要

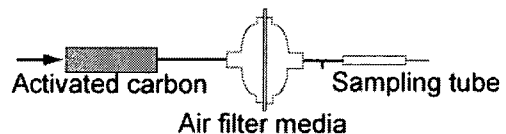


図2 フィルタ発生ガス測定用装置

### B-2 実空調システムにおけるエアフィルタの VOCs 発生量の測定

使用済みエアフィルタを設置していた空調機が設置されている図3に示すような空気調和システムにおいて、空調機の上流・下流の空気の測定を行った。ここでは、還気と外気を混合し、プレフィルタ、エアフィルタを通してコイルで冷却、除湿又は加温・加湿をするもので、本研究では、春(4月)、夏(8月)、秋(10月)、冬(1月)において測定を行った。夏は除湿、冬の時期は加湿を行っている。測定には、プレフィルタの上流側(P1)及び加湿器の下流側(P2)を測定点とした。また、エアフィルタ以外のコイル等の影響を把握するために、通常通りエアフィルタを装着した状態及びプレフィルタ及び中性能エアフィルタを取り除いた場合の測定を行った。

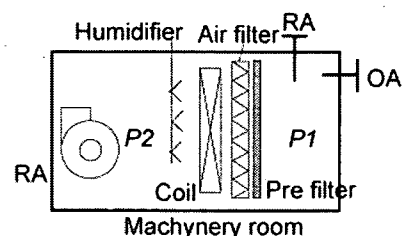


図3 空調システムの概要



### B-3 実空調システムにおけるエアフィルタの微粒子透過の測定

微小粒子のエアフィルタによる透過率の計測についても、上記と同様に上流側(P1)、下流側(P2)及び外気、居室において行った。計測には、粒径 10nm から 500nm に 32 チャンネルの粒径範囲の個数濃度が計数可能なワイドレンジ粒子スペクトロメータ(MPS社:WPS Model 1000XP)を用いた。これは微分モビリティ分離技術および凝縮核測定技術を用いた粒径分布及び粒子個数濃度の計測を行うことのできる装置である。

測定には、各季節において P1, P2, 外気、室内の順で、20 分間ずつ計測を行い、各測定点における濃度データを算術平均値として求めた。また、測定は化学物質同様に経時的な変化と空調吹出口における超微粒子の計測を行った。

## C 研究結果

### C-1 チャンバーを用いた VOC 発生量

図 4 にホルムアルデヒド、アセトアルデヒド及び TVOC の発生量について示す。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ものの、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。しかしながら、検出量が極微量であること、また空気がフィルタを通過せず、表面を接触する状態であることが考えられ、実際のフィルタの使用環境とは異なることが問題となる。そのため次に示す空気通過型のチャンバーを用いた。

使用済みフィルタを使用した空気通過型のチャンバーを用いた発生ガス測定結果を図 5 に示す。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、流量に関わらず濃度として表しているが、物質によっては通過流量が増えることにより下流側の濃度が減少する傾向が見られた。また、図 6 に通過風量から単位時間あたりの発生量として換算した値を示す。発生量としては、面風速が多くなるほど高い値となった。下流側の濃度としては低くなるものの、発生量は異なっており、小形チャンバー法を応用した方法では、エアフィルタの通過風量を考慮に入れていない分、少なく見積もっている可能性もある。今回設定した条件では、フィルタ面の面風速は 5L/min の時に 0.015m/s 程度

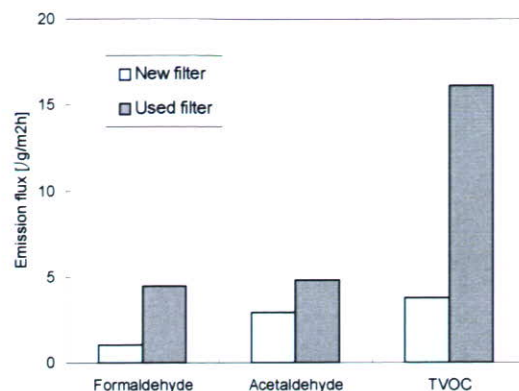


図 4 小形チャンバーによるフィルタからの VOC 発生量

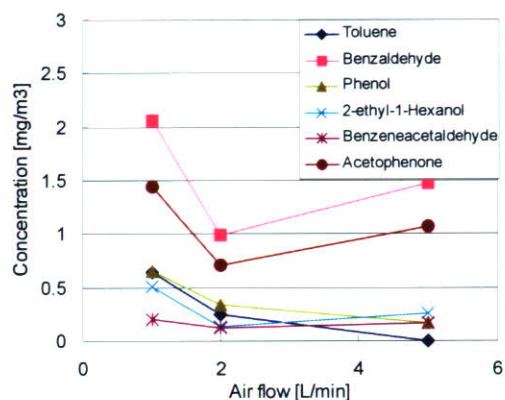


図 5 流量による発生ガス測定結果

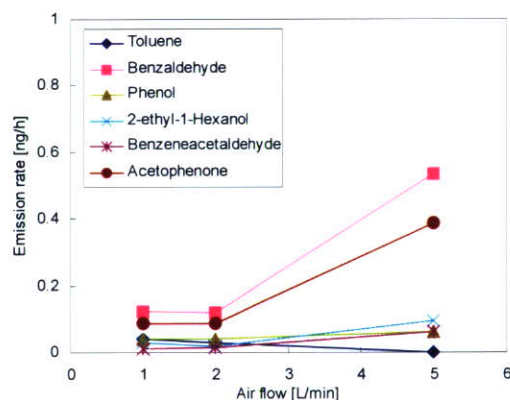


図 6 通過風速とフィルタからの発生量の関係

であり、定格面風速の 0.125m/s (ブリーツ型のユニットとして 2.5m/s) よりも更に遅い速度であることから、流速による影響についても今後検討する必要がある。

### C-2 実空調システムにおけるエアフィルタの発生・透過量

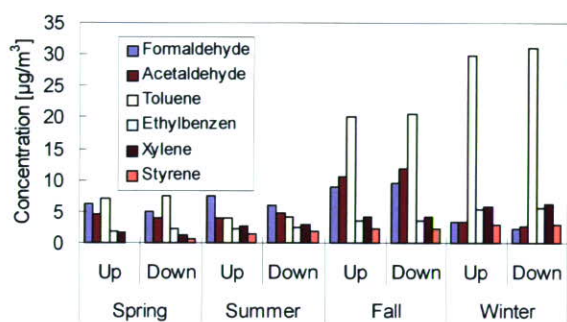
表 1 に各測定時期における空調機フィルタの上流側(P1)、加湿器の下流側(P2)及び室内の温

湿度条件を示す。夏期は冷却・除湿，冬期は加熱・加湿を行っているが，中間期である春期にも若干の加湿を行っていた。秋期については，特に熱処理は行っていない。

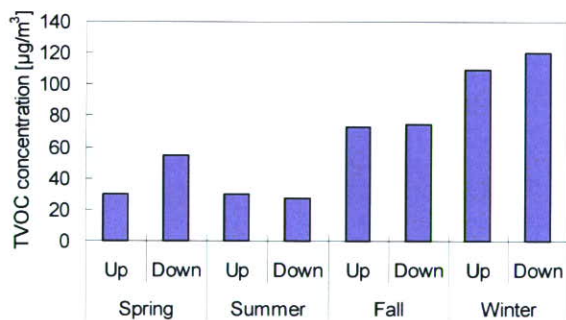
図7に季節毎の空調機の上流・下流側のVOCs濃度及びTVOC濃度の測定結果を示す。季節毎に各VOC濃度が異なり，それに伴って上流・

表1 実測時の各温湿度条件

	Spring		Summer		Fall		Winter	
	Temp [°C]	Humid [%]	Temp [°C]	Humid [%]	Temp [°C]	Humid [%]	Temp [°C]	Humid [%]
Up-stream	17.8	28.9	27.8	59.3	21.3	49.8	11.1	33.3
Down-stream	20.4	34.4	22.1	79.4	21.9	48.9	20.4	11.3
Room	22.7	36.8	24.8	59.3	23.4	25.1	21.9	27.1



(a) VOCs 濃度



(b) TVOC 濃度

図7 季節毎の上流・下流側のVOCs濃度

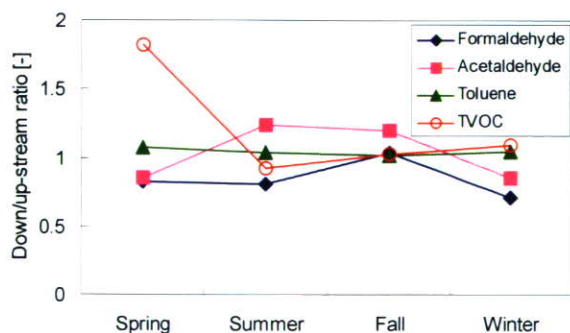
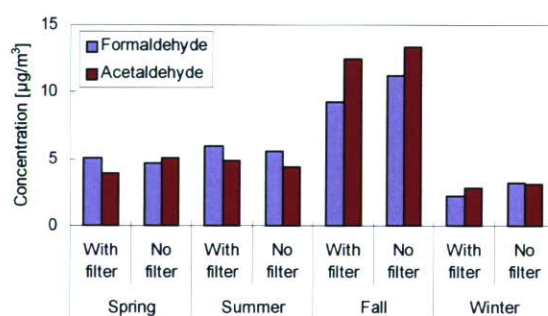


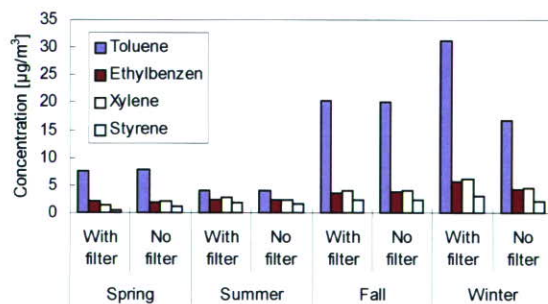
図8 季節毎の空調機下流/上流濃度比

下流側の濃度が変動する傾向にある。トルエンを除けば，多くの物質は  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下であり，室内の循環空気を外気空気で希釈しているため，比較的low濃度となっている。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るものである。

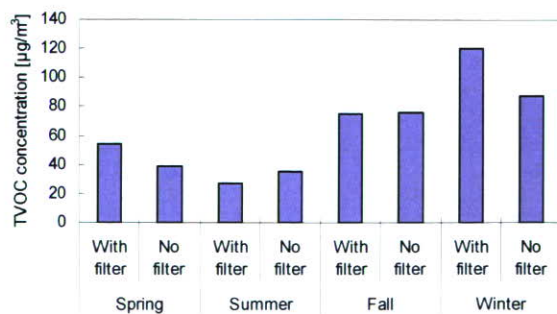
図8に空調機の下流濃度に対する上流濃度の比率について示す。濃度比1以上は発生側，1以下は除去されていることになる。春期にはTVOCが大きな値を示しているほかは，1程度の値となった。トルエンなど主要な物質は，上流・下流側で濃度の変化はないが，下流側にヘキサンが多く検出されているものがこのTVOC



(a) ホルムアルデヒド及びアセトアルデヒド



(b) VOCs 濃度



(c) TVOC 濃度

図9 フィルタ有無による下流側濃度

濃度に反映されているもので、その原因は不明である。詳細を見ると、トルエンについては 1 を超える値で季節毎に一定なのに対し、ホルムアルデヒドは、春期、夏期、冬期に 1 を下回り、除去の傾向に、アセトアルデヒドも、春期、冬期に 1 を下回った。

図 9 に季節毎のフィルタ装着時とプレフィルタ及び中性能フィルタの非装着時の空調下流側各 VOC 濃度について示す。エアフィルタから発生していれば、非装着時には下流側の濃度が低下するが、同等か若干増加の傾向に、TVOC は春期と冬期に減少する傾向となったが、概ね上流・下流共に同様の傾向となった。

図 10 に季節毎のフィルタ非装着時における空調機下流/上流側の濃度比を示す。図 8 と同様に 1 前後に値が集まっていることは同様であるが、例えば、ホルムアルデヒドについては、夏期に 1 を下回り除去側となるものの、他の季節では 1 を上回っていた。1 を上回る原因として、フィルタを除くコイルや空調機内面などからの発生も考えられる。

図 11 にフィルタ装着時と非装着時の濃度比を示す。ホルムアルデヒド及びアセトアルデヒドについては、春期にフィルタ非装着時の方が濃度の高い傾向にあるが、その他に特に変化はなく、夏期に発生側にある。トルエン及び TVOC については、季節毎にフィルタ装着時の方が高くなる傾向となった。

### C-3 実空調システムにおけるエアフィルタの微粒子透過の測定

図 12 に空調機前段(P1: Up), 空調機後段(P2: Down), 外気(Outdoor), 室内(Indoor)の粒径別粒子濃度を示す。外気については微小粒子の濃度が高く、またピークがダブルモードとなった。濃度レベルは各粒径において、外気が高く、外気と室内の還気が混合する(P1:Up), エアフィルタにより粒子が捕集された空気(P2:Down), そして室内(Indoor)となった。

図 13 にフィルタ前後段の濃度比(フィルタの透過率)室内濃度と外気濃度の比(I/O 比)及び下流濃度と室内濃度の比を示す。室内と外気の濃度比については、過去にも研究<sup>4,5)</sup>が行われており、本研究で行った部屋は、室内でのたばこ煙など微粒子を発生させる人間の活動がない条件であったために、I/O 比は 1 を切り、今

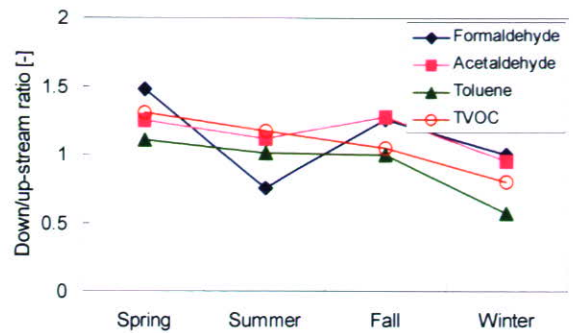


図 10 季節毎の空調機下流/上流濃度比

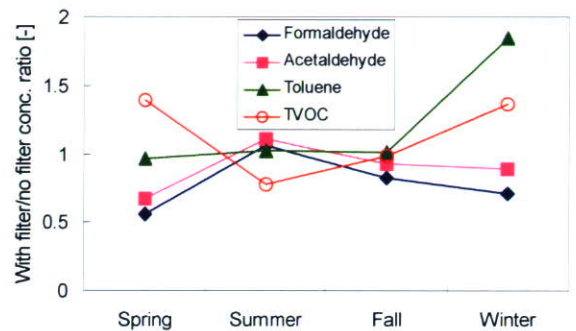


図 11 フィルタ装着時と非装着時の濃度比

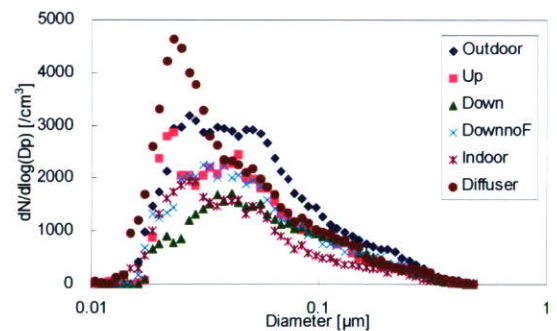


図 12 各測定点における粒径別粒子濃度

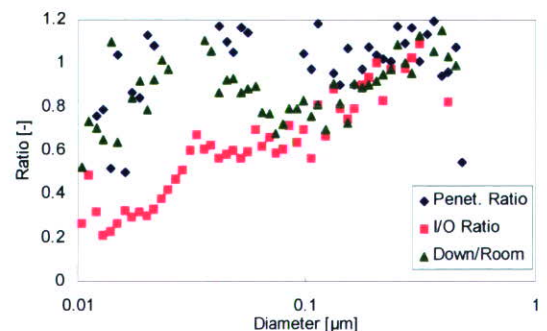


図 13 超微粒子の透過率, I/O 比及び空調下流・室内濃度比

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。また、フィルタにより 0.2 $\mu\text{m}$  前後では捕集されておらず、それよりも微小粒子は徐々に捕集される傾向となり、フィルタの捕集理論と矛盾していない。また、下流濃度と室内濃度の比についても、粒径 0.2  $\mu\text{m}$  程度では、I/O 比と同様の傾向になっており、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<sup>6)</sup>、それ以下の粒子については、フィルタ下流濃度よりも室内濃度の方が低い値となっていた。

## D 考察

### D-1 チャンバーを用いた VOC 発生量

エアフィルタから発生する VOC の測定方法については、小形チャンバーを使用して行った。エアフィルタの特性としてエアフィルタろ材に空気が通過することによる VOC 発生の影響について考慮すると、発生量を過小評価している可能性があるため、フィルタの測定方法の検討は今後も必要である。

また空気を通過させて発生させるチャンバーについては、面風速の違いにより下流側の濃度が減少し、風速による影響が示唆された。今回使用した流量の設定した条件では、フィルタ面の面風速は 5L/min の時に 0.015m/s 程度であり、定格面風速の 0.125m/s (プリーツ型のユニットとして 2.5m/s) よりも更に遅い速度であることから、流速による影響についても今後検討する必要がある。

### D-2 実空調システムにおけるエアフィルタの発生・透過量

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、空調機に通過す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。この中でもトルエンについては発生量が少なく季節を通じて一定なのに対し、ホルムアルデヒドは、春期、夏期、冬期に 1 を下回り、除去の傾向に、アセトアルデヒドは、春期、冬期に 1 を下回った。これには、除湿による結露水及び加湿水への溶解による影響が考えられる。表 1 に示したとおり、本研究の測定時期では、春期・冬期に

加湿、夏期に除湿を行っていた。

また、フィルタ非装着時においては、概ね上流濃度と同等であったが、ホルムアルデヒドについては、夏期に除去側となるものの、他の季節では発生側であり、フィルタを除くコイルや空調機内面からの発生も考えられる。フィルタ装着時と非装着時の関係からは、ホルムアルデヒド及びアセトアルデヒドについては、春期にフィルタ非装着時の方が濃度の高い傾向にあるが、その他に変化はなく、夏期に発生側にある。この結果には、どちらにも結露・加湿の影響が含まれているため、その他の影響が考えられ、例えばフィルタ温度の上昇による発生量の増加及び夏期の大气からのオゾンなどの酸化性物質によるホルムアルデヒドの生成なども理由として考えられる<sup>1)</sup>。トルエン及び TVOC については、季節毎にフィルタ装着時の方が高くなる傾向となった。この空調機は、実験期間中プレフィルタは毎月洗浄交換をしているものの、中性能フィルタについては、交換されていない。フィルタの汚れの堆積による影響も考えられる。

### D-3 実空調システムにおけるエアフィルタの微粒子透過の測定

図 14 に季節毎によるエアフィルタの透過率について示す。粒径 0.2  $\mu\text{m}$  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 0.2  $\mu\text{m}$  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る。また、先に示した室内と外気濃度の I/O 比からも、エアフィルタの特性による影響が強く現れていると言える。季節毎には、この期間はプレフィルタについて毎月洗浄交換をしているものの、中性能フィルタについては、交換されていない。そのため、フィルタの捕集理論からすれば、徐々に捕集効率が上昇する傾向とならずであるが、春期及び秋期には捕集効率が落ち (透過率が上がる)、夏期及び冬期に捕集効率が若干上がる傾向となった。空調機の除湿・加湿を含めた熱処理の関係については、不明である。

図 15 に空調吹出口と室内粒子濃度の関係を示す。微小粒子においては室内濃度よりも室内空調吹出口の濃度が非常に高い傾向となった。ここでも、室内よりも全粒径範囲において空調吹出口の濃度が高くなった。図 16 にフィルタ下