

解説

空気清浄機の空中除菌性能の評価法

室内にカビ胞子を散布しその減衰速度から空気清浄機を評価する

環境生物学研究所 阿部 恵子

● はじめに

人の生活環境では、空気中にカビの胞子や細菌など様々な微生物が常に浮遊している。空気中に特定の微生物が高濃度で浮遊すれば、その微生物による呼吸器系のアレルギーが誘引される場合があり、また感染症が空気を介して広がる場合も多く、空気中で浮遊微生物が高濃度になることは健康上好ましいことではない。

近年、様々なタイプの空中浮遊微生物除去および防止のための機器が次々と開発されているが、その性能については開発メーカーによる評価であり、本当に効果の高い製品から誇大広告に過ぎない製品まで実際の性能は様々で、消費者にとって判断が困難な状況である。そこで共通の性能評価法を用いて、各種の空中浮遊微生物除去と防止のための機器を客観的に検証できる体制を整えるべきであると考え、2004年に室内環境学会において『空中浮遊微生物除去および防止性能評価法プロジェクト』が発足した。趣旨に賛同された企業から調査研究費の提供を受け、参加企業、関連する調査機関、および室内環境学会に所属する研究者が共同で微生物ワーキンググループとして3年間活動した^{(1)~(3), (7)}。

本プロジェクトでは扱う対象を空気清浄機に絞り、空気中に浮遊する生菌の除去性能（空中除菌性能）を評価することにした。空中除菌性能を評価するためには、生菌を室内の空気中に散布しその減衰を測定する必要がある。このような試験では作業者の安全確保のためバイオハザード対策が必須である。そこで、微生

物の物理的封じ込め策として陰圧管理のできる二重構造の試験室の使用と試験室への入室制限を、生物的封じ込め策として37℃で発育できない非病原性の微生物を扱う方法を採用した。

室内に散布する菌は、以下の三つの理由からカビの胞子とした。

- ① バイオハザード対策がとりやすい。37℃(人の体温)で発育できないカビであれば、万一試験室から漏洩し作業員が吸入しても重篤な病気を引き起こす可能性が低い。
- ② カビの胞子は空気中で長時間生存する。空気中に生菌を散布しその残存率の低下を調査するためには、空気中で安定して生存する微生物を用いる必要がある。
- ③ カビは室内環境との係わりが深い。建物の内部に湿気があればそこでカビが増殖し室内に多量の胞子を飛散させる可能性があり、カビは室内空気中からの除去対象に含まれるべき微生物である。

本プロジェクトにおいて実際に菌を散布するための二重構造の試験室を試作し、その試験室内にカビの胞子を散布し、空気清浄機による空中除菌性能の評価試験を試みた。ここでは2つの試験例について紹介する。

● 方法

(1) 試験室

空気清浄機の空中除菌性能の評価に用いる試験室は、陰圧管理ができる（室内の気圧を室外より低く保つことで、室外

への空気の漏れを防ぐ）二重構造の試験室を基本とした。図1に試験室の概略を示す。試験室は、内室、前室および外室の3室から構成される。内室は、評価対象の機器を設置し、供試菌の胞子を散布し、その機器を稼働させる室で、評価対象の空気清浄機の他に浮遊粒子濃度測定のためのパーティクルカウンタおよび空気攪拌ファンを置いた。前室は、機器操作等をする室で、菌を内室に散布するための装置および内室の浮遊菌をサンプリングするための装置を置いた。試験時は内室を立入禁止で閉じた状態とし、試験時の作業は全て前室から行った。外室は、窓や扉を閉じ関係者以外の入室を制限した室である。前室と外室には菌の漏洩をチェックするためエアースンプラを置き浮遊菌を調査した。

(2) 供試菌

供試菌として *Wallemia sebi* J-155 株および *Penicillium glabrum* A1 株を用いた。

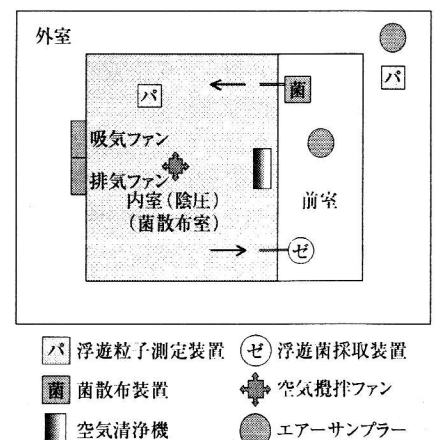


図1 試験室の構造と機器類の配置

何れも環境生物学研究所の保存菌株で、37℃での発育が認められなかったカビで、分生孢子（直径約3μm）を着生する。

(3) 評価試験の概要

陰圧管理下で内室空気中の浮遊微生物を除去し、そこに供試菌の孢子を散布した。あらかじめ内室に設置した評価対象の空気清浄機を孢子散布後に稼働させ、経時的に内室空気中の浮遊生菌濃度を測定し、その減衰を対照試験（機器を作動させない試験）と比較することにより空気清浄機の空中除菌性能を評価した。

空気清浄機の稼働条件は、

① 空気清浄機off（対照試験）

② 空気清浄機onでイオン発生なし

③ 空気清浄機onでイオン発生ありとした。

(4) 孢子散布

内室への孢子散布法として、ネブライザ法および空中超音波法を用いた。

① ネブライザ法

ガラス製ネブライザに菌液を入れ、エアコンプレッサーから1.0 kg/cm²で空気を10分間圧送（この時の菌液の噴霧量は、0.15mL/分）し、試験孢子の懸濁液（菌液）を内室へ噴霧した。

菌液は試験開始1時間前に調製した。DG18寒天平板培地10枚に発育した供試菌を掻き取り、25mLの0.005%スルホコハク酸ジオクチルナトリウム水溶液に懸濁し、滅菌ロートに装着した滅菌ガーゼ2枚で濾過した。ろ過後に孢子濃度をヘマトメーターで計測し、 5×10^7 spores/mLの菌液を調製した。

② 空中超音波法⁽⁵⁾

超音波照射装置に付属の超音波照射容器を、口径50mmの管で内室と接続し、口径10mmの管で圧縮空気ボンベと接続した。孢子付着試験片をこの超音波照射容器の中央に設置し、上方から孢子付着試験片に照準を合わせて超音波を発信し、試験片上の孢子を容器内に飛散させた。発信と同時にボンベ内の圧縮空気を容器内に送り（毎分10L）、容器内の孢

子飛散空気を内室に導入した。

孢子付着試験片の作製法は以下の通りである。供試菌を接種した試験片（目視カビセンサー⁽⁴⁾、環境生物学研究所製）を、*W. sebi*は相対湿度94%、*P. glabrum*は相対湿度97%に調湿した密閉容器に入れ、25℃で7日間培養し孢子を着生させた。培養後の孢子着生試験片を相対湿度43%で7日間乾燥させ、空中超音波照射に供した。

(5) 空中浮遊菌の測定

内室の空中浮遊孢子のサンプリングには、ゼラチンフィルタ法⁽⁶⁾を用いた。前室側から一定量（10L）の内室空気を吸引してゼラチンフィルタで濾過し、その空気中の浮遊孢子を捕集した。捕集後のゼラチンフィルタは、直接培養法（そのままDG18寒天培地に載せて培養）、または希釈培養法（ゼラチンフィルタを溶かして段階希釈し、その溶解液および希釈液をDG18寒天培地に拡げて培養）で培養した。培養5日後に発育したコロニー数から、内室の空気中の浮遊生菌濃度を計算した。

(6) 空中浮遊粒子の測定

内室空気中の雑菌除去の確認および孢子散布の確認のため、パーティクルカウンタを内室に設置した。パーティクルカウンタは前室に置いたパソコンとコードで接続し、内室空気中の浮遊粒子濃度の変化を連続で追跡した。

● 空気清浄機の評価試験 例－1（布製試験室内に ネブライザ法により菌散布）

2006年10月25日に行った試験例⁽²⁾を最初に紹介する。この試験では外室として（財）北里環境科学センターの、前室を備え陰圧管理ができる実験室を用いた。試験方法がまだ確立されていない段階での予備試験であり、菌の漏洩防止のため外室として陰圧管理のできる試験室を用いた。内室は布製の立方体（アメニティー・テクノロジー製）で、その前室は内室の出入口外側を覆う形で取付けられた

布製の小室である。内室の容積は約10立方メートルで、出入口の向かい側に吸気ファンと排気ファン（いずれもHEPAフィルタを備えたもの）があり、陰圧管理ができる。

この試験では、2台の空気清浄機（AおよびB）を内室に入れた。空気清浄機Aはフィルタのみ（イオン発生なし）、Bはフィルタ＋イオン（イオン発生あり）で稼働させた。

表1に、試験例－1の作業工程を示す。1工程を1時間半とし、1日に3工程を実施した。供試菌は*W. sebi*で、ネブライザ法により内室に菌液を噴霧した。空中浮遊菌のサンプリングには、口径42mmのゼラチンフィルタを用いた。ゼラチンフィルタへの捕集空気量は、5L/minで10L（2分間）吸引採取した。孢子散布前、散布終了3分後、および30分後の3回サンプリングし、希釈培養法を用いて内室の浮遊生菌濃度を測定した。

表1 試験例－1の行程表

経過時間 [分]	作業工程
	陰圧管理により内室の浮遊菌除去継続
0	サンプリング① 菌散布前
4	内室の陰圧管理停止
5	ネブライザ噴霧開始 (内室への菌散布、10分間)
15	ネブライザ噴霧停止
18	サンプリング② 菌散布終了3分後
20	空気清浄機 on (対照試験はoffの状態)
45	サンプリング③ 菌散布終了30分後
47	内室の陰圧管理開始 (内室の浮遊菌除去、30分間)
60	空気清浄機 off

図2に、内室空気中の浮遊粒子（パーティクルカウンタで測定）および浮遊生菌（ゼラチンフィルタ希釈培養法で測定）の濃度変化を示す。孢子散布前は、内室の浮遊孢子は空気10L当り1cfu未満であったが、図2では1の値にプロットした。

フィルタによる空中浮遊孢子（生菌）

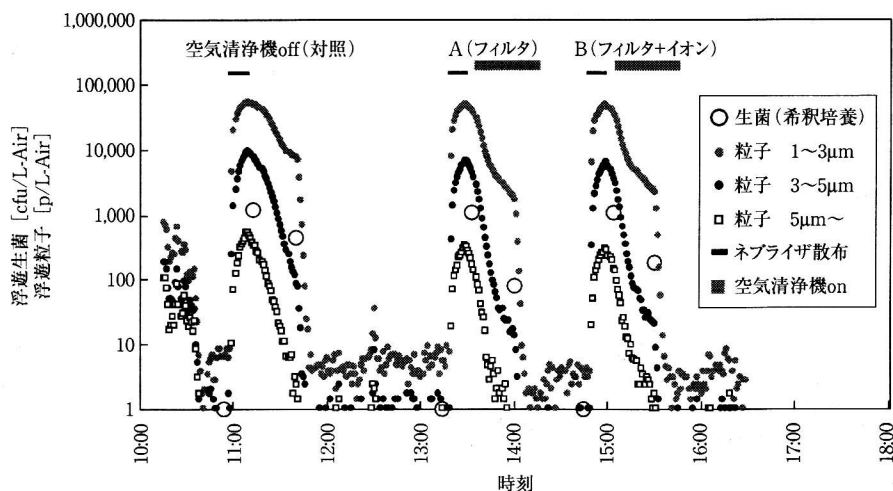


図2 室内空气中の浮遊粒子および浮遊生菌濃度の変化
供試菌 *Walleria sebi*。ネブライザ法により孢子散布

の除去効果は認められたが、空気清浄機Aと空気清浄機Bを稼働させた場合を比較すると、今回の試験ではB（フィルタ+イオン）のほうが30分後に残留した生菌数が多く、イオン（除菌イオンと表示されている）による空中除菌効果は認められなかった。

● 空気清浄機の評価試験 例－2（パネル組立試験 室内に空中超音波法に より菌散布）

評価試験例－2として、2007年3月9日～10日の試験³⁾を紹介する。この試験では、外室に㈱エフシー総合研究所の実験室を用い、内室および前室はアルミパネル組立の試験室（協和工業㈱製）とした。内室の容積は約20立方メートルで、出入口の左奥のパネルに吸気ファン、右手前のパネルに排気ファン（いずれもHEPAフィルタを備えたもの）があり、陰圧管理ができる。

本試験では1台の空気清浄機を用いて2日間の試験をした。空気清浄機の稼働条件は、

- ① 空気清浄機off、
 - ② 空気清浄機onでイオン発生なし、
 - ③ 空気清浄機onでイオン発生あり、
- とし、空気清浄機に装着されているフィ

ルタの目詰りの影響を排除するため1日目の試験は①→②→③の順で、2日目は順序を逆転させ③→②→①の順で、1日に3工程ずつ試験した。

表2に、本試験例の作業工程を示す。供試菌として1日目は *W. sebi* を、2日目は *P. glabrum* を用いた。孢子の散布法は空中超音波法で、内室に乾燥状態の孢子を散布した。内室の空中浮遊菌のサンプリングには、直径80mmのゼラチンフィルタを用いた。孢子散布前からサンプリングを開始し、捕集空気は10L（12秒間）とした。孢子散布後は15分毎に1時間まで、5回サンプリングした。2枚のゼラチンフィルタで同時に捕集し1枚は直接培養法で、もう1枚は希釈培養法で培養した。それぞれの培養方法を用いて、内室空气中の浮遊生菌濃度を測定した。

図3に、2日目（*P. glabrum* の散布試験）における室内空气中の浮遊粒子（パーティクルカウンタで測定）および浮遊生菌（ゼラチンフィルタ法で測定）の濃度変化を示す。

評価試験例－1の試験では菌液を噴霧していたため、水滴由来の粒子が高濃度で浮遊していたが、空中超音波法で飛散した粒子は、ほとんどが孢子と思われる。*P. glabrum* の孢子は直径約3μmであ

表2 試験例－2の行程表

経過時間 [分]	作業工程
	内室の陰圧管理継続
0	安全キャビネット内で超音波照射容器に孢子着生試験片をセット
5	超音波照射容器を前室で超音波発生装置に接続
15	サンプリング① 菌散布前
19	内室の陰圧管理停止
20	超音波発生装置 on (内室への菌散布、5分間)
25	超音波発生装置 off
28	サンプリング② 0分 (菌散布終了3分後)
29	空気清浄機 on (対照試験はoffの状態)
43	サンプリング③ 15分
58	サンプリング④ 30分
73	サンプリング⑤ 45分
88	サンプリング⑥ 60分
89	空気清浄機 off
90	内室の陰圧管理開始 (内室の浮遊菌除去、30分間)
	超音波発生装置から超音波照射容器を取り外す

るが、孢子散布直後は粒径5μm以上の粒子が最多であった。空中超音波法による孢子散布では、孢子が連なった状態で浮遊する場合が多いことがわかる。ゼラチンフィルタで採取された菌は、直接培養法よりも希釈培養法のほうがカウントされた数が多かった。希釈して平板に拡げる操作により連なっていた孢子が離れ、個々の孢子が生菌としてカウントされたことが、その一因と思われる²⁾。

図4に、孢子散布直後から1時間後までの、内室空気10Lあたりの浮遊生菌数の経時変化を示す。Aは *W. sebi* の直接培養法、Bは *P. glabrum* の希釈培養法により計測した生菌数である。

孢子散布直後の空気10L（ゼラチンフィルタ1枚に採取）あたりの浮遊生菌数は *W. sebi* が60～300cfu、*P. glabrum* が5,000～6,000cfuで、*P. glabrum* のほうが散布された孢子数が多かった。空気清浄機を稼働させない対照試験での内室空气中の浮遊生菌は、初期濃度が異なったが

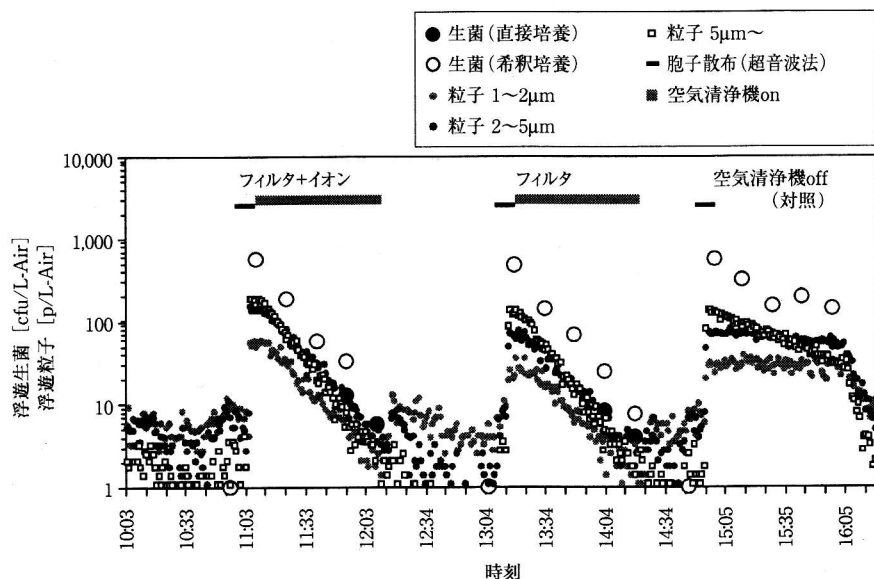


図3 室内空气中の浮遊粒子および浮遊生菌濃度の変化
供試菌 *Penicillium glabrum*。空中超音波法により胞子散布

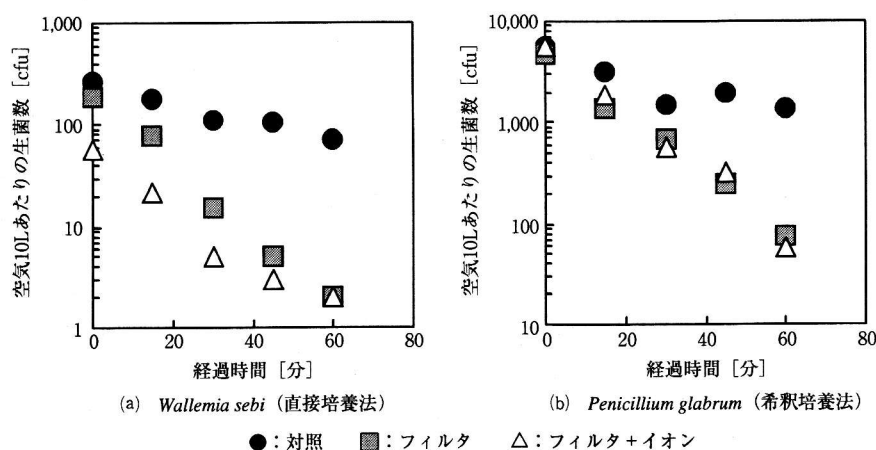


図4 空気中に残存する生菌数の経時変化

経時的な減衰の傾きは2種のカビではほぼ同じであった。フィルタのみで空気清浄機を稼働させた場合も同様で2種のカビで差が認められなかった。フィルタ+イオンで稼働させた場合も同様と思われるが、サンプリング45分と60分で採取された *W. sebi* の生菌数が少なくデータの信頼性が低い。*W. sebi* は、散布胞子濃度を高める必要がある。

なお、*W. sebi* は室内の空中浮遊生菌濃度が低かったため希釈培養法ではゼラ

チンフィルタの溶解液を接種した寒天培地上にコロニーが全く発育しない場合があり、また、*P. glabrum* は空中浮遊生菌濃度が高かったため直接培養法では寒天培地に載せたゼラチンフィルタ上に発育したコロニーが重なり合って数がカウントできない場合が多く、何れも浮遊生菌濃度の経時変化を示すことができなかった。

図5に、胞子散布直後の室内空气中の浮遊生菌濃度を1とした場合の、浮遊生

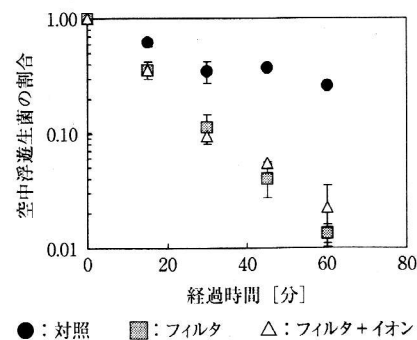


図5 空気中の浮遊生菌残存率の経時変化
Wallemia sebi と *Penicillium glabrum* の平均

菌濃度の平均残存率の経時変化を示す。1時間後の残存率は、対照試験で *W. sebi* が0.26、*P. glabrum* が0.25でほとんど同じであった。空気清浄機稼働時の1時間後の残存率は、フィルタのみの稼働条件で、*W. sebi* が0.01、*P. glabrum* が0.02 (平均0.015)、フィルタ+イオンの稼働条件で *W. sebi* が0.04、*P. glabrum* が0.01 (平均0.025) であった。空気清浄機による生菌除去効果は認められたが(1時間で対照の約1/10)、イオンについては効果が認められなかった。

本試験例は予備試験を兼ねていたため、2回の試験それぞれで、胞子のサイズは同じ(直径3μm)であるが種類の違うカビを散布した。用いた2種のカビの対照試験での生菌濃度の減衰速度が同じで、また2種ともイオンに対する感受性が認められなかったため(図4)、残存率の平均値を求めたが、本来は、同一種類の菌での試験を繰り返して平均残存率を求めるべきである。特に、胞子のサイズが異なるカビを用いた場合は空気中での落下速度が異なるため平均値を求めることはできない。また、空気中に散布された何らかの成分あるいは光線の照射等による除菌を検討する場合には、種によって感受性が異なるため、複数種を用いて試験する場合は、用いたそれぞれの種で同じ試験を繰り返して平均残存率の変化を調べる必要がある。

● まとめ

空気清浄機の空中除菌性能を評価する方法として、試験室の空気中に供試菌(カビ)の胞子を散布し、評価対象の空気清浄機をその室内で稼働させ、散布した胞子(生菌)の気中濃度の減衰を対照試験と比較する方法を用いた。

室内に生菌を散布する評価試験ではバイオハザード対策が必須である。物理的封じ込め策として二重構造で陰圧管理のできる試験室、および試験室内への入室制限を採用し、生物的封じ込め策として37℃(人の体温)で発育しないカビを使用する方法を採用した。

空中浮遊生菌の減衰は、胞子散布直後の濃度を1とした、相対的な残存率の経時変化から表示することができる。これにより散布胞子の初期濃度が試験ごとに異なった場合でも、各経過時間の浮遊生菌残存率を計算し、それらの平均値を用いて、機器稼働条件の違いによる浮遊生菌減衰速度の違いを比較することができる。

空中浮遊生菌の計測は希釈や培養などの操作が入るため誤差が大きい。従って、1回の試験での浮遊菌サンプリング回数を多くし、さらに評価対象機器の同一稼働条件での試験を繰り返して平均値から判断することが、空気清浄機の空中除菌性能の評価に必要である。

● おわりに

ここで紹介した空気清浄機の除菌性能評価法は、あくまでも例示するものである。今後、『室内環境学会標準評価試験法』を提案し、室内環境学会標準化委員会において審議した後、一般公開して意見を取り入れ、必要であれば再度評価試験を行い、室内環境学会標準化委員会において再審議の後『室内環境学会標準評価試験法』を策定する予定である。

室内環境学会において微生物ワーキンググループは2007年に終了し、現在は

生物粒子ワーキンググループの立ち上げを検討している。このワーキンググループにおいて、空中浮遊アレルゲン等の除去性能評価試験法について検討する予定である。

〔プロジェクト参加者およびアドバイザー〕

阿部恵子(環境生物学研究所)、有田佳子(ライオン株)、飯塚 宏(株日建設)、池田耕一(国立保健医療科学院)、石川隆之(アイネクス株)、伊藤 央(南デジタルクオリティーマネージメント)、入江建久(新潟医療福祉大学)、埋橋英夫(宇都宮大学)、大塚哲郎(日本大学)、大谷良平(プロクターアンドガンブルファーマーイストリンク)、岡上晃(財北里環境科学センター)、岡本誉士夫(ダイキン工業株)、奥田舜治(財北里環境科学センター)、角野政弥(財東京顕微鏡院)、狩野文雄(東京都健康安全研究センター)、川上裕司(株エフシージー総合研究所)、楠本 愛(株日立ハウステック)、佐藤成広(松下電器産業株)、篠原克明(国立感染症研究所)、新谷英晴(国立医薬品食品衛生研究所)、須山祐之(東京歯科大学)、高橋佑子(横浜国立大学大学院・現株IHI)、高塚 威(新日本空調株)、高島浩介(国立医薬品食品衛生研究所)、竹内史朗(三菱電機株)、唯岡英介(株日立ハウステック)、谷太美雄(株アイデック)、中井里史(横浜国立大学)、中川 淳(株エフシージー総合研究所)、中根偕夫(日本大学)、永安克志(株アメニティテクノロジー)、南部 桂(松下電器産業株)、橋本一浩(株エフシージー総合研究所)、八太 豊(ミドリ安全株)、藤井拓郎(株日建設)、保明克信(アイネクス株)、星崎潤一郎(三菱電機株)、本田公康(松下電器産業株)、八重樫幸栄(協和工業株)、山岸 弘(ライオン株)、山口 一(清水建設株)、山口陽二(環境リサーチ株)、山下信彦(大阪ガス株)、山村信男((NPO)日本室内予防環境協会)、山本尚理(東海大学)、山田花華(国立保健医療科学院)、矢田 修(日立アプライアンス株)、柳 宇(国立保健医療科学

院)、柳沢幸雄(東京大学)、吉沢 晋(愛知淑徳大学)。50音順。

＜参考文献＞

- (1) 阿部恵子：室内環境学会微生物ワーキンググループの活動について、室内環境、10巻1号、pp.75-76 (2007)
- (2) 阿部恵子・他：微生物ワーキンググループ活動速報-微生物散布と空気清浄機除菌性能評価の予備試験-、室内環境、10巻1号、pp.69-73 (2007)
- (3) 阿部恵子・他：微生物ワーキンググループ活動速報(2)-空気清浄機による空中浮遊カビ(生菌)の除去性能の評価例-、室内環境、10巻2号、pp.163-166 (2007)
- (4) 阿部恵子：カビセンサーを用いた実験、遺伝、56、97-101 (2002)
- (5) 大塚哲郎・仲瀬正樹・中根偕夫：微小物体の超音波浮揚に関する研究、電子情報通信学会、超音波研究会資料、US2005-99 (2005-12)、pp.37-42
- (6) J. Bruce Harstad, Herbert M. Decker, Lee M. uchanan and Melvin E. Fuller. Penetration of Submicron Ti Bacteriophage Aerosols and Bacterial Aerosols through Commercial Air Filter. 9th Air AEC Air Cleaning Conference, Harvard University School of Public Health, September 13-16 (1966)
- (7) 山岸 弘：微生物ワーキンググループの思い出、室内環境、10巻1号、p.80 (2007)
- (8) U. Yanagi, Y. Kawakami, Y. Suyama, T. Otsuka : The Behavior of Bio-aerosols Suspended in Air, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.7, No.2 (投稿中)

筆者紹介

阿部恵子(昭和24年7月12日生)
環境生物学研究所 所長
〒243-0303
神奈川県愛甲郡愛川町中津4036-1
TEL : 046-285-7801
(日中9:00~15:00)
FAX : 046-285-7801
E-Mail : abeiko@kamakuranet.ne.jp