

論文の内容の要旨

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

柳 宇

本論文は、微生物による室内空気汚染の改善に資する研究成果をまとめたものである。とくに、本研究は、室内空気質に大きな影響を及ぼす空調システム内の微生物汚染の実態を把握し、その汚染特性に応じた対策手法を確立することを目的としている。

近年、SARS・新型インフルエンザウイルス・鳥インフルエンザウイルス・ウエストナイルウイルスのようなウイルスによる健康障害のほか、細菌（結核菌、レジオネラ属菌など）・真菌による室内空気汚染問題に関する話題が多方面から注目を集めている。

微生物に関わる室内空気汚染の問題は SBS（Sick Building Syndrome, シックビルディングシンドローム）と BRI（Building-related illness, ビル関連病）の 2 種類に大別される。SBS は“原因物質は特定されない（No specific causative agent has been identified）”特徴を有し、また症候群であるゆえに、医学的に確立した単一の疾患ではなく、環境要素に関わる、居住者に由来するさまざまな健康障害の総称である。これに対して、BRI は原因物質が特定でき、レジオネラ症（Legionnaires' disease）、加湿器熱（Humidifier fever）、過敏性肺炎（Hypersensitivity pneumonia）がその代表例である。

レジオネラ症、加湿器熱、過敏性肺炎の何れを取ってみても空調設備そのものに関わる問題であり、いわゆる BRI というものはその特徴からすればむしろ空調設備関連病とも言

うべきであろう。何れにしても空調設備に関連した微生物汚染問題はその汚染の原因から、① 環境中の微生物粒子が空調システムを介して室内に侵入することによって生じるものと、② 空調システム自身が微生物の温床となり室内の汚染源となるものの 2 種類に分類することができる。両者は全く関係がないものではないが、本研究の内容は主として後者に関するものである。以下に、本論文の各章で得られた主な知見と結論を示す。

第 1 章は、空調システムにおける微生物の汚染と対策に関する研究を実施した背景、既往研究結果のまとめ、本研究の位置づけと目的、および各章の構成と概要について述べた。

本研究は、微生物による空気汚染の問題の中でも、とくに室内に調和された空気を搬送する空調システムの空気搬送系に着目し、それにおける微生物生育環境を含めた汚染実態を明らかにした上で、その汚染特性に応じた対策方法を確立しようとするものである。本研究はそのため以下に示す検討を行った。

- (1) 空調システム内における微生物の生育環境と汚染実態を定量的に把握するとともに、温湿度環境の調整による微生物汚染の制御を検討。
- (2) 空調システム内における微生物汚染の工学的な対策といったハードな面の手法を確立するための検討。
- (3) 空調設備の維持管理面の現状を把握し、日常の維持管理といったソフト面の対策方法を検討。

第 2 章は、まず微生物の分類・性状を概述し、空調システムにおける微生物汚染問題の性質について述べた。次に、実環境下における微生物の生育環境を温湿度との物理的尺度のみならず、カビセンサーによる生物的な尺度からその微生物の生育状況を定量的に評価した。その結果、冷房期と暖房期を問わず空調システム内の温湿度環境は生育ための最低相対湿度を 95% 以上とする好湿性微生物と、70% 以下とする好乾性微生物の生育にとって適さないものの、冷房期のコイル下流からダクト内までの間では、70~95% の広い相対湿度範囲を適とする微生物の生育にとって好環境となっていることが明らかにされた。さらに、相対湿度 70% 以上の累積頻度、即ち、相対湿度が 70% 以上に保たれる時間の長さが微生物の生育状況を左右し、その累積頻度が 30% を超えると微生物の生育速度はそれに比例して速くなることを見出した。また、空調運転停止後の温湿度調整によって、微生物の増殖を抑制できることを明らかにした。

第 3 章は、空調システム内での測定という特徴を踏まえて、付着微生物量、浮遊微生物

濃度の測定方法と測定装置を検討した上で、夏期冷房時と冬期暖房時における空調システム内各箇所の付着微生物量、浮遊微生物濃度に関する実態調査を行った。その結果、空調システム内の各箇所において、細菌を主とした総菌、黄色ブドウ球菌、真菌が検出され、とくに、気化式加湿器の素材表面において、約 50[cfu/cm²]の総菌、360[cfu/cm²]の真菌が検出され、空調システム全体に対する微生物汚染の対策を施す必要があることが明らかにされた。また、一ビルではあるが、空調システム内から微生物が発生し、室内に侵入することが測定結果より示された。

第 4 章は、微生物汚染の温床となっているダクト内の汚染実態の解明とダクト清掃による微生物汚染の低減効果について検討した。

まず、築後 19 年のオフィスビルにおいて、給気ダクト内で 1.9~2.8g/m²、還気ダクト内で 2.4~13.5g/m²の付着粒子量が測定され、付着総真菌数は付着粒子重量に比例し、1g の付着粒子に約 42,000 個の真菌が存在することを定量し、ダクト清掃によって粒子状物質と同時に微生物も除去されることを明らかにした。また、清掃作業中に発生したダクト内浮遊粒子を除去するため、ダクト清掃直後から入居するまでの間において半日間のクリーンアップ運転が必要であるという重要な指針を得た。

次に、面積率により付着粒子重量を予測する方法を検討した。また、ダクト内の付着粒子量は時間経過に従って指数関数的に高くなることを明らかにした。給気、還気ダクト内に付着する粒子の粒度分布は何れも対数正規分布に従い、それぞれの個数幾何中位径は 2~4μm, 4~7μm であり、堆積粒子径が 40μm 以上に成長すると再飛散しやすくなることを明らかにした。

さらに、空調用ダクト清掃効果を評価するための簡易評価法である「デジタル画像法」を提案し、9 つビルの実測値より検証を行った結果、その有効性を確認した。デジタル画像法は操作が容易に行え、試料の採取から解析結果までの一連の操作が短時間で可能なため、ダクト清掃効果の評価、とくに清掃後のような付着粒子量の少ない場合に対しても適用できることを明らかにした。

第 5 章は、微生物汚染の温床となっているコイルに関して、無機系抗菌剤を施した場合の抗菌効果を評価し、その適用について検討を行った。

まず、フィルム密着法に準じて、抗菌材の抗菌性能に関する試験を行った結果、本研究に用いた抗菌材は、大腸菌、黄色ブドウ球菌に対して強い抗菌性能を有することを確認した。さらにコイル表面中の金属イオンを微量分析より定量し、その結果から抗菌メカニズ

ムの考察を行った。

次に、コイルのフィンに抗菌処理を施したファンコイルユニットでの抗菌性能評価方法と抗菌性能を定量的に評価するための指標 API (Antibacterial Performance Index) を提案し、実際の空調運転時を想定しての評価を行い、フィルム密着法の結果を検証するとともに、API 指標での比較を行い、その有用性を確認した。

第 6 章は、実環境下で、エアフィルタによる微生物粒子の捕集性能について検証を行った結果、エアフィルタによる浮遊微生物粒子の捕集率と粒径別浮遊粒子の捕集率との間に有意な相関関係が認められ、浮遊黄色ブドウ球菌、浮遊総菌、浮遊真菌に対するそれぞれの捕集率は $1\mu\text{m}$ 以上、 $2\mu\text{m}$ 以上、 $5\mu\text{m}$ 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した。また、浮遊粒子のみならず、浮遊微生物粒子の除去の視点からも中性能フィルタの設置が望ましいことを明かにした。

さらに、黄色ブドウ球菌数は総菌数の間に有意な相関関係にあり、その 20% 強を占めること、また、これは筆者らが病院の待合室・病室・集中治療室での測定結果と一致し、黄色ブドウ球菌は総菌の代表指標として用いられることを明かにした。

第 7 章は、空調設備の維持管理現状を把握するために行った全国規模のアンケート調査について解析を行った。その結果、地域と建築規模の間と空調設備については有意な差がなく、その維持管理も同じように行われていることがわかった。また、建築物衛生法の対象であるか否かによって、中性能フィルタの設置やコイル・加湿器の清掃において有意な差が認められ、建築物衛生法の有用性を再確認した。

アンケート調査の結果より、維持管理の面による微生物汚染の低減の面においても、中性能フィルタの設置、コイルと加湿器の定期清掃が重要である一方、清掃のしやすい空調機の設置が望ましいことを明かにした。

第 8 章は、第 1 章～第 7 章の内容を総括した。

本研究は、微生物の生育環境の定量、汚染実態の把握、諸対策の検討に関する一連の研究成果から空調システムにおける微生物汚染の実態を解明し、その汚染特性に応じた対策手法を提案するものとなっている。本研究は今までなかなか系統的に解明されて来なかった空調システム内微生物汚染の実態システムに捉え、その対策方法を定量的に提案するものであり、今後この分野の技術開発、対策研究に大きく貢献できるものと考えている。