

## 論文の内容の要旨

論文題目 建築衛生上微生物汚染防止のための紫外線殺菌効果の評価に関する研究

氏名 成 旻起

建物は原始時代の人の安全を守る基本的な役割から始まり、近代は基本的な安全確保の他、快適な生活ができる役割を担うように変化してきた。しかしながら、現代は生活の質向上に従い、在室者に快適かつ健康を増進するような室内環境を提供しないといけなくなった。建物において在室者の健康に脅威を与える汚染物質はその発生源の検知及び除去のみならず、汚染発生の事前防止対策までが要求されている。

1979年のオイルショックにより省エネルギー性が何より重視された1980年の後、1990年代には建築衛生の面を軽視した過重な省エネルギー化による室内空気汚染の問題が大きな問題となった。このため、特に室内仕上げ建材からの揮発性の化学物質によるシックハウス症候群の原因究明及び対策に関する研究が活発に始まった。その結果、2000年代には徐々にこの室内の揮発性化学物質による空気汚染状況が改善されていると報告されている。

しかしながら、室内においての微生物による空気汚染に関してはその汚染源の同定が簡単ではなく、微生物汚染の現状把握が引き続き行われているものの改善対策もまだ明確には提案されていない。この傾向は近年にはシックハウス問題の懸念から、建材への化学物質使用が減少していくことにより、一層、微生物が生息しやすくなり、これによる汚染が増加するとの懸念もある。

微生物汚染に関しては、カビ等真菌による汚染の他、主に感染症に感染した在室者から室内に拡散される感染性の浮遊汚染物質（細菌やウイルス）も課題となる。この感染性の浮遊微粒子汚染に対しては、近年集団感染で世界的な問題となったSARS（重症呼吸器症候群）や最近のインフルエンザの大流行等に従い、建築衛生上の管理が重大な課題となっている。特に不特定多数の人々が滞在する病院やショッピングモール、ターミナル、劇場等は屋外に比べ密閉された空間が多く、感染者からの感染性の浮遊微粒子汚染物質が咳や呼吸によって拡散され、他の人の感染を招きやすい環境となっている。

このように室内環境において微生物による健康被害及び感染性の浮遊汚染物質の拡散に対して積極的な対策が要求されている。

本研究は建築衛生上微生物による汚染及びウイルス等による感染拡散の対策として殺菌効果が優れた紫外線殺菌システムの適用性を検討し、殺菌効果を予測する方法を提案した。本研究で検討した一連の予測評価方法によって最適な殺菌効果が得られる適用方法の提案ができると期待する。

各章の検討結果をまとめると以下のようである。

第1章では、本研究の社会的学文的な背景を述べ、本研究の必要性及び目的を説明した。

第2章では、建築衛生上の微生物汚染及びウイルスによる感染拡散の危害性及びその対策を既往の文献により検討した。室内では建物の構造体及び空調機等の設備における真菌の増殖により在室者への健康上被害を起こす可能性が高いと知られており、その対策が不可欠である。また、建物で細菌による在室者の感染は人由来のケースが多く、空気感染の恐れも高い。インフルエンザウイルスによる感染拡散の場合、主に飛沫による感染が知られているが、空気感染も疑われている。特に不特定多数の人が集まる病院等の建物において細菌及びウイルスによる感染拡散の可能性が高いので建築衛生上の対策が必要である。

微生物及びウイルスの汚染対策としてフィルターを設置した場合、その除去効果は高いが、一般的にフィルターの高い気流抵抗のためエネルギー消費量を懸念し、適用性に限界がある。他の殺菌技術に比べ紫外線殺菌の場合、その殺菌効果が明確で、制御性、経済性が優れており、建築衛生上対策として適用性が高いと考えられる。

第3章では、紫外線殺菌に関する基本情報及び既往の研究を調べた。主に人工的な方法で求められる殺菌用紫外線はその殺菌効果が原理的にも明確で、微生物及びウイルスを対象とした数多くの実証研究が行われてきた殺菌方法である。オゾンの発生や人体への曝露、劣化の恐れがある物質等に対して十分な注意をしながら活用するのであれば建築衛生上の応用範囲は広い。

伝統的に結核等の大量感染の恐れがある病院を主に対象にしており、この分野での紫外線殺菌の積極的な活用を叫ぶガイドラインが現在まで発表されているが、結核や病院のみならず、不特定多数の人が集まる建物においてインフルエンザ等の感染拡散等の対策としても紫外線殺菌を適用することが検討されている。特にアメリカやヨーロッパ等で近年建物の室内環境のための研究及び実績が続々発表されている中、日本でもその適用可能性を幅広く検討すべきだと考えられる。

第4章では、体表的な環境微生物（真菌及び細菌）及びインフルエンザウイルスを対象として紫外線殺菌の基礎実験を行った。その結果、既往の研究通り、全体的に真菌より細菌のほうが紫外線に殺菌されやすい結果が得られた。殺菌係数から判断すると *S. aureus*、*E. coli*、*P. pinophilum*、*C. cladosporioides*、*A. niger* の順で殺菌されやすい。特に *P. pinophilum* の結果では、低い照射量では殺菌効果が遅れる初期遅延効果が観察された。また、胞子を1日培養してから行った紫外線照射実験でもほぼ同じ結果が得られた。

インフルエンザウイルスを用いた実験結果からも既往の研究結果とほぼ同じ殺菌係数が得られた。インフルエンザウイルスの種類（A/H3N2 及び A/H1N1）によっても変化がほとんどなく一定な結果を示した。

第5章では、紫外線センサーを用いた実測によって UR-UVGI 装置及び ID-UVGI 装置の紫外線強度の配光分布を確認した。その結果、UR-UVGI 装置の場合、紫外線ランプの前方に設けられたルーバーによって垂直に狭いビームを照射していることが確認された。この結果から室内上部に設置される UR-UVGI 装置からの強い紫外線が室内上部だけを照射し、在室者に影響を与えないように室内下部には照射しないことが分かる。しかし、UR-UVGI の設置する際に水平性がずれると在室者に照射される紫外線の強度が高くなる危険性があるので、設置の際や設置の後、室内下部に曝露ガイドラインの  $0.02 \text{ mW/m}^2$  以上の紫外線が照射されないように確認する必要がある。

る。

ID-UVGI の場合、紫外線ランプの設置位置によって各表面の紫外線強度分布が大きく変わり、共に空調機内部の構成物にも注意が必要と確認された。空調機が稼働してない状態で測定を行ったため、実際運転する際、気温及び気流によるランプ表面の温度低下によって出力が下がることも考慮する必要がある。

第 6 章では、紫外線強度とともに気流の解析により UR-UVGI の殺菌効果を評価する方法を検討し、実際の病室モデルに適用してその適用性を確認した。評価の結果、検討された評価方法によって UR-UVGI の設置位置及び空調方式による殺菌効果の明確な差が得られた。UR-UVGI を設置した近傍で高い紫外線照射量を示す。UR-UVGI による殺菌効果を高めるためには排気口と UR-UVGI 装置を近いところに設置しないほうが望ましい。UR-UVGI により結核菌のように細菌には比較的の高い殺菌率が予想できるが、カビには殆ど殺菌効果がない。

第 7 章では、ID-UVGI システムの殺菌効果を予測するために紫外線の強度分布を放射解析により求めた。放射計算の主な手法として用いられている形態係数法及び光線追跡法に関して検討を行い、精度が高い光線追跡法を利用することにした。光線追跡法を採用している RADIANCE を用いて、ある ID-UVGI システムにおける紫外線の表面及び空間強度を求めた。その結果、同数のランプであっても設置方法によって表面の紫外線強度分布はかなり変わることが分かった。しかし、空間分布は殆ど変化がなかった。放射解析によって求めた紫外線強度から代表的な環境微生物を対象として検討したところ空調機の表面では 1 時間半で 99% 以上殺菌できると予測されたが、空間では真菌の殺菌率が低く予測された。実測との比較結果、大きな差が見かけられ、実測で使われたセンサーを確認したところ、紫外線センサーのコサイン補正に問題があることが分かった。以上の結果により光線追跡法 (RADIANCE) を用い ID-UVGI システムの紫外線強度分布解析は有効であると考えられ、殺菌効果の予測及び ID-UVGI システムの最適な稼働時間の設計等に活用できると期待される。

第 8 章では、事務所ビルの空調機を対象として真菌及び細菌の環境微生物の実測によって ID-UVGI の殺菌効果を確認した。1 年以上に渡って行われた今回の実測によって ID-UVGI の殺菌効果が明らかになった。付着菌及びドレン水に関しては明確な殺菌効果を示したが、浮遊菌に対しては不十分な結果であり、空調方式など多様な条件の空調機を対象として ID-UVGI の殺菌効果データを追跡する必要がある。室内に供給される空気質管理のためには空調機での環境微生物のみならず、外気の状態、ダクト及び吹出し口の清浄状態等の確認も必要である。今回の実験では ID-UVGI を 24 時間稼働したが、紫外線強度の予測によって細菌効果及び省エネルギーを考慮した最適な稼働条件を導く必要があると考えられる。

第 9 章では、循環式空調機を採用している病院において感染性汚染物質が発生した場合の拡散形状及びその対策として ID-UVGI の効果を実験及び定常ネットワークモデルで検討した。その結果、病室等各空間における圧力制御により気流が設計通りに流れていることを、白煙を用いた可視化及び toluene-d8 を用いた拡散実験により確認した。ある病室で発生した汚染物質は循環式空調システムにより同じ系統にある他の病室まで拡散することが分かった。循環式空調方式であっ

ても ID-UVGI により感染性汚染物質の拡散が防止できると予測された。ただ、発生源のある病室内や廊下等での感染性汚染物質汚染にはまだ議論の余地が残っている。ID-UVGI に加えて発生源制御のため、病室内に個別換気又は UR-UVGI 等の工夫が必要と考えられる。

第 10 章では、本論文の総括を示し、併せて今後の研究課題を提示した。