

酸化チタン担持セラミックフィルターの光触媒反応による抗菌効果の検討

中尾 美幸

岡山大学大学院医歯薬学総合研究科 病原細菌学
(指導責任者: 小熊恵二 教授)

Antibacterial efficacy of photocatalytic reaction on titanium dioxide-coated ceramic air filters

Miyuki Nakao

Department of Bacteriology, Okayama University Graduate School of Medicine, Dentistry and Pharmaceutical Sciences, Okayama 700-8558, Japan

Titanium dioxide (TiO_2) photocatalysis generates reactive oxygen species such as $\cdot OH$ and $\cdot O_2^-$, which can effectively eliminate organic compounds. In the present study, we evaluated the antibacterial and antifungal effects of TiO_2 -coated ceramic air filters in both laboratory and hospital settings. Photocatalysis with the TiO_2 -coated ceramic filter effectively inactivated all 4 pathogenic organisms tested. *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* and *Candida albicans*. After the photocatalysis reaction for 4 h under UV-A (365 nm, 250 $\mu W/cm^2$) irradiation, the percentage reductions of the number of *E. coli*, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, *C. albicans* cells were 99.9%, 98.9%, 97.7% and 99.9%, respectively, indicating that Gram-negative bacteria are more susceptible to such photocatalysis than Gram-positive bacteria. Scanning electron microscopic analysis showed damage to the cytoplasmic membrane and cell wall by photocatalysis: consistent with above observations, the morphological change of Gram-negative *E. coli* was greater than that of Gram-positive *S. aureus*.

Further, an air cleaner equipped with a TiO_2 -coated ceramic filter significantly decreased the number of bacteria floating in hospitals.

These results indicate that air cleaners with TiO_2 -coated ceramic filters could be useful in reducing the incidence of nosocomial infections.

キーワード: 光触媒 (photocatalysis), 酸化チタン担持セラミックフィルター (TiO_2 -coated ceramic air filters), 抗菌効果 (antimicrobial effect), 院内感染 (nosocomial infection), 空気清浄機 (air cleaner)

緒 言

わが国では医療の進歩に伴い、高齢者をはじめとする易感染者が増加し日和見感染のリスクが高まっている¹⁻³⁾。日和見感染の起因菌には、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌 (methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* : MRSA), バンコマイシン耐性腸球菌 (vancomycin-resistant *Enterococcus* : VRE), 多剤耐性アシネットバクター (multiple drug-resistant *Acinetobacter* : MDRA) や多剤耐性緑膿菌 (multiple drug-resistant *Pseudomonas aeruginosa* : MDRP) などの多剤耐性菌がある。これらの菌に感染すると使用できる抗生素が限定され、治療が困難となり症状

が重篤となる場合もある。このことから、病院をはじめとする保健・医療施設において室内環境を整えることは、院内感染対策として極めて重要である。

ところで、光触媒は、光を吸収することによりその表面で水と酸素からヒドロキシラジカルなどを発生させ、細菌、有害物質、悪臭などを酸化・還元反応により最終的に無害な二酸化炭素と水に分解する。今から約40年前に「ホンダ・フジシマ効果」⁴⁾として発見された酸化チタン (TiO_2) は代表的な光触媒物質で、種々の材料に担持出来るようになり、1990年代後半から、酸化チタン光触媒の抗菌、防汚、脱臭などの機能を応用した製品が多数開発されている。近年、盛和工業株式会社より開発された酸化チタン担持セラミックフィルターは、①フィルター表面が多孔質で表面積が大きく、担持する TiO_2 の量を増やすことができる、②フィルターが不燃物であることから光源を近づけることができる、③空孔率が高く通気抵抗が極めて小さい、④骨格が

平成23年12月5日受理

〒703-8501 岡山市中区平井1-14-1 山陽学園大学
電話: 086-272-6254 FAX: 086-273-3226
E-mail: mnakao@sguc.ac.jp

ランダムに存在するため流体との接触効率が高い、⑤表面が汚れても洗浄することで繰り返し使用ができるという特徴を有しており、このフィルターを搭載した空気清浄機は、高い抗菌・脱臭効果が期待されるため、院内感染対策として有用であると考えられている。光触媒の抗菌効果を示す報告⁵⁻⁸⁾は多数あるが、その多くは実験用にガラス上表面に簡易コーティングしたものや専用装置内でのものであり⁹⁻¹¹⁾、病院や施設で実際の装置を使用した研究はほとんどない。

そこで、本研究では酸化チタン担持セラミックフィルターを搭載した空気清浄機の院内感染菌に対する効果を実験室レベルのみならず、病院・施設で評価検討した。

材料と方法

1. 酸化チタン担持セラミックフィルターの抗菌効果

1) フィルター

実験には、実際の空気清浄機に使用しているものと同じ酸化チタン担持セラミックフィルター (TiO₂フィルター) と、コントロールとして酸化チタンを担持していないセラミックフィルター (無加工フィルター) の2種のフィルターを使用した。各フィルターは、縦20mm・横20mm・高さ5mmの大きさとし、蒸留水による洗浄後、オートクレーブ (121°C, 20分) で滅菌して使用した。

2) 供試菌

実験に使用した菌は、臨床分離株である, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*,

Candida albicans の4種である。菌数が10⁷個/mlとなるように、培養24時間以内の菌を生理食塩水を用いて希釈し、これを試験菌液とした。*C. albicans*においては、10⁵個/mlの菌液を調製した。

3) 光触媒反応

光触媒反応は、JIS (日本工業規格) R1702¹²⁾ と石黒らの方法⁹⁾に従った (図1)。各フィルターを生理食塩水に5分以上浸漬させた後、遠心分離 (43×g) により余分な水分を除去した。この時、フィルターは生理食塩水を約1.2ml含んでいる状態であった。滅菌シャーレに蒸留水を含ませたカット綿を置き、ガラス棒を設置した。その上にフィルターをのせ、試験菌液100μlをフィルターに接種後シャーレの蓋をして、UV照射 (ブラックライト365nm) 250μW/cm²を0～4時間行った。

無加工フィルターとTiO₂フィルターを用い、それぞれにUV照射を行ったものと行わないものの計4群を作製した。なお、UV照射を行わないフィルターは、処理時間中は暗黒下においてた。

光触媒反応後、8.7mlの生理食塩水が入った遠沈管にフィルターを入れ、振とうにより菌を溶出し、洗浄液を10倍段階希釈後、希釈液100μlを普通寒天培地に接種し、37°Cで24時間培養して生菌数を測定した。

実験はそれぞれ3回ずつを行い、生菌数の平均値をデータとして示した。

4) 走査型電子顕微鏡による細菌の形態観察

S. aureus および *E. coli* の菌液を10⁷個/ml以上となる

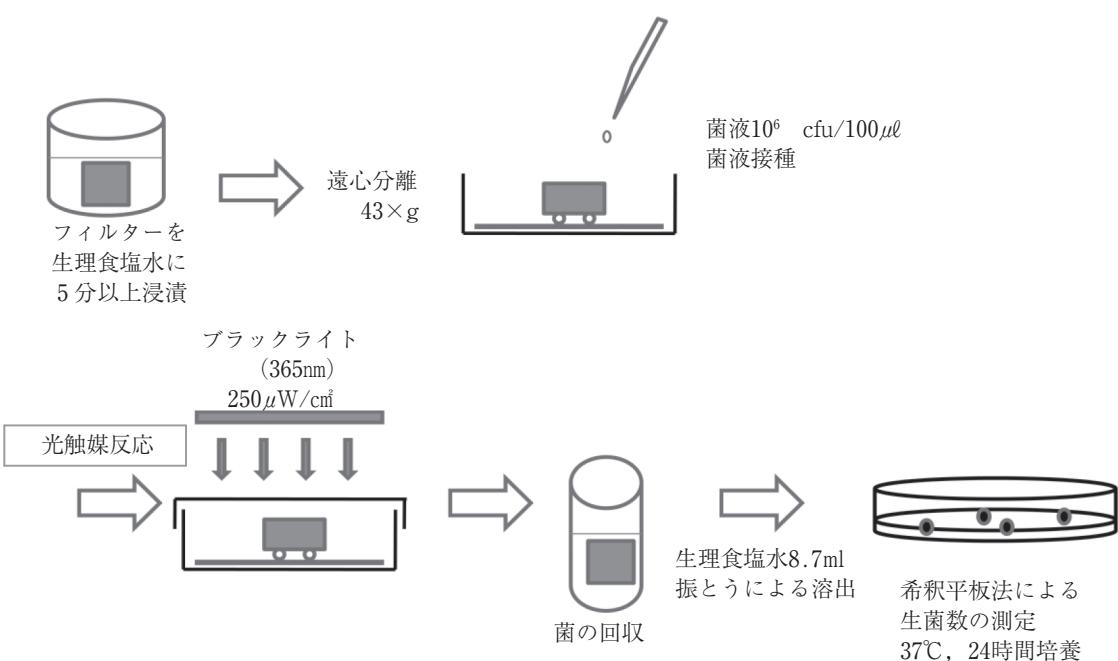


図1 光触媒反応実験の概略

ように調製し、フィルターを菌液の中に5分以上浸漬した。その後、4時間UV照射した。コントロールとして、UV照射を行わないものを作製した。そして、2%グルタルアルデヒドと2%パラフォルムアルデヒドで前固定、0.1Mリン酸バッファー(pH7.4)による洗浄、エタノールの上昇系列による脱水を順に行った。続けて、t-ブチルアルコールで置換した後、凍結乾燥し、各フィルター上の細菌の形態を走査型電子顕微鏡(S-4800、日立ハイテクノロジーズ製)により観察した。

2. 酸化チタン担持セラミックフィルターを搭載した空気清浄機の居室空間における効果

1) 使用機器および菌の捕獲

光触媒環境浄化装置SPP-20iT(Y)(盛和工業株式会社)を用いた。浮遊菌は、RCSエアーサンプラー(ビオテスト社)を用い、8分間(320ℓ)空気を吸引することにより専用の普通寒天培地に捕獲した。その後、35℃で30時間培養し、菌数を計測した。また、色や形態の異なる菌を培地より2~3コロニー釣菌し、アピマニュアルキット(システム・ビオメリュー株式会社)により菌の同定を行った。

2) シーツ交換時の浮遊菌数の変化

A施設(病院)の個室(24m²)において、空気清浄機稼働の有無による浮遊菌数の比較を行った。エアサンプラーはベッド近くに設置し、シーツ交換前とシーツ交換直後、シーツ交換30分後および60分後に浮遊菌を捕獲した。なお、空気清浄機稼働とシーツ交換開始は同時スタートとした。空気清浄機を稼働させた場合と稼働させない場合で、それぞれ3回ずつ実施し、浮遊菌数の平均値および標準偏差をデータとして示した。

3) 居室空間における浮遊菌数の変化

B施設(老人福祉施設)の個室(15m²)およびC施設(病

院)の2人部屋(25m²)において、空気清浄機稼働の有無による浮遊菌数の変化を比較した。まず空気清浄機の稼働前に浮遊菌を捕獲し、その後から装置を稼働させて3時間後まで1時間毎に浮遊菌を捕獲した。空気清浄機を稼働させない日は、入室者への処置などを考慮しつつ、空気清浄機を稼働させた場合とほぼ同じ時刻で同様の条件となるように浮遊菌を捕獲した。B、C施設では、実験中にスタッフの出入りが認められたので、居室空間へのスタッフの出入りや処置などをすべて記録するとともに、温度と湿度の計測をした。空気清浄機を稼働した場合と稼働しない場合の実験は、B施設では2回ずつ実施し、浮遊菌数の平均値をデータとして示した。また、C施設では3回ずつ実験を行い、浮遊菌数の平均値および標準偏差をデータとして示した。

結果

1. 酸化チタン担持セラミックフィルターの抗菌効果

1) 各種菌に対する抗菌効果

図2に示すように、無加工フィルター・UV照射無、無加工フィルター・UV照射有、およびTiO₂フィルター・UV照射無の場合には抗菌効果を認めなかった。しかし、TiO₂フィルター・UV照射有の場合は、4種の菌すべてに対して抗菌効果を認めた。S. aureusでは、時間経過とともに緩やかに生菌数は減少し、4時間後には生菌数は1桁減少した(減少率97.7%)。E. coliでは、90分から生菌数の減少は顕著で、4時間後には2桁以上の減少を認めた(減少率99.9%以上)。P. aeruginosaにおいては、生菌数の減少が現れはじめるまでに時間を要したが、4時間後には約2桁の生菌数の減少となった(減少率98.9%)。C. albicansは、30分後より生菌数の減少が著明であり、時間経過とと

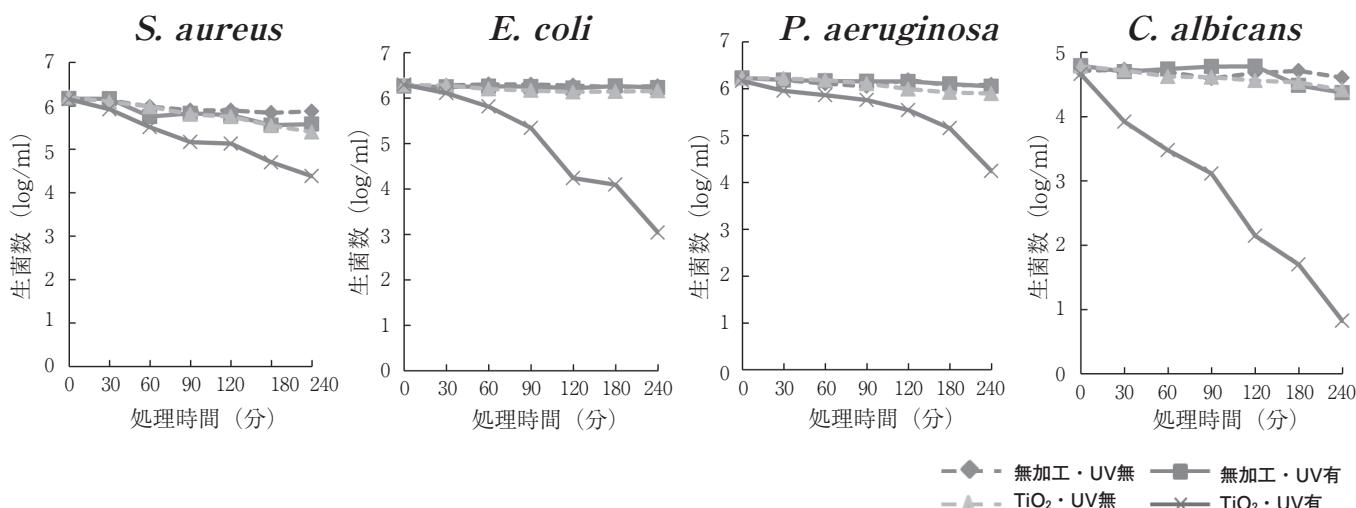


図2 光触媒反応後の生菌数

もに生菌数はさらに減少し、4時間後には4桁以上減少した（減少率99.9%以上）。

2) 走査型電子顕微鏡による菌の形態観察

走査型電子顕微鏡により *E. coli* と *S. aureus* の形態を観察したところ、無加工フィルター・UV 照射無の4時間は、0時間と形態に変化はなかった。しかし、 TiO_2 フィルター・UV 照射4時間では、観察された *E. coli* と *S. aureus* の細胞表面に多数の皺を認めた。また、*E. coli* では、菌体の中央部分にくぼみがみられるなど形態が変化しているものが多く観察した。*S. aureus*においては、球状を維持していたが、細胞表面にくぼみを認めるものを一部認めた(図3)。

2. 酸化チタン担持セラミックフィルターを搭載した空気清浄機の居室空間における効果

1) シーツ交換時の浮遊菌数の変化

A施設において、空気清浄機稼働の有無による浮遊菌数(平均値)を比較した結果を図4に示した。室温は23.0～

25.1°Cで、湿度は60～68%であった。交換されたシーツは、それぞれ7日間使用したものであった。シーツ交換は2名の看護師で行っており、所要時間は毎回約2分であった。シーツ交換中は、入室者は不在であり、スタッフの出入りはない状態であった。

シーツ交換直後は、浮遊菌数が最も多い状態で、空気清浄機を稼働しない場合の浮遊菌数は46 colony forming unit (cfu) で、空気清浄機を稼働した場合の浮遊菌数は37 cfu であった。シーツ交換直後から浮遊菌数は減少し、空気清浄機を稼働しない場合は、シーツ交換30分後には17 cfu、60分後には11 cfu であったが、空気清浄機を稼働した場合は、シーツ交換30分後より 1 cfu となり60分後には浮遊菌は0 cfu となった。空気清浄機を稼働させた方が、装置を稼働させない場合と比較して、浮遊菌数は少なかった。

2) 居室空間における浮遊菌数の変化

B施設とC施設での実験結果をそれぞれ図5と図6に示

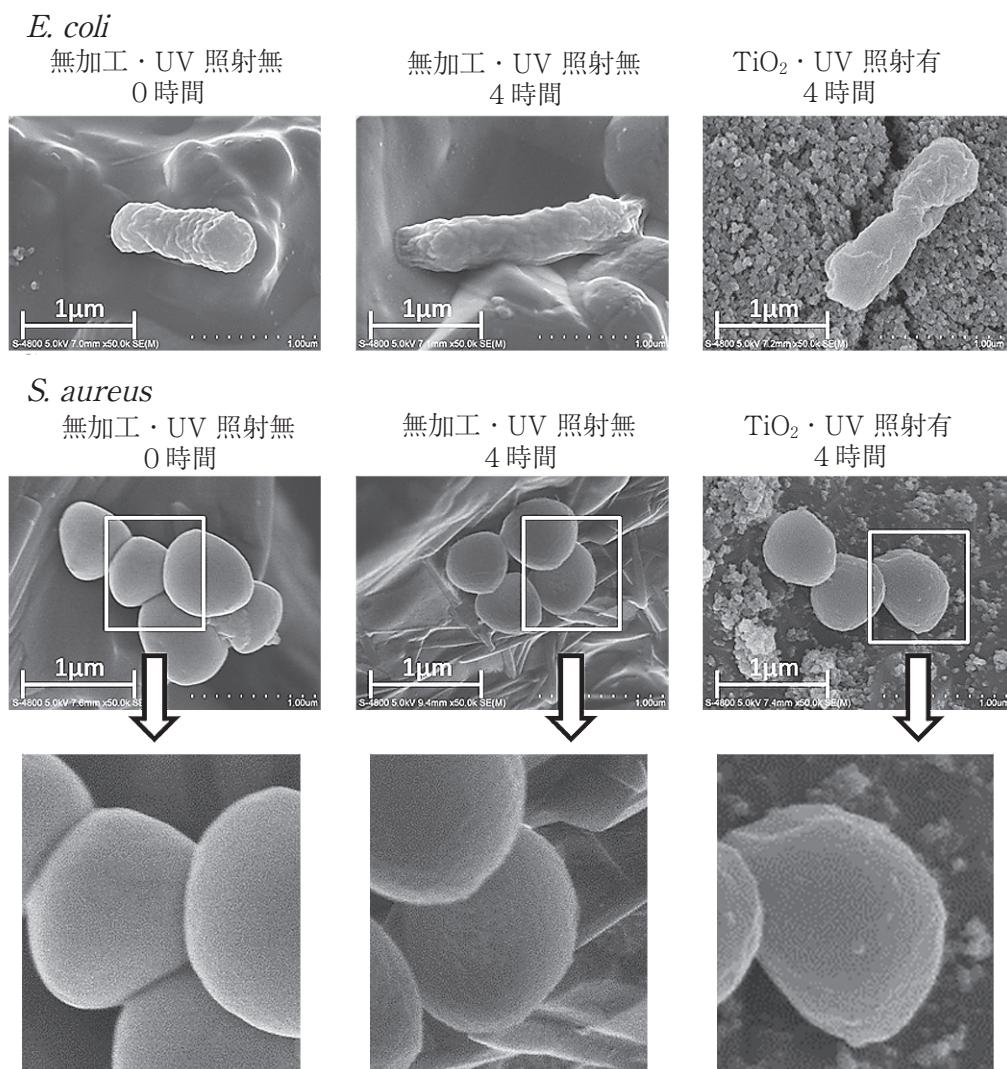


図3 走査型電子顕微鏡による形態観察

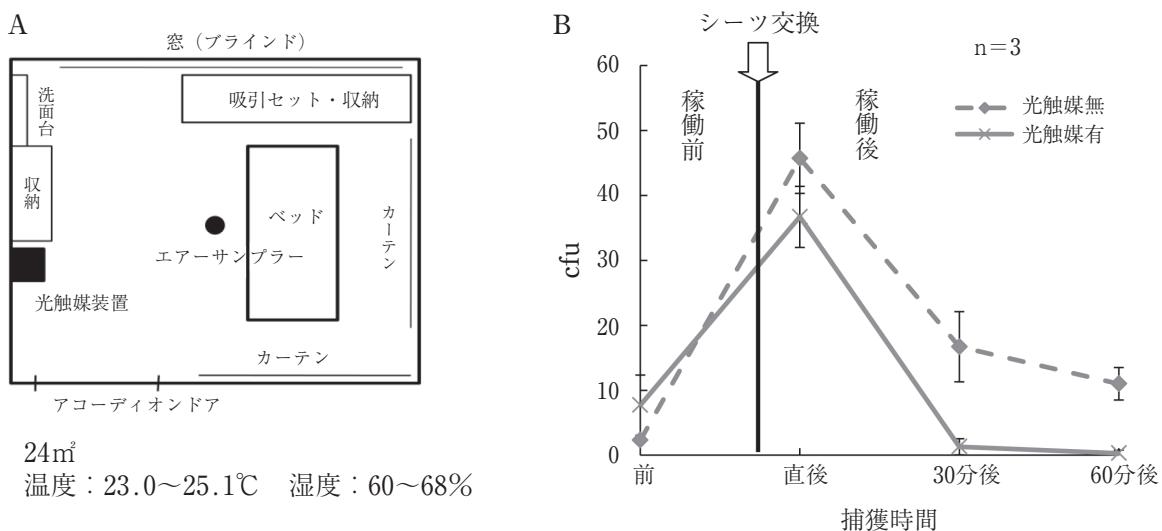


図4 A施設における光触媒効果

A：見取り図, B：空気清浄機稼働の有無によるシーツ交換時の浮遊菌数の変化。

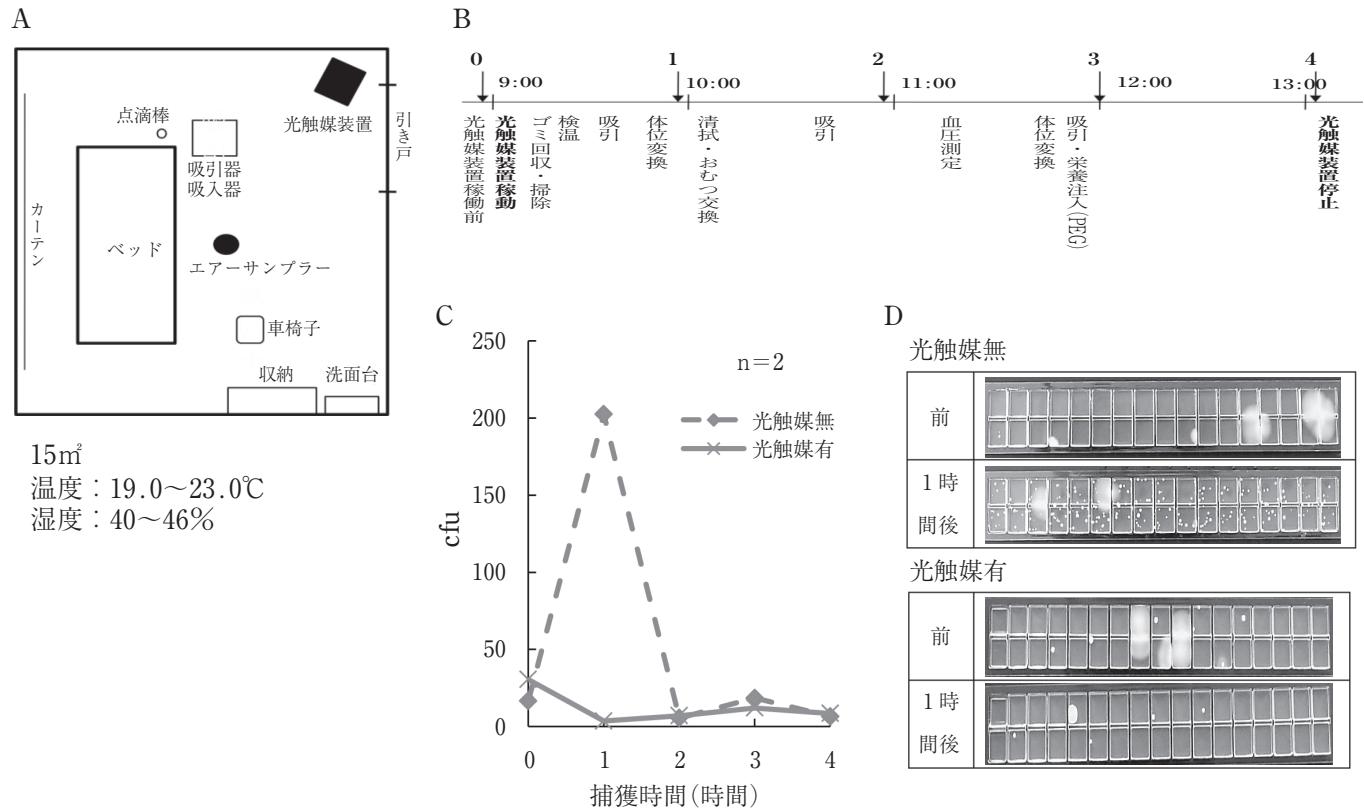


図5 B施設における光触媒効果

A：見取り図, B：浮遊菌捕獲時間と主な動き, C：空気清浄機稼働の有無による浮遊菌数の変化, D：エアーサンプラーで捕獲した浮遊菌。

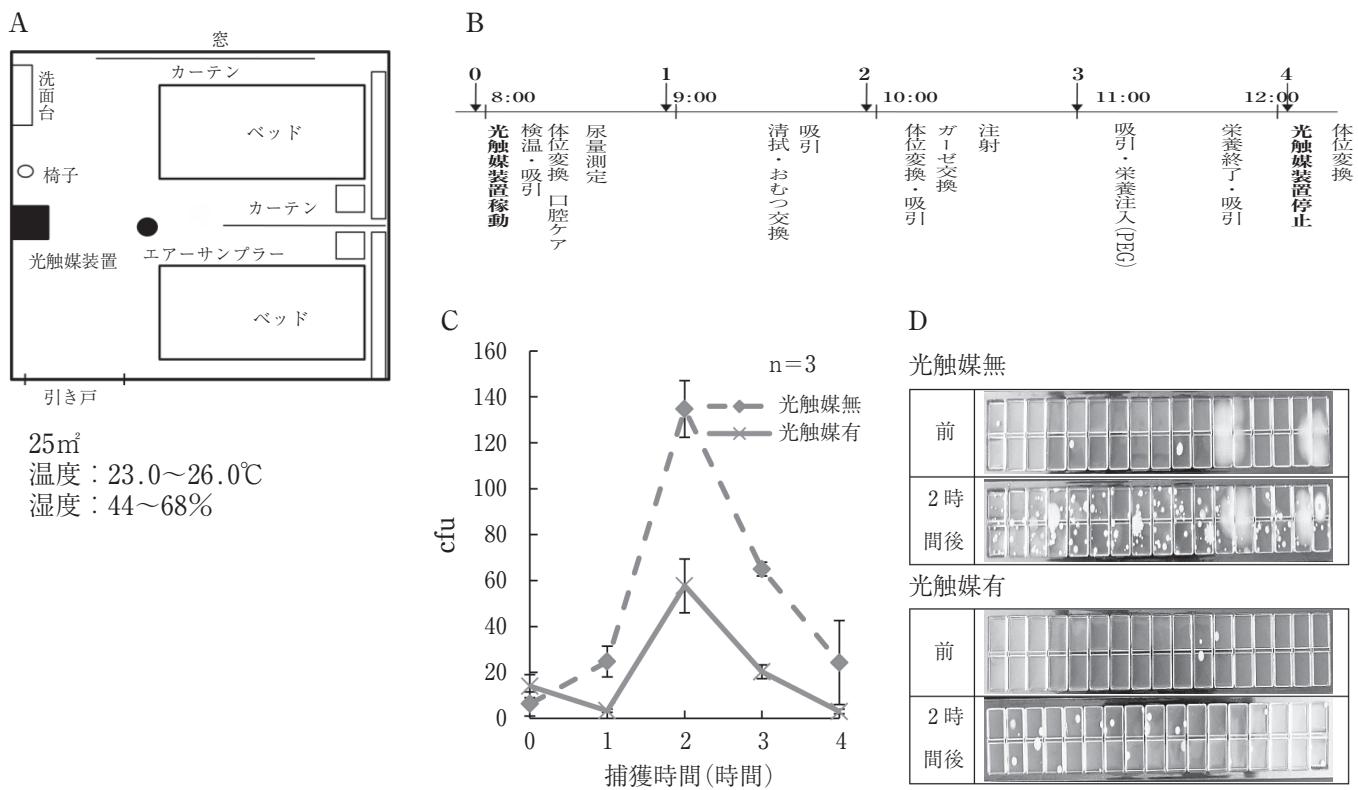


図6 C施設における光触媒効果

A:見取り図, B:浮遊菌捕獲時間と主な動き, C:空気清浄機稼働の有無による浮遊菌数の変化, D:エアーサンプラーで捕獲した浮遊菌.

した。B施設における室温は19.0~23.0°Cで、湿度は40~46%であった。また、C施設の室温は23.0~26.0°Cで、湿度は44~68%であった。

B施設とC施設ともに、入室者は医療依存度が高く寝たきりの状態で、処置などのためにスタッフが頻回に入出していた。2施設において、体位変換などの処置後には浮遊菌数が増加した。浮遊菌数を比較すると、装置を稼働した場合の方が浮遊菌数は少ない結果であった。B施設では、空気清浄機を稼働させない場合、実験開始1時間後には吸引や体位変換などの処置後には、200cfu以上の浮遊菌が捕獲された。一方、空気清浄機を稼働させた場合には、装置稼働1時間後から4時間後まで浮遊菌はほとんど捕獲されなかつた。C施設では、清拭や吸引の処置後である2時間後に最も多く浮遊菌が捕獲され、その後少しづつ浮遊菌数は減少した。装置を稼働させた場合は、装置を稼働させない場合と比べて捕獲される浮遊菌数は半分以下となっていた。また、C施設では、装置を稼働させない場合、捕獲した浮遊菌の中に多くのカビを認めたが、装置を稼働させた場合は、捕獲されるカビは少なくなっていた。

B, C施設で捕獲した菌を同定した結果、その多くは *Micrococcus* や表皮ブドウ球菌であった。B施設において、

S. aureus を認めたので、薬剤感受性試験 (SNディスクおよびP/Cアーゼテスト-N「ニッスイ」)を行ったが、結果は分離した *S. aureus* はオキサシリンに感受性を示し、ペニシリナーゼは陰性で MRSA ではなかった。

考 察

1. 酸化チタン担持セラミックフィルターの抗菌効果

実験に使用した4種のすべての菌に対して、TiO₂フィルターにUV照射を行った場合には抗菌効果がみられた。しかし、グラム陰性菌である *E. coli* や *P. aeruginosa* および真菌の *C. albicans* に対しては抗菌効果が高かつたが、グラム陽性菌である *S. aureus* に対する抗菌効果は他3種に比べて低い結果であった(図2)。このことは、グラム陽性菌とグラム陰性菌の細胞壁の構造上の違いが抗菌効果に影響しているものと考えられた¹³⁾。つまり、ペプチドグリカン層の厚いグラム陽性菌に対しては、抗菌効果を発揮するのに時間を要すると考える。

UV照射4時間のTiO₂フィルター上で走査型電子顕微鏡による菌の形態観察では、*S. aureus*と*E. coli*の表面に多数の皺を認めるなどの変化があった(図3)。このことは、Kangwansupamonkonらの結果と同様であった¹⁴⁾。

Saito らは、連鎖球菌に対する光触媒実験において、まず細胞壁の損傷により、細菌内部からカリウムイオンが急速に露出し、その後1分以内にタンパク質やRNAが放出され、60~120分の光触媒反応で生存能力は完全に失われるとしている¹⁵⁾。また、光触媒反応の早期に起こる細胞表面の損傷によるカリウムイオンの露出は、細胞死を意味するとの報告もある¹⁶⁾。このことは、TiO₂フィルター・UV照射4時間で、*S. aureus*の表面に多数の皺を認めつつも、球形は維持されていたが、抗菌効果での実験において生菌数が減少した今回の結果と一致する。つまり、光触媒の作用は、細胞壁が完全に壊れていなくても、細菌の細胞壁に生じた限局的な小さな損傷から細菌の内部までおよび、細胞死に至っていると考える^{17,18)}。

抗菌効果の実験における生菌数の減少や形態観察における細菌表面の変化より、TiO₂フィルターは細菌に対して高い抗菌効果を持つことが明らかとなった。

2. 酸化チタン担持セラミックフィルターを搭載した空気清浄機の居室空間における効果

居室空間においては、ベッドメイキングやシーツ交換を行うことで空中浮遊菌が増加し、感染のリスクが増すと考えた。そこで、シーツ交換に着目してA施設での実験を行った。浮遊菌数を比較すると、装置を稼働させた方が浮遊菌は早く減少するという結果を得た。浅野らは、患者のシーツ交換を行った際の空中浮遊菌数について、多い時で約400cfu/100ℓと報告しているが¹⁹⁾、A施設で50cfu/320ℓ以下と非常に少ない結果であった。このことは、床などの清掃が行き届いていたことや、シーツ交換の際に、ベッドから外したシーツを高い位置で操作する、振る、床に落とすといった浮遊菌を著しく増加させる行動が見られなかったことが影響していると考える。B、C施設での居室空間における実験では、処置後に浮遊菌数が増加したが、空気清浄機を稼働した場合の方が、装置を稼働しない場合と比べて浮遊菌数が早く減少した。通常舞い上がった浮遊菌は、時間の経過とともに落下し、また人の動きなどで舞い上がる。空気清浄機の稼働は、空気を吸引するため、装置を稼働しない場合と比べて浮遊菌が早く減少するのは当然のことである。しかし、光触媒装置は、一度吸引し、装置内にとらえた細菌を死滅させることから²⁰⁾、再び空気中に戻ることはないため、居室空間の浮遊菌を減少させていえるといえる。また、今回使用した機器の適応空間は18~82m³であったが、C施設(25m³)よりもB施設(15m³)において効果が高かった。このことは、閉鎖空間という条件が整ってこそ有効となり、空間が小さくなれば効率的に空気を吸引し、室内の空気を浄化する効果が大きくなつたと考える。

セラミックフィルターに担持されている酸化チタンは、

安定性・耐久性・価格的に優れているうえに、従来白色原料として化粧品に使用されたり、食品添加物として使用されるなど安全性が高いものである。従来の空気清浄システムと比較すると、今回検討した光触媒は、オゾンなどのように人体に対して有害な物質を出すことはない。また使用しているUV波は、ブラックライトというUV-A(365nm)であり、殺菌灯に使用されているUV-C(260nm)のように目や皮膚に悪影響をおよぼすものではなく安全なものである。最近よく使用されているHEPA(hight efficiency particulate air)フィルターは、0.3μmの粒子を99.9%以上捕獲するといわれているが、細菌を死滅させるわけではない。そのため、圧力損失によるフィルター交換時に捕獲された菌が再び舞い上がり、二次感染のリスクを伴うこととなる。しかし、光触媒の場合、徐々に付着し堆積する菌を死滅させその死骸さえも分解することができる²⁰⁾。つまり、抗菌性を発揮させる材料の表面が細菌の死骸などで汚れてても、汚れを分解することができるため、抗菌効果を維持できることとなる。また、大腸菌などのグラム陰性菌の場合、細胞壁が崩壊した際に、エンドトキシンを出すが、光触媒は、エンドトキシンに対しても解毒作用があるとされている^{21,22)}。最近では、光触媒による住環境中のホルマリン対策や消臭効果も報告されており²³⁻²⁶⁾、病室環境下における汚物処理時などの臭い対策にも有効であると思われる。また、ウイルスに対しても不活性化効果があるとされ^{27,28)}、光触媒によるインフルエンザ対策などの抗ウイルス効果も期待される。さらに、TiO₂フィルターは洗浄することで機能復帰しランニングコストを抑えることが可能である。

以上のことより、TiO₂フィルターを搭載した空気清浄機の使用は、居室空間において空気環境の改善に大きなメリットがあり、院内感染対策の一助になると考えられる。

現在は、TiO₂に抗菌金属を担持するなどさらなる改良が進められており²⁹⁻³¹⁾、筆者らもTiO₂と銅を担持したセラミックフィルターでの抗菌効果実験を行い、このフィルターの高い抗菌効果を確認している。また、院内感染の原因菌として問題となっている多剤耐性アシネットバクター³²⁾についても、同様の実験を進行中である。

結論

酸化チタン担持セラミックフィルターを用いた光触媒は、院内感染の原因となる各種菌に対して抗菌効果を認め、酸化チタン担持セラミックフィルターを搭載した空気清浄機の導入は、居室空間の浮遊菌数の減少につながり、院内感染対策の一助になるといえる。

謝 辞

稿を終えるにあたり、機器の提供をしてくださった盛和工業株式会社と調査協力いただいた各施設の皆様に心より感謝致します。

また、ご指導ならびにご校閲を賜った岡山大学大学院医歯薬学総合研究科病原細菌学教室の小熊恵二教授と教室の皆様に深謝致します。

文 献

- 1) Safdar N, Maki DG : The commonality of risk factors for nosocomial colonization and infection with antimicrobial-resistant *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus*, gram-negative bacilli, *Clostridium difficile*, and *Candida*. *Ann Intern Med* (2002) 136, 834-844.
- 2) 長野則之, 長野由紀子 : わが国の医療機関における臨床分離細菌の多剤耐性化の現状とその対応. *化療の領域* (2011) 27, 1592-1601.
- 3) 成井浩二, 松永宣史, 野口雅久, 能條純一, 富澤 崇, 石井隆之, 並木勇太, 山中義裕, 熊木雄一, 諏訪淳一, 奥山 清, 明石貴雄, 他 : 感染制御を目的とした病院内の細菌学的環境調査. *Jpn J Pharm Health Care Sci* (2008) 34, 441-447.
- 4) Fujishima A, Honda K : Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature* (1972) 238, 37-38.
- 5) 崔田吉信 : 光触媒の医学・医療への応用について. *泌外* (2005) 18, 395-401.
- 6) Asahara T, Koseki H, Tsurumoto T, Shiraishi K, Shindo H, Baba K, Taoda H, Terasaki N : The bactericidal efficacy of a photocatalytic TiO_2 particle mixture with oxidizer against *Staphylococcus aureus*. *Jpn Infect Dis* (2009) 62, 378-380.
- 7) Shintani H, Kurosu S, Miki A, Hayashi F, Kato S : Sterilization efficiency of the photocatalyst against environmental microorganisms in a health care facility. *Biocontrol Sci* (2006) 11, 17-26.
- 8) 荻田憲郎 : 二酸化チタンの光触媒作用による除菌効果の検討と院内感染防止対策への応用. *岡山衛検* (2002) 38, 5-7.
- 9) 石黒 齊, 中野竜一, 姚 燕燕, 梶岡実雄, 崔田吉信 : フィルター状光触媒の抗菌・ウイルス効果について. *会報光触媒* (2010) 32, 64-67.
- 10) Kashige N, Kakita Y, Nakashima Y, Miake F, Watanabe K : Mechanism of the phototocatalytic inactivation of *Lactobacillus casei* phage PL-1 by titania thin film. *Curr Microbiol* (2001) 42, 184-189.
- 11) Pal A, Pehkonen SO, Yu LE, Ray MB : Photocatalytic inactivation of airborne bacteria in a continuous-flow reactor. *Ind Eng Chem Res* (2008) 47, 7580-7585.
- 12) 日本工業標準調査会 : ファインセラミックス光照射下での光触媒抗菌加工製品の抗菌性試験方法・抗菌効果. *JIS R1702* (2006), 1-34.
- 13) Pal A, Pehkonen SO, Yu LE, Ray MB : Photocatalytic inactivation of Gram-positive and Gram-negative bacteria using fluorescent light. *J Photochem Photobiol A* (2007) 186, 335-341.
- 14) Kangwansupamonkon W, Lauruengtana V, Surassmo S, Ruktanonchai U : Antibacterial effect of apatite-coated titanium dioxide for textiles applications. *Nanomed Nanotechnol Biol Med* (2009) 5, 240-249.
- 15) Saito T, Iwase T, Horie J, Morioka T : Mode of photocatalytic bactericidal action of powdered semiconductor TiO_2 on mutans streptococci. *J Photochem Photobiol B* (1992) 14, 369-379.
- 16) Hu C, Guo J, Qu J, Hu X : Photocatalytic degradation of pathogenic bacteria with AgI/TiO_2 under visible light irradiation. *Langmuir* (2007) 23, 4982-4987.
- 17) Wu P, Imlay JA, Shang JK : Mechanism of *Escherichia coli* inactivation on palladium-modified nitrogen-doped titanium dioxide. *Biomater* (2010) 31, 7526-7533.
- 18) Sunada K, Watanabe T, Hashimoto K : Bactericidal activity of copper-deposited TiO_2 thin film under weak UV light illumination. *Environ Sci Technol* (2003) 37, 4785-4789.
- 19) 浅野美礼, 近藤未緒, 遠藤美代子, 佐々木美奈子, 高橋泰子 : 患者シーツ交換における空气中浮遊粒子数と浮遊細菌の関係. *防菌防黴* (2003) 31, 123-132.
- 20) 藤嶋 昭, 菱沼光代, 崔田吉信 : 光触媒による院内感染の防止および空気清浄化. *Mebio* (2000) 17, 94-103.
- 21) Hayakawa T, Kuroiwa A, Higashi E, Nakano K : Photoinduced bactericidal effect of titania thin film against *Legionella pneumophila*. *福岡大学医学紀要* (2007) 34, 71-81.
- 22) 濱田一人, 多田治生, 前山安代, 松下利江, 久保朋子, 小比賀二郎, 十枝健一, 大原昌樹 : 光触媒による生菌およびエンドトキシン分解能の検証. *日臨工技士会誌* (2009) 36, 282.
- 23) 佐々木茂喜, 栗谷川智司 : 光触媒による抗菌(消臭)効果の持続性の確認. *防菌防黴* (2011) 39, 13-20.
- 24) 佐々木茂喜, 横澤拓郎, 栗谷川智司 : 光触媒・抗菌施工による厨房などの抗菌と消臭. *防菌防黴* (2008) 36, 365-373.
- 25) 平川 力, 米良信昭, 佐野泰三, 根岸信彰, 竹内浩士 : 光触媒による化学剤の分解. *薬誌* (2009) 129, 71-92.
- 26) 加藤薰一 : 光触媒による環境中のホルムアルデヒドの分解除去事例. *防菌防黴* (2009) 37, 51-55.
- 27) 岡本誉志夫 : 光触媒抗菌製品の現状. *防菌防黴* (2007) 35, 161-170.
- 28) 高木弘隆, 杉山和良 : 新規技術により作成した二酸化チタン(TiO_2)不織布の光触媒反応によるウイルス不活性化効果についての検討. *感染症誌* (2011) 85, 244-249.
- 29) Wong MS, Sun DS, Chang HH : Bactericidal performance of visible-light responsive titania photocatalyst with silver nanostructures. *PLoS One* (2010) 5, e10394.
- 30) Akhavan O : Lasting antibacterial activities of $Ag-TiO_2/Ag-a-TiO_2$ nanocomposite thin film photocatalysts under solar light irradiation. *J Colloid Interface Sci* (2009) 336, 117-124.
- 31) Le NT, Nagata H, Aihara M, Takahashi A, Okamoto T, Shimohata T, Mawatari K, Kinouchi Y, Akutagawa M, Haraguchi M : Additional effects of silver nanoparticles on bactericidal efficiency depend on calcination temperature and dip-coating speed. *Appl Environ Microbiol* (2011) 77, 5629-5634.
- 32) Karageorgopoulos DE, Falagas ME : Current control and treatment of multidrug-resistant *Acinetobacter baumannii* infections. *Lancet Infect Dis* (2008) 8, 751-762.