

---

**総説** シンポジウム III**気流制御による空気感染リスク低減**

森 本 正 一

新菱冷熱工業株式会社技術統括本部中央研究所

**Controlling airflow to reduce airborne infection risks**

Shoichi MORIMOTO

Research &amp; Development Center, Technical Supervision Division, Shinryo Corporation

---

**抄録**

医療施設が空気感染対策として実施しているのは主に2つである。1つは患者の隔離で、陰圧室（病室、診察室）に隔離することで周囲への拡散を防止する。もう1つが个人防护具の着用で、N95マスク等を着用することで病原体の曝露を防止する。空調設備では、換気による希釈、フィルターによる病原体の除去、圧力差による封じ込め・清浄度の維持といった対策が実施されている。しかし、陰圧室の中の感染リスクを下げられておらず、陰圧室であってもドアを開放すると漏洩するといった課題が残っている。これらの課題を解決する方法の1つに低速の一方向流の活用がある。一方向流を使った既存技術として、プッシュプル型換気装置による局所排気がある。この技術を応用し、簡易的に一方向流を形成して局所排気することで、空気感染リスクの低減が可能である。また、一方向流を漏洩防止の用途に使用することで、ドア開放時でも漏洩防止効果を維持することが可能である。（臨床環境 27：20-27, 2018）

---

**《キーワード》** 医療施設、空気感染対策、気流制御、一方向流、漏洩防止

---

**Abstract**

There are two primary methods of preventing airborne infections in hospitals. The first method is the use of isolation and containment to prevent the diffusion of airborne pathogens by isolating the rooms of infectious patients. The second method of prevention is wearing personal protective equipment, such as an N95 respirator. This method can prevent exposure to infectious airborne pathogens. Air-conditioning equipment reduces airborne infection risks via diffusion and filtration, as well as by

---

受付：平成29年11月27日 採用：平成30年8月20日

別刷請求宛先：森本正一

新菱冷熱工業株式会社技術統括本部中央研究所

〒300-4247 茨城県つくば市和台41

controlling room pressure by means of isolation (negative pressure) and protective environment (positive pressure). However, certain problems still exist: the airborne infectious risk in an isolation room is relatively high. It is difficult to maintain negative pressure in the room when a door is opened, and air often leaks from the room through the door. Low-speed unidirectional airflow can resolve both of these issues. Push-pull local exhaust is one of the examples of unidirectional airflow technology. This technology is specifically designed for airborne precaution. The use of low-speed unidirectional airflow technologies, such as simple local exhaust system and leak prevention system, can reduce airborne pathogen risks in a room, prevent air leakage, and maintain the isolation conditions, regardless of whether the door to the room is open. (Jpn J Clin Ecol 27 : 20 - 27, 2018)

《Key words》 Hospital, airborne precaution, airflow control, unidirectional airflow, leak prevention

## I. 緒言

医療施設は感染症の患者と感染しやすい患者（易感染患者）が共存する場所である。一般に、医療施設ではすべての処置に対して手洗いやマスクの着用など標準予防策と呼ばれる対策を実施し、感染を防止している。これにより、多くの接触感染、飛沫感染を防止している。しかし、空気（飛沫核）感染は標準予防策で防止できないため、追加の対策が必要である。空気感染対策として病院設備設計ガイドライン<sup>1)</sup>や CDC ガイドライン<sup>2)</sup>などで求められている内容は主に2つある。1つは感染症の患者の隔離、もう1つは N95 マスクの着用である。N95は米国 NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) の規格で、0.1~0.3 μm の微粒子を95%以上除去できる性能を示す。これは、医療施設で日常的に使われているサージカルマスクよりも捕集効率の高いマスクである。

空気感染する代表的な感染症は、結核、麻疹、水痘である。このうち、麻疹と水痘は主な患者が小児であり、成人の感染者が多いのは結核である。看護師の結核罹患率は同世代の一般女性と比較して3~4倍と報告されており<sup>3)</sup>、潜在性結核感染症の新登録患者の約30%が介護職も含めた医療従事者である<sup>4)</sup>。そのため、空気感染リスクの低減は病院・医療施設における重要な課題である。

一方、気流制御は空調・換気技術の1つとして様々な分野で使用されている。飛沫感染の原因となる飛沫は速くて大きいため気流による制御は難

しいが、空気感染の原因となる飛沫核は長時間浮遊するため気流で制御しやすい。つまり、医療従事者が防ぎにくい空気感染を制御しやすいのが空調設備による気流制御である。本稿では、空気感染リスクの低減に利用できる気流制御技術を紹介する。

## II. 空調設備による既存の感染対策

### 1. 空調設備の役割

送風機で送り出した空気を、空気の通り道（ダクト）を通じて目的の場所に届けるのが空調設備である。その際、温度や湿度、清浄度、気流などを制御することで、目的の場所の空気質を調整する。これにより、目的の場所の快適性を向上させたり、工場などで生産に必要な環境を作り出したりすることができる。医療施設では快適性の向上だけでなく、病原体や臭気などの封じ込めや、清浄度の維持などの目的でも利用されている。感染対策の目的で利用される場合、主な用途は空気中を長時間浮遊する病原体が原因となる空気感染リスクの低減である。

### 2. フィルターによる病原体除去

空調設備による空気感染リスクの低減で重要な役割を担うのがフィルターである。空気感染の原因となる病原体はウイルスや細菌などの粒子である。ウイルスは0.01~0.1 μm 程度、細菌は1 μm 程度の大きさであり、HEPA フィルターで除去できる。また、中性能フィルターであっても細菌は

90%以上除去できるとされている<sup>1)</sup>。

空気感染する代表的な感染症のうち、結核は病気が再燃することがある。また、日本は1999年に結核緊急事態宣言が出されるなど結核患者が多い。そのため、一般の医療施設で対象となる患者が多いのは結核である。結核の原因となる結核菌は長さ2~10 μm、幅0.3~0.6 μmの細長い細菌であり、中性能フィルターでもある程度の除去が可能である。施設や部屋によって結核患者が訪れる頻度は異なることから、想定されるリスクに合わせたフィルターの選定が重要である。

換気には2種類あり、ガイドラインで外気量と表記されているのは、屋外の空気を供給し、同じ量の空気を屋外に排気する換気による風量である。一方、室内循環風量と表記されているのは、屋外からの給排気と、室内を循環させる換気の合計風量である。このうち室内循環風量を部屋の容積で除した数値が換気回数で、単位時間あたりの空気の入れ替え回数を示す。フィルターは室内循環の中にも使用されるため、1回の通過で十分に汚染物質を除去できない場合も、換気回数を増やしてフィルターを通過させる回数を増やすことで、汚染物質濃度を低減できる。

なお、2016年にWHOから手術室の層流(laminar airflow)について整形外科領域における手術部位感染(SSSI)予防方法として推奨しないというガイドラインが出された<sup>5)</sup>。病院設備設計ガイドライン<sup>1)</sup>では、手術室に対して層流を用いて清浄度を保つバイオクリーン手術室と一般手術室の2種類の基準が定められている。このうち、バイオクリーン手術室が手術部位感染を予防する根拠は乏しいという指摘である。これは、病院設備設計ガイドラインでも解説されているとおりバイオクリーン手術室の有効性に対する疑問は従来からあったが、日本で広く認知されているWHOやCDC等のガイドラインで初めて推奨しないことが明記されたガイドラインだと思われる。これにより、ガイドラインよりも過剰な設備が見直され、手術室でHEPAフィルターが必ずしも必要ではないという流れが加速する可能性がある。

### 3. 希釈による病原体濃度低減と換気効率

換気による希釈は、単純であるが効果の高い感染対策である。一方で、効果を過信することは禁物である。病院設備設計ガイドライン<sup>1)</sup>では、一般の病室や診察室の換気回数を6回/h以上と設定しているのに対し、隔離病室や隔離診察室は12回/h以上の換気回数を要求している。これにより、隔離病室は一般病室と比較して病原体濃度が1/2になることが期待されるが、これだけで十分な空気感染リスクの低減効果があるとは言い難い。

換気回数と汚染物質の除去に必要な時間を示した表(表1)がCDCのガイドライン<sup>2)</sup>に示されており、この表を知っておくと便利である。室内および給気に汚染物質の発生源がない場合、約2回換気ごとに部屋の濃度が一桁(90%)低減する。6回/hの場合、20分ごとに2回換気することになるので、約20分(23分)で90%、約40分(46分)で99%、約60分(69分)で99.9%低減することを意味する。つまり、部屋の換気回数と濃度が何桁低減してから次の患者を入室させるかが決まっていれば、必要な待機時間を知ることができる。また、待機時間の要望に合わせて換気回数を提案することも可能である。

### 4. 陰圧と陽圧

清浄度が高いほど陽圧、清浄度が低いほど陰圧とし、空気を一方向に流すことで清浄度の維持と

表1 換気回数と空中の汚染物質の除去に必要な時間<sup>2)</sup>

換気回数 (回/h)	除去に必要な時間(分)		
	90%*	99%	99.9%
2	69	138	207
4	35	69	104
6	23	46	69
12	12	23	35
15	9	18	28
20	7	14	21
50	3	6	8
400	<1	<1	1

※：出典の表に筆者が90%の欄を追加

汚染の封じ込めを行うのが陽圧と陰圧に管理する目的である。一方で、陰圧室であっても、条件によってはドアを開放すると室内の空気が廊下に漏洩する。この解決策として、病院設備設計ガイドラインなどでは陰圧室に前室を設けることが推奨されている<sup>1)</sup>。前室を設けることで、陰圧室の出入りによって前室へ漏洩した空気が直接廊下へ漏洩せず、廊下側のドアを開ける前に希釈することが可能である。さらに、前室で个人防护具の着脱を行うなどの運用上の工夫を加えることで、陰圧室から廊下へ漏洩する空気を大きく減らすことができる。

また、移植病棟などの免疫力の低下した患者(易感染患者)を、陽圧に保った清浄な環境に保護して感染リスクを下げる保護環境という考え方がある。さらに、空気感染する感染症で保護環境が必要な患者用に、前室付き空気感染患者用隔離病室が提案されている<sup>1)</sup>。前室の室圧を廊下および病室に対してプラスまたはマイナスに調整することで、病室の空気が廊下へ漏洩しにくいだけでなく、廊下の空気が入りにくい病室とすることができる。ただし、保護環境については空気中を浮遊しているかびが原因の疾病以外の病気を予防する根拠は示されていない<sup>6)</sup>。

一方で、結核病床およびモデル病床(結核患者収容モデル病床事業<sup>7)</sup>により、一般病床または精神病床で結核患者を収容可能な病床)において、陰圧の病室は64.5%、前室の設置されている病室は14.0%というアンケート調査の報告があり、陰圧であっても前室のない病室が多く存在している<sup>8)</sup>。モデル病床のように当初の計画から用途を変更して使用される部屋など、前室を設置したくても設置できない病室や診察室では、前室に代わる漏洩防止技術が求められている。

### Ⅲ. 一方向流を活用した空気感染制御の例

#### 1. 気流の特徴

吹出し気流は直進性があり、遠くまで届く特徴がある。また、吸込み気流分布は半球状に形成されるため遠くまで吸込み口の影響が及ばない特徴がある。この2つの気流の特徴を利用した装置に

プッシュプル型換気装置<sup>9)</sup>がある。汚染物質の発生源を挟んで吹出し(プッシュ)装置と吸込み(プル)装置を設置し、装置間に形成された気流で汚染物質を捕捉する。これにより、プル装置から離れた場所にある汚染物質でもプル装置から排出することができる。プッシュプル型換気装置の基準では、汚染源を確実に捕捉するため制御風速が0.3 m/s以上と定められている。また、プッシュ装置の気流が周囲の空気を誘引するため、プル装置の風量はプッシュ装置の風量の1.3倍以上と定められている。これにより、プッシュプル装置の外に汚染物質を拡散させずに排出することができる。

プッシュプル型換気装置では汚染物質がプッシュ装置とプル装置の間にある場合が想定されている。そのため、プッシュ装置とプル装置によって形成される気流の外に汚染物質がある場合には利用されていなかった。気流の外に汚染物質があり、漏洩防止の用途で用いられる気流制御方式にエアカーテンがある。一般にエアカーテンでは、10 m/sなどの速い気流が使われている。気流が速いほど埃の巻上げや歩行への影響などがあるため、エアカーテンを病院・医療施設の中で使用するのは難しい。また、気流が速いほど誘引する空気の量も多くなるので、吹出し気流に対向して吸込み口を設置する場合、プッシュプル型換気装置よりもさらに大きな風量が必要である。

このように、漏洩防止のための従来の気流制御方式は、速い気流、大きな風量に頼っていたため、周囲の空気を誘引する。これにより、吹出し空気に周囲の空気が混合するため、吹出し風量よりも大きな風量の気流が形成される。そのため、排気風量を増やして形成された気流をすべて排出する必要があり、気流が速いほどエネルギー効率が悪くなることが課題である。

一方で、誘引が少ない気流を使うと、吹出し風量とほとんど同じ吸込み風量としても、吸込み装置によって吹出し気流とそれによって誘引された空気を排気することが可能になる。著者らの知見によると、誘引を少なくするためには気流の速度を0.3 m/s以下とするのがよい<sup>10)</sup>。0.3 m/s以下の気流でプッシュプル型換気装置のような一方向流

を作った場合、吹出し風量と吸込み風量をほとんど同じとすることが可能である。また、0.3 m/s以下の気流は人体の発熱による上昇気流と同程度のため、ほとんど感じる事ができないほど低速である。

## 2. 一方向流による簡易的な局所排気

感染症患者が医療施設で最初に訪れる場所が、診察室などの外来部門である。空気感染する感染症の患者を診察する場合は、陰圧の隔離診察室が使用されるが、前述のとおり室内の医療従事者はN95マスクなどの個人防護具に頼った感染対策を行っている。さらに、診断前の患者に対しては、一般の診察室で空気感染対策を実施できないまま診察する可能性がある。そのため、外来部門では感染症患者の診察を考慮した診察室を設置することが望まれる。

そこで、0.3 m/s以下の一方向流を簡易的な局所排気として使用する例を紹介する(図1)。0.3 m/s以下の気流で吹出し風量と吸込み風量を同量としているため、プッシュプル型換気装置の基準は満たしていない。それでも、患者が咳やくしゃみをしている場合はマスクを着用することを想定し、0.18 m<sup>3</sup>/h (0.6 m/s)の流量でペーパーパウダーを模擬粒子として発生させた実験の結果、装置間隔が1.8 mでも全体換気と比較して1/10



図1 一方向流の簡易局所排気としての使用例

以下の濃度に低減できることが分かった<sup>11)</sup>。実験では患者と医療従事者を吹出し装置と吸込み装置の中央に配置したが、吸込み装置の近くで診察することで装置の間隔が広がっても効果的に咳を排出できる。また、装置の配置について検討した結果、医療従事者と患者の間に横方向の一方向流を形成したほうが医療従事者への曝露が少ないことが分かった。つまり、医療従事者の背後に設置した吹出し装置から患者の背後に設置した吸込み装置へ向かう一方向流など、医療従事者を清浄空気で覆うよりも患者から発生した病原体を局所排気したほうが、医療従事者の空気感染リスクを低減できた。また、この方法は病室でも飛沫核濃度の低減効果がある<sup>12)</sup>。そのため、簡易的に一方向流を形成して局所排気することで、空気感染リスクの低減が可能である。

## 3. 一方向流による漏洩防止

病室の室圧は廊下に対して陰圧にするべきか陽圧にするべきか議論が分かれるところだが、陰圧にした場合は廊下で発生した病原体の病室への流入、陽圧にした場合は病室で発生した病原体の廊下への漏洩が課題となる。

この解決策として、空気感染する感染症で免疫力の低下した患者用に、前室付き空気感染隔離室が提案されている<sup>1)</sup>。しかし、この部屋でも患者をベッドに乗せたまま搬送するなど前後のドアを同時に開放すると、空気の流出入を完全に防ぐことはできない。そのため、ドアを常時開放しても病室と廊下の空気が出入りしない技術があれば、感染対策に有効である。

そこで、低風速の一方向流を空間の仕切りとして漏洩防止の用途で使用する例を紹介する。前室の代わりにドアに隣接して感染対策用漏洩防止装置を設置した使用例を図2に示す。吸込み装置の排気は天井内で吹出し装置へと循環している。この装置には吹出し装置、吸込み装置ともHEPAフィルターを使用しているが、吹出し装置の形成した一方向流のほとんどが吸込み装置に到達するため清浄な空気が循環することになり、フィルターの目詰まりは起こりにくい。



図2 感染対策用漏洩防止装置の使用例

漏洩防止効果の検証は、廊下と前室の間にドアの代わりに感染対策用漏洩防止装置を設置した実験室で行った<sup>10)</sup>。ドアを設置していないため、幅は装置の間隔と同じ2 m、高さは天井と同じ2.5 mの開放空間に対しての漏洩防止効果を評価した。病原体を模した汚染物質にはベビーパウダーを使用し、廊下で発生させた際の廊下と前室の濃度比で評価した。その結果、プッシュプル装置の幅を0.4 m以上とすると、風速が0.3 m/s以下でも前室の濃度が廊下の1/10以下に低減した。また、一方向流を人が横切った場合の漏洩について検討したところ、一時的に前室の濃度が廊下の1/10を超えるものの、気流の上流側（吹出し装置側）を通過した場合は5分以内、下流側（吸込み装置側）を通過した場合は2分以内に清浄度を回復した。そのため、前室内で个人防护具を着脱するなど、前室の清浄度を回復してから病室のドアを開けたり廊下へ出たりする運用上の工夫で、より完全に汚染物質の流入を防止することが可能である。空気感染対策で使用されるN95マスクのフィットテストでの合格基準は漏洩率10%などが使用されている<sup>13)</sup>ことから、一方向流を漏洩防止の用途で活用することで、汚染側でN95マスクを着用した際の曝露量と比較しても清浄な環境を維持できると考えられる。

さらに詳細な条件をCFD (Computational Fluid Dynamics; 数値流体力学) 解析で検討したところ、吸込み装置は風量を大きくするほど漏洩防止効果も大きくなるが、吹出し装置は風速を0.15~0.3 m/sの範囲とすると効率が良いことが明らかとなった。これは、プッシュ風速が0.3 m/s以上と規定されているプッシュプル型換気装置の規準<sup>9)</sup>と大きく異なっている。感染対策用漏洩防止装置とエアカーテン、プッシュプル型換気装置の仕様の比較を表2に示す。なお、装置間隔と幅の関係はプッシュプル型換気装置の30倍以下に対して感染対策用漏洩防止装置は5倍以下と範囲を限定しているが、標準仕様で装置の幅が0.4 mのため装置間隔を2 mとすることができ、病室での使用には十分な間隔である。また、装置の幅を広げることで、さらに大きな空間でも使用可能である。さらに、温度差や外乱が大きい場合は幅を2倍の0.8 mとすることで、漏洩を減らせることが分かっている。次に、前室との比較を図3に示す。感染対策用漏洩防止装置は、前室と同等の漏洩防止効果を持ちながらドアを開放時も漏洩防止効果を維持し、設置スペースを節約できる。なお、この感染対策用漏洩防止装置は separate (隔てる) と area (エリア) の造語で SEPARAREA™ (セパレア) と命名されている。

表2 感染対策用漏洩防止装置と従来技術の仕様比較

項目	新技術	従来技術	
	感染対策用漏洩防止装置	エアカーテン	プッシュプル型換気装置
部屋からの漏洩防止効果	○ (1/10 以下)	△ (風量による)	× (用途が違う)
吹出し風速	○ (0.3 m/s 以下)	× (約 10 m/s)	△ (0.3 m/s 以上)
気流バランス (吸込み/吹出し)	○ (約 1 倍)	× (吹出しのみ)	△ (1.3 倍以上)
気流の到達距離	○ (幅の 5 倍以下)	△ (風量による)	○ (幅の 30 倍以下)

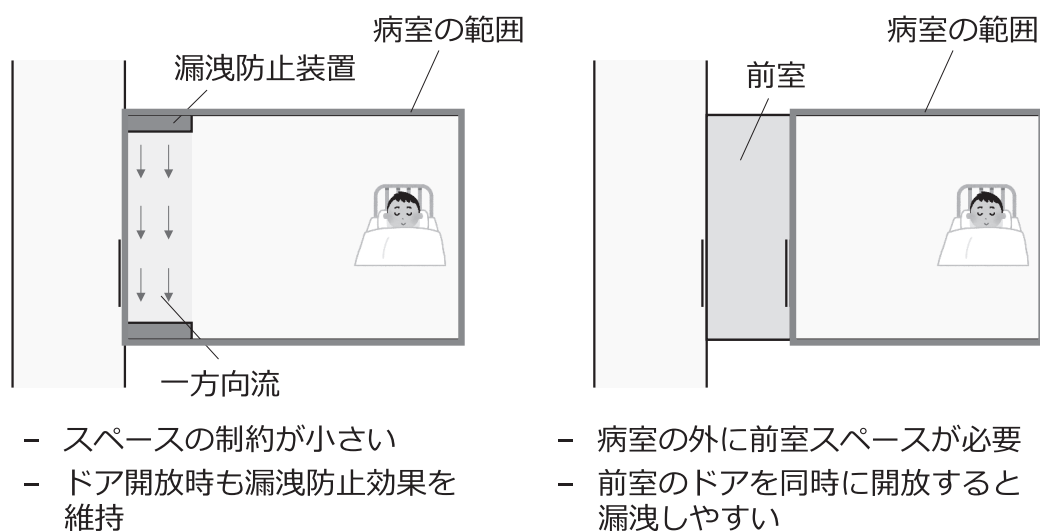


図3 感染対策用漏洩防止装置と前室の比較

#### IV. まとめ

本稿では、空気感染リスクの低減に利用できる気流制御技術について紹介した。医療施設での感染リスク低減のため、ガイドラインなどで様々な対策が提唱され、実行されている。一方で、医療施設の感染リスク低減という課題は、依然として十分に解決できたとは言いがたい。これは、様々な症状の患者が訪れる医療施設では想定外が発生しやすいためと考えられる。想定外を防ぐために標準予防策がすべての場面で適用されている。しかし、看護師の結核罹患率が高いなど、空気感染については想定外が起きていると考えられる。空気感染対策で大きな可能性を持っているのが空調設備による気流制御である。低速の一方

向流の活用のような新しい発想で想定外を減らすことに貢献していきたいと考えている。

#### 謝辞

本稿で紹介した研究を指導していただいた、早稲田大学・順天堂大学共同研究「次世代環境医療研究会エコ技術・感染環境制御ワーキンググループ」の皆様に深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 日本医療福祉設備協会. 病院設備設計ガイドライン (空調設備編) HEAS-02-2013. 一般社団法人日本医療福祉設備協会規格, 2013
- 2) CDC: Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities, 2003

- 3) 日本結核病学会予防委員会・治療委員会. 潜在性結核感染症治療指針. 結核 88: 497-512, 2013
- 4) 厚生労働省. 平成 26 年結核登録者情報調査年報集計結果
- 5) WHO: Global guidelines on the prevention of surgical site infection, 2016
- 6) 堀賢. 感染対策実践マニュアル第 3 版考え方と運営のポイント. じほう, 東京, 2015
- 7) 厚生労働省通知平成 4 年 12 月 10 日健医発第 1415 号
- 8) 伊藤邦彦, 永田容子, 他. 結核病床の施設整備状況に関する全国アンケート調査. 結核 87: 475-479, 2012
- 9) 労働省労働基準局. プッシュプル型換気装置の性能及び構造上の要件等について. 基発第 0319008 号: 2004
- 10) 森本正一, 堀賢, 他. 数値流体力学 (CFD) 的手法を用いた陰圧病室の飛沫核の解析. 環境感染誌 24: 9-14, 2009
- 11) 佐伯寅彦, 森本正一, 他. 医療・福祉施設における感染制御に関する研究 (第 9 報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集: 1087-1090, 2011
- 12) 森本正一, 湯懐鵬, 他. 医療・福祉施設における感染制御に関する研究 (第 11 報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集: 1455-1458, 2012
- 13) 黒須一見, 小林寛伊, 他. 各種 N95 微粒子用マスクの漏れ率に関する基礎的研究. 環境感染誌 26: 345-349, 2011