

無菌治療室を対象とした換気システムの性能評価に関する研究
(その4) 気流方向と給気面積が非等温場の換気効率に及ぼす影響
Evaluation of Mechanical Ventilation System for Bio-Clean Sickroom
(Part 4) Effect of Flow Direction and Supply Opening Area on Ventilation Efficiency
under Non-Isothermal Condition

○村山 熙 (大阪市立大学) 小林 知広 (大阪大学)
梅宮 典子 (大阪市立大学)

Hiroshi MURAYAMA *¹ Tomohiro KOBAYASHI *² Noriko UMEMIYA *¹
*¹ Osaka City University *² Osaka University

In April 2012, the facility standard of bio-clean sick room was changed by the notification by the Ministry of Health, Labor and Welfare, and the air conditioning equipment in the bio-clean sick room is obliged to adopt the designated laminar flow system. However, it is not clearly defined what kind of air conditioning system specifically meets the facility standard for each system. In addition, the performance evaluation method of the ventilation system has not been established. Therefore, in this study, we focus on the ventilation efficiency in various ventilation methods for bio-clean sick room and aim to perform quantitative performance evaluation.

1. はじめに

平成 24 年 4 月、厚生労働省告示¹⁾により、無菌治療室の空調設備は、水平層流方式、垂直層流方式、または、その双方を併用した方式をとることが義務化された。しかし、それぞれの換気システムに関して、明確な定義が存在するとは言い難く、性能評価手法も確立されていない。そこで本研究では、無菌治療室の各種換気システムにおいて、CFD 解析を行い、換気効率を算出することで、定量的な性能評価を行うことを目的とする。既報²⁾では、等温場を対象としたが、本報では、非等温場を対象とし、また、給気面におけるパンチングメタルの開孔率の差異における影響についても調査を行う。

2. 無菌治療室の CFD 解析

2.1 対象とする無菌治療室の換気システム

本研究で対象とする病室モデルの平面図と換気システムを Fig.1 (1) ~ (4) に示す。給気量は全条件で 700 [m³/h] で統一しており、給気温度は 22℃とした。Case 1 はベッド付近からの壁面給気で対面より排気する水平層流を想定した方式である。Case 2 は天井給気で床面から下方向に吸い込み、壁ダクトで排気する垂直層流を想定した方式である。Case 3 は天井給気で、壁面全体から排気する水平・垂直層流の双方併用を想定した換気方式である。Case 4 は Case 3 と比較して壁面の排気口を下部のみに変更した水平・垂直層流の双方併用を想定した換気方式とした。

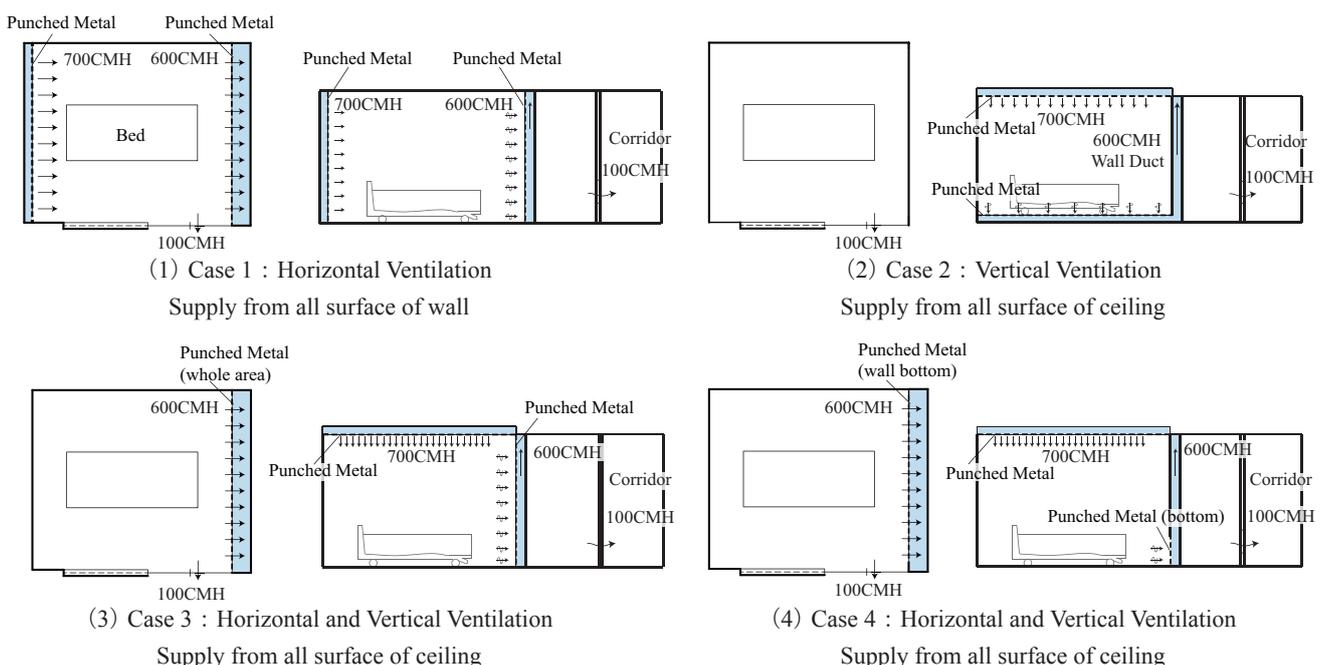


Fig.1 Floor Plan and System Diagram of Ventilation System for Bio-Clean Sickroom

2.2 解析領域の概要

Fig.1 に示した解析対象を再現し、CFD 解析を行う。例として Case 2 の解析領域とメッシュレイアウトを Fig.2 に示す。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて定常計算を行った。Table 1 に CFD 解析条件を示す。全条件で病室中央にベッドと、ベッドに横たわる患者を再現しており、給気部、排気部はパンチングメタルを介してチャンバー空間と繋がっている状況を想定した。また、実際の無菌治療室には患者からの熱上昇流の発生やその他各種熱負荷が存在し、それらは室内の気流場に大きな影響を及ぼすと考えられるため、非等温場での解析を行った。人体からの発熱、窓や壁面の貫流熱を想定し、室内の総発熱量を 210W に設定し、解析を行った。

2.3 パンチングメタル部の再現方法

パンチングメタルの孔を CFD 解析で詳細まで再現しつつ室全体を解析することは計算負荷の観点から難しいため、既往研究³⁾ で採用したパンチングメタルの圧力損失特性を該当する領域の構造格子に組み込む手法を用いた。この手法では解析時に以下で示される損失項を運動量保存式に加える。

$$\Delta p_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha_i} v + C_{2i} \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta n \quad (1)$$

ここで、 $1/\alpha_i$ [1/m²] が粘性抵抗係数を表し、 C_{2i} [1/m] は慣性抵抗係数を表す。また、 Δp_i [Pa] は圧力損失、 μ [kg/m·s] は粘性係数、 v [m/s] は速度、 ρ [kg/m³] は密度、 Δn [mm] は格子の厚みを表す。本研究では、既往研究³⁾ で整備した開孔率 50.9% のパンチングメタルの圧力損失特性から上記の抵抗係数を算出して運動量損失項を付加し、パンチングメタルを再現した。

2.4 換気効率の評価方法

本研究では、2つの方法で換気効率を評価する。1つ目は、空気齢に基づき換気効率を評価する方法である。評価指標には室空気交換効率を用いる。名目換気時間を τ_n 、室全体の平均空気齢を $\langle \tau \rangle$ とすると、室空気交換効率 ϵ^a は以下のように表すことができる。

$$\epsilon^a = \frac{\tau_n}{2 \langle \tau \rangle} \quad (2)$$

なお、 ϵ^a は完全なピストンフローを 1.0 とした室全体の換気効率指標であり、0 ~ 1.0 で定義される。局所平均空気齢は SVE3⁴⁾ を算出することで求めた。SVE3 は局所平均空気齢を名目換気時間で除した無次元の換気効率指標であり、室内で一様に Passive Contaminant を発生させる解析を行い算出される。

2つ目の評価方法は、汚染質濃度に基づき換気効率を評価する方法である。定常状態における排気中の汚染質濃度を c_e 、平均汚染質濃度を $\langle c \rangle$ とすると、汚染質除去効率 ϵ^c は以下のように表すことができる。

$$\epsilon^c = \frac{c_e}{\langle c \rangle} \quad (3)$$

本報では、 ϵ^a 、 ϵ^c を室全体とベッド周辺領域（ベッド端部より水平方向に 300mm、床面から 1,100mm 以内の空間）のそれぞれで評価する。

Table 1 CFD Analysis Condition

CFD code		ANSYS Fluent 17.0		
Turbulence Model		Standard k-epsilon Model		
Algorithm		SIMPLE		
Discretization Scheme		QUICK		
Boundary Condition	Inlet	700CMH		
		k, ε : based on Turbulent Intensity and Length Scale I=10.0 %, L=198mm		
	Outlet	Based on Flow Rate and Outlet Area		
		Velocity	Standard Wall Function	
	Walls	Heat Flux	Exterior Wall	8W/m ²
			Interior Wall (Corridor Side)	4W/m ²
Other Walls			adiabatic	
Window			25W/m ²	
Total Number of Cells		Case 1 : 3,613,588	Case 2 : 4,024,582	
		Case 3 : 3,310,210	Case 4 : 3,284,250	
Modeling Method of Punched Metal		Source Term for Momentum Equation based on Pressure Loss Characteristics		

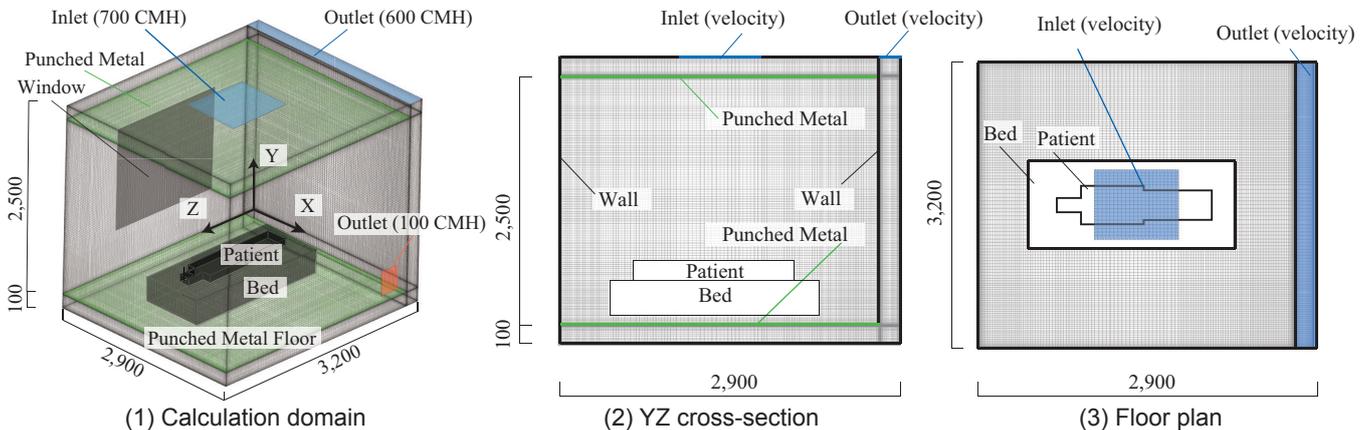


Fig.2 Calculation domain and Mesh Layout for Case 2

2.5 解析結果と換気効率評価

ベッド中央断面におけるSVE3をFig.3に、各点の汚染質濃度を排気濃度で基準化した濃度分布をFig.4に示す。汚染質発生位置は患者の口元とした。Table 2に算出した室空気交換効率と汚染質除去効率を示す。Case 1では風下のベッド近辺でSVE3が高い部分が見られ、汚染質分布においては、汚染質が天井面に広がる結果となった。Case 2では、壁面付近のスペースでSVE3が高い部分が見られ、汚染質濃度も同様であった。Case 3では、部屋全体としてSVE3の値が顕著に高い部分は見られなかったが、壁面付近での空気の滞留がにわかに見られた。汚染質は非排気面側の壁に広がる様子が見られた。Case 4ではCase 2と類似した分布が見られ、室空気交換効率、汚染質除去効率においても近い値を示す結果となった。室空気交換効率、汚染質除去効率ともに室全体でもベッド周辺においても、Case 1が最高値を示し、分布を

みるとCase 2からCase 4では、天井内で新鮮な空気が広がっておらず、パンチングメタルの開孔率が換気効率に影響を及ぼすと考えられる。

3 パンチングメタル開孔率の変化による影響

3.1 CFD 解析概要

開孔率の差異による換気効率への影響を明らかにすることを目的として、新たに開孔率の異なる3種のパンチングメタルのCFD解析を行った。Table 3に各パンチングメタルの詳細を示す。また、Table 4にCFD解析条件を、Fig.5に主流方向と、直交方向におけるメッシュレイアウトを示す。モデルの全体幅は風上側500mm、風下側500mmとし、パンチングメタルの厚みは1.2mmとした。分割幅は最小0.4mmとし、パンチングメタル部分から離れるにしたがって格子幅が大きくなるように設定した。流入境界では流入速度の値を10段階に変化させ、0.1m/sから1.0m/sまで、0.1m/s刻みに設定し、解析を行った。乱流モデルには標準k-εモデルを用いた^{注)}。

3.2 圧力損失特性式と開孔率の変化による影響

Fig.6に解析結果から得られた圧力損失特性を示

Table 2 Ventilation Efficiency for Case 1 - Case 4

Case	Air Change Efficiency [-] (ϵ^a)		Contamination Removal Efficiency [-] (ϵ^c)	
	Room	Around Bed	Room	Around Bed
Case 1	0.630	0.733	1.35	1.62
Case 2	0.412	0.553	0.600	0.684
Case 3	0.566	0.696	0.791	0.772
Case 4	0.433	0.575	0.625	0.700

Table 3 Basic Information of Punched Metal

ID	Original	A	B	C
Diameter	3.0 mm			
Pitch	4.0 mm	4.5 mm	5.0 mm	6.0 mm
Porosity	50.9%	40.3%	32.6%	22.7%
Width : W	8 mm	9 mm	10 mm	12 mm
Hight : H	13.9 mm	15.6 mm	17.3 mm	20.8 mm
Thickness : T	1.2 mm			

Table 4 CFD Analysis Condition for Punched Metal

CFD code	ANSYS Fluent 17.0		
Turbulence Model	Standard k-epsilon Model		
Algorithm	SIMPLE		
Discretization Scheme	QUICK		
Boundary Condition	Inlet	Velocity : 0.1 to 1.0 m/s (every 0.1 m/s)	
	Outlet	Gauge Pressure : 0 Pa	
	Walls	Metal Wall : Standard Wall Function Symmetry : Free Slip	
Total Number of Cells	A : 227,964		
	B : 245,280		
	C : 299,412		

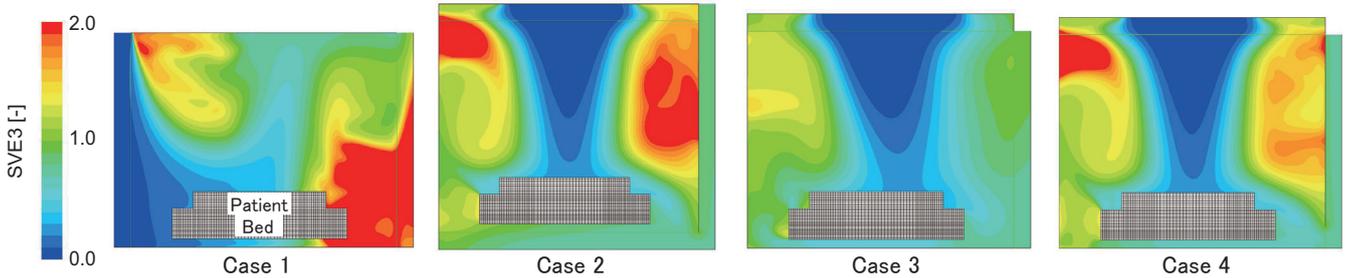


Fig.3 SVE3 Distribution for Case 1 - Case 4

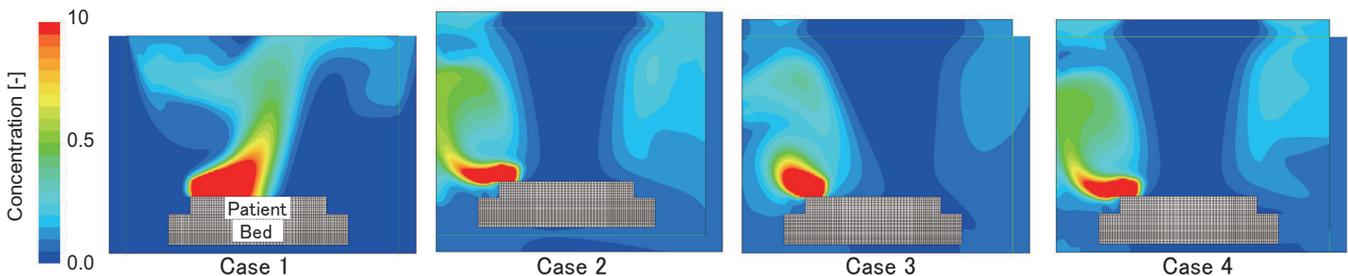


Fig.4 Concentration Distribution for Case 1 - Case 4

す。この特性を用いて無菌治療室の解析を再度行った。換気システムは Case 4 の換気方式を対象とした。Fig.7 にベッド中央断面における SVE3 分布を、各点の汚染質濃度を排気濃度で基準化した濃度分布を Fig.8 に示す。Table 5 に、解析結果から得られた各条件の室空気交換効率と汚染質除去効率を示す。パンチングメタルの開孔率が下がるに従って、SVE3 が高い部分が減少していき、また、汚染質は室下部へと流れていく傾向が見られた。室空気交換効率、汚染質除去効率においては、ともに上昇傾向が見られた。要因としては、開孔率が低くなったことにより、天井内部で新鮮空気が広がり、流入面全体から空気が流入するようになったことが影響したと考えられる。

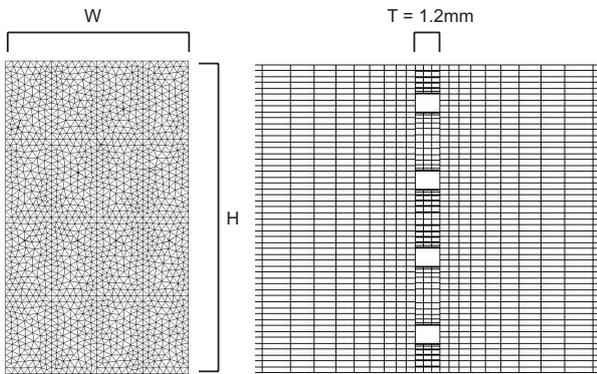


Fig.5 Mesh Layout for Punched Metal

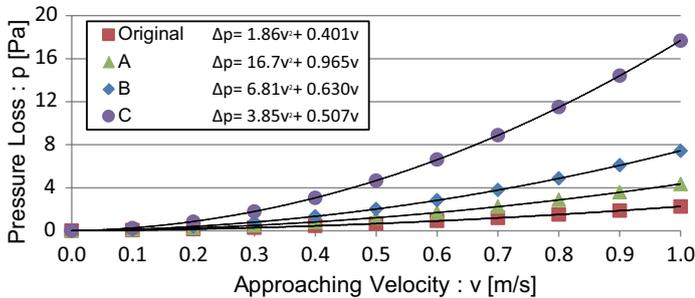


Fig.6 Pressure Loss of Punched Metal A - C

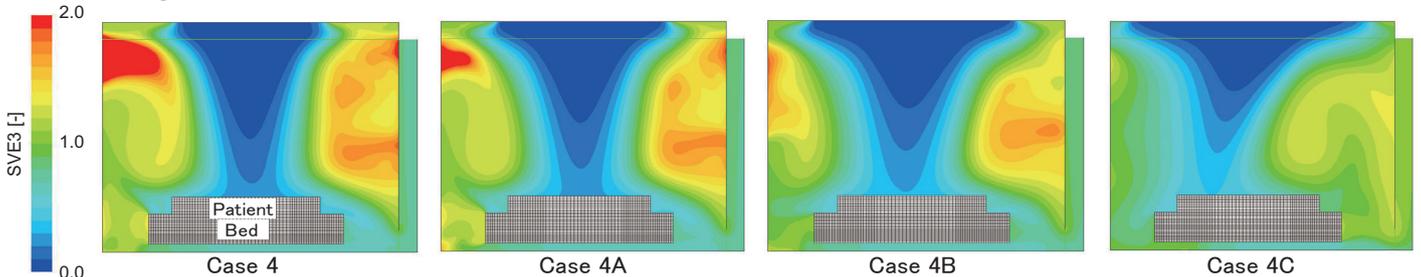


Fig.7 SVE3 Distribution for Case 4A - 4C

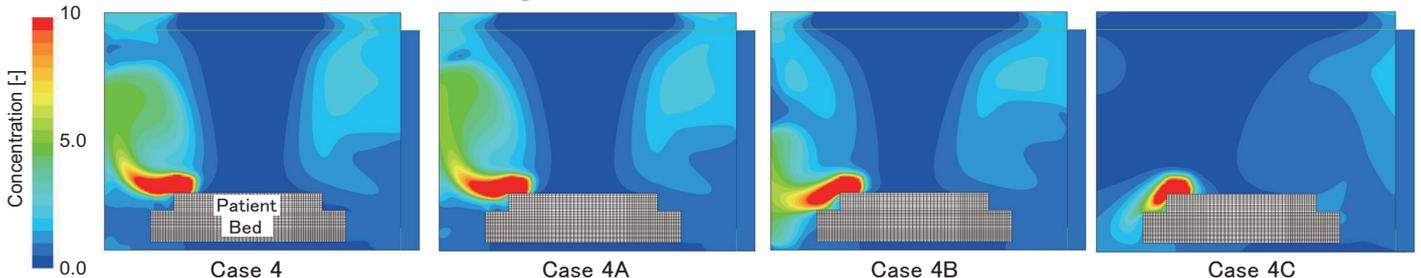


Fig.8 Concentration Distribution for Case 4A - 4C

4. まとめ

本研究では、無菌治療室における各種換気方式について非等温場でCFD解析を行い、室空気交換効率・汚染質除去効率を算出することで性能評価を行った。また、天井面給気の状態を対象としてパンチングメタル開孔率を変更した解析を行い、開口率が小さく天井全面から流入する条件で換気効率が上昇することを確認した。今後は、汚染質発生点の違いによる換気効率への影響の調査を行う所存である。

注)

本研究では予備検討として低レイノルズ型 $k-\epsilon$ モデルを用いた解析も行い、標準 $k-\epsilon$ モデルと比較して圧力損失特性に大きな差異がないことを確認している。

[参考文献]

- 1) 平成 24 年厚生労働省告示第 77 号：「基本診療料の施設基準等の一部を改正する件」
- 2) 村山 照ら：「無菌治療室を対象とした換気システムの性能評価に関する研究（その 2）気流方向と給気面積が等温場の換気効率に及ぼす影響」、空調調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、A-11, 2018.3
- 3) 徳原盛孝ら：「無菌治療室を対象とした垂直及び水平層流換気システムの換気効率評価」、空調調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、pp.240-243, 2015.3
- 4) 加藤 信介、村上 周三：「換気効率の評価モデルに関する研究その 1 新たな換気効率指標とその分布の定義及び算出法」、空調調和・衛生工学会講演論文集、1984.10

Table 5 Ventilation Efficiency for Case 4A - 4C

Case	Porosity	Air Change Efficiency [-] (ϵ^a)		Contamination Removal Efficiency [-] (ϵ^c)	
		Room	Around Bed	Room	Around Bed
Case 4	50.9%	0.433	0.575	0.625	0.700
Case 4A	40.3%	0.460	0.586	0.630	0.709
Case 4B	32.6%	0.491	0.599	0.636	0.708
Case 4C	22.7%	0.530	0.590	1.08	0.860