

# 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1) CFD解析による垂直/水平層流換気方式の空気交換効率評価

## Evaluation of Mechanical Ventilation System for Bio Clean Sickroom (Part 1) Air Change Efficiency of Vertical/Horizontal Ventilation System by CFD

正会員 ○徳原 盛孝 (ダイダン) 正会員 小林 知広 (大阪市立大学)  
正会員 梅宮 典子 (大阪市立大学) 雉鼻 一郎 (日本医化器械製作所)  
飯田 哲司 (日本医化器械製作所)

Moritaka TOKUHARA \*<sup>1</sup> Tomohiro KOBAYASHI \*<sup>2</sup> Noriko UMEMIYA \*<sup>2</sup> Ichiro KIJIHANA \*<sup>3</sup> Tetsuji IIDA \*<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup> DAI-DAN Co., Ltd \*<sup>2</sup> Osaka City University \*<sup>3</sup> Nippon Medical & Chemical Instruments

After the guideline regarding bioclean sickroom by Ministry of Health, Labour and Welfare was revised, it shall now be provided with vertical/horizontal laminar ventilation system. Nevertheless, details of these ventilation system have not been sufficiently defined. Consequently, the performance of bioclean sickroom has not been evaluated quantitatively. This work conducts CFD analysis for four cases of vertical/horizontal laminar ventilation system, and evaluates their ventilation performance in terms of ventilation efficiency.

### 1. はじめに

平成24年4月より無菌治療室の空調設備は垂直層流方式または水平層流方式の採用が義務化された<sup>1,2)</sup>。両換気方式に関して厚生労働省の疑義解釈は見られるが明確に定義されているとは言い難い。無菌治療室に関する研究事例はこれまでも見られるが<sup>3)</sup>、定量的な性能評価は多くない。本研究では垂直・水平層流換気方式の定量的な性能評価を目的とする。本報では一般的な垂直層流換気方式、水平層流方式、さらに床面にブロック式吸引ユニットを敷設した垂直層流換気方式をCFD解析により評価する。ここでは換気システムの効率という観点からの定量的評価を目的とし、汚染物濃度に基づく手法ではなく空気齢に基づく評価手法を用い、空気交換効率と局所空気交換指数<sup>4)</sup>の評価を行った結果を報告する。

### 2. 対象とする無菌病室の換気システム

図1に本研究で想定した無菌治療室の概要を示す。Case1, 2は壁面ダクトから排気する垂直層流方式、Case3は表面がパンチングメタルのブロック式吸引ユニットから下方向に吸い込み、その下部で水平に気流を移動させて壁ダクト内で排気する垂直層流方式、Case4はベッド付近で壁面から給気し、対面する壁面から排気する水平層流換気方式とした。各条件のSAまたはRA部の吹出/吸込器具をCFD解析で詳細に再現して室全体を解析することは計算負荷の観点から難しい。そこで、一様流下で器具の圧力損失特性を明らかにした上で病室全体を対象とした計算の構造格子に特性を組み込むこととする。

### 3. 給排気パネルのみを詳細に再現したCFD解析

#### 3.1 CFD解析概要

SA/RAパネルの圧力損失特性を明らかにするため、非構造格子により詳細に再現して一様流下でCFD解析を行う。図2及び図3に断面図と解析領域の格子配置を示す。表1に給排気部に用いた吹出/吸込器具の詳細、表2に解析条件を示す。ここでは対称となる位置で主流方向に直向する解析空間の境界をFree Slipとして無限に続く平板を再現し、圧力損失の評価を行う。格子分割幅は最小0.4mmとし、パネル部から主流方向に離れるにつれて分割幅を大きくした。流入境界では一様流入流速を10段階に変化させ、0.1m/sから1.0m/sまで0.1m/s刻みとした。流出境界は圧力規定とし、乱流モデルは標準k-εモデルを用いた。

#### 3.2 解析結果と圧力損失特性式

図4に各器具に対する風速と圧力損失(流入境界の静圧差)を示す。ここで得られた流速と圧力損失の特性式は、次章のCFD解析で設置が想定される位置の構造格子において運動量保存式の損失項として考慮する。なお、圧力損失の特性式は風速の2次式を想定するため図4には得られた式の2次近似式も併記している。この2次式は次章のCFD解析では以下の式により粘性抵抗係数と慣性抵抗係数に基づいて運動量損失項として反映される。

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

右辺第1項はダルシー則に基づく粘性による損失項で右辺第2項は慣性による損失項を表す。ここで $\alpha_i$

[m<sup>2</sup>] は浸透率で、その逆数の (1/ $\alpha_i$ ) [1/m<sup>2</sup>] が粘性抵抗係数を表す。また、 $C_{2i}$  [1/m] は慣性抵抗係数を表す。 $\Delta n$  は格子の厚みである。本研究では、ここで得られた圧力損失特性式の1次と2次の係数に基づき算出された  $\alpha_i$  と  $C_{2i}$  を使用して、運動量保存式に (1) 式に示した損失を付加することでパネルにする方向の圧力損失係数を与えた。なお、パネル部に平行な方

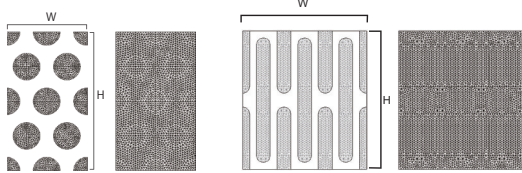


図2 器具断面のメッシュ図

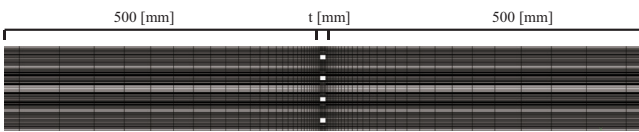


図3 解析領域におけるメッシュレイアウト

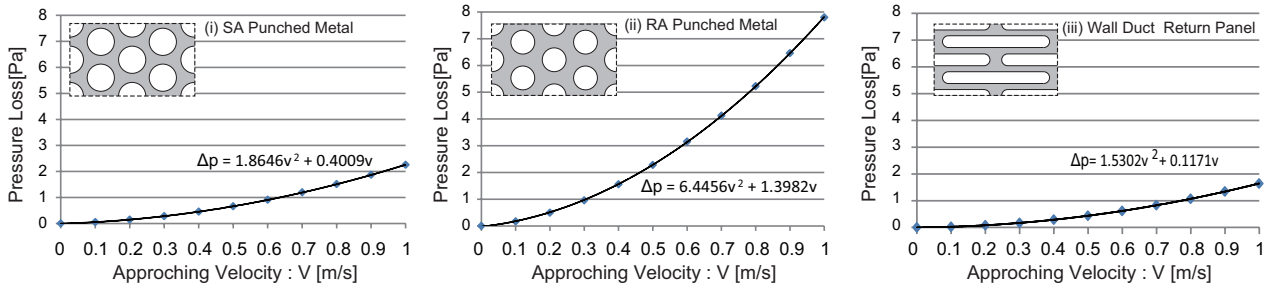


図4 各 SA/RA パネルにおける圧力損失特性

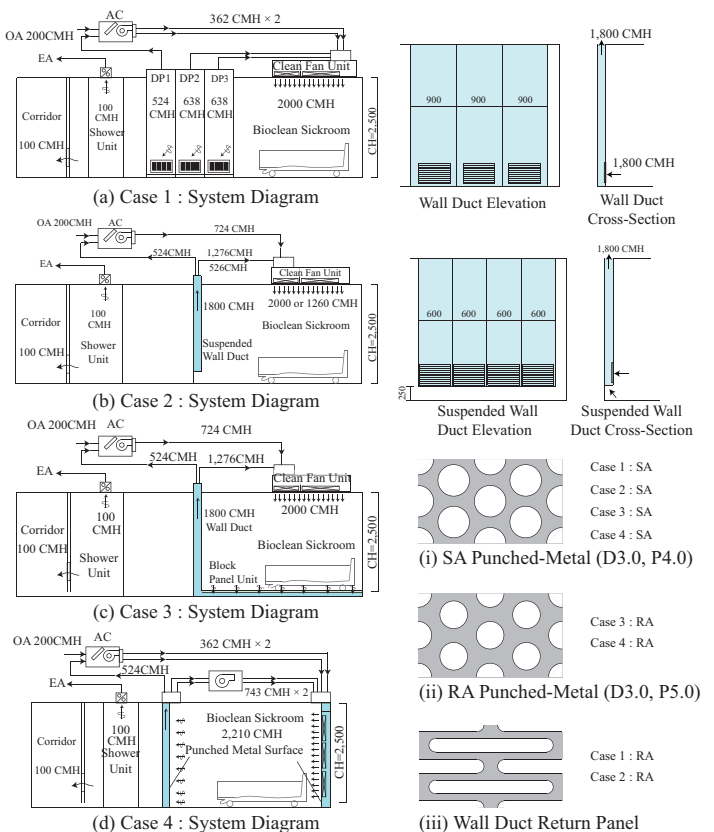
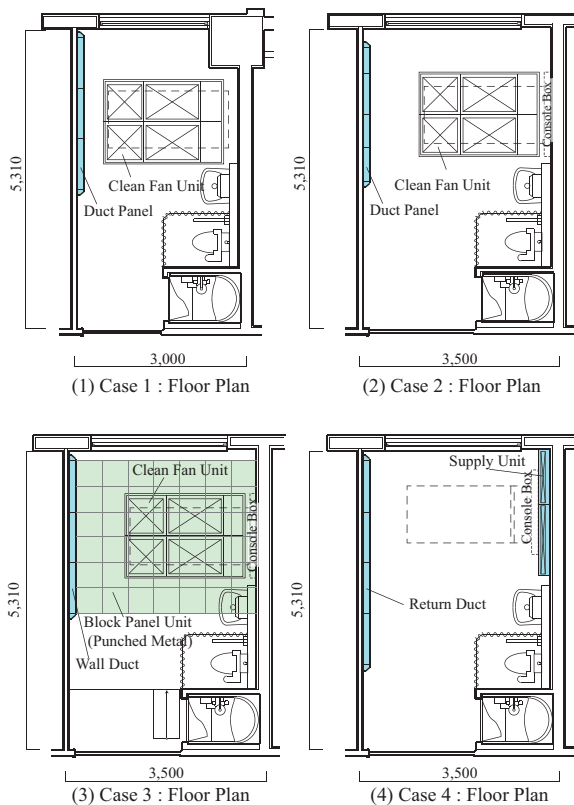


図1 対象とする無菌治療室の概要

表1 SA/RA パネル詳細

ID	Punched Metal		Duct Panel
	SA	RA-1	RA-2
Diameter : $D$	3.0 mm	3.0 mm	-
Pitch : $P$	4.0 mm	5.0 mm	-
Porosity : $\varphi$	50.9 %	32.6 %	58.5 %
W	8 mm	10 mm	54 mm
H	13.856 mm	17.32 mm	60 mm
T	1.2 mm	3.0 mm	1.2 mm
Total number of grids	205,920	338,988	649,704

表2 吹出 / 吸込器具を対象とした CFD 解析の計算条件

CFD Code	ANSYS Fluent 14.5	
Discretization Scheme for Advection Term	QUICK	
Algorithm	Steady State (SIMPLE)	
Boundary Condition	Inlet	Velocity : 0.1 to 1.0 m/s (every 0.1 m/s) $k, \epsilon$ : based on Turbulent Intensity and Length Scale $I=1.0\%$ , $L=10\text{mm}$
	Outlet	Gauge Pressure : 0 Pa
Total Number of Grids	205,290 ( $D=3.0, P=4.0$ Porosity 50.9%)	338,988 ( $D=3.0, P=5.0$ Porosity 32.6%)
	649,704 (Porosity 58.5%)	
Turbulence Model	Standard k-epsilon Model (SKE)	

向には固体が存在するため圧力損失係数は理論的には無限大であるが、ここでは計算の安定のため主流方向の1,000倍の抵抗係数を設定した<sup>5)</sup>。

#### 4. CFD解析による無菌治療室の換気効率評価

##### 4.1 換気効率の評価方法

本研究では換気効率の観点から垂直/水平層流方式を「ピストンフローに近い換気システム」と解釈して対象システムを評価する。そのため空気齢に基づく性能評価が妥当と判断し、室の空気交換効率及び局所空気交換指数を用いた評価を行う。室全体の平均空気齢を $\langle \tau \rangle$ とすると、室全体の空気交換効率は以下のように空気交換時間と名目換気時間の比となる。

$$\epsilon^a = \frac{\text{Nominal Time Constant}}{\text{Air change time}} = \frac{V_r/Q}{2\langle \tau \rangle} \quad (2)$$

また、同様の考えにより室内の特定の位置Pにおける平均空気齢の2倍の値を分母とすると、

$$\epsilon_p^a = \frac{V_r/Q}{2\tau_p} \quad (3)$$

が局所空気交換指数を表す。(2)式の空気交換効率は理想的なピストンフローで1.0、完全混合で0.5で、(3)式の局所空気交換指数はその点の指標である。

##### 4.2 CFD解析概要

図5にCase3の垂直層流方式(ブロック式吸引ユニット)の格子分割を示す。また、表3に解析条件を示す。本研究ではCase1~4の4条件に関して原則として等温場で解析を行い、空気交換効率とベッド付近の領域の平均的な局所空気交換指数を評価する。また、Case3,4については発熱体を設置した非等温場のCFD解析も行い、等温条件との比較も行う。非等温解析では、ベッド上に仰臥人体を想定した発熱体(300×200×1,600mm)を設置し、発熱量は60Wとした。また、ベッドの側方の窓側に発熱量100Wで300mm角の発熱体を設置し、吹出温度は20℃、壁面は断熱境界とした。室表面に露出しているパネルは前章で得られた特性式を組み込み、これらの格子分割は主流方向に2分割とした。

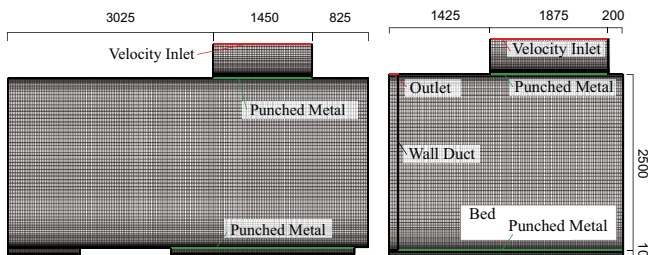


図5 Case3におけるメッシュレイアウト

##### 4.3 等温での解析結果と換気効率評価比較

表4に等温条件での室全体の平均空気齢と空気交換効率を示す。また、図6にベッド中央断面の空気齢分布を示す。どの条件も平均空気齢が名目換気時間より大きく、空気交換効率は0.3程度となった。この結果は空気の滞留域が存在し、室全体で見た際にショートサーキットが発生していることになるが、対象としたシステムはどれも主にベッドが配置された病室奥側の領域で一方向流が形成されるよう意図されている。このため、シャワーブースや入口付近では気流が滞留しやすい傾向にある。

ここで、ベッド周辺領域のみに着目して、鉛直方向は床面から床上2,100mmまで、水平方向にはベッドから500mm(壁面が存在する場合には壁面まで)の領域を抽出して同様に平均空気齢を算出し、領域内平均の局所空気交換指数を算出した(表5)。この結果、最も重要なベッド周辺領域では垂直層流方式ではどの条件も大差なく平均局所空気交換指数が0.8以上となり、水平層流方式については、2.26となった。このことから、本研究で対象としたシステムでは、患者の居住域として清浄に保つことを意図したベッド周辺領域ではあまり混合されずに新鮮な空気で満たされており、垂直層流方式と比較すると水平層流方式の方が明らかに局所的な空気交換効率が高いと言える。これは対象とした水平層流方式の吹出し面積が大きいことに対して、垂直層流方式のCase1~3では天井の一部から吹出したためと言え、床面からある程度の高さでは、吹出口直下以外で空気齢の値が大きくなったためと言える。したがって、さらに性能を向上させるためには天井面全体から吹出しに近づけることが望ましいと言える。

表3 無菌治療室全体を対象としたCFD解析の計算条件

CFD Code	ANSYS Fluent 14.5		
Discretization Scheme for Advection Term	QUICK		
Algorithm	Steady State (SIMPLE)		
Boundary Condition	Inlet	Case 1 : Vertical Laminar (Wall Duct)	2,000 CMH
		Case 2 : Vertical Laminar (Suspended Wall Duct)	
		Case 3 : Vertical Laminar (Block Panel Unit)	
		Case 4 : Horizontal Laminar	
	k, ε : based on Turbulent Intensity and Length Scale I=5.0%, L=10mm		
Outlet	Based on Flow Rate and Outlet Area		
Wall	Room Wall : Standard Wall Function (Generalized Low Law)		
Total Number of Grids	Case 1 : 4,239,620 (Vertical Laminar Flow: Wall Duct)		
	Case 2 : 4,084,259 (Vertical Laminar Flow: Suspended Wall Duct)		
	Case 3 : 2,835,802 (Vertical Laminar Flow: Block Panel Unit)		
	Case 4 : 3,797,340 (Horizontal Laminar Flow)		
Turbulence Model	Standard k-epsilon Model		
Modeling Method of Punched Metal	Source Term for Momentum Equation based on Pressure Loss Characteristics		

#### 4.4 非等温での解析結果と換気効率評価比較

表6に非等温計算における室全体での平均空気齢と空気交換効率を示す。また、表7にはベッド周辺領域の平均空気齢と局所空気交換指数の平均値を示す。室全体では空気交換効率は等温時と大差なく、水平層流方式では効率の低下が見られる。ベッド付近の場合でも平均の局所空気交換指数は低下しているが、これは熱上昇流の影響と考えられる。図7に非等温計算条件での温度分布と空気齢分布を示すが、垂直層流方式（Case 3）では熱上昇流と吹出气流が衝突してベッド付近での混合が促進されることや、水平層流換気（Case 4）では新鮮な空気が患者の足下付近で上昇しやすいため空気齢の小さな気流が居住域外に移動した可能性が考えられる。本研究で与えた熱負荷は小さいものの、ベッド周辺の熱負荷が周辺空気齢を増加させることがわかる。また、本研究で想定した条件では、ベッド周辺の局所空気交換指数は等温時と同様に水平層流方式の方が良いと言える。

表4 室全体における等温での換気効率

Case	Room Volume [m <sup>3</sup> ]	Ventilation Rate [m <sup>3</sup> /h]	Nominal Time Constant [s]	Air Change Rate [-/h]	Average Age of Air [s]	Air Change Efficiency [-]
Case 1 Isothermal	38.3	2,000	68.9	52.2	112	0.307
Case 2 Isothermal	43.7	2,000	78.7	45.7	116	0.339
Case 3 Isothermal	44.6	2,000	80.2	44.9	137	0.293
Case 4 Isothermal	43.7	2,210	71.2	50.5	159	0.224

表5 ベッド周辺領域における等温での換気効率

Case	Room Volume [m <sup>3</sup> ]	Ventilation Rate [m <sup>3</sup> /h]	Nominal Time Constant [s]	Air Change Rate [-/h]	Average Age of Air [s]	Average Local Air Change Index [-]
Case 1 Isothermal	38.3	2,000	68.9	52.2	41.0	0.840
Case 2 Isothermal	43.7	2,000	78.7	45.7	44.8	0.878
Case 3 Isothermal	44.6	2,000	80.2	44.9	45.9	0.874
Case 4 Isothermal	43.7	2,210	71.2	50.5	15.8	2.261

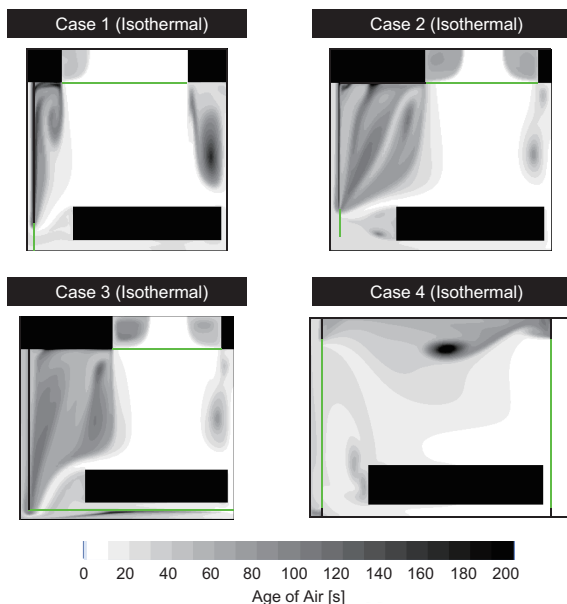


図6 等温での空気齢分布

#### 4 まとめ

本報では無菌治療室を対象としてCFD解析を実施し、換気効率の観点から性能評価を行った。どの条件においても入口付近で空気が滞留しやすい領域が発生したが、ベッド付近の領域は空気齢が小さい値に保たれていた。また、垂直層流方式と比較して水平層流方式で概して局所空気交換指数が高くなった。

#### [参考文献]

- 文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」
- 文2) 平成24年厚生労働省通知(保医発0305第2号):「基本診療料の施設基準等及びその届出に関する手続きの取り扱いについて」別添3第12の3
- 文3) 例えば, 山下礼二, 伊藤修一, 森岡雅代:「垂直層流型無菌病室における塵埃拡散シミュレーションと実測」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.553-556, 1996.9.
- 文4) 例えば, REHVA編, 空気調和・衛生工学会誌・編, :「換気効率ガイドブック-理論と応用」空気調和・衛生工学会, 2009.10.
- 文5) 樋口彩子, 小林知広, 岩田剛, 相良和伸ら: 温度成層型水蓄熱槽のCFD解析-ディフューザー吐出部のパンチングメタルのモデル化手法の検討-, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.149-152, 2013.9

表6 室全体における非等温での換気効率

Case	Room Volume [m <sup>3</sup> ]	Ventilation Rate [m <sup>3</sup> /h]	Nominal Time Constant [s]	Air Change Rate [-/h]	Average Age of Air [s]	Air Change Efficiency [-]
Case 3 Non-Isothermal	44.6	2,000	80.2	44.9	127.5	0.315
Case 4 Non-Isothermal	43.7	2,210	71.2	50.5	242.0	0.147

表7 ベッド周辺領域における非等温での換気効率

Case	Room Volume [m <sup>3</sup> ]	Ventilation Rate [m <sup>3</sup> /h]	Nominal Time Constant [s]	Air Change Rate [-/h]	Average Age of Air [s]	Average Local Air Change Index [-]
Case 3 Non-Isothermal	44.6	2000	80.2	44.9	60.6	0.662
Case 4 Non-Isothermal	43.7	2210	71.2	50.5	17.8	1.997

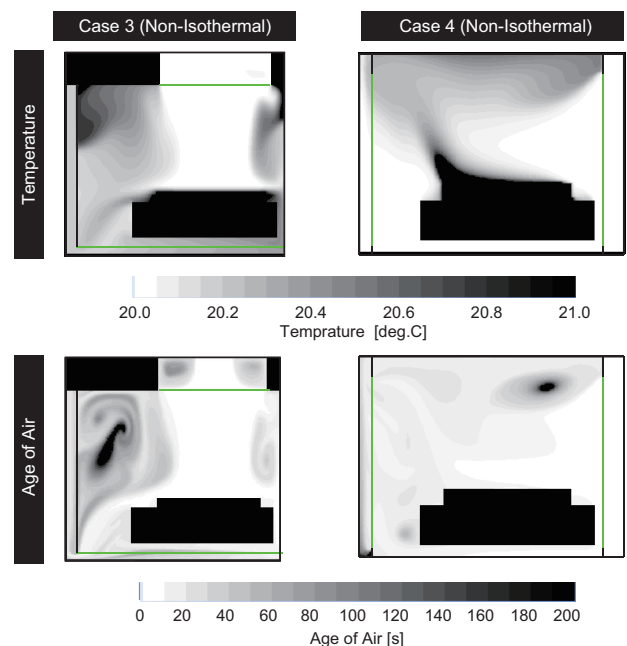


図7 非等温での温度・空気齢分布