

## 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性能評価 (その1) CFD解析を用いた空気齢に基づく換気効率評価

正会員 ○徳原 盛孝\*<sup>1</sup> 同 小林 知広\*<sup>2</sup> 同 梅宮 典子\*<sup>3</sup>  
雫鼻 一郎\*<sup>4</sup> 飯田 哲司\*<sup>4</sup>

### 4. 環境工学 - 13. 空気流動応用

無菌治療室 垂直層流 水平層流  
CFD 空気交換効率

#### 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、水平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<sup>1,2)</sup>。「垂直層流方式」「水平層流方式」に関しては、厚生労働省による疑義解釈は見られるものの、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<sup>3)</sup>はこれまでも見られるものの、前述の背景から各方式の評価手法が確立されていないため、定量的な性能評価はあまり見られない。そこで本研究では各種垂直・水平層流換気方式の定量的な性能評価を行うことを目的とする。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換気層流方式を対象としてCFD解析により性能評価

を行う。ここでは各換気方式を「病室に対する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する。そのため具体的な汚染物質発生を想定する手法ではなく空気齢に基づく評価手法を採用し、各方式の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換気システムの概要を示す。Case1, 2は壁面ダクトから排気する方式、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は主に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を想定した。

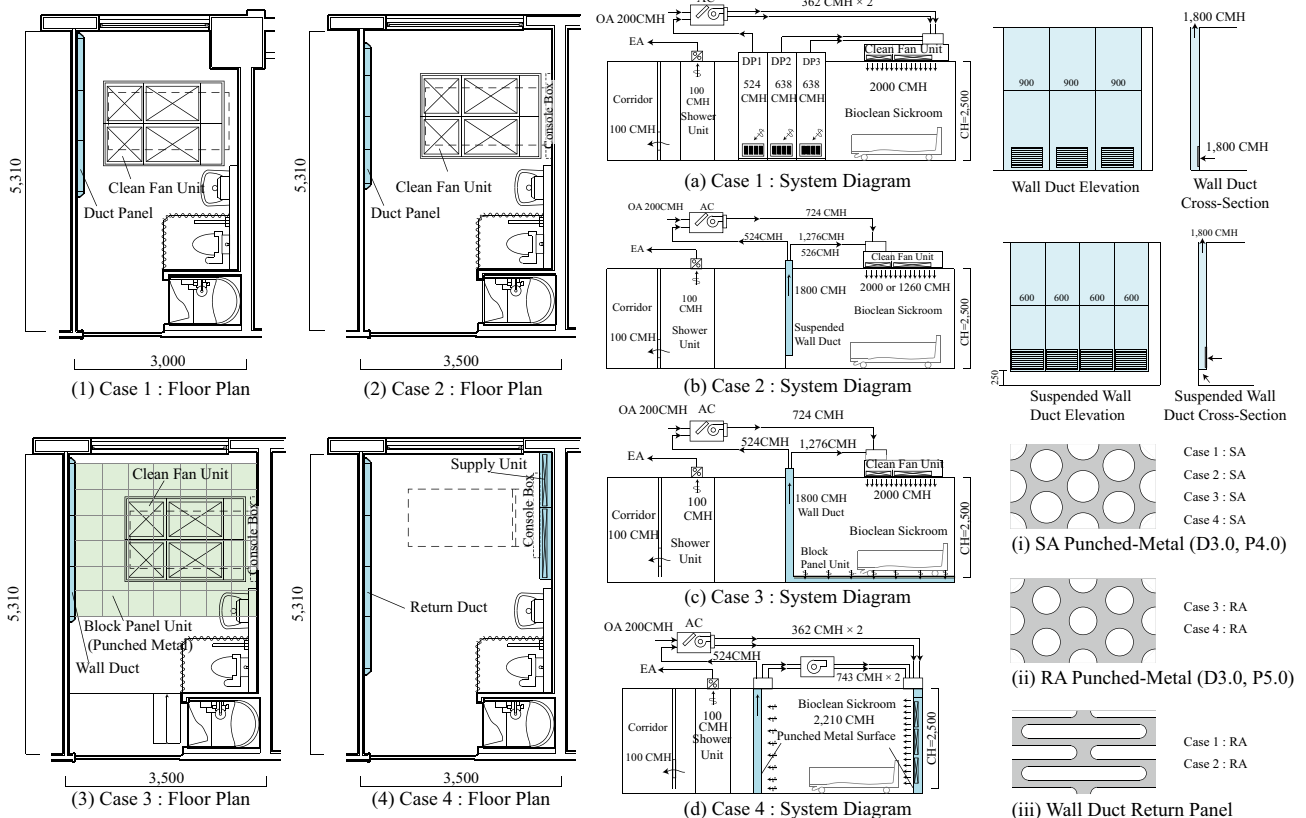


図1 対象とする無菌治療室

Performance Evaluation of Vertical/Horizontal Ventilation for Bio-Clean Sickroom  
Part 1. Ventilation Efficiency based on Age of Air analysed by CFD

TOKUHARA Moritaka, KOBAYASHI Tomohiro, UMEMIYA Noriko, KIJIHANA Ichiro, and IIDA Tetsuji

各条件の SA または RA 部にはパンチングメタルやパネルが用いられており、これを CFD 解析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。そこで、一様流下のパネル部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。

### 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、各パネルを非構造格子によって詳細に再現して一様流下での CFD 解析を行う。図 2 及び図 3 に断面図及び解析領域のメッシュレイアウトを示す。また、表 1 には給気、排気部に用いられたパンチングメタル及びダクトパネルの詳細、表 2 に CFD 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 境界とすることで無限に続く平板を再現して圧力損失の評価を行う。格子分割幅は最小 0.4mm とし、対象とするパネル部から主流方向に離れるにつれて分割幅が大きくなるように設定した。流入境界では一様流入流速の値を 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 に各パネルに関するアプローチフロー風速と圧力損失（流入出境界の静圧差）を示す。ここで得られた流速と圧力損失の特性式は、次章に示す CFD 解析でその設置が想定される位置の構造格子において、運動量保存式に損失項を加えることで考慮される。な

お、圧力損失の特性式は風速の 2 次式で与えることを想定するため、図 4 には得られた特性式の 2 次の近似的も併記しており、この 2 次式は次章の CFD 解析のパネル位置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することとする。

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

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>。

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 : $\phi$	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 CFD 解析条件

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, ε : based on Turbulent Intensity and Length Scale I=1.0 %, L=10mm
	Outlet	Gauge Pressure : 0 Pa
	Wall	Metal Wall : Standard Wall Function (Generalized Log Law)
		Symmetry : Free Slip
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)	

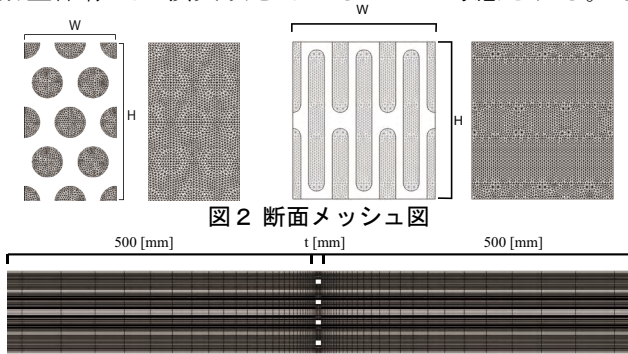


図 2 断面メッシュ図

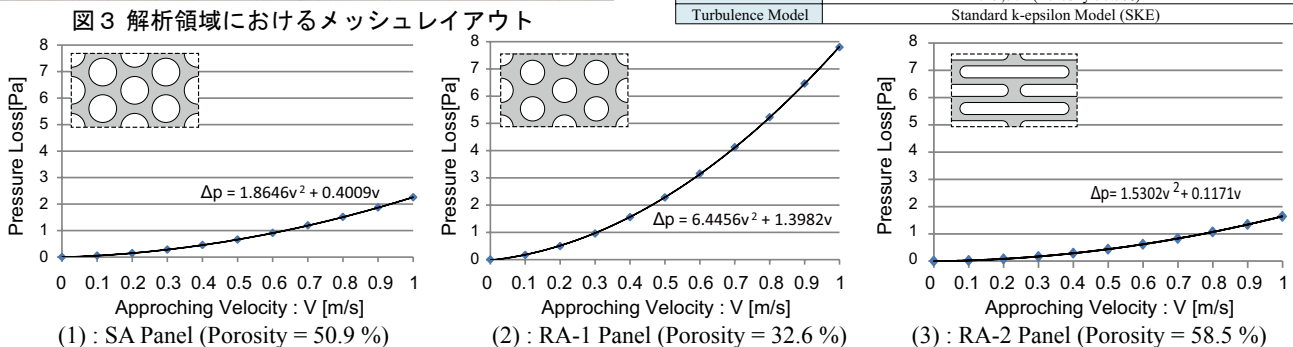


図 3 解析領域におけるメッシュレイアウト

図 4 各 SA/RA パネルにおける圧力損失特性

#### 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層流換気または水平層流方式を「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の評価を行う。そのため、性能評価指標は空気齢に基づく指標が妥当と判断し、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 $\epsilon^a$ は以下のように空気交換時間に対する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 60 W とした。また、ベッドの側方の窓側に発熱量 100 W の 300 mm 角の発熱体を設置し、吹出温度は 20°C、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、パネルの格子分割は主流方向に 2 分割とした。

##### 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は名目換気時間より大きく、空気交換効率が 0.3 程度となった。この結果

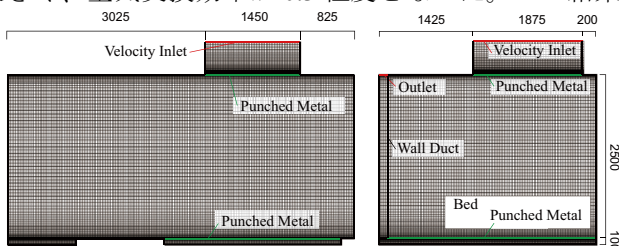


図 5 Case3 メッシュレイアウト

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 500 mm（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 Case 1 ~ 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。

##### 4.4 非等温での解析結果と換気効率評価比較

非等温計算の結果に関して、前節と同様に Table 6 に室全体での平均空気齢と空気交換効率を示す。また、Table 7 にはベッド周辺の領域の平均空気齢と局所空気交換指数の平均値を示す。室全体で見た際には空気交換効率は等温時と変わらないオーダーであり、水平層流方式では効率の低下が見られる。ベッド付近に着

表 3 CFD 解析条件

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)
		Case 2 : Vertical Laminar (Suspended Wall Duct)
		Case 3 : Vertical Laminar (Block Panel Unit)
		Case 4 : Horizontal Laminar
		2,000 CMH
		2,210 CMH
		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	

目した場合でも平均の局所空気交換指数は低下している。これらの結果は熱上昇流の存在が影響していると考えられる。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気流が衝突することでベッド付近での混合が若干促進されることや、水平層流換気（Case 4）では新鮮な空気がベッド上の患者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。本研究で想定した熱負荷はあまり大きくないが、ベッド周辺の熱負荷は周辺空気齢を増加させる傾向にあると言える。また、等温時と同様に、ベッド周辺の局所空気交換指数は、ここで想定した条件では垂直層流方式よりも水平層流方式の方が良いと言える。

#### 4 まとめ

本報では3種の垂直層流換気方式と水平層流換気方式の無菌治療室を対象として、CFD解析を実施する

表4 室全体における等温での換気効率評価

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評価

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

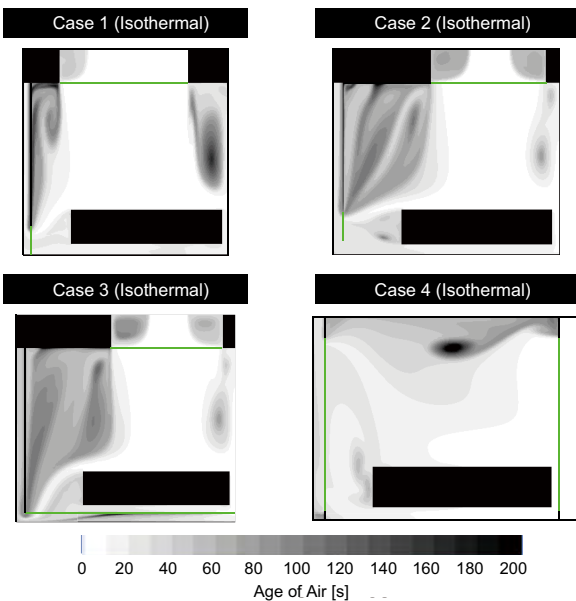


図6 等温での空気齢分布

ことで換気効率の観点からその性能評価を行った。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、患者の主たる居住域と想定するベッド付近の領域で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・衛生工学会訳・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評価

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評価

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

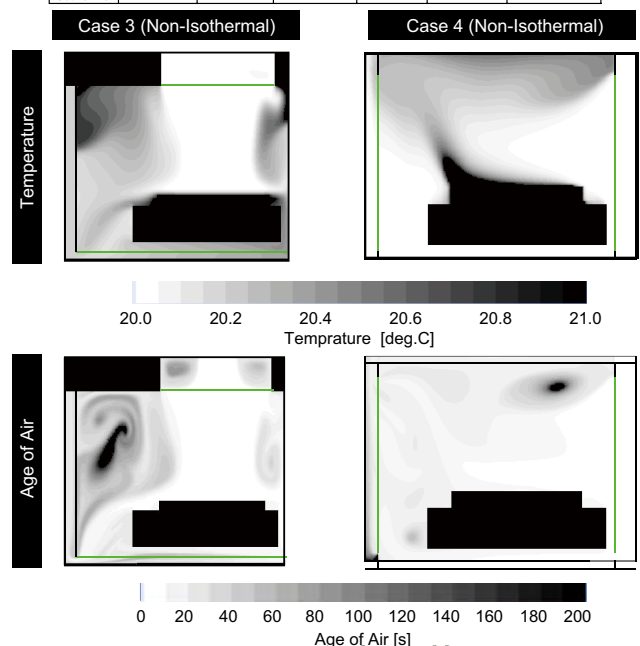


図7 非等温での温度・空気齢分布

\* 1 大阪市立大学工学部建築学科 学部生  
 \* 2 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 講師 博士 (工学)  
 \* 3 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 教授 博士 (工学)  
 \* 4 日本医化器械製作所

Undergraduate Student, Department of Architecture, Faculty of Eng., Osaka City University  
 Lecturer, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr.Eng.  
 Professor, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr.Eng.  
 Nippon Medical & Chemical Instruments