

無菌治療室を対象とした 室内気流性状と空気交換効率評価

大阪市立大学
大学院工学研究科
建築環境工学研究室
小林 知広

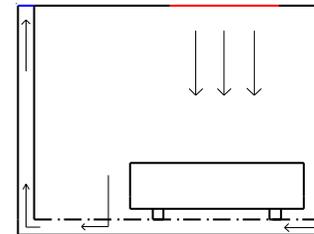
はじめに：共同研究の背景

2

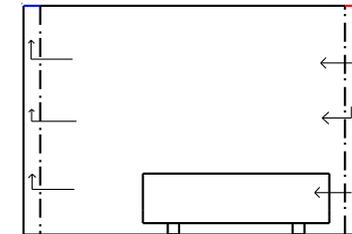
H24年4月より無菌治療室管理加算に関する設置基準が改定

- ① 自家発電設備を有している
- ② 滅菌水の供給が常時可能
- ③ 個室であること
- ④ 空気清浄度が常時ISOクラス6以上
- ⑤ 空調設備が垂直層流式方式、水平層流方式
またはその双方を併用した方式

垂直層流方式



水平層流方式



はじめに

3

厚労省通知：空調設備を...

- ・水平層流換気方式
- ・垂直層流換気方式
- ・その双方を併用した方式

のいずれかを採用すること

厚労省の疑義解釈は見られるが、その一方で

例えば、吹出し風速や給排気口面積といった
詳細な設計条件に明確な規定はない

定義自体が曖昧で、
定性的



無菌治療室の換気システムを
定量的に性能を評価する
手法も確立されていない

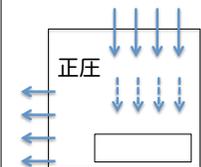
疑義解釈（厚労省）

4

(問2) A224無菌治療室管理加算1に関する施設基準に「当該治療室の空調設備が垂直層流方式、水平層流方式又はその双方を併用した方式である。」とあるが、空気の流れが壁から対壁への層流になっていない場合であっても、以下を全て満たす室については、当該施設基準を満たすのか。

- ・当該個室が陽圧である
- ・空調設備の送気口が1か所である
- ・患者頭部にはHEPAフィルターを通した送気口からの直接の空気だけが流れ、患者の直上にある空気がそれ以外の場所を経て再度患者の頭上に戻ってくる
ことがない

Q：これはOK？



(答) 当該施設基準を満たす。この場合、当該加算を算定する日にあっては、病室の

この程度の評価にとどまっているのが現状。
(一方向流の程度や性能まで議論されていない)

A：OK！

ただし、

- ・給気口1カ所
- ・給気口と排気口は別の壁面に

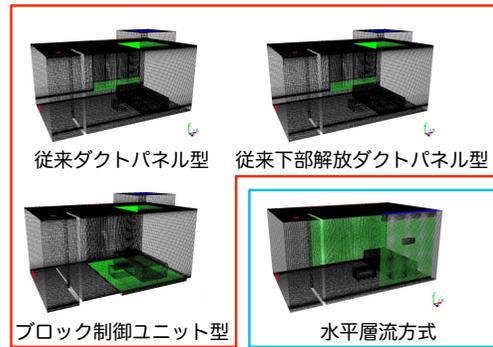
なお、下記のいずれかに該当する場合は、当該施設基準を満たさないため留意されたい。

- ・垂直層流方式及び水平層流方式双方を併用した方式以外で、送気口が2か所以上ある場合又は送気が多方向性になっている場合
- ・送気口及び吸気口が双方とも同一の壁面（天井を含む。）にある場合（空気の流れが一方向になるよう隔壁等で送気口と吸気口の間を区切っている場合を除く。）

研究の目的と流れ

5

例として4種類の換気システムを取り上げる。



発表の流れ

対象とする無菌治療室の換気システムの説明。

無菌治療室のCFD解析における計算負荷の軽減を目的とした詳細部みのCFD解析。

無菌治療室のCFD解析による換気方式の性能評価。

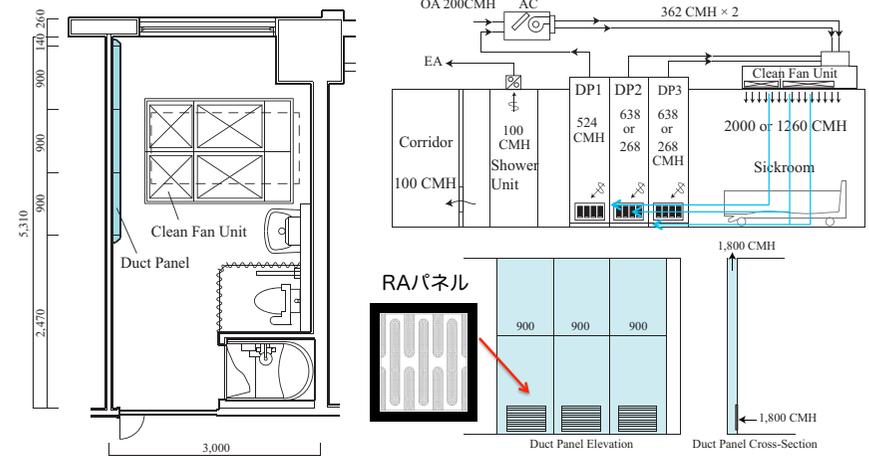


CFD解析を用いて、各換気方式の定量的な性能評価を行うことが目的。

対象とするシステム：Case 1

6

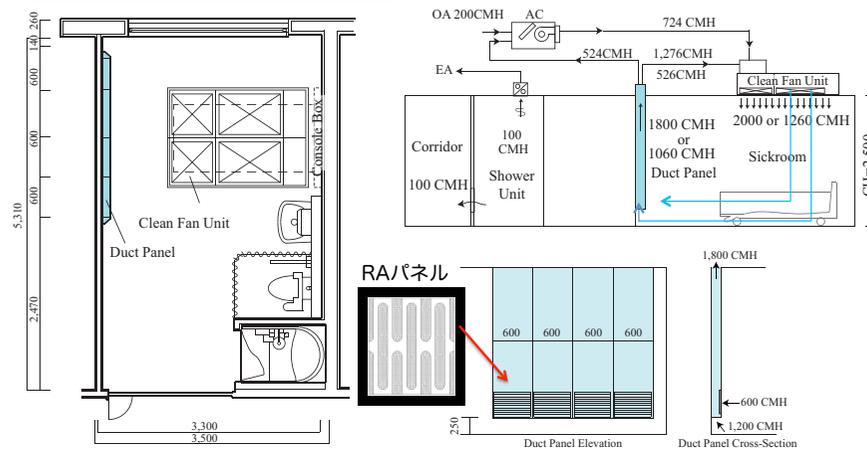
Case 1: 垂直層流方式
従来ダクトパネル型



対象とするシステム：Case 2

7

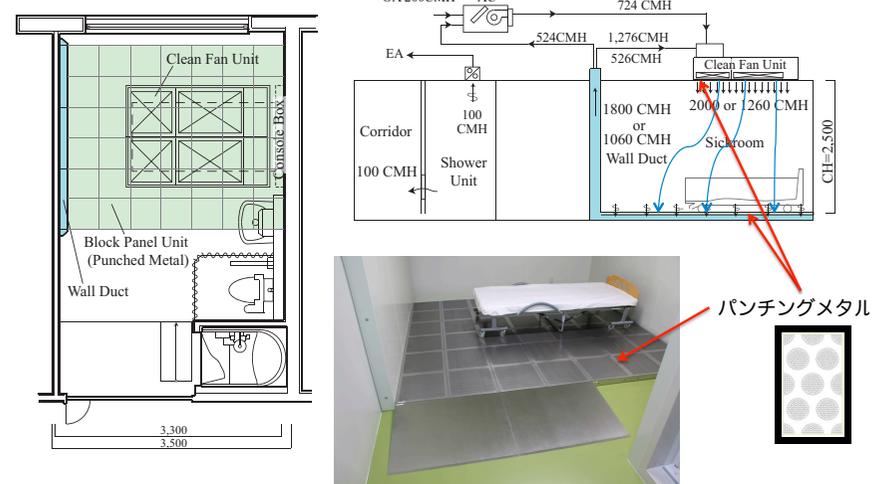
Case 2: 垂直層流方式
従来下部開放ダクトパネル型



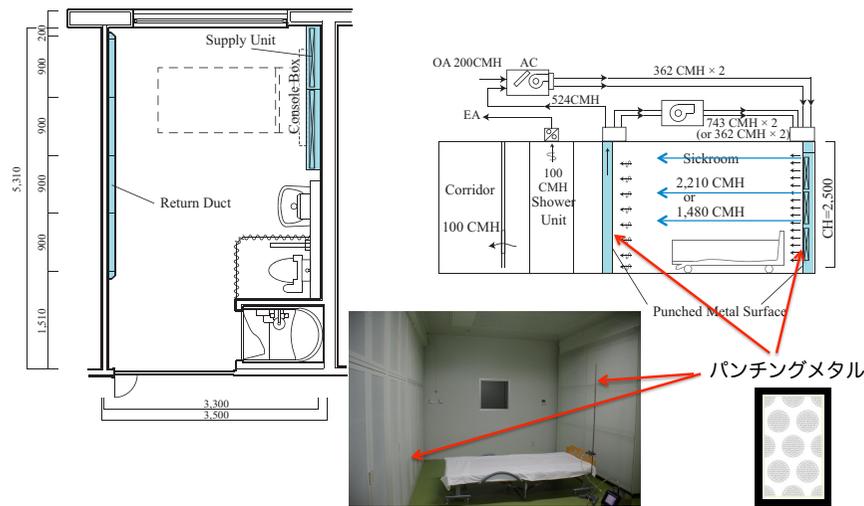
対象とするシステム：Case 3

8

Case 3: 垂直層流方式
ブロック制御ユニット型



Case4: 水平層流方式
ブロック制御ユニット型



CFD解析における問題点

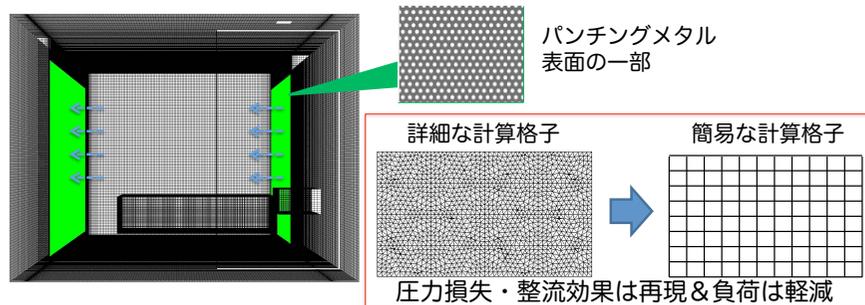
SA/RA用のパネル・パンチングメタルの孔が小さい (数ミリ)

→病室全体を解析する際、小孔の全て再現すると**計算量が膨大に (事実上不可能)**

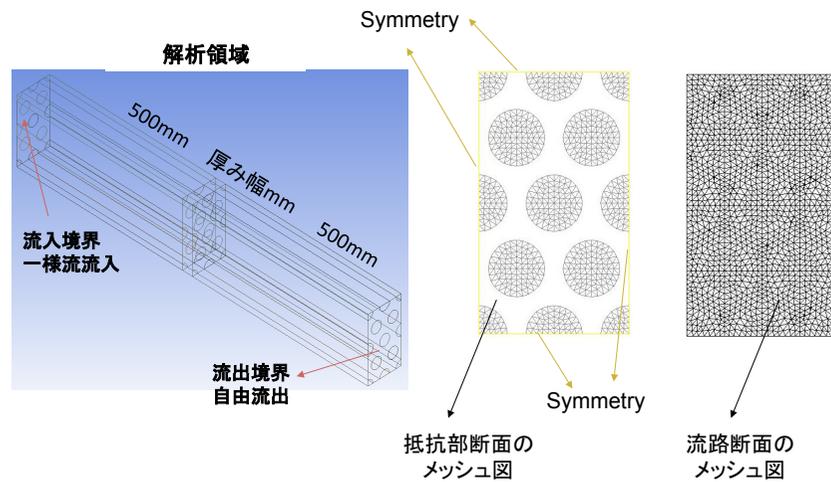
■解決策として

→通過時の**圧力損失をあらかじめ取得**

→比較的粗く、**簡易な形状の計算格子に「圧力損失特性」だけを与える**

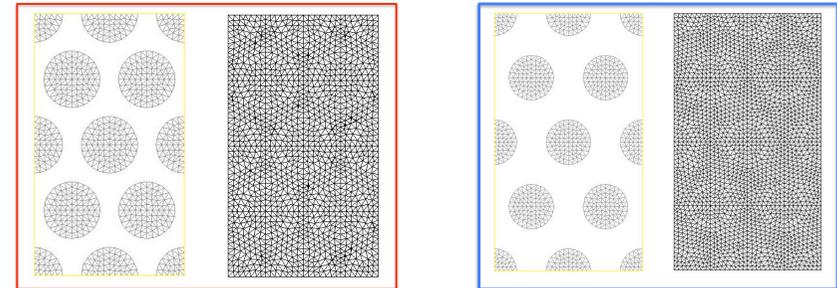


パンチングメタル等の抵抗部のCFD解析 - 概要



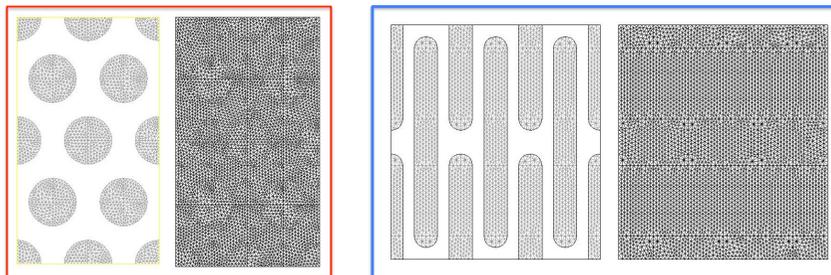
上下左右にFree Slip境界条件 (対象面を仮定した) することで、無限に続く平板を再現して、圧力損失の評価を行う

パンチングメタル等の抵抗部のCFD解析 - 詳細



	パンチングメタル			ダクトパネル
	SA面	RA面(1)	RA面(2)	RA面
直径	3mm	3mm	8mm	-
ピッチ	4mm	5mm	12mm	-
開口率	50.9%	32.6%	40.2%	58.5%
幅	8mm	10mm	24mm	54mm
高さ	13.856mm	17.32mm	41.568mm	60mm
厚み	1.2mm	3mm	3mm	1.2mm
メッシュ数	205,920	338,988	673,024	649,704

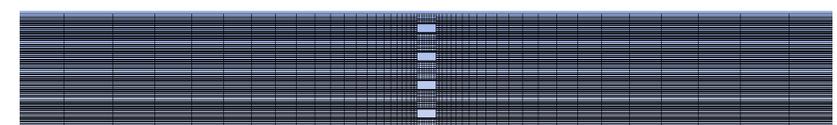
パンチングメタル等の抵抗部のCFD解析 - 詳細



	パンチングメタル			ダクトパネル
	SA面	RA面(1)	RA面(2)	RA面
直径	3mm	3mm	8mm	-
ピッチ	4mm	5mm	12mm	-
開口率	50.9%	32.6%	40.2%	58.5%
幅	8mm	10mm	24mm	54mm
高さ	13.856mm	17.32mm	41.568mm	60mm
厚み	1.2mm	3mm	3mm	1.2mm
メッシュ数	205,920	338,988	673,024	649,704

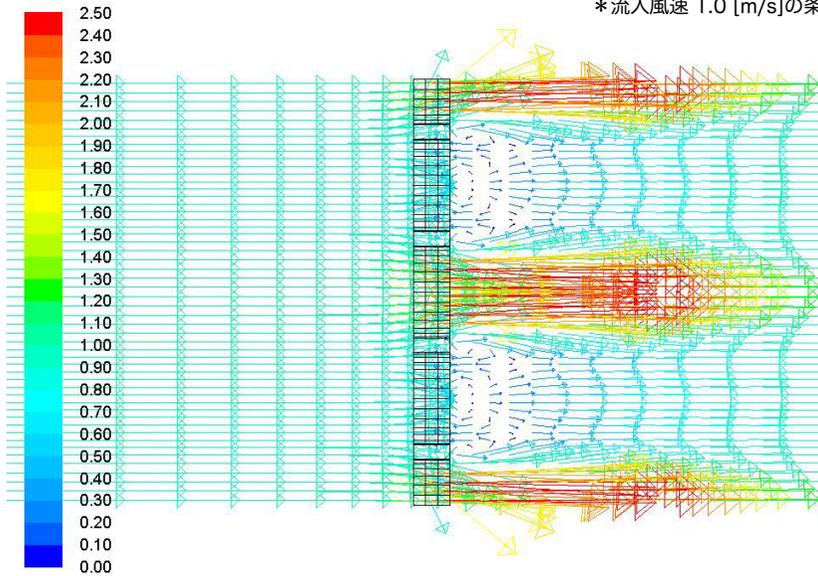
パンチングメタル等の抵抗部のCFD解析 - 手法一覧

CFD コード	ANSYS Fluent 14.5	
移流項差分スキーム	QUICK	
Algorithm	定常計算 (SIMPLE)	
境界条件	流入	流速 : 0.1 m/sから1.0 m/sまで (0.1 m/s刻み) k, ε : 乱流強度と乱れの長さスケールに基づく 乱流強度 : I=1.0 %, 乱れの長さスケールL=10mm
	流出	圧力規定 (ゲージ圧0Pa)
	壁面	パンチングメタル: 標準壁関数 (一般化対数則) 対象面: Free Slip境界
格子数	205,290 (D=3.0, P=4.0 開口率 50.9%)	
	338,988 (D=3.0, P=5.0 開口率 32.6%)	
	673,024 (D=8.0, P=12.0 開口率 40.2%)	
	649,704 (開口率 58.5%)	
乱流モデル	標準k-εモデル (SKE)	
	低Re数型k-εモデル (Low-Re ke)	
	応力方程式モデル (RSM)	

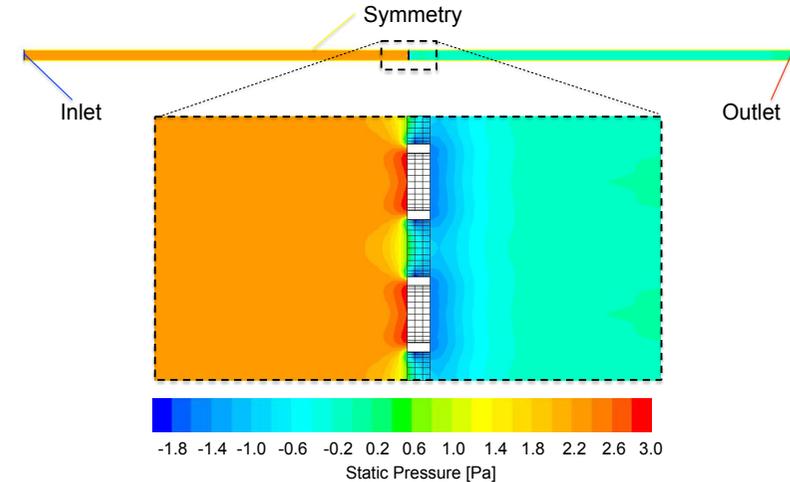


パンチングメタル前後の風速ベクトル分布

* 流入風速 1.0 [m/s]の条件



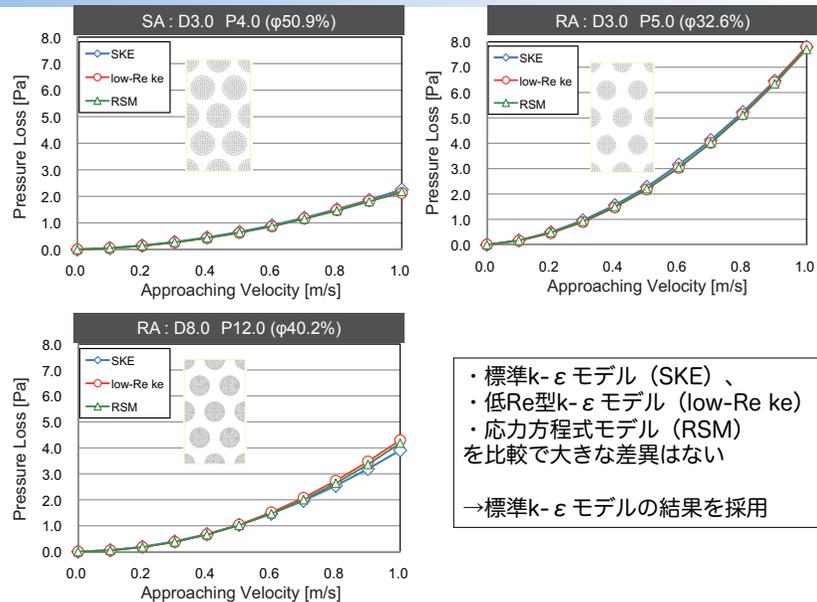
パンチングメタル前後の静圧分布



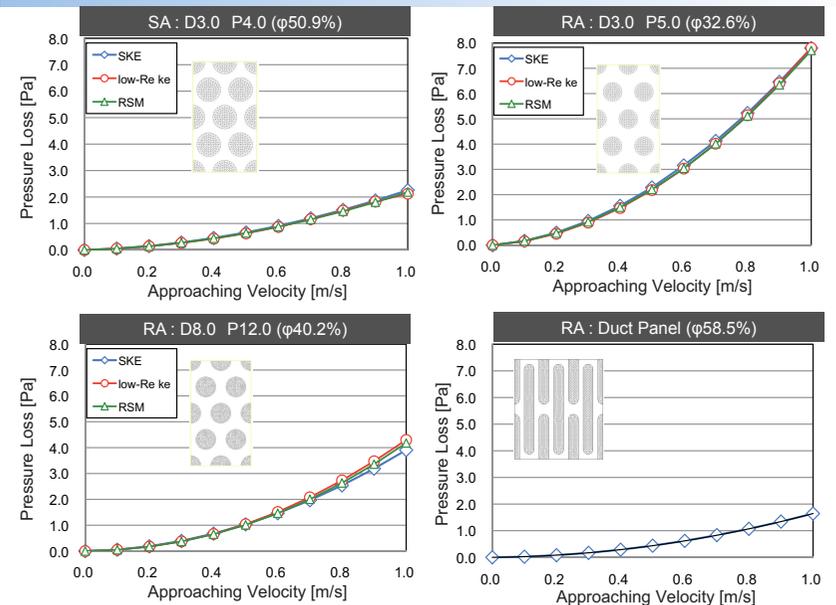
* 流入境界と流出境界の圧力差を取ることで、圧力損失を評価

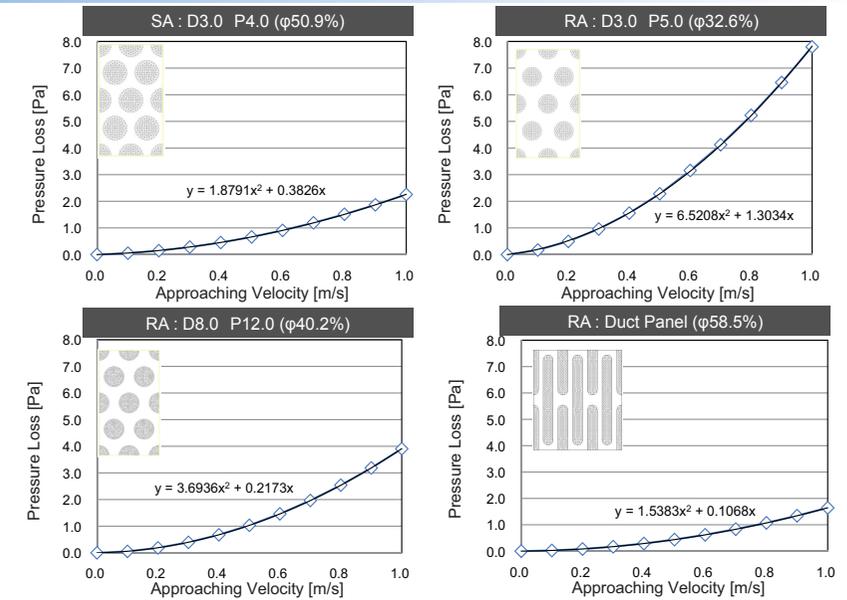
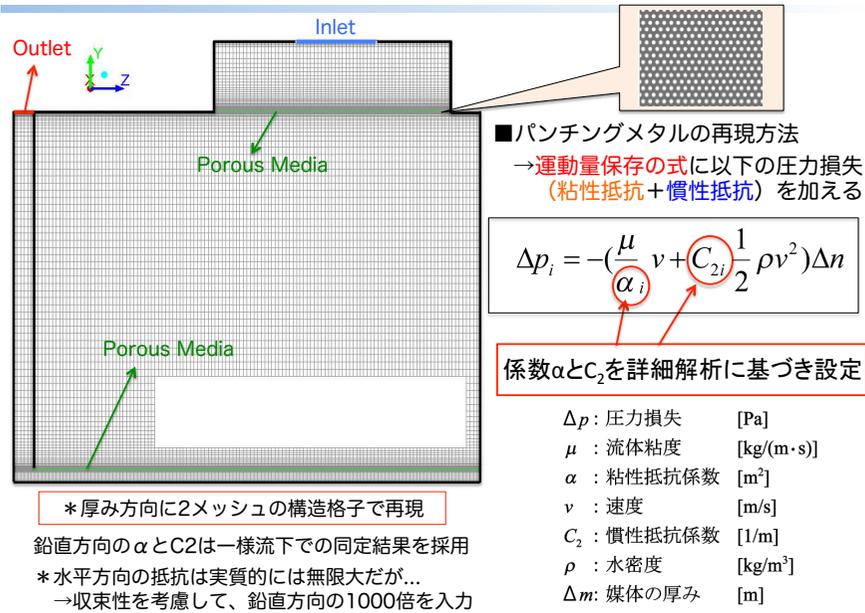
このような解析を 0.1 [m/s]~1.0 [m/s] まで 0.1 [m/s]刻みで解析対象ごとに計10段階でCFD解析を実施

パンチングメタルの圧力損失特性 (乱流モデルの影響) 19

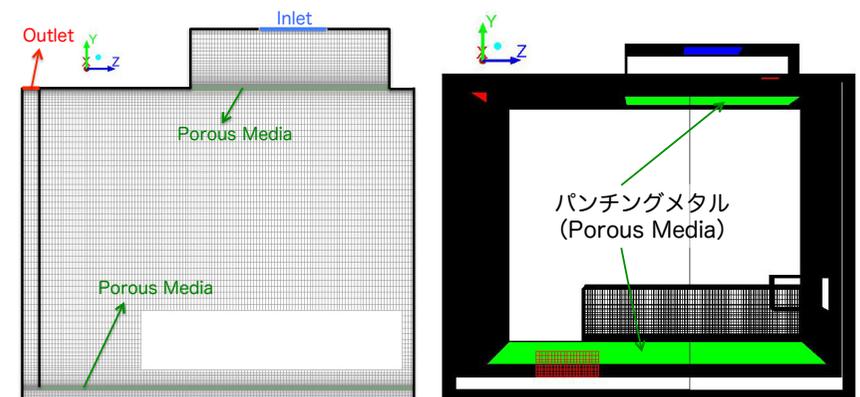
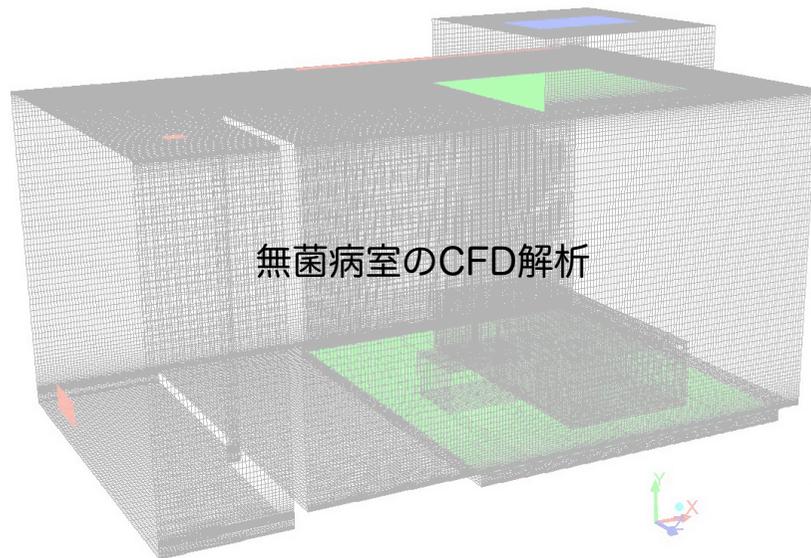


パンチングメタルの圧力損失特性 (乱流モデルの影響) 20





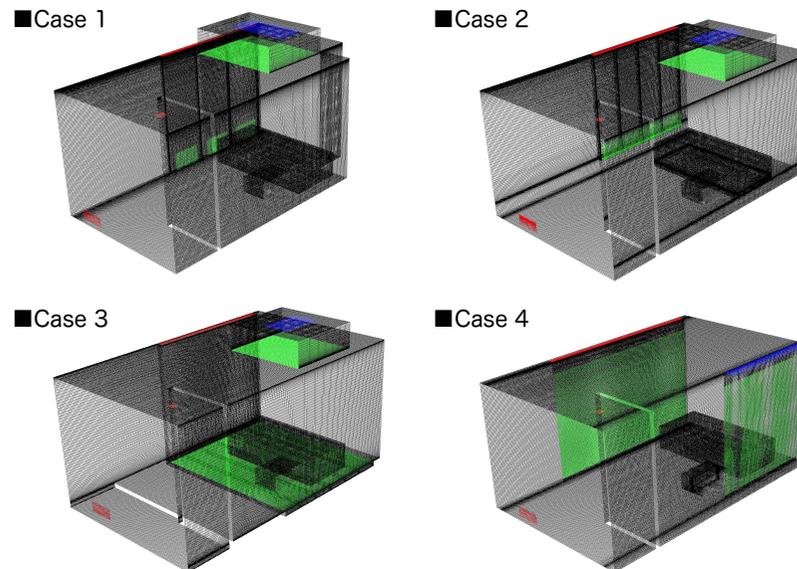
無菌病室のCFD解析



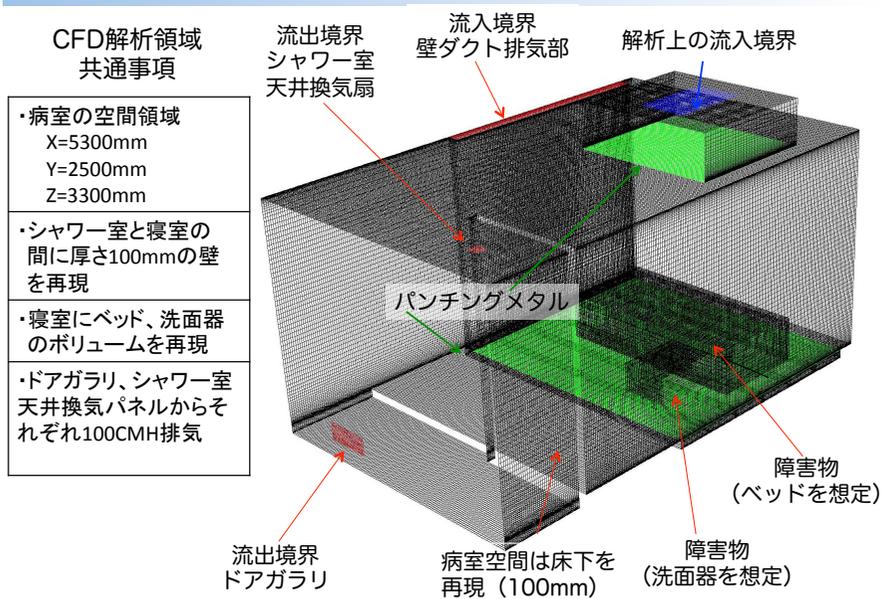
パンチングメタル等のPorous Mediaは厚み方向に2メッシュに分割。
→室全体の格子分割はそれに合わせて適宜非等間隔のメッシュレイアウトに。

* 等温場における解析

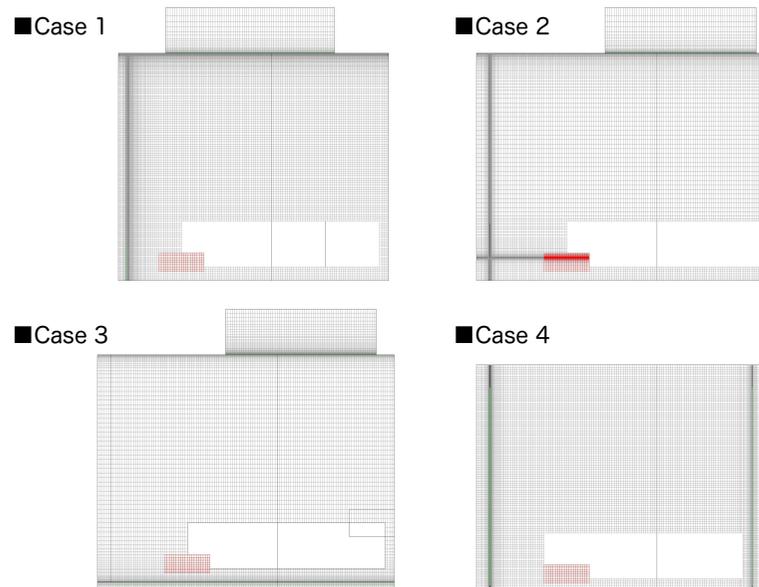
CFDコード	ANSYS Fluent 14.5		
移流項差文スキーム	QUICK		
Algorithm	定常計算 (SIMPLE)		
境界条件	流入	Case 1 (従来ダクトパネル)	1,260CMH 2,000CMH
		Case 2 (下部解放ダクトパネル)	1,260CMH 2,000CMH
		Case 3 (垂直層流)	1,260CMH 2,000CMH
		Case 4 (水平層流)	1,480CMH 2,210CMH
	k, ε : 乱流強度と乱れの長さスケールに基づく 乱流強度I=5.0% 乱れの長さスケールL=10mm		
	流出	壁面	
総格子数	Case1	: 4,239,620 (従来ダクトパネル)	
	Case2	: 4,084,259 (下部開放ダクトパネル)	
	Case3	: 2,835,802 (垂直層流)	
	Case4-1	: 3,947,296 (水平層流・コンソールBOX有)	
	Case4-2	: 3,797,340 (水平層流・コンソールBOX無)	
乱流モデル	標準k-εモデル (SKE)		
パンチングメタルのモデル化手法	詳細解析の圧力損失特性に基づき、運動量保存式に消散項の式を付加		

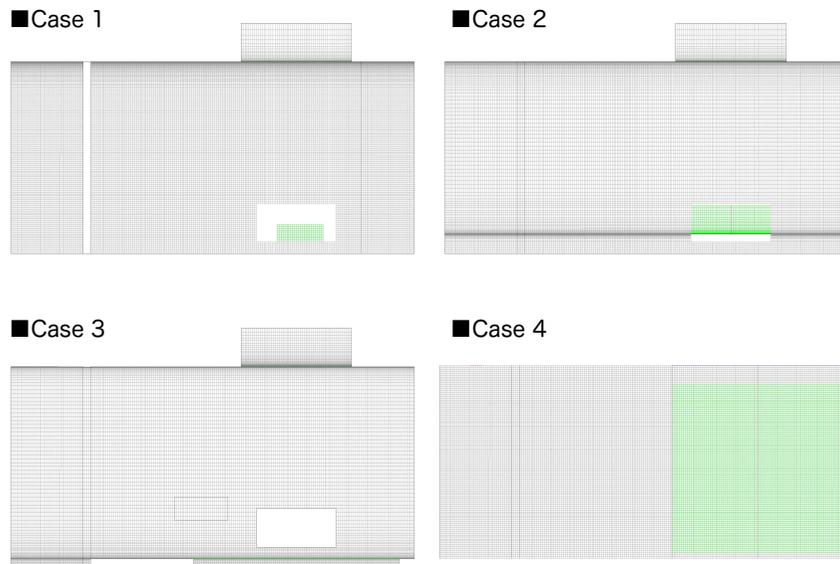


CFD解析領域 (Case3の例)



CFD解析領域 : YZ断面



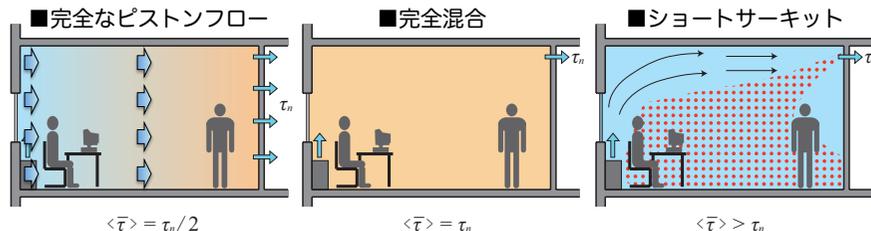


・本研究では...

「空調設備が垂直層流方式、水平層流方式
又はその双方を併用した方式であること」

という厚労省の文言を

「気流性状が一方向流（ピストンフロー）に近いこと」と解釈



平均空気齢 = 名目換気時間/2

平均空気齢 = 名目換気時間

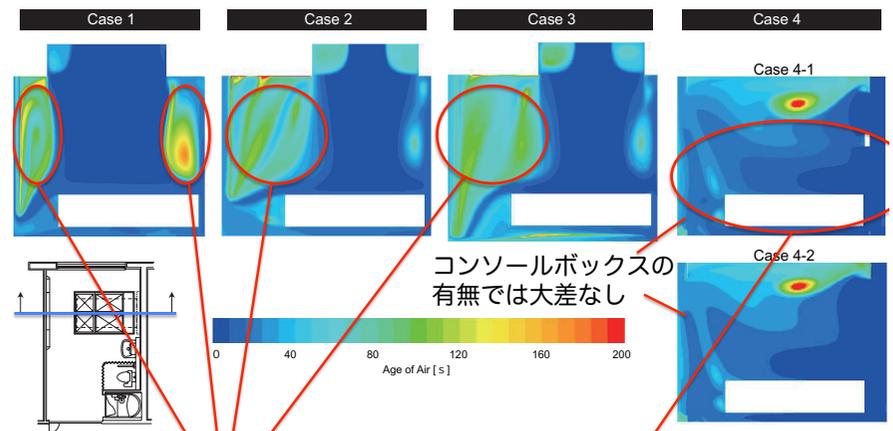
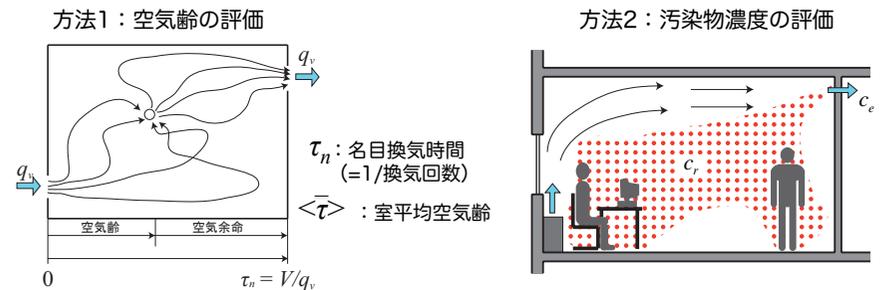
平均空気齢 > 名目換気時間

→ 定量的な評価が可能！

■ 室内換気効率の評価方法：大きく分けて2種類存在

方法1). その換気システムが室の空気を交換する能力を表現する方法
「室平均空気齢」、「空気交換効率」、「局所空気交換指数」
→室内の空気がどれぐらい早く入れ替わるかを評価

方法2). その換気システムが汚染物質を除去する能力を表現する方法
「室平均汚染質濃度」、「汚染質除去効率」

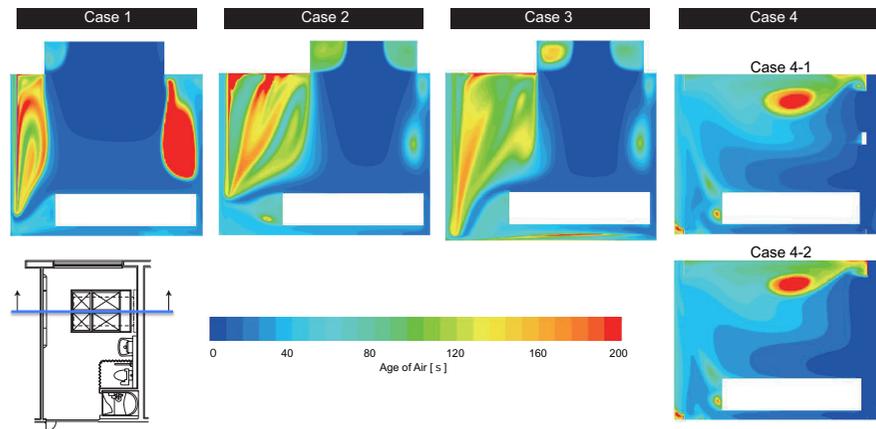


吹出口直下以外は、立位人体頭部の高さでも空気齢が高い

居住域内の高さ範囲では概ね空気齢が低い

空気齢の分布 (YZ断面) -弱運転

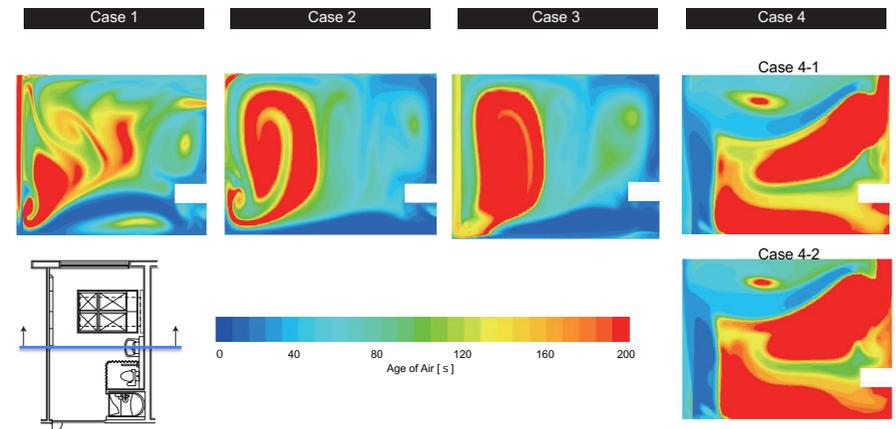
33



- 空気齢の分布性状は強運転と同じ
- 滞留域の空気齢の値が大きい理由は換気量が小さいため
(→定量的評価には名目換気時間で基準化して比較する必要あり)

空気齢の分布 (YZ断面) -強運転

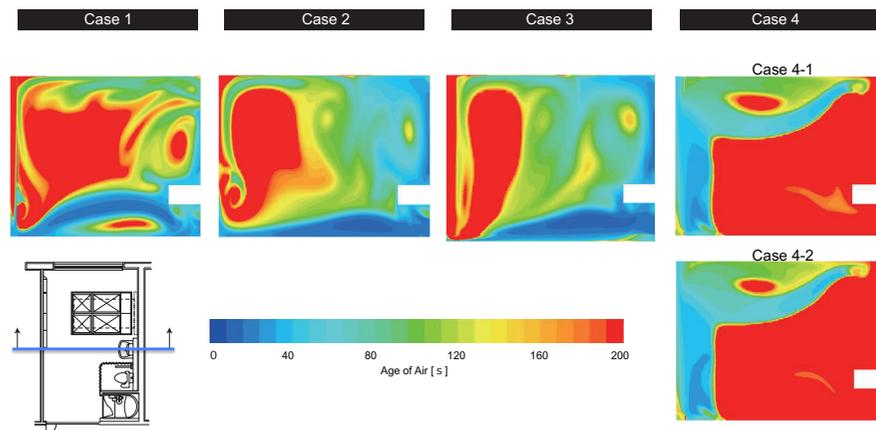
34



- 天井吹出し条件 (Case1~3) では空気齢が小さい箇所も見られる
→下向きに給気された気流が、床の影響で拡散しやすい
- 水平層流方式 (Case4) では空気齢が高い箇所が多く占める
→ベッドの断面で給気された気流が、一方向流であることを示す。

空気齢の分布 (YZ断面) -弱運転

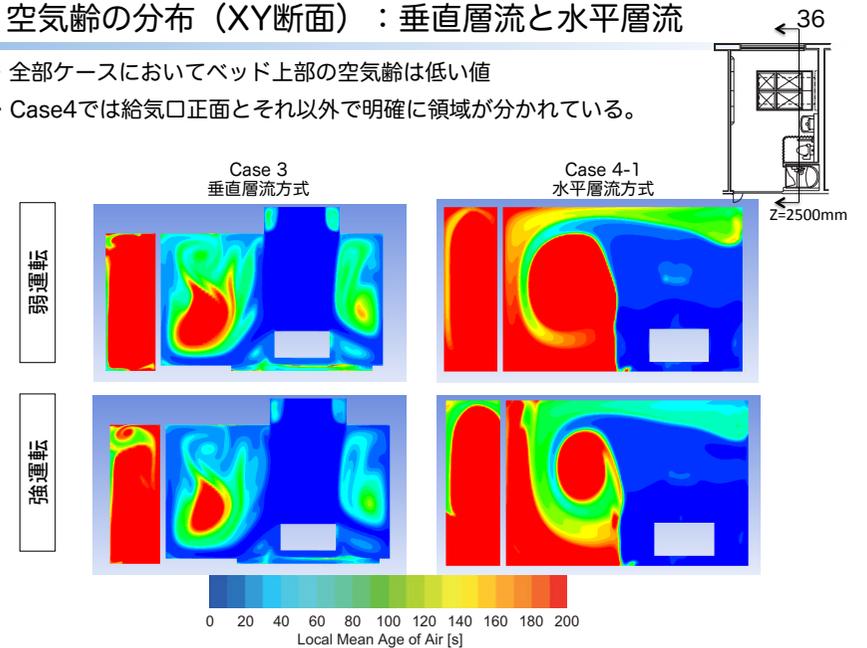
35



- 弱運転でも傾向は変わらない。

空気齢の分布 (XY断面) : 垂直層流と水平層流

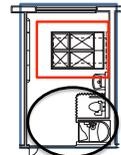
- 全部ケースにおいてベッド上部の空気齢は低い値
- Case4では給気口正面とそれ以外で明確に領域が分かれている。



平均空気齢と名目換気時間の比率

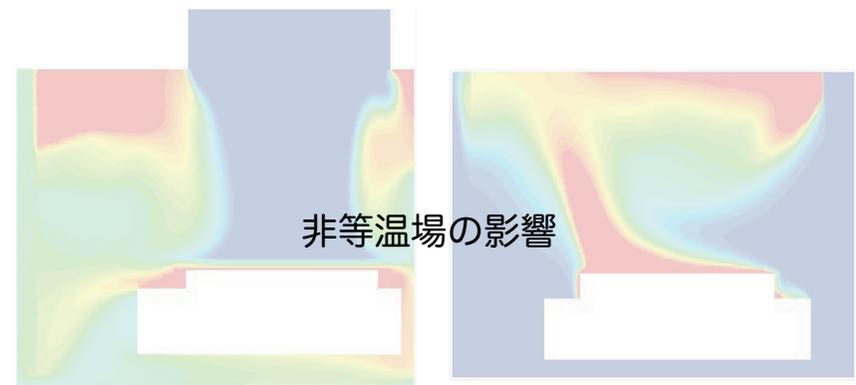
37

室条件	室容積 [m3]	パネル開口率 [%]	換気量 [m3/h]	名目換気時間 [s]	換気回数 [-/h]	室全体		ベッド周辺領域	
						平均空気齢 [s]	平均空気齢/名目換気時間	平均空気齢 [s]	平均空気齢/名目換気時間
Case1	38.295	58	2000	68.9	52.2	112.4	1.60	41.02	0.60
		58	1260	109.4	32.9	187.5	1.71	75.14	0.69
Case2	43.725	58	2000	78.7	45.7	115.9	1.47	44.8	0.57
		58	1260	124.9	28.8	181.2	1.45	52.2	0.42
Case3	44.57887	30	2000	80.2	44.9	136.9	1.71	45.9	0.57
		40	2000	80.2	44.9	139.7	1.74	45.5	0.57
		30	1260	127.4	28.3	181.7	1.43	51.1	0.40
		40	1260	127.4	28.3	180.0	1.41	49.7	0.39
Case4-1	43.725	30	2210	71.2	50.5	165.6	2.32	18.4	0.26
		40	2210	71.2	50.5	148.6	2.09	17.0	0.24
		30	1480	106.4	33.8	230.4	2.17	31.0	0.29
Case4-2	43.725	40	1480	106.4	33.8	231.8	2.18	28.7	0.27
		30	2210	71.2	50.5	158.7	2.23	15.75	0.22
		40	2210	71.2	50.5	157.9	2.22	15.78	0.22
		30	1480	106.4	33.8	257.2	2.42	28.2	0.27
		40	1480	106.4	33.8	232.4	2.19	26.4	0.25



滞留しやすい (特にCase4)

ベッド周辺領域に着目すると、水平層流は一方向流を形成している



等温解析と非等温解析

39

■ これまでの解析 : 等温条件



■ 実際には : 非等温条件であるため
浮力が室内気流に影響を及ぼす

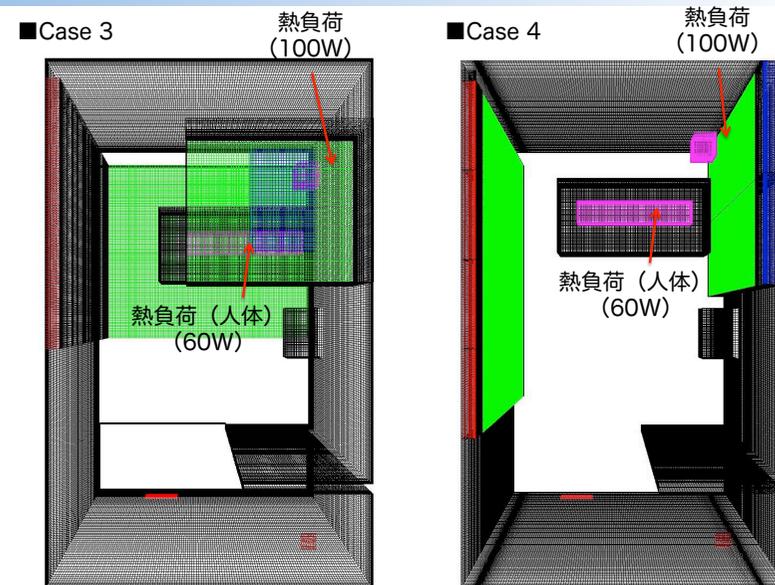
ex). 熱負荷からのサーマルプルーム
吹出し気流の温度差

* そこで : まずは非等温場 (冷房時) のCFD解析を実施
対象 : Case 3 (垂直層流方式)、Case 4 (水平層流方式)

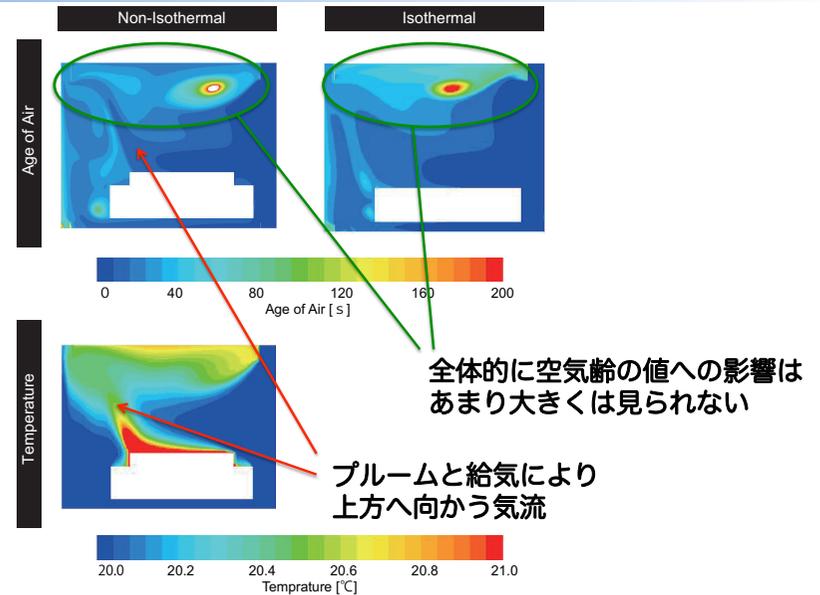
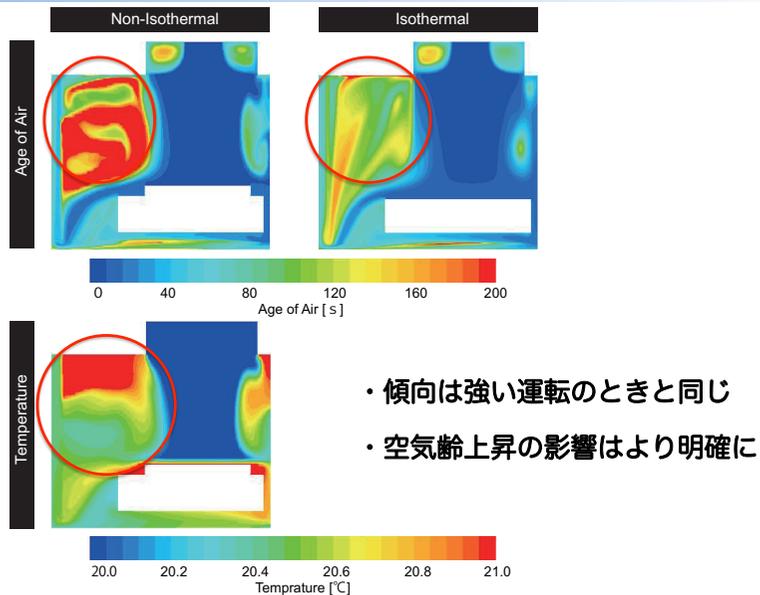
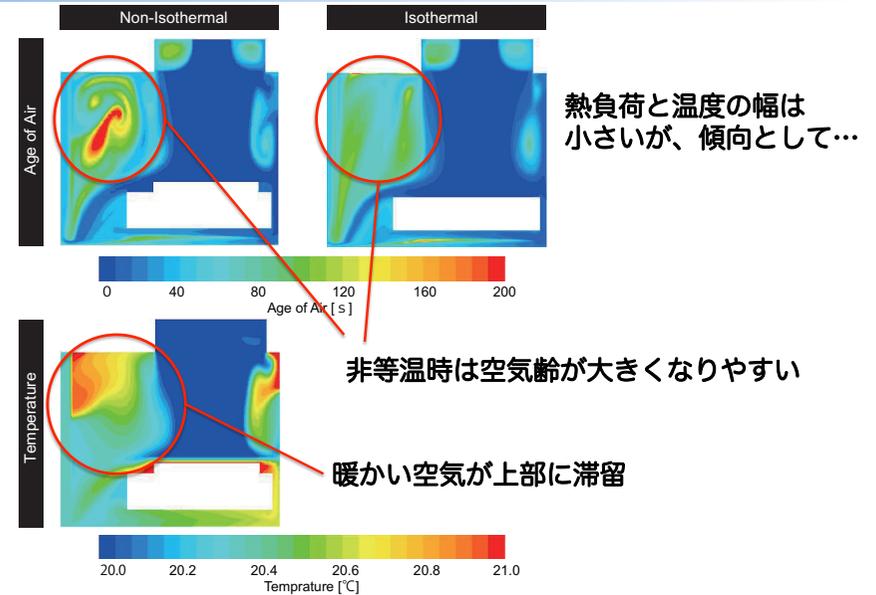
等温場と比較して、気流性状や
空気齢に変化があるかを確認

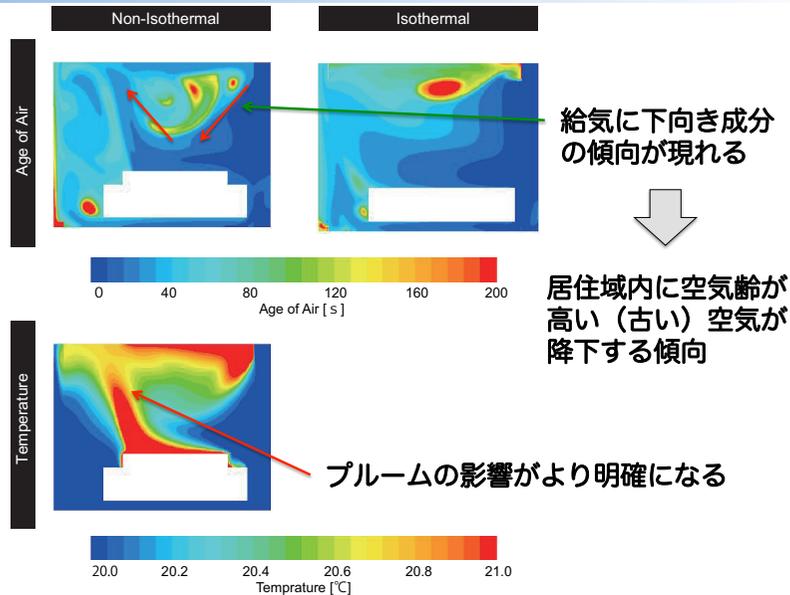
非等温場の解析領域と計算格子

40



CFDコード	ANSYS Fluent 14.5		
移流項差分スキーム	QUICK		
アルゴリズム	定常計算 (SIMPLE法)		
境界条件	流入	Case 3	Low : 1,260 CMH (20°C) High : 2,000 CMH (20°C)
		Case 4	Low : 1,480 CMH (20°C) High : 2,210 CMH (20°C)
	k, ε : 乱流強度と乱れの長さスケールに基づく 乱流強度 I = 5.0 %, 乱れの長さスケール L = 10mm		
	流出	換気量と排気部面積に基づいて流速を規定	
壁面	速度 : 標準壁関数 温度 : 断熱条件		
総計算格子数	Case 3 : 2,835,802 Case 4 : 3,797,340		
乱流モデル	標準k-εモデル		
浮力の再現	ブシネスク近似		
熱負荷	発熱体 I	60 W (300 × 200 × 1,600mm, 48.39 W/m ²)	
	発熱体 II	100 W (300 × 300 × 300mm, 222 W/m ²)	
多孔板部の再現	詳細解析の圧力損失特性に基づき、 運動量保存式に消散項を付加		





室条件	室容積 [m ³]	パネル開口率 [%]	換気量 [m ³ /h]	名目換気時間 [s]	室全体		ベッド周辺領域	
					平均空気齢 [s]	平均空気齢/名目換気時間	平均空気齢 [s]	平均空気齢/名目換気時間
Case3 等温	44.57887	30	2000	80.2	136.9	1.7	45.9	0.57
		40	2000	80.2	139.7	1.7	45.5	0.57
		30	1260	127.4	181.7	1.4	51.1	0.40
Case3 非等温	44.57887	40	1260	127.4	180.0	1.4	49.7	0.39
		30	2000	80.2	127.5	1.6	60.6	0.75
		40	2000	80.2	130.1	1.6	59.3	0.74
Case4 等温	43.725	30	1260	127.4	214.2	1.7	105.1	0.83
		40	1260	127.4	212.5	1.7	112.2	0.88
		30	2210	71.2	158.7	2.2	15.75	0.22
Case4 非等温	43.725	40	2210	71.2	157.9	2.2	15.78	0.22
		30	1480	106.4	257.2	2.4	28.2	0.27
		40	1480	106.4	232.4	2.2	26.4	0.25
Case4 非等温	43.725	30	2210	71.2	242	3.4	17.83	0.25
		40	2210	71.2	214.1	3.0	16.26	0.23
		30	1480	106.4	211.1	2.0	53.58	0.50
		40	1480	106.4	278.3	2.6	36.11	0.34

非等温場になることで、ベッド周辺領域の空気齢は上昇する傾向

まとめ

47

■内容

無菌治療室4条件を対象にCFD解析を行い、名目換気時間に対する空気齢を指標として、換気システムの性能を定量的に評価した。

■知見

- ・ 室全体で見ると、全条件で空気が滞留する箇所が存在するが、それは入口付近で患者から遠い位置での滞留である。
→ベッド付近では、**全条件で一方向の気流性状が形成**される。
- ・ 上記の傾向は水平層流方式（Case 4）で最も顕著であり、気流は給気口からベッド付近を通過し、対面の排気口まで一方向に流れる。
→**水平層流は一方向性が明確で、ベッド周辺の新鮮度が高い。**
- ・ Case 3の垂直層流はCase 1, 2の従来型と比較すると、**同等以上の換気効率**を示すと考えられるが、**大きな性能向上は期待し難い。**
- ・ 冷暖房時の**浮力の影響**は少なからず存在し、小さな熱負荷を設定した冷房計算でも**居住域内空気齢の上昇**が見られた。（垂直層流で顕著）

今後の課題

48

■課題 1

- ・ 今回は「換気システム評価」を前提として、室内気流の一方向性を定量的に評価するため、空気齢をベースにした評価を行った。

→ 実際に形成される「室内環境評価」を考えた場合には、汚染物濃度の分布に基づく定量的な評価が求められる

■課題 2

- ・ 今回の検討で、小さな熱負荷でも非等温時の影響が小さくなかった。

→ さらに現実的な冷房負荷/暖房負荷条件の下で、空気齢と汚染物濃度の両者を評価する必要がある

■課題 3

- ・ 傾向は十分把握されたが、CFD解析の精度検証が実施されていない。

→ 実験室実験による検証が必要。