

微生物による室内汚染

■ SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome; 重症急性呼吸器症候群) や 鳥インフルエンザ感染への対策

- SARSは、飛沫・空気感染が疑われる感染症であり、2002年11月に中華人民共和国広東省に発生し、2003年7月に制圧宣言が出されるまでの間に、8,069人が感染し、775人が死亡した。

■ 結核感染への対策

- 患者の咳やくしゃみ、大きな声から発生する直径1-5mmの菌を含む浮遊微粒子の吸入による飛沫感染。発展途上国のみならず、衛生状態、栄養状態のよい先進国でも近年増加。教室など公共空間での感染対策が急がれる。

■ 生物・化学兵器によるテロへの対策

- オウム真理教は、東京亀戸道場付近で1993年6月28日と7月2日、炭疽菌の気中散布による無差別テロを実施。幸い、ワクチン用の弱毒性の炭疽菌もしくは死滅した菌の散布により、被害なし。皮膚感染に比べ、吸入による呼吸器感染は急激で死亡率も高い。

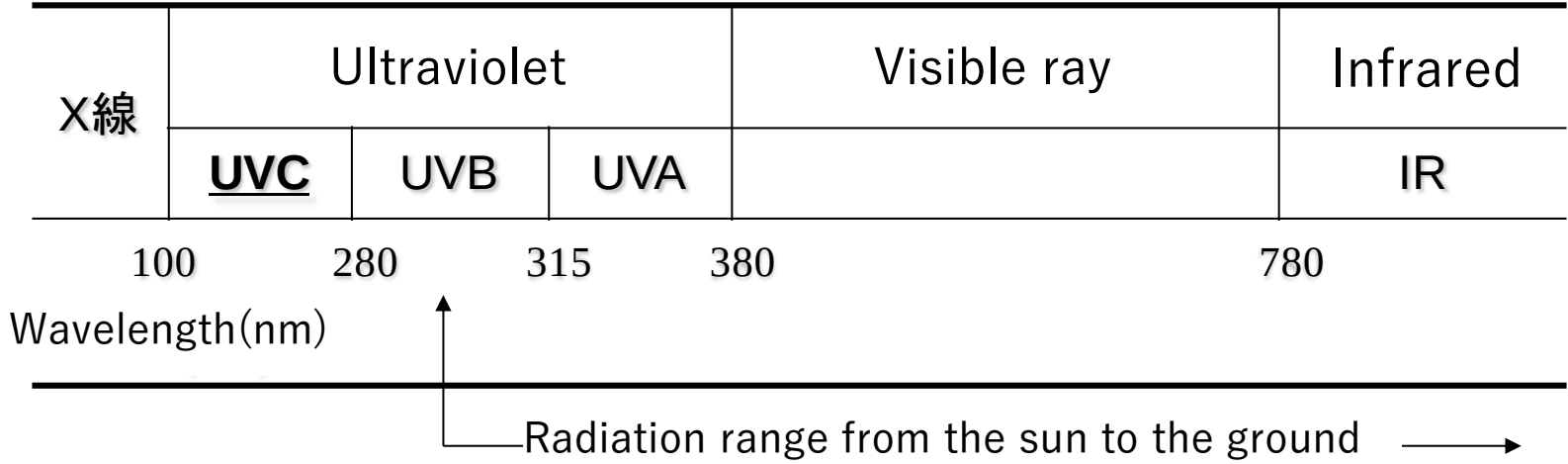
■ 室内の真菌汚染への対策

- コウジカビの一種であるアスペルギルスなどのカビは、ダニ、ホコリなどと並んで生活環境の吸入性アレルゲンとなり、アレルギー性気管支喘息を引き起こす。
- アスペルギルスの一部のものはヒトに対する病原性を持ち、日和見感染の原因となる。肺に感染したものは、肺アスペルギルス症と呼ばれ、治療が困難である。

紫外線による微生物汚染への対策

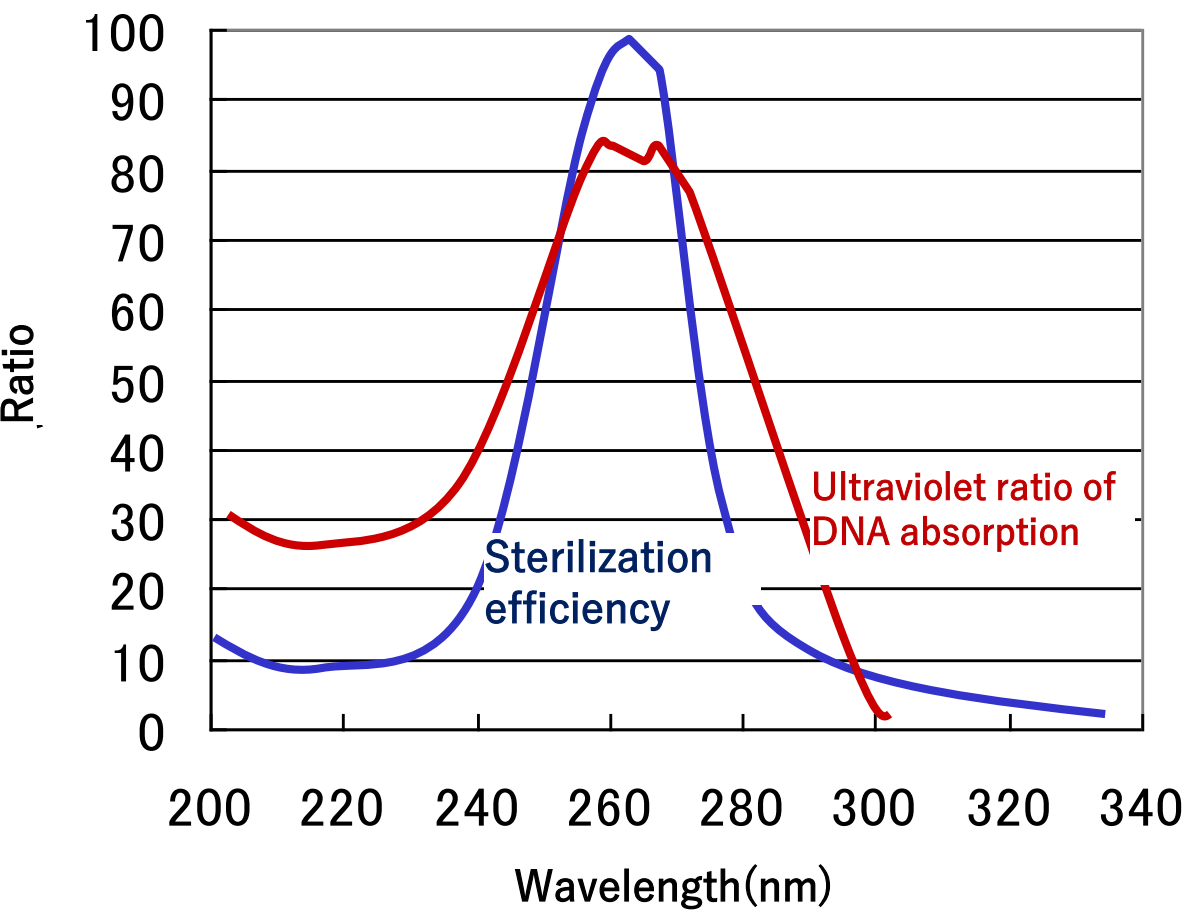
■ 紫外線と殺菌

・ Range of X-ray



・ 紫外線の殺菌原理及び範囲

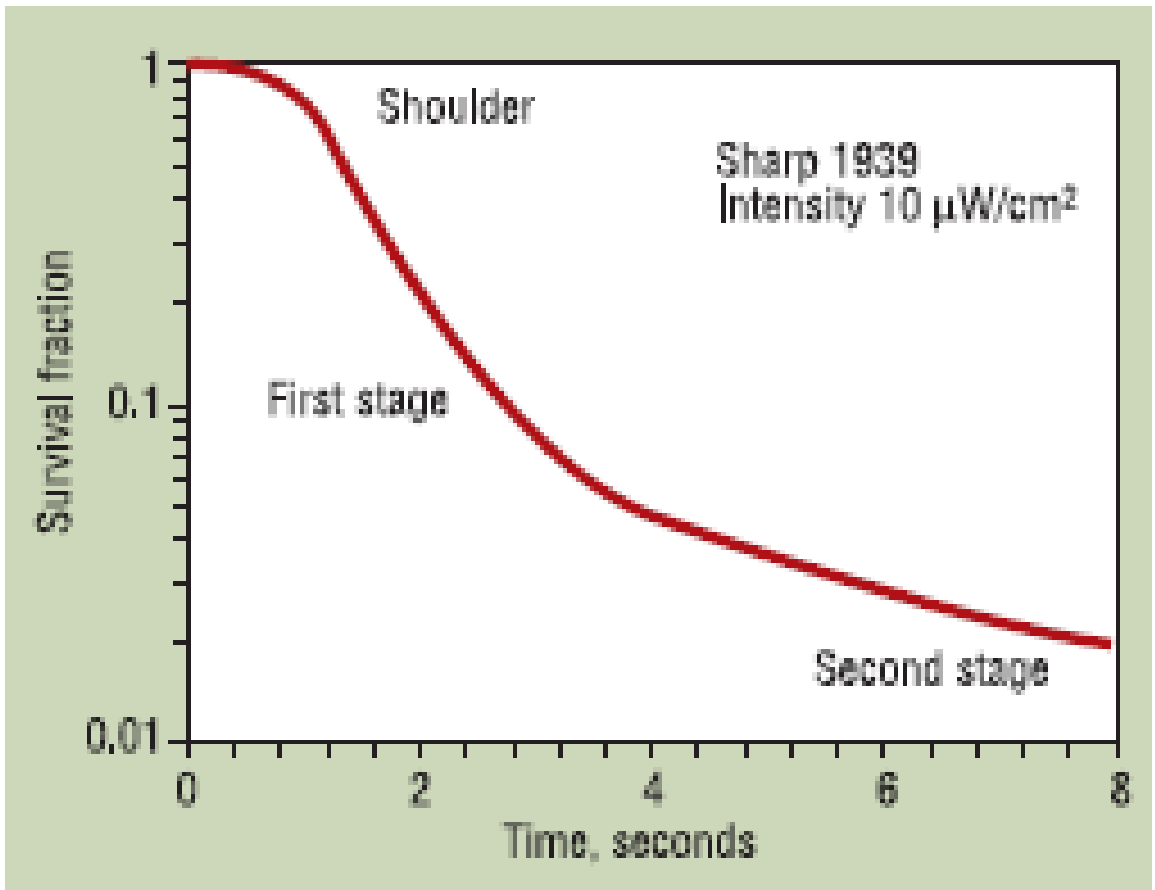
- * 紫外線を吸収したDNAの複製機能を喪失させる。
- * 260nmで最高の殺菌効率



■ 紫外線の殺菌効果

$$KR = 1 - e^{-kIt}$$

KR: 殺菌率
k: 殺菌係数[m²/J]
I: 紫外線強度[W/m²]
t: 暴露時間[sec]



* 0.1W/m² の紫外線強度と
100秒の暴露で

- » コウジカビ <1% 殺菌
- » 結核菌 99% 殺菌

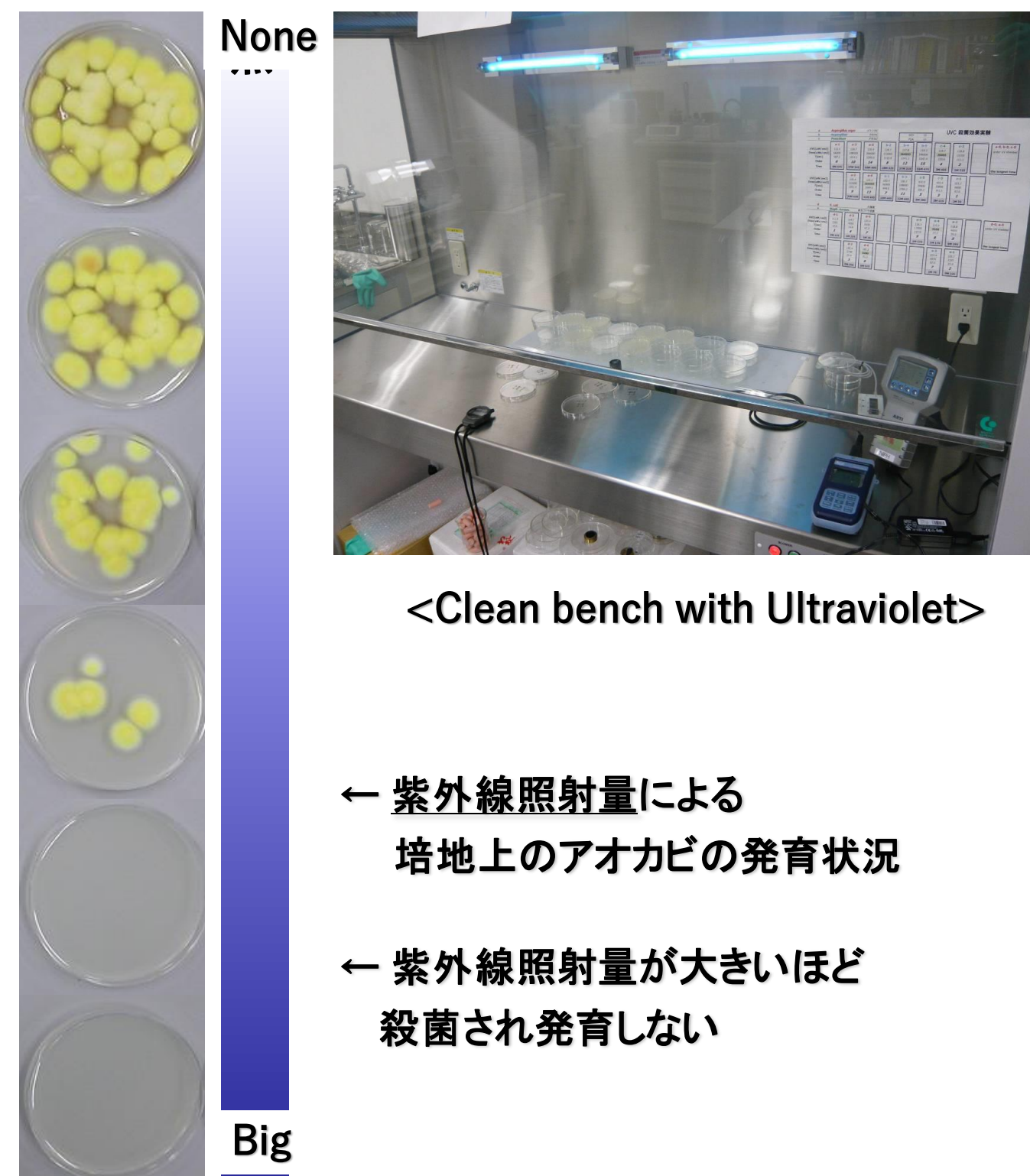
Microorganism	k (Bactericidal coefficient)
Aspergillus sp.	0.0007
Penicillium chrysogenum	0.0014
Bacillus subtilis	0.1686
Mycobacterium tuberculosis	0.4721
Influenza A	0.1187

* Referred to IUVA guideline (draft)

紫外線の殺菌効果

■ 紫外線の殺菌効果実験

- 紫外線の照射量(強度×曝露時間)を調節しながら真菌及び細菌の殺菌挙動を観察した。
- 細菌の方が真菌より殺菌されやすい。

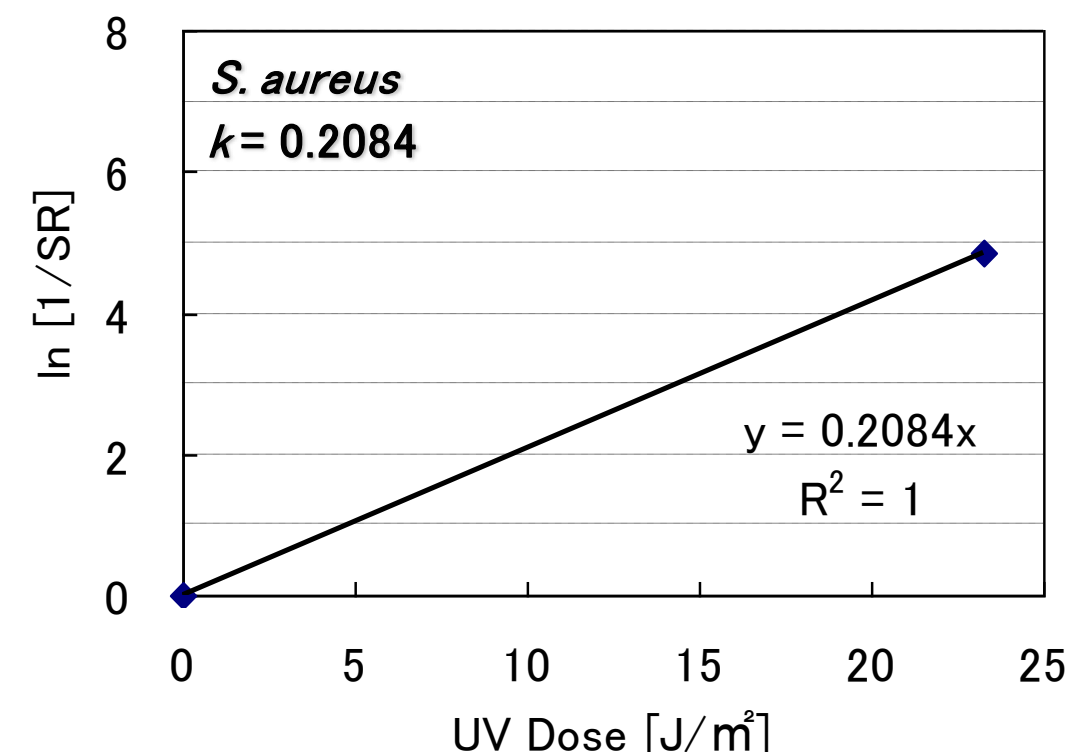
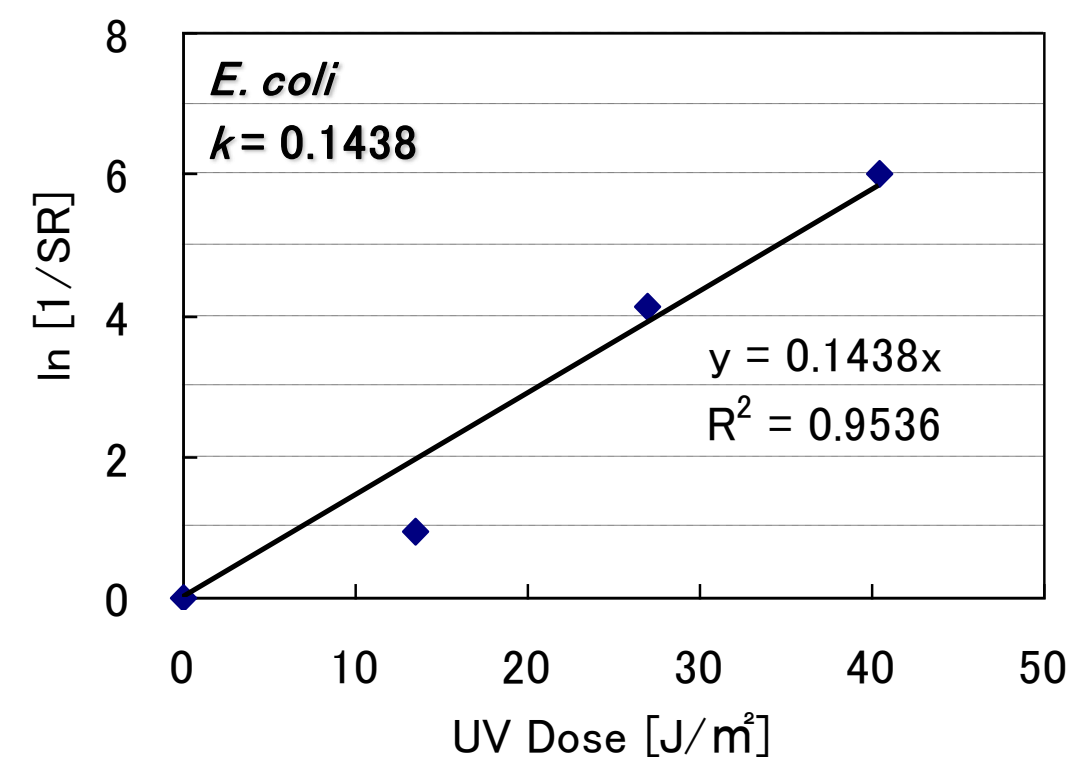


<Bactericidal effect for *Penicillium pinophilum*>

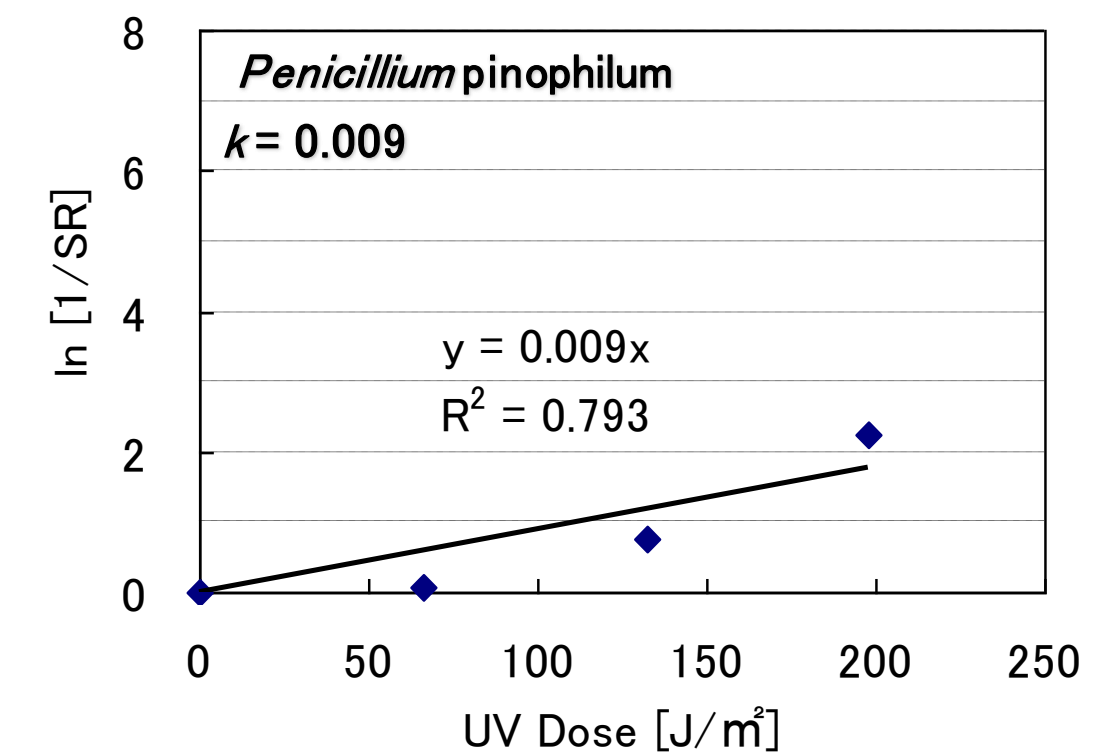
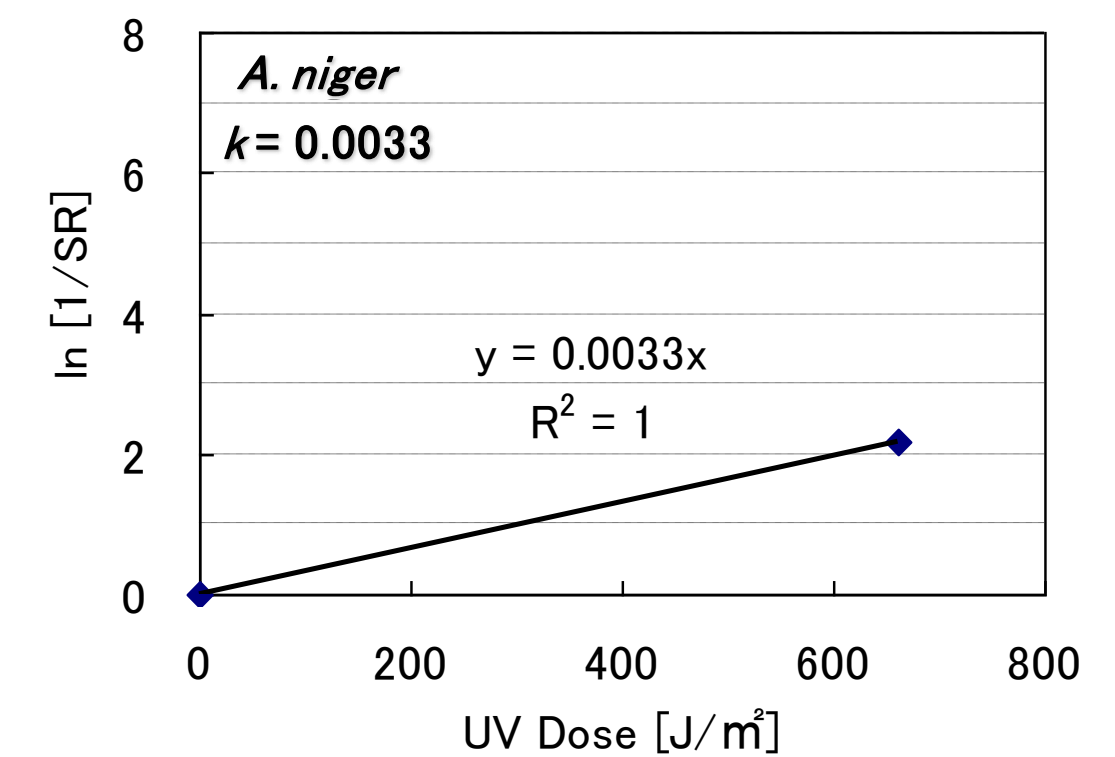
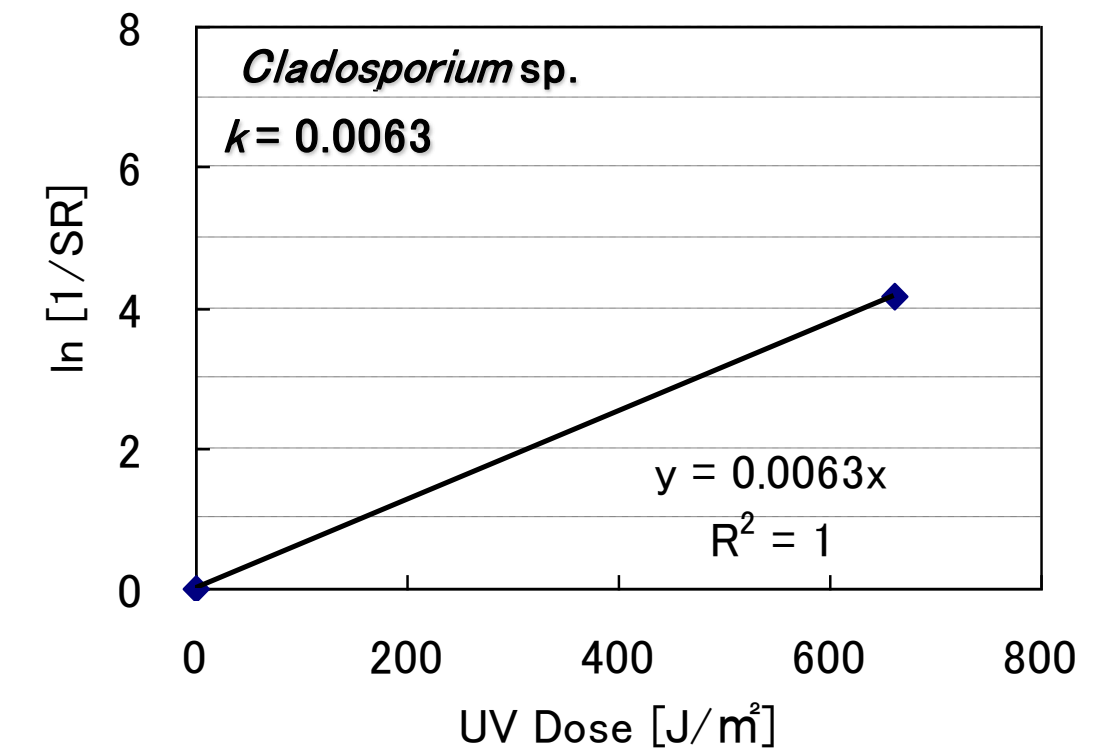
$$\ln(1/SR) = kIt$$

*SR : Survival rate

Bacteria



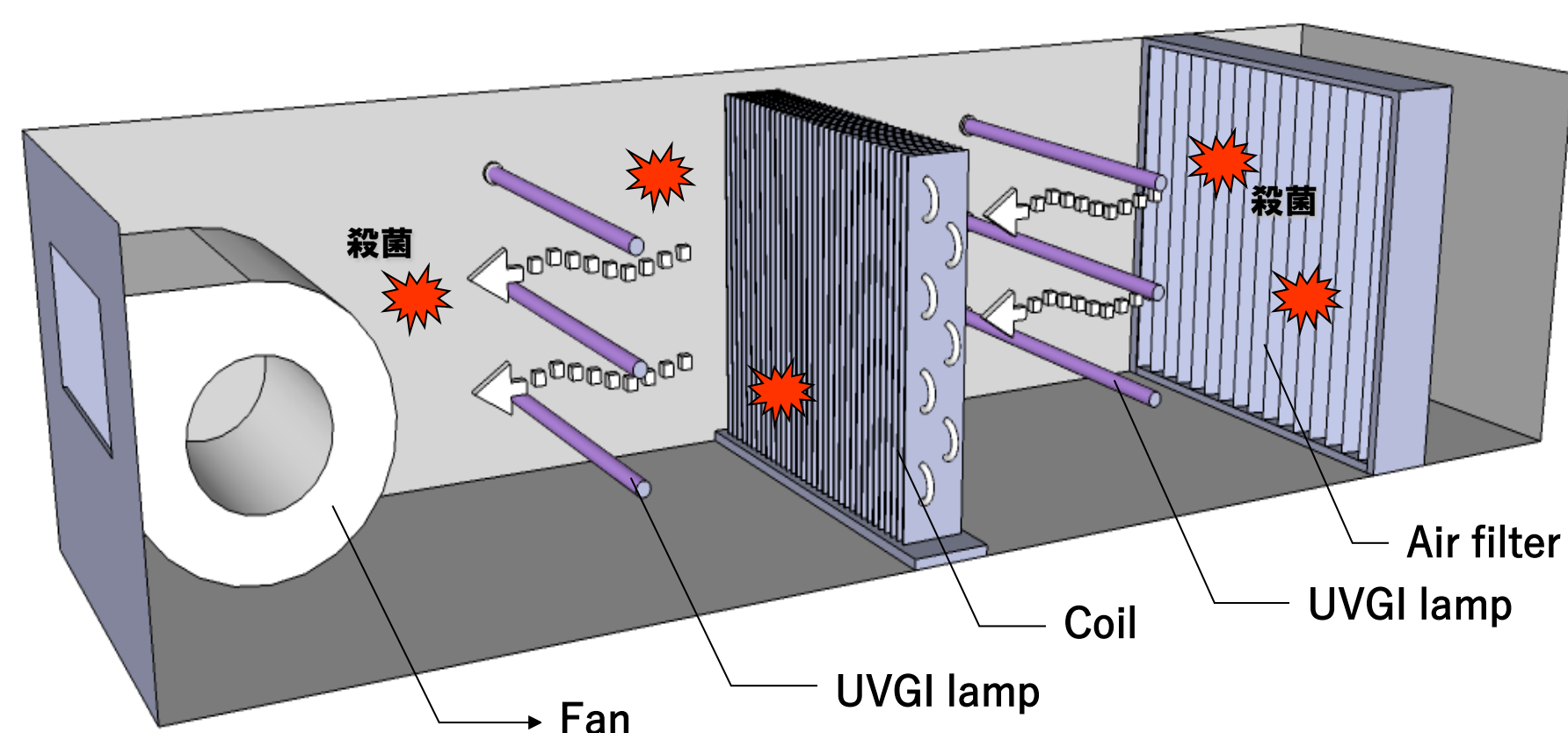
Fungus



UVGIの適用方法及び安全

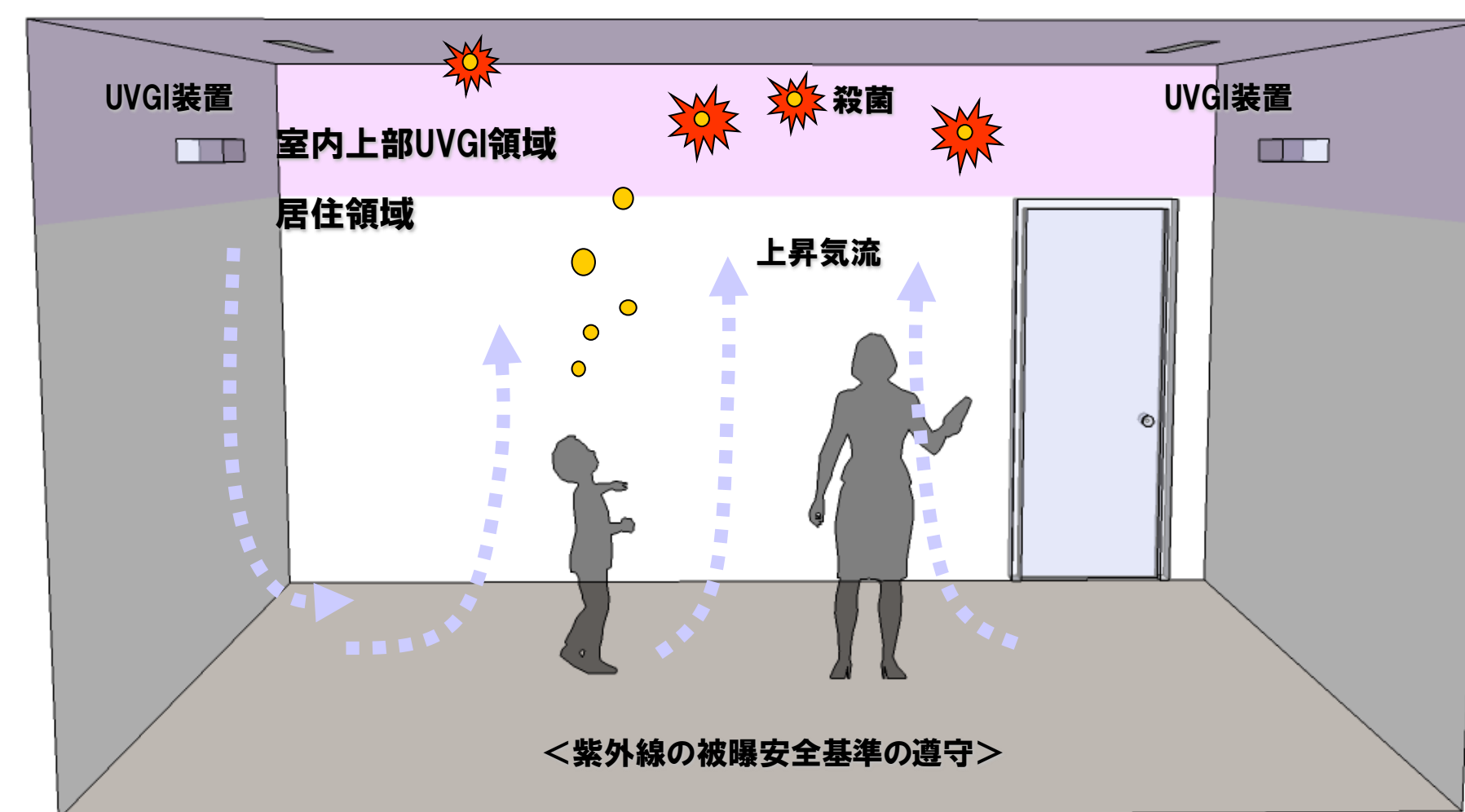
■ In-Duct UVGI System

- 空調機(AHU)又はダクト内部にUVGIランプを設置し、通過する空気中及びコイルやフィルタに付着した汚染微生物を紫外線(UVC)により殺菌



■ Upper-Room UVGI System

- 室内上部への紫外線(UVC)照射及び室内気流移動により室内空気中の汚染微生物を殺菌



■ 紫外線ランプ及び紫外線被曝安全

- 主な紫外線ランプの低圧水銀ランプからの放射波長中オゾンを発生させる184.9nmの波長をカット
- 紫外線による暴露基準(ACGIH; 米国産業衛生専門家会議、JIS Z8812)
 - ⇒ $60\text{J}/\text{m}^2$ (1日8時間就労基準、UVGI装置の波長の254nm基準)
 - ⇒ 8時間暴露基準で換算すると $0.2\mu\text{W}/\text{m}^2$ 以下の強度

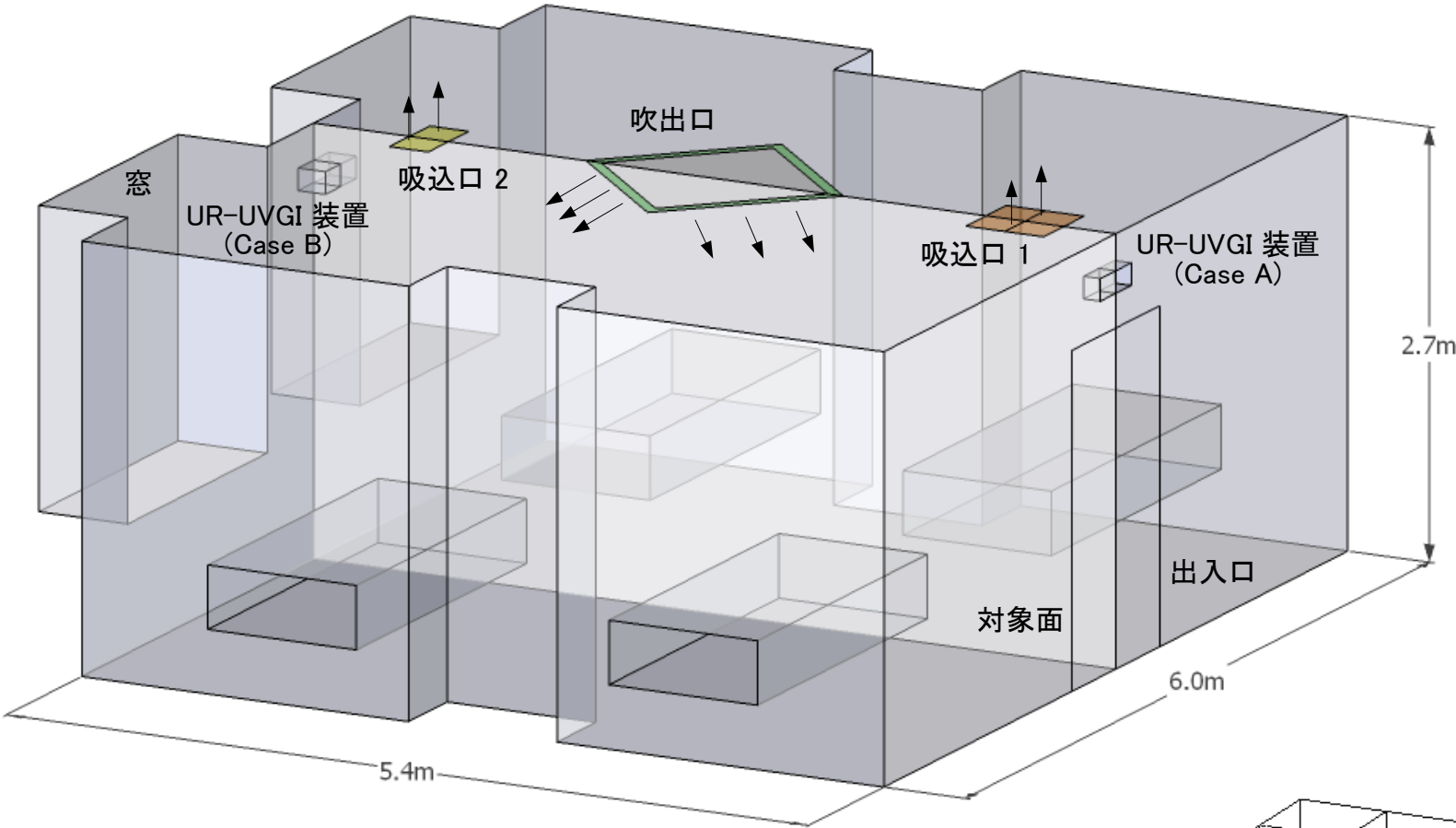
室内上部UVGI装置の殺菌性能 I シミュレーションによる解析 1

● 空気の紫外線照射量分布を求める方法

- 実測による紫外線空間分布をソースにしたスカラー解析
- 紫外線強度(I)の時間積分(t)は紫外線照射量 (D)

<CFD analysis condition>

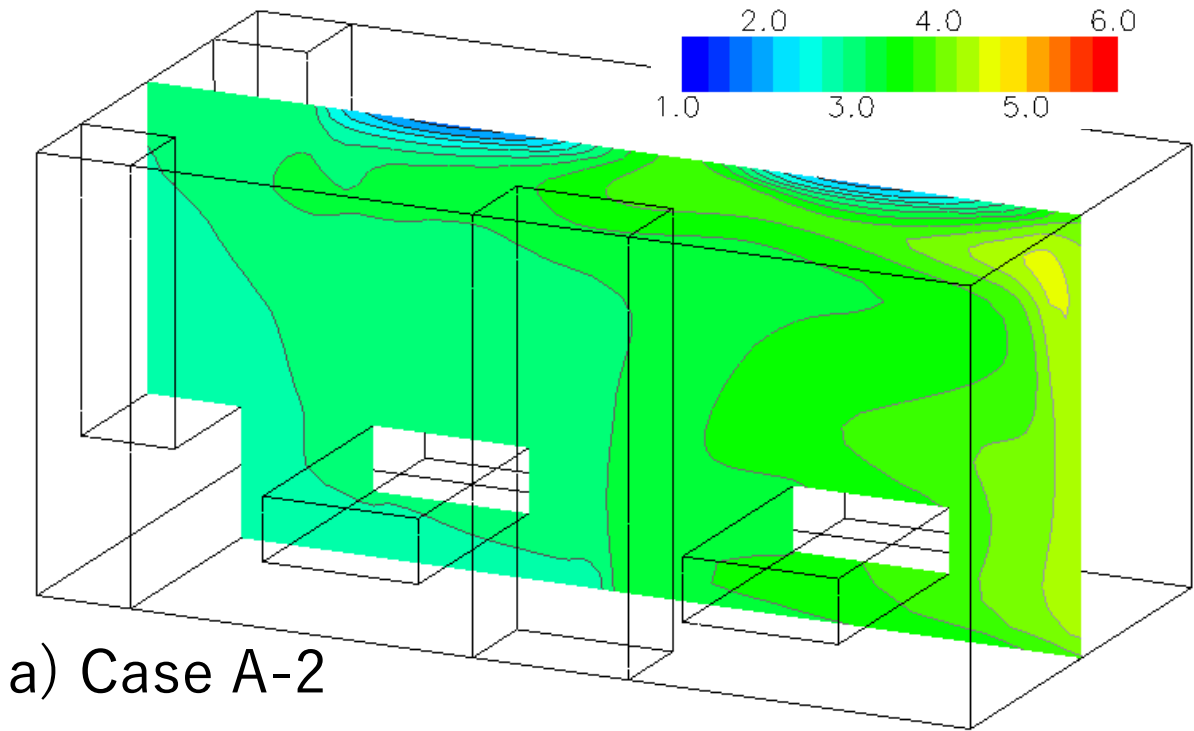
メッシュ	97,080 (対称なので4床病室の半分のみ)
乱流モデル	標準k-εモデル
境界条件	$k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$ $\varepsilon_{in}=C_u \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ l_{in} = 吹出幅の1/2 $C_u = 0.09$ U_{in} : 4.18m/s (換気回数11回/h相当) U_{out} : 質量保存則に従う。
発熱条件	総894W 人体68W (34W/人 × 2人) ベッド面 照明334W (20W/m ² × 16.7m ²) 天井面 窓面負荷492W (144W/m ² × 3.4m ²) 窓面
スカラー量 (UV照射量)の 支配方程式	$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial U_j D}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial D}{\partial x_j} \right) + I$ D : 紫外線照射量 [J/m ²]、I : 紫外線強度 [W/m ²] ν_t : 渦動粘性係数、 σ : 乱流シュミット数



<4-bed sickroom model>

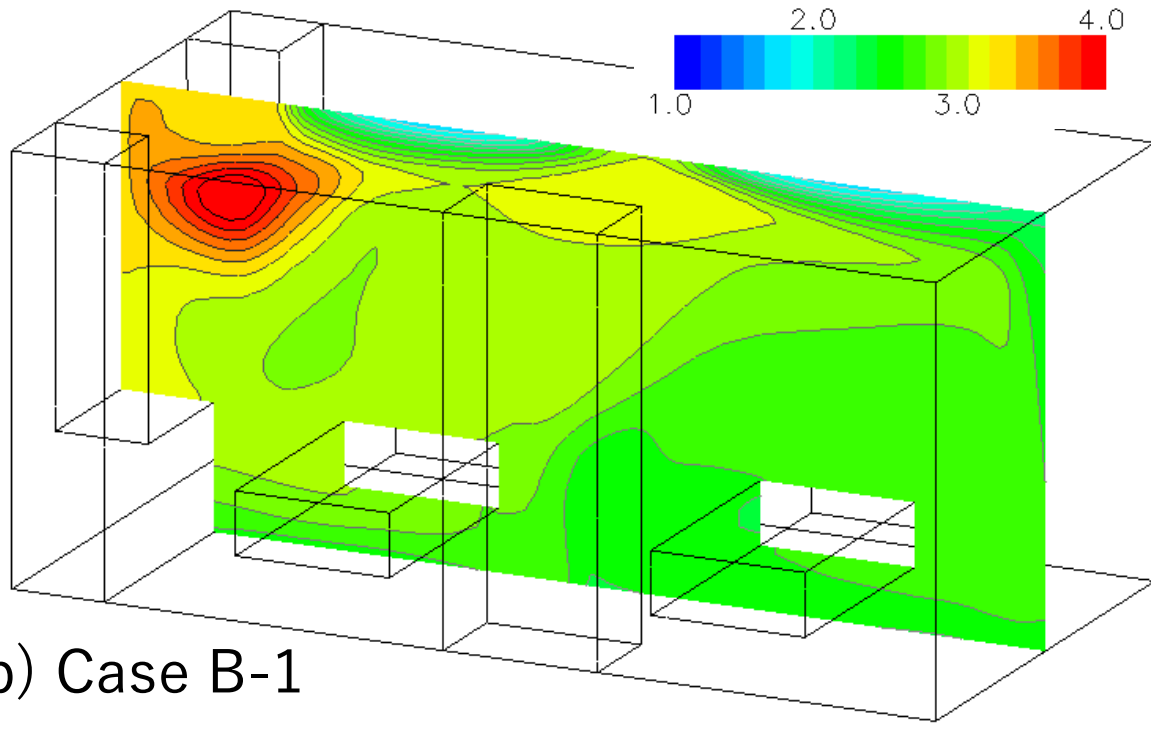
<解析ケース>

Case	UR-UVGIの設置位置	吸込口	吹出口
Case A-1	出入口側	吸込口1	中央 吹出口
Case A-2		吸込口1+2	
Case B-1	窓側	吸込口1	
Case B-2		吸込口1+2	



a) Case A-2

Indoor average doze : 2.9 [J/m²]



b) Case B-1

Indoor average doze : 4.8 [J/m²]

<Ultraviolet doze distribution

室内上部UVGI装置の殺菌性能 II シミュレーションによる解析 2

● 空気清浄機及びUVGIの性能予測

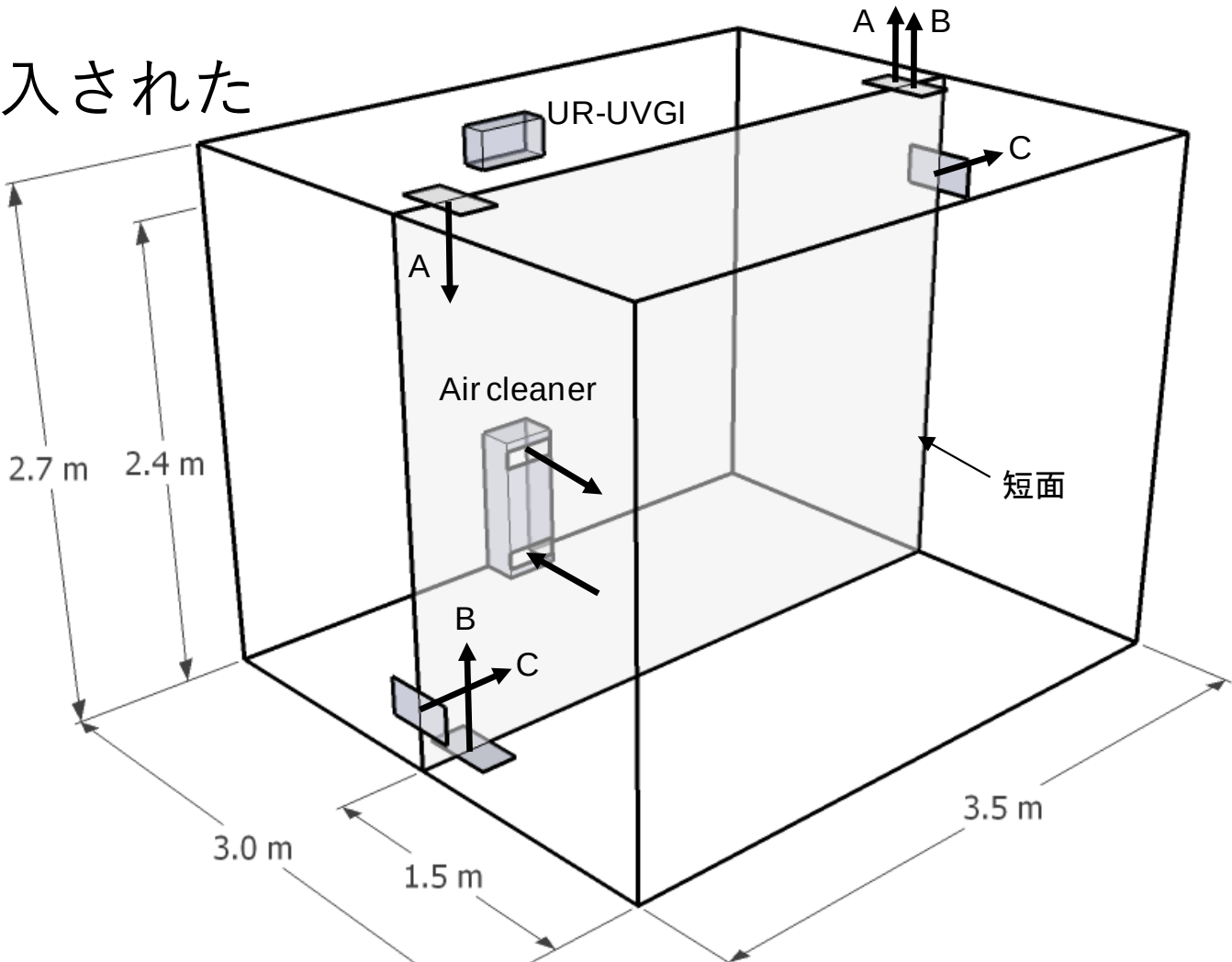
- 吸気口から感染性汚染物質が導入された場合を想定
- 紫外線分布をソース (Sink) にしてスカラー解析

< Scalar equation >

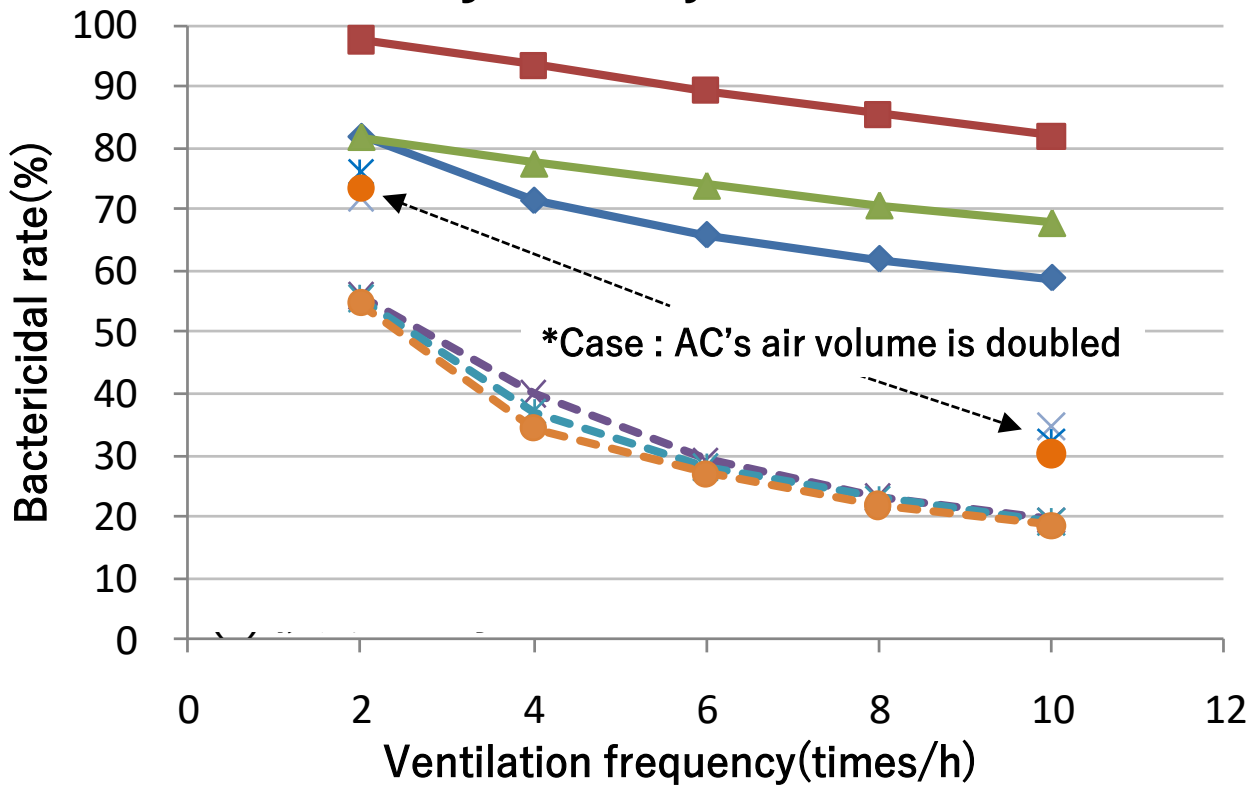
$$C_t / C_0 = e^{-kIt}$$
$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S$$
$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - kIC$$

< Analysis condition and case >

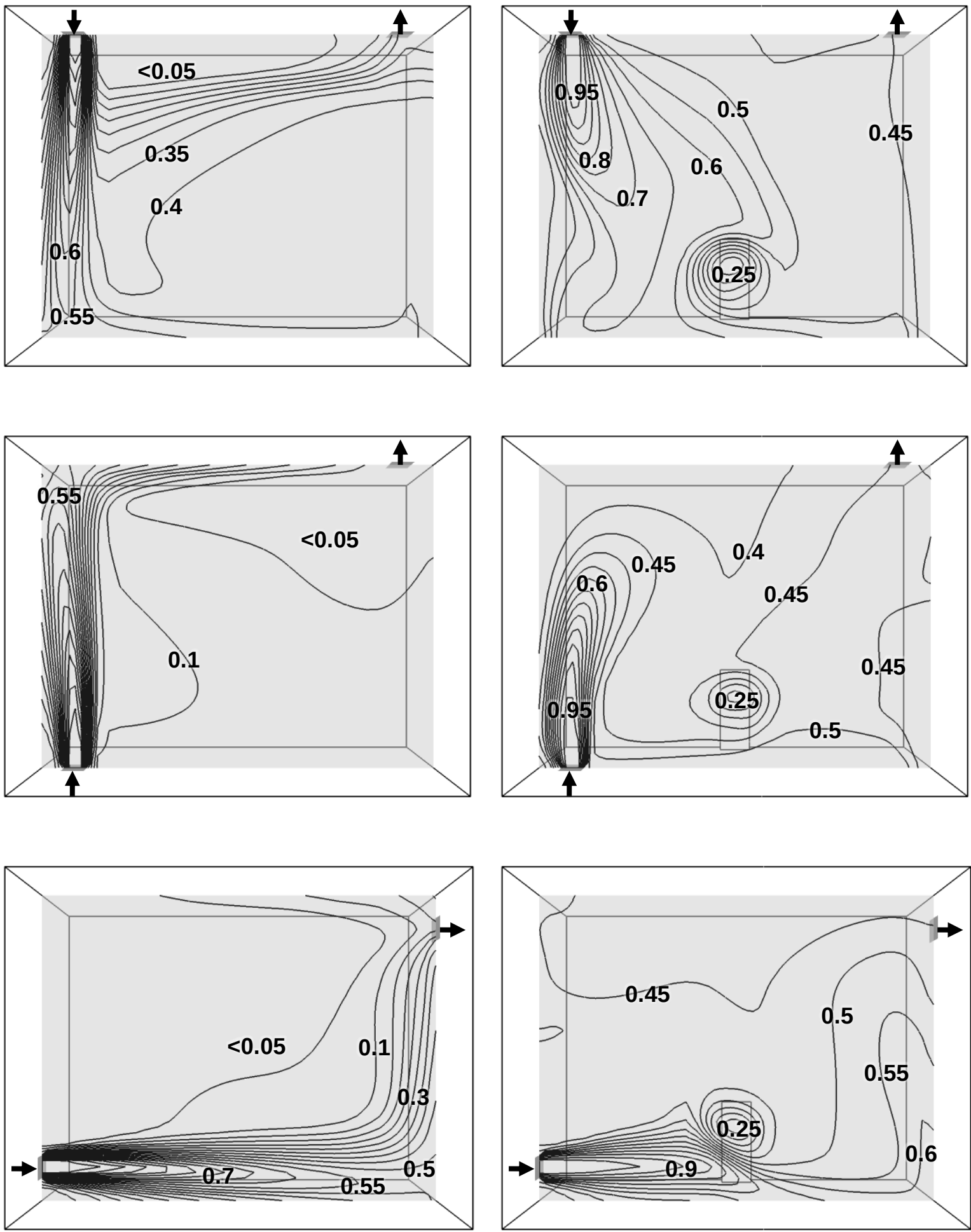
解析ツール	STAR-CD V.3.26
解析条件	メッシュ：約 10 万 乱流モデル：標準 $k-\epsilon$ モデル 等温定常流れ場で汚染物質の濃度計算 (パッシブスカラー拡散)
空調方式	A：天井給気・天井排気、B：床給気・天井排気、C：壁下部給気・壁上部排気 給気：換気回数 2,4,6,8,10 [回/h]相当
UR-UVGI システム	UVC ランプ (紫外線出力 2.3W) 2 本 高さ 2.4m に設置
紫外線空気清浄機	紫外線ランプ (出力 7.5W) 1 本 風量：60CMH (換気回数約 2 [回/h]に相当) ワンパス殺菌率：>99.9% (メーカー提示)



< Analysis object model >

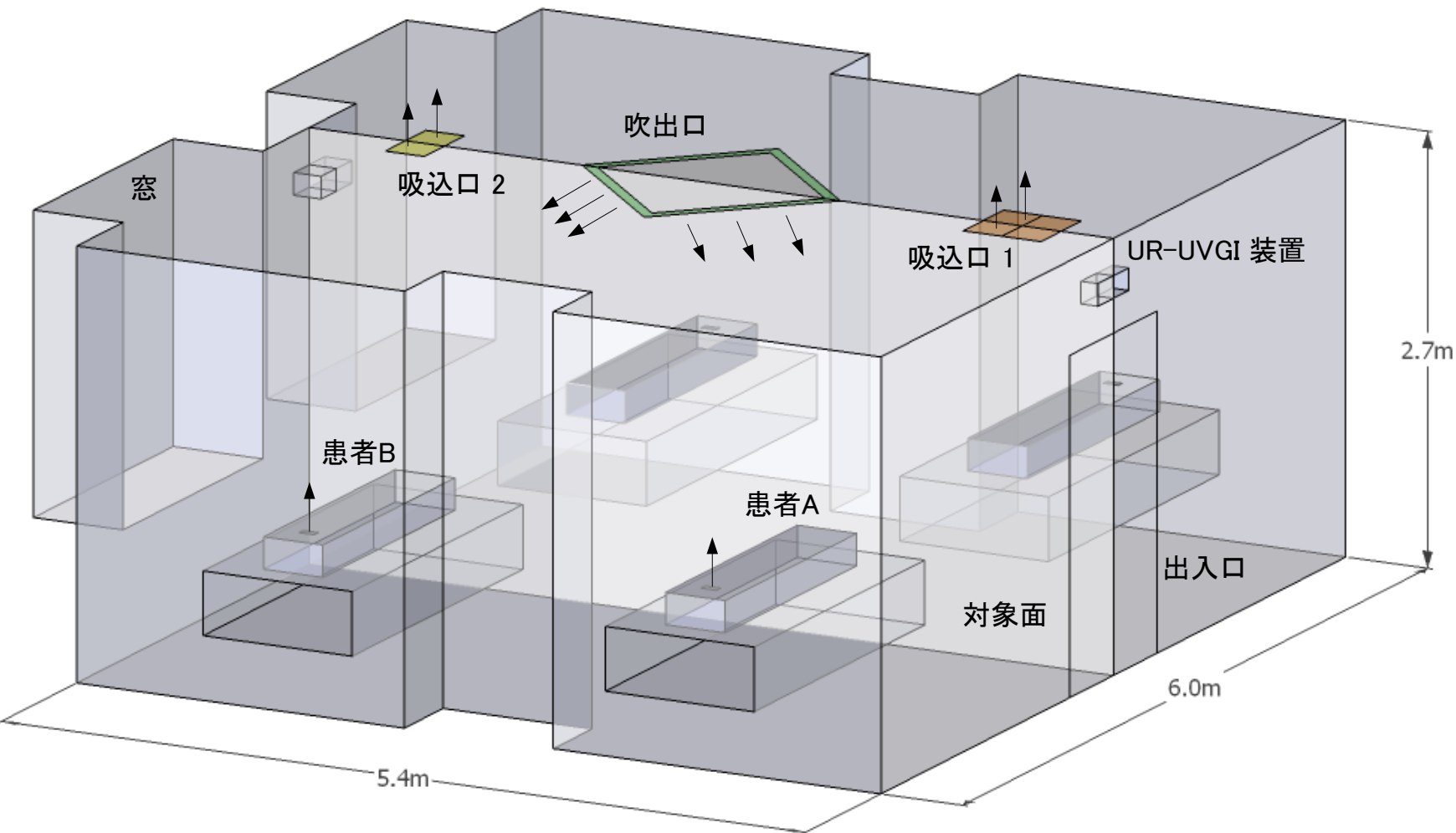


< Comparison of sterilization rates
(in case of the target bacteria is Mycobacterium tuberculosis)



< Concentration distribution (air supply concentration: 1, ventilation frequency 2 times

室内上部UVGI装置の殺菌性能 III
患者の呼気を対象とした解析



<4-bed sickroom model>

<Analysis case>

Case	UR-UVGIの設置位置	吸込口	吹出口
Case 1	出入口側	吸込口1	中央吹出口
Case 2		吸込口1+2	

<Human condition>

区分	条件
人体サイズ	身長：1.7m、幅：0.4m、厚み：0.2mの直方体
口の条件	面積：0.0003m ² 風量：0.000024m ³ /s(定常呼気仮定)

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial r \cdot u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma} \cdot \frac{\partial r}{\partial x_j} \right)$$

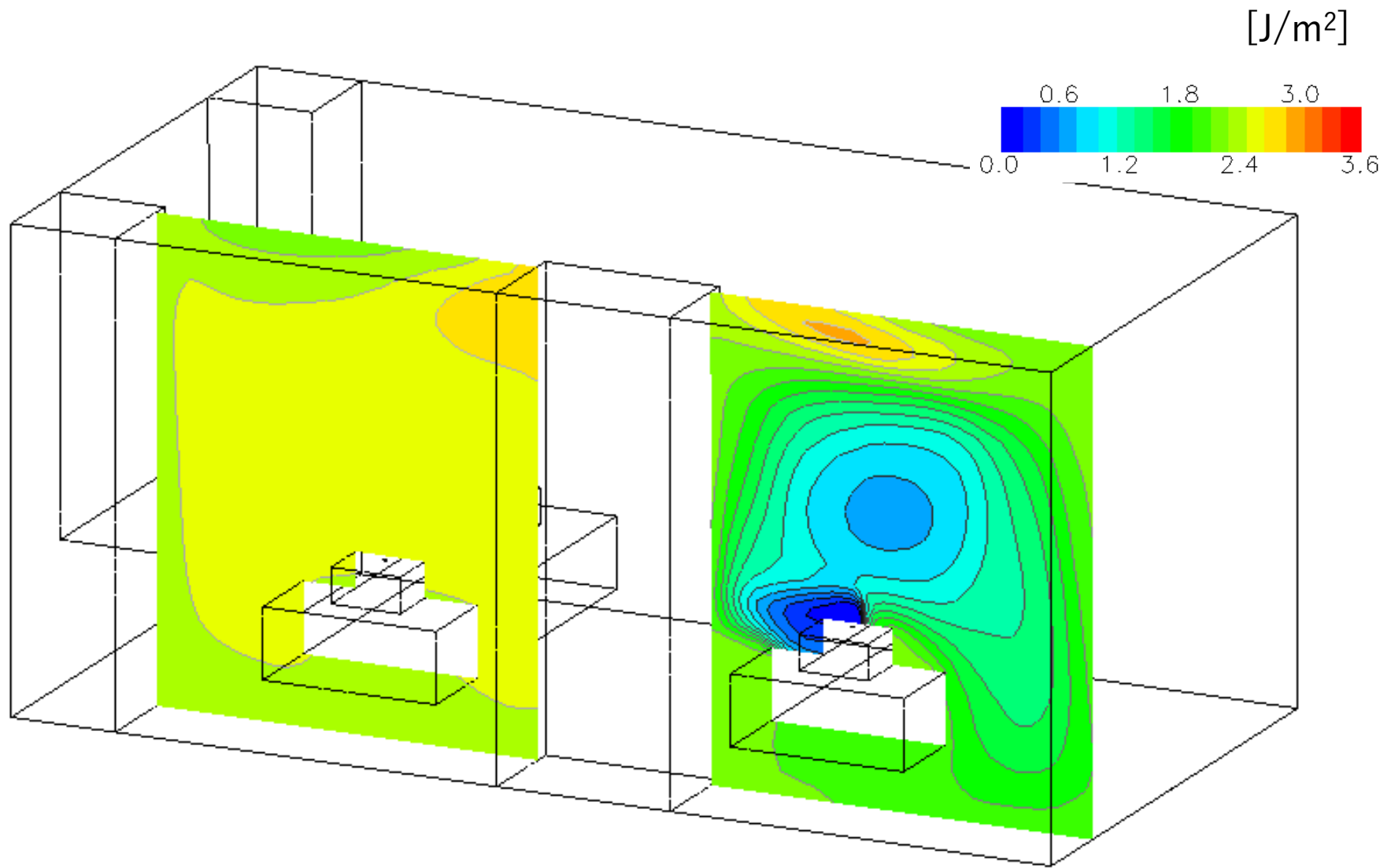
Equation(1) : Patient's expiration contribution rate

$$\frac{\partial Dr}{\partial t} + \frac{\partial Dr \cdot u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma} \cdot \frac{\partial Dr}{\partial x_j} \right) + r \cdot I$$

Equation(2) : UV dose reflecting contribution rate

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial D \cdot u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma} \cdot \frac{\partial D}{\partial x_j} \right) + I$$

Equation(3) : The result of dividing the distribution of B from the distribution of Equation 1



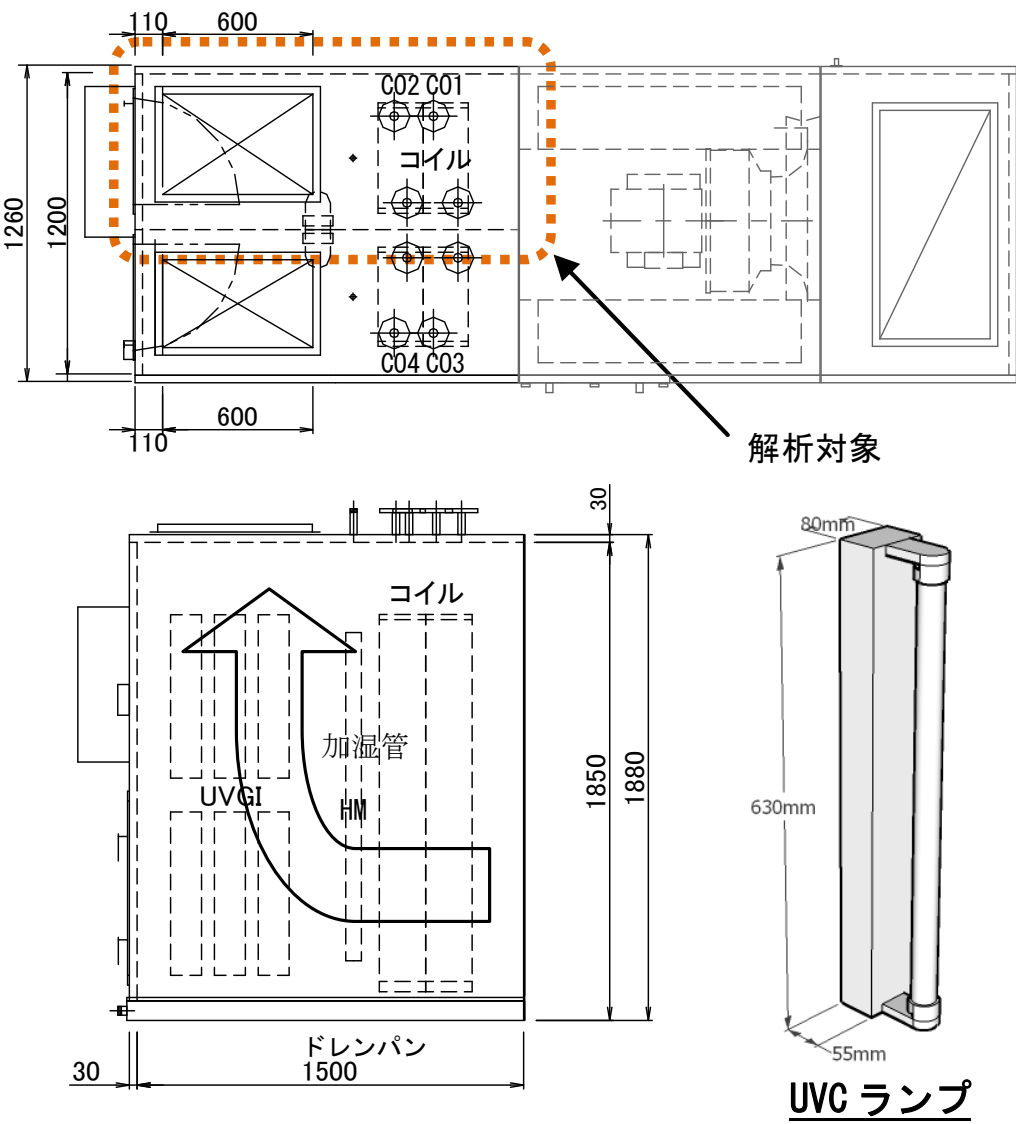
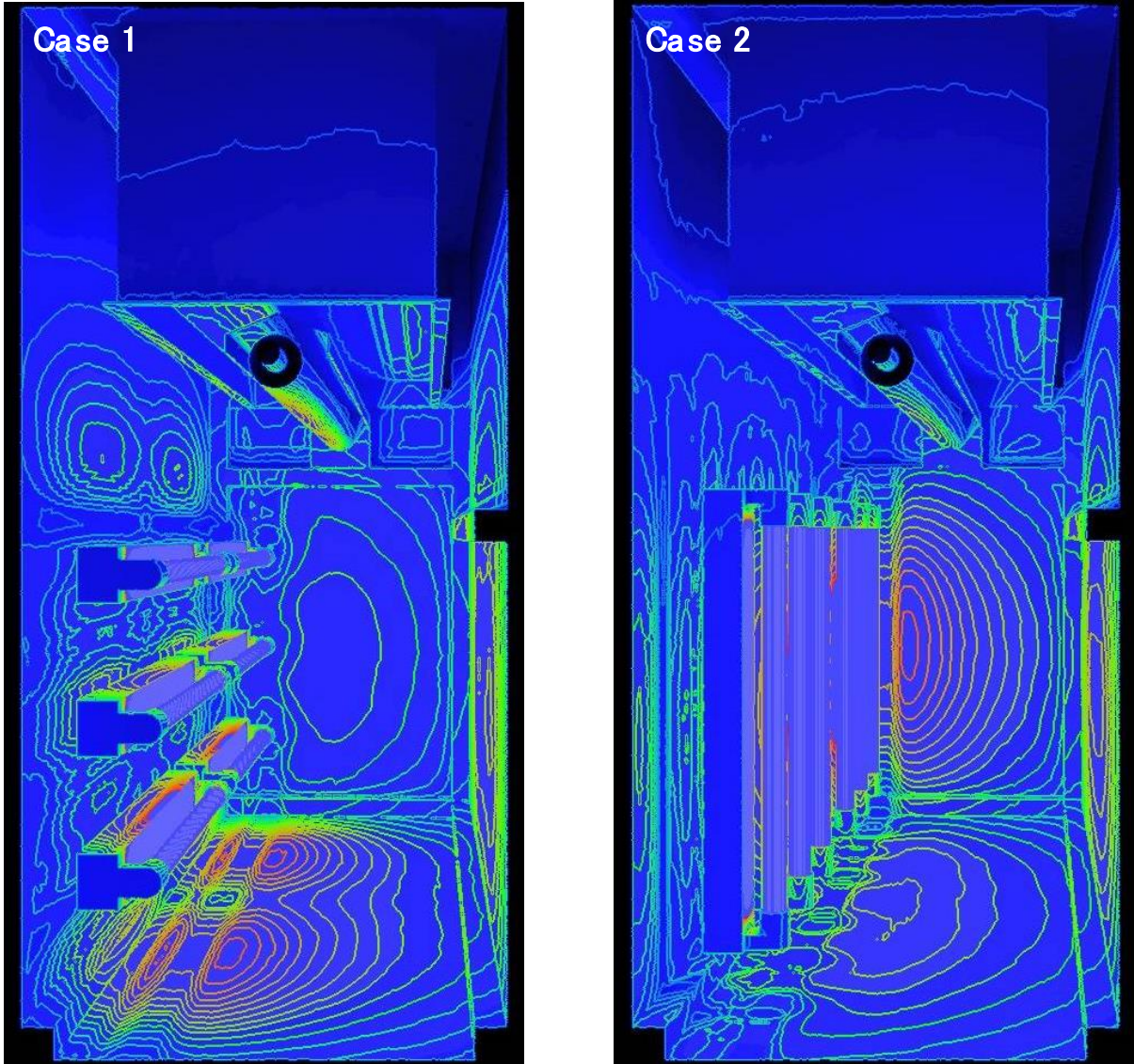
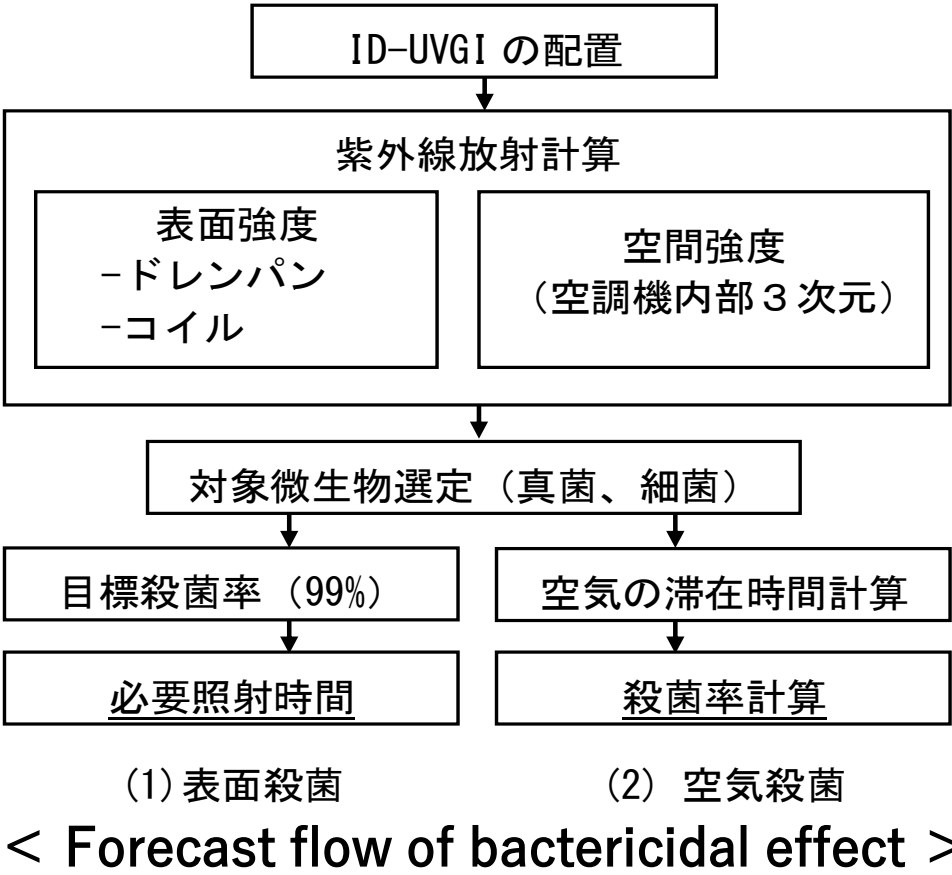
< Case 1 Ultraviolet irradiation dose for exhalation from patient A >

空調機用UVGI装置の殺菌性能 I

表面殺菌及び空気殺菌解析

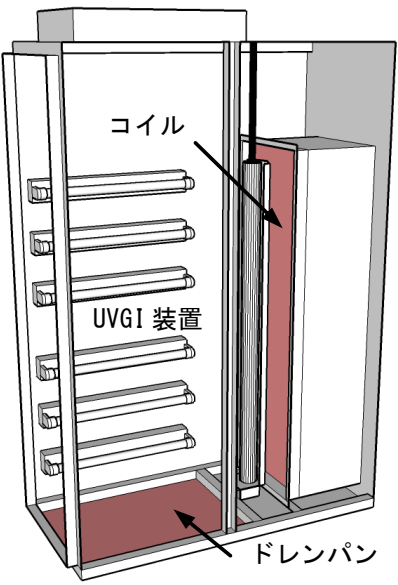
● 紫外線放射計算による殺菌効果予測

- － 病院用空調機にUVGI装置を設置した場合の紫外線強度計算
- － 放射計算ソフト：RADIANCE（米LBLで開発した光線追跡コード）
- － 光源、反射率等を紫外線として設定
- － 表面殺菌： コイル、ドレンパンの表面強度
- － 空気の殺菌効果： 空間強度



<Target air conditioner>

区分	仕様
風量	11,350 m³/h (6,000 m³/h + 5,350 m³/h)
材料	外板：ガルバリウム鋼板 ドレンパン：ステンレス コイル：アルミフィン (アクリルコート) 蒸気加湿管：ステンレス
UVGI 装置	UVGI 装置 防湿器具 UVC ランプ 低圧水銀灯 定格 20W (UVC 出力 7.5W)



<Average Ultraviolet strength> [W/m²]

区分	表面平均強度		空間平均強度
	ドレンパン	コイル	
Case 1	7.3 (3.9~9.8)	4.7 (0.7~9.6)	27.2 (Max.120)
Case 2	10.7 (4.5~17.7)	3.2 (0.6~6.0)	27.8 (Max.142)

< Prediction of bactericidal effect > < Distribution of UVC strength >

種類 (殺菌係数 k [m²/J])	表面		空気殺菌 (平均滞在時間0.8秒 での空気殺菌率)
	ドレンパン	コイル	
<i>Aspergillus</i> sp. コウジカビ (0.00731)	64~162 36~140	66~900 105~1050	15% 15%
<i>Cladosporium</i> sp. クロカビ (0.00384)	122~308 68~267	125~1713 200~1999	8.0% 8.2%
<i>Penicillium</i> sp. アオカビ (0.0014)	336~843 186~731	343~4699 548~5482	3.0% 3.1%
<i>Bacillus subtilis</i> . 枯草菌 (0.027)	17~44 10~38	5~13 3~12	44% 45%
<i>Staphylococcus</i> sp. ブドウ球菌 (0.0886)	5~13 3~12	5~74 9~87	85% 86%

* 左上がCase 1、右下がCase 2

空調機用UVGI装置の殺菌性能 II 病院における殺菌効果の実測

● カビセンサーの概要

- 空調機用UVGI装置を稼働している病院で微生物汚染状態をモニタリングしてその殺菌効果を確認する。
- 病室の浮遊菌及び空調機の付着菌等を測定
- ⇒ 空調機の表面に微生物が検出されない。
- ⇒ 空調機から病室への給気にも検出されない。

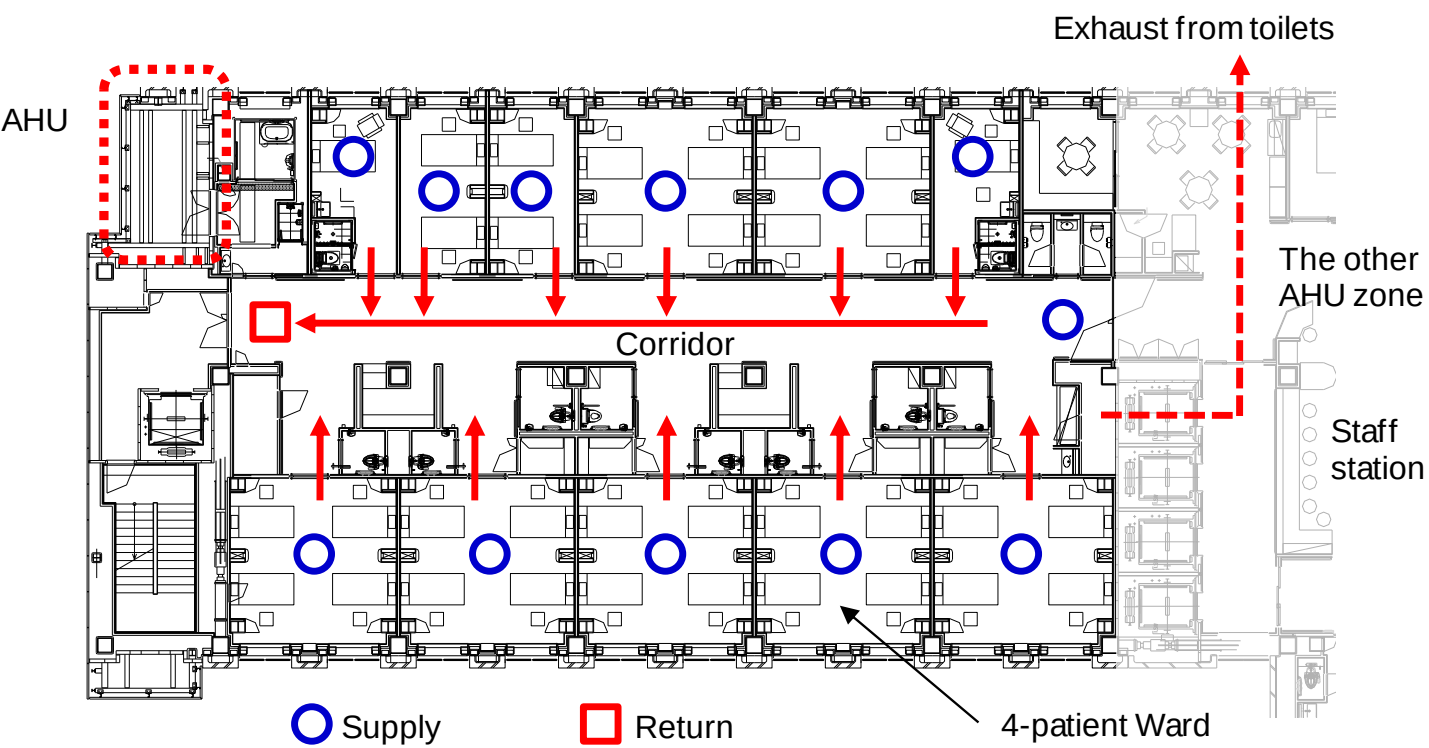


Fig.1 Air conditioning flow

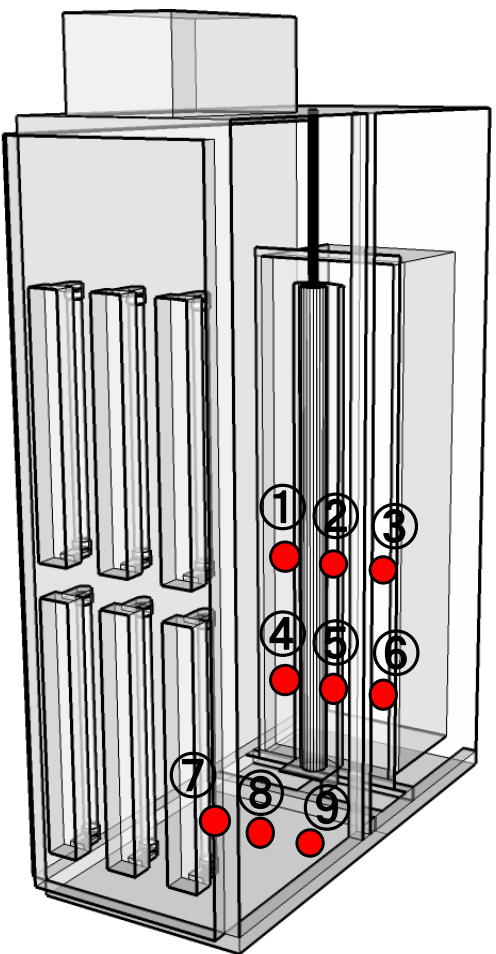


Fig.2 Stuck bacteria measurement

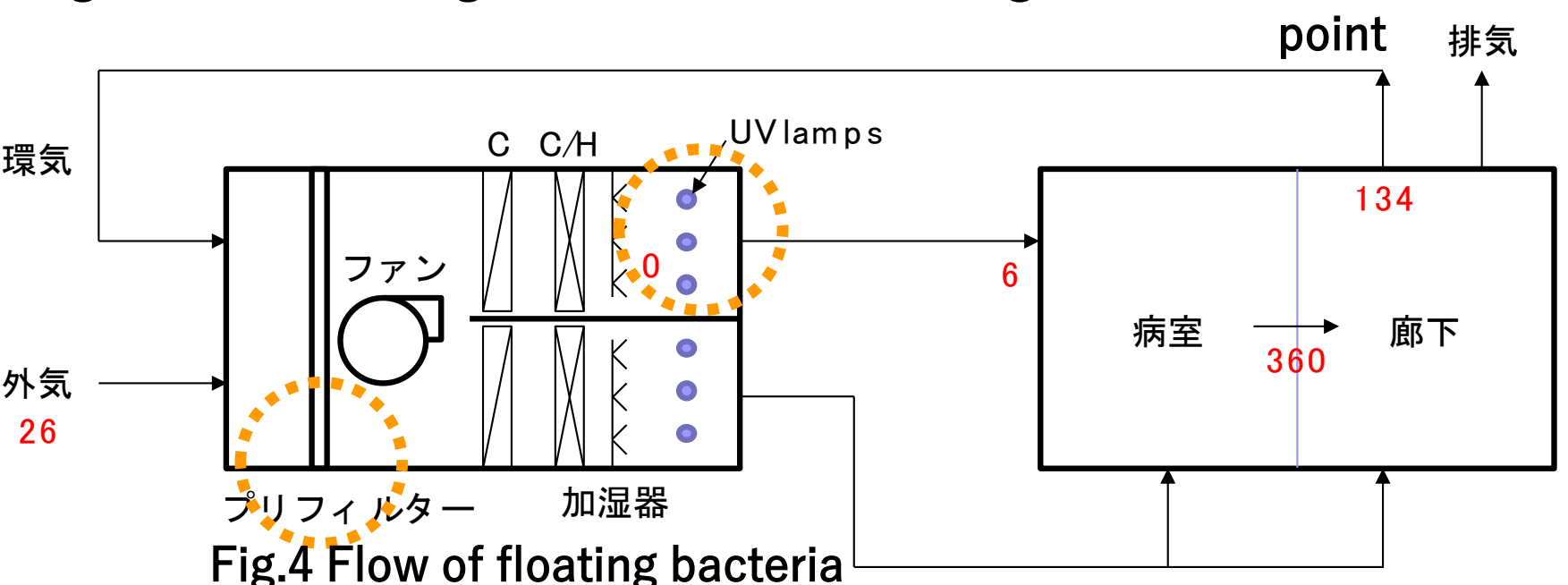


Fig.4 Flow of floating bacteria

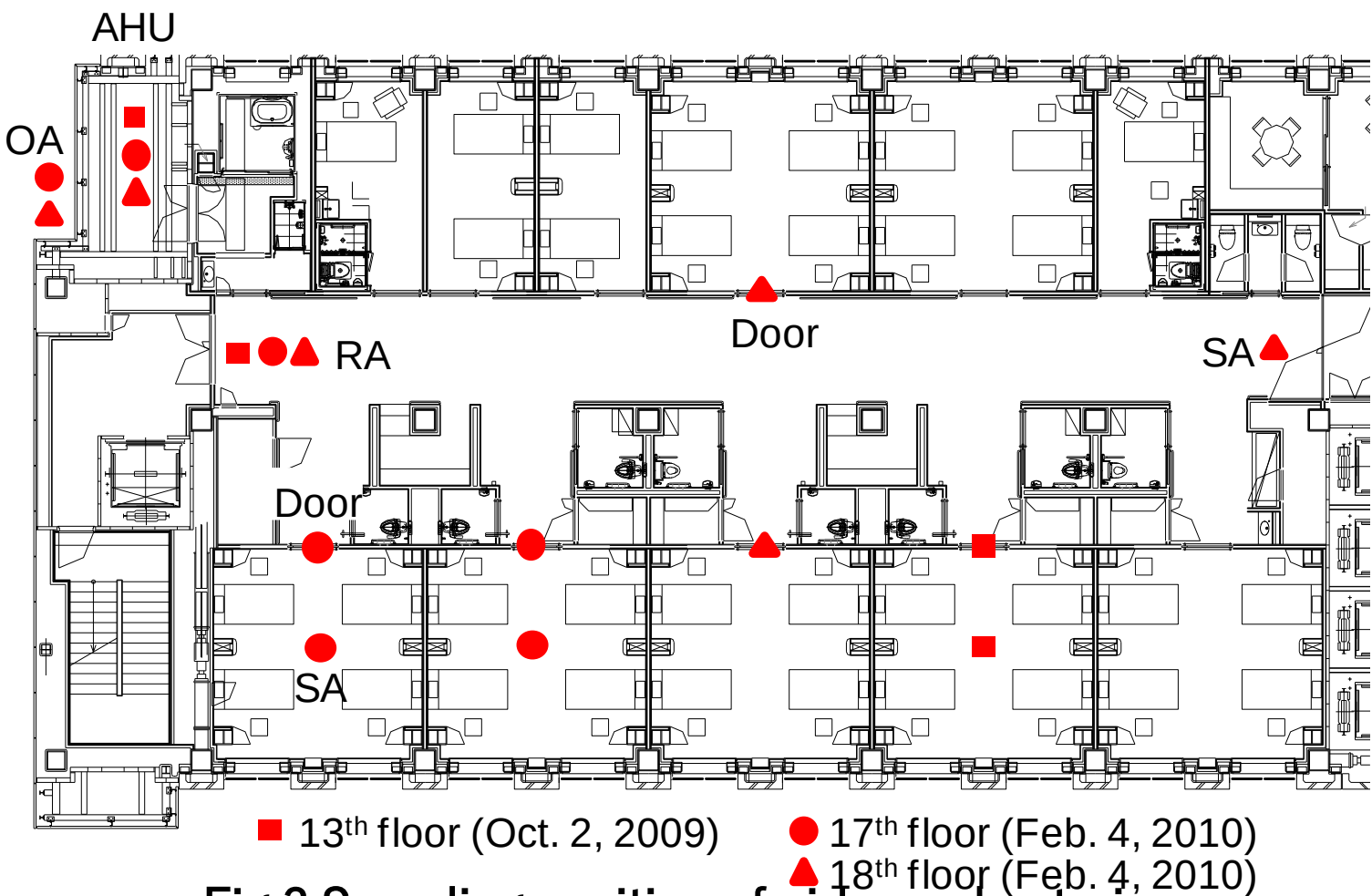


Fig.3 Sampling position of airborne bacteria

Table1 Measurement result

Airborne bacteria			[CFU/m ³]	
#/m3			細菌	真菌
17F	1719	SA	6	2
		Door	404	38
	1720	SA	0	4
		Door	310	24
	RA		134	16
	Outdoor		26	16
	AHU		0	2
18F	1812	Door	244	6
	1818	Door	232	4
	SA		100	14
	RA		172	72
	Outdoor		34	22
	AHU		0	4

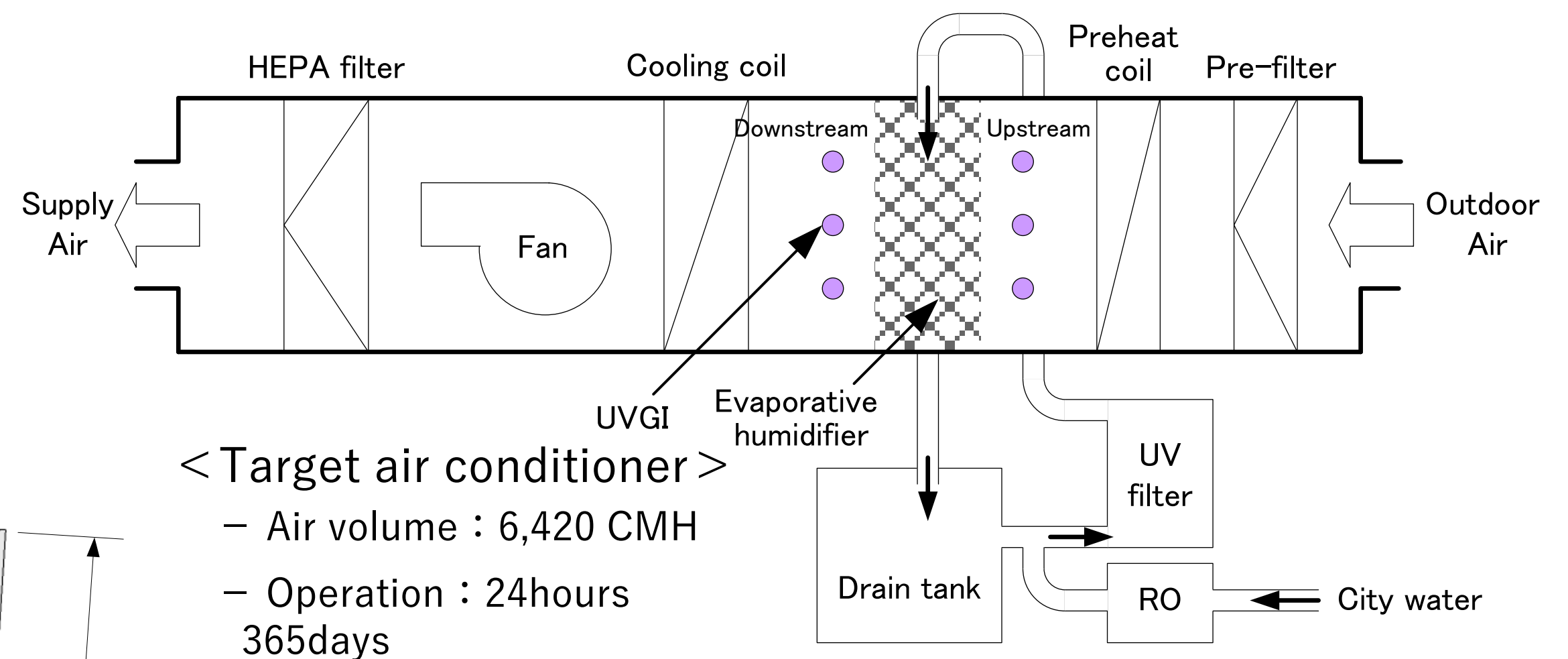
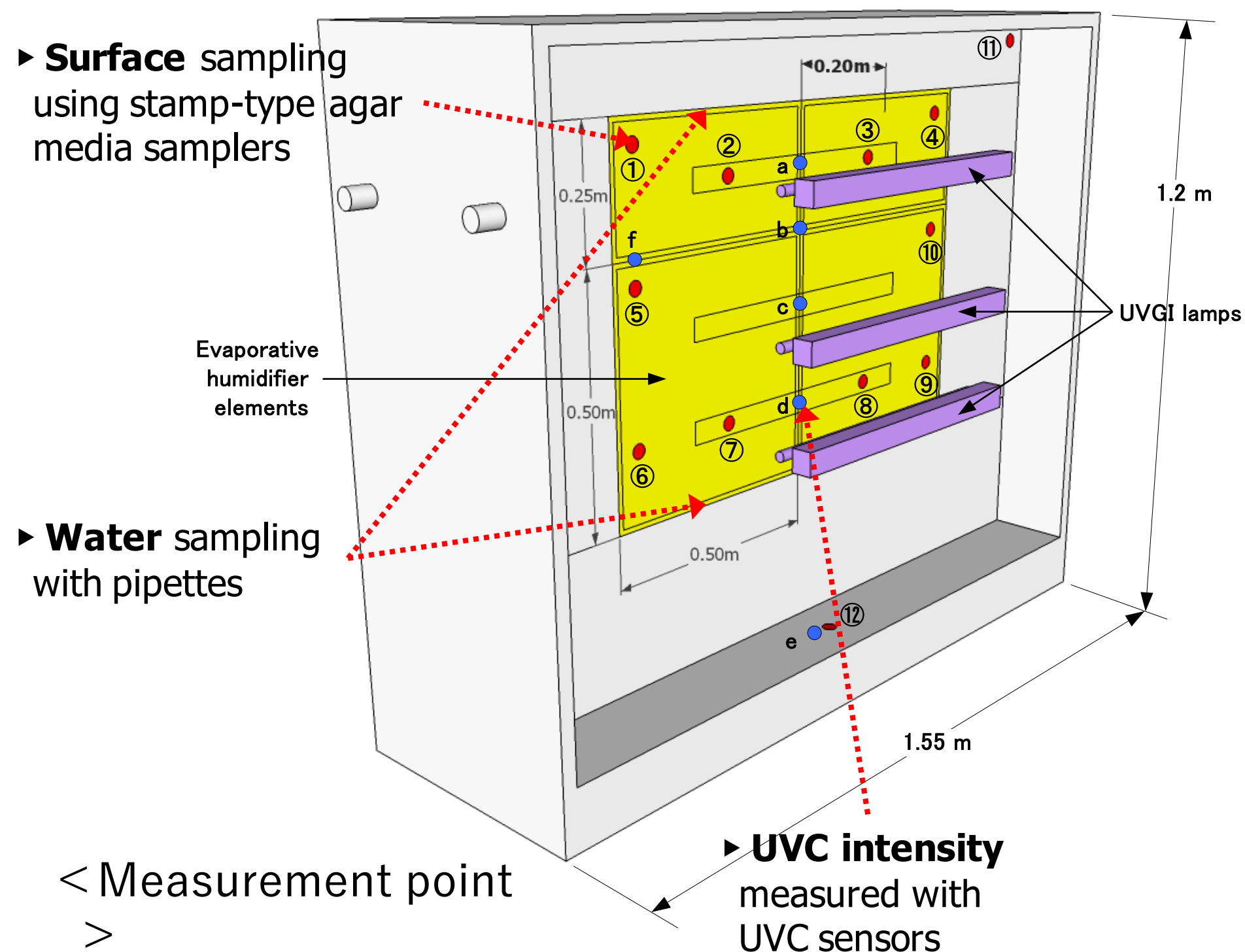
Adhering bacteria		[CFU/10cm ²]			
		細菌	真菌		
		17F	18F	17F	18F
①		0	0	0	0
②		0	0	2	0
③		0	0	0	0
④		0	0	0	0
⑤		0	0	0	0
⑥		0	0	0	0
⑦		0	0	0	0
⑧		0	0	0	0
⑨		1	0	0	0

Drain water		[CFU/50 μ l]	
		細菌	真菌
17F		0	0.5

空調機用UVGI装置の殺菌性能 III 気化式加湿器を対象とした殺菌効果確認 1

● 気化式加湿器

- 空調機用気化式加湿器に増殖する微生物を対象
- 加湿器表面付着菌、浮遊菌、循環水中菌を採取
- UVGI装置の稼働前後の微生物汚染状況比較
- 気化式加湿器エレメント表面の紫外線強度測定
⇒ 0.24~16.2 W/m²の分布



Before UVGI operation



UVGI operation



After UVGI operation

< Changes in humidifier surface due to UVGI operation >

空調機用UVGI装置の殺菌性能 IV

気化式加湿器を対象とした殺菌効果確認2

● 測定結果

- 加湿器エレメント表面の汚れがきれいになった。
- UVGI稼働後付着菌、浮遊菌、循環水中菌が全て急激に減少した。
- UVGI稼働後もある程度菌の検出が持続した。



Fig.1 Inside the humidifier

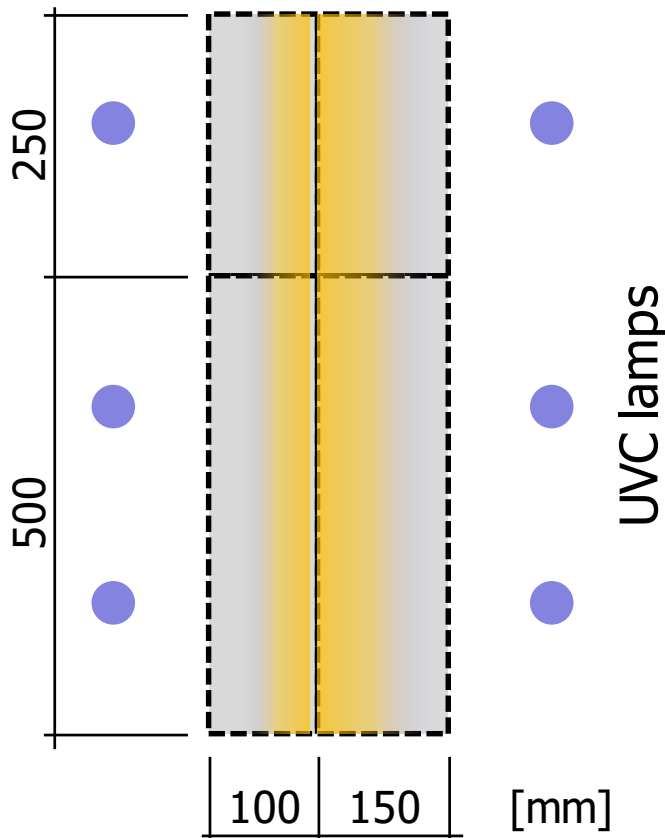


Fig.2 Inside the humidifier

- 紫外線が届かない加湿器エレメントの内部に汚染が発見
- 紫外線照射効率を上げるか、補助殺菌手法等の対策が必要である。

<微生物測定結果>

Adhering bacteria [CFU/10cm²]

測定点		4月7日	4月22日	5月7日	5月18日	6月4日	10月5日
風上側	1~4	TMTC	2.8	31.0	3.8	7.5	5
	5~10	TMTC	14.7	36.0	7.0	11.2	2.7
	11~12	TMTC	0.0	0.0	0.0	2.0	-
	平均	TMTC	8.3	28.3	4.8	8.4	3.6
風下側	1~4	TMTC	0.0	3.3	9.3	16.8	1
	5~10	TMTC	0.3	11.8	27.2	27.3	2.7
	11~12	TMTC	0.0	0.0	0.5	2.5	-
	平均	TMTC	0.2	7.0	16.8	19.7	2

Airborne bacteria [CFU/m³]

		4月7日	4月22日	5月7日	5月18日	6月4日	10月5日
細菌	風上側	0	2	64	4	2	10
	風下側	754	4	104	8	10	66
真菌	風上側	0	0	0	0	0	2
	風下側	12	14	8	4	4	12

Circulating water [CFU/50μL]

		4月7日	4月22日	5月7日	5月18日	6月4日	10月5日
細菌	風上側	-	31	810	1,180	1,088	637
	風下側	23,550	20	238	981	1,163	32
真菌	風上側	-	0	4	27	20	0
	風下側	995	0	4	26	19	0

UVGI Operation

カビセンサーによるUVGI装置の殺菌性能検討

● カビセンサーの概要

- カビの胞子を培養すると菌糸が生長する原理を用いて、菌糸の長さで生物の生長環境を評価
- 紫外線の照射によりカビセンサー胞子がどの程度不活性化するかを見て紫外線殺菌性能を予測判断する。

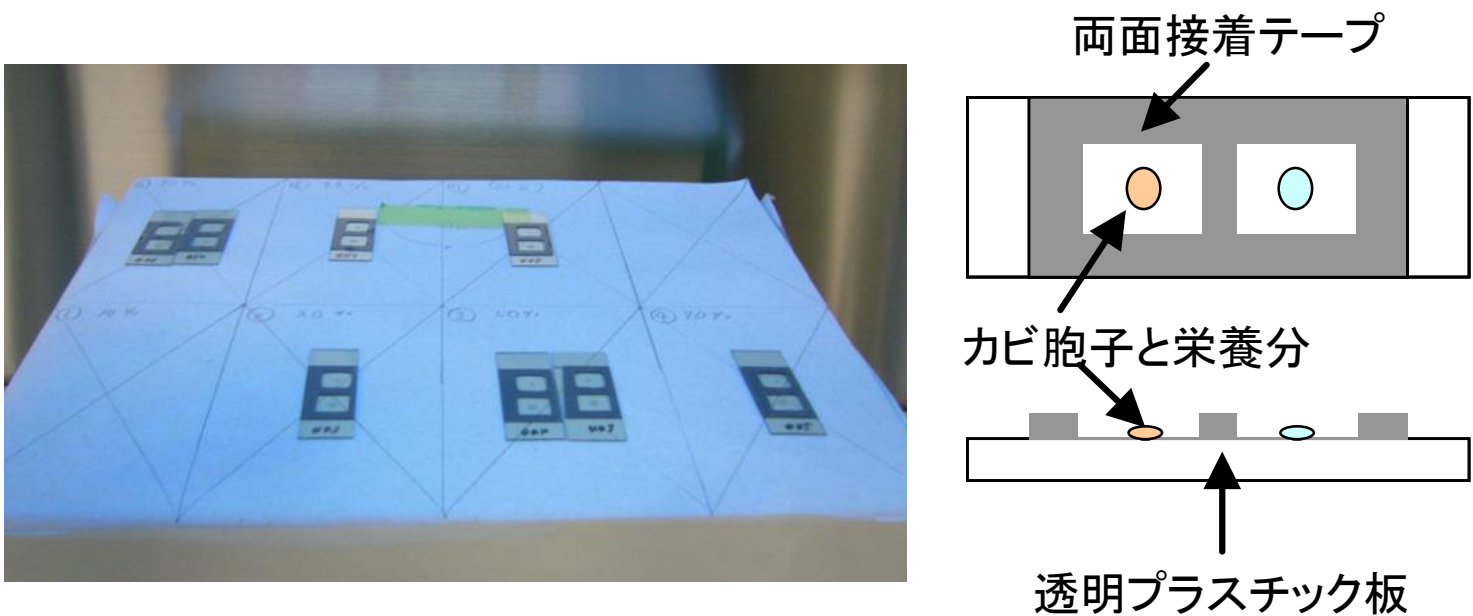


Fig.1 UV irradiation situation and mold sensor

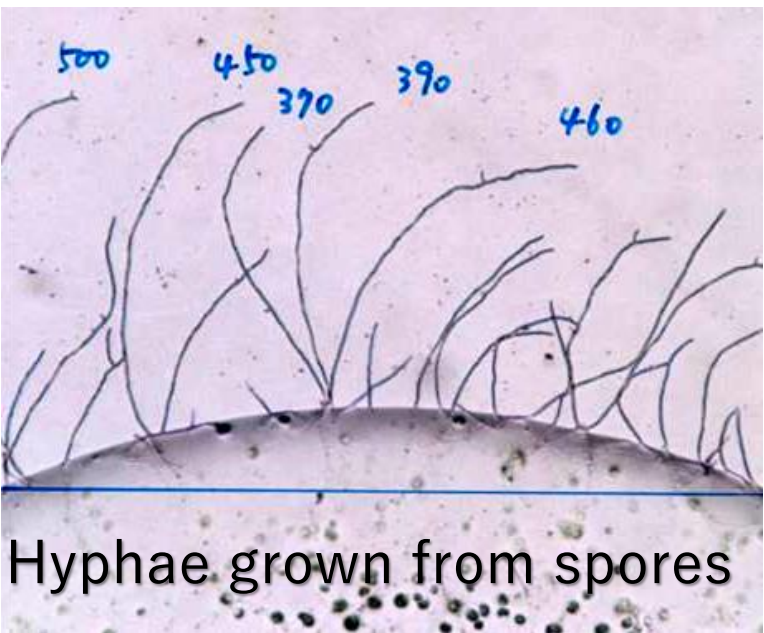
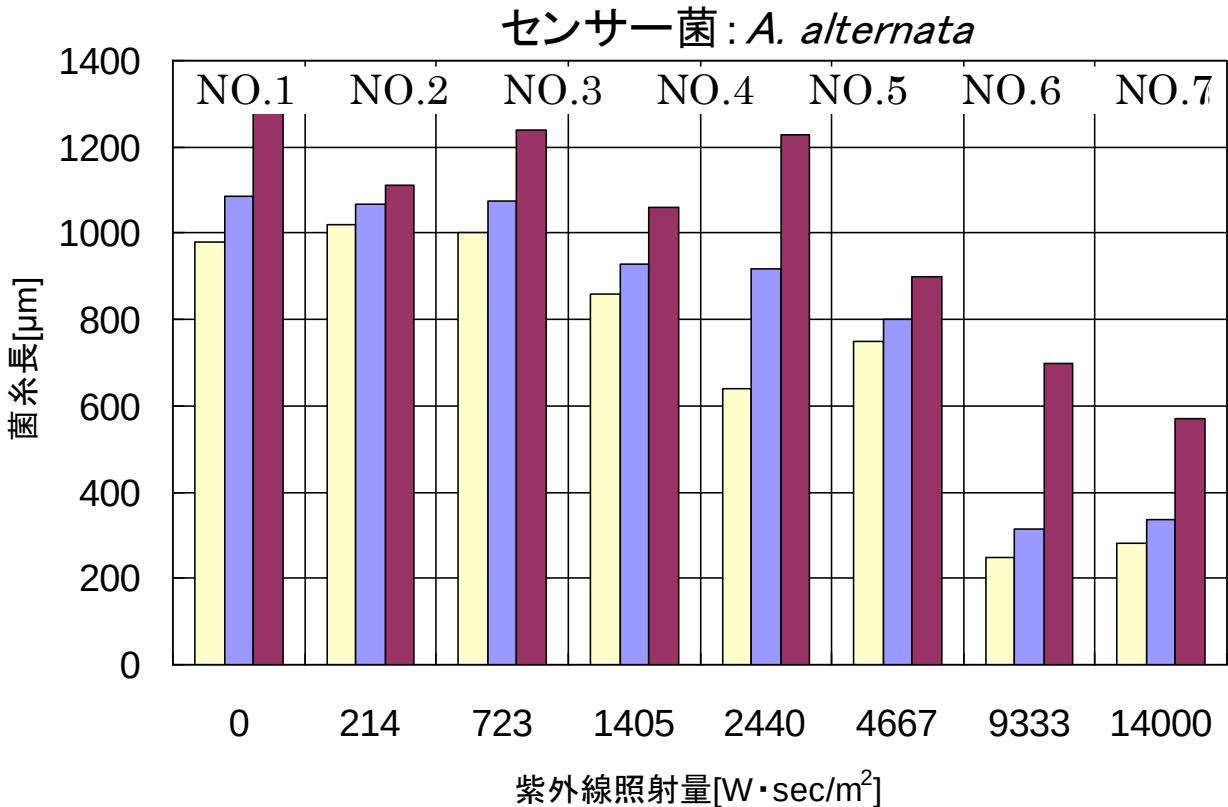
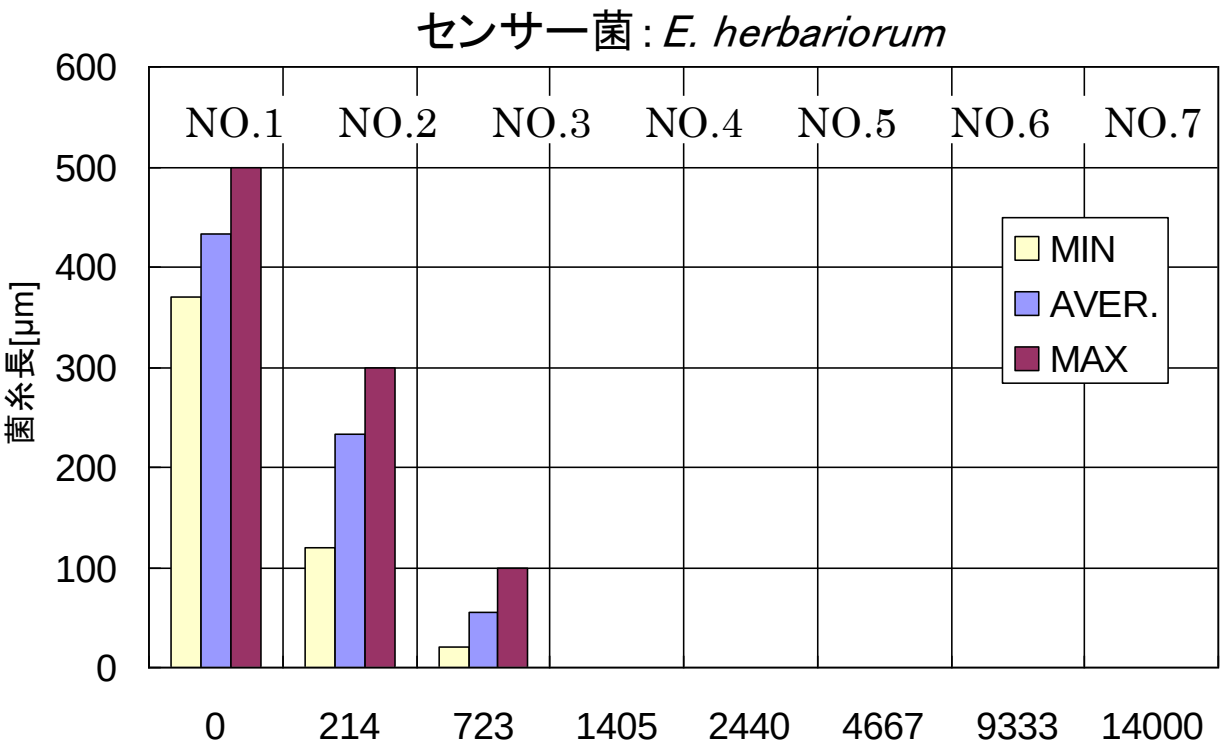


Fig.2 Example of mycelial length measurement by microscope



● 現場確認実験

- UVGI装置が設置されている運転中の空調機にカビセンサーを1時間設置してから回収し、菌糸の長さを確認した。
- 比較的に紫外線に強いカビが不活性化されることから細菌なども殺菌できると予測される。

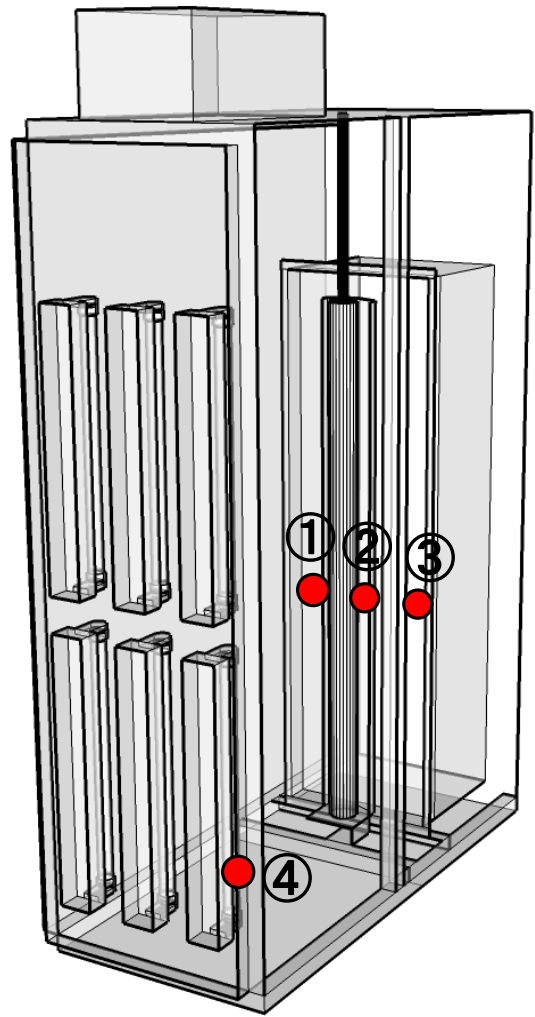


Fig.4 Position of target air conditioner and mold sensor

Table1
length

Place and hyphae length

Fig.3 Relation between ultraviolet irradiation dose and hyphae length

	①	②	③	④	B/G
UVC強度 [W/m²]	0.45	0.13	0.49	0.18	0
UV照射量 [J/m²] * 1時間曝露	1,620	468	1,764	648	0
菌糸長さ [μm]					
<i>Cladosporium herbarum</i>	619	713	506	601	527
<i>Fusarium solani</i>	0	88*	0	0*	437