住宅における人からの 飛沫の拡散に関する研究

単室を対象とした飛沫の 拡散・排出・除去のCFD解析

> 松山 千紘 指導教員 赤林 伸一 教授







昨年から、新型コロナウイルスによる<mark>感染症</mark>が世界的に流行している。





昨年から、新型コロナウイルスによる<mark>感染症</mark>が世界的に流行している。

多くの感染症の感染経路は飛沫もしくは接触であり、厚生労働省は、「換気の悪い密閉空間」が感染リスク要因の一つであるとしている。





昨年から、新型コロナウイルスによる<mark>感染症</mark>が世界的に流行している。

多くの感染症の感染経路は飛沫もしくは接触であり、厚生労働省は、「換気の悪い密閉空間」が感染リスク要因の一つであるとしている。

換気の悪い密閉空間は、換気量30[m³/h・人]以下の空間であり、これ以上の換気量があれば「換気が悪い空間」には当てはまらないとしている。





更に、空気清浄機は換気と同様にウイルス除去に効果があると考えられるが、換気・空気清浄機は風量だけでなく給排気位置によって排出・除去の効果が異なるのは当然である。





更に、空気清浄機は換気と同様にウイルス除去に効果があると考えられるが、換気・空気清浄機は風量だけでなく給排気位置によって排出・除去の効果が異なるのは当然である。

本研究では、CFD解析(RANS*1)により、一辺が3[m]の単室を対象に、室内における人からの飛沫の拡散解析を行い、換気・空気清浄機による飛沫の排出・除去効果を定量的に評価することを目的とする。



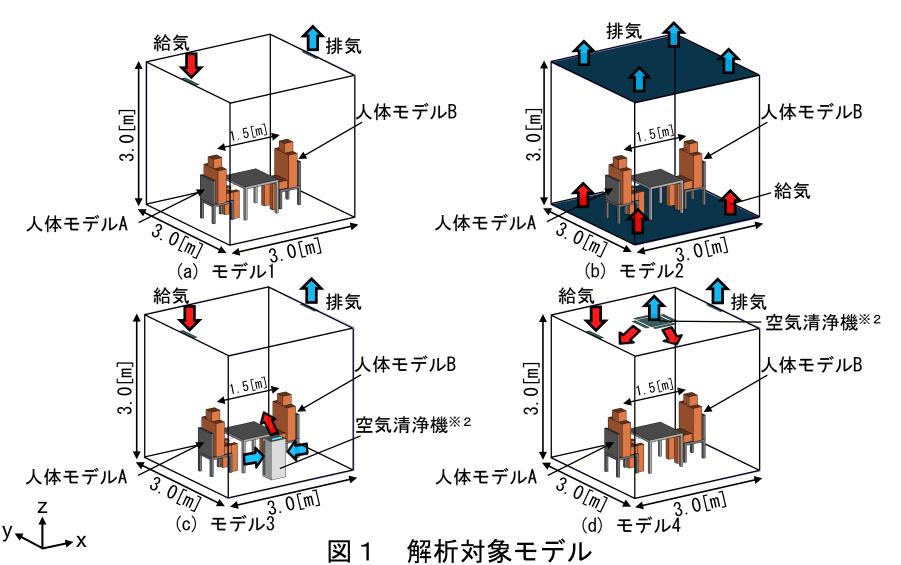
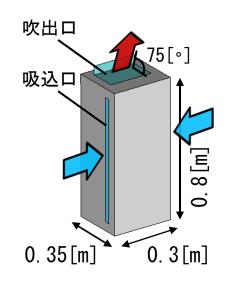






表 1 解析条件

case	解析対象 モデル	換気量 [m³/h]	空気清浄機 ^{※ 2} 風量[m³/h]
case1	モデル 1	60	_
case2	モデル2	60	-
case3	モデル3	60	300
case4	モデル4	60	300
		-	



吹出

吹出口: 0.15×0.25[m]

風量: 300 [m³/h]

風速 : 2. 22 [m/s]

吹出風向:水平から

上向きに75[。]

吸込

吸込口 : 0.03×0.7[m]

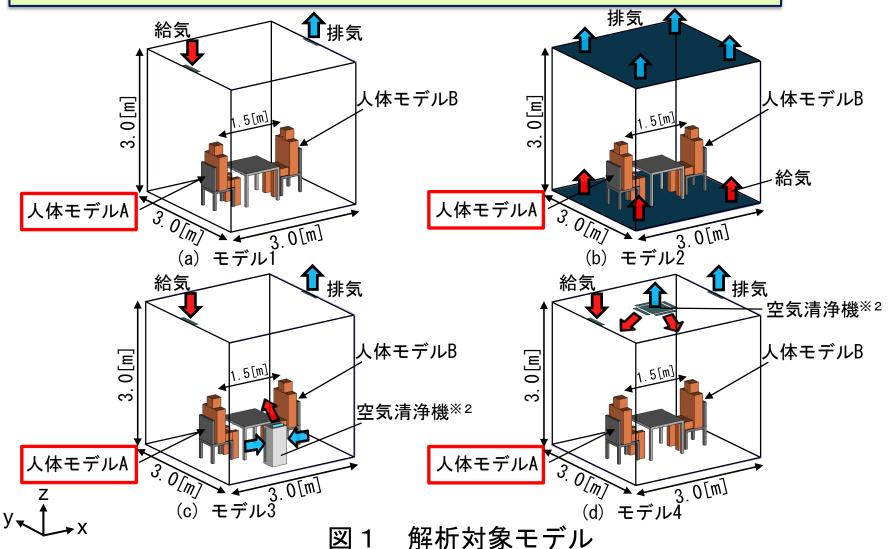
風量: 150[m³/h] × 2 箇所

風速 : 1.98[m/s]

図2 空気清浄機※2



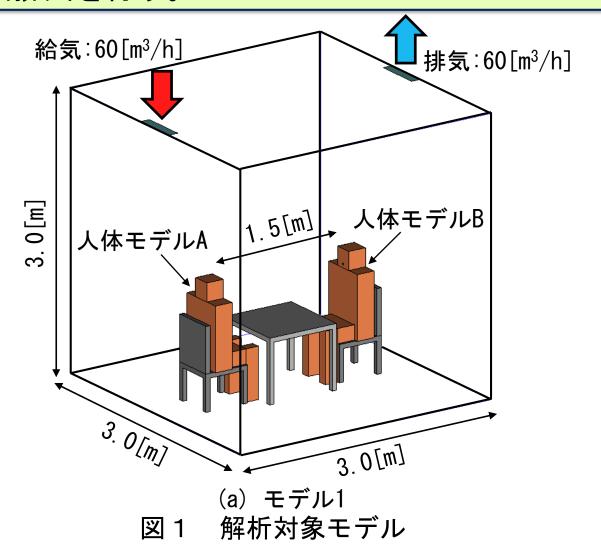
滞在人員は2名とし、人体モデルAを感染者とする。







case1は天井の換気口(100[mm]×500[mm])から鉛直方向に<mark>換気量60[m³/h]</mark>で給排気を行う。

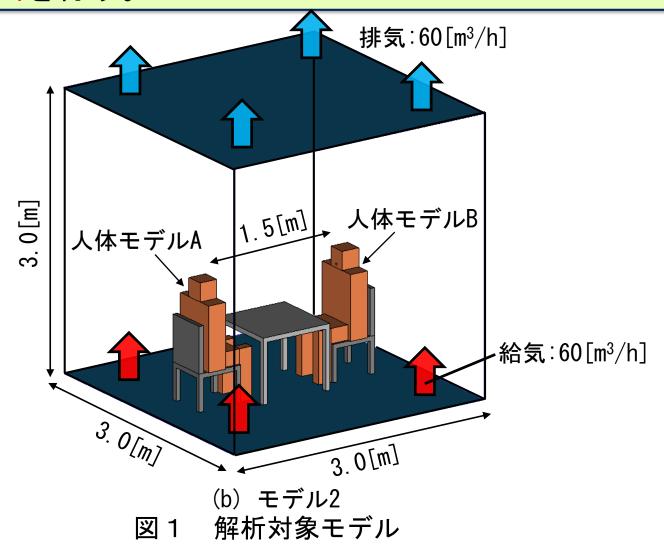






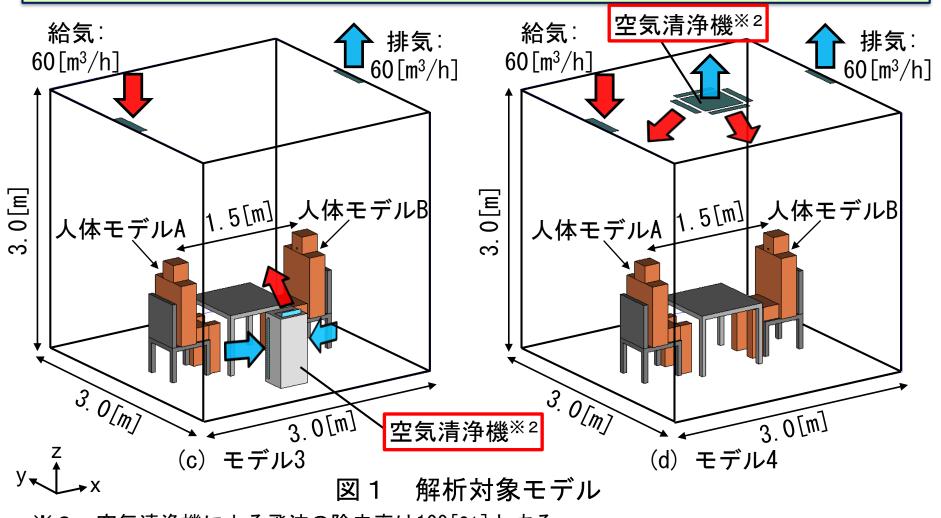


case2はcase1と同じ換気量(60[m³/h])で、床全面で給気、天 井全面で排気を行う。



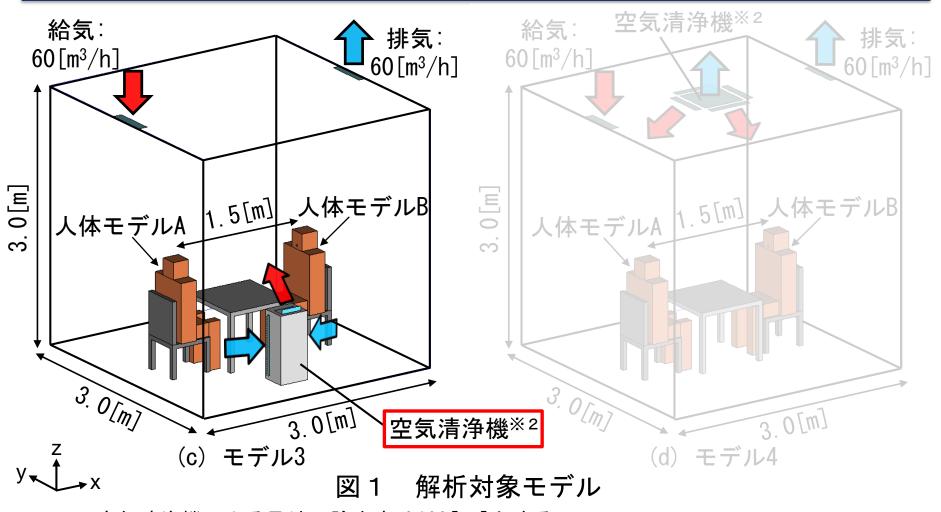


case3、4はcase1に空気清浄機を追加し、空気清浄機の風量は300[m³/h]とする。



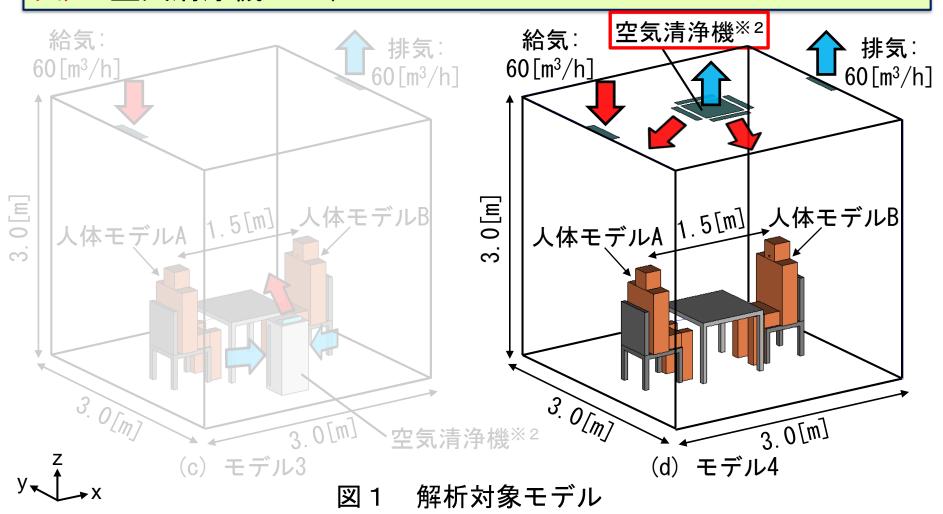


case3は床置き型、case4は天井カセット型(中央吸込、4方向吹出)の空気清浄機とし、



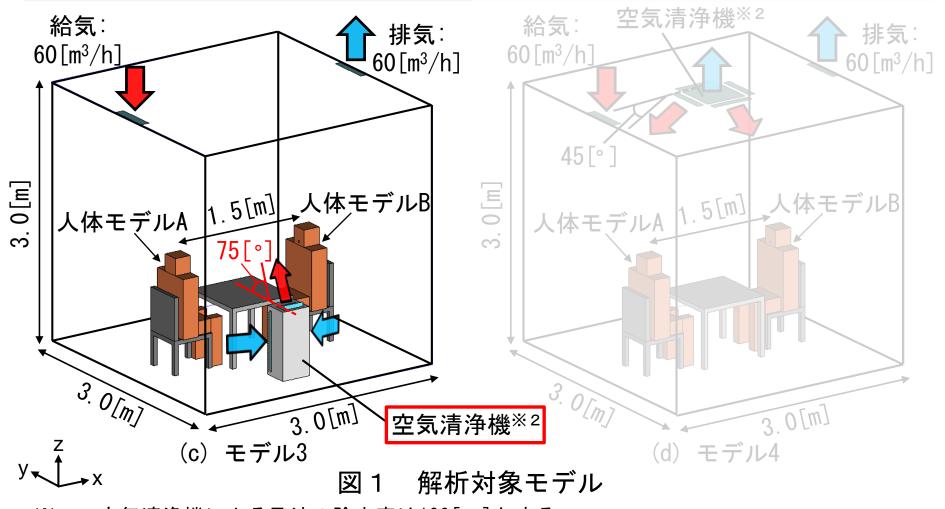


case3は床置き型、case4は天井カセット型(中央吸込、4方向吹出)の空気清浄機とし、



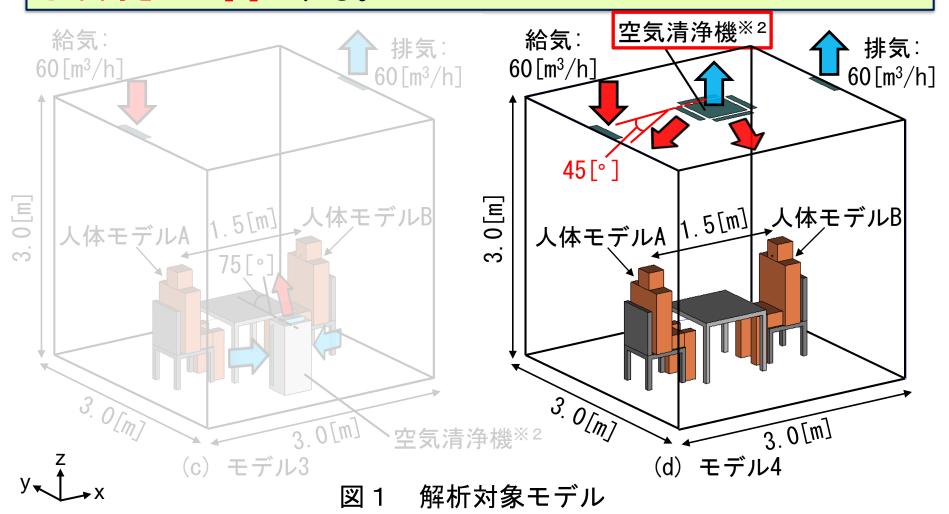


吹出風向は、**case3が水平から上向きに75[°]**、case4が天井面から下向きに45[°]とする。





吹出風向は、case3が水平から上向きに75[°]、case4が天井面から下向きに45[°]とする。









解析方法 表 2

乱流モデル	標準k-εモデル			
解析領域	3.0[m] × 3.0[m] × 3.0[m]			
	表面境界	床	壁面対数則	
境界条件		モデル面		
	輻射境界	輻射	率0.9	
雰囲気温度	20[°C]			
	粒子発生:t=0~600[s]			
解析時間 t	発生停止:t=600~1, 200[s]			
-				

人体表面温度:30[℃]

 \Box : 0. 02 × 0. 02 [m]

呼出

呼出温度:35[℃]

呼気風速:1.0[m/s]^{文2)}

飛沫

飛沫粒径:①100[µm]

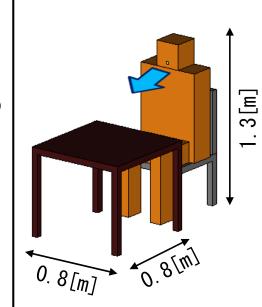
210[µm]

飛沫物性:水

反発係数:1.0%3

発生数 : 100個

発生間隔:10[s]



人体モデル 図 3

- 文2) 村上ら「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、2001年
- 換気による飛沫の排出率を算出する為、壁面に付着することで飛沫が空気から減少する \times 3 ことが無いように、壁面に到達した飛沫は跳ね返るよう設定している。





RANS解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAM ver. 2020を使用する。

表 2 解析方法

乱流モデル	標準k-εモデル			
解析領域	3.0[m] × 3.0[m] × 3.0[m]			
	表面境界	床	壁面対数則	
境界条件		モデル面		
	輻射境界	輻射	×0.9	
雰囲気温度	20[°C]			
#7 +C n± 88 ±	粒子発生:t=0~600[s]			
解析時間 t	発生停止:t=600~1, 200[s]			
·				

人体表面温度:30[℃] 口:0.02×0.02[m]

呼出

呼出温度:35[℃]

呼気風速:1.0[m/s]^{文2)}

飛沫

飛沫粒径:①100[µm]

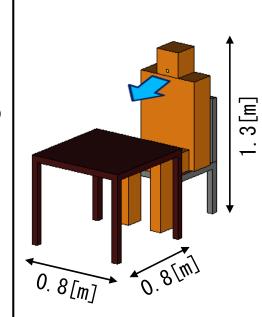
210[µm]

飛沫物性:水

反発係数:1.0%3

発生数 : 100個

発生間隔:10[s]



- 文2) 村上ら「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、2001年
- ※3 換気による飛沫の排出率を算出する為、壁面に付着することで飛沫が空気から減少する ことが無いように、壁面に到達した飛沫は跳ね返るよう設定している。





感染者は10[s]毎に呼吸(呼気風速1.0[m/s]^{文2)})すると仮定し、

表 2 解析方法

乱流モデル	標準k-εモデル			
解析領域	3.0[m] × 3.0[m] × 3.0[m]			
	表面境界	床	壁面対数則	
境界条件		モデル面		
	輻射境界	輻射	×0.9	
雰囲気温度	20[°C]			
### ## ## ## ## ## ## ## ## ## ## ## ##	粒子発生:t=0~600[s]			
解析時間 t	発生停止:t=600~1, 200[s]			

人体表面温度:30[℃] 口:0.02×0.02[m]

呼出

呼出温度:35[℃]

呼気風速:1.0[m/s]^{文2)}

飛沫

飛沫粒径:①100[µm]

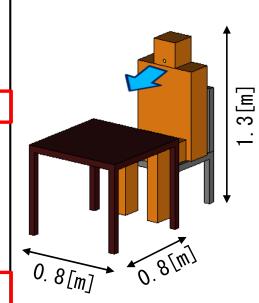
 $210[\mu m]$

飛沫物性:水

反発係数:1.0%3

発生数:100個

発生間隔:10[s]



- 文 2) 村上ら「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、2001年
- ※3 換気による飛沫の排出率を算出する為、壁面に付着することで飛沫が空気から減少する ことが無いように、壁面に到達した飛沫は跳ね返るよう設定している。





粒径が100[µm]と、10[µm]の飛沫を呼気中に発生させる。

表 2 解析方法

乱流モデル	標準k-εモデル			
解析領域	3.0[m] × 3.0[m] × 3.0[m]			
	表面境界	床	壁面対数則	
境界条件		モデル面		
	輻射境界	輻射	輻射率0.9	
雰囲気温度	20[°C]			
	粒子発生:t=0~600[s]			
解析時間 t 	発生停止:t=600~1, 200[s]			

人体表面温度:30[℃]

 $\Box : 0.02 \times 0.02 [m]$

呼出

呼出温度:35[℃]

呼気風速:1.0[m/s]^{文2)}

飛沫

飛沫粒径:①100[µm]

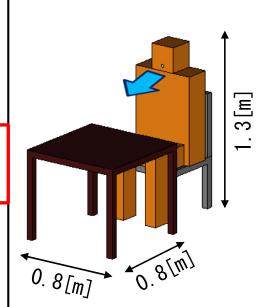
210[µm]

飛沫物性:水

反発係数:1.0%3

発生数:100個

発生間隔:10[s]



- 文2) 村上ら「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、2001年
- ※3 換気による飛沫の排出率を算出する為、壁面に付着することで飛沫が空気から減少する ことが無いように、壁面に到達した飛沫は跳ね返るよう設定している。





粒径が100[µm]の飛沫は感染者から呼出された後すぐに沈降する為無視し、粒径10[µm]の飛沫のみ濃度の算出を行う。

表 2 解析方法

乱流モデル	標準k-εモデル			
解析領域	$3.0[m] \times 3.0[m] \times 3.0[m]$			
	表面境界	床	壁面対数則	
境界条件		モデル面		
	輻射境界	輻射	————— 率0. 9	
雰囲気温度	20[°C]			
#71 - 1	粒子発生:t=0~600[s]			
解析時間 t	発生停止:t=600~1, 200[s]			
·				

人体表面温度:30[°C]

 \Box : 0. 02 × 0. 02 [m]

呼出

呼出温度:35[℃]

呼気風速:1.0[m/s]^{文2)}

飛沫

飛沫粒径:①100[µm]

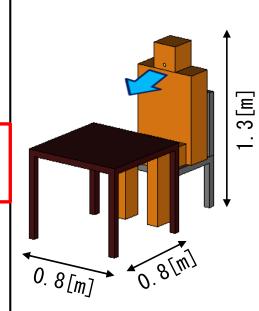
 $210[\mu m]$

飛沫物性:水

反発係数:1.0%3

発生数 : 100個

発生間隔:10[s]



- 文2) 村上ら「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、2001年
- ※3 換気による飛沫の排出率を算出する為、壁面に付着することで飛沫が空気から減少する ことが無いように、壁面に到達した飛沫は跳ね返るよう設定している。





飛沫の物性は水とし、壁表面における反発係数は1.0^{×3}とする。

表 2 解析方法

乱流モデル	標準k-εモデル			
解析領域	3.0[m] × 3.0[m] × 3.0[m]			
	表面境界	床	壁面対数則	
境界条件		モデル面		
	輻射境界	輻射	———— 率0. 9	
雰囲気温度	20[°C]			
#77 1C n+ 88	粒子発生:t=0~600[s]			
解析時間 t	発生停止:t=600~1, 200[s]			

人体表面温度:30[℃] 口:0.02×0.02[m]

呼出

呼出温度:35[℃]

呼気風速: 1.0[m/s]^{文2)}

飛沫

飛沫粒径:①100[µm]

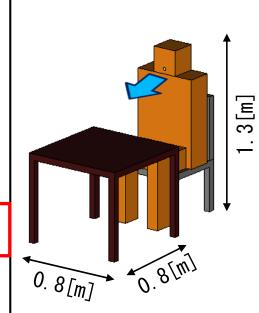
 $210[\mu m]$

飛沫物性:水

反発係数:1.0%3

発生数 : 100個

発生間隔:10[s]



- 文2) 村上ら「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、2001年
- ※3 換気による飛沫の排出率を算出する為、壁面に付着することで飛沫が空気から減少する ことが無いように、壁面に到達した飛沫は跳ね返るよう設定している。





最初のt=0~600[s]の間は飛沫を10[s]毎に100個発生させ、 t=600~1,200[s]の間は発生を停止し、飛沫の減衰の解析 を行う。

表 2 解析方法

乱流モデル 標準k-εモデル			
·			
解析領域 3.0[m]×3.0[m]×3.0[m]	3.0[m] × 3.0[m] × 3.0[m]		
床 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	壁面対数則		
表面境界 世面対数 世面対数 現界条件 まずル面 まずル面 まずれる まずれる			
輻射境界 輻射率0.9			
雰囲気温度 20[℃]			
粒子発生:t=0~600[s]	粒子発生:t=0~600[s]		
解析時間 t 発生停止:t=600~1, 200[s]	発生停止:t=600~1, 200[s]		

人体表面温度:30[℃] 口:0.02×0.02[m]

呼出

呼出温度:35[℃]

呼気風速:1.0[m/s]^{文2)}

飛沫

飛沫粒径:①100[µm]

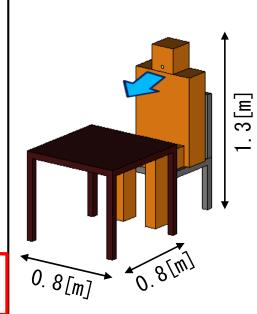
210[µm]

飛沫物性:水

反発係数:1.0%3

発生数 : 100個

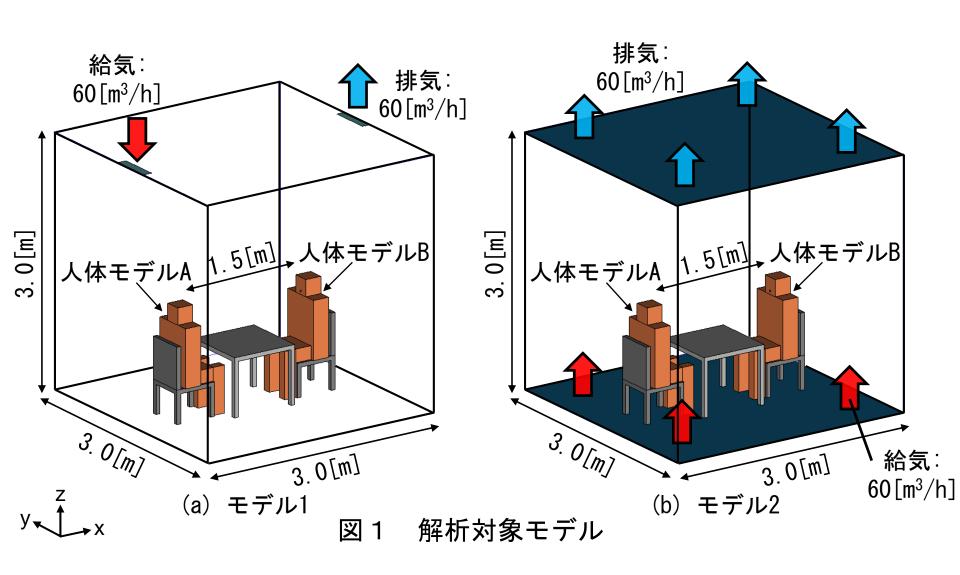
発生間隔:10[s]



- 文2) 村上ら「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、2001年
- ※3 換気による飛沫の排出率を算出する為、壁面に付着することで飛沫が空気から減少する ことが無いように、壁面に到達した飛沫は跳ね返るよう設定している。



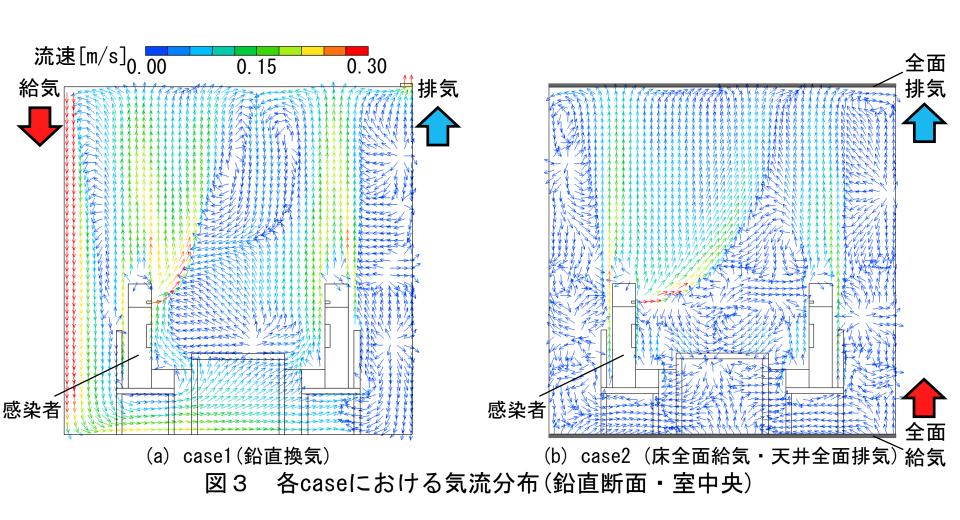




.

気流分布(case1、2)



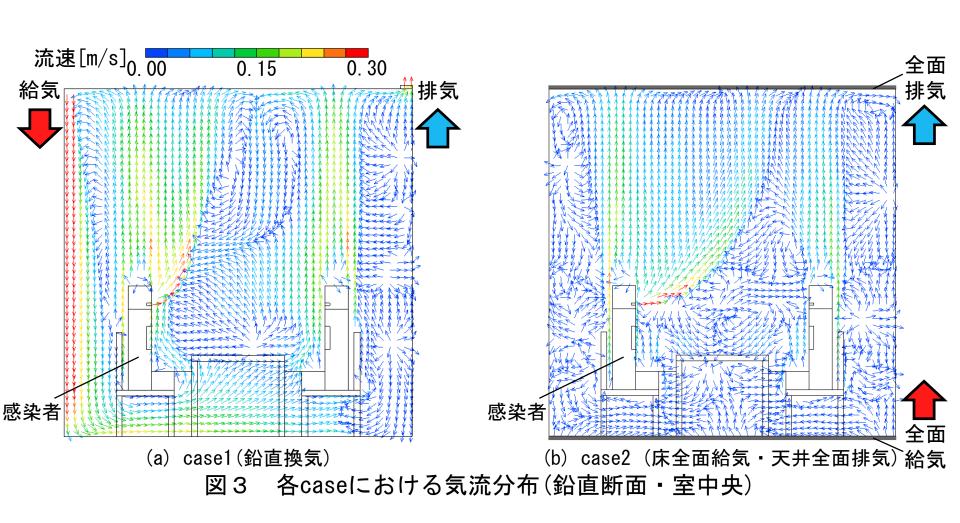




気流分布(case1、2)

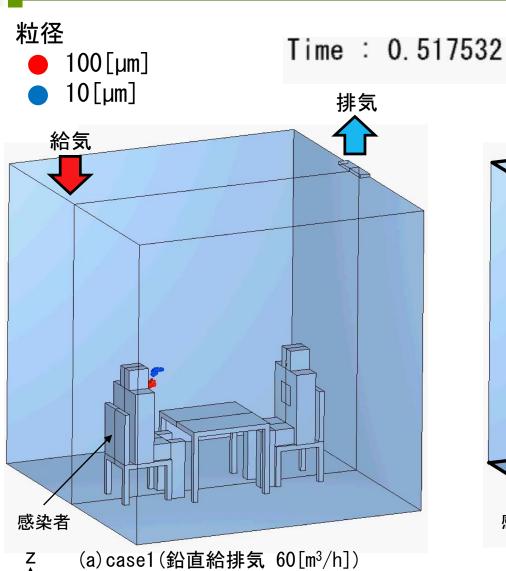


人体の体温や床の吹出気流により上昇気流が生じる。



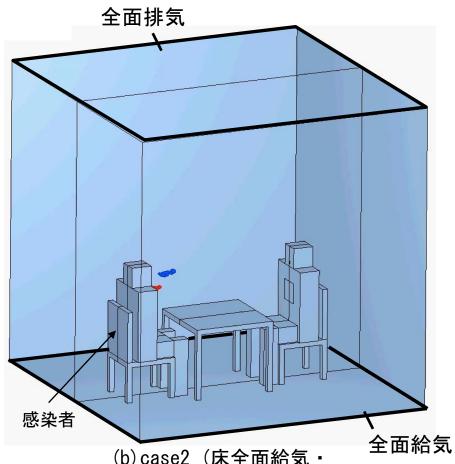






| 粒子発生:t=0~600[s]

発生停止: t=600~1, 200[s]



(b) case2 (床全面給気・ 天井全面排気 60 [m³/h])

動画 室内空間の飛沫の拡散状況(0~400[s])





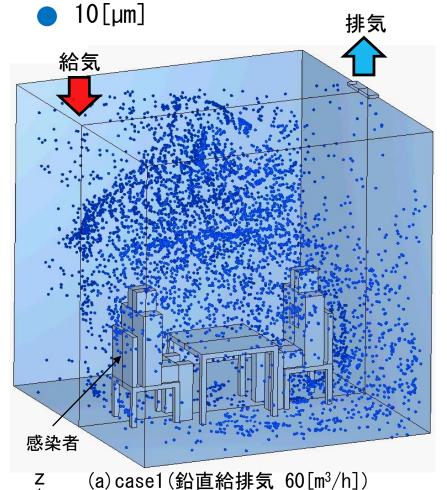


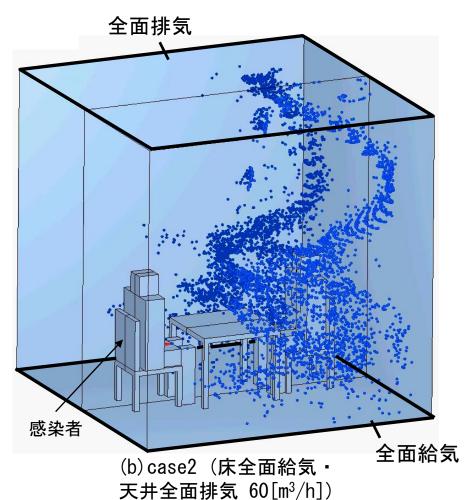
100 [μm]

Time: 600.014893

粒子発生: t=0~600[s]

発生停止: t=600~1, 200[s]

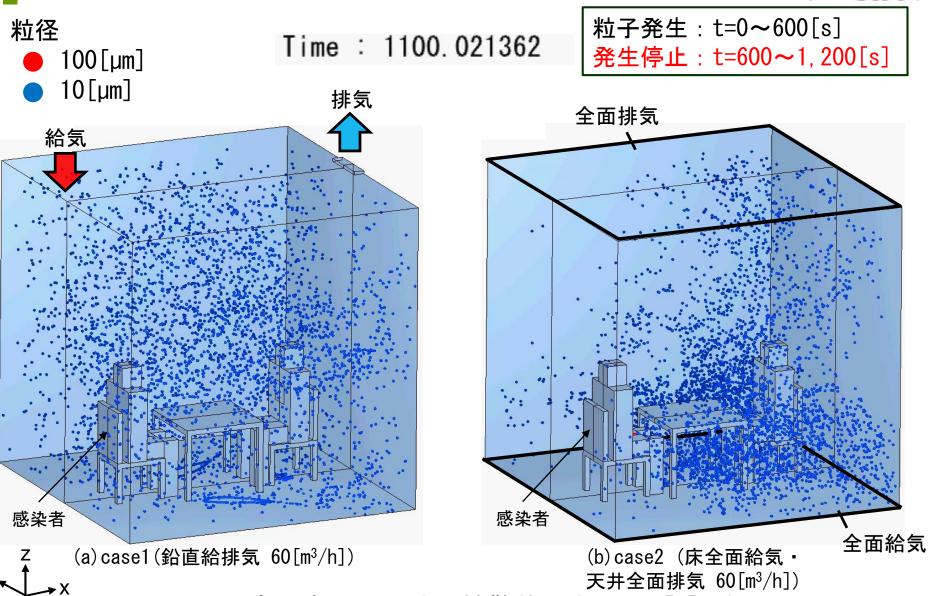




動画 室内空間の飛沫の拡散状況(600[s]~)





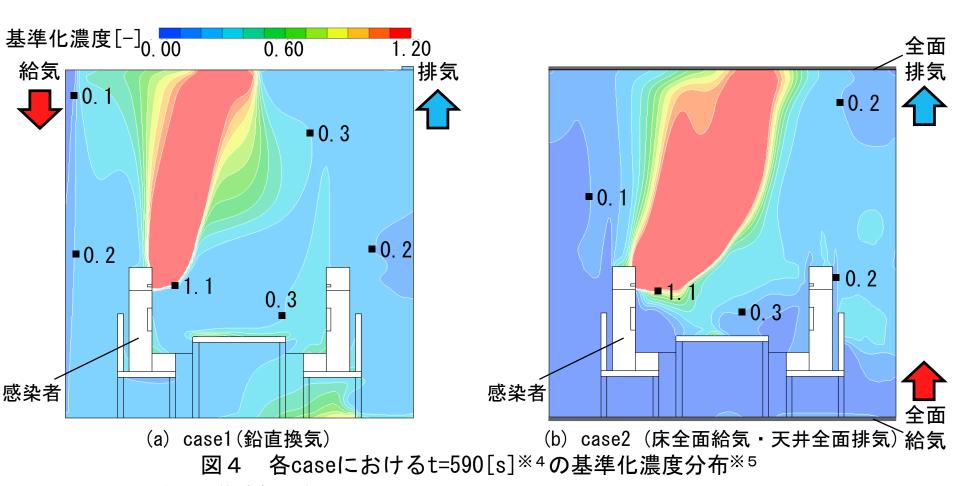


動画 室内空間の飛沫の拡散状況(1,100 [s]~)

7

基準化濃度分布(case1、2)





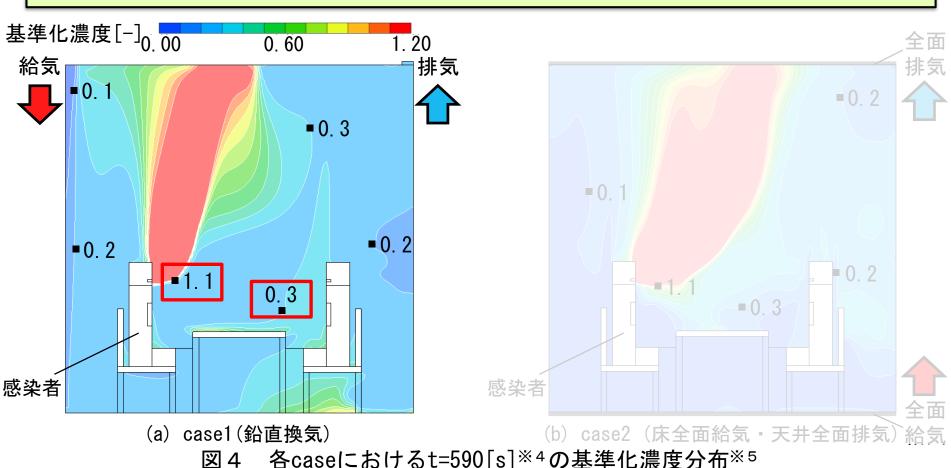
- ※4 飛沫発生の最終時刻とする。
- ※5 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m²/h])で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサ濃度は 基準濃度で除すことで、基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0 となる時、完全拡散濃度となる。



基準化濃度分布(case1)



基準化濃度は、人体の呼出上部で1.0以上と高く、人体周辺で 0.3程度となる。



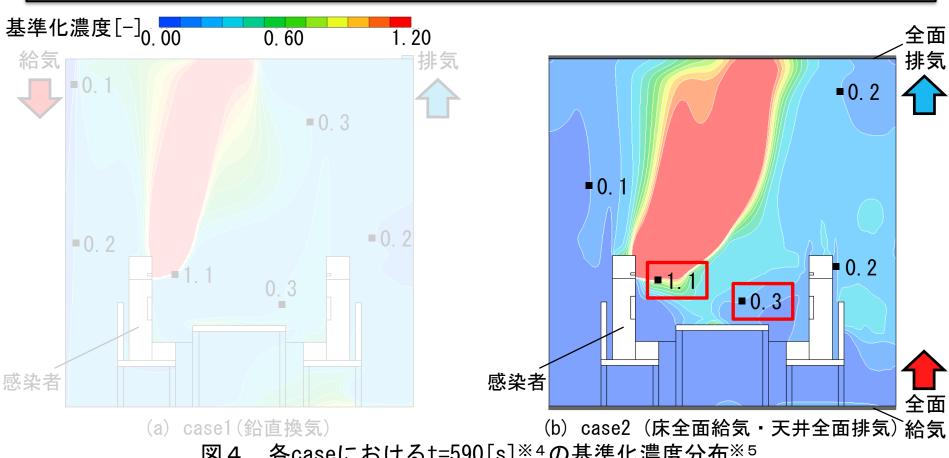
- ※4 飛沫発生の最終時刻とする。
- ※5 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m²/h])で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサ濃度は 基準濃度で除すことで、基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0 となる時、完全拡散濃度となる。



基準化濃度分布(case2)



基準化濃度が1.0以上の部分が他のcaseに比較して大きく、非感 染者上部まで広がるが、人体周辺では0.3程度となる。

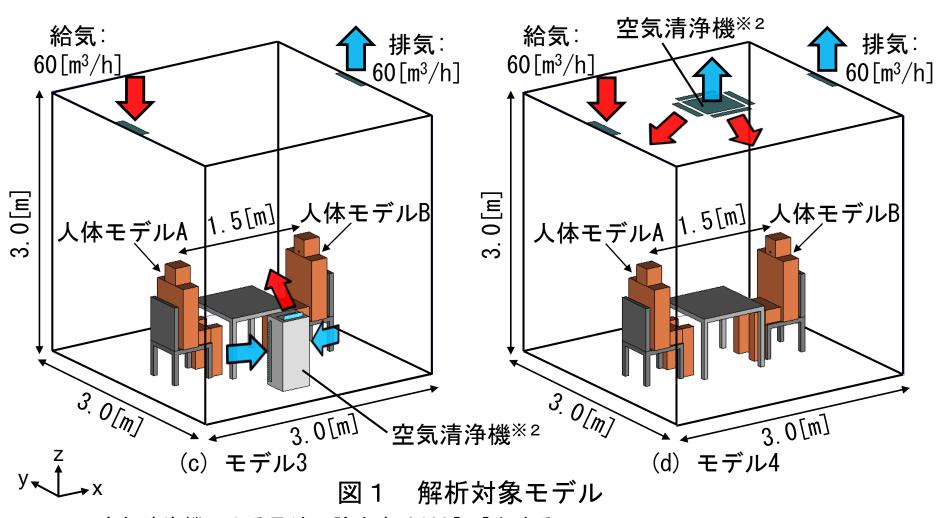


- 各caseにおけるt=590[s]*4の基準化濃度分布*5
- 飛沫発生の最終時刻とする。 $\times 4$
- 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m³/h])で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサ濃度は × 5 基準濃度で除すことで、基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0となる時、完全拡散濃度となる。

.

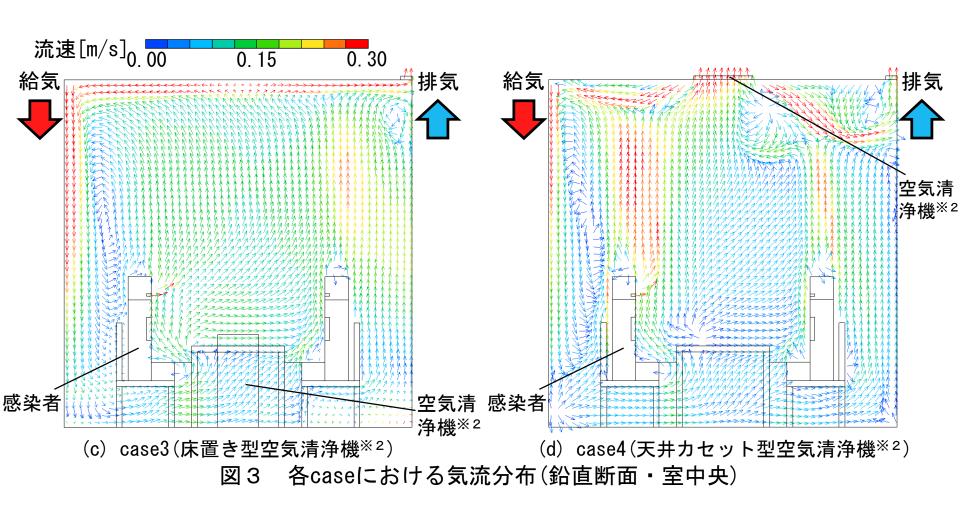
解析結果(case3、4)





気流分布(case3、4)



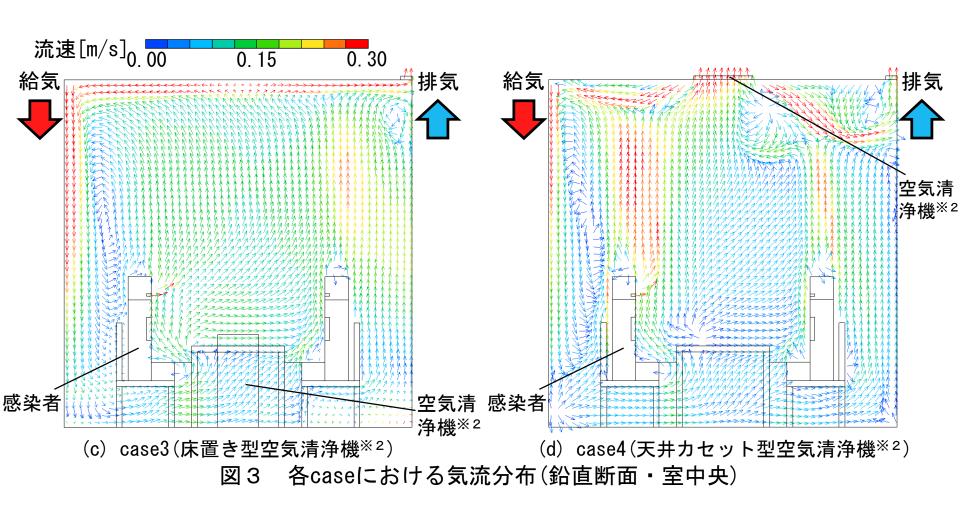




気流分布(case3、4)



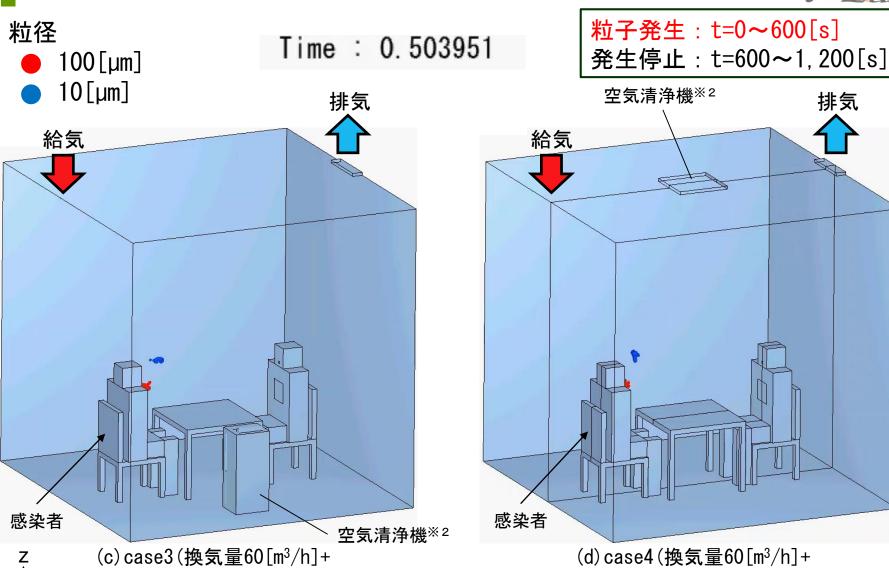
人体の体温による上昇気流や空気清浄機による吹出気流が生じる。



.

解析結果(case3、4)





動画 室内空間の飛沫の拡散状況(0~400[s])

天井カセット型空気清浄機300[m³/h])

※2 空気清浄機による飛沫の除去率は100[%]とする。

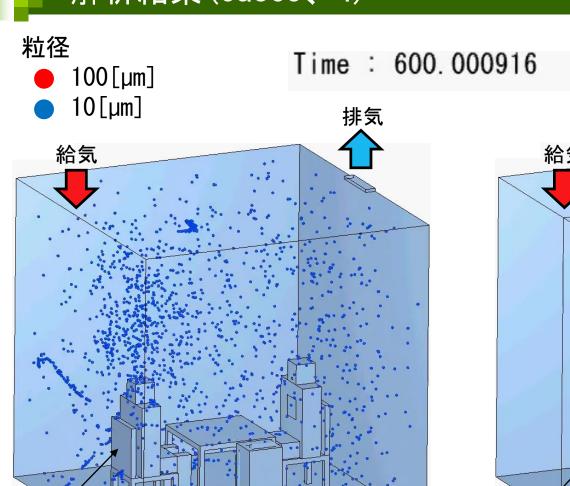
x 床置き型空気清浄機300[m³/h])

.

感染者

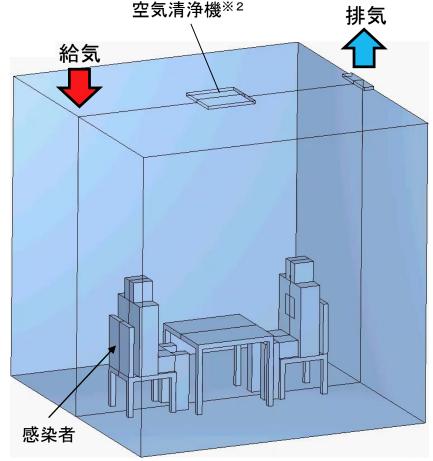
解析結果(case3、4)





粒子発生: t=0~600[s]

発生停止: t=600~1, 200[s]



(d) case4 (換気量60 [m³/h]+ 天井カセット型空気清浄機300 [m³/h])

動画 室内空間の飛沫の拡散状況(600[s]~)

空気清浄機※2

※2 空気清浄機による飛沫の除去率は100[%]とする。

(c) case3 (換気量60 [m³/h]+ 床置き型空気清浄機300 [m³/h])



解析結果(case3、4)



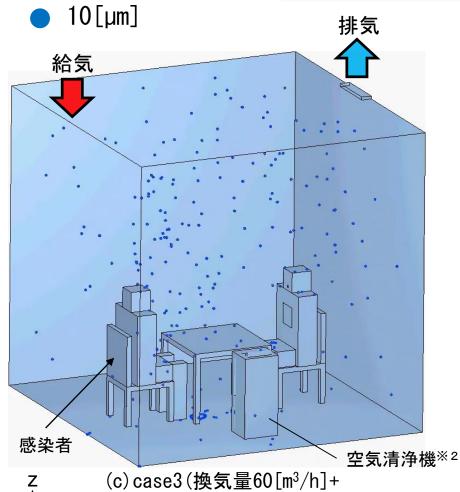


 $100[\mu m]$

Time: 1099.500366

粒子発生: t=0~600[s]

発生停止: t=600~1, 200[s]



床置き型空気清浄機300[m³/h])

空気清浄機※2 排気 給気 感染者

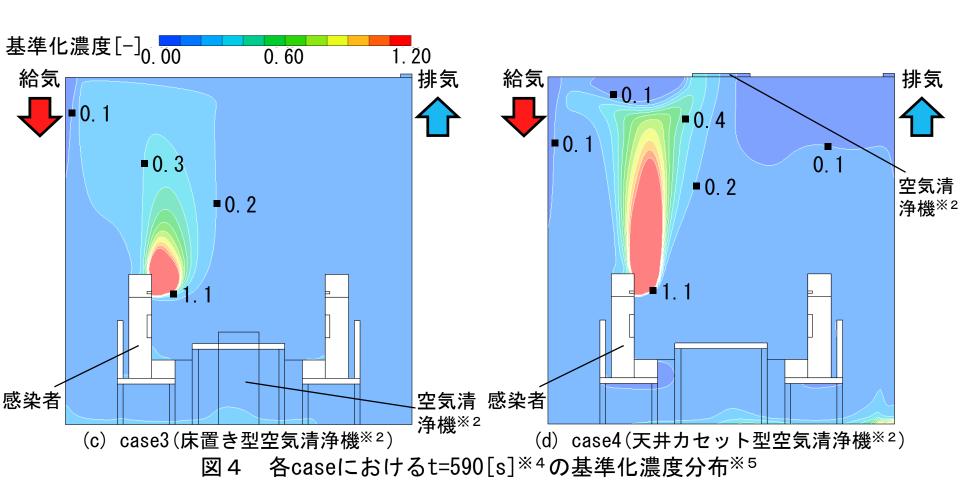
(d) case4 (換気量60 [m³/h]+ 天井カセット型空気清浄機300 [m³/h])

動画 室内空間の飛沫の拡散状況(1,100[s]~)

.

基準化濃度分布(case3、4)





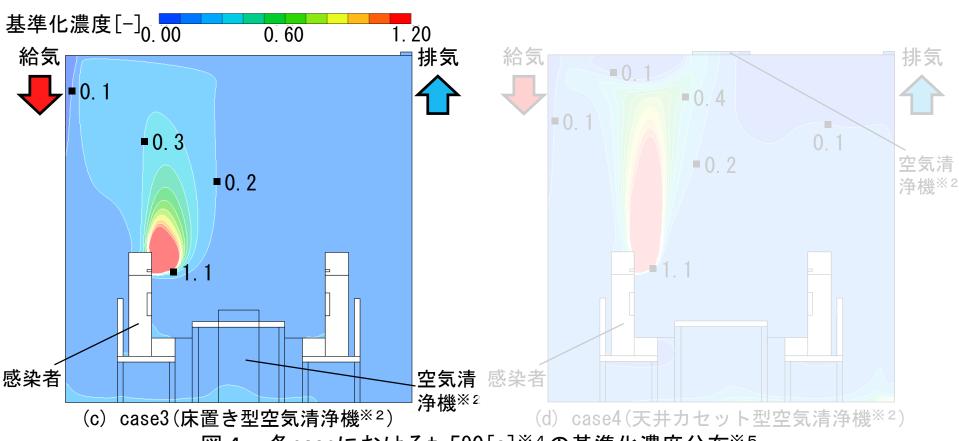
- ※2 空気清浄機による飛沫の除去率は100[%]とする。
- ※4 飛沫発生の最終時刻とする。
- ※5 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m²/h])で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサ濃度は 基準濃度で除すことで、基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0 となる時、完全拡散濃度となる。



基準化濃度分布(case3)



基準化濃度は、非感染者の人体周辺では0.1程度と低くなる。



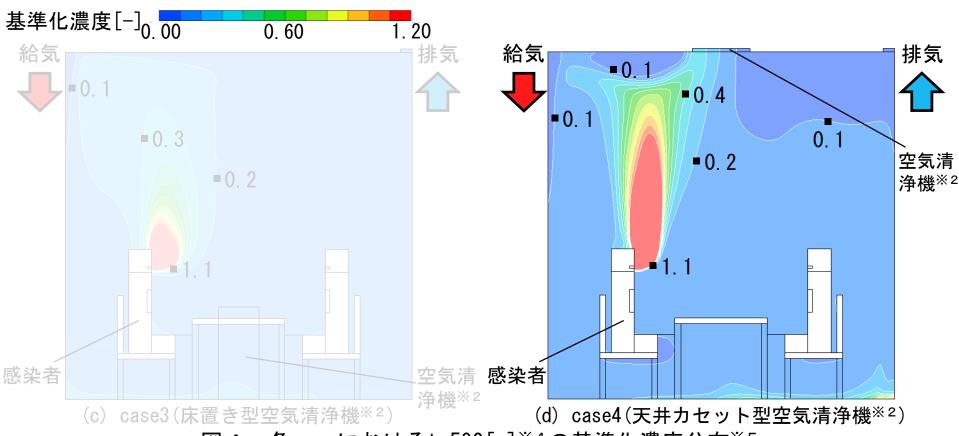
- 図4 各caseにおけるt=590[s]^{※4}の基準化濃度分布^{※5}
- ※2 空気清浄機による飛沫の除去率は100[%]とする。
- ※4 飛沫発生の最終時刻とする。
- ※5 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m²/h])で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサ濃度は 基準濃度で除すことで、基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0 となる時、完全拡散濃度となる。



基準化濃度分布(case4)



基準化濃度は人体周辺で0.1以下と極めて良好である。



- 図4 各caseにおけるt=590[s]^{※4}の基準化濃度分布^{※5}
- ※2 空気清浄機による飛沫の除去率は100[%]とする。
- ※4 飛沫発生の最終時刻とする。
- ※5 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m²/h])で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサ濃度は 基準濃度で除すことで、基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0 となる時、完全拡散濃度となる。





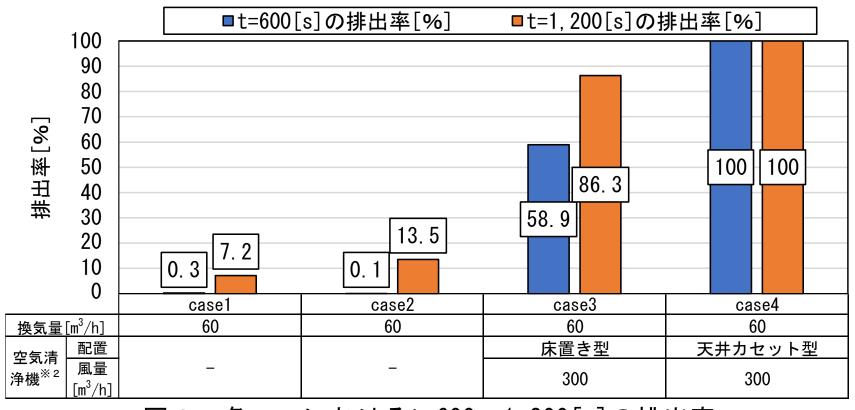


図 6 各caseにおけるt=600、1,200[s]の排出率



換気量を60[m³/h]としたcase1、case2の排出率は、t=600[s]で1.0[%]以下、t=1,200[s]で10[%]前後と極めて低い。

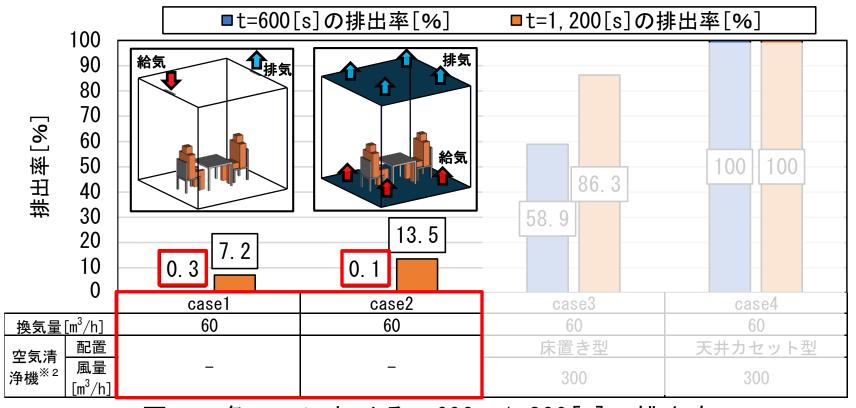


図6 各caseにおけるt=600、1,200[s]の排出率



換気量を60[m³/h]としたcase1、case2の排出率は、t=600[s]で1.0[%]以下、t=1,200[s]で10[%]前後と極めて低い。

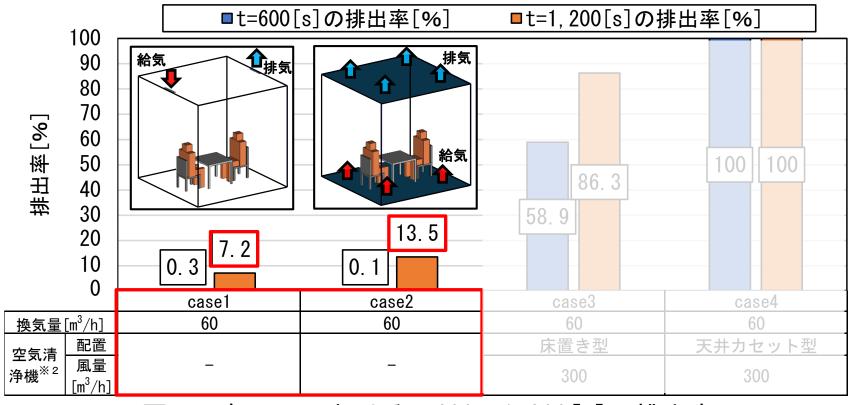


図 6 各caseにおけるt=600、1,200[s]の排出率



換気量が60[m³/h]での飛沫の排出率は極めて低く、換気方式による差は殆ど見られない。

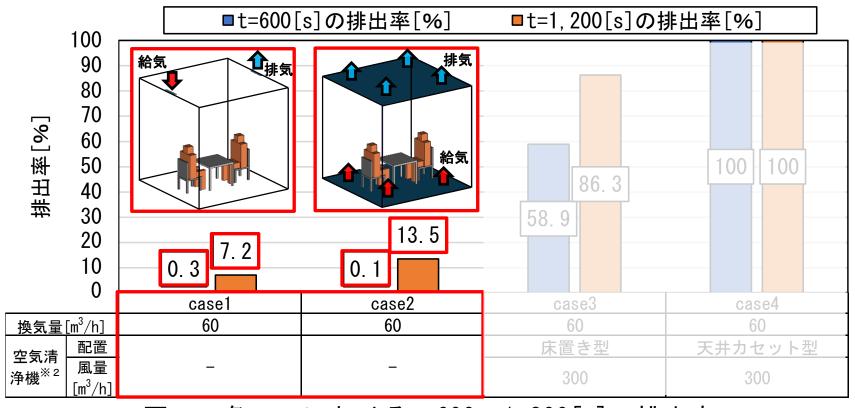


図 6 各caseにおけるt=600、1,200[s]の排出率



case3、4は換気量+空気清浄機の風量は360[m³/h]と等しいが 床置き型の空気清浄機を設置したcase3の排出率は、t=600[s] で58.9[%]、天井カセット型を設置したcase4の排出率は、 t=600[s]で100[%]と極めて良好な値となる。

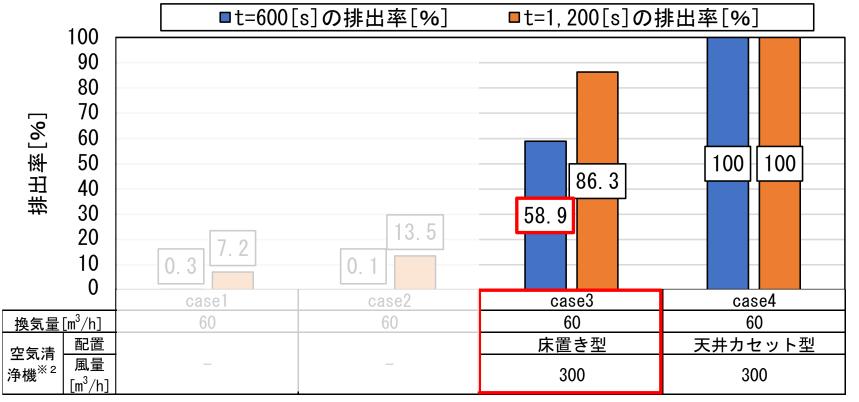


図 6 各caseにおけるt=600、1,200[s]の排出率



case3、4は換気量+空気清浄機の風量は360[m³/h]と等しいが 床置き型の空気清浄機を設置したcase3の排出率は、t=600[s] で58.9[%]、天井カセット型を設置したcase4の排出率は、 t=600[s]で100[%]と極めて良好な値となる。

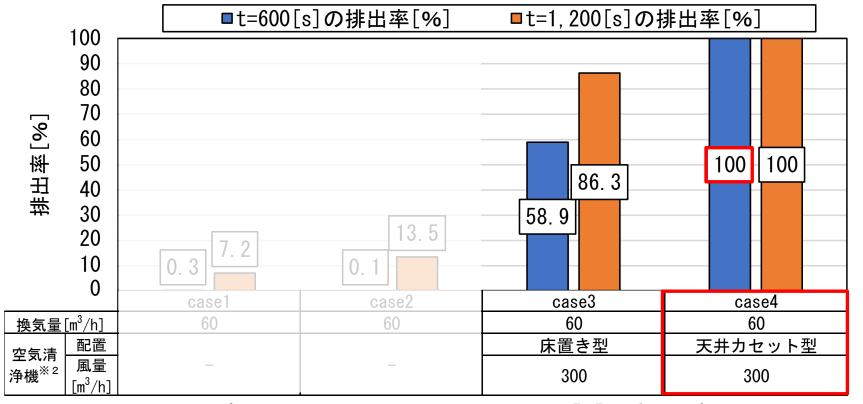


図 6 各caseにおけるt=600、1,200[s]の排出率



特に冬季は換気を行うと室温が低下する為、空気清浄機の使用が有効である。

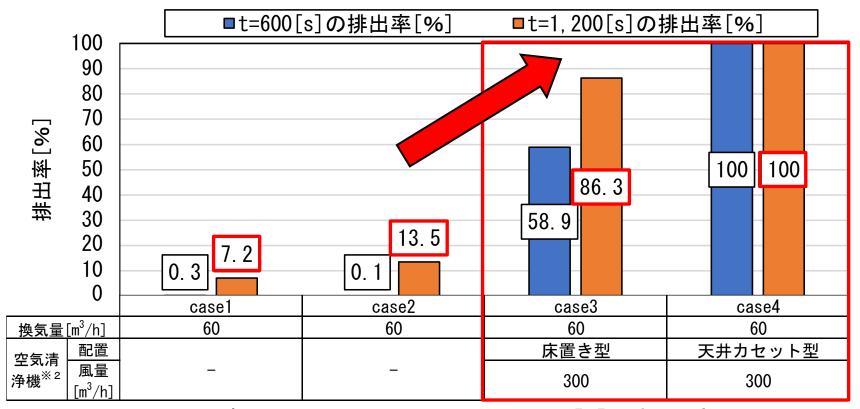


図 6 各caseにおけるt=600、1,200[s]の排出率

まとめ



- ①粒径が10[µm]の飛沫は、呼出された後、人体周辺の上昇気流により天井付近へ流れ、室全体に拡散する。
- ②換気量を60[m³/h]としたcase1、case2の排出率は、t=600[s]で1.0[%]以下、t=1,200[s]で10[%]前後と極めて低い。 換気量が60[m³/h]での飛沫の排出率は極めて低く、換気方式による差は殆ど見られない。
- ③case3、4は換気量+空気清浄機の風量は360[m³/h]と等しいが、 床置き型の空気清浄機を設置したcase3の排出率は、t=600[s] で58.9[%]、天井カセット型を設置したcase4の排出率は、 t=600[s]で100[%]と極めて良好な値となる。特に冬季は換気 を行うと室温が低下する為、空気清浄機の使用が有効である。





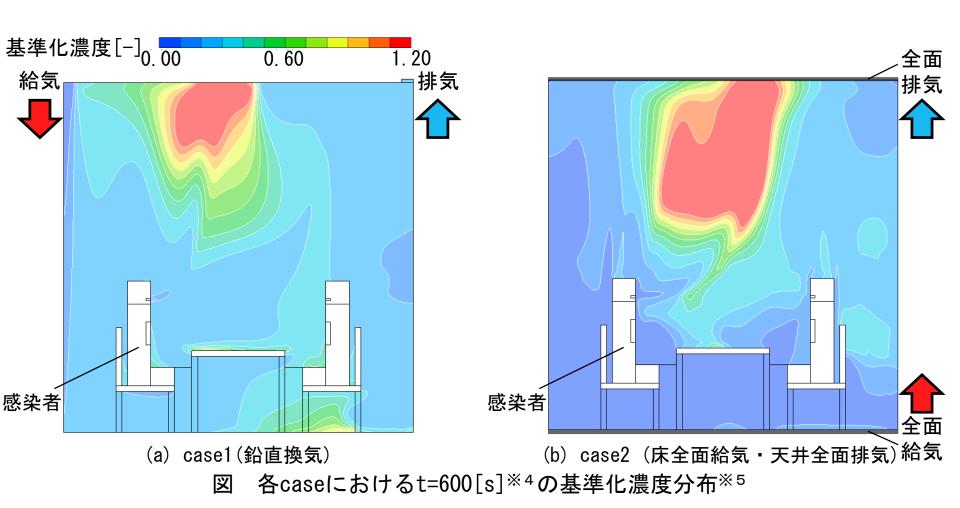
数值流体解析(CFD)



数値流体解析(CFD)により、流体の流れや熱の伝わり方の様子を解析することができる。全ての乱流渦をモデルにより表現し解析する手法をレイノルズ平均モデル(RANS)といい、本報で用いている手法である。

解析結果

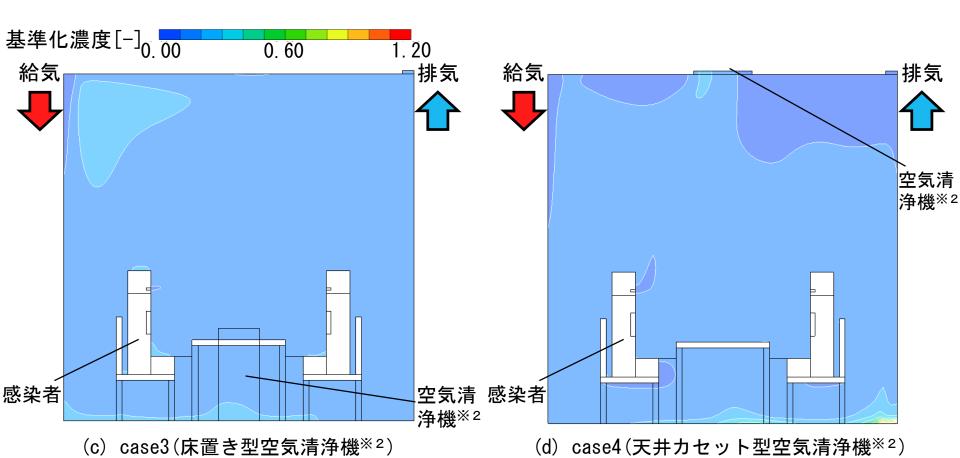




- ※4 飛沫発生の最終時刻とする。
- ※5 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m³/h])で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサ濃度は 基準濃度で除すことで、基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0 となる時、完全拡散濃度となる。

解析結果

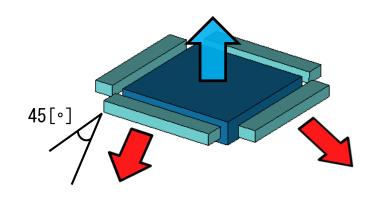




- 図 各caseにおけるt=600[s]^{※4}の基準化濃度分布^{※5}
- ※2 空気清浄機による飛沫の除去率は100[%]とする。
- ※4 飛沫発生の最終時刻とする。
- ※5 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m³/h])で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサ濃度は 基準濃度で除すことで、基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0 となる時、完全拡散濃度となる。







○空気清浄機モデルの概要

• 吹出口風量:

 $300 [m^3/h] (150 [mm] \times 250 [mm])$

• 吹出風速: 2.22[m/s]

・吹出風向:水平から75°

• 吸込口風量: 150[m³/h] × 2

図 天井カセット型空気清浄機





・積算発生量:その時刻までに感染者から発生した飛沫(t=600[s]間の総発生量は6,000)

・残留量:その時刻までに室内に残留している飛沫

・排出率[%] : その時刻までに発生した飛沫のうち排出された飛沫の割合

・残留率[%] : その時刻までに発生した飛沫のうち室内に残留している飛沫の割合

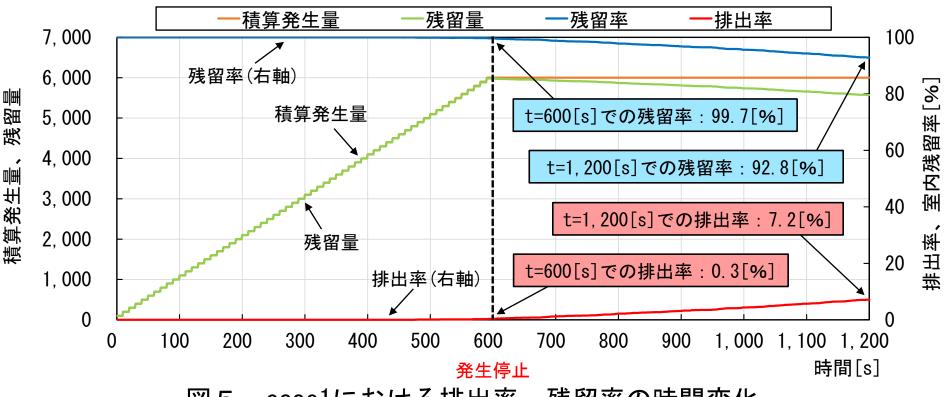


図5 case1における排出率・残留率の時間変化