

住宅における 換気・空気清浄に関する研究

天吊型空気清浄機による汚染質除去に関する研究

指導教員 有波 裕貴 助教
岡田 真生



研究目的

研究目的

住宅の高気密化に伴い、居室で発生する臭いや油煙などの汚染物質が室内に滞留し、室内環境に及ぼす影響が懸念される。

一般に居室で発生した汚染物質は、住宅全体を換気経路とする全般換気によって室内に拡散される。

拡散した汚染物質は居住者の快適性に影響を及ぼす可能性があるため、汚染物質は拡散する前に速やかに除去することが望ましい。

居室で発生する汚染物質の除去には局所排気が有効であると考えられる。

研究目的

本研究では、ダイニングの卓上での調理に伴って発生する汚染質（油煙）除去のため、天吊型空気清浄機※¹を用いた場合の室内の汚染質濃度の測定を行う。

レンジフードを用いた場合の濃度の解析結果と比較することで、ダイニングでの卓上調理に対する汚染質除去方法の検討することを目的とする。



写真 天吊型空気清浄機

※¹ 油捕集効率約95[%]

研究目的

更に、CFD ※²解析 (RANS※³) を用いて対象空間をモデル化し、汚染質濃度の解析を行う。

実験結果と比較することでCFD解析による実験結果の予測可能性を検討する。

※² 数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics)

※³ レイノルズ平均モデル (Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulations) を用いて解析する手法

研究概要

実験概要

対象空間は4,500 [mm] (幅) × 2,700 [mm] (奥行) × 2,400 [mm] (高さ)の住宅用厨房とする。

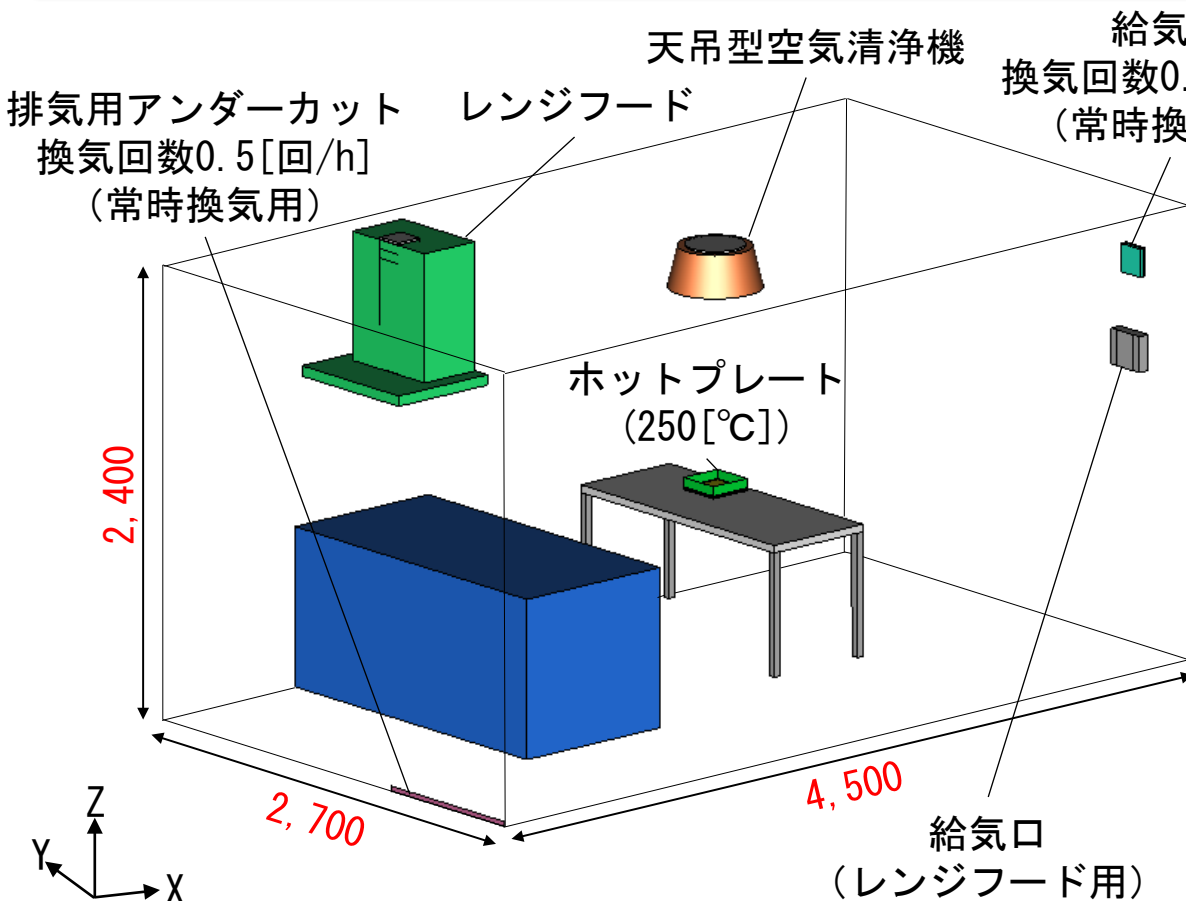
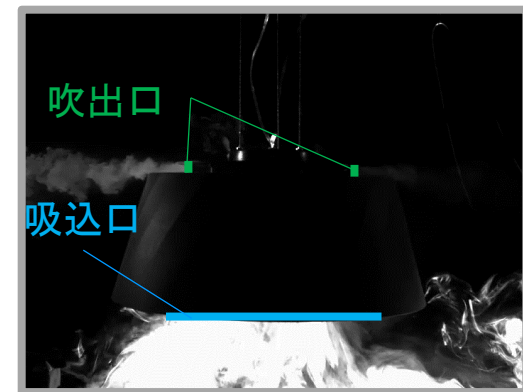


図2 天吊型空気清浄機の断面



動画 吸込・吹出気流性状の可視化

図1 実験及びCFD解析対象空間の概要

実験概要

常時換気は給気口（壁面）と排気口（アンダーカット）を設置して行う。

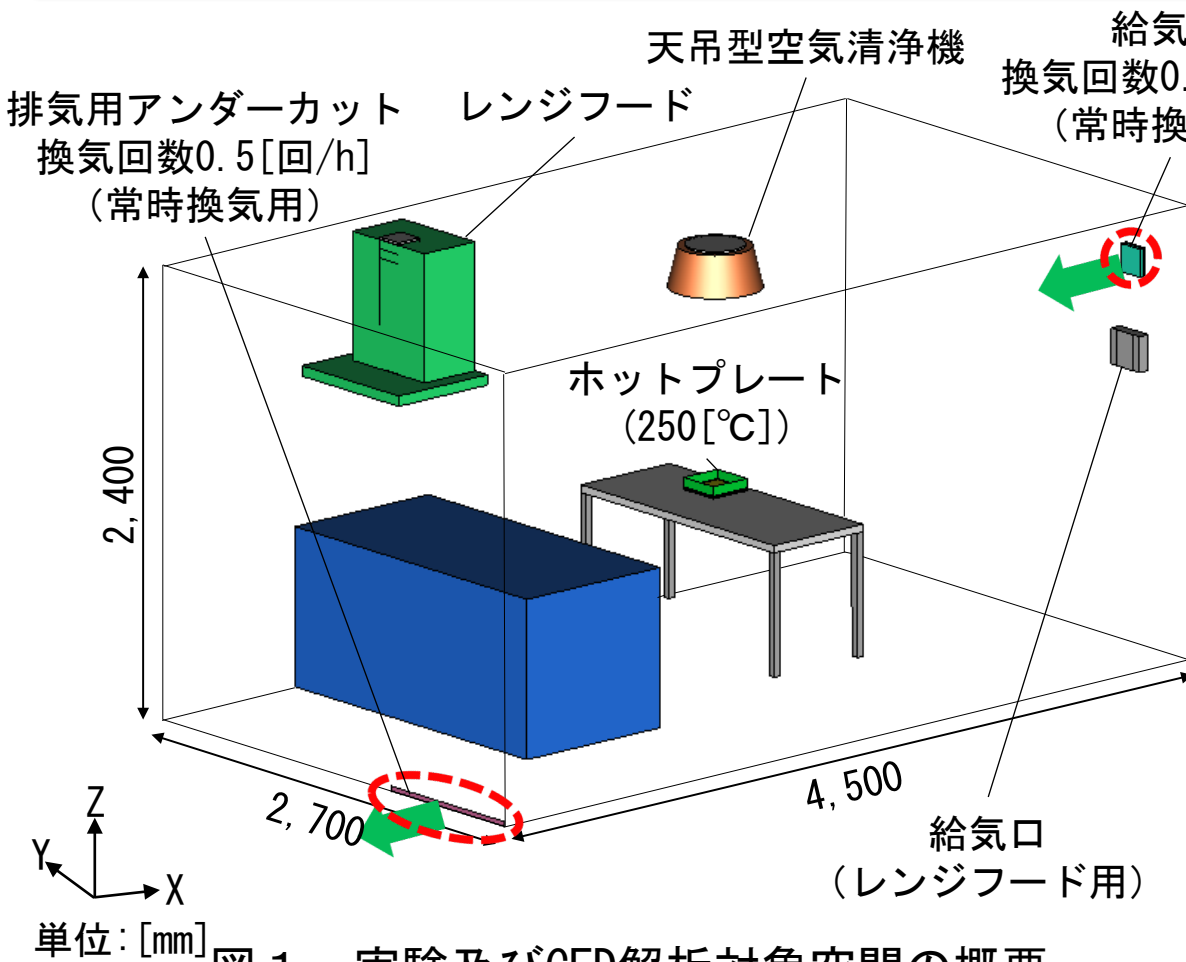
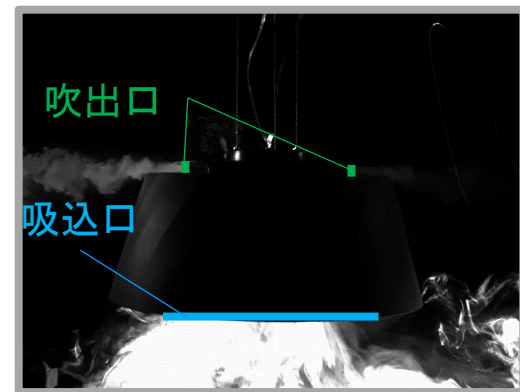
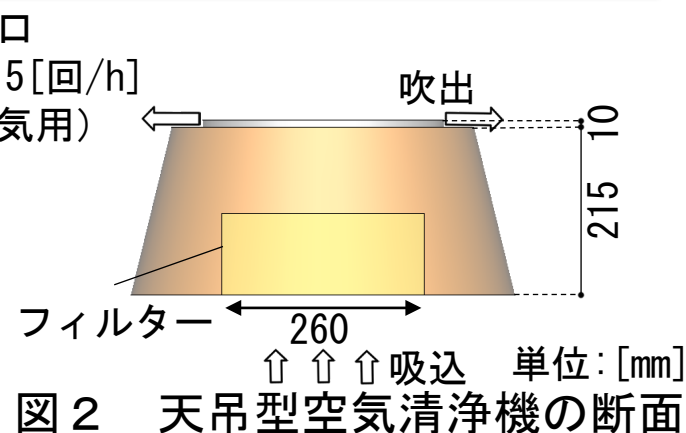


図1 実験及びCFD解析対象空間の概要



動画 吸込・吹出気流性状の可視化

実験概要

汚染質の除去装置としてレンジフードと天吊型空気清浄機を用いる。

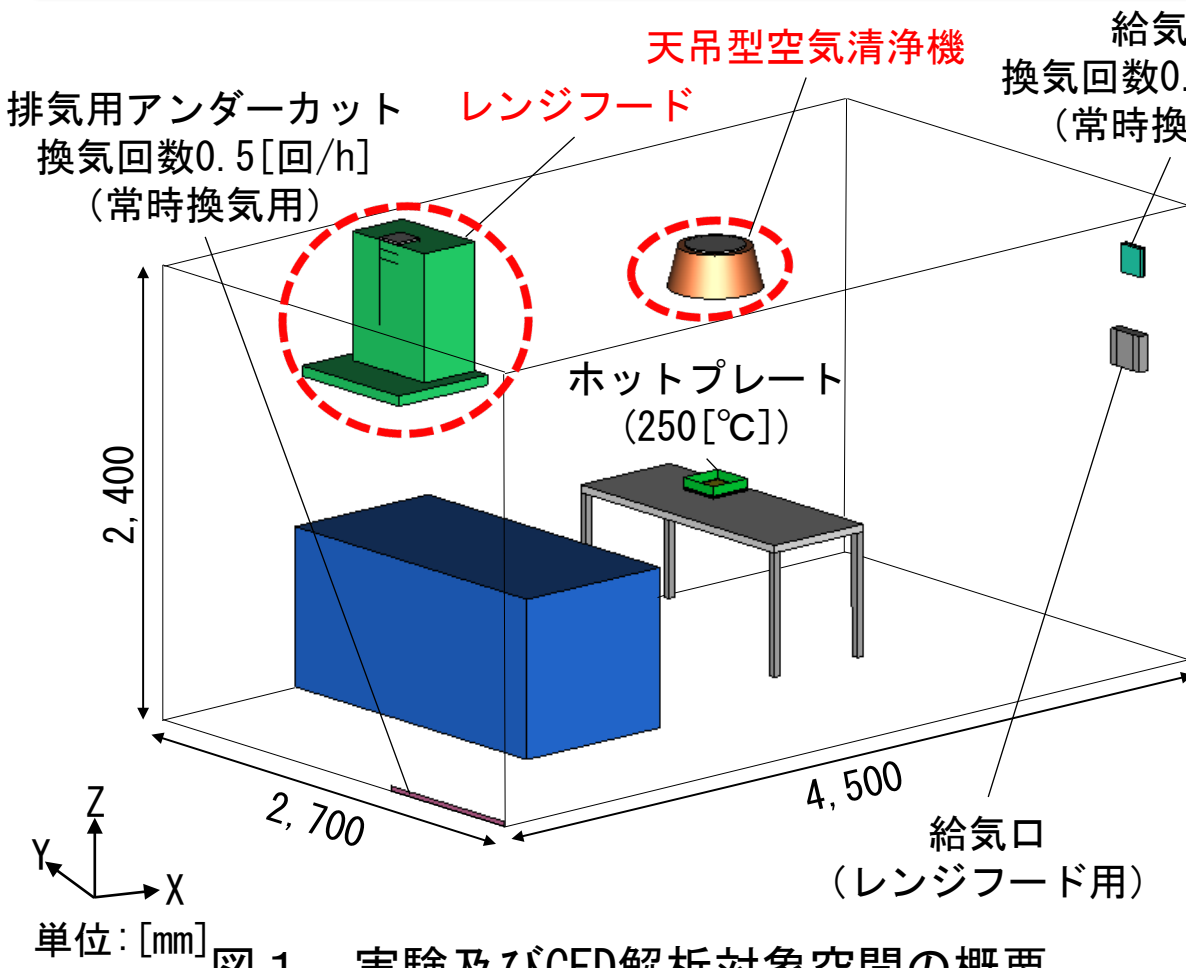


図1 実験及びCFD解析対象空間の概要

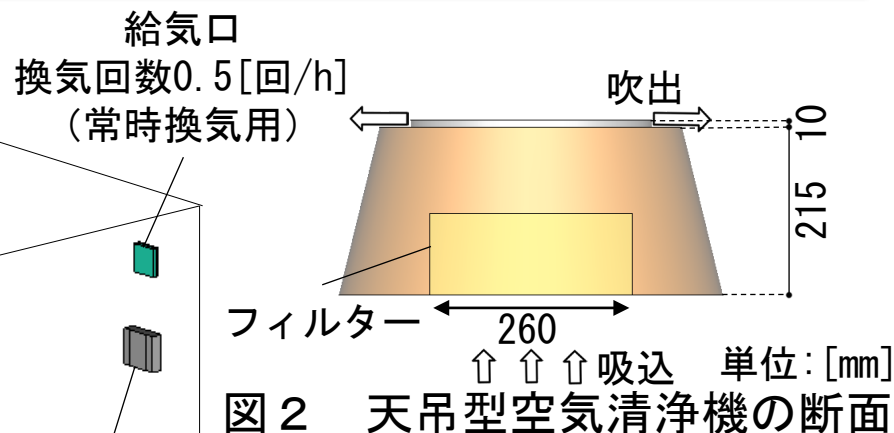
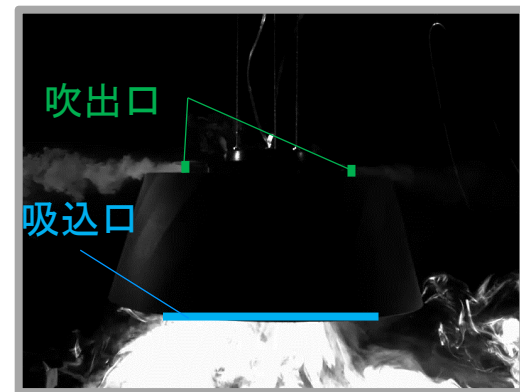


図2 天吊型空気清浄機の断面



動画 吸込・吹出気流性状の可視化

実験概要

天吊型空気清浄機は底面から吸い込み、上側の側面から放射状に吹き出す。

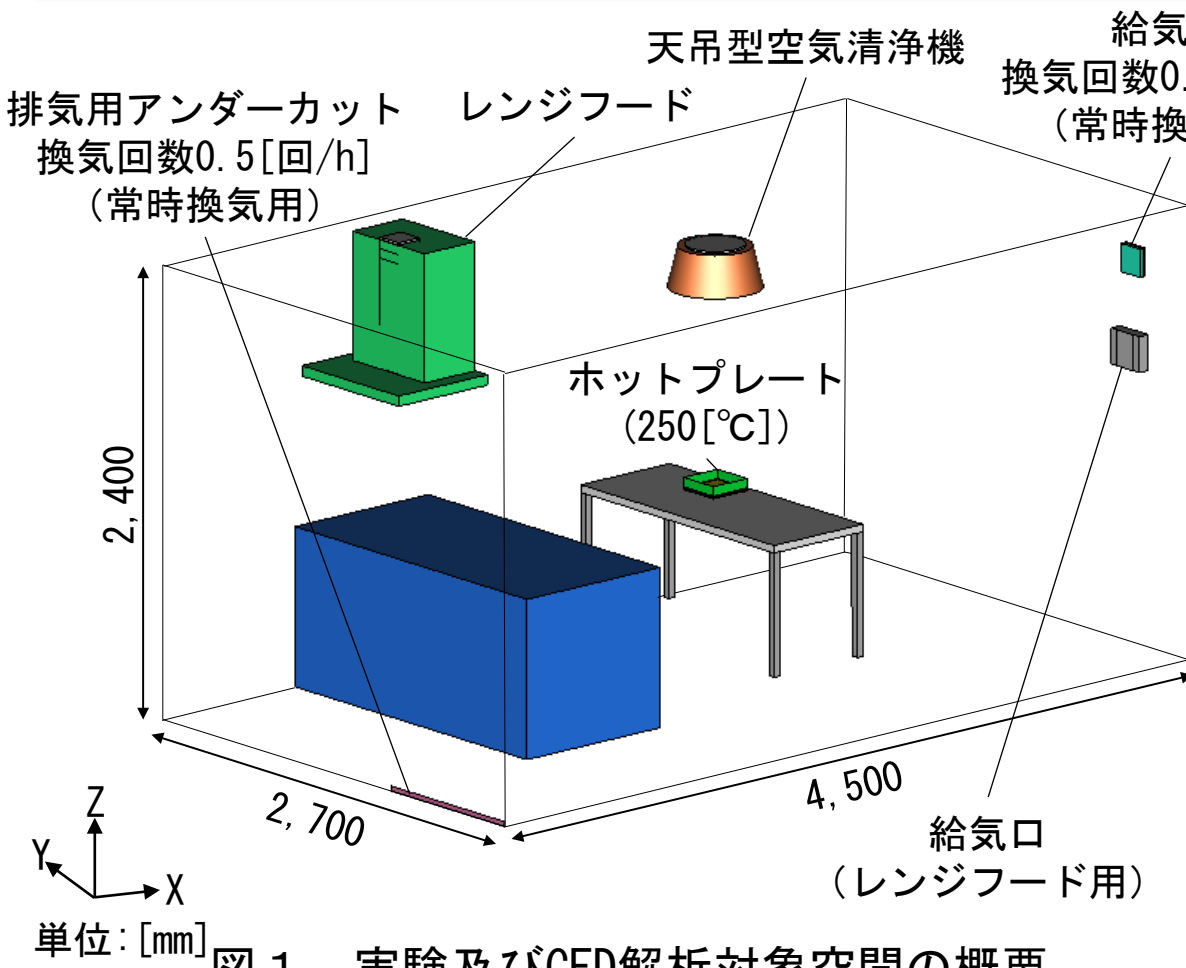


図1 実験及びCFD解析対象空間の概要

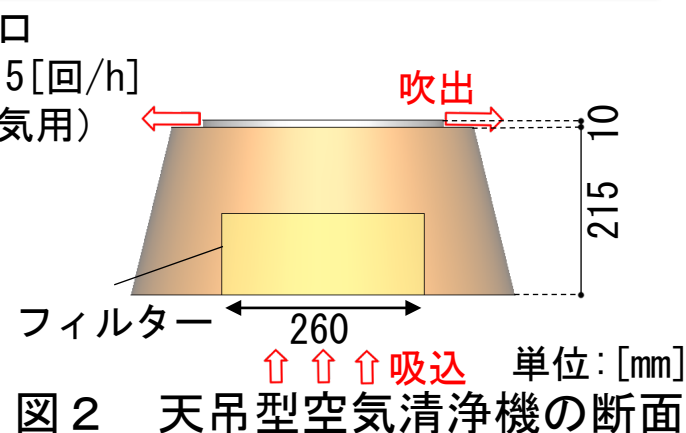
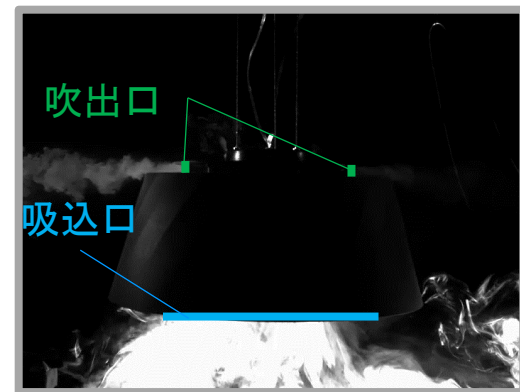


図2 天吊型空気清浄機の断面



動画 吸込・吹出気流性状の可視化

実験概要

汚染質（油煙）は250[°C]に加熱したホットプレートに定流量ポンプから水及び油を同時に滴下することで発生させる。

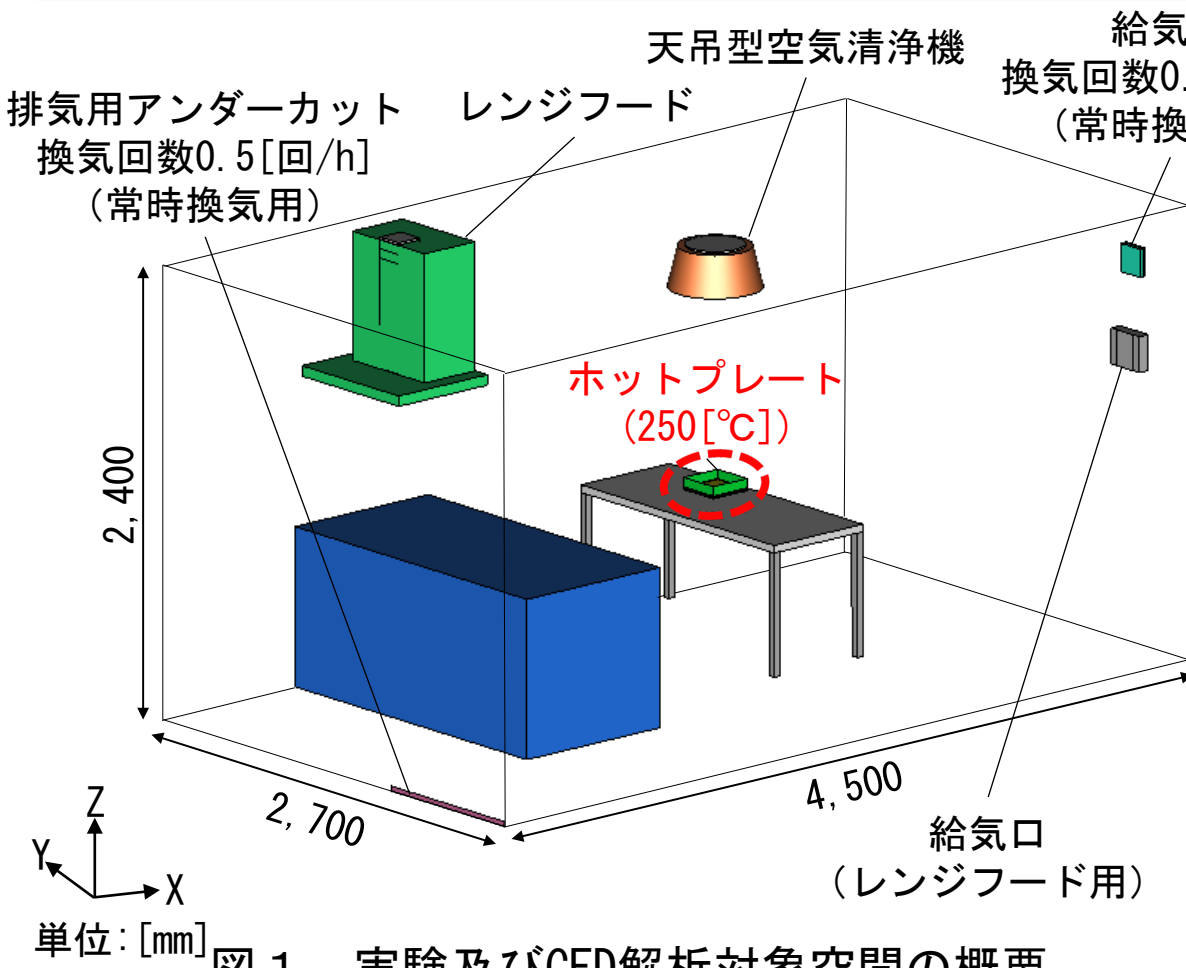
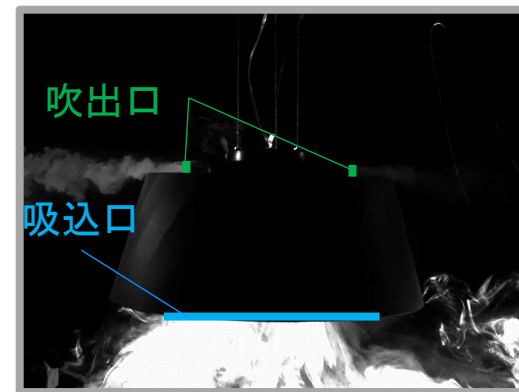
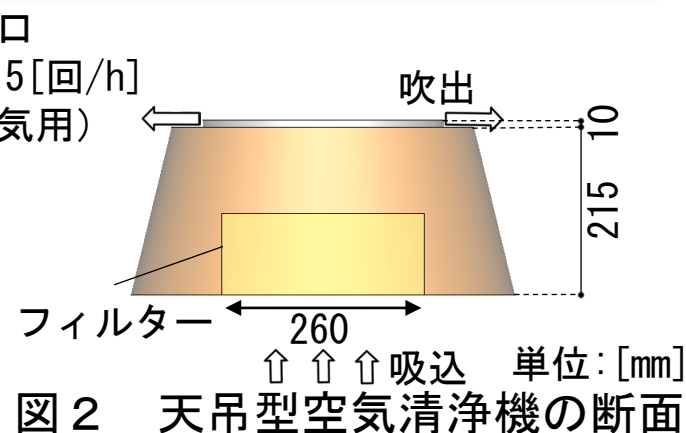


図1 実験及びCFD解析対象空間の概要



動画 吸込・吹出気流性状の可視化

実験概要

調理時に発生する油煙を模擬している。

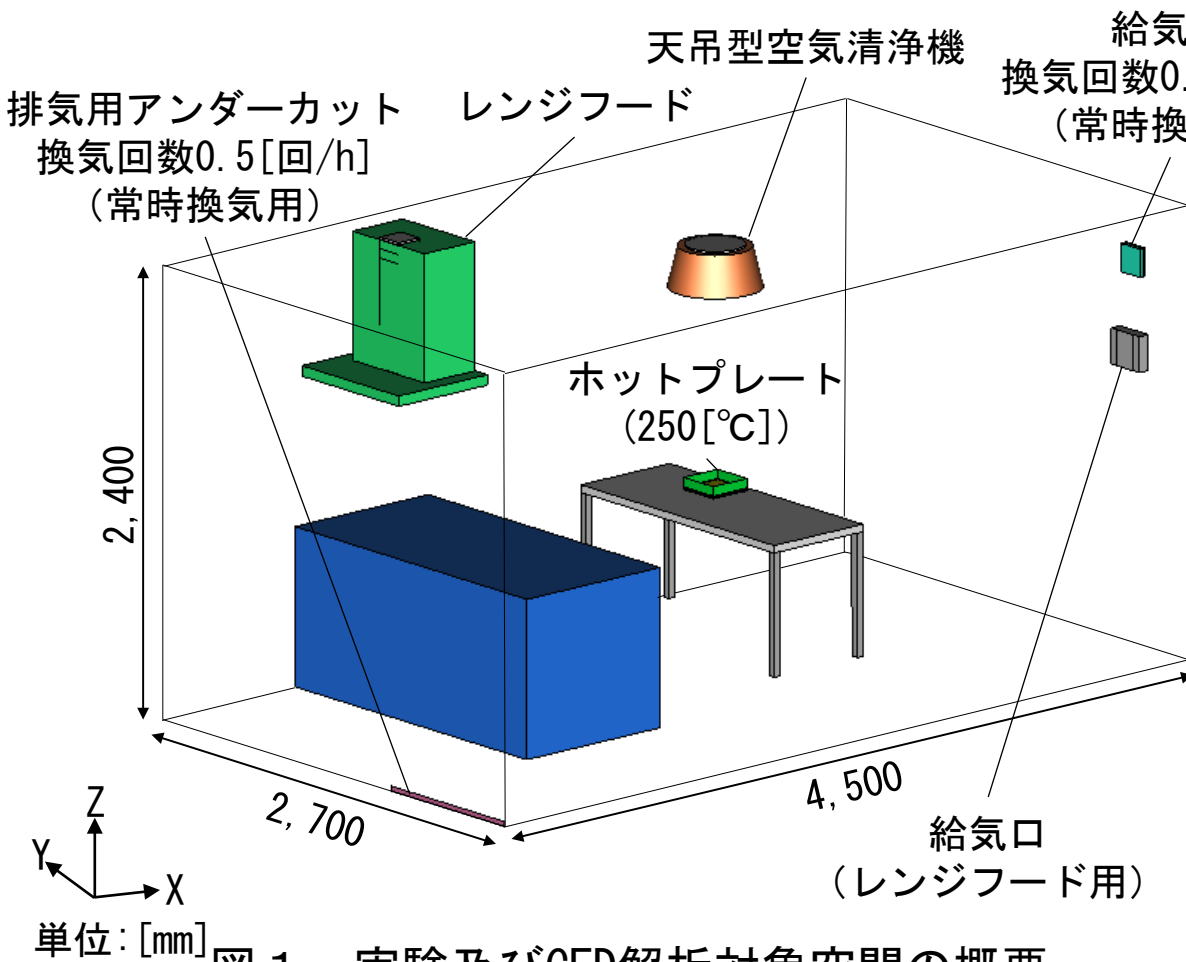
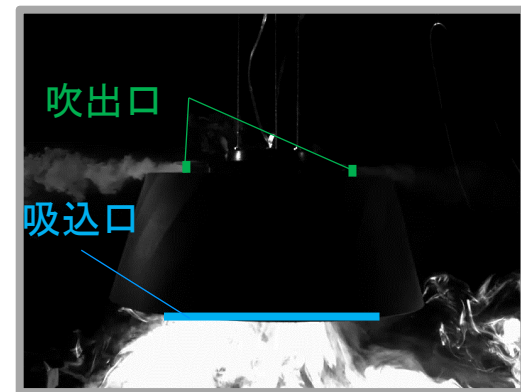
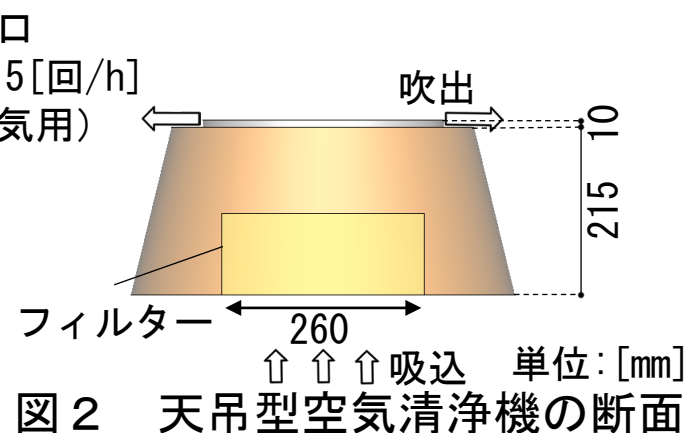


図1 実験及びCFD解析対象空間の概要



動画 吸込・吹出気流性状の可視化

実験概要

ホットプレートはダイニングのテーブルの上に設置する。

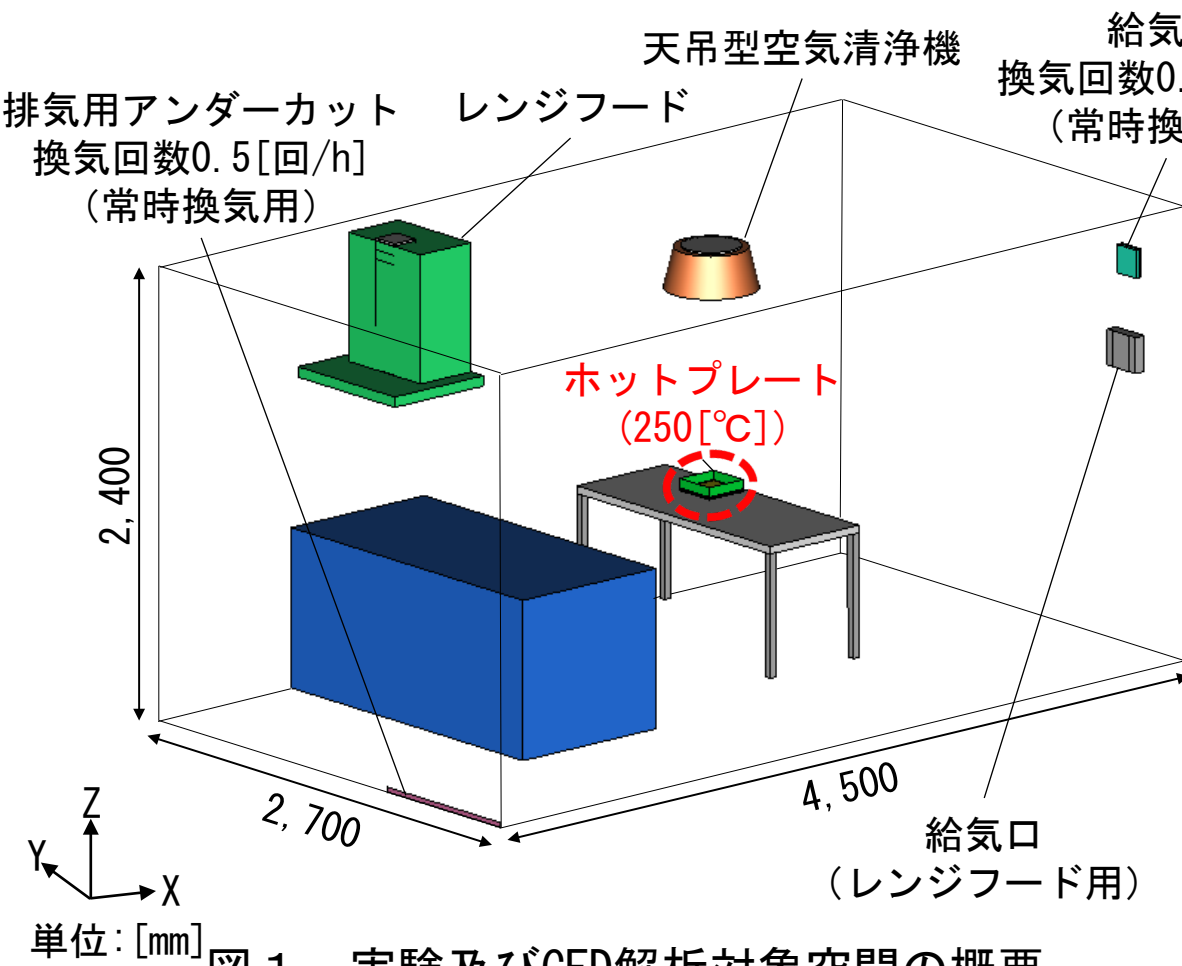


図1 実験及びCFD解析対象空間の概要

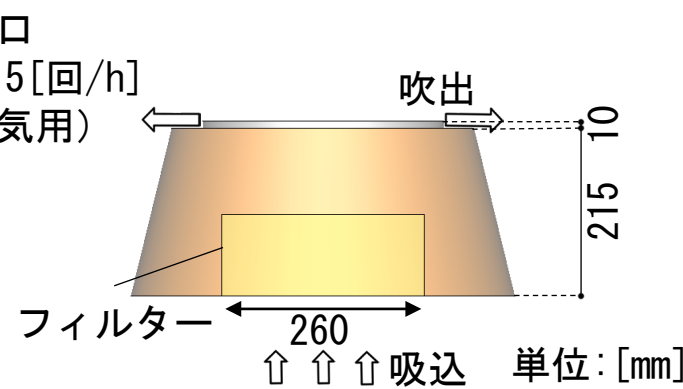
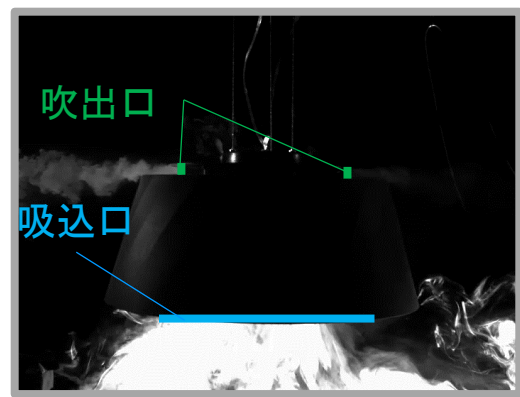


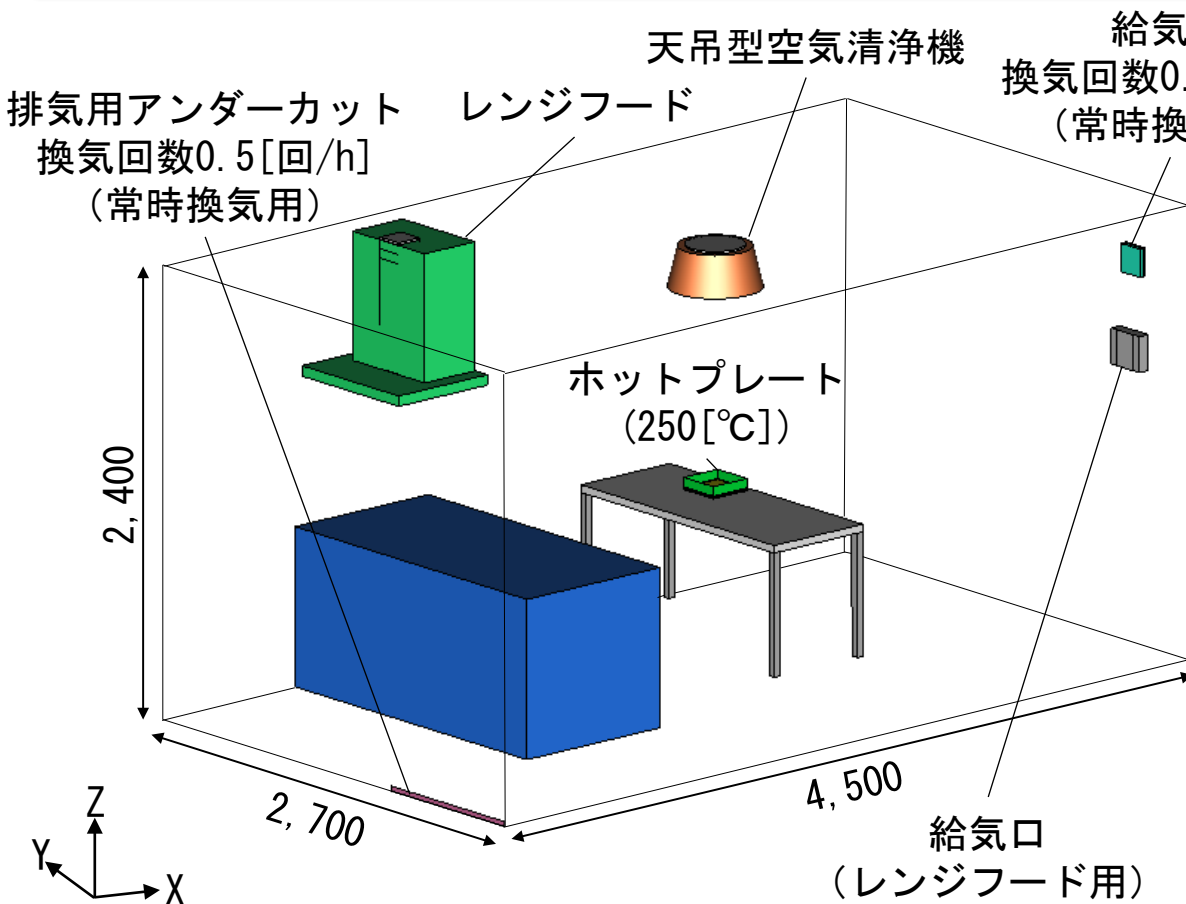
図2 天吊型空気清浄機の断面



動画 吸込・吹出気流性状の可視化

実験概要

汚染質濃度は粉じん計※⁴をレンジフードの吸込口または天吊型空気清浄機の吸込口に設置して測定する。



単位: [mm]

図1 実験及びCFD解析対象空間の概要

※⁴ SIBATA社製: LD-5R

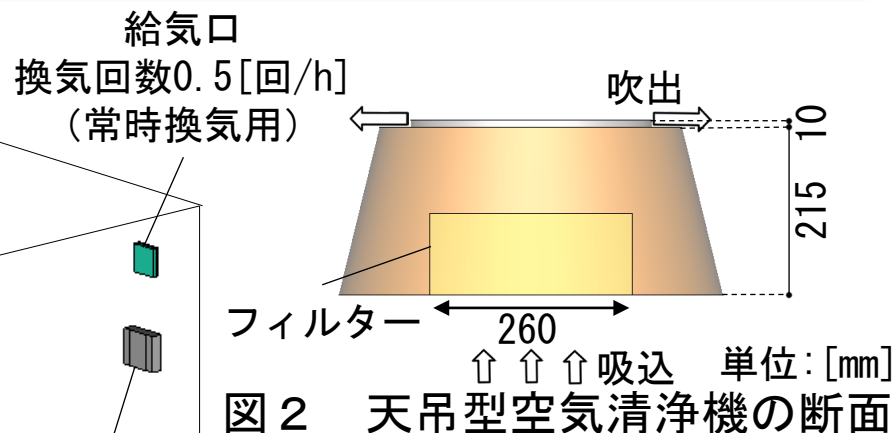
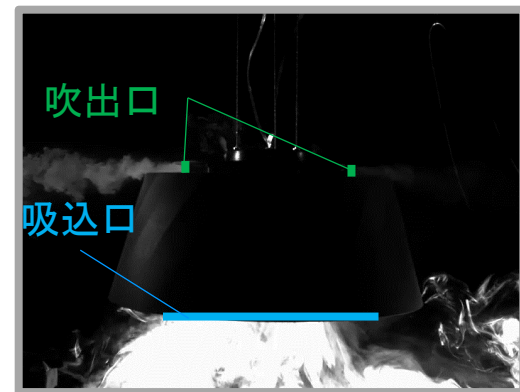


図2 天吊型空気清浄機の断面



動画 吸込・吹出気流性状の可視化

実験及びCFD解析case

case1~4はキッチンに設置されているレンジフードを、case5~7はダイニングテーブルの上に設置された天吊型空気清浄機を稼働する。

表 1 実験及びCFD解析case

| case | 汚染質除去装置 | 風量 [m ³ /h] | 設置位置 |
|-------|----------|------------------------|-------|
| case1 | レンジフード | 160 | キッチン |
| case2 | | 190 | |
| case3 | | 300 | |
| case4 | | 420 | |
| case5 | 天吊型空気清浄機 | 110 | テーブル上 |
| case6 | | 160 | |
| case7 | | 190 | |

実験及びCFD解析case

case1～4はキッチンに設置されているレンジフードを、case5～7はダイニングテーブルの上に設置された天吊型空気清浄機を稼働する。

表 1 実験及びCFD解析case

| case | 汚染質除去装置 | 風量 [m ³ /h] | 設置位置 |
|-------|----------|------------------------|-------|
| case1 | レンジフード | 160 | キッチン |
| case2 | | 190 | |
| case3 | | 300 | |
| case4 | | 420 | |
| case5 | 天吊型空気清浄機 | 110 | テーブル上 |
| case6 | | 160 | |
| case7 | | 190 | |

実験及びCFD解析case

case1～4、case5～7はそれぞれ**汚染質除去装置の風量**を変化させる。

表 1 実験及びCFD解析case

| case | 汚染質除去装置 | 風量 [m ³ /h] | 設置位置 |
|-------|----------|------------------------|-------|
| case1 | レンジフード | 160 | キッチン |
| case2 | | 190 | |
| case3 | | 300 | |
| case4 | | 420 | |
| case5 | 天吊型空気清浄機 | 110 | テーブル上 |
| case6 | | 160 | |
| case7 | | 190 | |

RANS解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAMver. 2022を使用する。

表 2 CFD解析条件

| 乱流モデル | 標準k-εモデル | | | | |
|-----------|--------------|--|--|------|--------------|
| 境界条件 | 流入出境界 | 給気口 換気回数0.5[回/h] (常時換気用) | | 流量規定 | |
| | | 排気口 (アンダーカット) 換気回数0.5[回/h] (常時換気用) | | | |
| | | レンジフード | | | |
| | | 給気口 (レンジフード用) | 乱流 エネルギー [m ² /s ²] | | case1:0.0114 |
| | | | | | case2:0.0162 |
| | | 天吊型空気清浄機 | | | case3:0.0404 |
| | case4:0.0792 | | | | |
| | | case5:0.0984 | | | |
| | | case6:0.2082 | | | |
| | | case7:0.2936 | | | |
| | 幅射境界 | 幅射率0.9 | | | |
| 移流項差分スキーム | Quick | | | | |

CFD解析概要

トレーサは流れに追従するパッシブスカラーとし、卓上のホットプレートから発生させる。

表 2 CFD解析条件

| 乱流モデル | 標準k-εモデル | | | | |
|-----------|--------------|--|--|------|--------------|
| 境界条件 | 流入出境界 | 給気口 換気回数0.5[回/h] (常時換気用) | | 流量規定 | |
| | | 排気口 (アンダーカット) 換気回数0.5[回/h] (常時換気用) | | | |
| | | レンジフード | | | |
| | | 給気口 (レンジフード用) | 乱流 エネルギー [m ² /s ²] | | case1:0.0114 |
| | | | | | case2:0.0162 |
| | | 天吊型空気清浄機 | | | case3:0.0404 |
| | case4:0.0792 | | | | |
| | | case5:0.0984 | | | |
| | | case6:0.2082 | | | |
| | | case7:0.2936 | | | |
| | 輻射境界 | 輻射率0.9 | | | |
| 移流項差分スキーム | Quick | | | | |

分析方法

本研究では汚染質除去効率^{文)}を用いて**汚染質除去装置の効果**を評価する。

$$\varepsilon^C = \frac{\tau_n C_{e,s}}{\int_0^\infty C_e(t) dt} \dots (1)^{\ast 5}$$

$$\varepsilon^C = \frac{C_e}{C} \dots (2)$$

ε^C : 汚染質除去効率[-]

τ_n : 名目換気時間[s]

$C_{e,s}$: 定常状態における濃度[mg/m³]

$C_e(t)$: 時間tによる濃度[mg/m³]

C_e : 定常状態における排気口の汚染質濃度[-]

C : 定常状態における室平均汚染質濃度[-]

※5 汚染質除去率はステップダウン法を基に式変形を行うと名目換気時間 τ_n とターンオーバー時間 τ_{down} を用いて下記のように表せる。

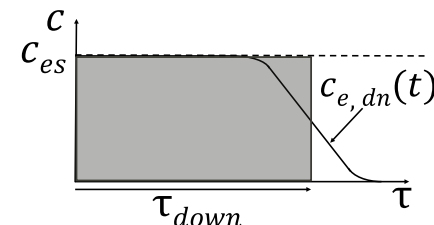
ステップダウン法より

$$V\langle C \rangle = Q \int_0^\infty C_{e,dn}(t) dt = C_{e,s} Q \tau_{down} \Leftrightarrow \frac{C_e}{\langle C \rangle} = \frac{V}{Q} \times \frac{1}{\tau_{down}} = \frac{\tau_n}{\tau_{down}} = \varepsilon^C$$

V : 室容積[m³] Q : 換気量[m³/h] $\langle C \rangle$: 室平均濃度[-]

τ_n : 名目換気時間

τ_{down} : ターンオーバー時間[s]



$C_{e,dn}(t)$: 時間tによる排気濃度

文) REHVA編: 「換気効率ハンドブック—理論と応用—」、社団法人 空気調和・衛生工学会、2009年

分析方法

汚染質除去効率^{文)}とは、**空気中の汚染質がどのくらい速く室内から除去されるかを示す尺度**であり、定常時における排気口の汚染質濃度と定常状態における室平均汚染質濃度との比で定義される。

$$\varepsilon^C = \frac{\tau_n C_{e,s}}{\int_0^\infty C_e(t) dt} \dots (1)^{\ast 5}$$

$$\varepsilon^C = \frac{C_e}{C} \dots (2)$$

ε^C : 汚染質除去効率[-]

τ_n : 名目換気時間[s]

$C_{e,s}$: 定常状態における濃度[mg/m³]

$C_e(t)$: 時間tによる濃度[mg/m³]

C_e : 定常状態における排気口の汚染質濃度[-]

C : 定常状態における室平均汚染質濃度[-]

※5 汚染質除去効率はステップダウン法を基に式変形を行うと名目換気時間 τ_n とターンオーバー時間 τ_{down} を用いて下記のように表せる。

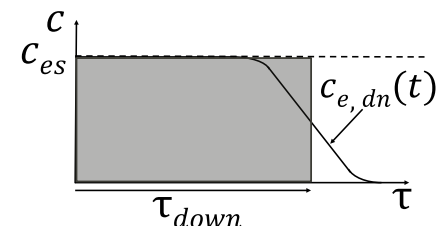
ステップダウン法より

$$V \langle C \rangle = Q \int_0^\infty C_{e,dn}(t) dt = C_{e,s} Q \tau_{down} \Leftrightarrow \frac{C_e}{\langle C \rangle} = \frac{V}{Q} \times \frac{1}{\tau_{down}} = \frac{\tau_n}{\tau_{down}} = \varepsilon^C$$

V : 室容積[m³] Q : 換気量[m³/h] $\langle C \rangle$: 室平均濃度[-]

τ_n : 名目換気時間

τ_{down} : ターンオーバー時間[s]



$C_{e,dn}(t)$: 時間tによる排気濃度

文) REHVA編: 「換気効率ハンドブック—理論と応用—」、社団法人 空気調和・衛生工学会、2009年

分析方法

汚染質除去効率^{文1)}は、実験では既往の研究^{文1)}を参考に(1)式^{※5}、CFD解析では(2)式より算出する。

$$\varepsilon^C = \frac{\tau_n C_{e,s}}{\int_0^{\infty} C_e(t) dt} \dots (1)^{\ast 5}$$

$$\varepsilon^C = \frac{C_e}{C} \dots (2)$$

ε^C : 汚染質除去効率[-]

τ_n : 名目換気時間[s]

$C_{e,s}$: 定常状態における濃度[mg/m³]

$C_e(t)$: 時間tによる濃度[mg/m³]

C_e : 定常状態における排気口の汚染質濃度[-]

C : 定常状態における室平均汚染質濃度[-]

※5 汚染質除去率はステップダウン法を基に式変形を行うと名目換気時間 τ_n とターンオーバー時間 τ_{down} を用いて下記のように表せる。

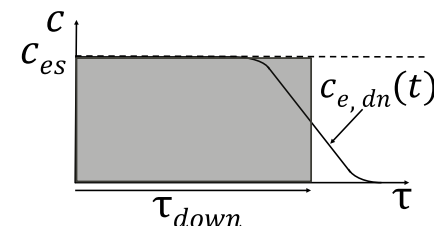
ステップダウン法より

$$V \langle C \rangle = Q \int_0^{\infty} C_{e,dn}(t) dt = C_{e,s} Q \tau_{down} \Leftrightarrow \frac{C_e}{\langle C \rangle} = \frac{V}{Q} \times \frac{1}{\tau_{down}} = \frac{\tau_n}{\tau_{down}} = \varepsilon^C$$

V : 室容積[m³] Q : 換気量[m³/h] $\langle C \rangle$: 室平均濃度[-]

τ_n : 名目換気時間

τ_{down} : ターンオーバー時間[s]



$C_{e,dn}(t)$: 時間tによる排気濃度

文1) 村井、倉渕ら：「汚染質除去効率を用いた空気清浄機の影響範囲に関する研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2023年

実験結果及びCFD解析結果

実験結果

汚染質除去効率の算出に用いる定常濃度は発生停止直前の30分の平均濃度とする。

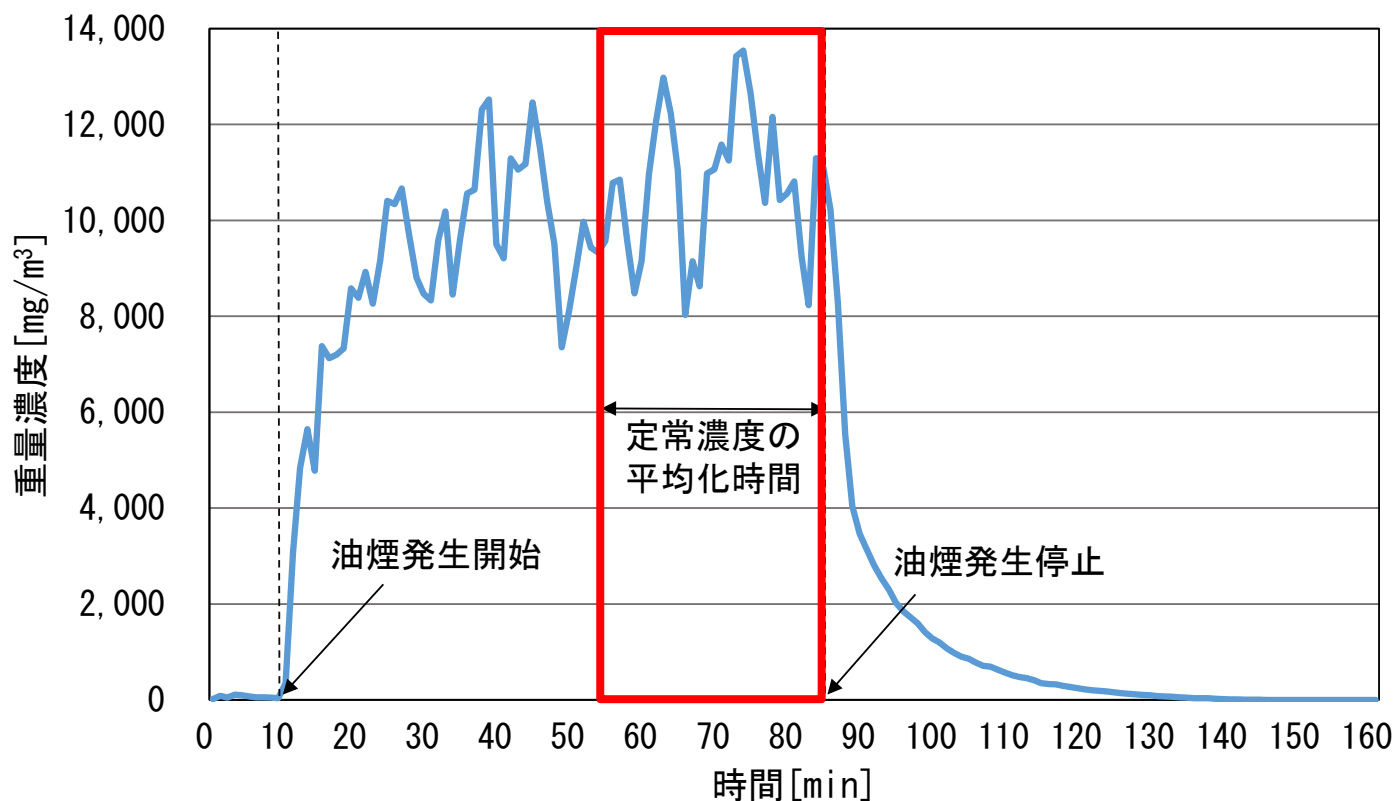


図3 case6における重量濃度の時系列変化
(実験結果：天吊型空気清浄機吸込口)

実験結果

case6において天吊型空気清浄機の吸込口における定常濃度は、 $10,780 \text{ [mg/m}^3\text{]}$ となる。

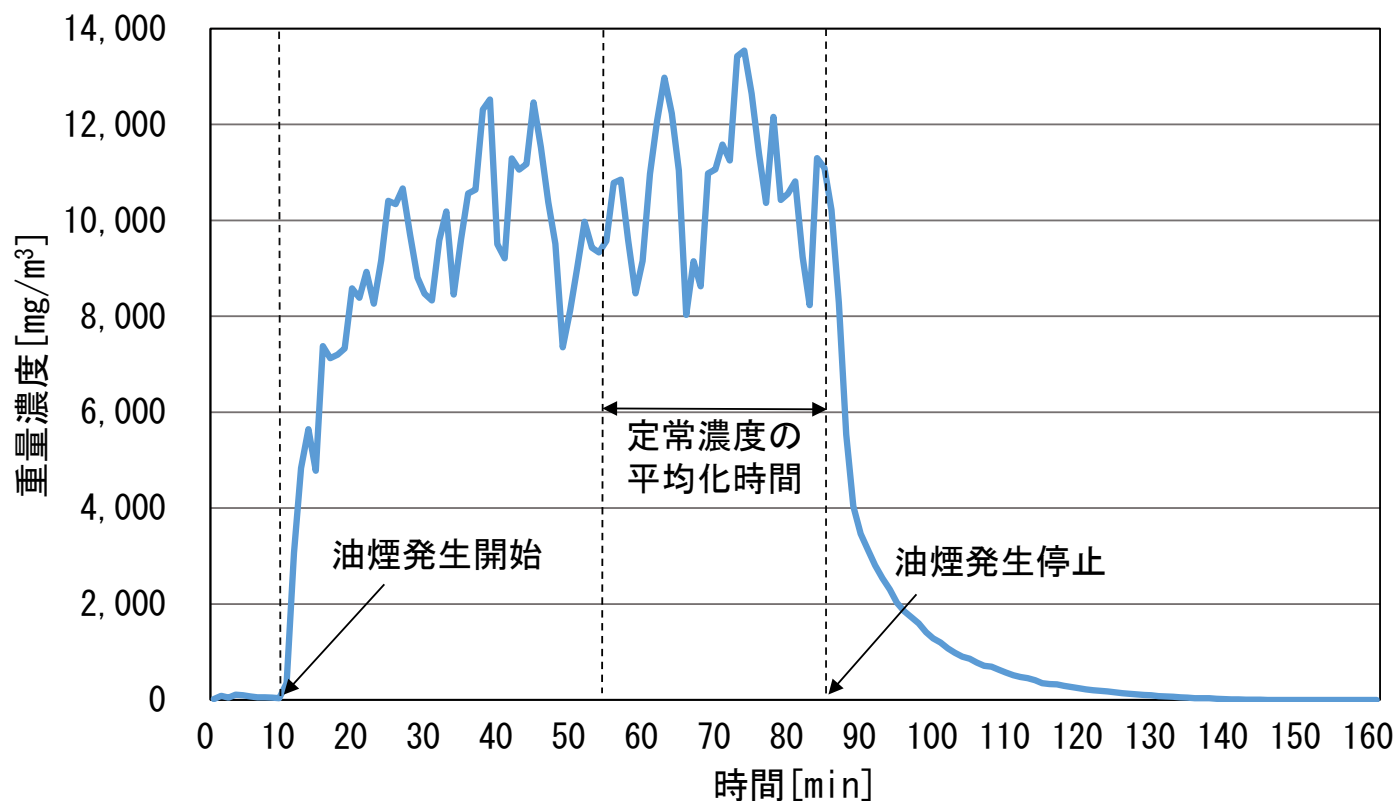


図3 case6における重量濃度の時系列変化
(実験結果：天吊型空気清浄機吸込口)

実験結果

レンジフードを稼働したcase1~4に比べて、天吊型空気清浄機を稼働したcase5~7では、室平均濃度に対して排気口における汚染質濃度が高くなり、汚染質除去効率が高くなる傾向がある。

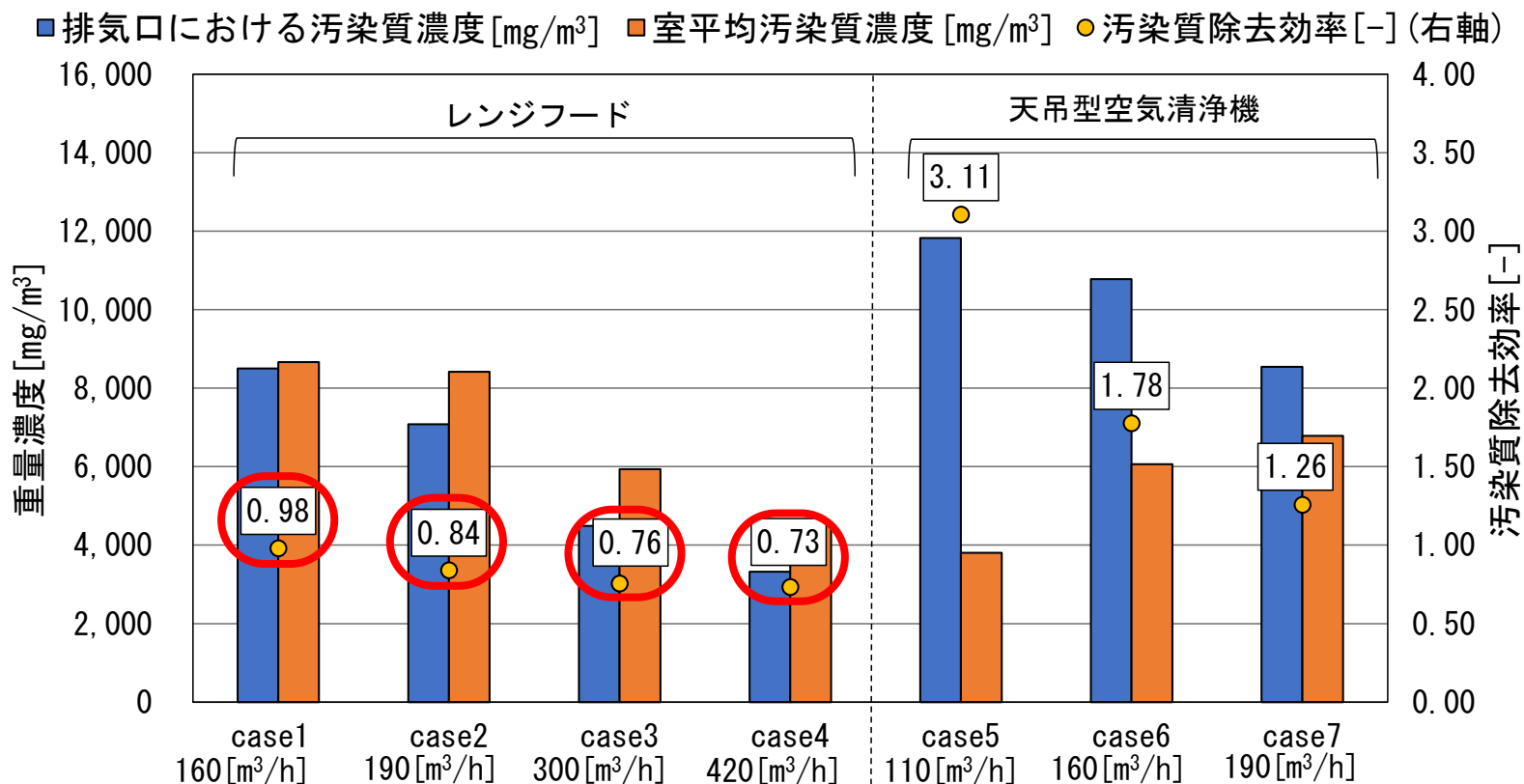


図4 各caseにおける重量濃度と汚染質除去効率 (実験結果)

レンジフードを稼働したcase1~4に比べて、天吊型空気清浄機を稼働したcase5~7では、**室平均濃度に対して排気口における汚染物質濃度が高くなり、汚染質除去効率が高くなる傾向がある。**

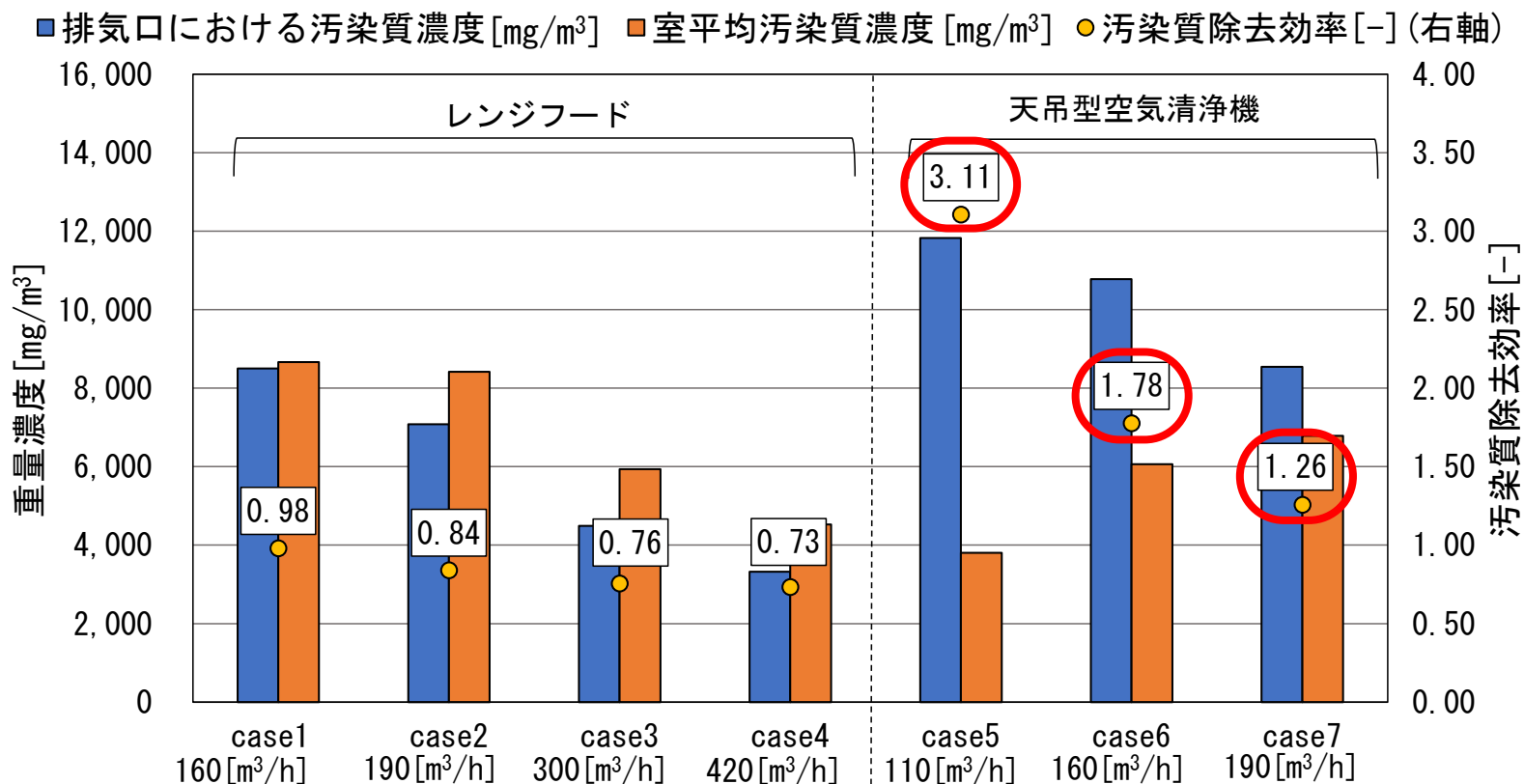


図4 各caseにおける重量濃度と汚染質除去効率 (実験結果)

天吊型空気清浄機を風量110[m³/h]で稼働したcase5が、汚染質除去効率が最も高くなる。

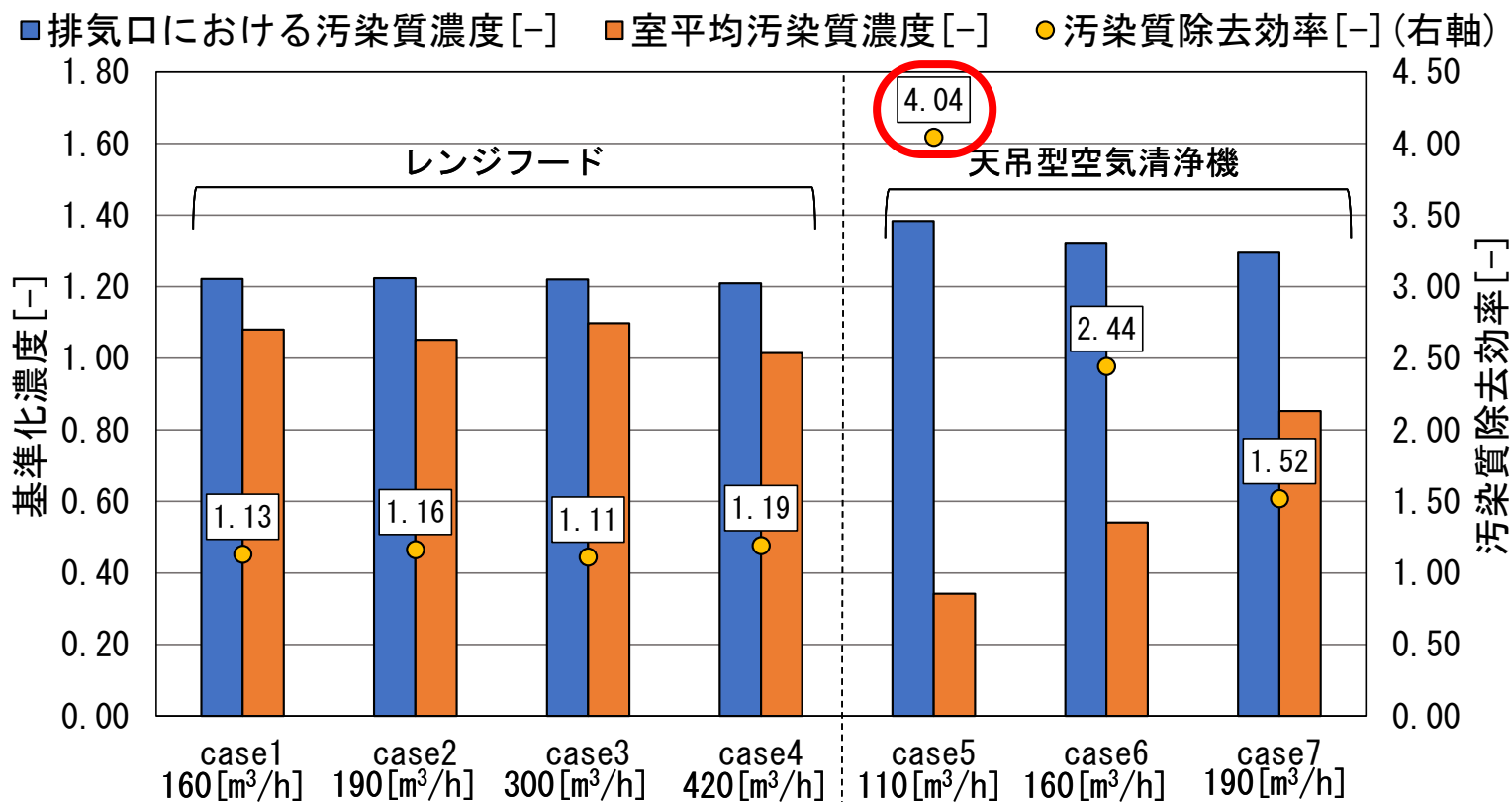


図5 各caseにおける基準化濃度と汚染質除去効率 (CFD解析結果)

CFD解析結果

レンジフードを用いたcase1に比べて同じ風量の天吊型空気清浄機を用いたcase6のほうが、室内の汚染質濃度が低くなる傾向がある。

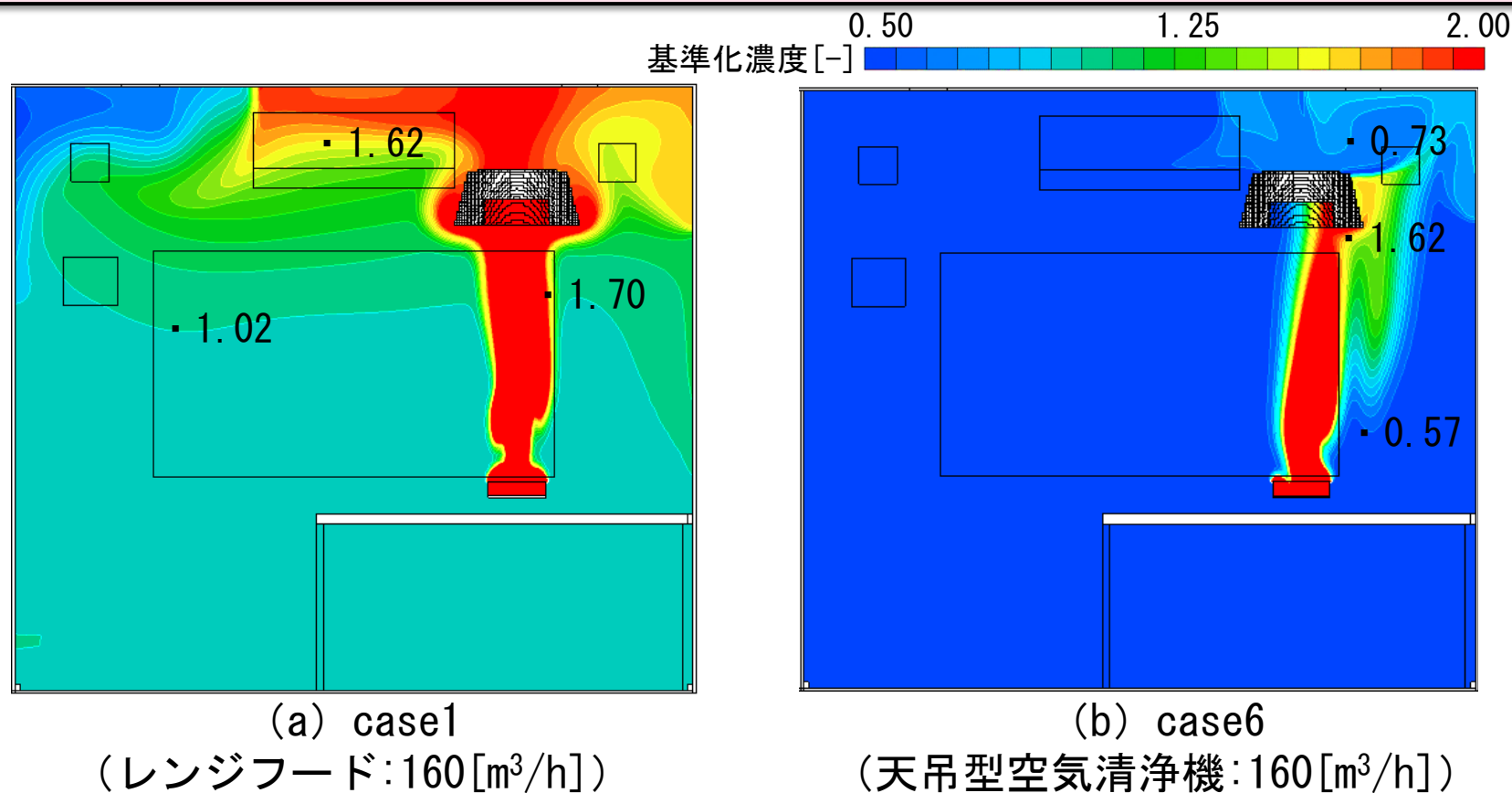


図6 代表caseにおける定常時の基準化濃度分布 (X=3, 150 [mm])

実験結果とCFD解析の比較

実験及び解析結果の汚染質除去効率^①は相対的に概ね一致する。

表1 実験及びCFD解析case

| case | 汚染質除去装置 | 風量[m ³ /h] |
|-------|----------|-----------------------|
| case1 | レンジフード | 160 |
| case2 | | 190 |
| case3 | | 300 |
| case4 | | 420 |
| case5 | 天吊型空気清浄機 | 110 |
| case6 | | 160 |
| case7 | | 190 |

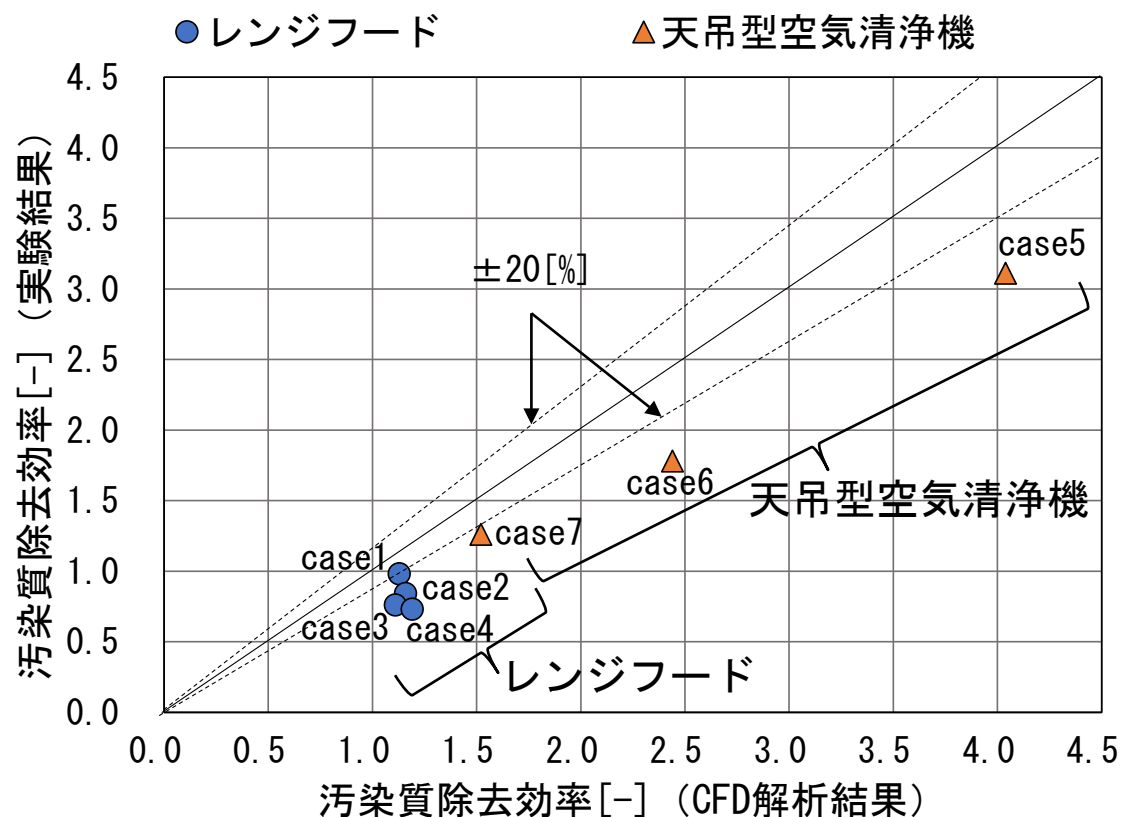


図7 実験とCFD解析における汚染質除去効率の比較

実験結果とCFD解析の比較

レンジフードを用いたcase1及びcase2に比べて、同じ風量の天吊型空気清浄機を用いたcase6及びcase7のほうが、汚染質除去効率が大きくなる。

表1 実験及びCFD解析case

| case | 汚染質除去装置 | 風量[m ³ /h] |
|-------|----------|-----------------------|
| case1 | レンジフード | 160 |
| case2 | | 190 |
| case3 | | 300 |
| case4 | | 420 |
| case5 | 天吊型空気清浄機 | 110 |
| case6 | | 160 |
| case7 | | 190 |

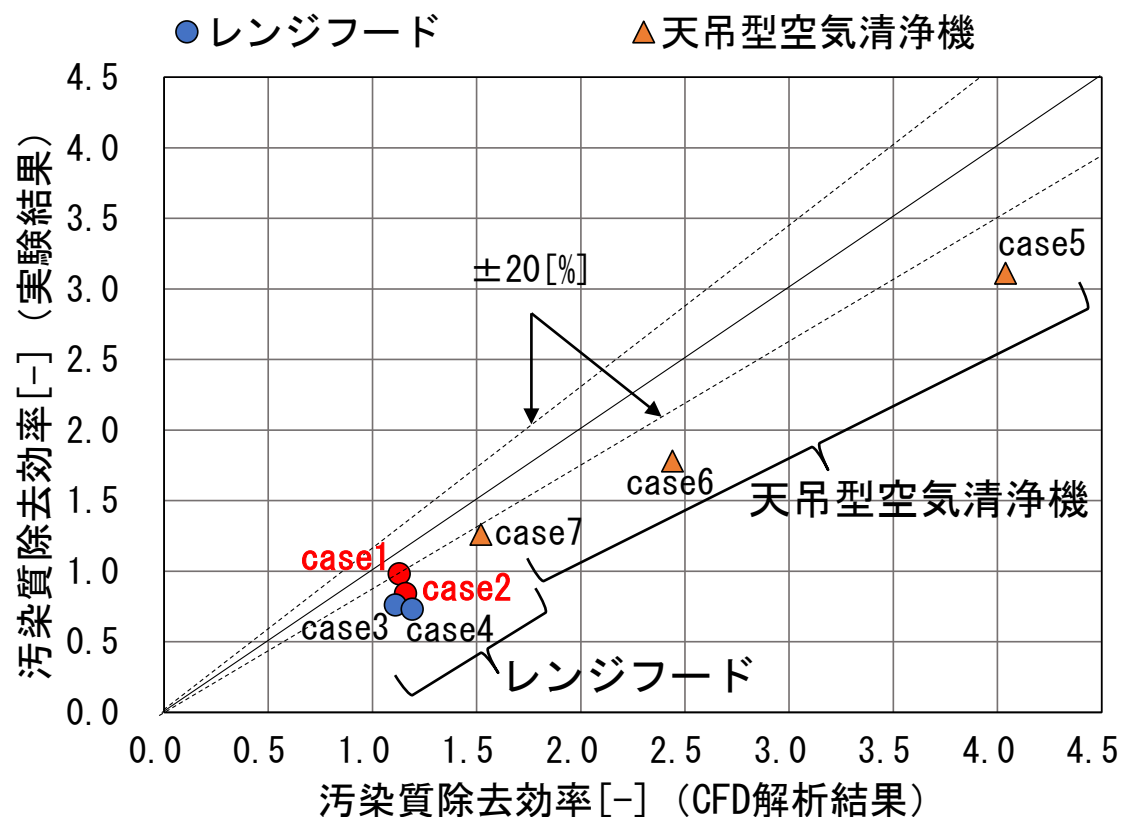


図7 実験とCFD解析における汚染質除去効率の比較

実験結果とCFD解析の比較

レンジフードを用いたcase1及びcase2に比べて、同じ風量の天吊型空気清浄機を用いたcase6及びcase7のほうが、汚染質除去効率が大きくなる。

表1 実験及びCFD解析case

| case | 汚染質除去装置 | 風量[m ³ /h] |
|-------|----------|-----------------------|
| case1 | レンジフード | 160 |
| case2 | | 190 |
| case3 | | 300 |
| case4 | | 420 |
| case5 | 天吊型空気清浄機 | 110 |
| case6 | | 160 |
| case7 | | 190 |

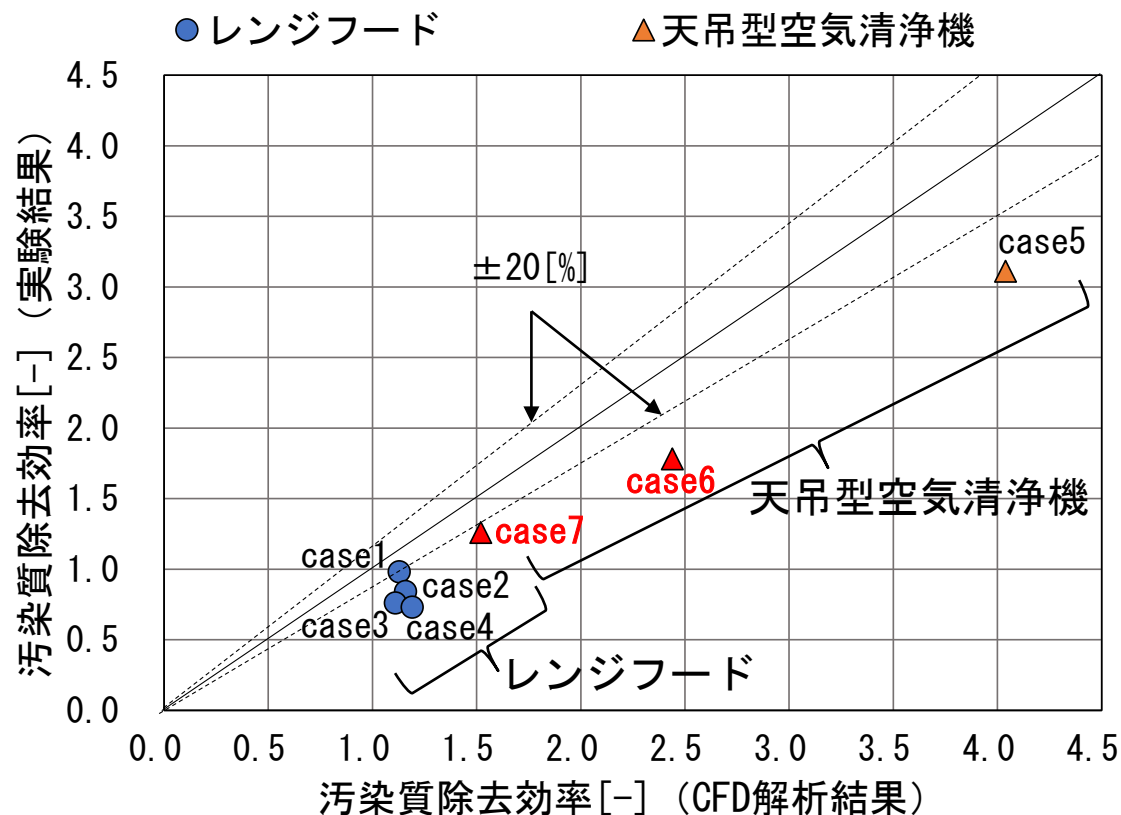


図7 実験とCFD解析における汚染質除去効率の比較

実験結果とCFD解析の比較

特に天吊型空気清浄機を風量110[m³/h]で稼動したcase5において、**実験結果とCFD解析結果ともに汚染質除去効率が最も高い。**

表1 実験及びCFD解析case

| case | 汚染質除去装置 | 風量[m ³ /h] |
|-------|----------|-----------------------|
| case1 | レンジフード | 160 |
| case2 | | 190 |
| case3 | | 300 |
| case4 | | 420 |
| case5 | | 110 |
| case6 | 天吊型空気清浄機 | 160 |
| case7 | | 190 |

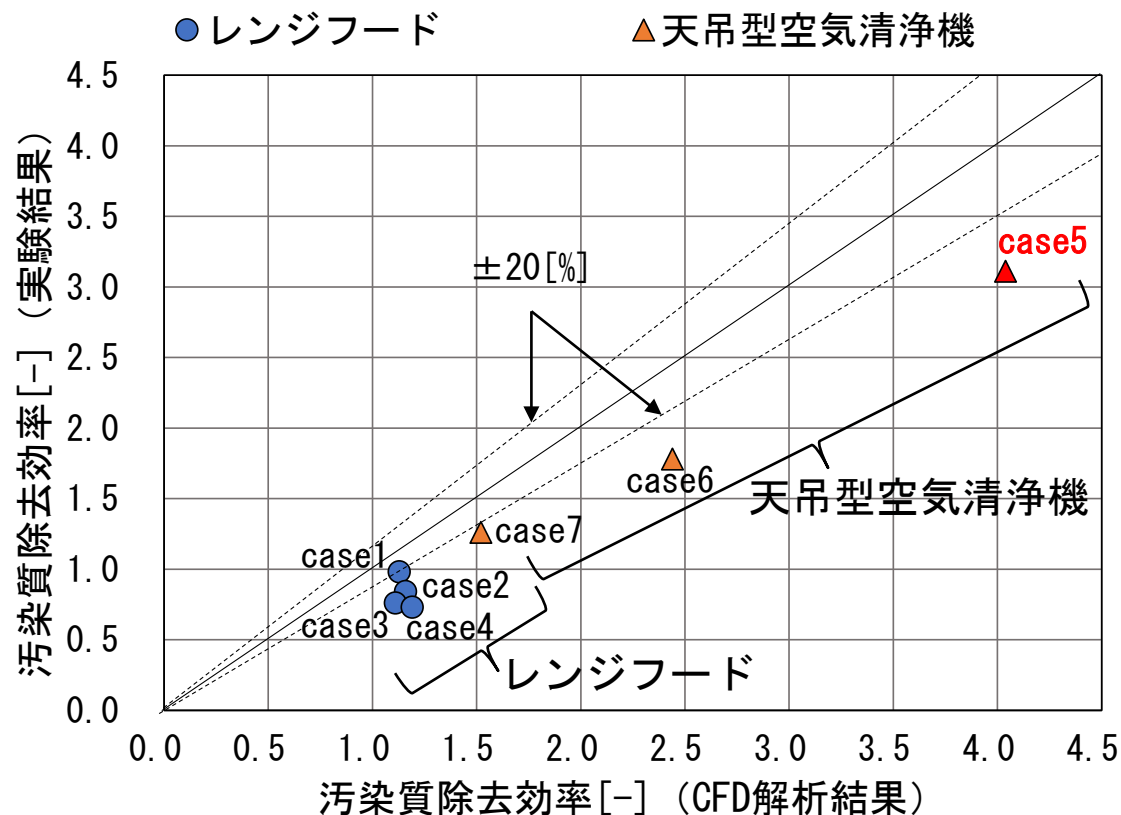


図7 実験とCFD解析における汚染質除去効率の比較

まとめ

- ①実験において同じ風量でレンジフードを稼動したcase1及びcase2に比べて、天吊型空気清浄機を稼動したcase6及びcase7の方が汚染質除去効率が大きくなる。そのため、ダイニング卓上調理において天吊型空気清浄機は有効であると考えられる。
- ②各caseにおいて実験結果とCFD解析結果の汚染質除去効率の傾向は一致する。