

住宅用電化厨房を対象とした 高効率換気に関する研究

模擬実環境におけるレンジフードの
直接捕集率に関するCFD解析・実験

指導教員 清水 孝輔
有波 裕貴 助教



研究目的

住宅の厨房における効率的な**汚染質**の捕集・排出は、厨房を含めた室内の**空気・熱環境的快適性を維持**し、冷暖房や換気による**エネルギー消費量を低減**するために重要である。

捕集・排出効率の高い換気方式の開発研究では、**数値シミュレーション** (CFD※¹解析) による**検討**が行われている。

既往の研究^{文1)}では、**熱上昇気流に対する周囲からの気流擾乱が少ない**条件において、従来の解析モデル(以下、従来モデル)と比較すると、**沸騰を考慮した解析モデル**(以下、沸騰モデル)を用いたCFD解析による**レンジフードの直接捕集率**^{※2}は概ね実験結果と**一致**することが明らかとなった。

一方、住宅用電化厨房を対象とした既往の実験では、**給気による擾乱がレンジフードの汚染質捕集性状に大きな影響を与える**ことが明らかとなっている^{文2)}。

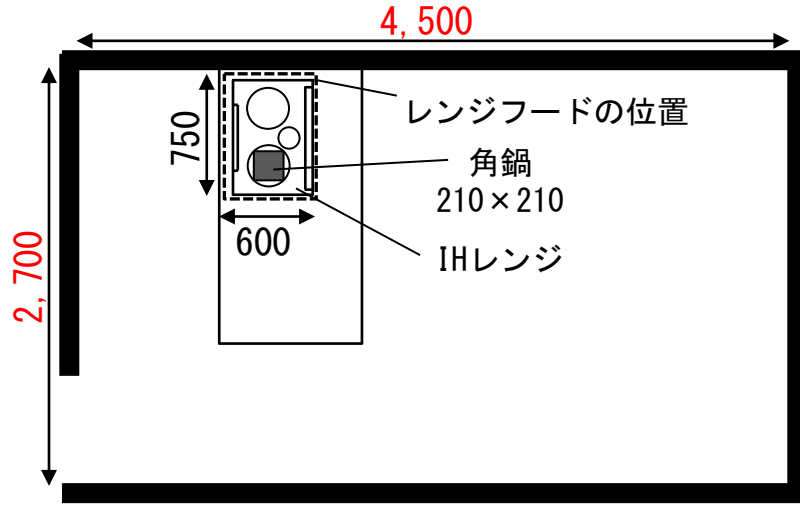
※2 鍋から発生する汚染質のうち、居住空間へ流出せず排気装置(レンジフード)から直接排出される汚染質の割合。
文1) 王、赤林ら：「住宅用電化厨房を対象とした排気捕集率に関する研究(その1)：数値流体解析によるレンジフードの直接捕集率の再現方法に関する研究」、日本建築学会環境系論文集 第88巻 第810号 2023

本研究では、住宅用電化厨房を対象に、**給気による擾乱がある場合のレンジフードの直接捕集率の測定**および**CFD解析**を行う。

直接捕集率の測定・解析結果を比較することで、**CFD解析による直接捕集率の予測方法を検討**する。

実験・CFD解析の概要

対象空間は4,500 [mm] (幅) × 2,700 [mm] (奥行き) × 2,400 [mm] (高さ) とする。



単位 [mm]

図1 実験・CFD解析対象平面

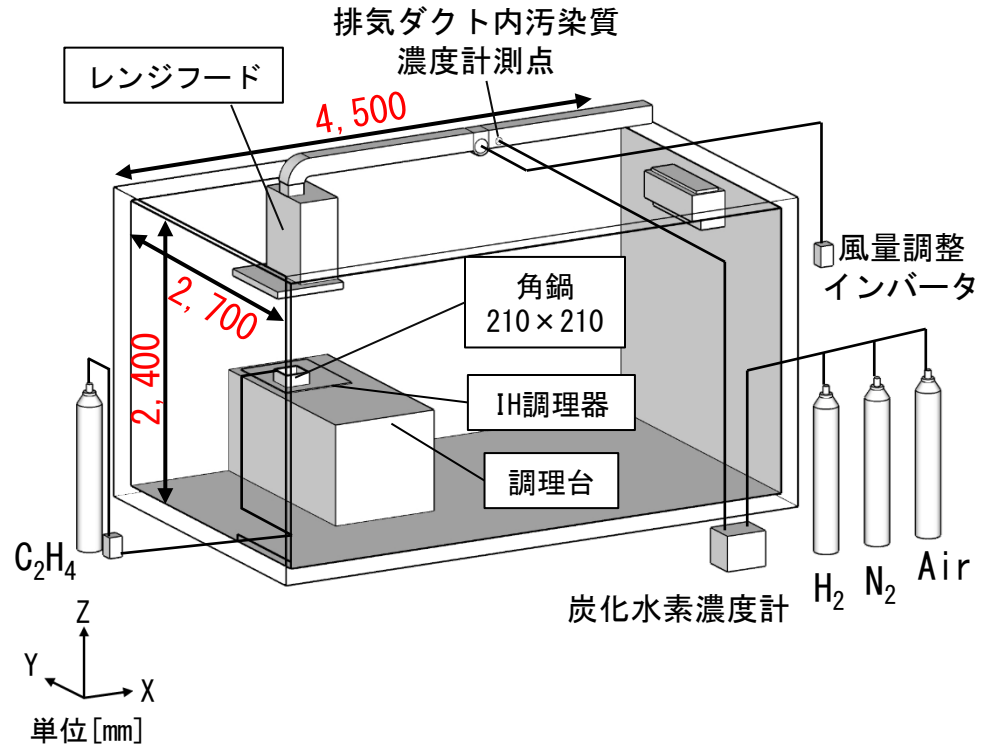
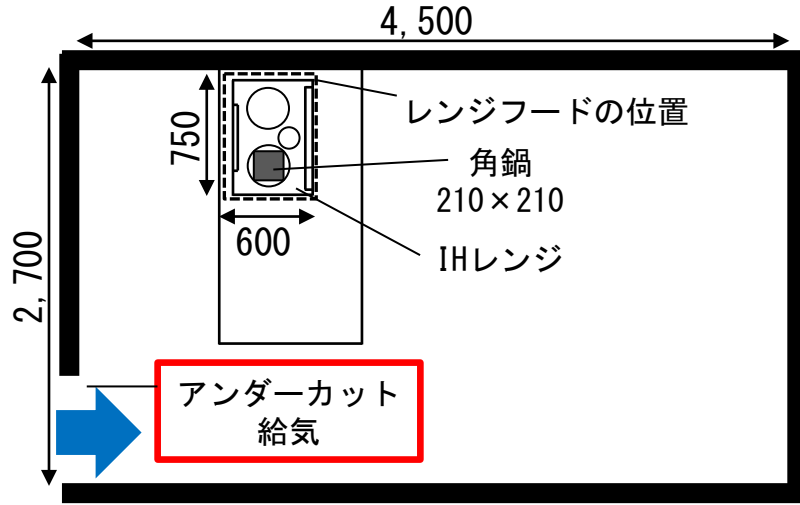


図2 実験・CFD解析対象空間

厨房換気の給気位置はアンダーカット、排気位置はレンジフードとする。



Y
↑
X
単位 [mm]

図1 実験・CFD解析対象平面

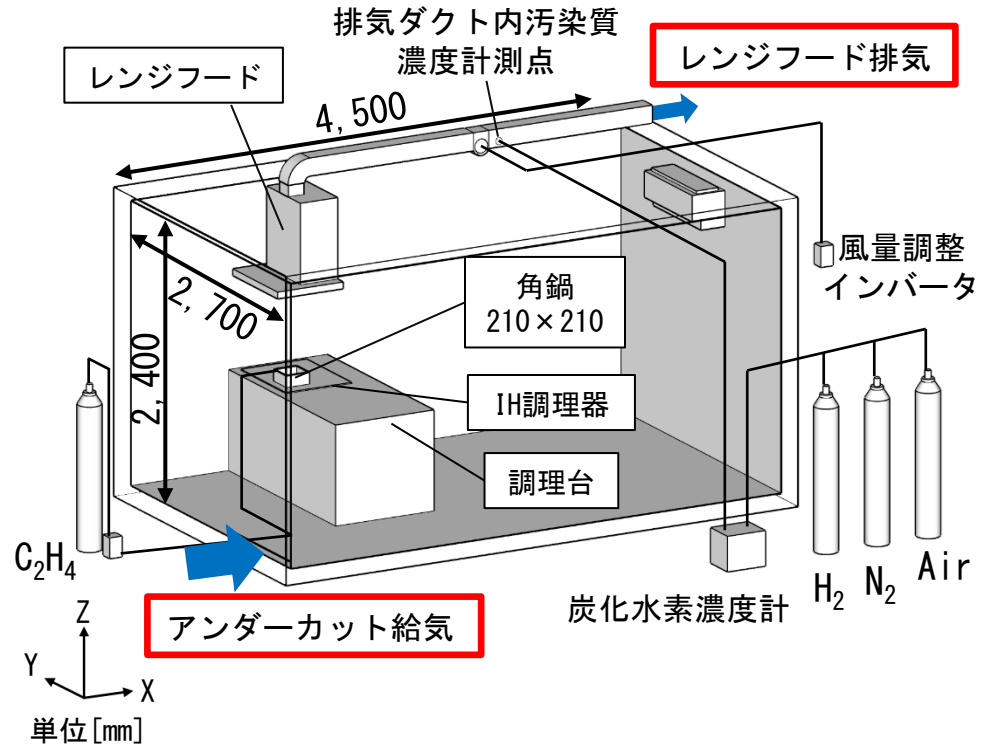
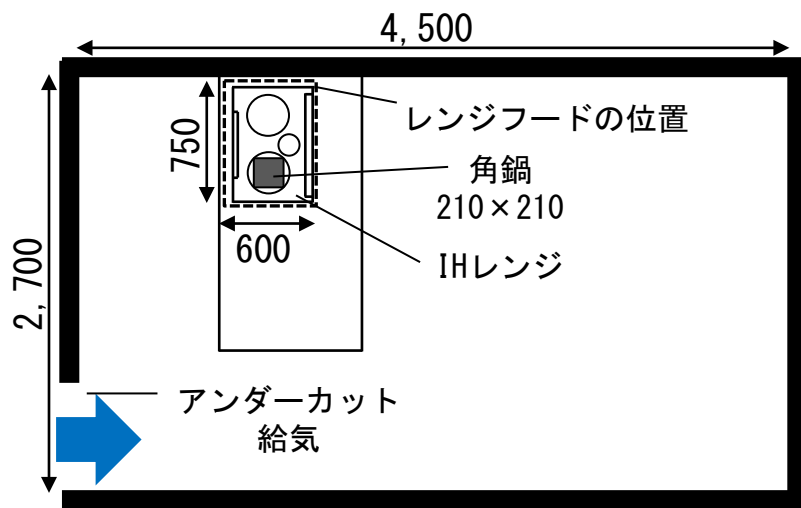


図2 実験・CFD解析対象空間

鍋の内容物を水とし、IHレンジで鍋を加熱することで100[°C]の沸騰状態に保つ。



Y
X
単位 [mm]

図1 実験・CFD解析対象平面

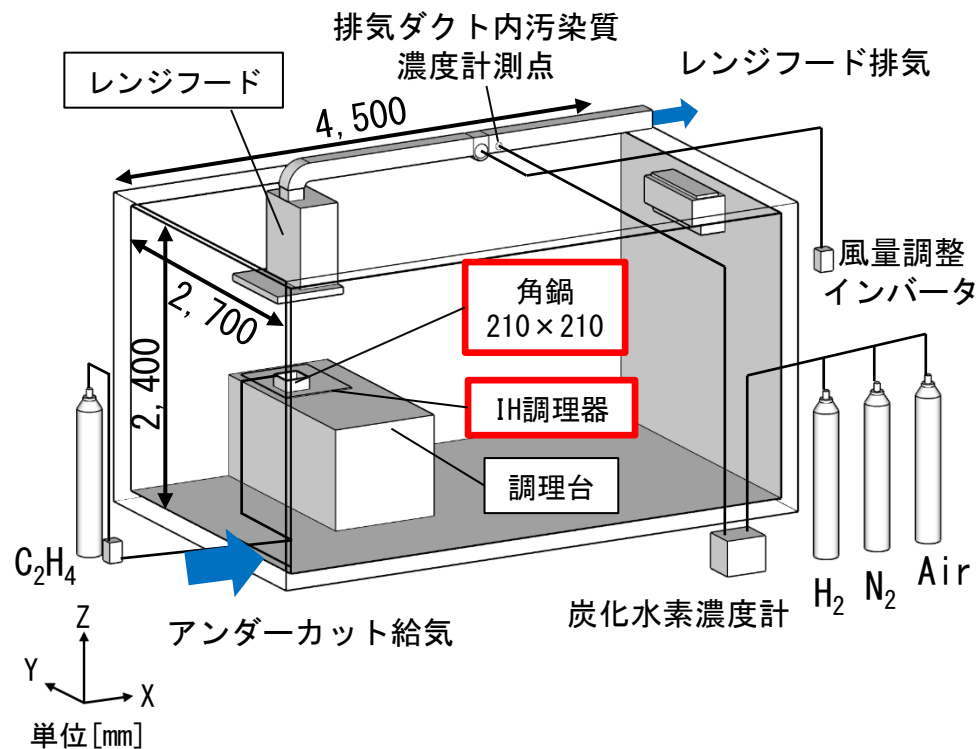


図2 実験・CFD解析対象空間

case1~4まで、レンジフード排気量はそれぞれ150、200、250、300 [m³/h]とする。

表1 実験・CFD解析case

| case | レンジフード排気量 [m ³ /h] | 給気位置 |
|-------|-------------------------------|---------|
| case1 | 150 | アンダーカット |
| case2 | 200 | |
| case3 | 250 | |
| case4 | 300 | |

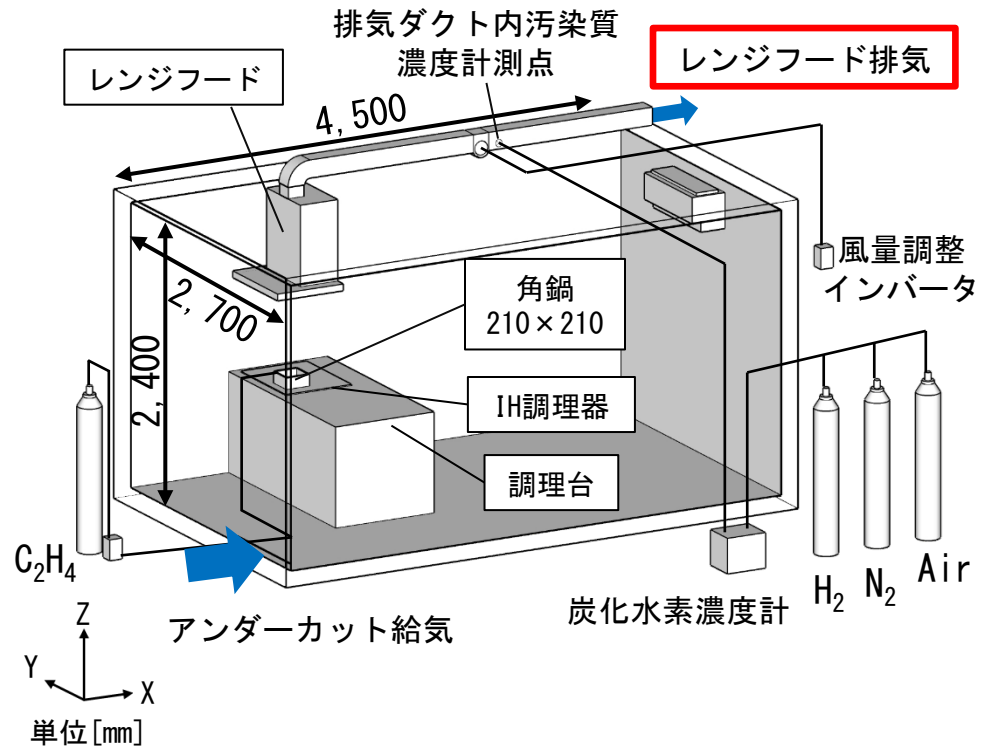


図2 実験・CFD解析対象空間

本研究では、ストップ法^{文3)}により、(1)式を用いてレンジフード排気ダクト内の汚染質濃度をもとに直接捕集率の算出を行う。

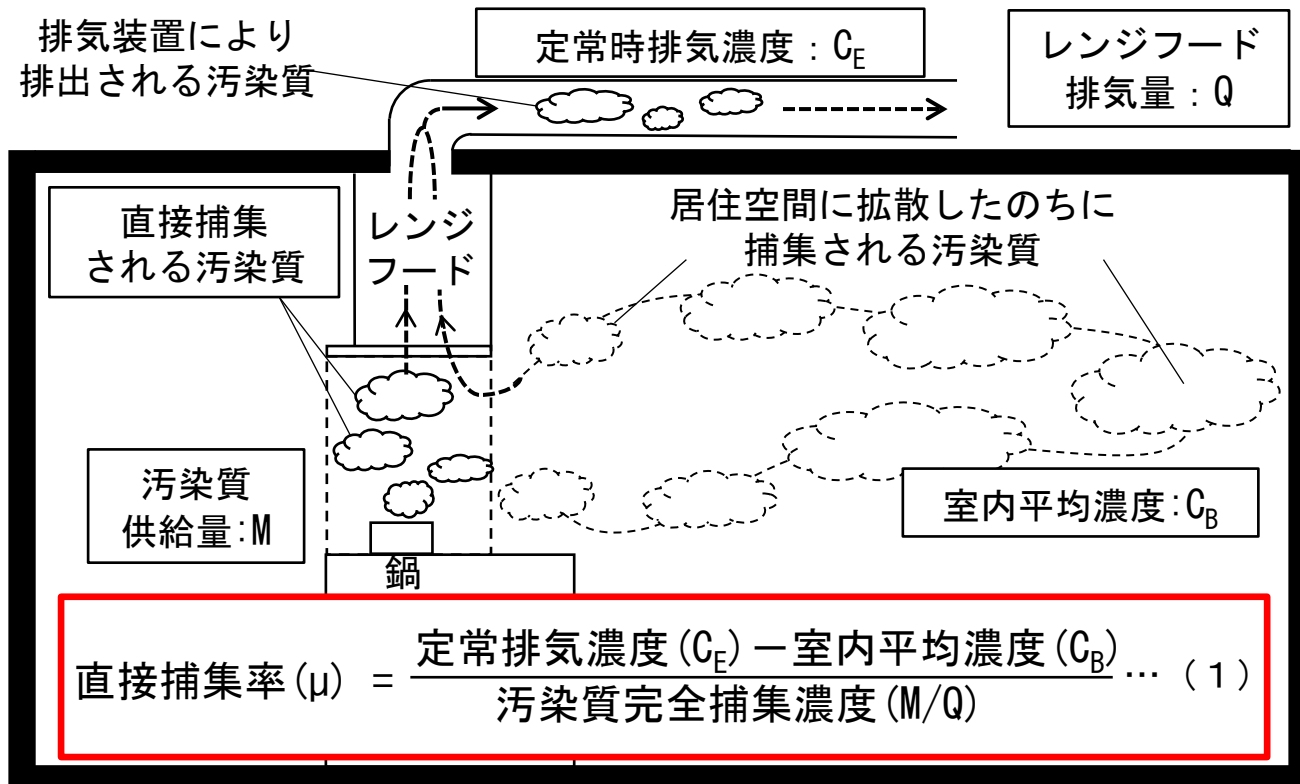


図 直接捕集率の概念

文3) 倉瀨ら：「住宅厨房内の各種擾乱が排気捕集率に及ぼす影響評価に関する研究」、日本建築学会環境系論文集、Vol. 76 No. 663、pp. 493-500、2011.5

調理時に発生する汚染質のトレーサにはエチレンを用いる。

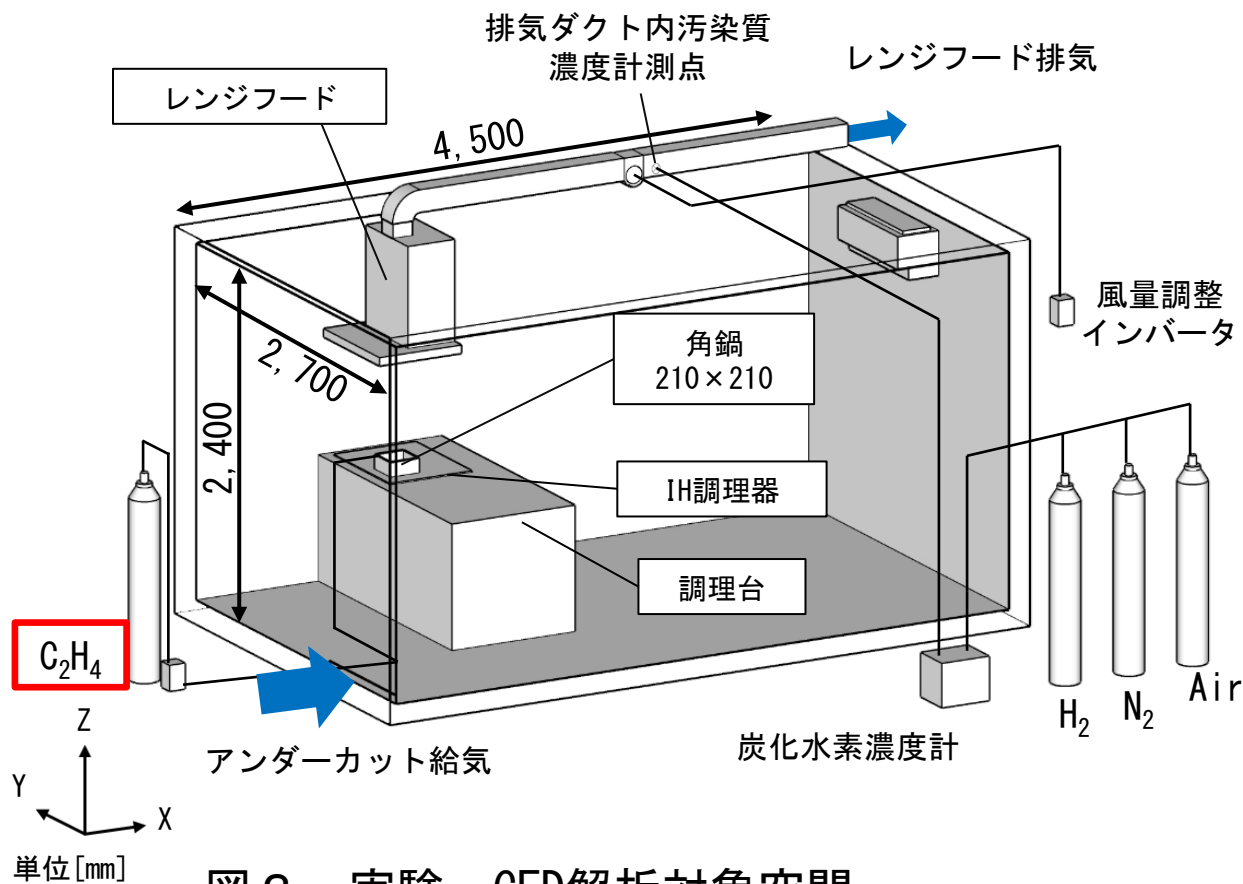


図2 実験・CFD解析対象空間

レンジフード排気ダクト内のトレーサ濃度を連続炭化水素濃度計で測定する。

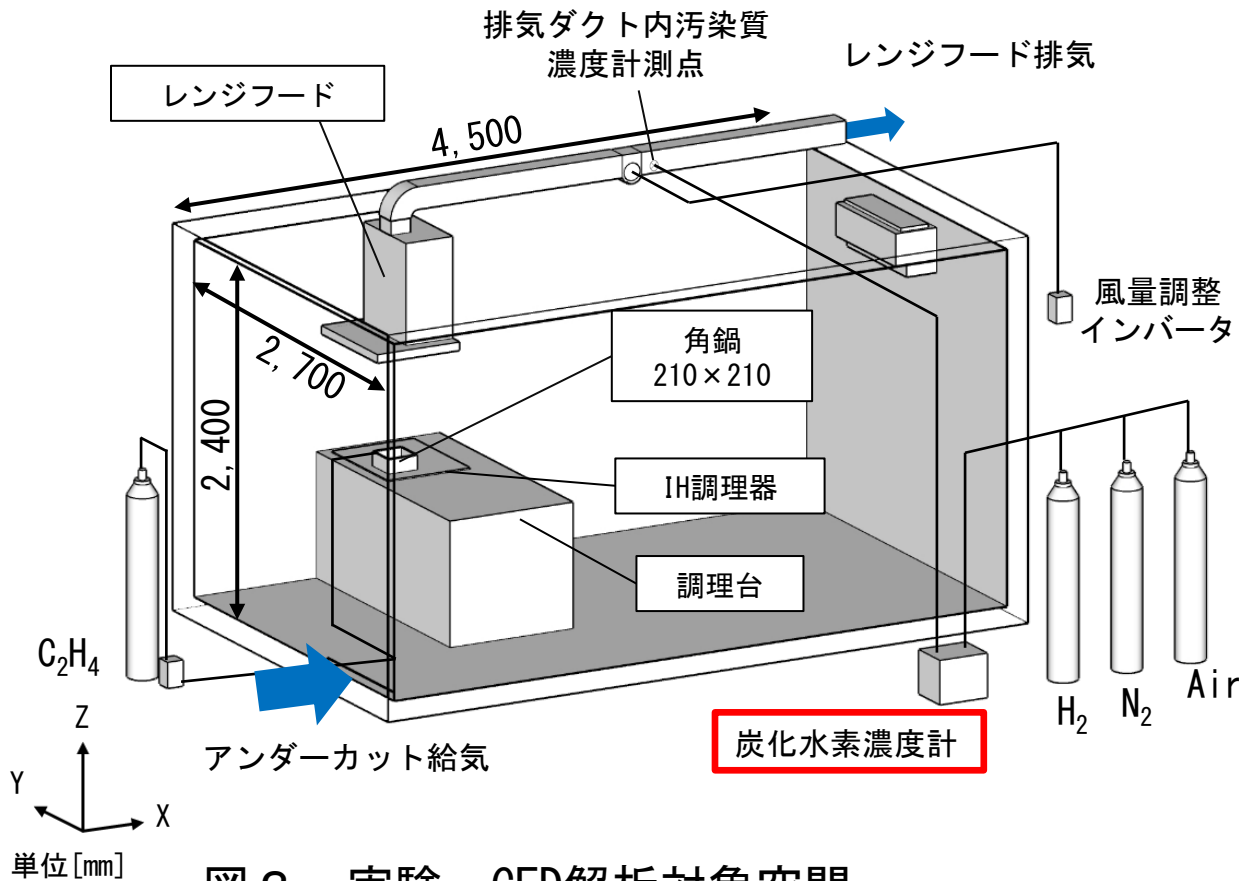


図2 実験・CFD解析対象空間



写真

連続炭化水素濃度計
(水素炎イオン化検出器)

鍋の内容物は水の物性値を持つ固体とし、温度を100[°C]とする。
 また、外気温および室内初期温度は20[°C]とする。

表2 CFD解析条件

| | | | |
|---------|--|-------------------------|---------------------------------|
| 計算コード | ソフトウェアクレイドルSTREAM ver. 2022 | | |
| 乱流モデル | 標準 $k-\epsilon$ モデル | | |
| 解析要素数 | 140 (X) × 189 (Y) × 90 (Z) = 2,381,400 | | |
| 移流項精度 | QUICK | | |
| 熱境界 | 熱対流 | 鍋・水表面 | 100 [W/(m ² · K)] |
| | | その他の表面 | 温度対数則 |
| | 個体間 | 鍋-水 | 2,000 [kW/(m ² · K)] |
| | | IHレンジー調理台 | 断熱 |
| その他の個体間 | 熱伝導 | | |
| 壁面条件 | 輻射境界 | 輻射率 : 0.9 | |
| | 流速境界 | 一般対数則 | |
| 流入境界 | 流出 | レンジフード | 流量規定 |
| | 流入 | アンダーカット | 流量規定 |
| 温度条件 | 水 | 100[°C]固定 | |
| | 外気温 | 20[°C] | |
| | 初期温度 | 20[°C] | |
| 汚染質 | 発生量 | 1.0 [1/s] = 3,600 [1/h] | |
| | 拡散 | パッシブスカラー | |
| 鍋内の水表面 | 従来モデル | 静止した水 | |
| | 沸騰モデル | 水蒸気発生領域 | |

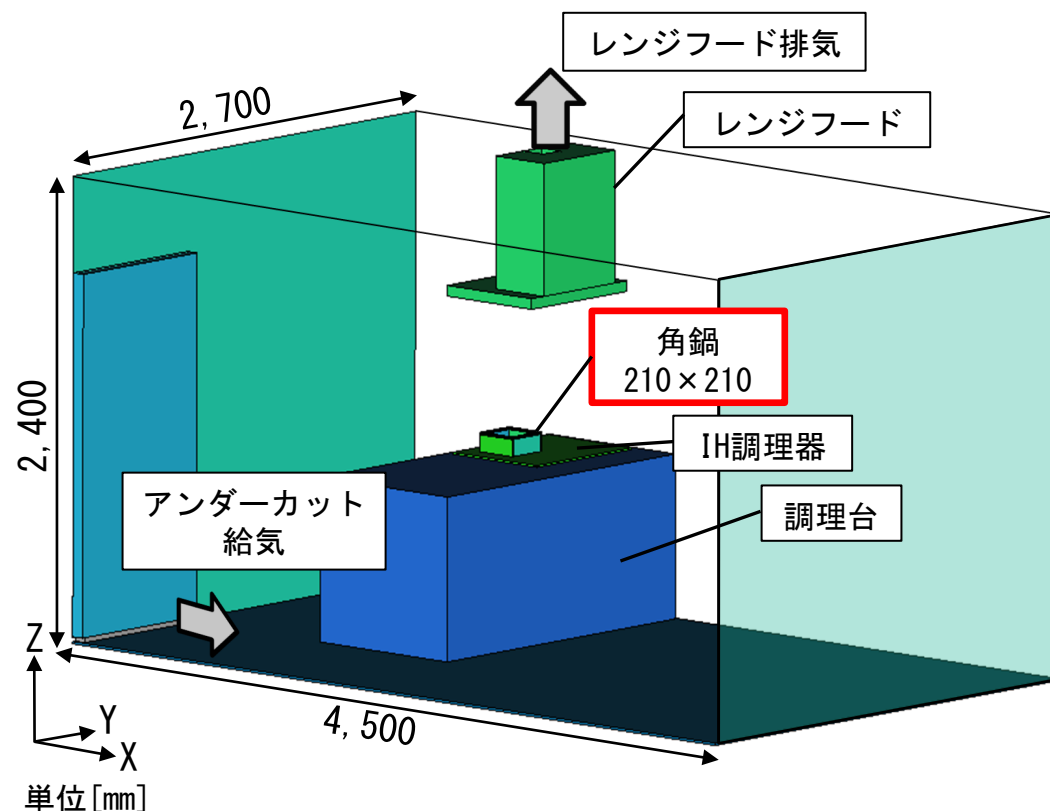


図 CFD解析モデル

気流はアンダーカットから流入、レンジフードから流出するとし、ともに流量規定とする。

表 2 CFD解析条件

| | | | |
|---------|--|-------------------------|---------------------------------|
| 計算コード | ソフトウェアクレイドルSTREAM ver. 2022 | | |
| 乱流モデル | 標準 $k-\epsilon$ モデル | | |
| 解析要素数 | 140 (X) × 189 (Y) × 90 (Z) = 2,381,400 | | |
| 移流項精度 | QUICK | | |
| 熱境界 | 熱対流 | 鍋・水表面 | 100 [W/(m ² · K)] |
| | | その他の表面 | 温度対数則 |
| | 個体間 | 鍋-水 | 2,000 [kW/(m ² · K)] |
| | | IHレンジー調理台 | 断熱 |
| その他の個体間 | 熱伝導 | | |
| 壁面条件 | 輻射境界 | 輻射率 : 0.9 | |
| | 流速境界 | 一般対数則 | |
| 流入出境界 | 流出 | レンジフード | 流量規定 |
| | 流入 | アンダーカット | 流量規定 |
| 温度条件 | 水 | 100 [°C] 固定 | |
| | 外気温 | 20 [°C] | |
| | 初期温度 | 20 [°C] | |
| 汚染質 | 発生量 | 1.0 [1/s] = 3,600 [1/h] | |
| | 拡散 | パッシブスカラー | |
| 鍋内の水表面 | 従来モデル | 静止した水 | |
| | 沸騰モデル | 水蒸気発生領域 | |

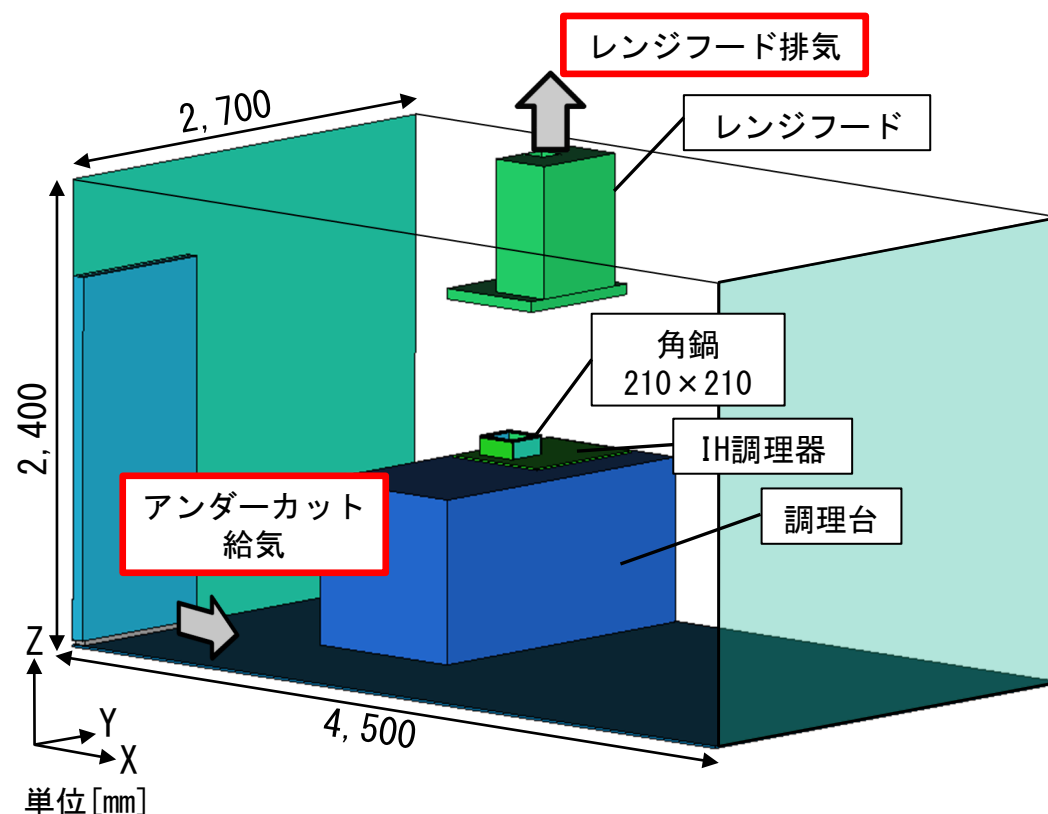


図 CFD解析モデル

既往の研究^{文1)}で作成した**沸騰モデル**と、比較対象として**従来モデル**を用いて**直接捕集率**を算出する。

表2 CFD解析条件

| | | | |
|---------|--|-------------------------|---------------------------------|
| 計算コード | ソフトウェアクレイドルSTREAM ver. 2022 | | |
| 乱流モデル | 標準 $k-\epsilon$ モデル | | |
| 解析要素数 | 140 (X) × 189 (Y) × 90 (Z) = 2,381,400 | | |
| 移流項精度 | QUICK | | |
| 熱境界 | 熱対流 | 鍋・水表面 | 100 [W/(m ² · K)] |
| | | その他の表面 | 温度対数則 |
| | 個体間 | 鍋-水 | 2,000 [kW/(m ² · K)] |
| | | IHレンジー調理台 | 断熱 |
| その他の個体間 | 熱伝導 | | |
| 壁面条件 | 輻射境界 | 輻射率 : 0.9 | |
| | 流速境界 | 一般対数則 | |
| 流入境界 | 流出 | レンジフード | 流量規定 |
| | 流入 | アンダーカット | 流量規定 |
| 温度条件 | 水 | 100 [°C] 固定 | |
| | 外気温 | 20 [°C] | |
| | 初期温度 | 20 [°C] | |
| 汚染質 | 発生量 | 1.0 [1/s] = 3,600 [1/h] | |
| | 拡散 | パッシブスカラー | |
| 鍋内の水表面 | 従来モデル | 静止した水 | |
| | 沸騰モデル | 水蒸気発生領域 | |

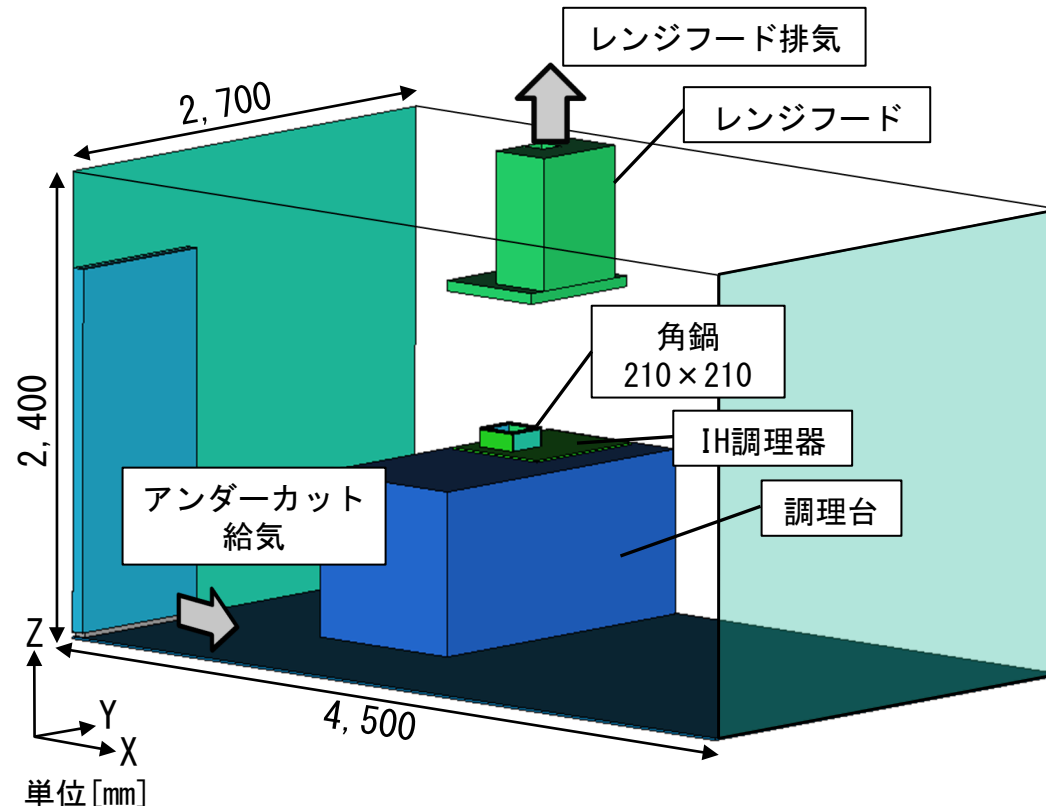


図 CFD解析モデル

文1) 王、赤林ら：「住宅用電化厨房を対象とした排気捕集率に関する研究(その1)：数値流体解析によるレンジフードの直接捕集率の再現方法に関する研究」、日本建築学会環境系論文集 第88巻 第810号 2023

従来モデルでは、角鍋内の水表面の境界条件は静止させ、温度を100[°C]に固定している。

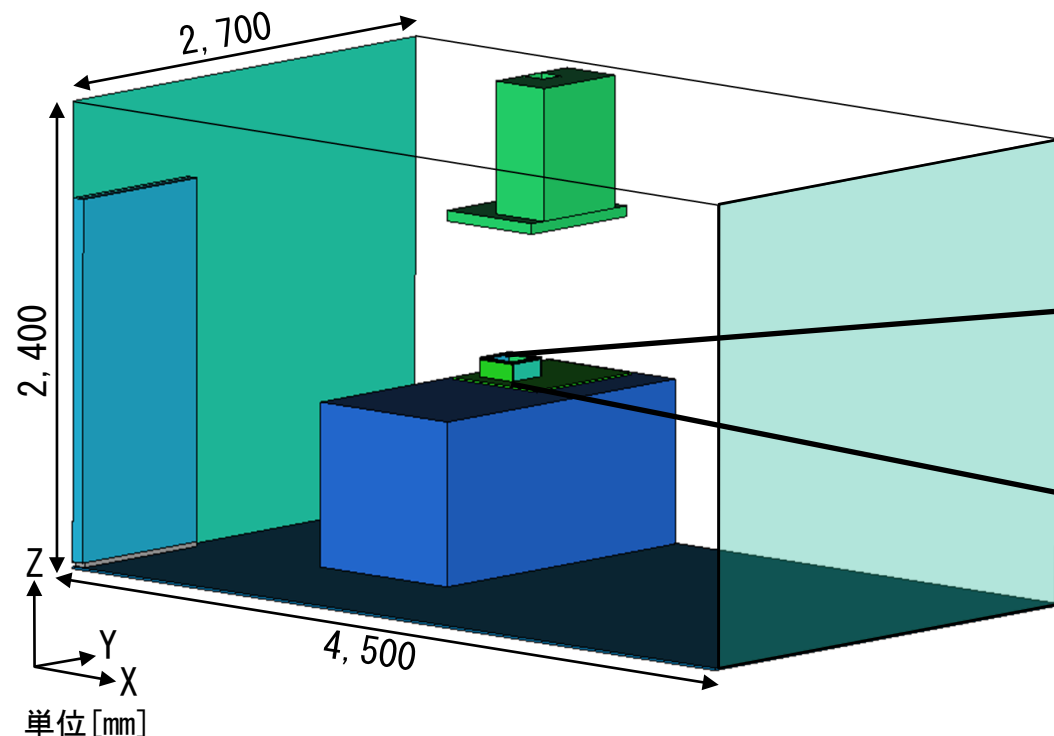
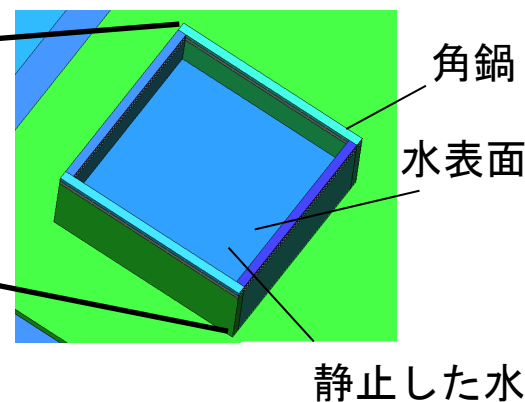
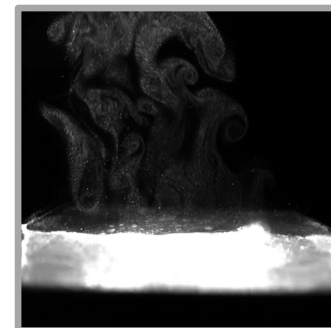


図 CFD解析モデル



CFD内の角鍋モデル
図 従来モデルの概要

既往の研究文¹⁾で作成した**沸騰モデル**では、水表面に**水蒸気発生領域**を設ける。



動画 水表面の様子

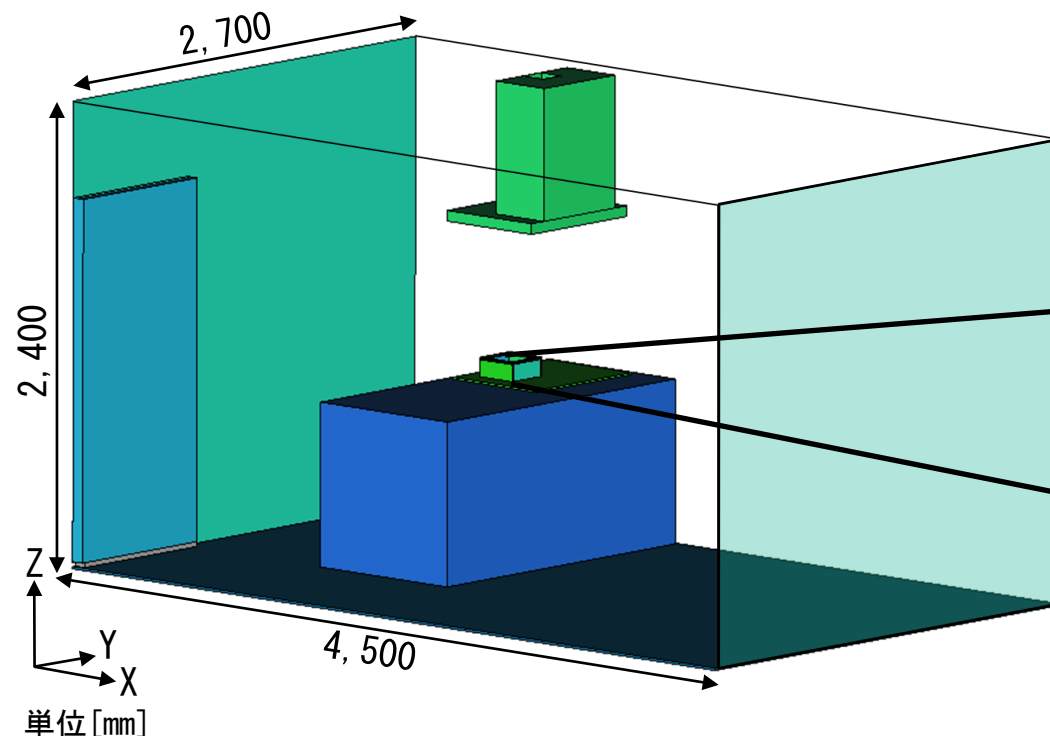
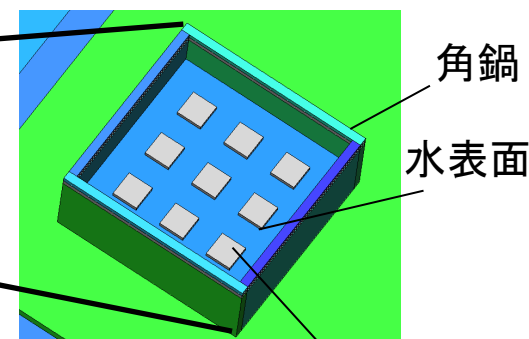


図 CFD解析モデル



(a) CFD内の角鍋モデル

図 従来モデルの概要

文1) 王、赤林ら：「住宅用電化厨房を対象とした排気捕集率に関する研究(その1)：数値流体解析によるレンジフードの直接捕集率の再現方法に関する研究」、日本建築学会環境系論文集 第88巻 第810号 2023

鍋内の水表面に均等に9か所の水蒸気発生領域を設けることで、沸騰による鍋上の熱上昇気流への影響を模擬する。

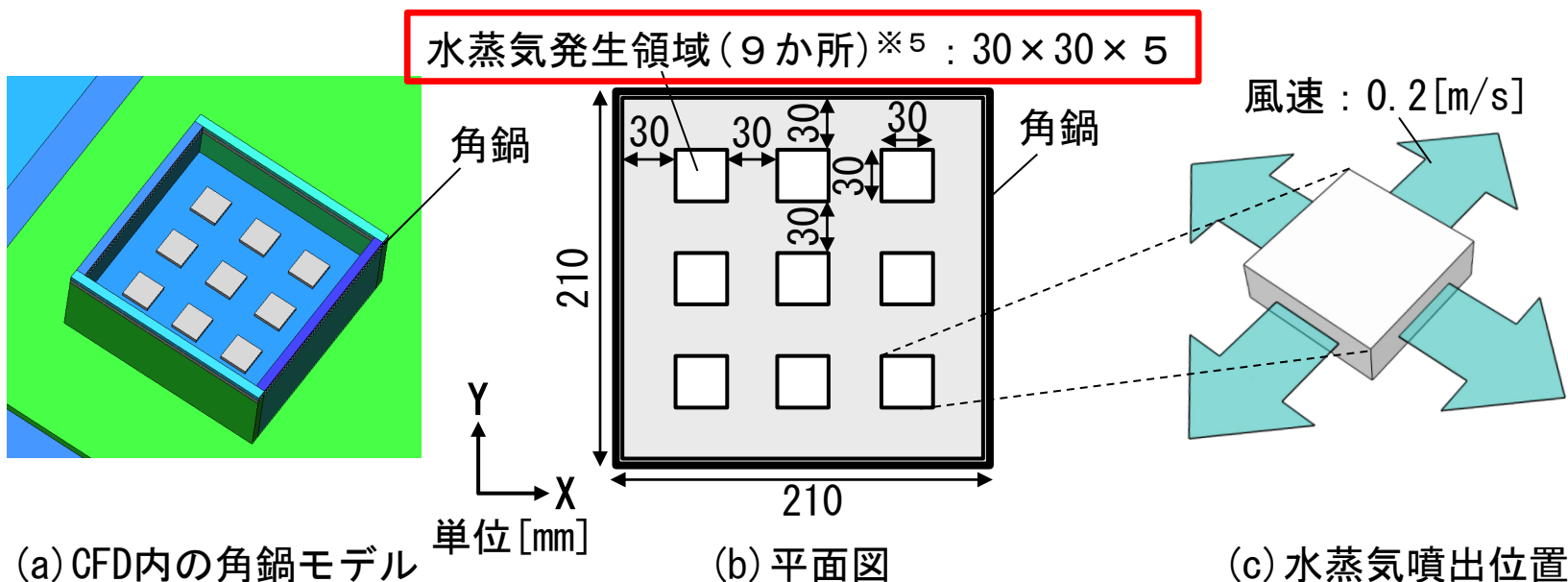


図3 沸騰モデルの概要

※5 IHレンジの熱出力が1,400[W]、熱効率を90[%]、水の蒸発潜熱量を2,257[kJ/kg]とすると、単位時間に生じる水蒸気の体積は949.0[cc/s]となる。水蒸気発生領域から発生させる合計風量は $0.2[m/s] \times 30[mm] \times 5[mm] \times 4面 \times 9か所 = 1,080[cc/s]$ となりおおむね一致する。

沸騰時の水蒸気噴出による影響を模擬するため、水蒸気発生領域 (30[mm] × 30[mm] × 5 [mm] (高さ)) の側面から気流 (100[°C]) を発生させる。

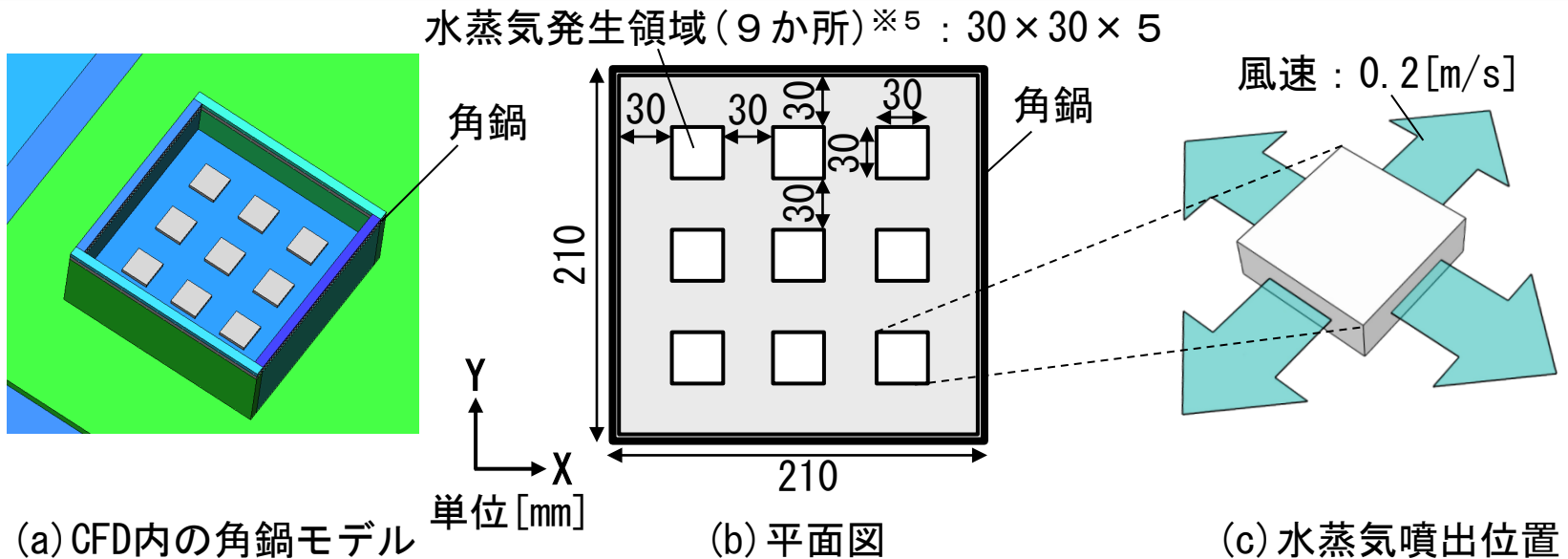


図3 沸騰モデルの概要

※5 IHレンジの熱出力が1,400[W]、熱効率を90[%]、水の蒸発潜熱量を2,257[kJ/kg]とすると、単位時間に生じる水蒸気の体積は949.0[cc/s]となる。水蒸気発生領域から発生させる合計風量は $0.2[m/s] \times 30[mm] \times 5[mm] \times 4面 \times 9か所 = 1,080[cc/s]$ となりおおむね一致する。

PIV※4 解析結果^{文1)}より、水蒸気発生領域から発生する**気流速度**を**0.2 [m/s]**と設定する※5。

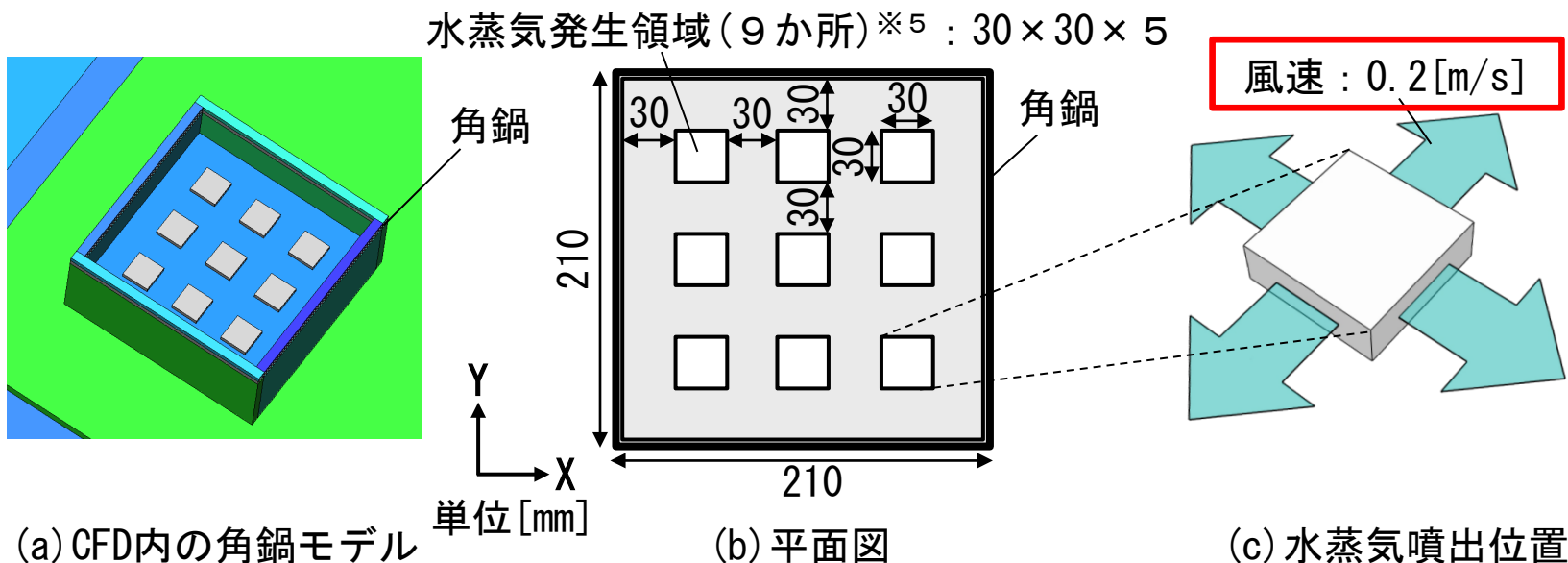


図3 沸騰モデルの概要

- ※4 粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry) の略称。流れの中に微細なトレーサー粒子を混入させ、その動きを動画として撮影し、個々の微粒子あるいは微粒子群の移動距離と撮影間隔から速度ベクトルを算出する方法の総称。
- ※5 IHレンジの熱出力が1,400 [W]、熱効率を90 [%]、水の蒸発潜熱量を2,257 [kJ/kg]とすると、単位時間に生じる水蒸気の体積は949.0 [cc/s]となる。水蒸気発生領域から発生させる合計風量は $0.2 \text{ [m/s]} \times 30 \text{ [mm]} \times 5 \text{ [mm]} \times 4 \text{ 面} \times 9 \text{ か所} = 1,080 \text{ [cc/s]}$ となりおおむね一致する。
- 文1) 王、赤林ら：「住宅用電化厨房を対象とした排気捕集率に関する研究(その1)：数値流体解析によるレンジフードの直接捕集率の再現方法に関する研究」、日本建築学会環境系論文集 第88巻 第810号 2023

実験・CFD解析の結果

実験では各caseにおいて3回ずつ測定を行い、直接捕集率は中央値となる実験結果を採用する。

実験の測定結果より、レンジフード排気量150[m³/h]の場合 (case1)、直接捕集率は64.9[%]となる。

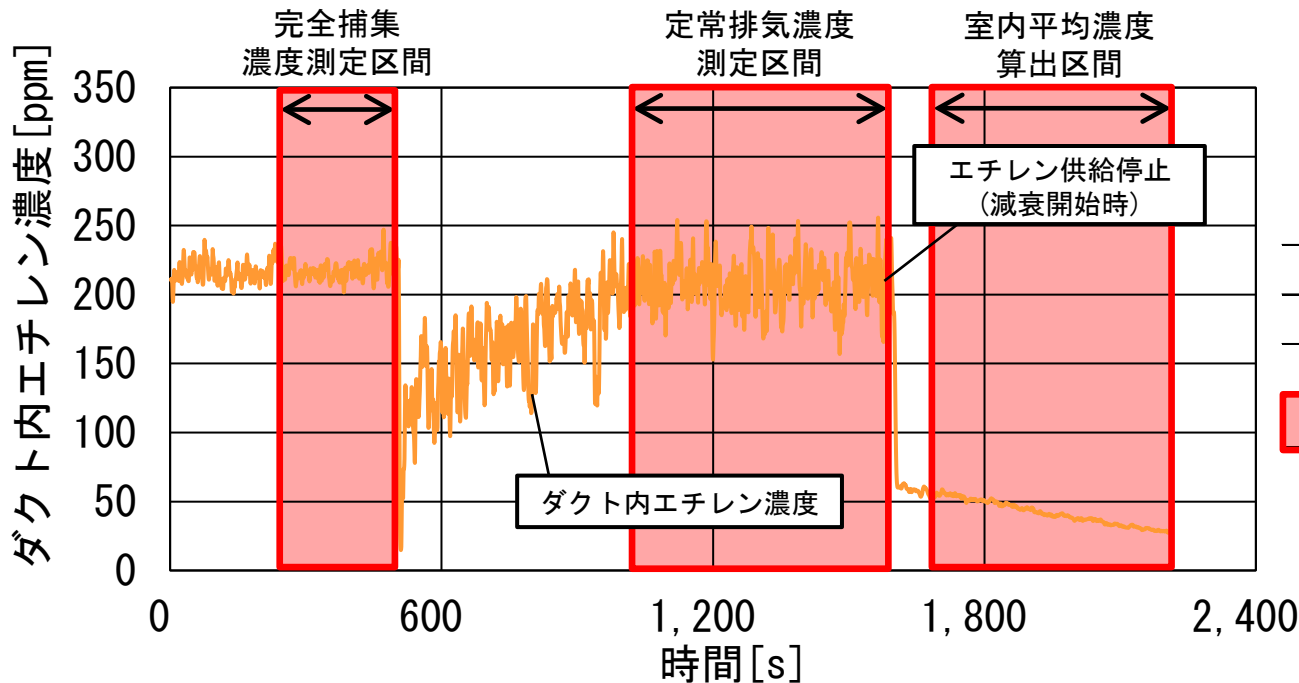


表 測定結果

| | |
|--------|-------------|
| 完全捕集濃度 | 217.7 [ppm] |
| 室内平均濃度 | 66.6 [ppm] |
| 定常排気濃度 | 207.8 [ppm] |
| 直接捕集率 | 64.9 [%] |

図4 排気ダクト内のエチレン濃度推移 (case1 レンジフード排気量150[m³/h])

今回の排気風量の範囲では、レンジフード排気量が大きくなるほど、直接捕集率は小さくなる傾向がある。

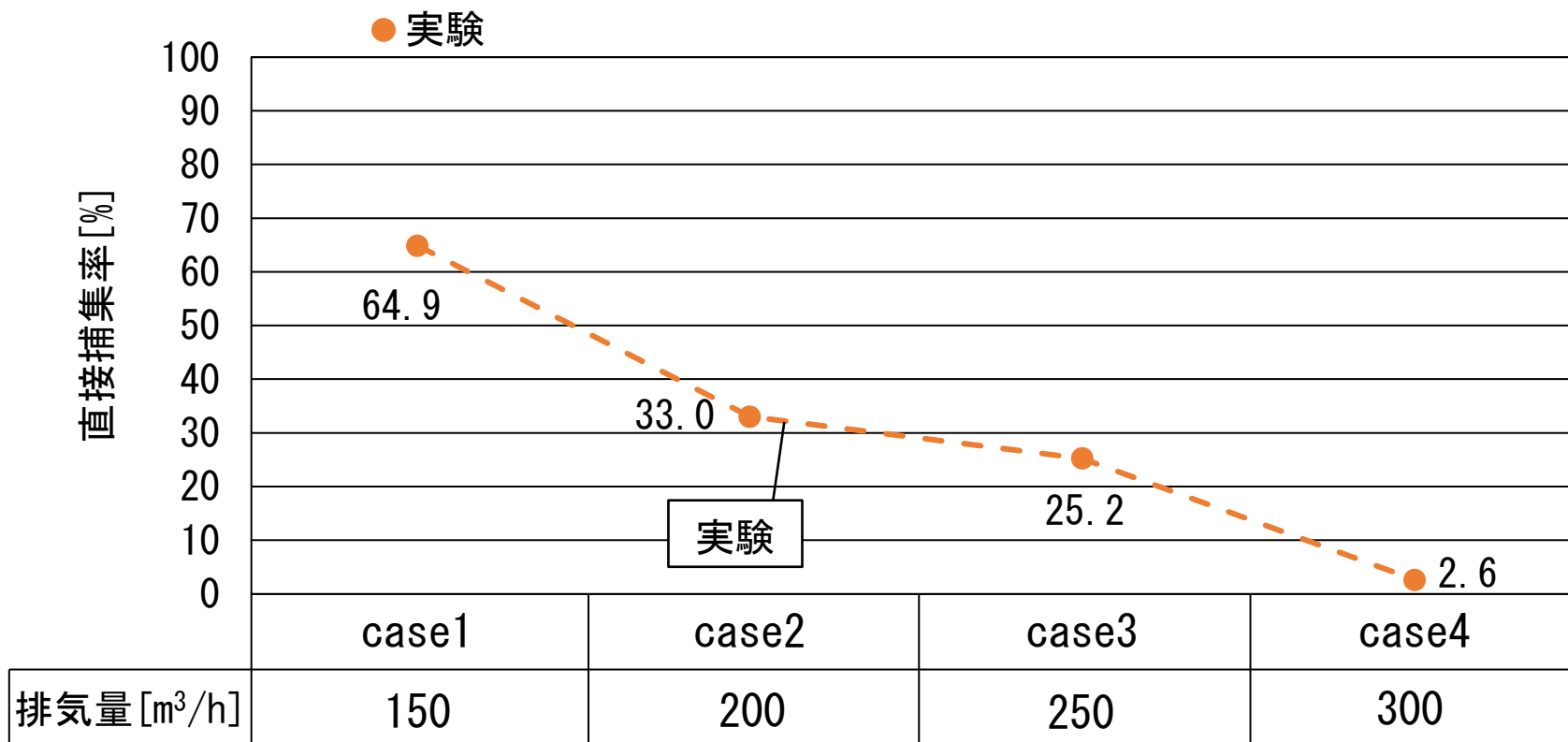


図5 実験とCFD解析の直接捕集率の比較

レンジフードの排気量の増加に伴いアンダーカットからの給気風速が増加し、その影響で給気による鍋上の熱上昇気流への擾乱の影響が大きくなったためと考えられる。

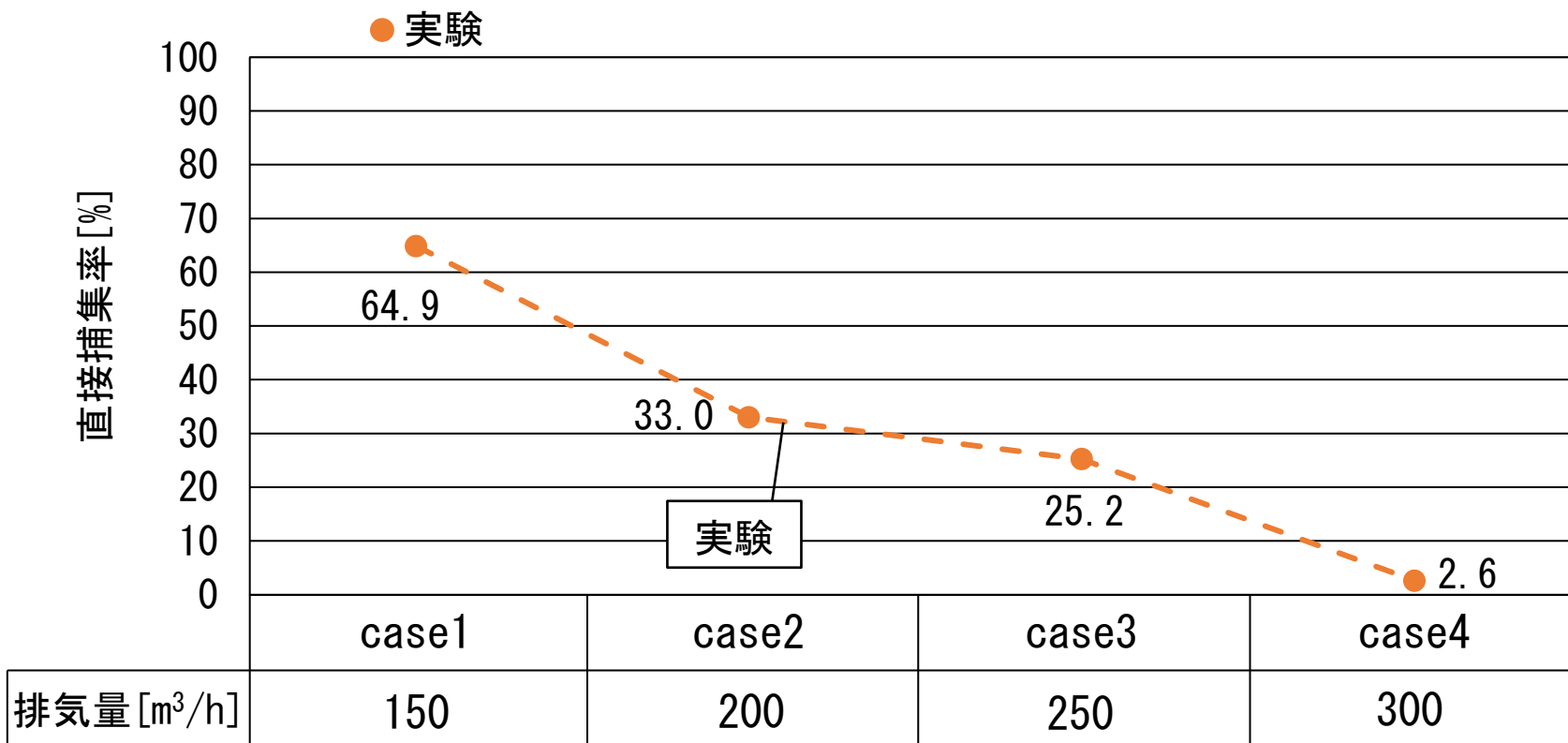


図5 実験とCFD解析の直接捕集率の比較

実験とCFD解析の直接捕集率の差は、従来モデルで11.1～32.8ポイント、沸騰モデルで1.9～23.8ポイントとなる。

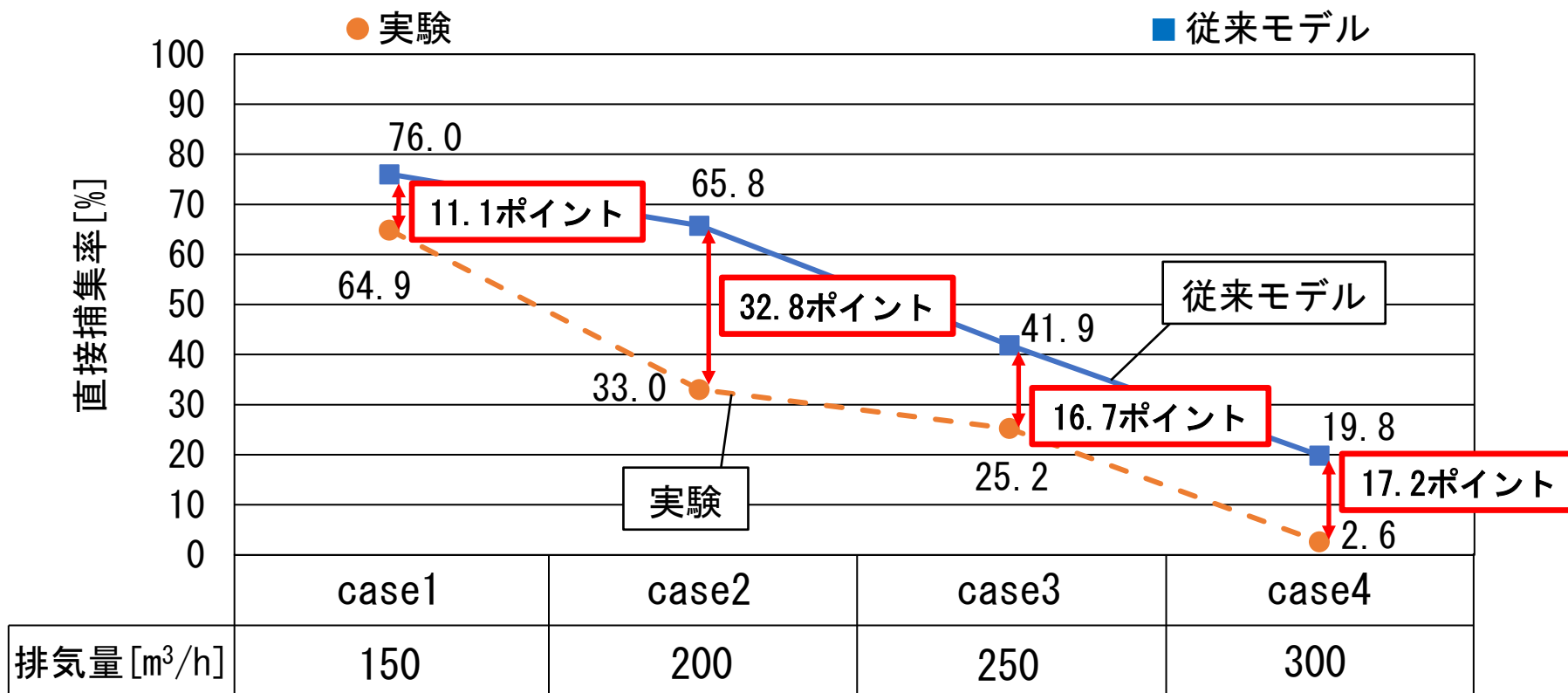


図5 実験とCFD解析の直接捕集率の比較

実験とCFD解析の直接捕集率の差は、従来モデルで11.1～32.8ポイント、**沸騰モデル**で**1.9～23.8ポイント**となる。

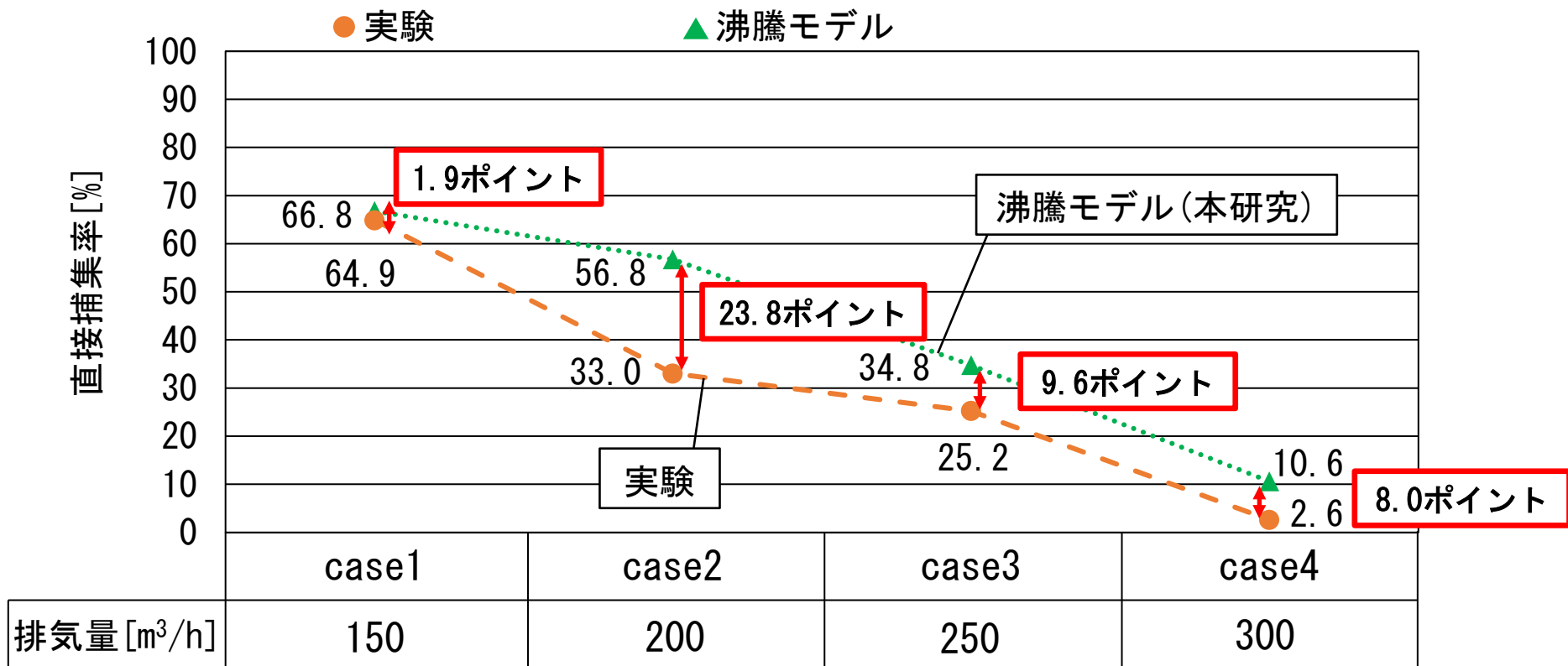


図5 実験とCFD解析の直接捕集率の比較

従来モデルよりも**沸騰モデル**を用いたCFD解析の方が、**直接捕集率**の**予測精度が向上**している。

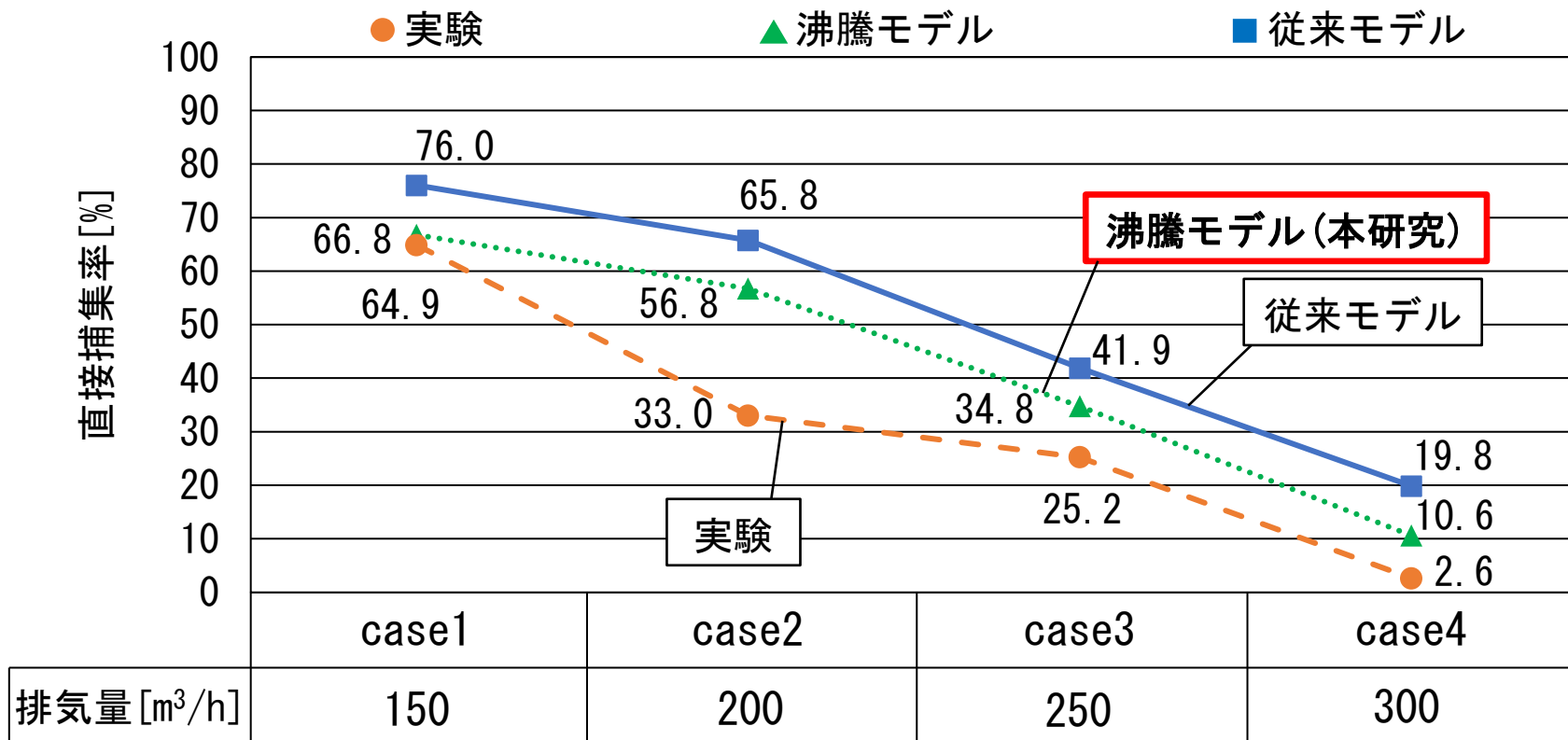


図5 実験とCFD解析の直接捕集率の比較

従来モデルよりも**沸騰モデル**を用いた**CFD解析**の方が、**実験と近い結果**となる。

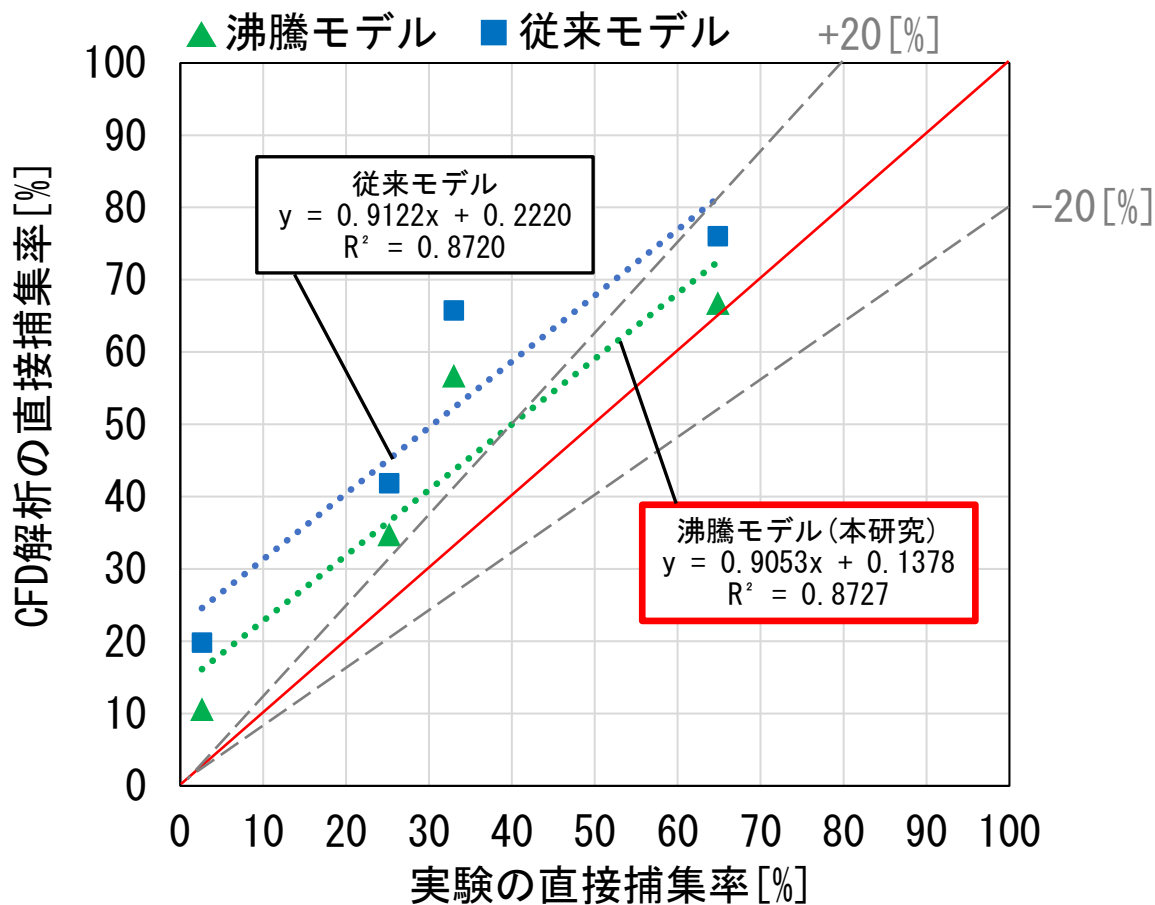


図6 実験とCFD解析の直接捕集率の相関

住宅用電化厨房を対象としたCFD解析では、水面に**沸騰モデル**を設けることにより、**給気による擾乱がある場合**でも、レンジフードの**直接捕集率の予測精度を向上させることが可能**である。

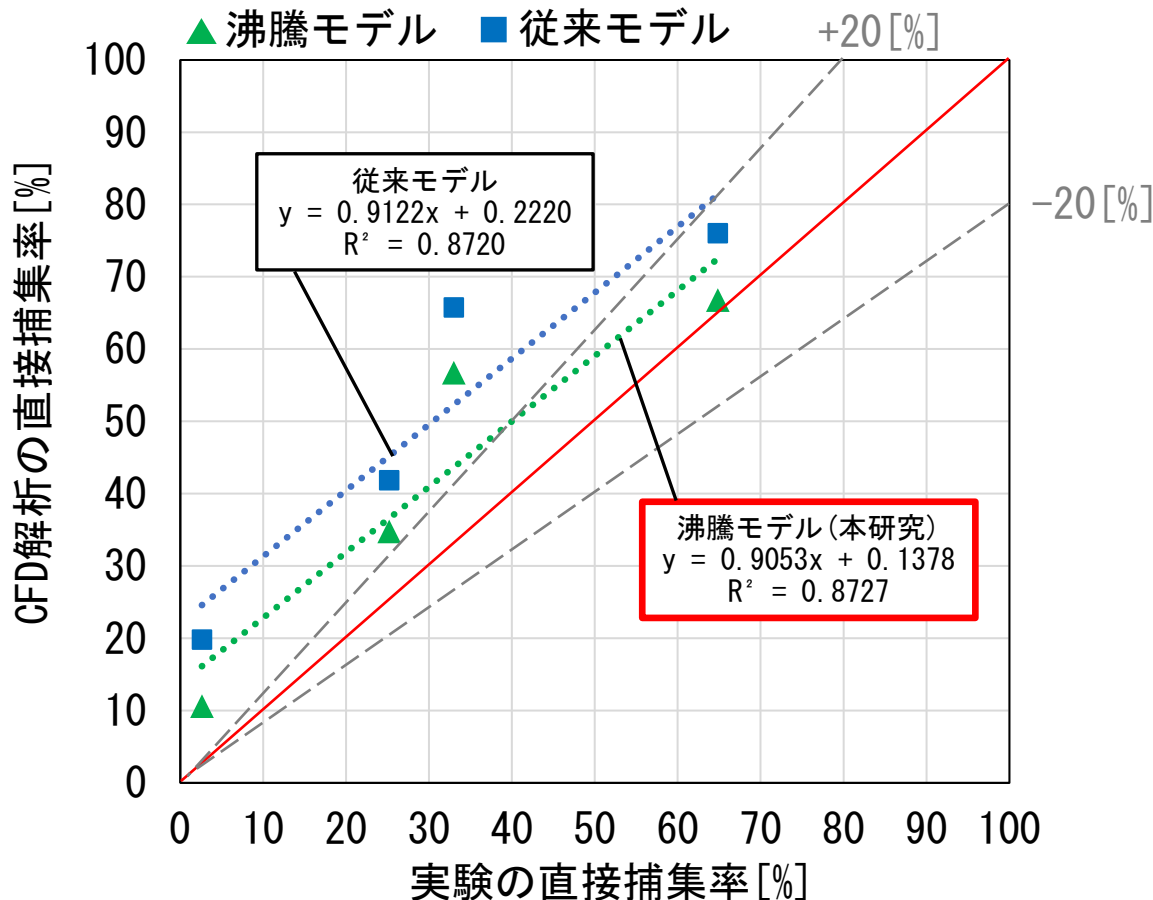


図6 実験とCFD解析の直接捕集率の相関

まとめ

- ① 今回の排気風量の範囲では、給気による擾乱がある場合、レンジフードの排気量が大きくなるほど直接捕集率は小さくなる傾向がある。
- ② 従来モデルと比較して沸騰モデルを用いたCFD解析のほうが、実験の直接捕集率の値に近い結果となる。
- ③ 住宅用電化厨房を対象としたCFD解析では、水面に沸騰モデルを設けることにより、給気による擾乱がある場合でも、レンジフードの直接捕集率の予測精度を向上させることが可能である。

