

高効率捕集性能を有する局所排気装置の設計手法に関する研究 (第4報) CFD解析による横風気流下の汚染物捕集性能の検討 Development of a Design of Local Exhaust Hood with High Capture Efficiency (Part4) Study on Capture Performance under Passing Airflow Condition by CFD Analysis

○ 鈴木 悠太 (大阪大学)	山中 俊夫 (大阪大学)
小林 知広 (大阪大学)	崔 ナレ (大阪大学)
小林 典彰 (大阪大学)	小森 美晴 (大阪大学)
Yuta SUZUKI ^{*1}	Toshio YAMANAKA ^{*1}
Tomohiro KOBAYASHI ^{*1}	Narae Choi ^{*1}
Noriaki KOBAYASHI ^{*1}	Miharu KOMORI ^{*1}

^{*1} Osaka University

In this report, CFD analysis was performed that reproduced the wind tunnel experiment in the previous report. The accuracy of CFD analysis was verified from the measured Capture Efficiency, airflow velocity distribution, and concentration distribution of passive contaminant. Although it is possible to get a rough idea from the results, there is still a big problem in its accuracy. It can be said that the future task is to identify an appropriate analysis model by examining the turbulence model in the analysis and the pollutant generation method.

はじめに

工場など生産活動を行う空間では有害物質を含む空気の除去に局所排気装置を用いて排気する方法が主流である。この際、必要排風量の設計が性能に影響する重要なパラメータであるが、従来の必要排風量の設計¹⁾では経験的数値に基づいて一律に設定されている。フード捕集性能に影響を及ぼす要因が多数存在する現場において、一律に定められた設計値では最適な性能要件になりえるとは言い難い。よって本研究ではフード捕集性能を示す指標である捕集率に着目し、外乱条件下における局所排気装置のフード捕集性能を実験、CFD解析により評価を行い、多様な環境条件の中で決定されるフード捕集性能を直接的に把握する設計指標の提案へ繋げることを目的とする。本報では前報²⁾で報告した実験での捕集率、分布測定実験を再現したCFD解析を行い、等温パッシブ汚染源におけるCFD解析の精度検証を行った結果について報告する。

に示す。本解析は前報²⁾の風洞実験を概ね再現したCFD解析を行う。解析時間の削減のため、解析領域は局所排気装置を設置した測定胴下流空間のみをモデル化した。再現する実験環境は汚染物性状を等温パッシブ汚染源、汚染源フード下端面間距離30cm条件とした。風洞風による横風気流を流入境界、局所排気装置排気口(145mm×145mm)および風洞最下流面を流出境界としている。解析メッシュは前報²⁾で汚染源を球形スポンジ(直径100mm)としたため、汚染源近傍をテトラ(正四面体)メッシュで作成し、球形を再現した。(Fig.2 i) Contaminant) また直交格子メッシュとの整合性を図るため汚染源近傍領域を中心とした3方向全ての要素は三角柱メッシュで作成している。解析に用いた局所排気装置の形状をFig.3に示す。全ての形状で板厚は3mmである。前報²⁾で局所排気装置は5形状で実験を行っているが本解析ではより普遍的と思われる3形状のみとした。局所排気装置は実験時と同様の位置に設置している。解析概要をTable1に示す。乱流モデルには標準k-εモデル(以下SKEモデル)及び一部条件でRealizable k-εモデルを用いている。壁面近傍処理については

1. 解析概要

1.1 解析領域

解析領域をFig.1に、メッシュレイアウトをFig.2

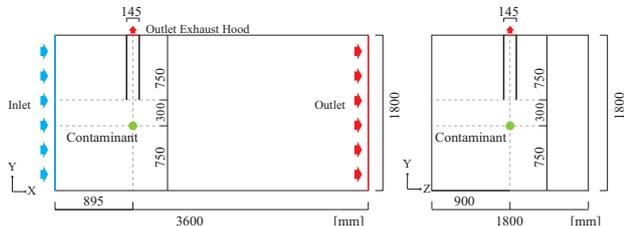


Fig.1 Analysis domain

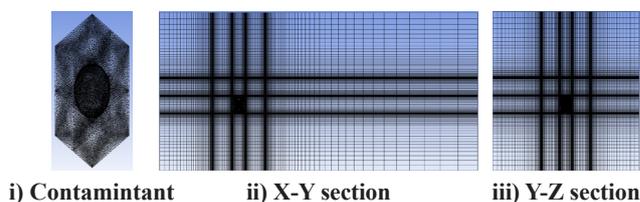


Fig.2 Mesh Layout

Table1 Summary of CFD Analysis

Hood type	Canopy Hood	Flanged Hood	Duct
CFD code	Ansys Fluent 19.2		
Turbulence Model	Standard k-ε model (SKE) Realizable k-ε model		
Species Model	Species Transport		
Contaminant Condition	Physical characteristics: Air Mass Diffusivity: 3.7625e-05 [m ² /s]		
Algorithm	Steady State (SIMPLE)		
Discretization Scheme	QUICK		
Boundary Condition	Inlet	Table2 Reference : Analysis Condition	
	Outlet	Exhaust Hood	5.0515 [m/s]
		Wall	Gauge Pressure : 0 [Pa]
	Walls	Standard Wall Function(SWF)(Case1~5) Enhanced Wall Treatment(EWT)(Case4)	
Total Number of Cells	CanopyHood	5,960,687	
	FlangedHood	4,916,928	
	Duct	4,897,118	

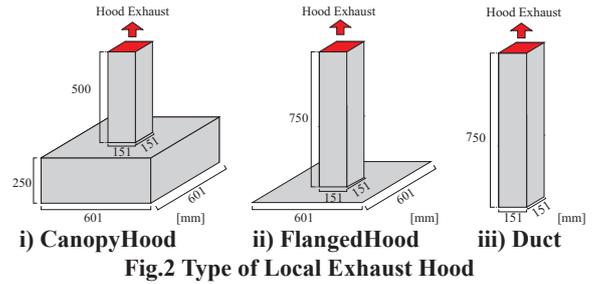
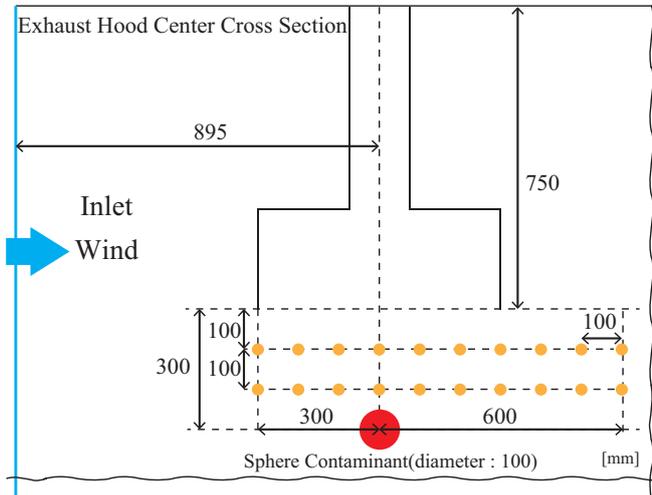


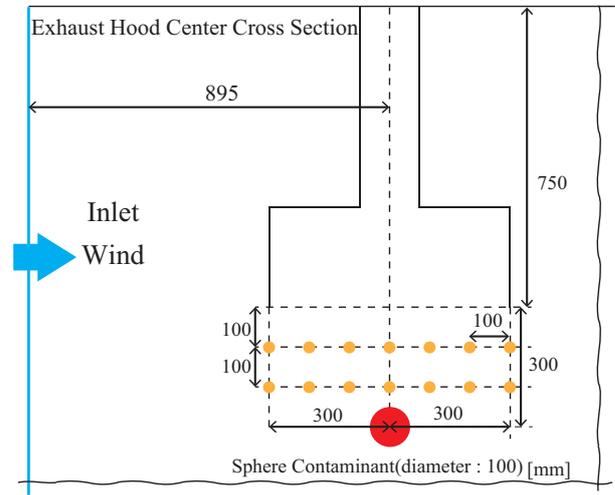
Fig.2 Type of Local Exhaust Hood

Table2 Analysis Condition

Analysis Condition	Inlet Boundary		
	Velocity [m/s]	Turbulent Kinetic Energy k [m ² /s ²]	Turbulent Dissipation Rate ε [m ² /s ³]
Case1	0.1	8.69656E-06	3.61.E-06
Case2	0.2	3.09442E-06	4.13229E-07
Case3	0.3	1.9495E-06	1.172903E-07
Case4	0.4	1.48829E-06	3.58974E-08
Case5	0.5	2.76107E-06	3.35614E-08



i) Velocity distribution



ii) Concentration distribution

Fig.3 Monitoring Point

SKE モデルでは標準壁関数を、Realizable k-ε モデルは壁面からの距離に基づく乱流レイノルズ数によって粘性の影響を考慮するモデルと壁関数を使い分ける改良型壁面処理 (Enhanced Wall Treatment) を採用した。また既報³⁾では汚染源領域に空間発生を規定し、Passive Scalar Contaminant を想定したが、本解析では実験時のスポンジが気流場へ与える影響を考慮し、汚染物内部を計算対象外とし、汚染物発生を汚染物表面からの面発生とした。発生量は実験と同等 (3.20L/min) となるよう発生風速を与えた。(0.001697653m/s) 汚染物ガス性状は空気とし、周辺空気における拡散係数には以下に示す式の通り、CO₂ と He の空気に対する拡散係数を実験時の両ガスの体積発生量で重みづけ平均した値とした。(Eq.1) 以上により、実験時における汚染源ガスの発生方法を再現している。

$$D = \frac{D_{CO_2} \times V_{CO_2} + D_{He} \times V_{He}}{V_{CO_2} + V_{He}} \quad \begin{matrix} D: \text{Diffusivity} [m^2/s] \\ V: \text{Volume Flow Rate} [L/min] \end{matrix} \quad (\text{Eq.1})$$

1.2 解析条件

解析条件を **Table2** に示す。本解析は横風気流風速と局所排気装置形状をパラメータとして解析を行った。各条件における流入風の乱流諸量には風洞実験時に熱線風速計で測定した結果を用いている。Case4 条件のみ Realizable モデルで解析を行った。また実験時の風速分布、汚染物濃度分布測定との比較を行うため、流れ方向フード中心断面上に実験と同様の箇所モニター点を設置した。(風速分布 20 点、濃度分布 14 点) (**Fig.3**)

2. 解析結果

2.1 汚染物捕集率の比較

解析結果から算出した捕集率を **Fig.4, Table3** に示す。**Table3** には壁面処理を変化させた条件の捕集率結果も記載している。解析結果には前報²⁾にて測定した 3 つの形状の実験結果も合わせて記載している。捕集率は

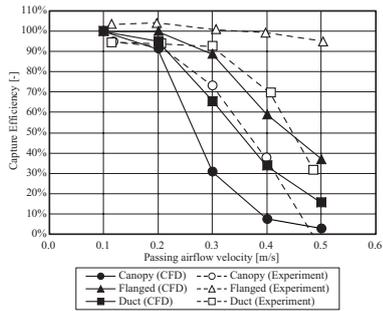


Fig.4 Relationship between passing airflow velocity and Capture Efficiency

Table3 Concentration of Outlet Boundary and Capture Efficiency

Concentration of Contaminant [ppm]	CanopyHood			FlangedHood			Duct			
	Hood	Leeward Outlet	Capture Efficiency	Hood	Leeward Outlet	Capture Efficiency	Hood	Leeward Outlet	Capture Efficiency	
Case1	1876.62	0.00	1.00	2479.21	0.00	1.00	2006.34	0.00	1.00	
Case2	2718.73	50.48	0.91	3353.29	0.93	1.00	2689.57	28.47	0.95	
Case3	1564.85	433.30	0.31	3972.91	62.68	0.89	2518.29	162.48	0.66	
Case4	SKE	536.24	582.46	0.08	3568.52	221.14	0.59	1745.33	306.13	0.34
	Realizable k-ε	858.23	1193.47	0.06	9039.31	189.62	0.81	4032.12	532.01	0.40
Case5	268.92	609.49	0.03	2769.53	330.63	0.37	1014.52	384.98	0.16	

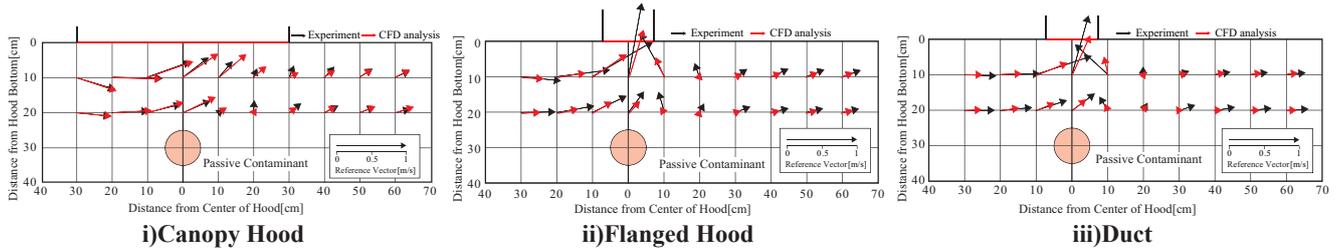
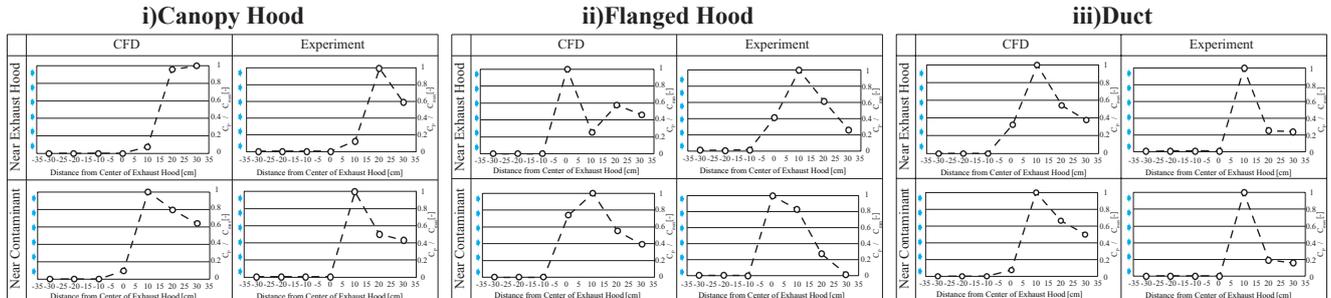


Fig.5 Velocity Distribution

Table4 Concentration Distribution



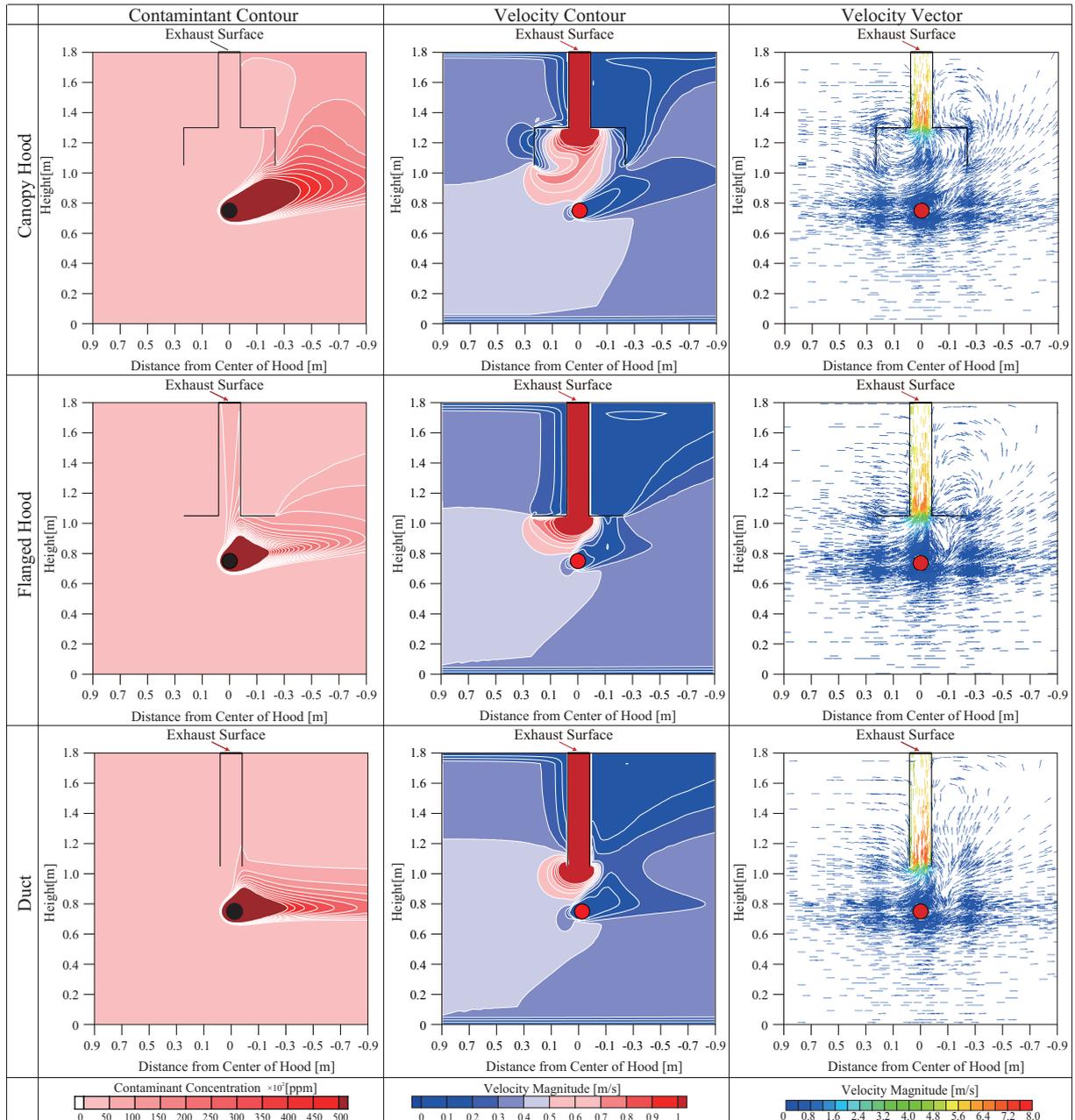
局所排気装置面を通過する汚染物量を局所排気面、下流側壁面を通過する汚染物量の和で除すことで算出した。実験時同様、横風気流流速が大きくなるにつれ、局所排気面で捕集される汚染物量は小さくなっていく傾向が確認されたが、3形状とも実験値を正確に再現することが出来ない結果であった。しかし、捕集率はFlangedHood、Duct、CanopyHoodの順に高い結果であり、これは実験と同様の傾向であるため、本解析においては形状ごとの相対的な評価は可能であると言える。またRealizable k-εモデル、壁面処理EWTモデルの場合ではSKEモデルに比べ捕集率が向上し、解析モデルの依存性が大きいことが明らかとなった。

2.2 フード下部空間分布の比較

Case4条件でのモニター点における風速分布の実験値と解析値の結果をFig.5に、濃度分布の結果をTable4に示す。風速分布では各モニター点におけるx、y方向成分風速から算出した合成風速とそのなす角を示している。濃度分布については汚染源近傍断面、排気フード近傍断面ごとに各モニター点での濃度 C_p を同断面での最大濃度 C_{max} で基準化した値を示す。風速分布を見ると全測定点において、実験時の風向を概ね再現できている。しかし、排気フード中心軸上において排気フー

ド方向への風速に実験値との誤差が発生しており、捕集率に影響を与えたものと示唆される。濃度分布でも実験同様、各断面にて横風気流の影響を受けていることが確認され、各測定断面における濃度最大値を概ね再現することが可能であると言える。しかし、ここには示していないが汚染物濃度自身は実験と大きな差がみられた。またTable5にCase4でのSKEモデルでの風洞中心断面排気フード近傍の汚染物、風速コンター図、風速ベクトル図を示す。汚染物コンター図より、FlangedHoodの汚染物拡散が他形状よりも小さいことが確認できる。これはベクトル図から水平方向に伸びたフランジにより排気気流の水平方向の吸込み効果を向上させ、横風気流により流された汚染物を下流側にて捕集するためと考える。また、Case4での横風気流風速0.4m/sでは汚染源は排気気流の影響を直接受けず、横風気流に流された汚染物が捕集されていることが確認された。これら実験値との整合性が良好ではない原因として乱流モデルの影響と汚染物発生方法の差異が考えられる。本解析では主にSKEモデルを用いていることから球体後流の乱れの生成が過大評価され、そのことから乱流拡散が過大に評価されたものと考えられる。また、前報²⁾の実験では多孔質性であるスポンジを用いた汚染物発生のため、スポンジ表面の気流場へ

Table5 Analysis result (Case4 , passing airflow velocity:0.4m/s)



の影響およびスポンジ内部を通過する気流による汚染物拡散の影響が考えられるが本解析では内部を通過する汚染物拡散の影響を考慮出来ていないことも要因として示唆される。

おわりに

本報ではCFD解析を用いて、前報で行った球形の等温パッシブ汚染源を用いた汚染物捕集実験の精度検証結果について報告した。結果より、本解析モデルでは大まかな気流性状、汚染物挙動の把握は可能であるものの、その精度としては不十分な結果であると言える。よって今後はモデルの依存性を考慮し、適切な乱流モデルの同定を行った上で再度精度検証を行った後、パラメトリックスタディを行っていく所存である。

謝辞

本研究は科研費挑戦的研究（萌芽）19K22011の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 社団法人 空気調和・衛生工学会編著：新版工場換気，第3章局所排気装置 3.3節、3.4節、pp.23-pp.33
- 2) 小森、山中、小林ら：高効率捕集性能を有する局所排気装置の設計手法に関する研究（第3報）横風風速及びフード形状が汚染物捕集性能に及ぼす影響，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表論文集，2021年3月掲載予定
- 3) 鈴木、山中、小林：高効率捕集性能を有する局所排気装置の設計手法に関する研究（第2報）吸い込み口形状が横風条件下における排気性能に及ぼす影響，令和二年度空気調和・衛生工学会学術講演会光栄論文集，講演番号 D-36