

CFD解析による レーザー除染集塵フードの吸引性能向上に関する研究

田中 聖一朗^{*1}・今井 久^{*2}・佐藤 光浩^{*3}・木川田 一弥^{*4}・井村 英樹^{*5}

原子力発電所や放射線利用施設等の廃止措置への適用に向けて、レーザー技術を活用した除染システムの開発を行っている。レーザー除染では、レーザー照射に伴い発生する切削粉を回収する技術が重要となる。本稿では、CFD解析を用いたケーススタディにより、切削粉の飛散を抑え、効率的な吸引回収を可能とする集塵フード形状改良の検討を行った。そして、この検討結果をもとに集塵フードを設計・製作し、気流確認実験を行うことによりその有効性を検証した。検証の結果、現行フードと比較して、フード内の吸引負荷を半分程度に軽減でき、吸引効率が向上することが確認された。

キーワード：レーザー除染、廃止措置、放射性廃棄物、集塵、CFD解析、コアンダ効果

1. はじめに

我が国では、東京電力福島第一原発事故後、安全基準の見直し等もあり、運転中止を選択するなど、運転期間を終える発電所とともに廃止措置に移行する原子力発電所が増加する見通しとなっている。廃止措置の工程は、一般的に解体工事準備期間（第1段階）、原子炉周辺設備等解体撤去期間（第2段階）、原子炉本体等解体撤去期間（第3段階）、建屋等解体撤去期間（第4段階）に区分される。2024年3月末時点で、実用発電用原子炉施設のうち18基の廃止措置計画が認可されており、そのうち6基が第2段階にある¹⁾。今後、廃止措置の工程が進み、第3段階に入ると、原子炉本体等の放射線量の高い主要箇所を解体することとなり、より難度の高い作業に対応した新技術の導入が望まれる。その一つにレーザー除染技術があり、当社においても遠隔操作式のレーザー除染システムの開発を行っている^{2), 3)}。

レーザー除染は、集光されたレーザー光を対象物表面に照射し、急速加熱することで生じる蒸散・昇華・破砕現象等を利用して、固着・浸透した汚染物を除去する技術である。この技術は、水や研磨材等が不要な非接触加工であるため二次廃棄物が少なく、遠隔操作に向いているため作業員の被ばく低減が可能であるという特長を持つ。

一方で、レーザー除染を実施する際には、発生した切削粉等の微粒子が周囲に飛散するのを防止する対策が求められる。その対策として、レーザー光の照射範囲をフードで覆い、フードに接続された集塵装置により、切削粉等を吸引回収する方法を用いている。しかし、これまで

実施したレーザー除染試験では、切削粉がフード内で滞留し、これにレーザー光が遮られることによる性能低下等の事象が確認された。

本稿では、効率的な切削粉回収法の検討として、数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 解析 (以下、CFD解析) を用いたケーススタディにより、集塵フード形状の最適化を行うとともに、改良した集塵フードの有効性を検証するために実施した気流確認実験の結果について報告する。

2. レーザー除染システムの概要と課題

当社で開発したレーザー除染システムの構成を図-1に示す。本システムは、レーザーを制御し照射するレーザーヘッド部と、3次元の動作が可能な多関節のロボットアーム部、装置全体を移動させる台車部から構成され、ヘッド部には発生した切削粉を回収するための集塵装置のホースが接続されている。

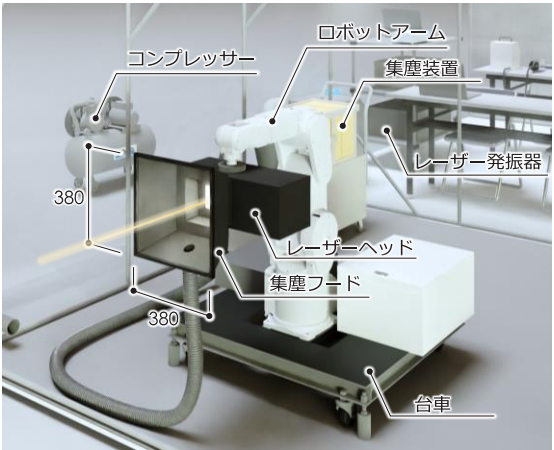
ヘッド部には前面が開いた集塵フードが装着されており、これをターゲット表面に押し当てて設置し、フード内を負圧に保った状態でレーザー光の照射を行う。これにより、レーザー光の周囲への散逸と、発生した切削粉の飛散防止を図っている。集塵フード内部のイメージを図-2に示す。フード上部にはスリット状の開口 (Inlet) が設けられており、ここから外気を取り入れ、気流により切削粉を下方に運び、円形開口 (Outlet) より排出する。排出後、切削粉はホースにて集塵装置に運ばれ、各種フィルタで回収される仕組みである (図-3)。なお、集塵装置内の吸引ブロワ (排風機) の性能は、静

*1 構造・材料研究部 *2 原子力部 *3 エネルギー事業技術部 *4 フロンティア研究部 *5 株式会社計測企画

圧条件下において風量 $3.5\text{m}^3/\text{min}$ である。

集塵フードとレーザーヘッドの接続部は、保護ガラス（図－4）で仕切られており、ヘッド内のミラー、レンズ等の光学系部品が汚染物質に接触しないように保護されている。また、保護ガラス表面にも切削粉等が付着するのを防ぐために、エア配管（赤いチューブ）を保護ガラスの外縁部に配置している。配管には細孔が設けられており、上下左右4方向からの対向吹き出しにより風のカーテン（エアカーテン）を形成し、粉塵を遮る仕組みである。

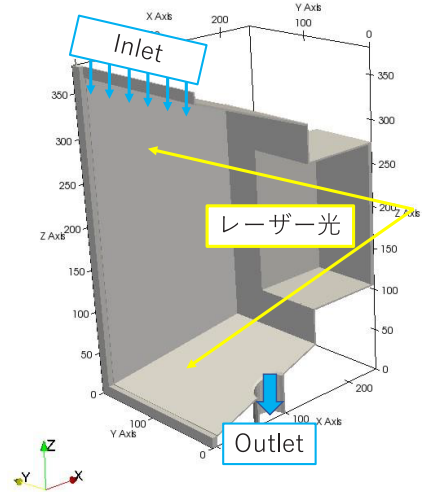
しかし、過去に実施したレーザー除染試験では、照射を繰り返すごとに保護ガラスが白化し（図－4（c））、レーザー光の強度が低下する状況となった。この原因は以下のように推察された。すなわち、外気導入による気流形成やエアカーテンの効果が十分に得られずに切削粉等がフード内で長期滞留し、保護ガラス表面に付着した。さらに、レーザー光が付着物に遮られて保護ガラスを通過できずに（レーザー光のエネルギーが付着物に吸収され）、ガラス窓の損傷（白化）につながった。この課題に対して、集塵フード内の気流を制御することにより、発生した切削粉を速やかに回収し、保護ガラスの損傷を抑制するための集塵フード形状の改良を試みた。



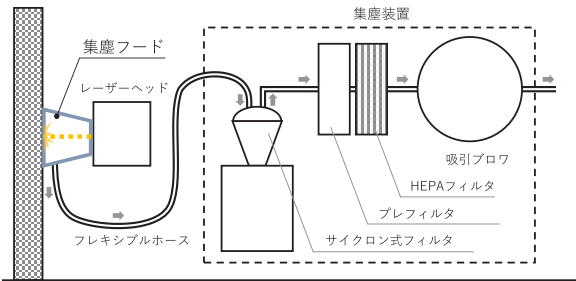
図－1 レーザー除染システムの構成

3. 粉塵滞留の原因と対策方針

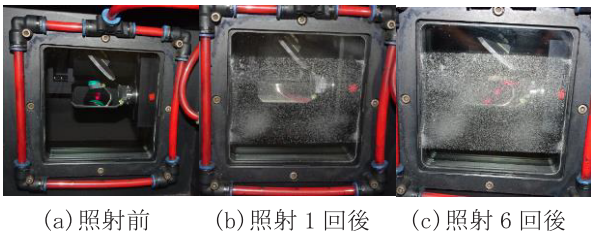
集塵フード内で発生した切削粉の回収には、コアンダ効果を応用した層状空気流（壁面噴流）を利用している。コアンダ効果とは、流体を壁面に沿って流すと、流体と壁面間の圧力が低下し、流れが壁に吸い寄せられる現象である。フード内において切削粉が長期滞留したのは、



図－2 集塵フード片側断面の斜視図



図－3 レーザー除染システムの切削粉回収系



図－4 レーザーヘッド部保護ガラスの変化

この層状空気流の効果を十分に得られなかったためと考えられる。その原因として以下が推察された。

- ① フード上部の Inlet からの外気導入（引き込み風量）が十分でなく、切削粉をフード排出口（Outlet）まで輸送するために必要な噴流速度が不足している。
- ② フード下部の Outlet の位置がレーザーの照射箇所から離れているため、下方への気流形成を妨げている（噴流の拡散・壁面からの剥離など）。

本研究では上記の原因に対して、CFD 解析によるケーススタディを行い、集塵フードの Inlet および Outlet の形状や配置等を改良することにより、フード内への外気導入の高効率化と集塵効率の向上を図った。

なお、前章にて述べた保護ガラス外縁部に設けたエア配管については、対向吹き出しによる気流衝突が外乱と

なり、Inlet から Outlet への一方向気流の場に悪影響を及ぼすおそれがあるため、設けないこととした。

4. CFD 解析による集塵フード形状の検討

4.1 CFD 解析の概要

現行の集塵フードを基準として形状を変化させ、さまざまな条件で CFD 解析を行うことにより、最適なフード形状を検討した。CFD 解析は、以下の 2 ステップで行った。

- ① 2 次元解析：計算負荷低減のために 3 次元形状から断面を抽出した 2 次元簡略化モデルを用いてケーススタディを行い、切削粉が流れやすく集塵装置の吸引負荷が少なくなるような Inlet 部および Outlet 部の形状要件を探索した。
- ② 3 次元解析：上記の形状要件を踏まえて改良モデルを作成し、3 次元解析により現行モデルとの比較を行い、性能を評価した。

解析には直交格子を採用した STREAM⁴⁾ を使用した。直交格子を採用した解析ソフトは、メッシュデータ作成が容易であるが、斜め形状や曲面等を有する複雑な解析対象に対しては適切なモデル化に課題がある。そのため、カットセル法 (Cut Cell)⁵⁾ を用いて計算精度を確保した。カットセル法とは、物体と交差するセルを切断し、物体形状を直線や平面で近似して表現する手法である。

表 1 に解析条件を示す。空気の流れは、温度一定 (20℃) で非圧縮性流体として解析を行った。

表 1 解析条件

解析領域 (現行モデル)	2 次元	250mm(x)×10mm(y)×580mm(z)
	3 次元	255mm(x)×400mm(y)×600mm(z)
メッシュ数 (現行モデル)	2 次元	250(x)×1(y)×581(z)=145, 250
	3 次元	261(x)×166(y)×269(z)=11, 654, 694
定常/非定常	定常	
乱流モデル	標準 k-ε モデル ⁶⁾	
壁面境界条件	対数則 ⁶⁾	

4.2 2 次元解析

2 次元解析では、フード形状に関して以下 2 項目の検討を行った。

- ① フード下部 Outlet の形状・配置
- ② フード上部 Inlet 部の形状

基本形状となる現行フードの解析モデルおよび境界条

件を図 5 に示す。事前確認として計算格子 (解析メッシュ) のサイズの影響に関して検討を行い、Inlet 幅 10mm に対して格子サイズを 1mm 程度に設定するのが望ましいことを確認した。解析領域の奥行 (厚さ) は 10mm とした。圧力 P は大気圧を基準 P=0 (吸引部では $P < 0$) とした。Outlet (流境界) における吸引風量は 2 次元流れを想定して、 $Q=0.6\text{m}^3/\text{min}$ とした。

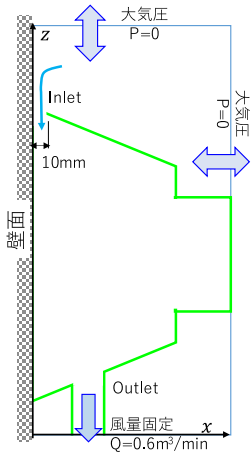


図 5 解析モデルおよび境界条件

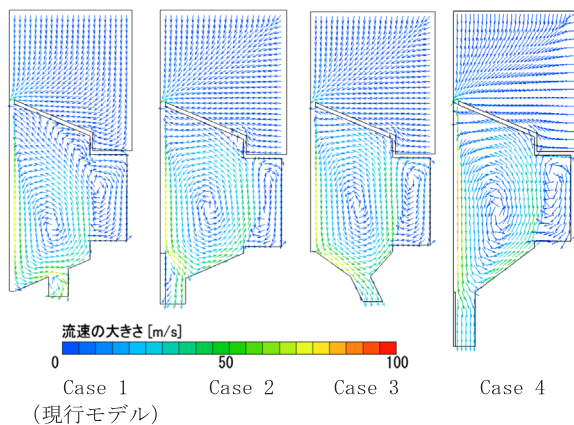
(1) Outlet 部の形状・配置検討

現行フードの Outlet の位置は、Inlet の真下 (壁際) ではなくフード下部傾斜面の後方 (壁から離れた位置) にあり、Inlet からの壁面に沿った下向きの気流がフード下端で方向を変えて Outlet に向かう流れとなっている。このため気流がフード下端で淀み、切削粉がこの部分に滞留・堆積しやすくなっている。現行フードのモデルを Case1 とし、これに対してフード下端での方向の変化を抑えるような 3 種類の形状を検討し (Case2 ~ 4)、現行フードおよび 3 つの改良ケースについて解析を行った。Case2 は、Outlet 位置を壁側に移動し、上方からの流れをそのまま Outlet に向かうように設定した。ただし、吸引ホースとの接続のため壁から約 10mm 後方にずらしている。Case3 は、流れの向きの急変を抑え、下方から斜め下方へと流れの向きを緩やかに変化させる形状とした。Case4 は、Case2 よりも Outlet を下方に移動、さらに壁側に近づけている。

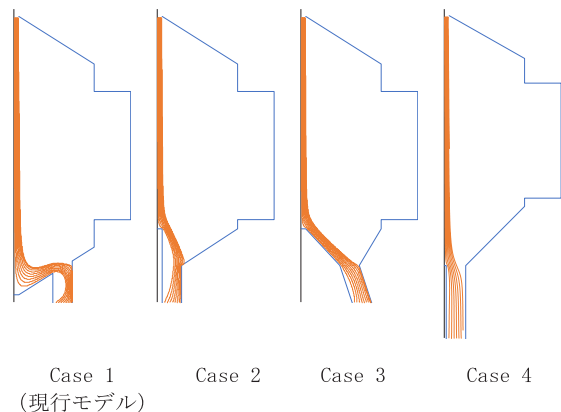
解析結果として、図 6 に流速ベクトル分布 (流速の大きさを色別に表示した。矢印の長さは流速の大きさにかかわらず一定とした。)、図 7 に CFD 解析の流速分布から求めた Inlet から Outlet に向かう粒子の移動軌跡を示す。全ケースで、コアンダ効果による壁面に沿った一方向の層状空気流の形成が確認できる。しかし、Case2 は、

気流が吸引ホース接続のためのパイプ肉厚部分に衝突し、Case1と同様にこの影響とみられる流れの蛇行が発生している。Case3は、フード傾斜面に沿ってスムーズな流れとなっている。Case4は、上方からの気流が速やかにOutletへと排出され、壁面での流速は現行フードよりも大きくなり、より切削粉を排出しやすい形状であると考えられる。

以上より、Outletはできるだけ壁側、下方に配置することが有効であり、Case3のように適度な傾斜を持たせることも有効であることが確認された。



図－6 各ケースにおける流速ベクトル分布



図－7 各ケースにおける粒子の移動軌跡

(2) Inlet 部の形状検討

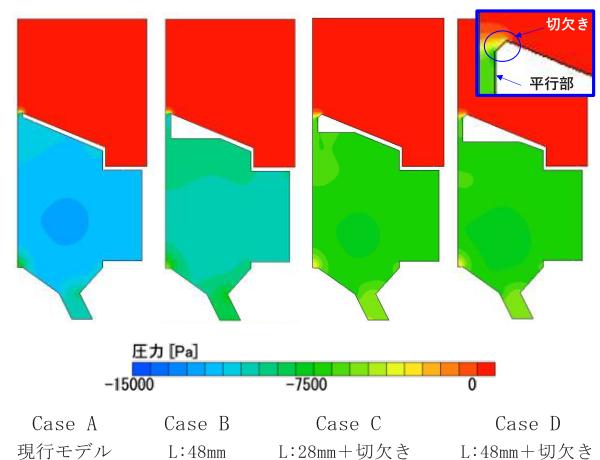
現行フード（Case A）に対して3種類の形状を検討し（Case B～D）、それぞれに対して解析を行った。Case Aは、単純にフード上端部にスリットを設けているタイプである。Case Bは、隙間が一定の外気導入部に壁と平行な部分（平行部の長さL=48mm）を設けている。Case C、Dは、壁との間に平行な部分を設けるとともに、隙間上部に切欠きを設けて外気導入時の流向変化を緩和している。Case Cの平行部の長さはL=28mmであるのに対して、

Case DはL=48mmとした。また、A～DともOutlet部の形状は前項のCase3とした。

フード内の圧力分布の解析結果を図－8に示す。フード内圧力は負圧となり、D、C、B、Aの順に圧力が低くなっている（負圧が大きくなっている）。4ケースとも流出境界における吸引風量等の条件は同じであるため、フード内の圧力差はInlet形状の影響によるものである。フード内圧力が低いということはInlet部の流動抵抗が大きいことを示している。すなわちCase Dの形状が最も好ましく、その特徴としては、以下の2点が挙げられる。

- ① Inletに壁面との平行な直線部（整流区間）を設ける。
- ② Inletの外気導入部に、流れ方向の急変を抑制するような切欠きを設ける。

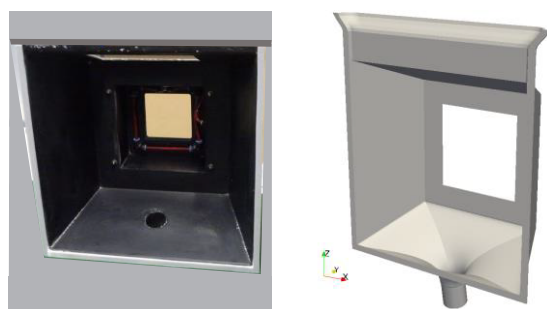
切欠き形状に関しては、水道管など管路流れにおける管径急変部の水頭損失を低減させるためのベルマウス形状が知られているが、実際のフード設計においても直線的な切欠きよりも滑らかな曲面にすることが望ましいと考えられる。また、隙間平行部も適度な長さを確保することが望ましいと考えられる。



図－8 Inlet 形状のフード内圧力への影響

4.3 3次元解析

2次元解析で得られた知見をもとに、現行フードをベースにして3次元の改良モデルを作成した。図－9に（a）現行フードと、（b）改良モデルを示す。改良モデルでは、壁面と平行な整流区間はフード上部の外側に張り出すようにした。また、整流区間の上端部は拡幅されており、側方からの流入しやすさも考慮して漏斗状スリットのような形状とした。Outletの配置は、壁面側（前方）に寄せるとともにフード下面を下方に突き出した形状とし、壁面から滑らかな流線を形成するようにした。



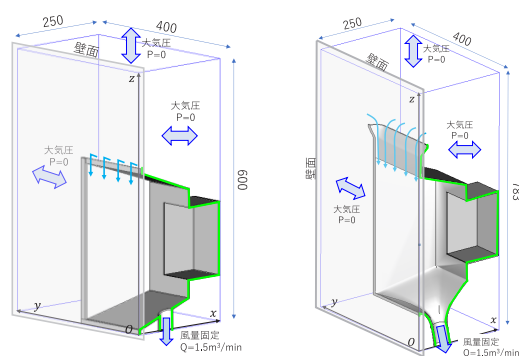
(a) 現行フード(写真) (b) 改良モデル

図－9 現行フードと改良モデル

現行モデルと改良モデルに対して3次元解析を行い、気流性状を比較した。解析モデルを図－10に示す。フード形状の対称性からフード中心断面を対称境界とし、片側を解析対象とした。Inlet幅は5mmとした。

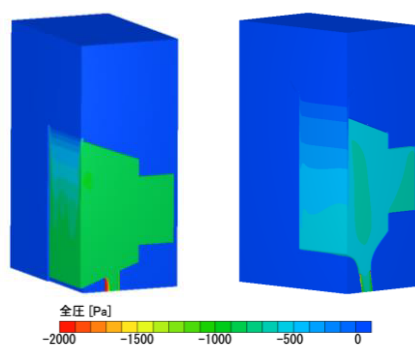
解析領域表面の圧力分布の結果を図－11に示す。フード外側は大気圧に近く、フード内部は $-1200\text{Pa} \sim -500\text{Pa}$ 、Outlet部では -2000Pa よりも低い圧力となっている。両者を比較すると、現行モデルのフード内部は -1000Pa 程度、改良モデルでは $-600 \sim -500\text{Pa}$ となっている。

流速分布の結果を図－12に示す。現行モデル、改良モデルともに左側は壁面近傍を壁面側からみた流速分布、右側は対称面内（フード中心断面）の流速分布を示



(a) 現行モデル (b) 改良モデル

図－10 解析モデルおよび境界条件

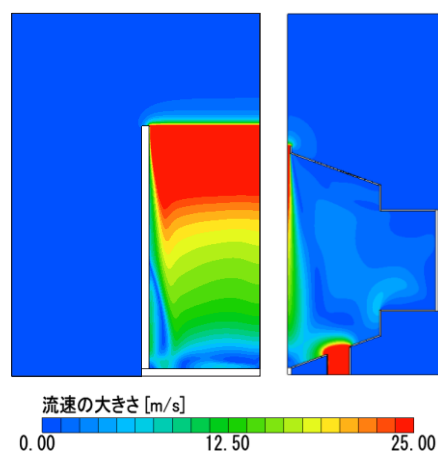


(a) 現行モデル (b) 改良モデル

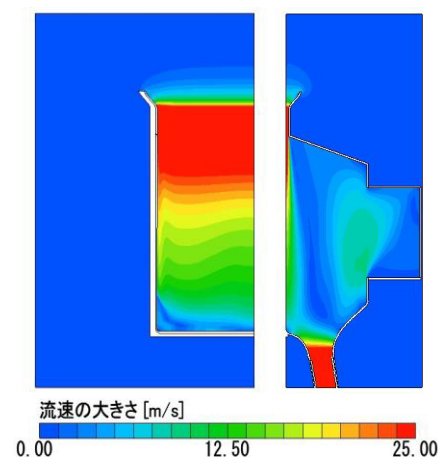
図－11 解析領域表面上での圧力分布

す。フード内部では現行モデル、改良モデルともに壁面に沿って $10 \sim 25\text{m/s}$ の流速である。凡例のカラースケールの上限は 25m/s であるが、Outlet部は 50m/s 程度の流速となっている。壁面近傍の分布を比較すると、改良モデルはフード端部でも気流の剥離が発生していない。また、対称面内の流速分布を比較すると、現行モデルはOutletにかけての流れが蛇行しており、湾曲部での流速低下が著しい。これによるフード下端での滞留の発生が予想される。一方、改良モデルはOutletにかけて流れの連続性が保たれており、スムーズな気流が形成されている。なお、フード内の奥側で還流（上向き流れ）が発生しているが、これは当初からフード内にある空気が外部からの空気流入に伴い渦流となったもので、切削粉排出への影響は少ないと考えられる。

上記の結果は、改良モデルが現行モデルと同じ排気風量設定の場合、フード内の圧力低下が小さく、吸引負荷が小さいことを示す。このことは、改良したフード形状は外気導入効率がよく、現行フードよりも大きい流速・風量が得られることを意味し、本改良により集塵効率が



(a) 現行モデル (左:壁面, 右:対称面)



(b) 改良モデル (左:壁面, 右:対称面)

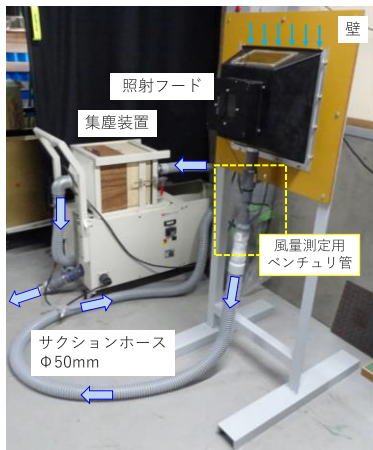
図－12 各モデルにおける流速分布

向上すると考えられる。

5. 気流確認実験

5.1 試験概要

改良フードの切削粉回収性能を確認するために、光造形方式の3Dプリンタで改良フードを製作し、現行フードとともに気流確認実験を実施した。実験は、照射対象壁を模した合板にフードを押し当て、Outletに集塵装置を接続し、吸引に伴う圧力や風量を測定した(図-13)。

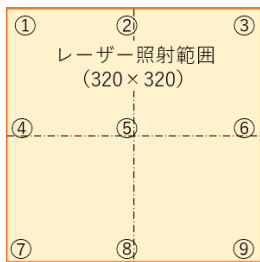


(a) 試験全景 (現行フード)



(b) 改良フードとデジタル差圧計

図-13 気流確認実験の写真



(a) 計測孔配置 (前面)



(b) 背面の写真
(通常は木栓で閉塞)

図-14 模擬壁合板に設置した計測孔

図-13(b)に示すデジタル差圧計マノメータを使用し、大気圧とフード内の差圧、大気圧とOutlet管内の差圧を測定した。測定精度は $\pm 0.3\%$ F.S.である。フード内圧力は、図-14に示す9カ所の小穴にて測定した。Outletには管径の異なる塩ビ管(内径40mmと内径25mm)を組み合わせて管路に絞りを設けたベンチュリ管を接続しており、Outletの風量は、この絞り前後の差圧を測定することにより求めた。

5.2 試験結果

集塵装置の風量は、モータの周波数にて制御するため、はじめにモータの周波数、電力と風量の関係を確認した。この結果を図-15に示す。モータ周波数と風量は、ほぼ比例関係であった(図-15(a))。一方、電力と風量の関係は非線形であり、電力が大きくなるにつれて風量の増加率は低下する傾向が確認された(図-15(b))。

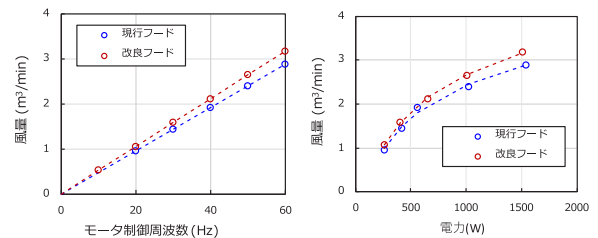
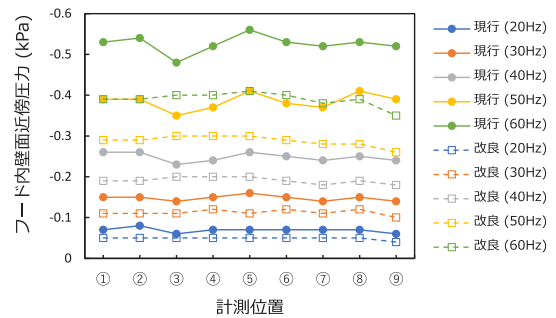
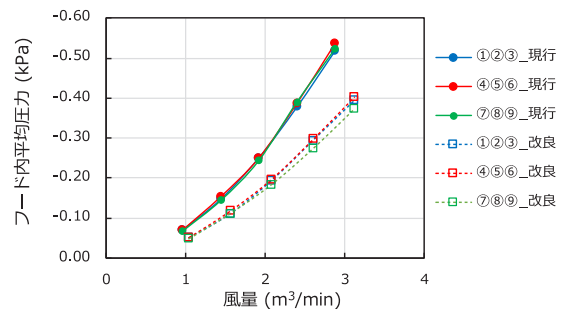


図-15 集塵装置の出力特性



(a) 測点位置とフード内圧力



(b) 風量とフード内圧力

図-16 フード内壁面近傍で計測された圧力 (kPa)

また、現行フードと改良フードを比較すると、同じモータ周波数・電力に対して改良フードの風量が大きく、フード内の排気効率が向上したことが確認できる。

フード内の圧力測定結果を図-16に示す。それぞれ周波数を20, 30, 40, 50, 60Hzと変えて測定した。図-16(a)には周波数(風量)に応じた各測点(①~⑨)での圧力と測点位置の関係を示す。この結果から、フード内で位置の違いによる圧力差はほとんどないこと、風量が増えると内部の圧力は低下する(負圧が大きくなる)ことがわかる。なお、全ケースにおいて③で圧力が低下している傾向があるが、原因として模擬壁合板に設置した圧力計測孔等の微妙な加工精度などによるものが考えられる。ただし、これらの変動自体はわずかであり、実験結果に対しての影響はほぼ無視できるものと考えられる。図-16(b)は、風量とフード内圧力の関係を示している。フード内圧力は、測定位置の高さごとの平均値である。この結果から、風量が増加すると負圧は増加し、風量が多いほど負圧の増加傾向はやや強まることがわかる。また、改良モデルは、現行モデルに比較して負圧が小さい(抵抗が少ない)。

Outlet 接続管内の吸引圧力と風量の関係を図-17に示す。フード内圧力と同様に、風量が多いほどOutlet 接続管内の吸引圧力は大きくなる傾向が確認された。また、現行フードに比べて改良フードの吸引圧力は約半分程度に抑えられていた。これは、フード形状の改良により、Inlet からOutlet への連続的でスムーズな気流が形成されたことで、吸引負荷の軽減に寄与したと考えられる。

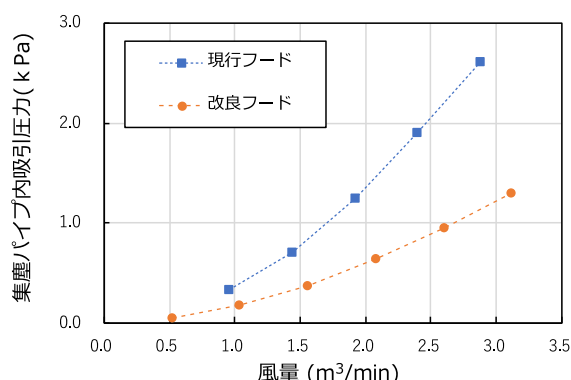


図-17 風量とOutlet 接続管内吸引圧力の関係

5.3 切削粉を模擬した挙動観察

模擬壁合板に設けた中央の小穴より微粉末を改良フード内に噴出することにより、切削粉を模擬した挙動観察を行った(図-18)。微粉末には炭酸カルシウム

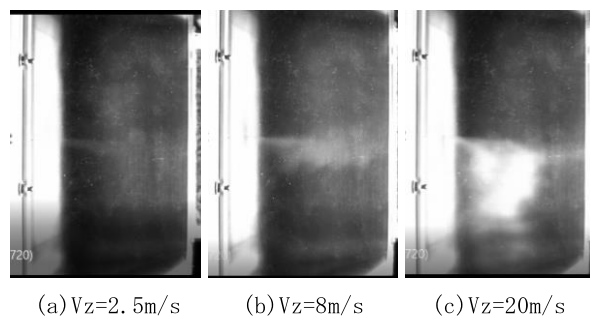
粉末($\rho: 2.71\text{g/cm}^3$, 粒径: $30\mu\text{m}$ 程度)を、フード内への噴出方法にはシリンジを用いた。シリンジにより20mlの空気を10mlに圧縮し、合板背面からフード内に微粉末と共に噴射した。シリンジから噴出される速度は、噴出時間を1秒、ノズル孔径を1mmとして試算すると約12.7m/sとなる。

フード内における微粉末の拡散状況を観察した結果を図-19に示す。集塵機制御により吸引風量を変えて観察を行っている。図中には風量から計算される鉛直方向流速 V_z を示している。 V_z が2.5m/s, 8m/sでは、微粉末は噴出位置を中心に上下に拡散しているのに対して、 V_z が20m/sの場合は、微粉末は上方への拡散が抑えられ、気流に乗って下方に流れている状況が確認できる。適切な排風機風量を設定することにより、レーザー照射に伴い発生した切削粉のフード内での拡散・滞留を抑え、効率よく吸引回収できることが確認された。



(a) 投入状況前面 (b) 投入状況

図-18 模擬切削粉の投入状況



(a) $V_z=2.5\text{m/s}$ (b) $V_z=8\text{m/s}$ (c) $V_z=20\text{m/s}$

図-19 投入された模擬切削粉の挙動

6. まとめ

レーザー除染では、切削に伴い発生した粉塵を周囲に飛散させることなく回収することが求められる。本研究において、効率的に切削粉を回収するための集塵フード形状をCFD解析により検討した。そして、この検討結果

をもとに集塵フードを設計・製作し、気流確認実験を行うことによりその有効性を検証した。この一連の解析・実験により、以下の知見が得られた。

- 1) 集塵フードの Outlet の向きを流動経路に沿って斜め方向にし、さらに下方に配置することにより、外気導入から排出までスムーズな流れが形成され、フード内での滞留を抑制できる。
- 2) 集塵フードの Inlet をフード上部の外側に張り出し、漏斗状スリットのような形状とすることで、外気導入を促すとともに、導入後の気流の乱れを少なくし、下方への方向性を高めることができる。
- 3) 上記改良により、Outlet 管内の吸引圧力は、現行フードに比べて半分程度に抑えられており、吸引負荷が低減され、集塵フードの吸引効率を向上することができる。
- 4) レーザー照射に伴い発生する切削粉を模擬した微粉末の挙動観察から、集塵フード内を下降する気流の流速を十分に確保することで、フード内での切削粉の拡散・滞留を抑制することができる。

謝辞

本研究の実施にあたり、埼玉大学 姜東赫准教授には CFD 解析の進め方や解析結果の妥当性評価等について親身にご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 原子力委員会：令和 5 年度版原子力白書，2024
- 2) 田中聖一朗，佐藤光浩，今井 久，木川田一弥：遠隔操作式レーザー除染技術の開発，安藤ハザマ研究年報，vol. 9，2021
- 3) 田中聖一朗，佐藤光浩，今井 久，木川田一弥：RI 施設の廃止措置におけるレーザー除染の適用，安藤ハザマ研究年報，vol. 11，2023
- 4) 株式会社ソフトウェアクレイドルホームページ：
<https://www.cradle.co.jp/product/stream.html>
- 5) 原田基至，玉置義治，高橋悠一，今村太郎：直交格子法における埋め込み境界法と Cut-Cell 法の比較 - 壁関数を用いた乱流解析，第 29 回数値流体力学シンポジウム，講演番号 B07-1，2015
- 6) J. H. ファーツィガー，M. ペリッチ著／小林敏雄，大島伸行，坪倉誠 訳：コンピュータによる流体力学，丸善，pp. 258-299，2012

Study on improving the suction performance of dust collection hood for laser decontamination using CFD analysis

Seiichiro TANAKA, Hisashi IMAI, Mitsuhiro SATO, Kazuya KIKAWADA and Hideki IMURA

We have been developing a decontamination system using laser technology for application to the decommissioning of nuclear power plants and radiation application facilities. In laser decontamination, it is important to collect the cutting dust generated due to laser irradiation. In this paper, we conducted a case study using CFD analysis to investigate the shape of a dust collection hood that would suppress the scattering of cutting dust and enable efficient suction collection. Based on the results of this study, a dust collection hood was designed and manufactured, and its effectiveness was verified by conducting an airflow test. As a result, it was confirmed that the suction load inside the hood could be reduced to about half that of the current hood, and that the suction efficiency could be improved.
