



〈技術レポート〉

CFDによるハニカムフィルター気流解析と応用事例

鶴見研究所 フィルター分野 米田 雅彦

表1 CFDの主な用途

分野	解析例
自動車	エンジン冷却システム エンジンルーム内流れ 車体空力 空調システム、他
建築/空調	建築物周りの流れ 室内流れ 空調ダクト 熱交換器 冷暖房システム、他
電気/電気機器	ファン・ブローア 冷蔵庫、空調機器 コンピュータ ヒートシンク、他
半導体	熱/CVD クリーンルーム スピニングコート、他

1. はじめに

コンピュータを使用した多くの数値解析の中で、流体（気体、液体）の解析は難度が高いうえ、多大な計算時間を要してきた。しかし、近年のコンピュータの高速化やソフトウェアの改良が進み、流体解析が汎用的なものとなった。そこで当社ではハニカムフィルターの内部構造やフィルターを使用している環境（機器・装置内部）の気流解析にCFDを使用し、フィルターの最適設計に活用している。本稿では基本的なハニカムの内部構造及びフィルターを組込んだ機器内部の気流解析の応用事例について紹介する。

2. CFDとは

コンピュータを使用した流体の数値解析を“CFD”と呼んでいる。これは Computational Fluid Dynamicsの頭文字をとったもので、CAD (Computer Aided Design：コンピュータ支援設計の略)などで作成された仮想モデルに対し、流体に関する物理学を適用し流れを予測する技術の事である。当社ではフルエント・アジアパシフィック株式会社製の「FLUENT」を使用している。

なお、CFDによって得られた解析結果は実際の流体挙動を保証するものではないが、適切な条件による解析結果は有用な情報である。これらのことから、CFDのメリットとして次の3点が挙げられる。

1. 目にすることが困難な流れの可視化。
2. 解析による最適条件の探索。

3. 試作や実験の回数削減による時間と費用の節約。
以上のことから近年では多くの分野でCFDを活用するようになってきた。主な用途を表1に示す。

3. 解析の流れ

解析は図1に示すように大きく3つの工程に分けることができる。

3.1 プリ処理

流体解析は「プリ処理」と呼ばれる解析モデルの作成から始まる。ここで解析したい対象（機器、装置内部構造）をCADなどにより2次元あるいは3次元の形状にモデル化する。そしてこの形状モデルを“メッシュ”と呼ばれる微小な小片に分割し、流体の入口や出口などの領域を設定すると、解析モデルが完成する。

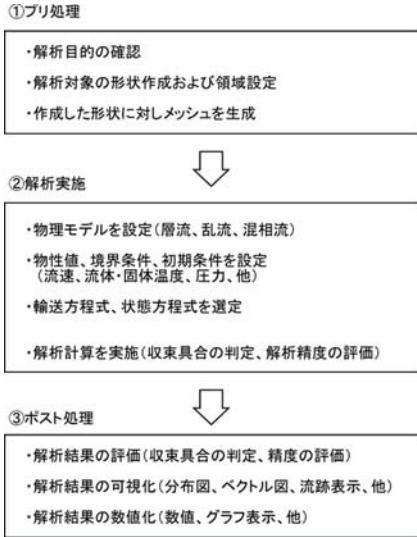


図1 CFD解析の流れ

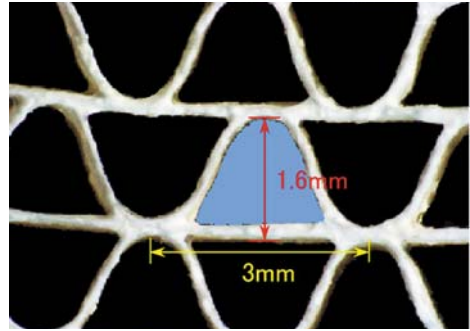


図2 ハニカム

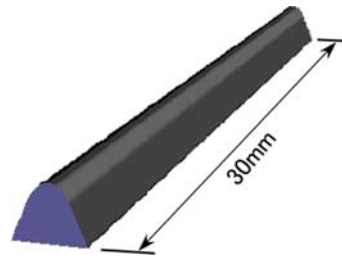


図3 解析モデル

3.2 解析実行

次に数値解法の設定を行う。流体の物理モデルの選定に始まり、流体や周囲構造物の物性値の入力、入口及び出口境界条件、初期条件などを設定し解析を実行する。

3.3 ポスト処理

得られた結果を分布図やベクトル図、グラフ、数値などで表現することを「ポスト処理」と呼ぶ。そして得られた結果を評価分析し、異常が無いか確認する。もし、明らかに異常な箇所がある場合には解析モデルや解析諸条件を改めて吟味し、異常な箇所がなくなるまで解析を繰り返し実行する。

4. 解析事例—その1 (ハニカムフィルター)

4.1 コルゲートハニカム

最初に普段は目にする機会が少ないハニカムフィルター内部の風速分布や流れの状態について解析した事例を紹介する。

当社ハニカムフィルターの中からセルサイズ：# 3016を解析対象とする。詳細な形状を把握するため実際のハニカムフィルターの断面を拡大したものを図2に示す。白色部分はハニカム構造体による壁であり、黒色部分は気体が行ける空洞(セル)である。そして1つのセルを解析領域とし、図3に示すようにフィルターの厚み(セルの

長さ)を30mmとする(青色部分を開口部とした筒形状)。

次にセルを通過する気体の物理モデルの選定に先立ち、通過気体の流れ具合を示すレイノルズ数を求める。レイノルズ数：Reは(1)式で求められ、 $Re \leq 2,000$ の時は流れが少ない層流と呼ばれ、 $Re > 2,000$ の時は流れが大きい乱流と呼ばれており、流体の流れ具合を計る尺度として良く用いられる。

$$Re = \frac{Du\rho}{\mu} \dots\dots\dots (1)$$

Re：レイノルズ数 [-] ρ：(気体)密度 [kg/m³]
 D：相当直径 [m] μ：(気体)粘度 [kg/(m・s)]
 u：流速 [m/s]

(1)式を用い図3を流れる気体のレイノルズ数を計算すると、セルを通過する面風速が約20m/s未満の場合は $Re < 2,000$ となり、当社ハニカムフィルターにおけるほとんどの使用条件では層流となる。このことから流体モデルとしては「層流」を選択する。以上をふまえ解析の諸条件を表2に示す。

表2 解析設定一覧

設定項目	設定値
セル入口条件	1.5m/s (均一風速)
セル出口条件	自由解放
流体モデル	層流モデル

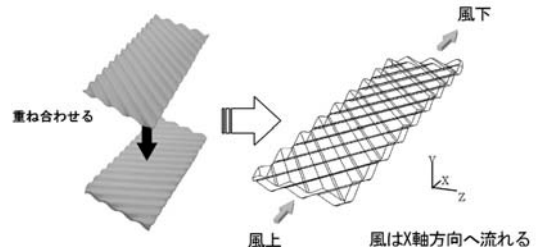


図5 斜行ハニカム

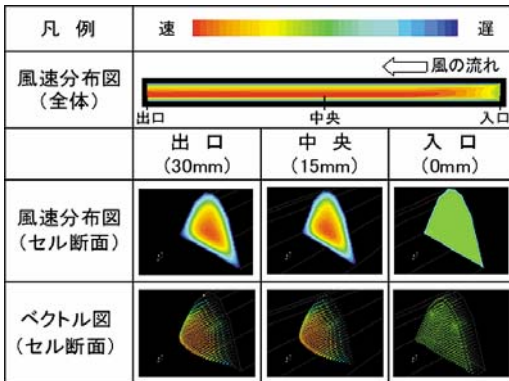


図4 セル内部の風速分布

解析結果の中から風速分布と風速ベクトルを図4に示す。結果を分析すると入口から約10mmの位置までは層流が発達する領域となっていることがわかる。また層流の発達に伴いセルの壁付近での風速が遅くなる一方、セル中心付近の風速は速くなる傾向が見られる。そしてセル入口から10mm以降ではほとんど風速分布に変化はなくなり、定常な状態になると予測される。

4.2 斜行ハニカム (ハニカムウォッシャー, ヒューセル)

次に斜行ハニカムと呼ばれる特殊な構造をしたハニカム内部を気流がどのように流れているかを解析した例について紹介する。斜行ハニカムは当社製品の「ハニカムウォッシャー」や「ヒューセル」に使用されており、図5に示す構造をしている。これはフィルターの厚み方向に対し一定角度を持たせた波板を互い違いに配置することで、隣接したセル同士が繋がっている。また今回は解析の確かさを調べる指標として斜行ハニカムの圧力損失を実測し、解析結果と比較も行った。その結果、解析と実測による圧力損失は図6に示すとお

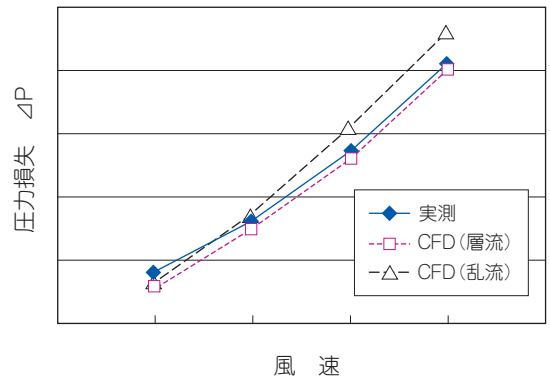


図6 斜行ハニカムの圧力損失

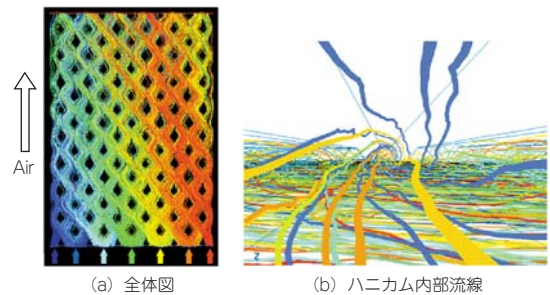


図7 斜行ハニカム内部気流の流跡線

りほぼ一致する傾向にあることがわかった。

次に、斜行ハニカムの中を空気がどのように流れているかを図7に示す。図7(a)は全体的な流跡を示しており、入口の場所に依じて色分けしている。そして入口から出口に進むにつれ空気が拡散していく様子が示されている。図7(b)では、斜行部と平行な目線から見た流跡であり、ハニカムの中を回転しながら空気が進んでいる様子が示されている。

5. 解析事例—その2 (ケミカルフィルターとFFU)

当社では空気中の酸、塩基、有機成分などを除去するケミカルフィルターを半導体製造装置やクリーンルーム向けに製造・販売している。ケミカルフィルターはFFU (Fan Filter Unit : ファンとフィルターを組み合わせ清浄空気を供給する機器の略称) と組み合わせて使用される場合が多いが、半導体製造装置の限られたスペースに設置したり、クリーンルーム天井の狭い空間に設置しなければならないなど制約も多い。そんな中、設計した除去性能や寿命を発揮させるためにはフィルター通過風速分布がより均一であることが望ましく、これまでは設計者の経験やデモ機などを用いた実測試験を繰り返し、多くの費用や時間を費やしてきた。ここではCFDを活用した最適条件の調査とその検証実験を実施した事例について紹介する。

まずFFUの一次側 (上流側) にケミカルフィルターを設置するケースを想定する。今回対象とするFFUは図8に示すように、1,200mm × 600mm サイズ、中央部には吸引ファンがある。そしてFFU上部とケミカルフィルターとの間には通過風速を均一にするための空間を設ける目的で高さ調節可能なダクトを設置する。

この事例はダクト高さを低い順に (a) ~ (c) の3段階設定し、ケミカルフィルターの通過風速分布がどのように変化するか調査したものである。

解析結果として、ケミカルフィルターの通過風速分布を図9に示す。ダクト高が低い (a) の時は吸引ファン部分が局所的に高風速となっている。それに対しダクト高が (b), (c) の場合はケミカルフィルター通過風速がほぼ均一となる結

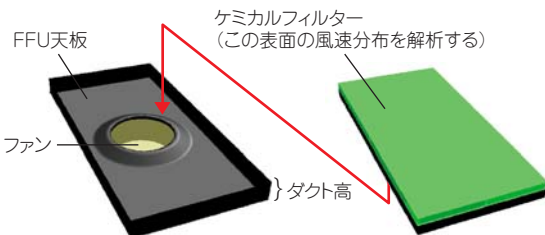


図8 FFUとケミカルフィルター設置概略

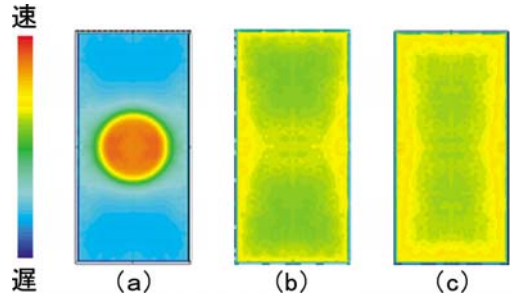


図9 CFDによるケミカルフィルター通過風速分布

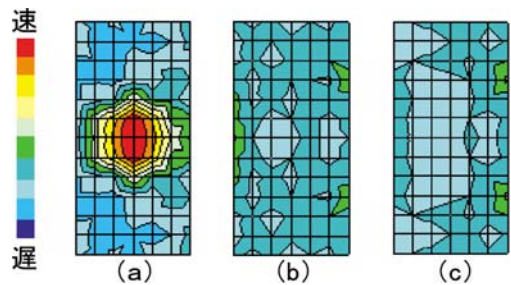


図10 実測によるケミカルフィルター通過風速分布

果が得られた。

続いて実測によるケミカルフィルター通過風速分布を図10に示す。ダクト高が低い (a) の場合は吸引ファン付近でケミカルフィルター通過風速が局所的に速くなっており、この傾向は解析結果と良好な一致を示している。さらにダクト高が (b) 以上になるとケミカルフィルター通過風速がほぼ均一となることが解析と実測の両手法から確認され、これにより気流解析が最適設計条件の探索に有効であることを確認した。

6. 解析事例—その3 (ソルベントクリーン)

ソルベントクリーンとは当社の揮発性有機溶剤 (Volatile Organic Compound, 以下: VOC) 濃縮装置の事である。この装置は工場から排出される大風量の低濃度VOC含有空気を、小風量で高濃度に濃縮するものである。そして高濃度に濃縮されたVOC含有空気は燃焼装置と組み合わせて処理され、VOCが大気中に放出されるのを防ぐことができる。この装置に使用される濃縮ローターは写真1に示すような形状をしており、

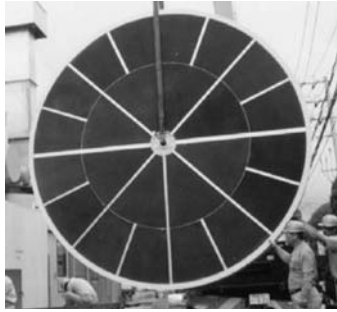


写真1 VOC濃縮ローター (φ3.5m)

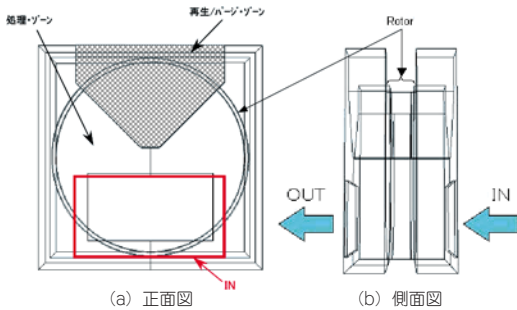


図11 VOC濃縮装置

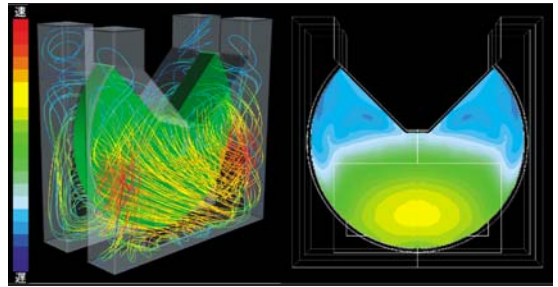
最大直径4.2mまで製作可能である。

このような大型のハニカムフィルターに対しては、均一に空気が流れるよう濃縮装置を設計することが重要となる。このため、当社では濃縮装置の設計段階からCFDを活用し、濃縮ローターを通る気流がより均一になるよう工夫をしている。

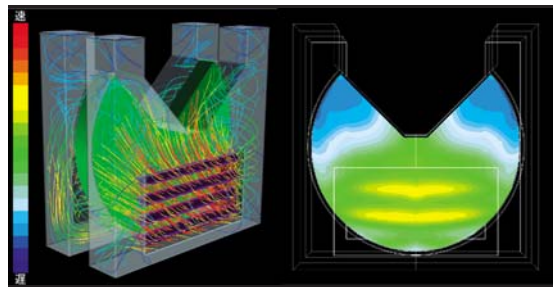
ここでは図11に示すような基本的な濃縮装置内部（処理ゾーンのみ）の解析事例について紹介する。この解析では導入された気流が装置内部をどのように流れているのか、濃縮ローターを均一に気流が流れているかといった点に着目する。

まず、装置内部の流れの状態を図12に示す。(a)では装置内部全体の流跡線を示し、(b)では濃縮ローターの通過風速分布を示している。今回の解析例では、導入された気流が入口付近のローター下方に集中してしまい、風速分布が生じる結果が得られた。

次に装置入口部分に気流を上方へ誘導する拡散板を設置した場合の解析結果を図13に示す。こういった工夫を施すことにより、導入された気流は装置上方へ導かれるとともに、ローターを通過



(a) 装置内流跡線 (b) ローター通過風速分布
図12 VOC濃縮装置内部の気流解析



(a) 装置内流跡線 (b) ローター通過風速分布
図13 改良構造における装置内気流

する気流がより均一となる。また、風速分布は所定風速に対し±10%以内に収まるとの解析結果が得られる。

この解析例では濃縮装置に至る配管形状は解析対象としていないが、配管部分も解析対象に加えると、より適切な装置設計が可能となる。

7. 解析事例—その4 (クリーンルーム)

次にクリーンルームを例とした建築物への応用事例を紹介する。クリーンルームは半導体、電子部品、液晶、化学などミクロン単位の微粒子やケミカル成分による汚染を嫌うさまざまな分野の研究、生産、検査工程などにおいて使用されている。そのため、一般の空調とは異なりFFUなどから供給されるクリーンな空気を室内に供給し、汚染物質が拡散しないような気流のコントロールが求められる。

ここではクリーンルーム内部に試験設備や分析設備が設置された状態における内部気流コントロールの方法として、FFUからの吹き出し口の形状、数量そして配置を変え、空気のリバウンドを抑える提案について紹介する。

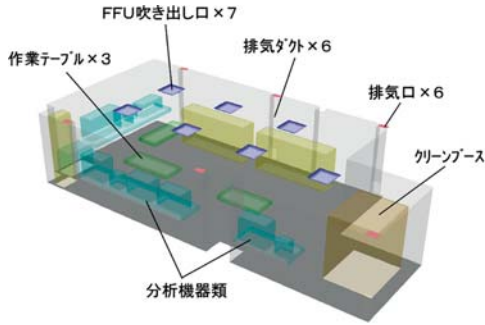


図14 モデル・クリーンルーム

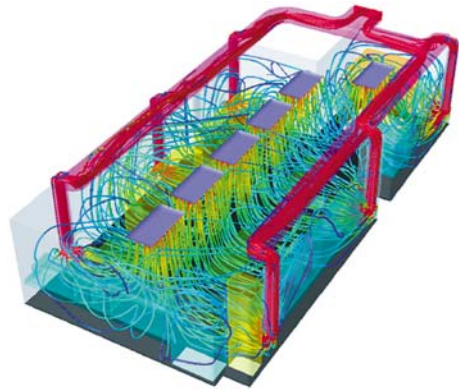


図16 吹き出し口 変更による効果

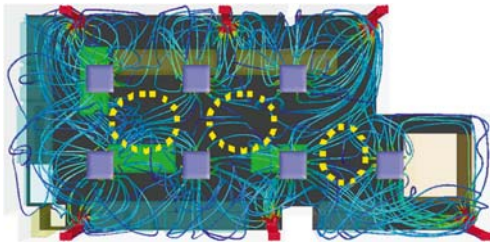


図15 クリーンルーム内部の流跡線

まず基本となるクリーンルーム（クラス1,000ターゲット）の解析モデルを図14に示す。クリーンルームには気流を乱す障害物として作業テーブルや分析機器類が設置されている。給気は天井に設置されたFFU吹き出し口からのダウンフローであり、壁際（床近傍に吸い込み口）に設けた6箇所の排気ダクトを通じて排気される。

基本モデルの解析結果において、クリーンルーム全体の流跡線を図15に示す。これによると黄色破線で囲まれたエリアでは天井から給気された空気が床付近に達した後、再び天井付近まで巻き上げられる「リバウンド」や流れが滞る「滞留」が生じている。また作業テーブル付近は、試料などへのコンタミネーションを防止するためにも清浄度を高めたい場所である。

そこで天井付近の吹き出し口形状と配置の変更を行い、そのときの改善案の解析結果を図16に示す。

部屋全体にさまざまな機器類が存在するため完全にリバウンドや滞留箇所をなくすことはできないが、クリーン度を高めたい箇所に重点的に清浄空気を流すなどの提案は可能である。

8. おわりに

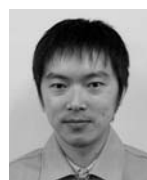
本稿では主に空気の流れについてのみ着目した解析例について紹介したが、流れの他に熱や圧力、さらには構造物の動きを組込んだ解析も行っている。このように当社ではハニカムフィルター製品を販売するだけでなく、CFDを組み合わせることでフィルター性能を発揮させるための提案も行っている。また、フィルターを組込む機器・装置類の内部気流を解析することで、最終製品の性能向上に寄与するだけでなく、気流の滞留箇所を予測するなどトラブル防止などにも役立てることができ。今後もお客さまから信頼頂ける提案を行っていく所存である。

最後に、このCFD解析技術を確立するにあたりご尽力いただいた関係諸氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 第2版 流体力学ハンドブック, 丸善書店, (1998)
- 2) 日本機会学会, 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗, 丸善, (2001)
- 3) フルーエント・アジアパシフィック株式会社ホームページ <http://www.fluent.co.jp>

筆者紹介



米田雅彦

鶴見研究所

フィルター分野