

## 汎用数値流体解析コードによる流体解析の事例紹介

## CFD Case Studies Using Commercial CFD Codes

水野 繁 株式会社 IHI 検査計測 制御システム事業部宇宙システム部

株式会社 IHI 検査計測制御システム事業部宇宙システム部における商用汎用コード ( ANSYS FLUENT ) を使用した流体解析事例を紹介する。本稿では汎用コードを使用した解析事例のうち、計算手法的に特徴的な三例 ( 多孔質媒体モデル、ダイナミックメッシュモデル、ラグランジュ分散相モデル ) を紹介する。なお解析条件や計算結果には、重要な設計情報が含まれ、詳細は公開できないので、どちらかという計算手法に焦点をあてた事例紹介となるが、CFD ( Computational Fluid Dynamics : 数値流体力学 ) でこういうこともできるのかという参考になればと考える。

We introduce CFD ( Computational Fluid Dynamics ) case studies using commercial general-purpose CFD code ( ANSYS FLUENT ). Three computationally interesting examples ( porous media model, dynamic mesh model, Lagrangian discrete phase model ) are shown in this report. As the details of the results, including important design information, cannot be disclosed at this time, we will focus on calculation techniques and introduce examples.

## 1. 緒言

株式会社 IHI 検査計測宇宙システム部での流体解析業務は、主に航空機エンジン内の翼列流れの解析が大半であるが、これは顧客指定の専用のコード、ツールを使用して解析を行っている。航空機エンジン以外の案件には、汎用数値流体解析コードの ANSYS FLUENT で対応している。ANSYS FLUENT で解析を行う案件でいちばん多いのは、混相流の解析である。ほかに、形状が複雑であるまたは、境界移動を模擬しなければいけないなど、簡単にはいかないものが多い。しかし、ANSYS FLUENT は多機能であり、大抵の案件に対応可能である。

本稿では、ANSYS FLUENT で実施した解析事例のなかから、計算手法的に特徴的なものを三例ピックアップして、紹介する。一つ目は、多孔質モデルを使用して形状を簡略化した事例、二つ目はダイナミックメッシュモデルを使用して境界移動をシミュレートした事例、三つ目はラグランジュ分散相モデルを使用して、スプレーガンの液滴の挙動をシミュレートした事例である。

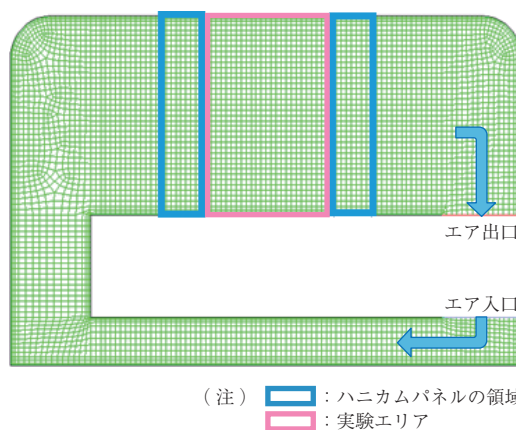
## 2. 多孔質媒体モデル

CFD ( Computational Fluid Dynamics ) では流体の流れる空間部分に計算メッシュを作成して計算を行うが、エアフィルタや充填層などでは、流体の通る細かい隙間のすべてに計算メッシュを作成することは困難である。このよう

な場合に重宝するのが、多孔質媒体モデルである。

ここでは、多孔質媒体モデルを使用した解析事例として、JAXA ( 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 ) の宇宙実験用の小型風洞試験装置の解析事例を紹介する。この装置では、装置内の実験エリアに一樣な流れ場の領域を作ることが要求され、この要求を満たすために、ハニカムパネルの整流作用を利用することを検討した。第 1 図にモデル概念図を示す。

上述のエアフィルタなどと同様にハニカムパネルもまた、小さな孔の一つ一つの形状をモデル化すると格子数が非常に多くなり、計算量、作業量が膨大になってしまう形状をもつものであり、また、ハニカムパネルの孔内部の速度分布の詳細を求めることが目的ではないことから、多孔



第 1 図 モデル概念図  
 Fig. 1 Schematic of the model

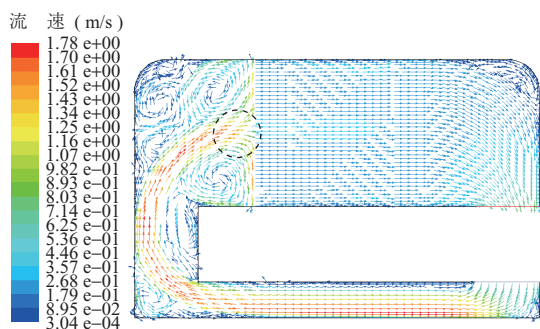
質媒体モデルを使用して、ハニカムパネルをモデル化した。

多孔質媒体モデルの基本的アイデアを説明する。多孔質媒体モデルでは、細かな隙間の形状をモデル化する代わりに、もう少し広い領域を考え、そこでの速度-圧力損失の関係式（理論式または実験式）を運動方程式に組み込む。領域内にあるたくさんの小さな隙間の効果を運動方程式の運動量シンク項として表現するのである。したがって、速度-圧力損失の関係式は、解析担当によって適切なものを与えなければならない。

この事例では、まず第1図に示すようにハニカムパネルの領域を設定し、計算メッシュについては細かい孔を無視して、周囲の空間部分と同様なメッシュを作成する。この領域でのハニカムパネルの孔の方向の速度-圧力損失の関係式は、直管の層流流れの理論式であるハーゲン・ポアズイユの式から設定する。孔の方向と垂直な方向は流れがないとして、大きな圧力損失係数を設定して流れないようにしてしまう。

こうして、設定したモデルで計算を実施し、得られた結果の一例（速度ベクトル図）を第2図に示す。ハニカムパネルによって整流されていることが確認できる。第2図の赤い部分は速度の速い領域で、黒の破線で囲んだハニカムパネルの手前の中央付近に速度の速い領域があるが、ハニカムパネルは大きな流体抵抗となるため、大きく減速し、この部分の流れの大部分はパネルを均一に通過するよう上下に向きを変えられる。

ここでは、一例を示しただけだが、このように多孔質媒体モデルを使用して、メッシュ作成の手間を大きく省けたことで、ハニカムパネルの厚み、設置位置、孔径などについての検討を迅速に行うことが可能となった。



(注) 〇：ハニカムパネルは大きな流体抵抗となるため減速し、パネルを均一に通過するよう上下に向きを変えられる。

第2図 速度ベクトル図  
Fig. 2 Velocity vectors

### 3. ダイナミックメッシュモデル

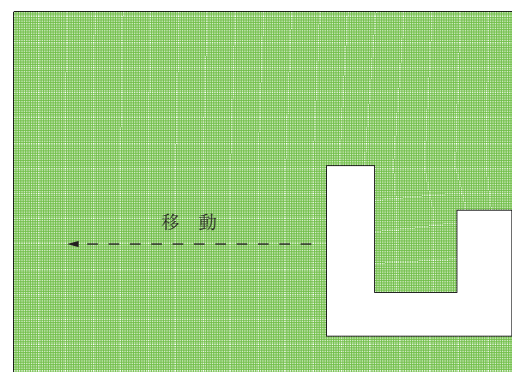
計算対象が移動変形を伴う場合にもいろいろな計算手法があり、個々の事例に応じて計算手法を選択しなければならない。

たとえば、軸流圧縮機やタービンの静翼と動翼を組み合わせた段解析では、静翼と動翼の間にインタフェース面を設定し、インタフェース面より後ろの動翼メッシュを回転させる。インタフェース面でメッシュをスライドさせるので、これをスライディングメッシュ法と呼ぶ。この場合、メッシュをスライドさせるだけなので、メッシュが変形して、体積を変えるようなことはない。しかし、メッシュを変形しなければ、計算対象の動きを模擬できないような動きもあり、このような場合に使用するのがダイナミックメッシュモデルである。ここではダイナミックメッシュを使用した事例を紹介する。

第3図に、JAXAが開発する無重力空間での燃焼実験を行う装置の形状モデル図を示す。移動機構が図の右から左へ移動する。このとき、移動機構が動くことによって、移動機構に押し出されるように空気の流れが発生する。この流れ場の時間発展を、ダイナミックメッシュモデルを使用してシミュレーションした。

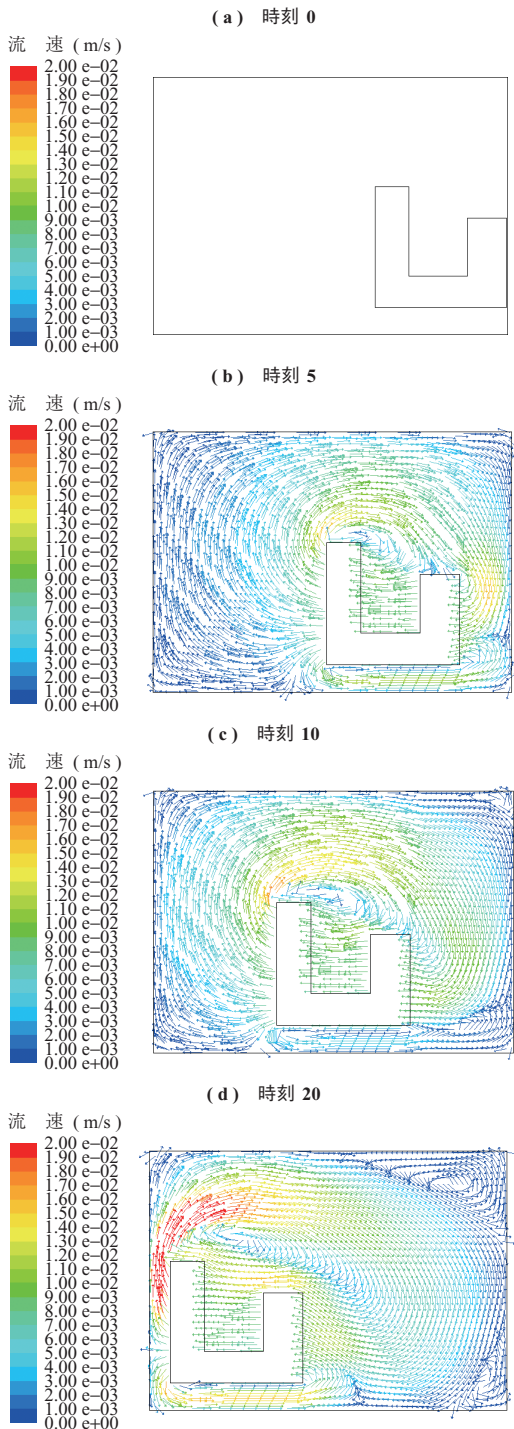
ダイナミックメッシュモデルにもいくつか手法があり、ここではレイヤリングという手法を使用した。

第4図に解析結果（速度ベクトル用）の一例を示す。動画であれば、移動機構が滑らかにスライドするところが見られるのだが、紙面なので、移動から停止までの4コマのみを図に載せている。第4図-(a)は時刻0のすべて静止した初期状態で、移動機構の移動とともに装置内に流れができていくことが確認できる。この解析では、移動



(注) ■：装置内空間  
□：移動機構（右から左へ移動）

第3図 形状モデル図  
Fig. 3 Schematic of the shape



第 4 図 速度ベクトル図  
Fig. 4 Velocity vectors

機構が移動して停止後、装置内の流れが止まるまで解析を行い流れが止まるまでの時間を推測した。その値は、後に行った実験結果と良く一致していた。

#### 4. ラグランジュ分散層モデル

二つ以上の相をもつ流れを混相流というが、気体-液体の気液二相流、固体-液体の固液二相流などがある。また、気液二相流といっても、キャビテーションのような液

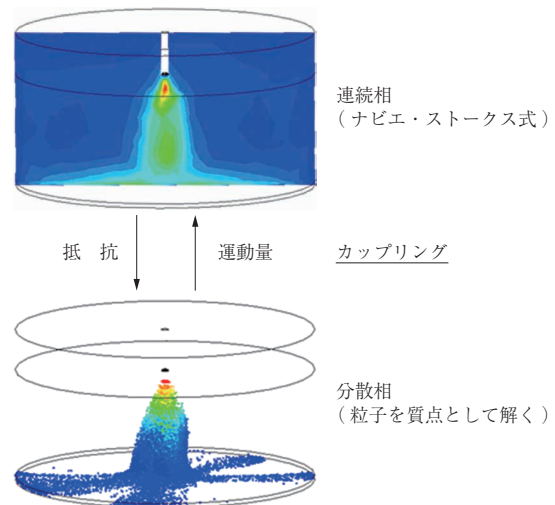
体中に気泡が発生するような現象もあれば、次に紹介するスプレーガンのように気体中に液滴が運動しているような形態もあり、さまざまな形態がある。

混相流の計算手法についてもさまざまな手法があるが、各相の流体運動をどのように記述するかで、オイラー-オイラー法とオイラー-ラグランジュ法の 2 種類に分けることができる。第 1 相、第 2 相ともにオイラー式記述で表現するのが、オイラー-オイラー法であり、第 1 相がオイラー式、第 2 相がラグランジュ式のものをオイラー-ラグランジュ法と呼ぶ。

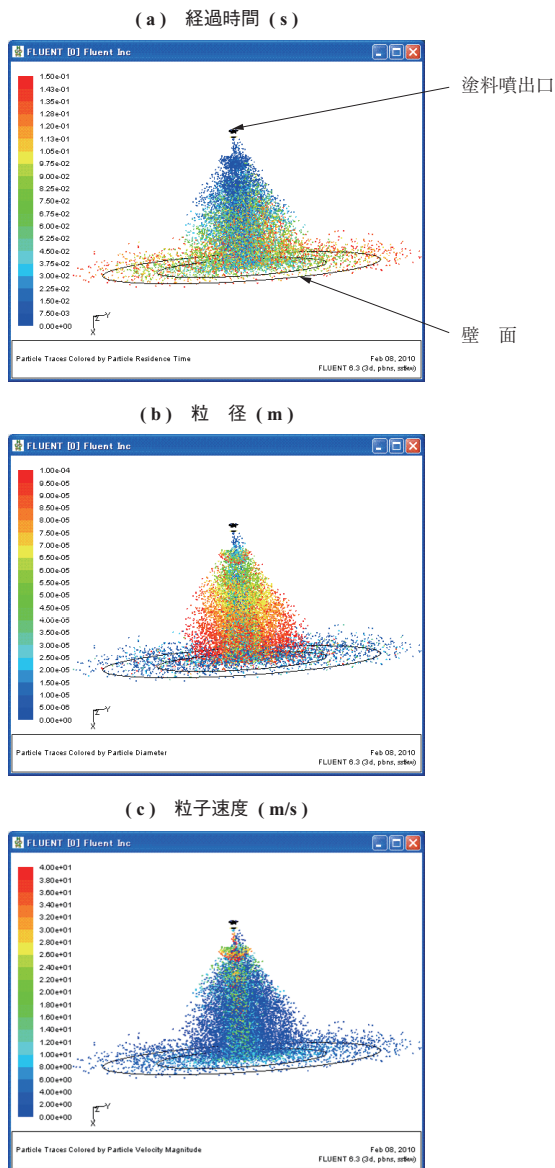
流体の運動を記述する方式には、オイラー式記述とラグランジュ式記述があり、オイラー式記述とは、位置と時刻を独立変数として、速度等の物理量を従属変数とする場の考え方によるものである。ほとんどの CFD コードが基礎式として採用するナビエ・ストークス方程式はこれに当たる。一方、ラグランジュ式記述とは、流体を小さな流体粒子の集まりと捉えて個々の流体粒子の動きを追跡していく方法で、質点系の力学と同じ立場をとるものである。

第 2 相の粒子が第 1 相の流れにほとんど追従するような場合は、オイラー-オイラー法で解くのが効果的で、たとえば大気中を飛散する PM2.5 粒子の濃度分布を予測したいというような場合、第 2 相を PM2.5 の濃度場として解けばよい。

一方、第 2 相の粒子が第 1 相の流れの影響を受けるものの独立性が高いという場合は、オイラー-ラグランジュ法を使うのが効果的で、今回紹介する事例の高塗着スプレーガンの解析は、オイラー-ラグランジュ法を採用した解析事例となる。第 5 図にラグランジュ分散相モデルの



第 5 図 ラグランジュ分散相モデル概念図  
Fig. 5 Schematic of the Lagrangian discrete phase model



(注) 粒子の色は、上の図から、粒子が噴出してからの経過時間 (a), 粒径 (b), 粒子速度 (c) を示す。

第 6 図 粒子空間分布図  
Fig. 6 Particle tracks

概念図を示す。空気の流れは、オイラー式で、噴霧される塗料の液滴の挙動はラグランジュ式で記述され、空気の流れ（連続相）と液滴群（分散相）は、カップリングされ、運動量を交換する（液滴の運動方程式には、空気抵抗の項が追加され、その反作用が連続相のナビエ・ストークス式に追加される）。

解析対象は、IHI 生産基盤技術部から依頼された高塗着スプレーガンである。ANSYS FLUENT のラグランジュ分散相モデルには、多くの機能が備わっており、吹き出す粒子の粒径分布を与えたり、連続相の乱流の効果を粒子に与えたりする機能も備えており、この事例でもそれらの機能を駆使して解析を実施した。

解析結果（粒子空間分布図）の一例を第 6 図に示す。これらの図はある時刻での粒子の空間分布で、上から粒子が噴出されてからの経過時間、粒径、粒子速度で色分けされている。

今回の解析では、CFD においても塗料噴出時の噴霧状態が確認され、塗装条件と塗着状態の関係を定量的に把握することが可能となった。

## 5. 結 言

本稿ではいくつかのモデリング手法について事例とともに紹介した。モデリングとは、複雑でそのままでは計算困難な対象に対して、平均値などの代表値で置き換える操作を伴うものなので、得たい情報の良い近似を得るためには、その手法について前提条件などを理解して使用する必要がある。

( IIC REVIEW No. 51 2014/04 pp. 8 - 12 より転載 )