

# 汎用数値流体解析コードによる流体解析の事例紹介

水野 繁<sup>\*1</sup>  
Mizuno Shigeru

当社制御システム事業部宇宙システム部における数値流体解析事例を紹介する。流体解析業務は、おもに航空機エンジン内の翼列流れの解析が大多数を占めるが、これらの解析には客先の指定による専用コードやツールを使用しているため本稿での公開を避け、汎用コードを使用した解析のうち、計算手法的に特徴的なものを3例ピックアップして、紹介する。なお解析条件や計算結果には、重要な設計情報等が含まれ、詳細は公開できないので、どちらかというと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。

キーワード：CFD（数値流体力学）、多孔質媒体モデル、ダイナミックメッシュ、ラグランジュ分散相モデル

## 1. はじめに

当社宇宙システム部での流体解析業務は、おも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一番多いのは、混相流の解析で、その他には形状が複雑であるとか境界移動を模擬しなければいけないとか、簡単にはいかないものが多いが、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中から、計算手法的に特徴的なものを3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で、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 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、エアフィルターや充填層などでは、流体の通る細かい隙間の全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）殿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様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（図1）。

上述のエアフィルター等と同様にハニカムパネルもまた小さな穴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

\*1：制御システム事業部 宇宙システム部

膨大になってしまう形状を持つものであり、また、ハニカムパネルの穴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かわりに、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。従って、速度-圧力損失の関係式は、ユーザーによって適切なものを与えなければならない。

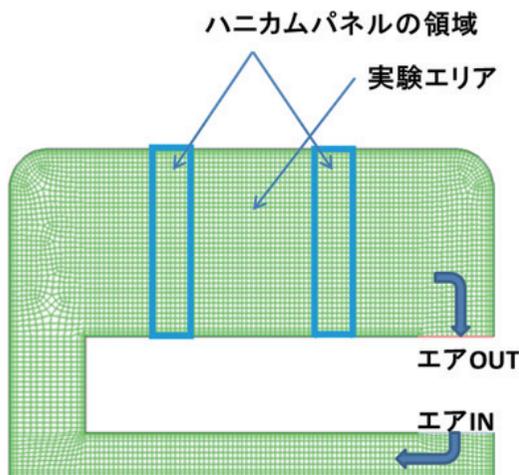


図1 モデル概念図

この事例では、まず図1の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穴を無視して、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穴の方向の速度-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。穴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を図2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。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、穴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。

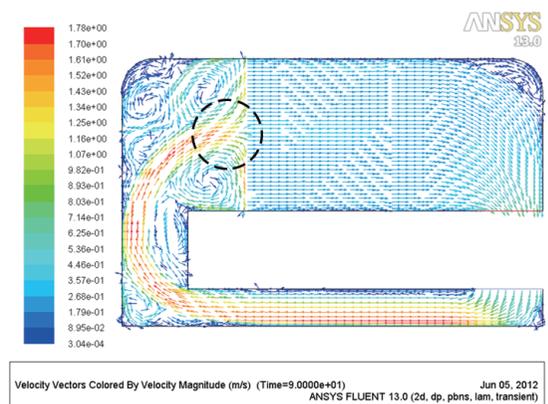


図2 解析結果の一例（速度ベクトル図）

### 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。

例えば、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ーフェース面を設定し、インターフェース面より後ろの動翼メッシュを回転させる。インター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。

図3に示すのは、JAXA 殿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で、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り、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。

図4に解析結果の一例を示す。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。一番上の図が時刻0の全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。

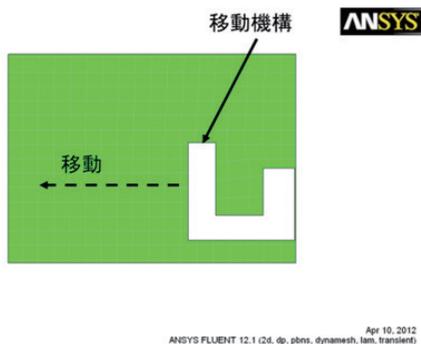
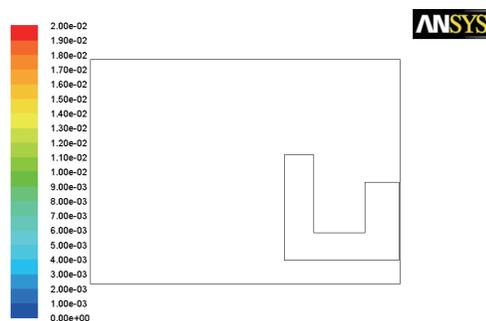
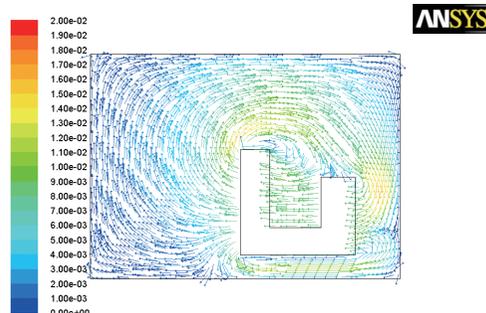


図3 形状モデル図

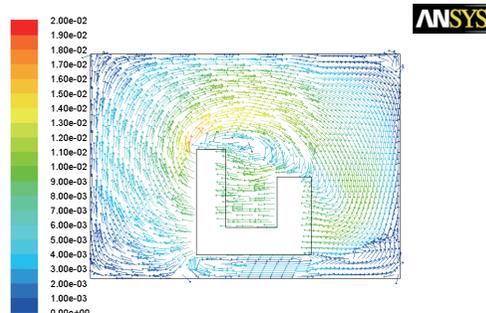
この解析では、移動機構が移動して停止後、装置内の流れが止まるまで解析を行い流れが止まるまでの時間を推測した。その値は、後に行った実験結果と良く一致していた。



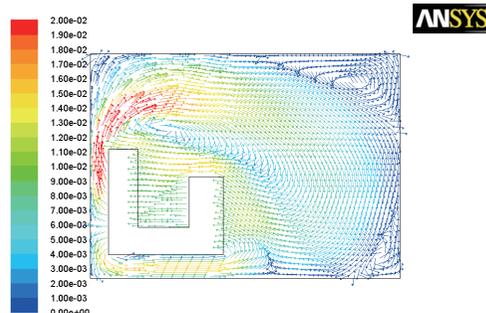
Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Time=0.0000e+00) Apr 12, 2012 ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, dynamesh, lam, transient)



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Time=5.0000e+00) Apr 12, 2012 ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, dynamesh, lam, transient)



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e+01) Apr 12, 2012 ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, dynamesh, lam, transient)



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Time=2.0000e+01) Apr 12, 2012 ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, dynamesh, lam, transient)

図4 速度ベクトル図

緑色部分が装置内空間。白抜き部分が移動機構。移動機構が右から左へとスライドする。

#### 4. ラグランジュ分散相モデル

2つ以上の相を持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、気液二相流と言っても、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を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おイラー-ラグランジュ法とよぶ。

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あたる。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、例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

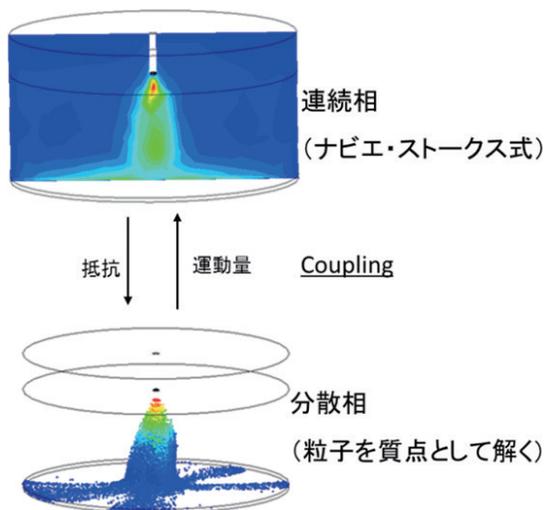


図5 ラグランジュ分散相モデル概念図

ラー-ラグランジュ法を採用した解析事例となる。図5に計算モデルの概念図を示す。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生産基盤技術部殿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。

解析結果の一例を図6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. おわりに

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。

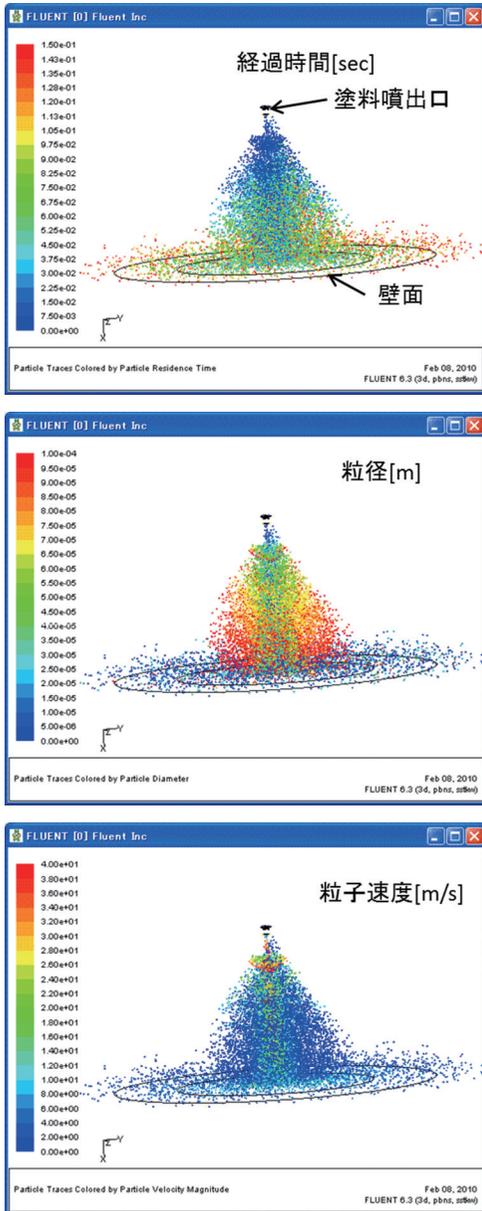


図6 粒子空間分布図

粒子の色は、上の図から、粒子が噴出してからの経過時間、粒径、粒子速度を示している。



制御システム事業部  
宇宙システム部  
水野 繁  
TEL. 042-523-8319  
FAX. 042-523-8320