

# OpenFOAMによる本学風洞試験気流の解析

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1190060 行徳 一真

## 1. 序論

これまで航空宇宙分野における流体力学の研究手段は風洞を用いた実験が主に用いられてきた。しかしコンピューターの著しい発展により CFD(Computational Fluid Dynamics:数値流体力学)解析が用いられるようになってきている。CFD とは流れの支配方程式をコンピューターで計算することによって現象を再現する手法である。CFD は風洞を用いる実験と比較して低コストかつ安全に現象を再現することが可能である。しかし CFD では連続体である流体を離散化し計算を行うため誤差が発生する。現象を再現するためにはこの誤差を小さくすることが重要になる。

本学風洞の外観を図1に示す。本研究では本学の開放型風洞の流れ解析を行い計測結果との比較を行った。その CFD ソフトを拡張し新たなコードの実装を行い昨年度得られた計測結果との比較を行う。

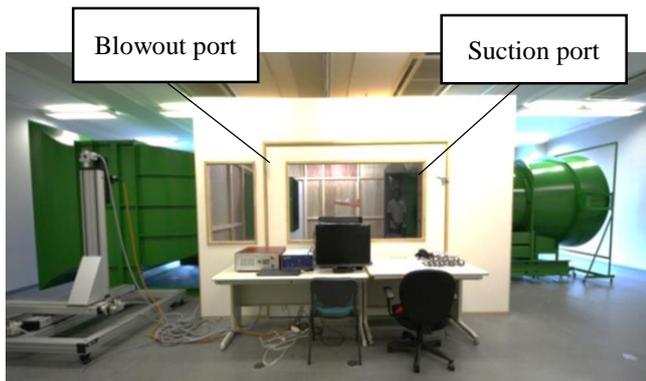


Fig.1 Wind Tunnel.

## 2. 数値計算法

### 2.1 OpenFOAM

解析ソフトは OpenFOAM を用いた。OpenFOAM は、有限体積法を中心とした偏微分方程式ソルバー開発用のクラスライブラリと、それによって作られたいくつかのソルバー及びツール群である。<sup>(1)</sup>特徴としてオープンソース化されているため自作のソルバーを実装することができる。本研究では ver.4.1 を用いて研究を行った。

### 2.2 計算モデル

計算モデルは風洞を天井から見た形状とする。本研究では風洞の吹き出し口の高さ方向中心断面を解析した。乱れは本来3次元の流れであるため3次元解析が望ましいが、まずは計算コストを考慮して2次元モデルで計算を行った。

計算格子を図2に示す。また計算格子は花崎<sup>(2)</sup>によって作成された格子を参考に OpenFOAM の blockMesh と snappyHexMesh を用いて格子を作成し計算を行った。総セル数は約35万セルである。

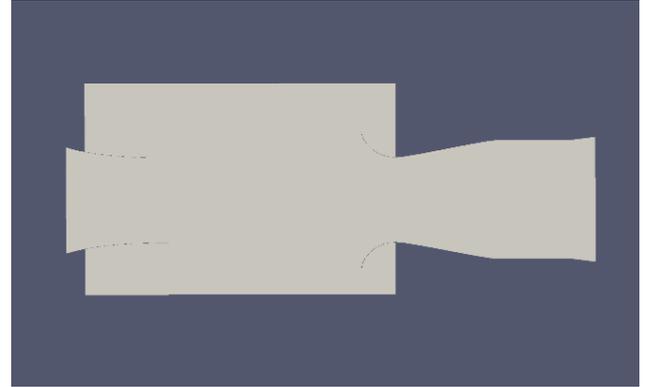


Fig.2 The model of wind tunnel.

### 2.3 計算条件

本研究では支配方程式として連続の式とナビエ・ストークス方程式を用いて解析を行った。

花崎による<sup>(2)</sup>RANS を用いた計算結果を定常状態と見なし初期条件として用いた。その状態から LES の乱流モデルにはkの1方程式SGSモデル<sup>(2)</sup>を使用し時間の離散化スキームには2次精度の backWard 法、空間の離散化の発散項に制限線形補間関数を使用し解析を行った。また OpenFOAM に実装されている非定常・非圧縮性流体解析の圧力-速度連成手法である piso法<sup>(3)</sup>を用いたソルバーpisoFoamを拡張し高精度化を行った rk4Foam<sup>(4)</sup>を作成しそれぞれのコードで計算を行った。それぞれのコードで LES 解析を dt=0.00001 で t=2 まで行った。

### 2.4 rk4Foam

今回新たに作成したソルバーは速度Uの時間ステップを4段階 Runge-Kutta 法を用いて次の時間ステップを求める。4段階 Runge-Kutta 法は離散化方法のひとつで

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t)$$

$$x(t_0) = x_0$$

で表される微分方程式に対して

$$k_1 = f(t_n, x_n)$$

$$k_2 = f(t_n + 0.5 \times dt, x_n + 0.5 \times dt \times k_1)$$

$$k_3 = f(t_n + 0.5 \times dt, x_n + 0.5 \times dt \times k_2)$$

$$k_4 = f(t_n + dt, x_n + dt \times k_3)$$

で表される $k_1 \sim k_4$ の値を用いて次の値を

$$x_{n+1} = x_n + \frac{dt}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$t_{n+1} = t_n + dt$$

で求める。

これを応用することによって時間ステップごとの速度の値を求める。まずセル面の運動量を流速フラックス $u$ とセル面の法線ベクトル $n$ の内積を使用して

$$\phi = u \cdot ndS$$

でセル面の運動量 $\phi$ の計算を行う。次に速度の増加分を

$$du = dt(v\Delta u - \nabla \cdot (uu))$$

で求める。その後1ステップ前の値 $U_n$ を参考にして

$$U_{n+1} = U_n + du$$

で速度を更新する。こののちに圧力などを参考にして計算を行う。この手順をそれぞれの段階で行うことにより速度の時間ステップを更新する。

### 3. 計算結果及び考察

$t=2$ の時の pisoFoam および rk4Foam での速度成分の解析結果を図3および図4に示す。また流れの乱れ度 $I$ を以下の式で求める。<sup>2)</sup>以下の式内の $U_i$ はある時間 $i$ での速度、 $N$ はデータ数を表す。

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N U_i$$

$$\bar{U}'^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (U_i - \bar{U})^2$$

$$I = \frac{\sqrt{\bar{U}'^2}}{\bar{U}} \times 100$$

またこの式によって求められた値を以下の図6に示す。傾向として全体的に乱れ度が pisoFoam と比較して rk4Foam のほうが大きくなる傾向にあると考えられる。また吹き出し口から 0.2m 地点での速度 $U$ の時間変化についてグラフに表すと図5のようになった。以上のことから今回作成したコードで解析を行うと pisoFoam で解析を行った結果と比較して rk4Foam を用いた解析は細かい速度の変化までとらえることができていると考えられる。

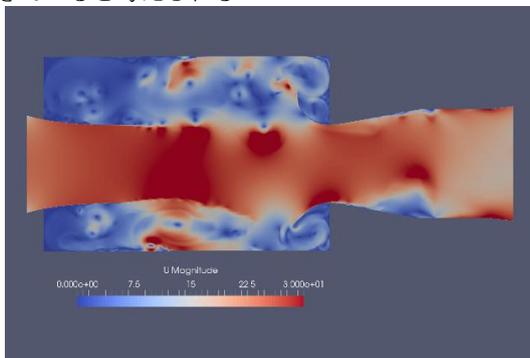


Fig.3 U for 2 sec(pisoFoam).

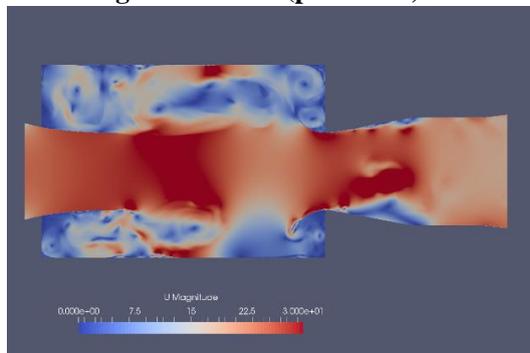


Fig.4 U for 2 sec(rk4Foam).

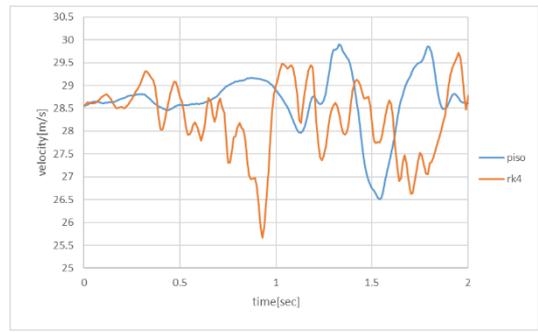


Fig.5 Change of velocity with respect to time(x=0.2).

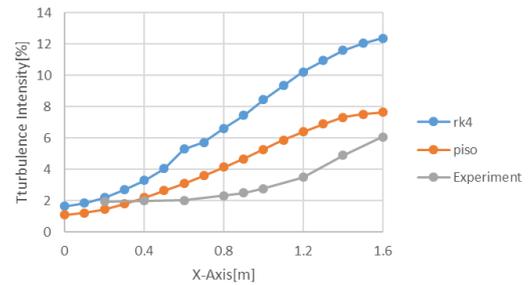


Fig.6 Turbulence intensity distribution.

### 4. 結論

本研究では風洞内の流れを再現するために新たなコードの実装と2つのコードの違いによる風洞内の流れの計算結果の比較を行った。その結果より精度の高い解析が得られた。今後風洞内の流れを完全に再現するためには今後メッシュサイズの見直しや空間精度の向上を行うことが必要になる。また風洞の流れや空気の乱れは本来3次元流れであるため今後3次元に拡張して解析を行うことも必要である。

### 文献

- (1) OpenFOAM : <https://www.openfoam.com/>.
- (2) 花崎正明, エッフェル式風洞における開放型測定部の流れ改善に関する研究, 高知工科大学修士論文, 2018.
- (3) 春日悠, 今野雅, 一般社団法人オープン CAE 学会, OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析.
- (4) Valerio D'Alessandro, Lorenzo Binci, Sergio, Montelpare, Renato Ricci, On the development of OpenFOAM solvers based on explicit and implicit high-order Runge-Kutta schemes for incompressible flows with heat transfer, Computer Physics Communications 222 (2018) 14-30.