

C17

遷音速におけるOpenFOAMの 圧縮性ソルバーの比較

2017年12月9日

松原 大輔

(オープンCAE勉強会@関西)

お詫びと訂正

講演概要集で誤記がありました。

記載されている計算結果は

「 非粘性

sonicFoamの速度の発散項はupwind 」

で行った結果となっております。

境界条件にも誤記があります(後に示します)。

申し訳ありません。

目次

1 OpenFOAMの圧縮性ソルバー

- ・ 圧縮性ソルバーの一覧
- ・ rhoCentralFoamとは
- ・ sonicFoamとは

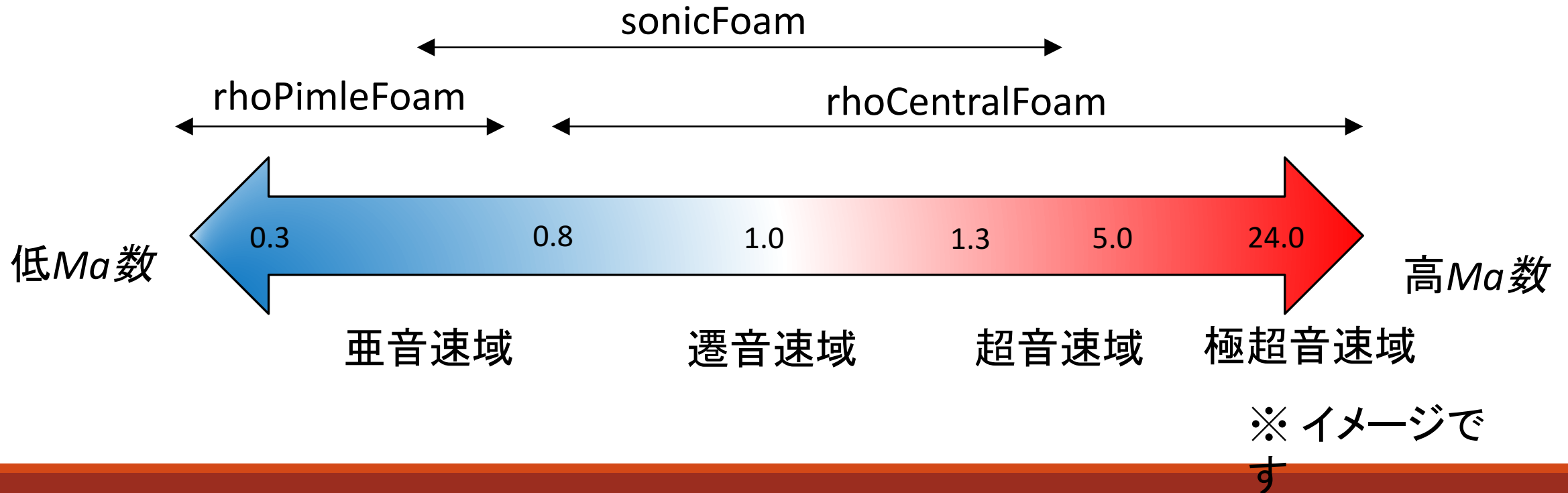
2 遷音速におけるnaca0012 airfoil周りの流れ

- ・ 計算対象と条件
- ・ 計算結果
- ・ 圧縮性ソルバーの比較

3 まとめ

圧縮性ソルバーの一覧

- rhoPimple(Simple)Foam
- sonicFoam
- rhoCentralFoam



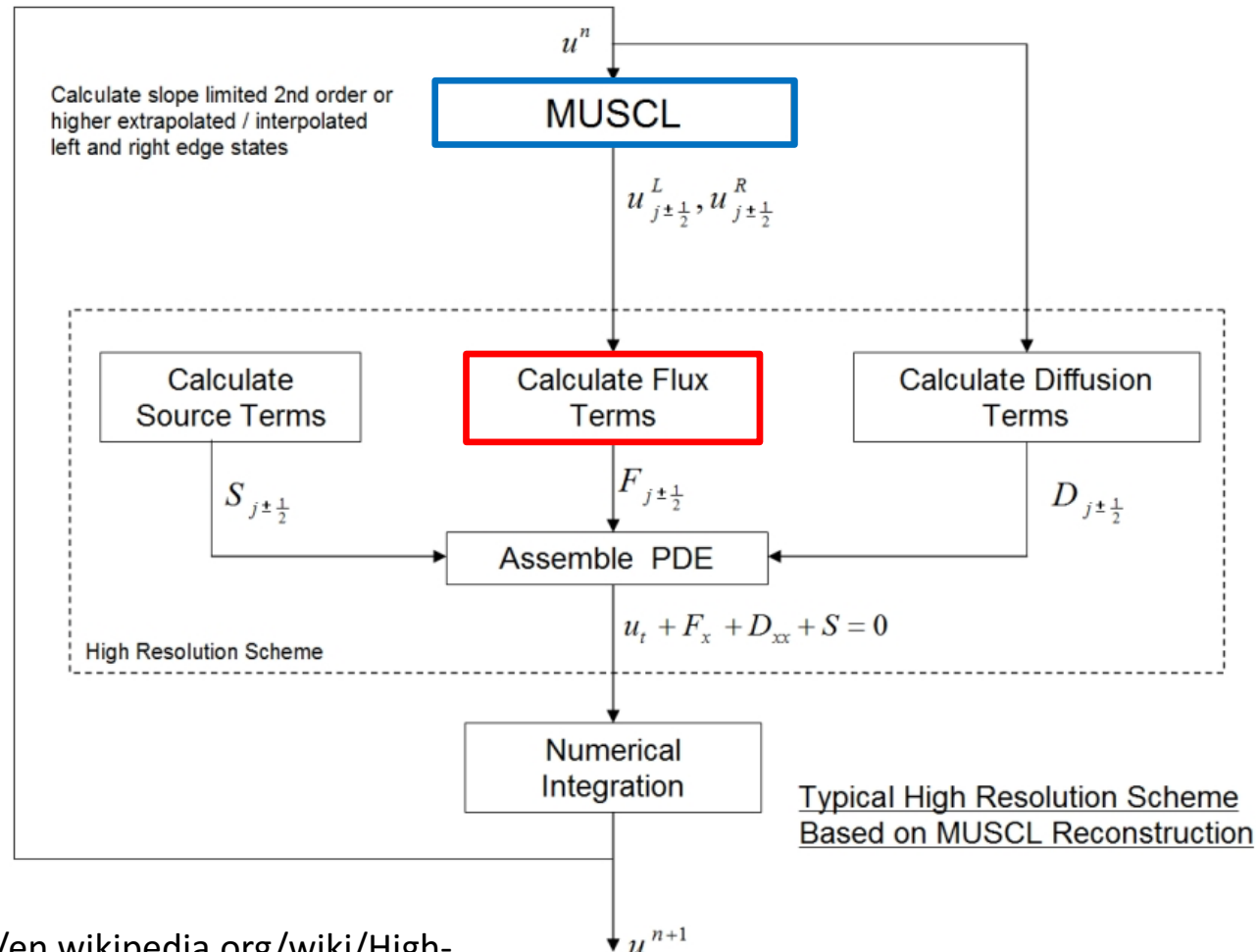
rhoCentralFoamとは

Density-based compressible flow solver based on central-upwind schemes of kurganov and tadmor

密度ベースソルバー

- ・ 数値フラックスと補間法を適切に選定することで計算安定性が高くなる(極超音速の計算も可能)
- ・ 低速の流れになる程, 計算時間と安定性の面で不利
- ・ 一般的に数値粘性が高いため境界層の精度に注意が必要

rhoCentralFoamとは



System/fvSchemes

fluxScheme Kurganov/Tadmor ;

interpolationSchemes

```
{  
  reconstruct(rho) vanLeer/etc..  
  reconstruct(U)  vanLeerV/etc..  
  reconstruct(T)  vanLeer/etc..  
}
```

https://en.wikipedia.org/wiki/High-resolution_scheme#/media/File:MUSCL_HiRes.jpg

rhoCentralFoamとは

rhoCentralFoam.C

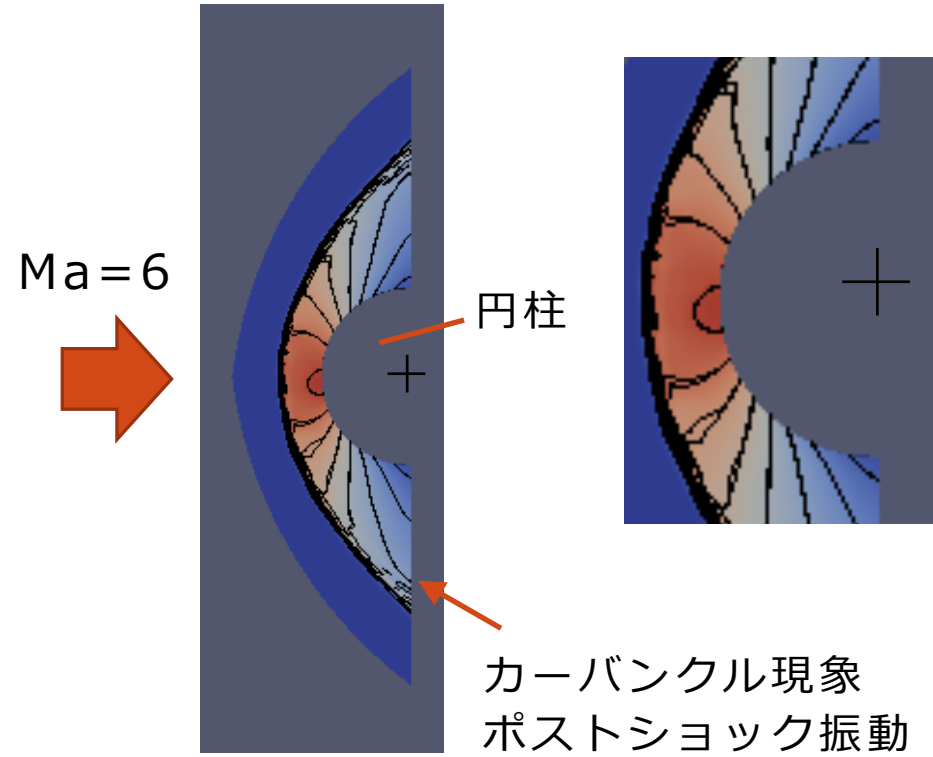
```
// --- Solve momentum
solve(fvm::ddt(rhoU) + fvc::div(phiUp));

U.ref() = rhoU() / rho();
U.correctBoundaryConditions();
rhoU.boundaryFieldRef() == rho.boundaryField()*U.boundaryField();

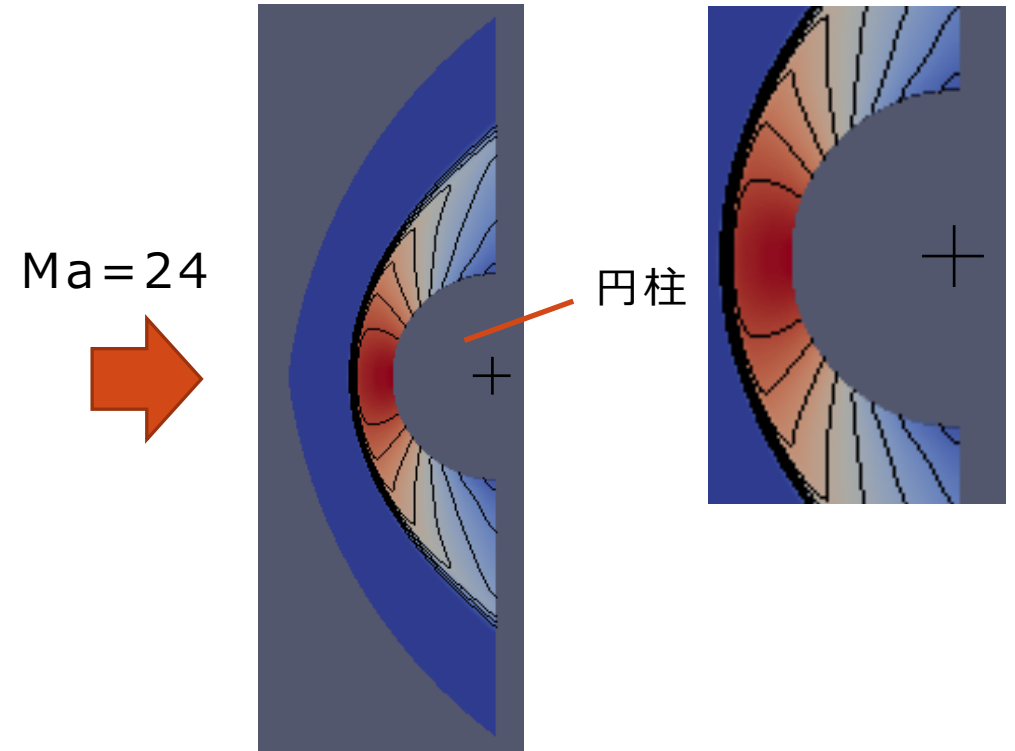
if (!inviscid)
{
    solve
    (
        fvm::ddt(rho, U) - fvc::ddt(rho, U) - fvm::laplacian(muEff, U) - fvc::div(tauMC)
    );

    rhoU = rho*U;
}
```

rhoCentralFoamとは 円柱に極超音速が衝突する例



sonicFoam



rhoCentralFoam
(Tadmor)

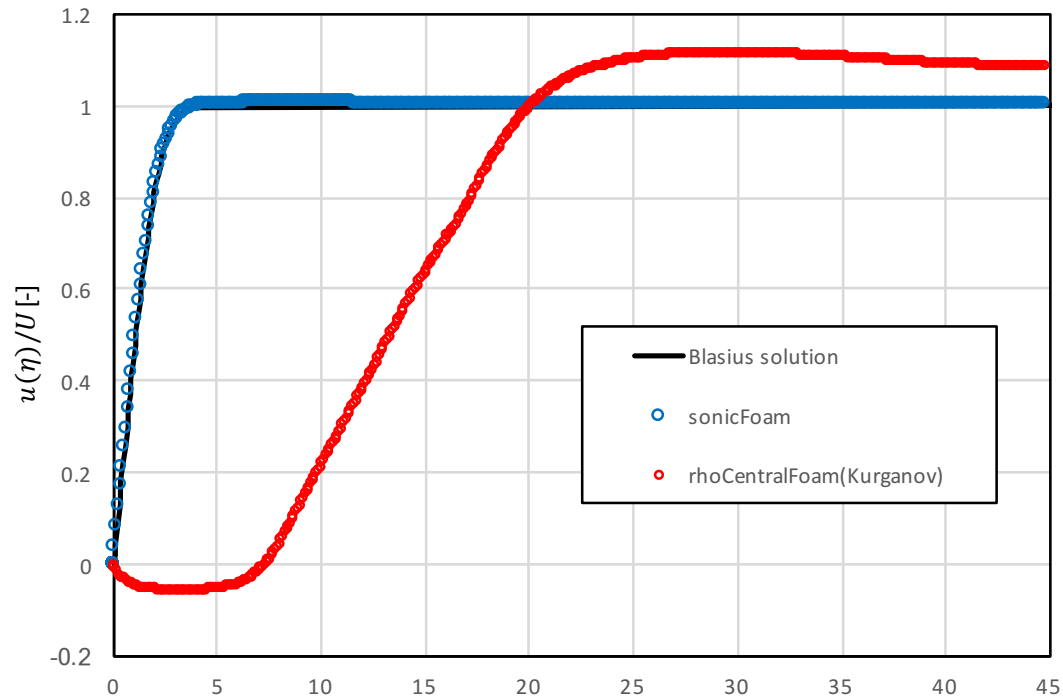
sonicFoamとは

Transient solver for trans-sonic/supersonic, laminar or turbulent flow of a compressible gas

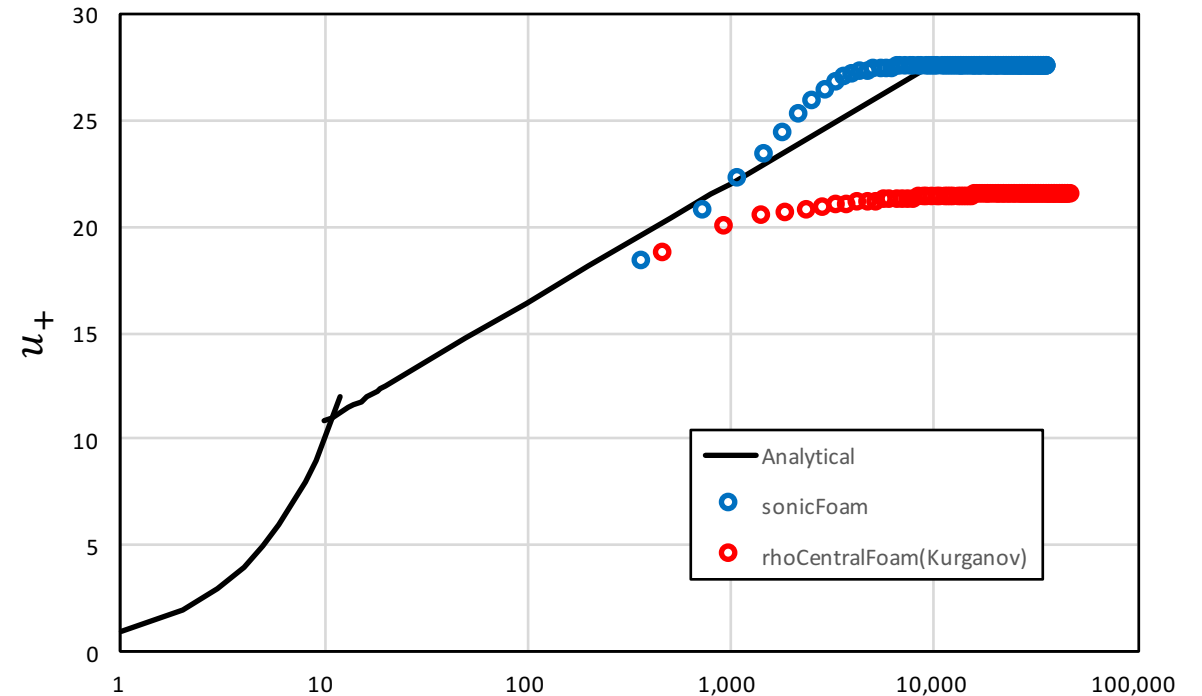
圧力ベースソルバー

- ・ 実務レベルで用いることが多い(ほぼこれ?)
- ・ 遷音速以上の領域で数値振動が起こりやすい
- ・ 乱流計算などで実績が豊富

sonicFoamとは 平板流れの層流・乱流境界層の例



$Re = 1 \times 10^5$
層流

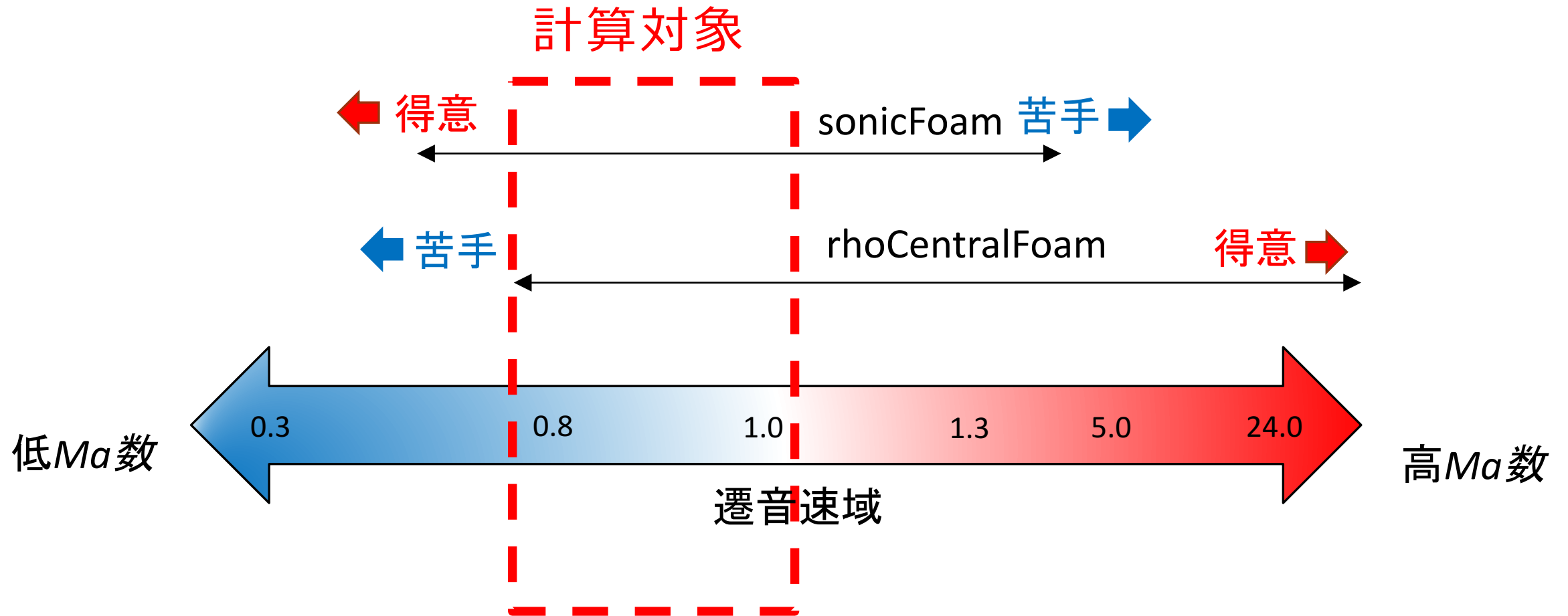


$Re = 5 \times 10^6$
乱流モデル: k- ϵ +壁関数

計算格子:

http://openfoamwiki.net/index.php/Blasius_Flat-Plate_Flow_Benchmark

圧縮性ソルバーの比較



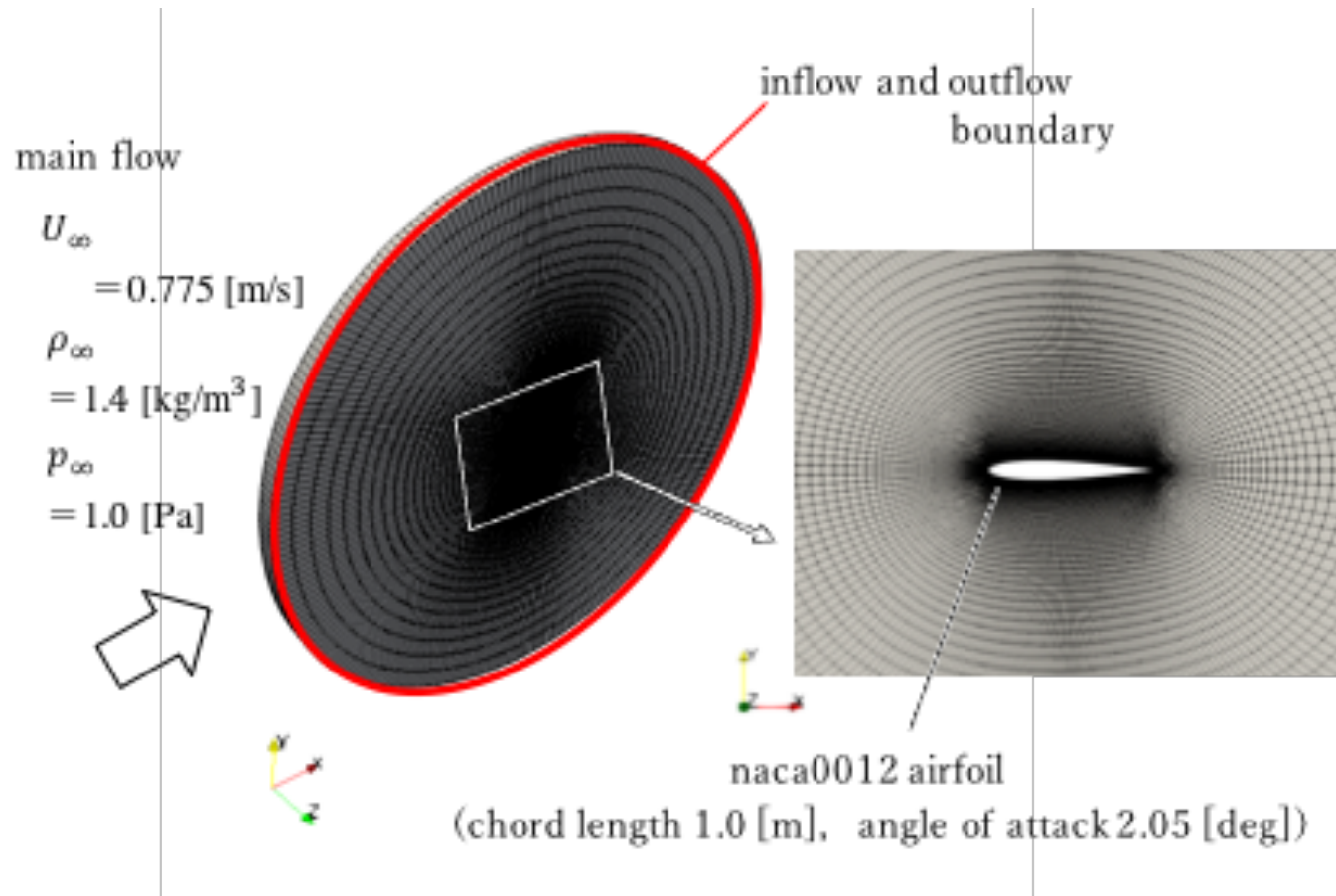
遷音速流れの特徴

超音速領域と亜音速領域が混在しているため，高い非線形を示し，解析が困難

衝撃波と境界層の干渉について解明できていないことが多い

出典:<http://www.cradle.co.jp/tec/column08/005.html>

計算対象と条件



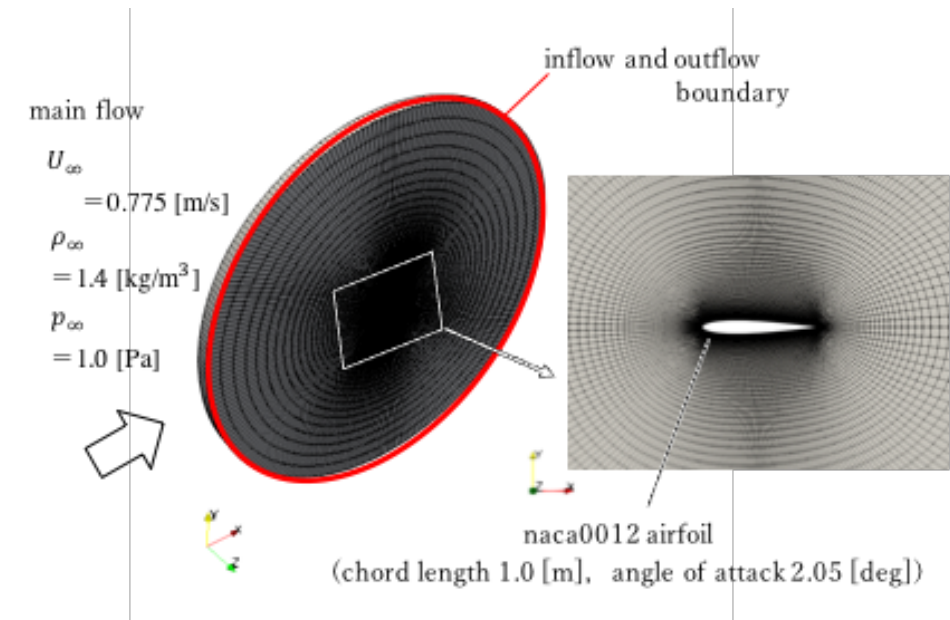
摘要	設定
simulationType	laminar
Cp	2.5
nMoles	1
molWeight	11640.3
Pr	1
mu	7.75×10^{-8}

計算格子:

[HTTP://3D.USKUDAR.BIZ/BAREHULL/CAE-CASE-FILES/CFD/NACA-0012-2D-GRID-FOR-OPENFOAM.HTML](http://3d.uskudar.biz/barehull/cae-case-files/cfd/naca-0012-2d-grid-for-openfoam.html), (ACCESSED 2017-11-1)

境界条件

摘要	流入流出境界	翼表面
速度	<pre>type inletOutlet inletValue uniform (0.774504 0.0104759 0);</pre>	slip/noSlip
温度	<pre>fixedValue uniform 1</pre>	zeroGradient
圧力	<pre>fixedValue uniform 1</pre>	zeroGradient



計算条件

sonicFoam

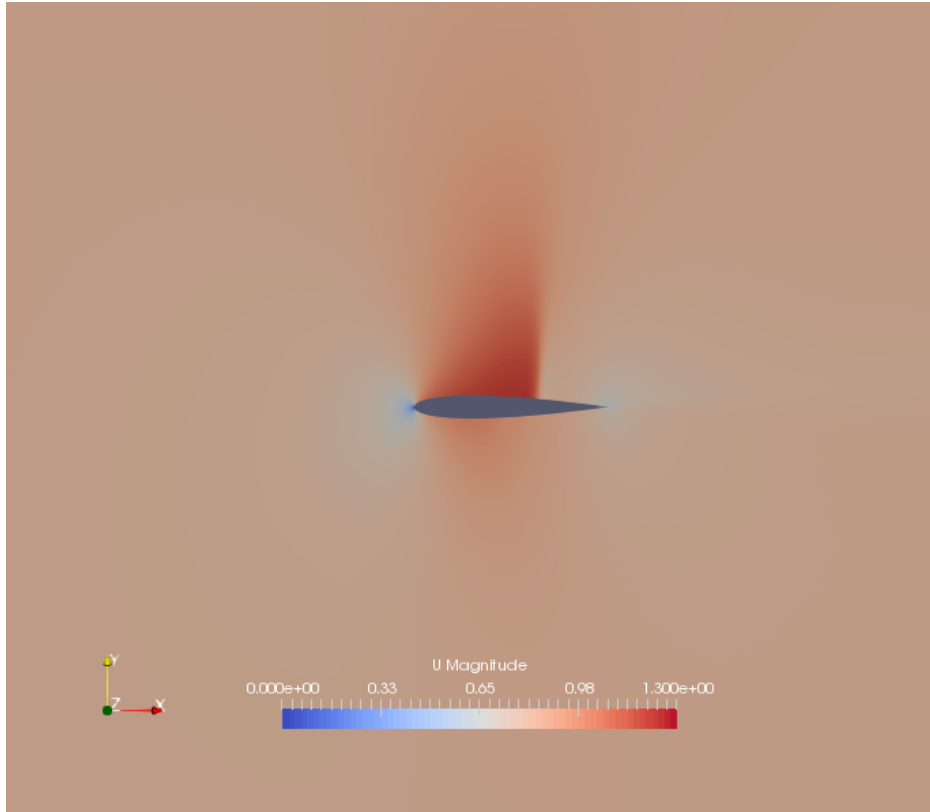
摘要	設定
時間発展	Euler
発散項の離散化	limitedLinear(V) 1.0 / upwind
nCorrectors	1
nOuterCorrectors	2
nNonOrthogonalCorrectors	2

rhoCentralFoam

摘要	設定
時間発展	Euler
reconstruction	vanLeer(V)
flux scheme	Kurganov
粘性項	Linear

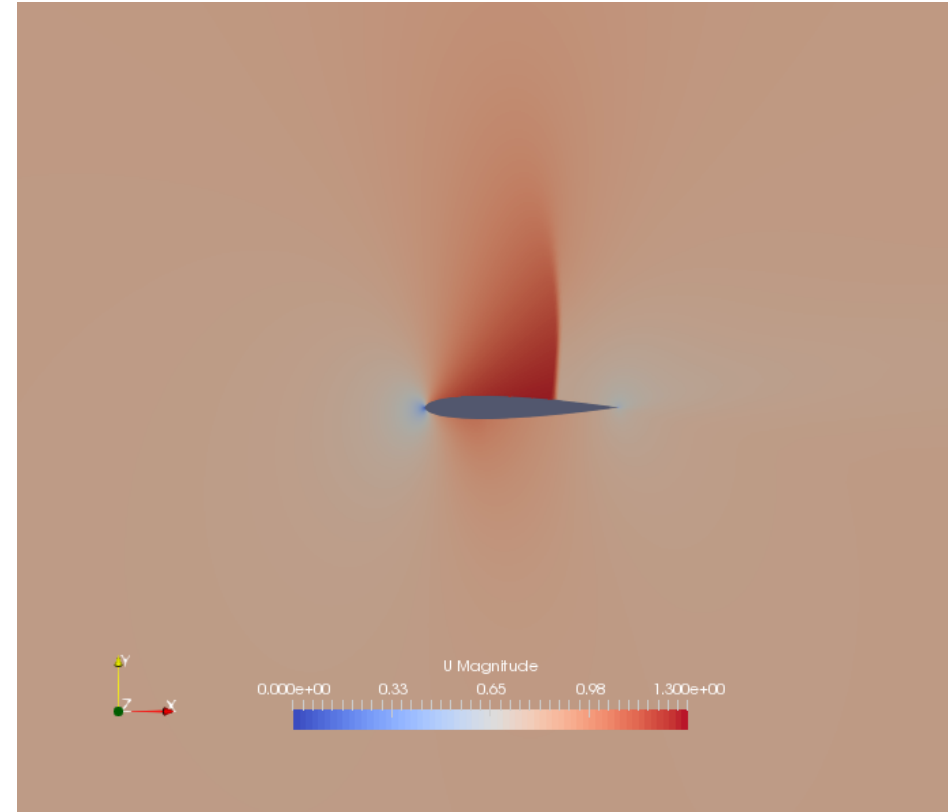
Naca0012 airfoil 周りの遷音速流れ

非粘性流れ



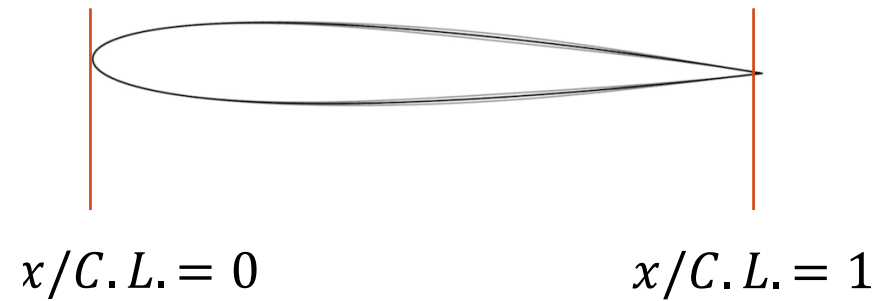
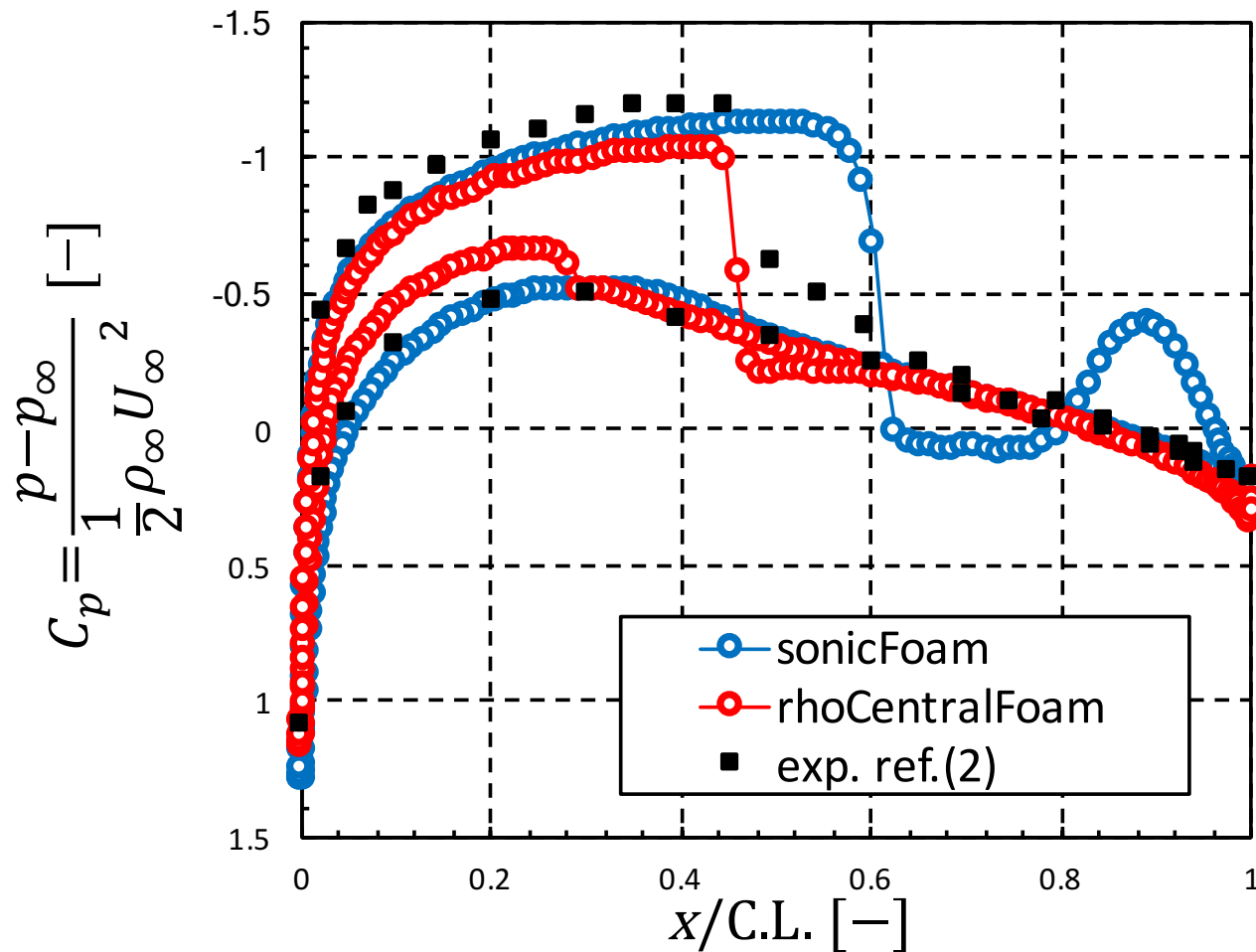
sonicFoam

sonicFoamの発散項(速度) → upwind



rhoCentralFoam

Naca0012 airfoil 周りの遷音速流れ



条件:

非粘性流れ

sonicFoamの発散項(速度)

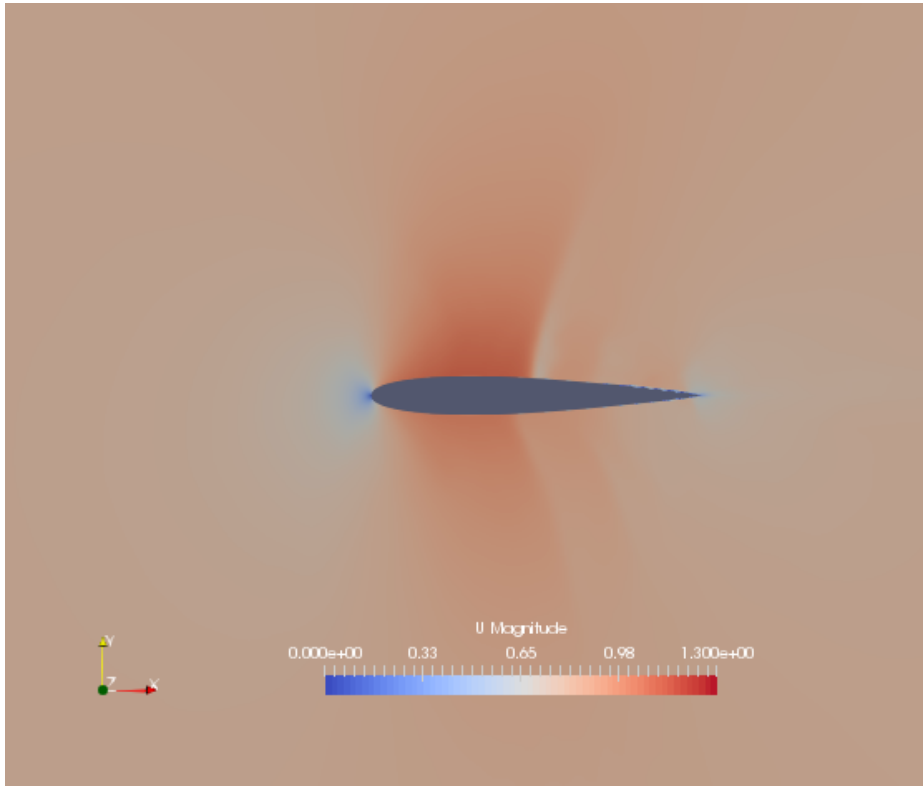
→ upwind

実験:

MCDEVITT, J.B. AND OKUNO, A.F., "STATIC AND DYNAMIC PRESSURE MEASUREMENTS ON A NACA 0012 AIRFOIL IN THE AMES REYNOLDS NUMBER FACILITY", NADA TP 2485, 1985.

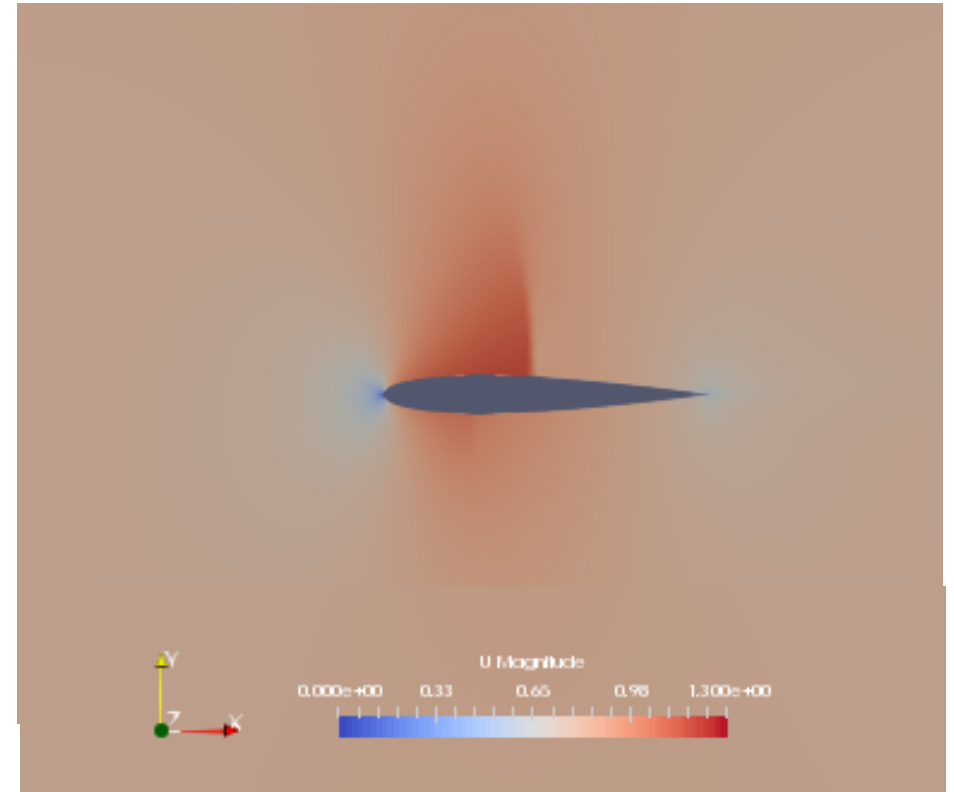
Naca0012 airfoil 周りの遷音速流れ

粘性流れ



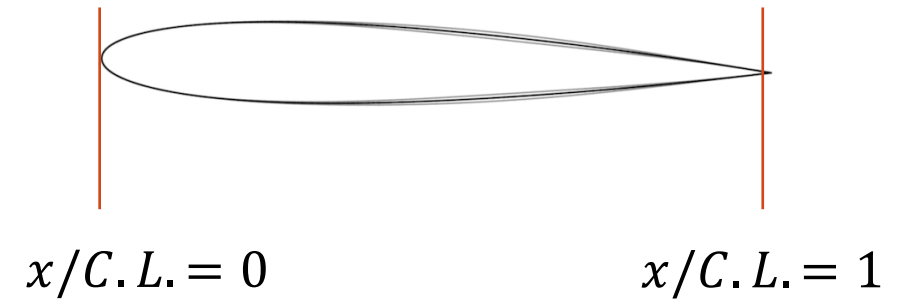
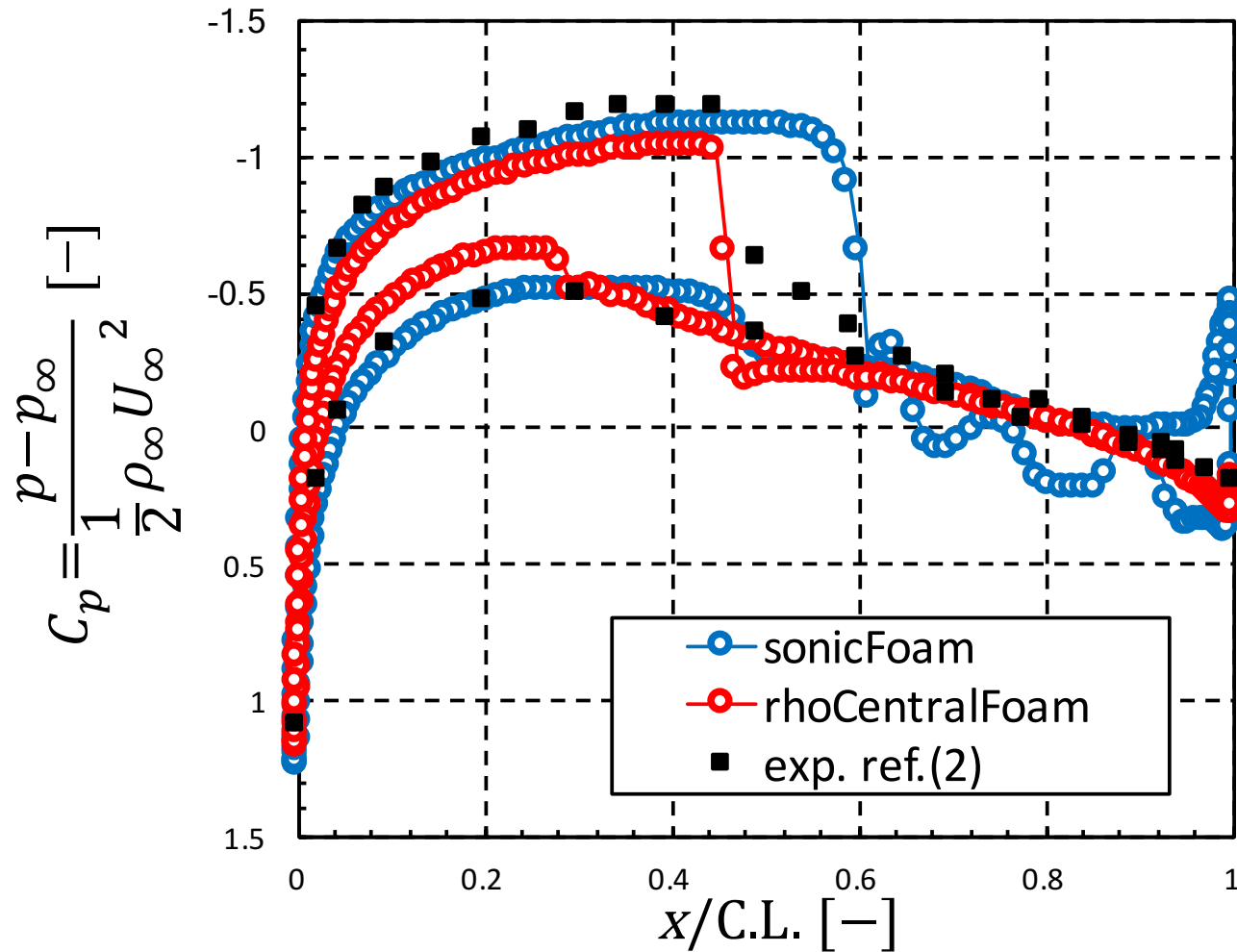
sonicFoam

sonicFoamの発散項(速度) → limitedLinear(V) 1.0



rhoCentralFoam

Naca0012 airfoil 周りの遷音速流れ



条件:

粘性流れ(層流)

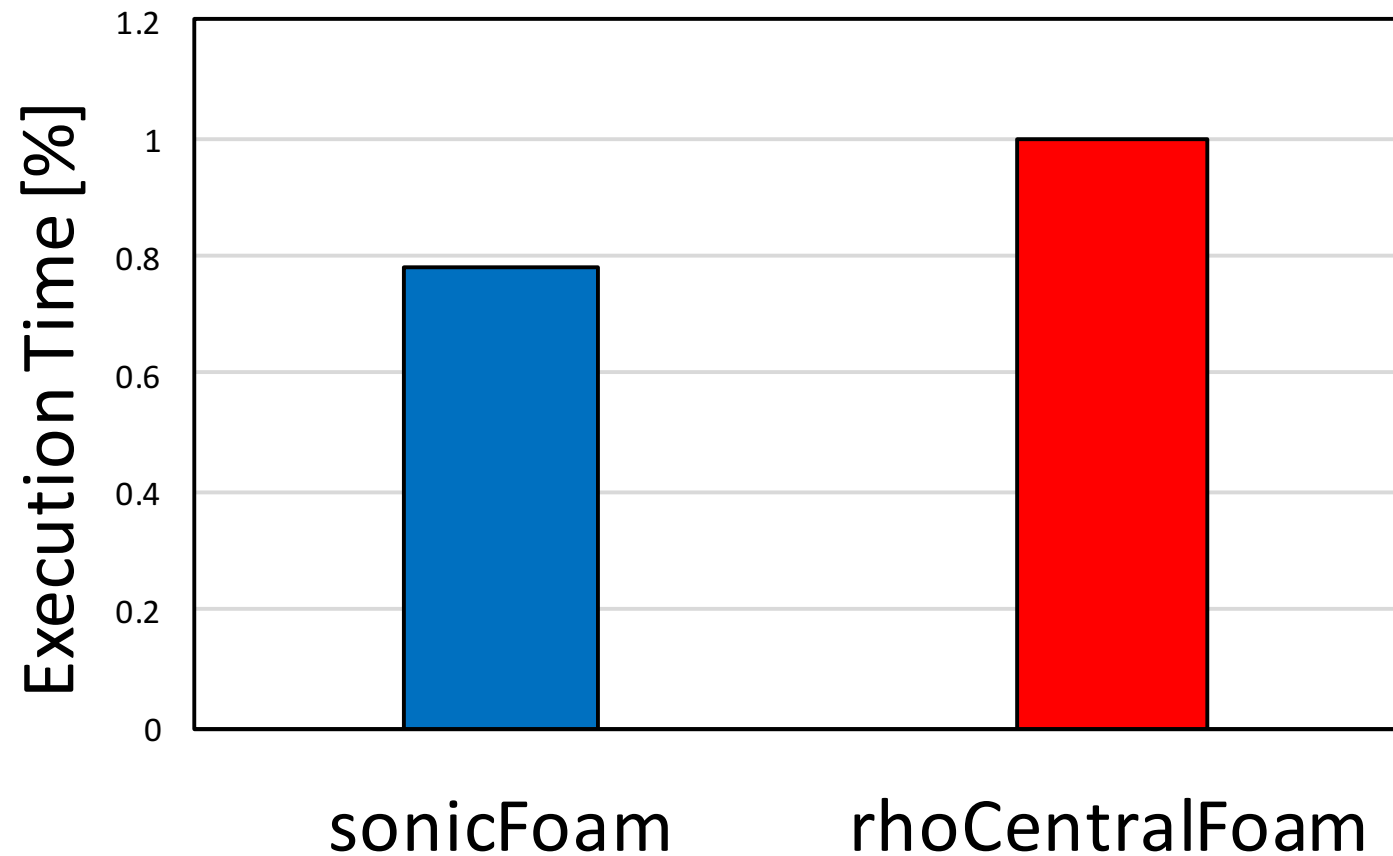
sonicFoamの発散項(速度)

→ limitedLinearV 1.0

実験:

MCDEVITT, J.B. AND OKUNO, A.F., "STATIC AND DYNAMIC PRESSURE MEASUREMENTS ON A NACA 0012 AIRFOIL IN THE AMES REYNOLDS NUMBER FACILITY", NADA TP 2485, 1985.

計算時間の比較



まとめ

naca0012 airfoil周りの遷音速流れを対象に密度ベースソルバーであるrhoCentralFoamと圧力ベースソルバーであるsonicFoamの比較を行った

rhoCentralFoamの方が衝撃波をシャープに捉えることができ、sonicFoamでは後縁付近で振動オーバーシュートが発生するなど異常現象が発生したが、計算負荷はsonicFoamの方が低いことがわかった

補足資料

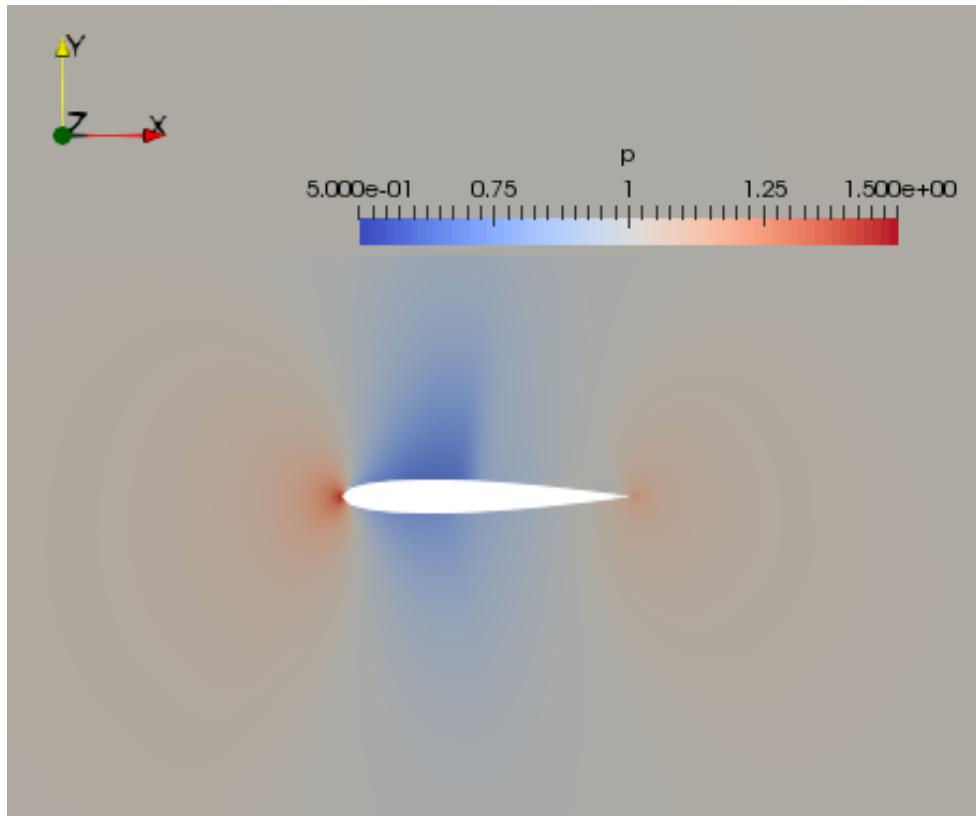
rhoCentralFoam.C

```
surfaceScalarField am
(
    "am",
    min(min(phiv_pos - cSf_pos, phiv_neg - cSf_neg), v_zero)
)
surfaceScalarField a_pos("a_pos", ap/(ap - am));
surfaceScalarField amaxSf("amaxSf", max(mag(am), mag(ap)));
surfaceScalarField aSf("aSf", am*a_pos);

if (fluxScheme == "Tadmor")
{
    aSf = -0.5*amaxSf;
    a_pos = 0.5;
}
```

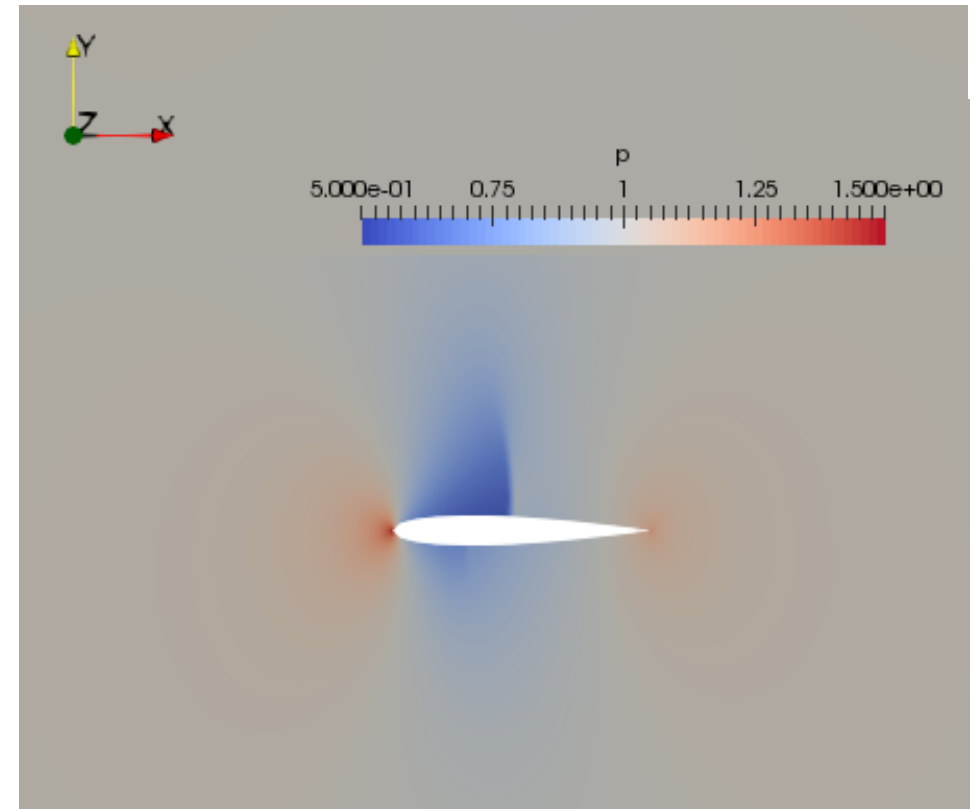
補足資料

非粘性流れ



sonicFoam

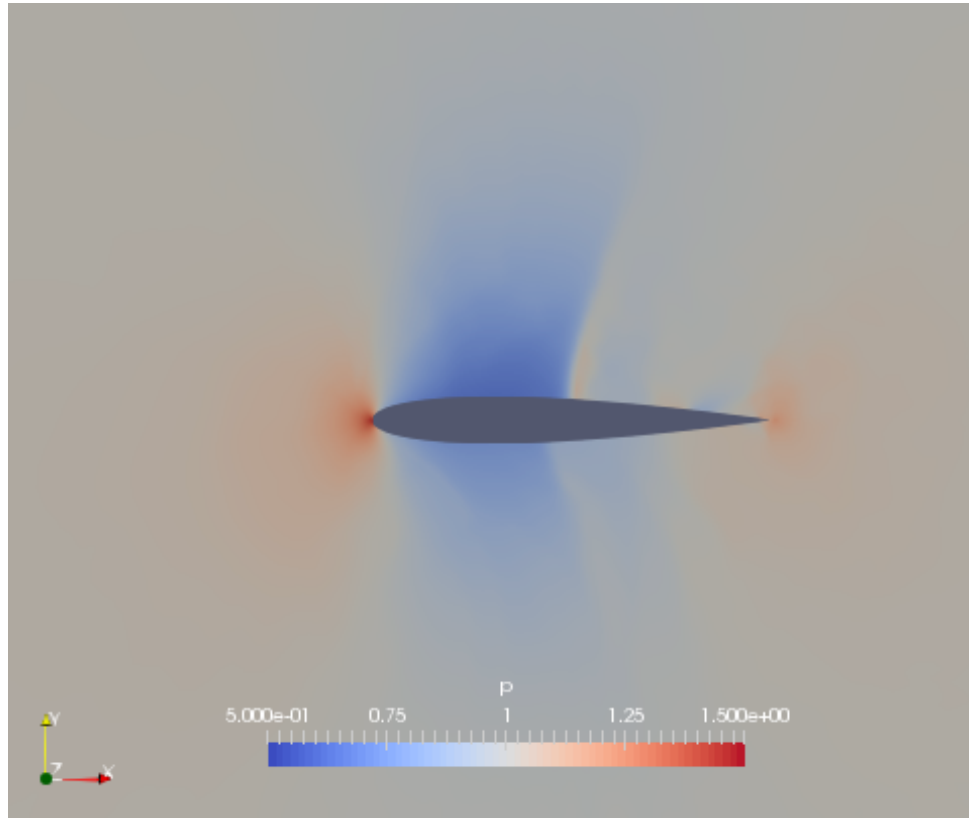
sonicFoamの発散項(速度) → upwind



rhoCentralFoam

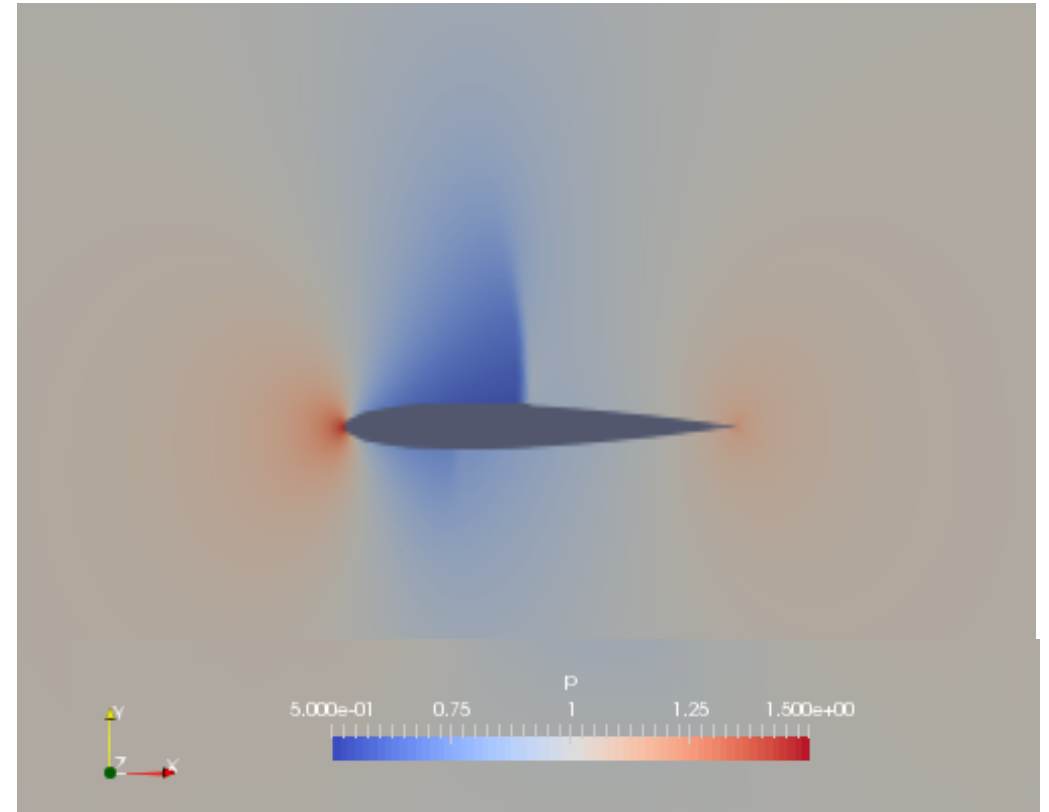
補足資料

粘性流れ



sonicFoam

sonicFoamの発散項(速度) → limitedLinear(V) 1.0



rhoCentralFoam