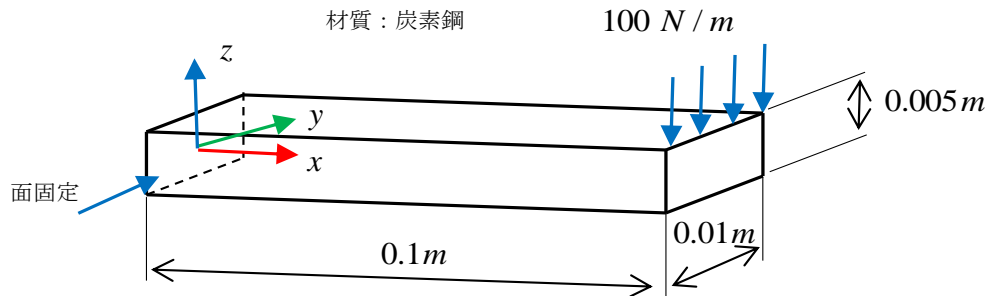


# CAE by ANSYS Workbench 14.5

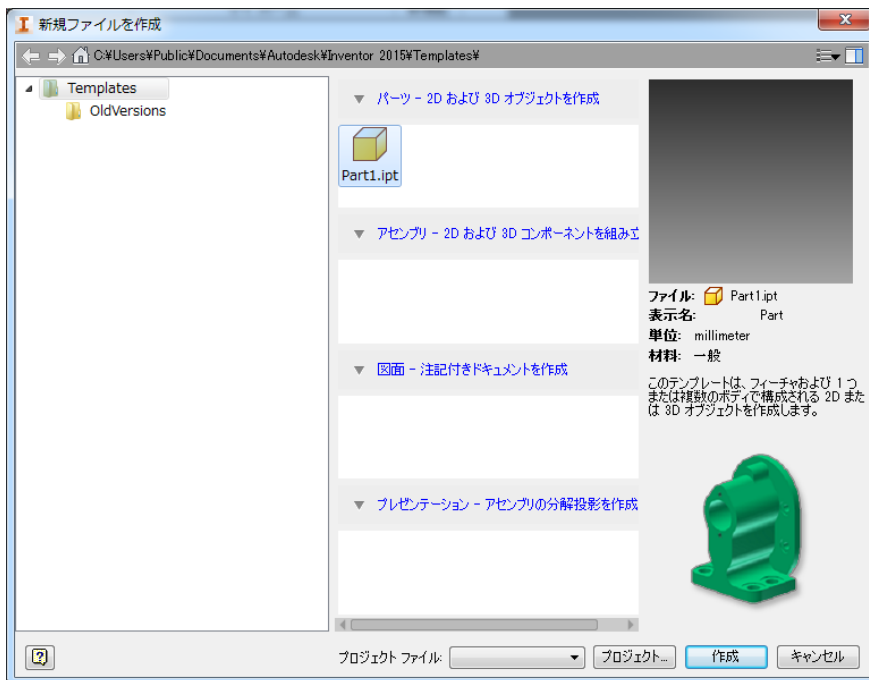
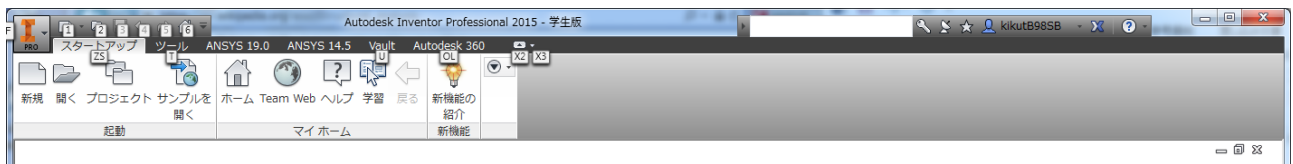
## 1 構造解析 (Structural analysis) : 梁の静力学解析の例

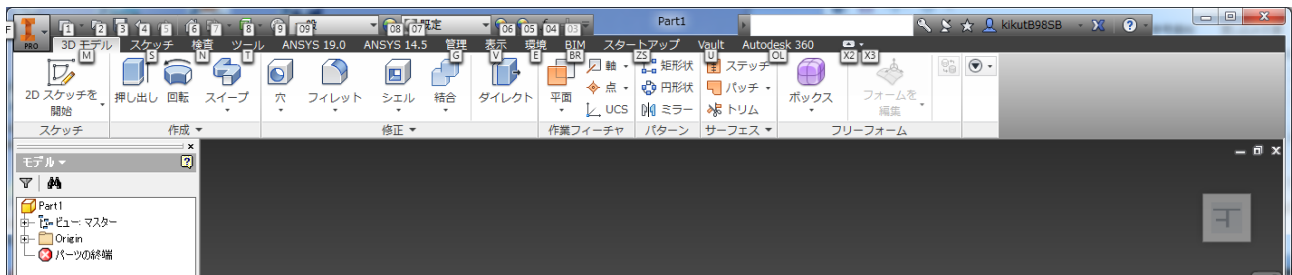


上記の梁の曲げ問題を取り扱う。CAD ソフト (Preprocessor) でモデルを作図し、ANSYS Workbench を呼び出して CAD データを流し込み、構造解析 Window (Solver) で境界条件を設定したあと計算し、計算結果メニュー (Postprocessor) で可視化する。

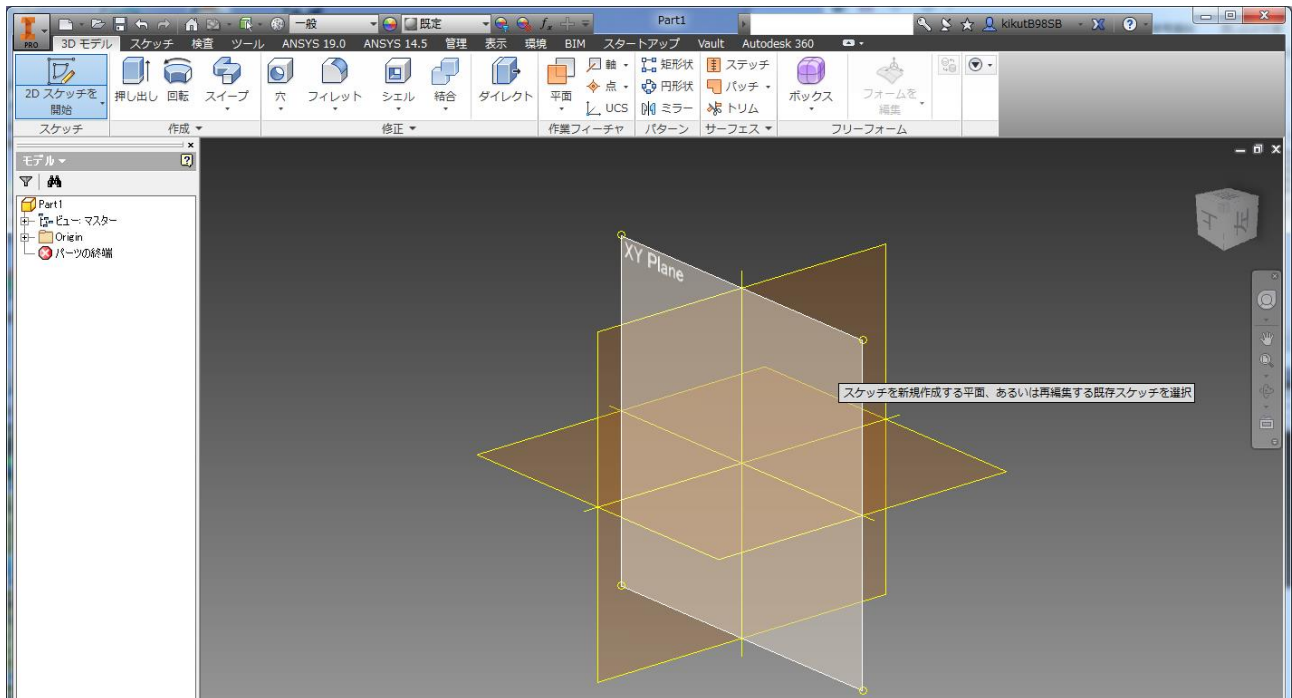
### 1.1 CAD モデル生成

Auto Desk Inventor Professional 2015 を立ち上げ、「スタートアップ」から「新規」を選択し、「パーツ 2D および 3D オブジェクトを作成」から、例えば、「Part1.ipt」をテンプレートとして「作成」する。

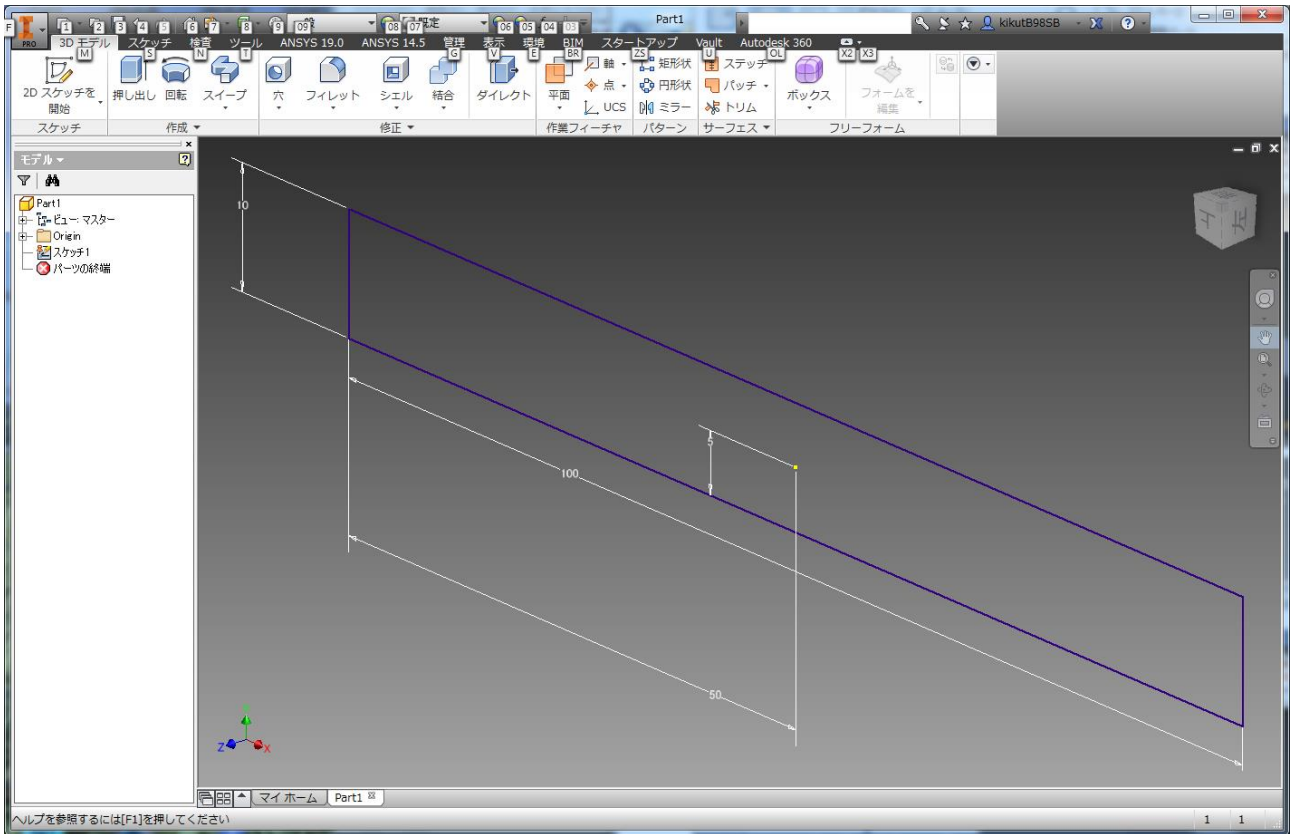
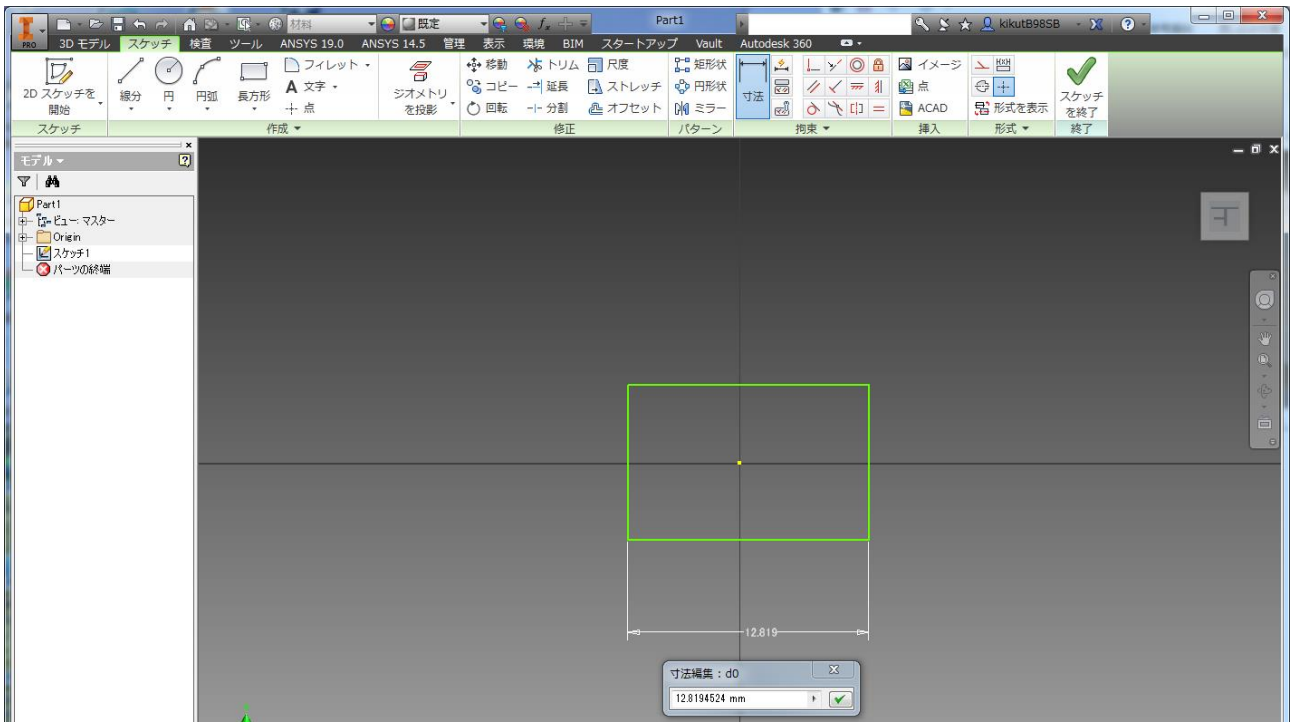




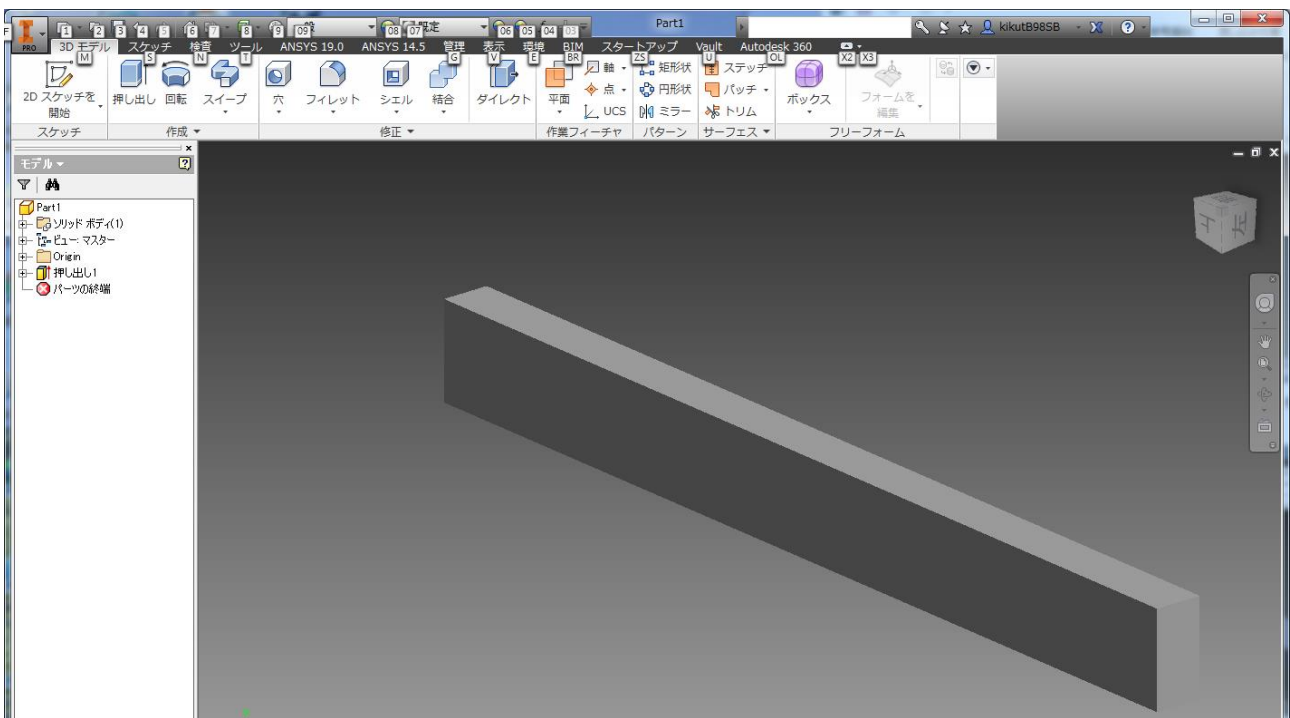
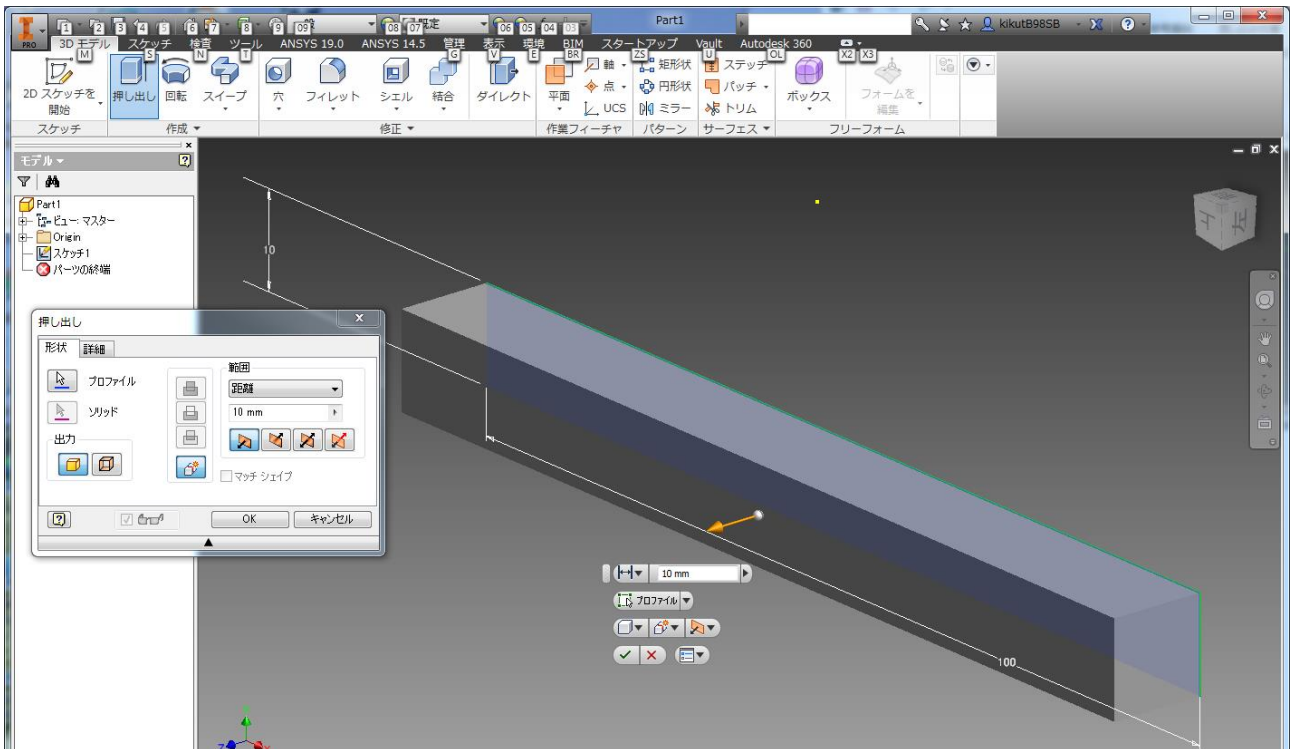
メニューバーから「2D スケッチを開始」を選択し、画面内の「XY Plane」をクリックする。



メニューバーから「長方形」を選択し、画面内で長方形となる左上頂点と左下頂点をクリックし、「寸法」を選択して長方形の底辺をクリックし、寸法”100”mmを入力、左辺をクリックして寸法”10”mmを入力する。また、データムを物体中心にするために、原点から底辺を”5”mmにし、原点から左辺を”50”mmにし、「スケッチを終了」する。このとき、モデルの大きさは、マウスの真ん中ローラで変更できる。モデルの移動は、画面右の「画面移動 (手の絵)」を選択し、モデルの回転は、「自由オービット (回転の絵)」マウスのクリックの役割を切り替えてから行う。



メニューバーの「押し出し」を選択し、「範囲」の「距離」に「5」mm を入力し、「OK」をクリックして 3D 化する。2D モデルが一つしかないため、自動的に作図した長方形が選択されている。

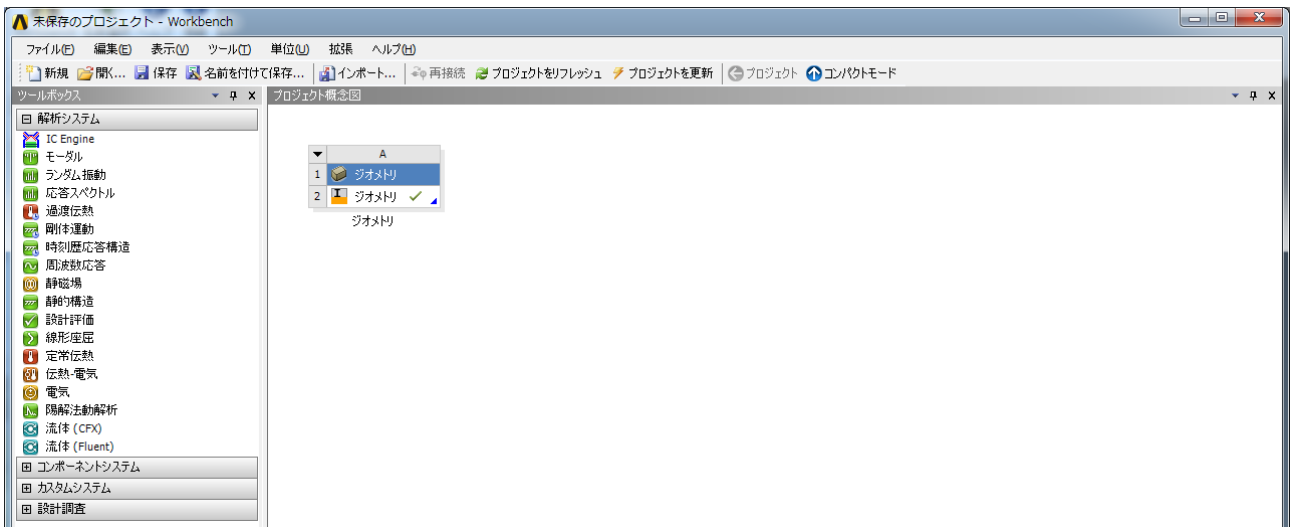


ここでは、"cantilever.ipt"として save しておく。

## 1.2 ANSYS による構造解析

### (a) CAD データの読み込みと構造解析の選択

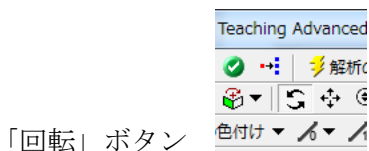
Inventor の上部タグから「ANSYS14.5」を選択し、現れたメニューバーから「Workbench」を選択すると、ANSYS Workbench が立ち上がる。

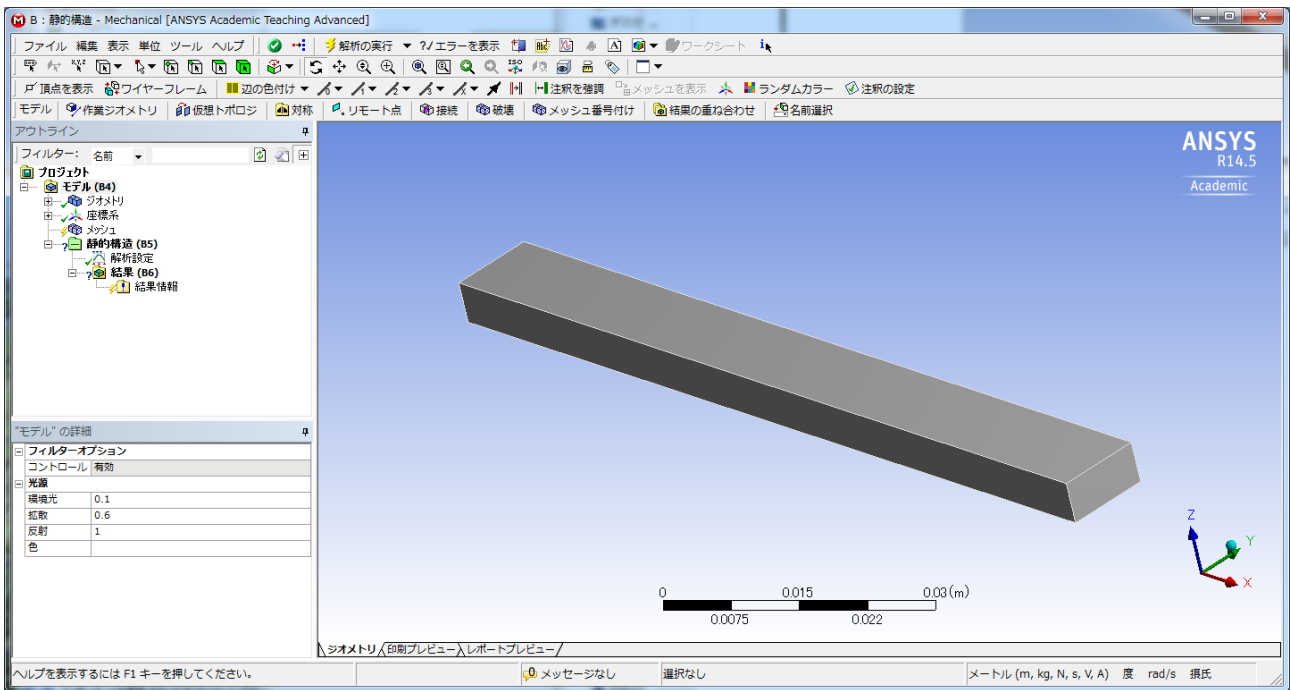


ここで、「ジオメトリV」となっている場合は、この時点でCADモデルは読み込まれている（「ジオメトリ？」となっている場合には、一度CADでモデルをセーブし、データを更新しておくことで読み込まれる）。構造解析を行うために、左のツールボックスの「静的構造」をドラッグし、右の画面の「ジオメトリV」にドロップすると、静的構造 Window がオープンする。A 項目のジオメトリから、B 項目のジオメトリへラインが結合され、データが出力されていることを示している。



次に「モデル」をダブルクリックすると、新たな静的構造 Mechanical Window が立ち上がり、CAD モデルが表示される。メニューバーの「回転」ボタンをクリックし、画面をドラックしながらモデルを回転させ、z 軸を上向きにする。



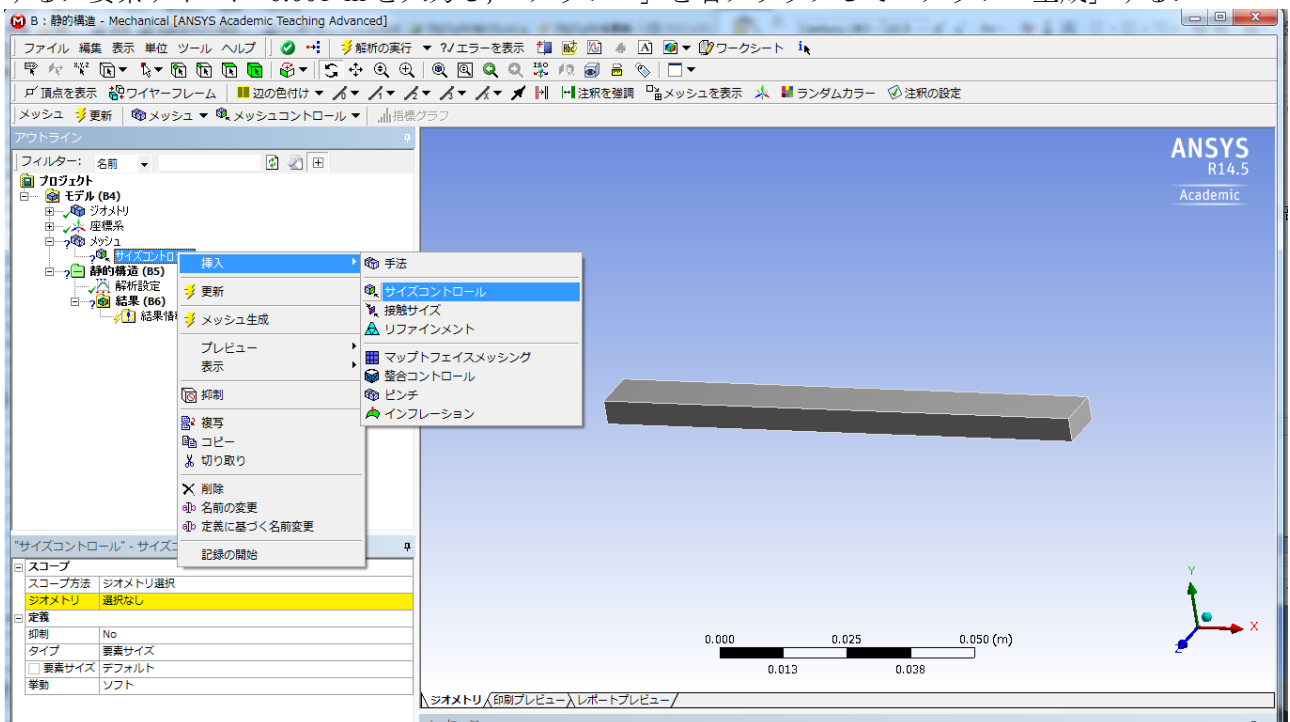


### (b) 物性値の設定

アウトラインのジオメトリを展開し, "cantilever.ipt"をクリックすると, 左下に材料が表示され, "構造用鋼"が選択されていることが分かる. プロジェクトの「エンジニアリングデータ」により様々な材料を設定できる.

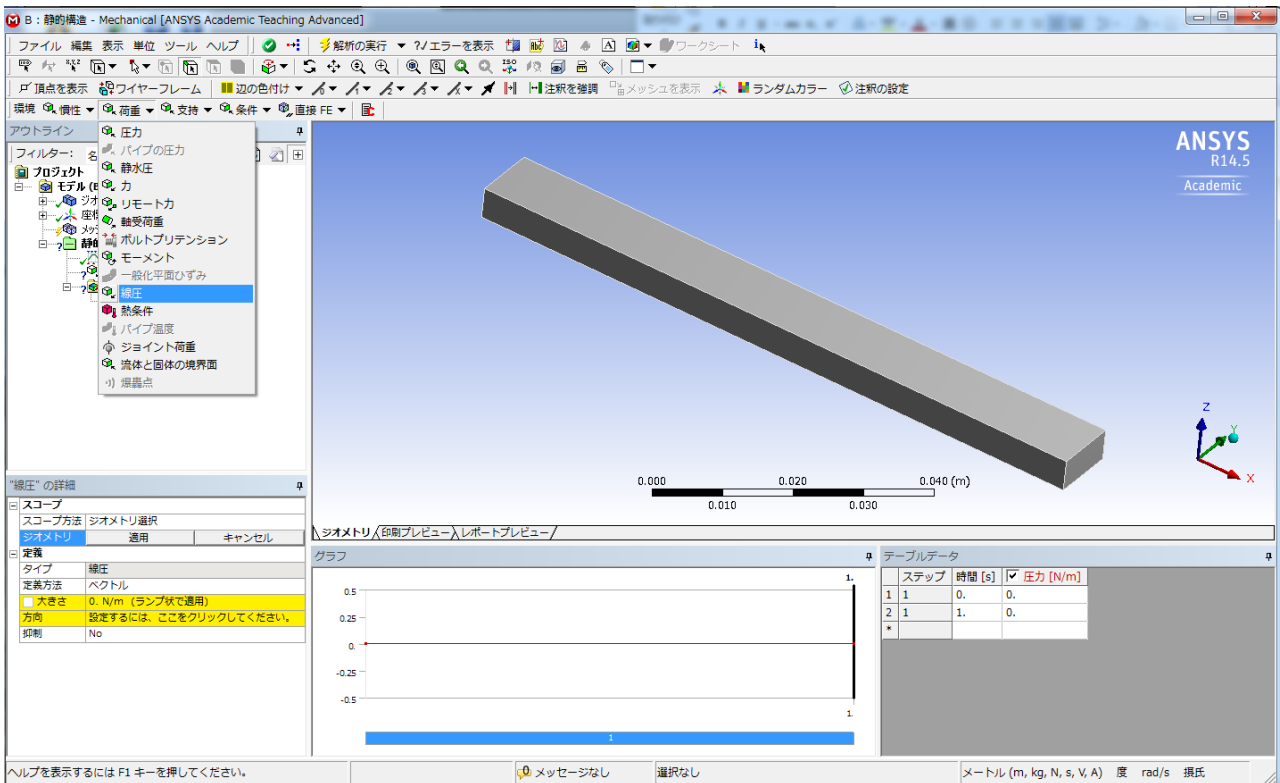
### (c) メッシュング

アウトラインの「メッシュ」を右クリックし, 「挿入」を選択し, 「サイズコントロール」をクリックすると, メッシュのサイズを設定できる. 画面のモデルのボディを選択し, 左下のジオメトリで「適用」する. 要素サイズに"0.001"mを入力し, 「メッシュ」を右クリックして「メッシュ生成」する.

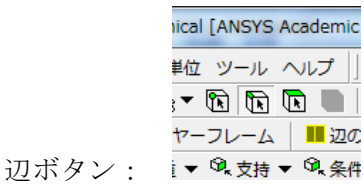


### (d) 荷重条件の付加

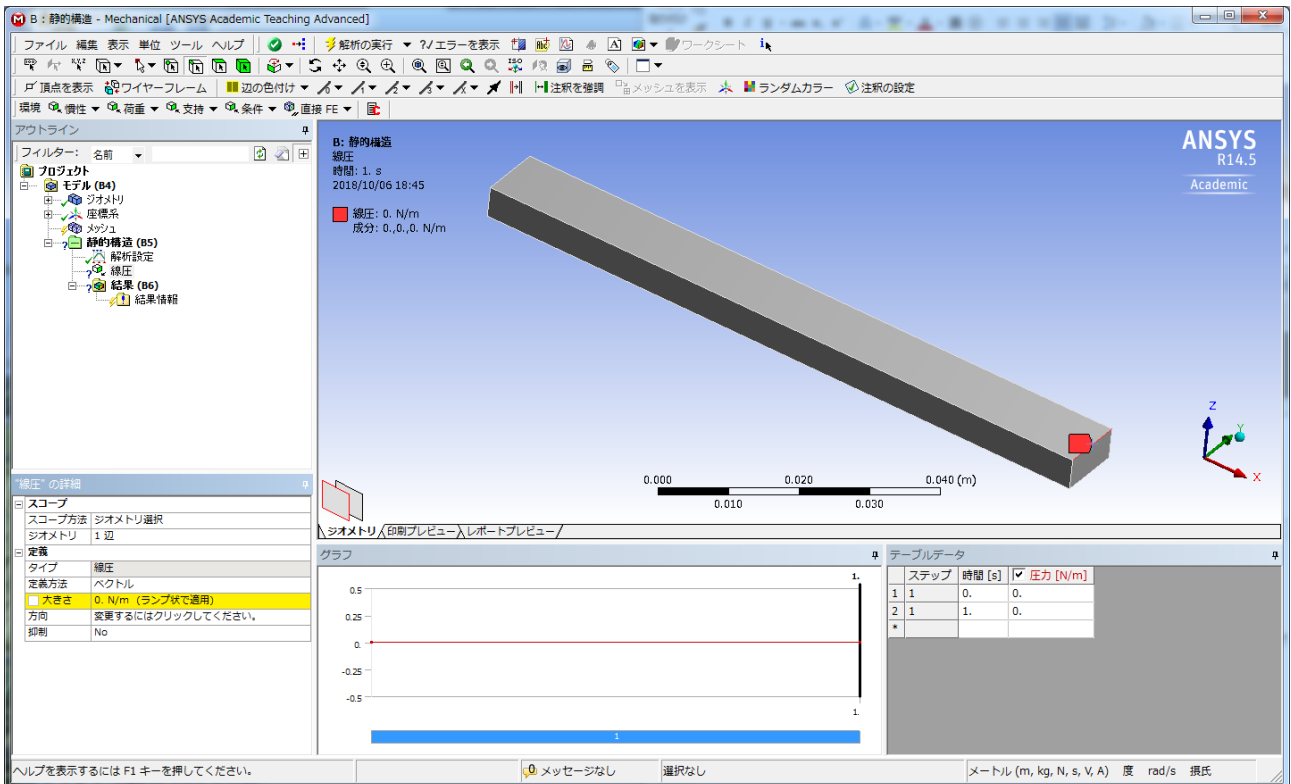
左のアウトラインの「静的荷重 (B5)」をクリックし, 上部メニューバー「荷重」を選択し, プルダウンメニューから「線圧」を選ぶ.



メニューバーの「辺」を選択し、画面中のモデルの右端の辺をクリックし、左下の「適用」をクリックする。



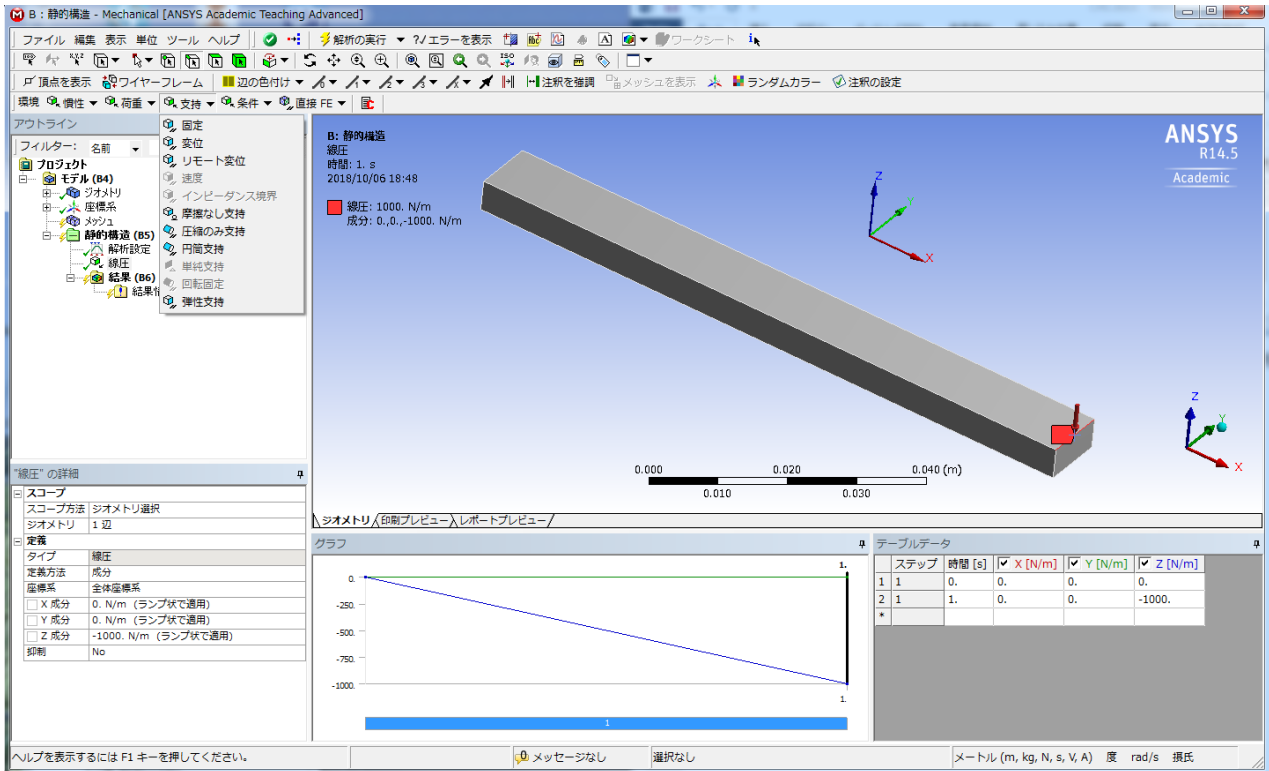
辺ボタン：



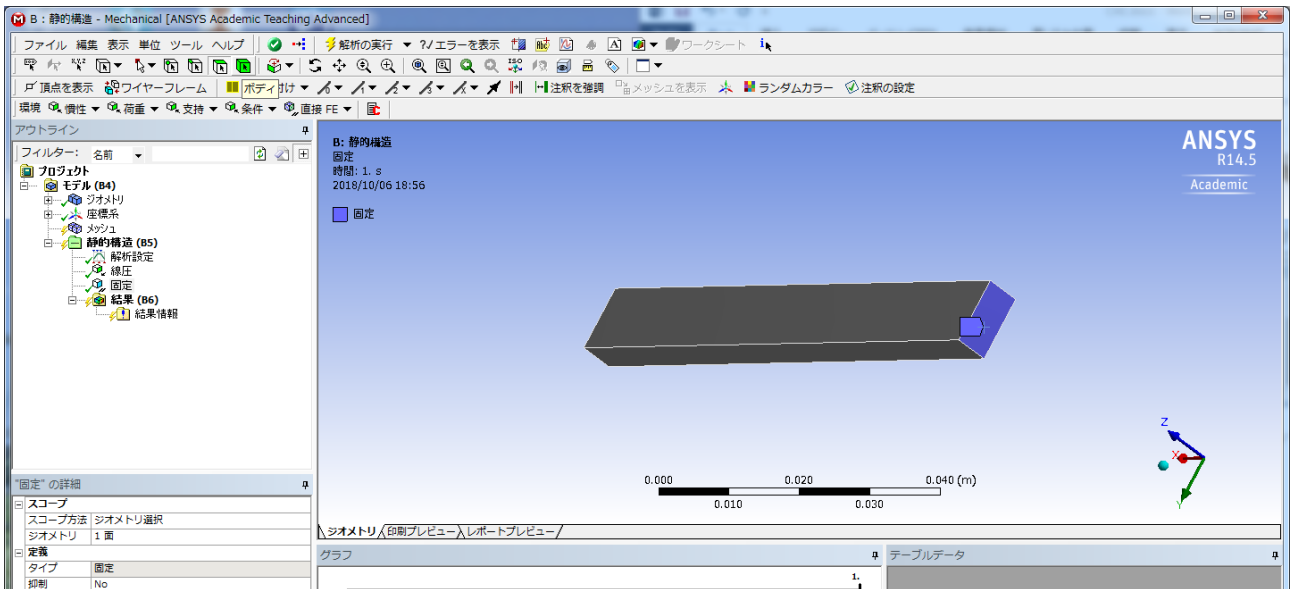
左下の定義方法をプルダウンして「成分」を選択し、z成分に"-100" N/mを入力する。

### (e) 支持条件の付加

メニューバーの「支持」をプルダウンして「固定」を選択する。

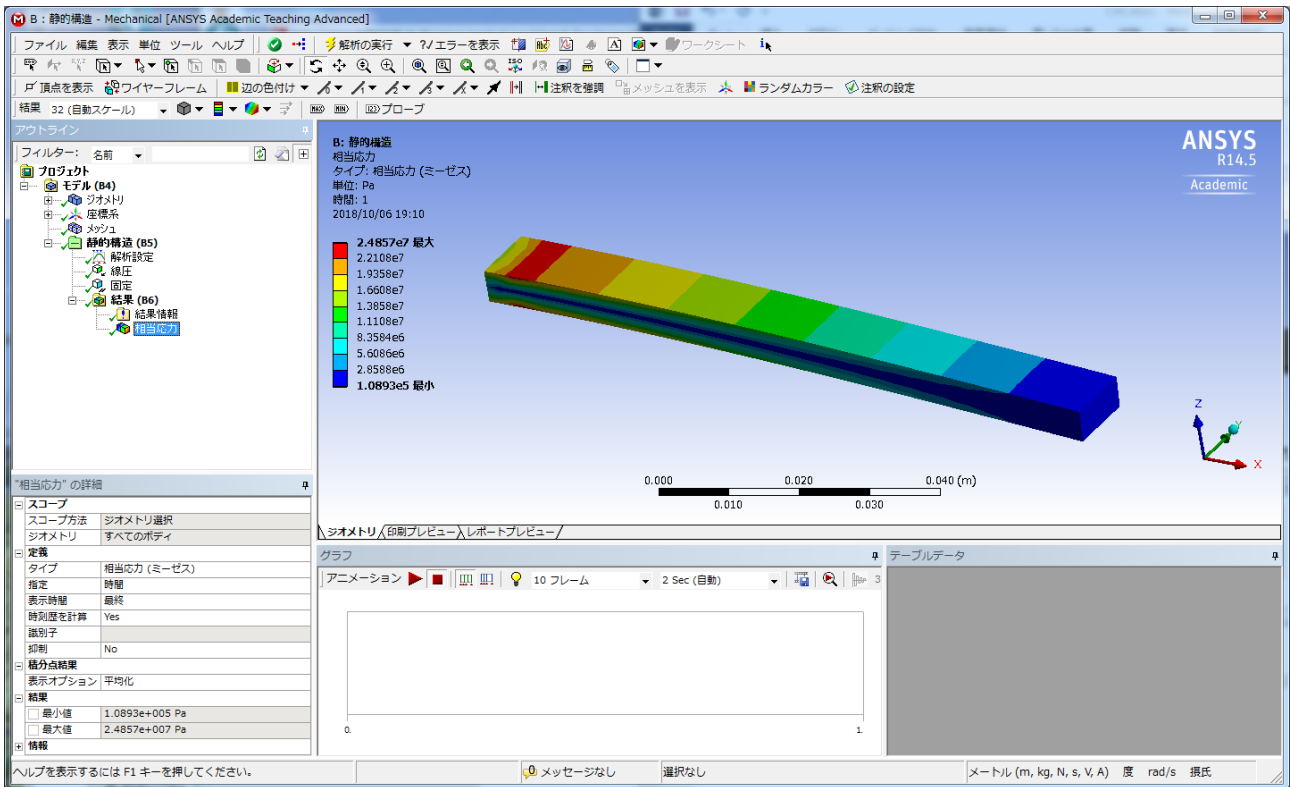


メニューバーの「回転」でモデル裏側の面が見えるようにし、左のアウトラインの「固定」を選択しなおし、メニューバーの「面」を選択し、モデルの左端面をクリックし、左下の「適用」をクリックする。



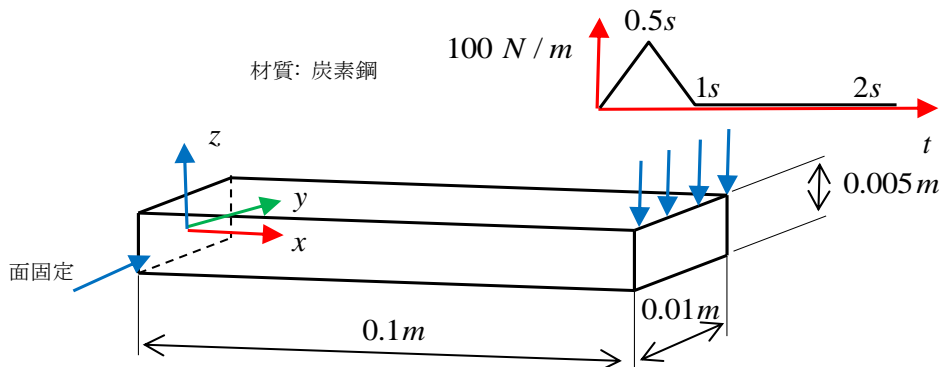
### (f) 解析結果の表示

左のアウトラインの「結果 (B6)」を選択し、メニューバーの「応力」をプルダウンし、「相当 (ミーゼス)」を選択し、メニューバーの「解析の実行」をクリックする。



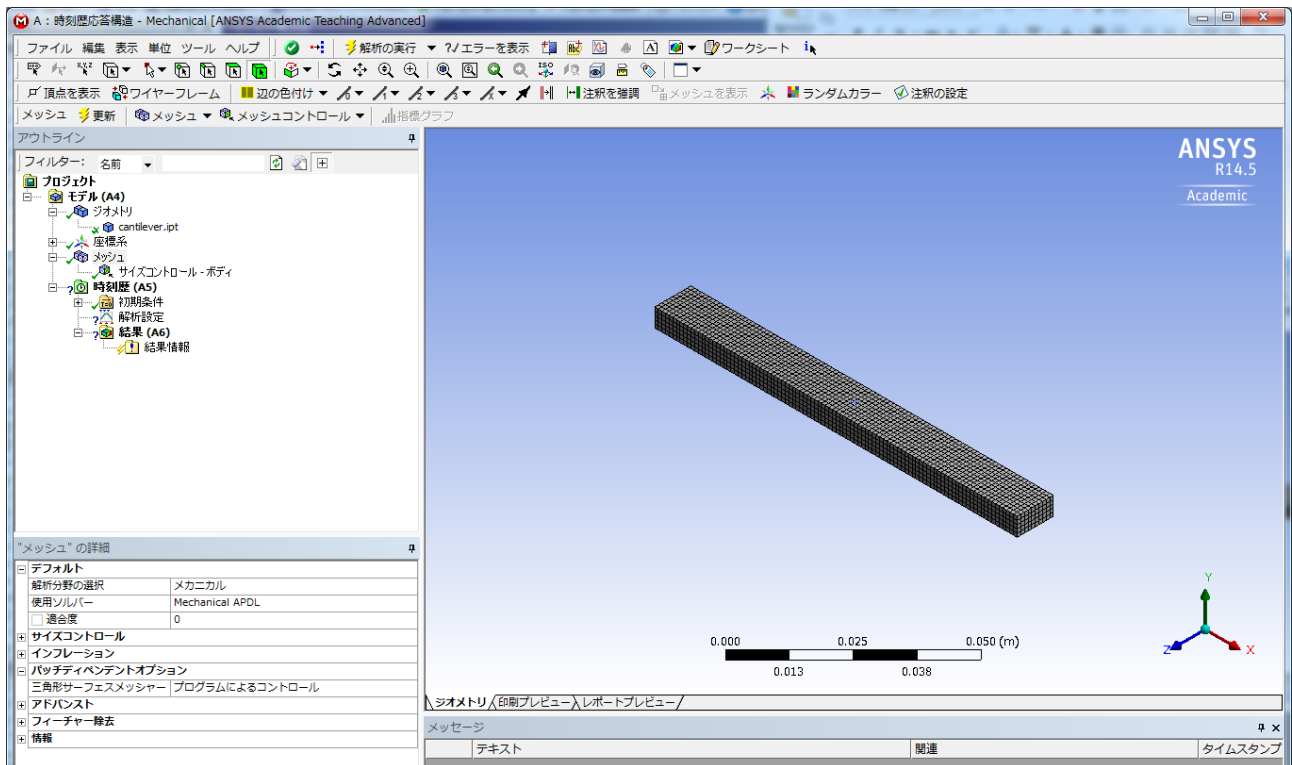
応力が色で示され、変位も示されている他、歪量なども表示可能である。

## 2 時刻歴応答解析 (Transient Structural Analysis) : 振動解析の例



CAD で上記のモデルを作図する。

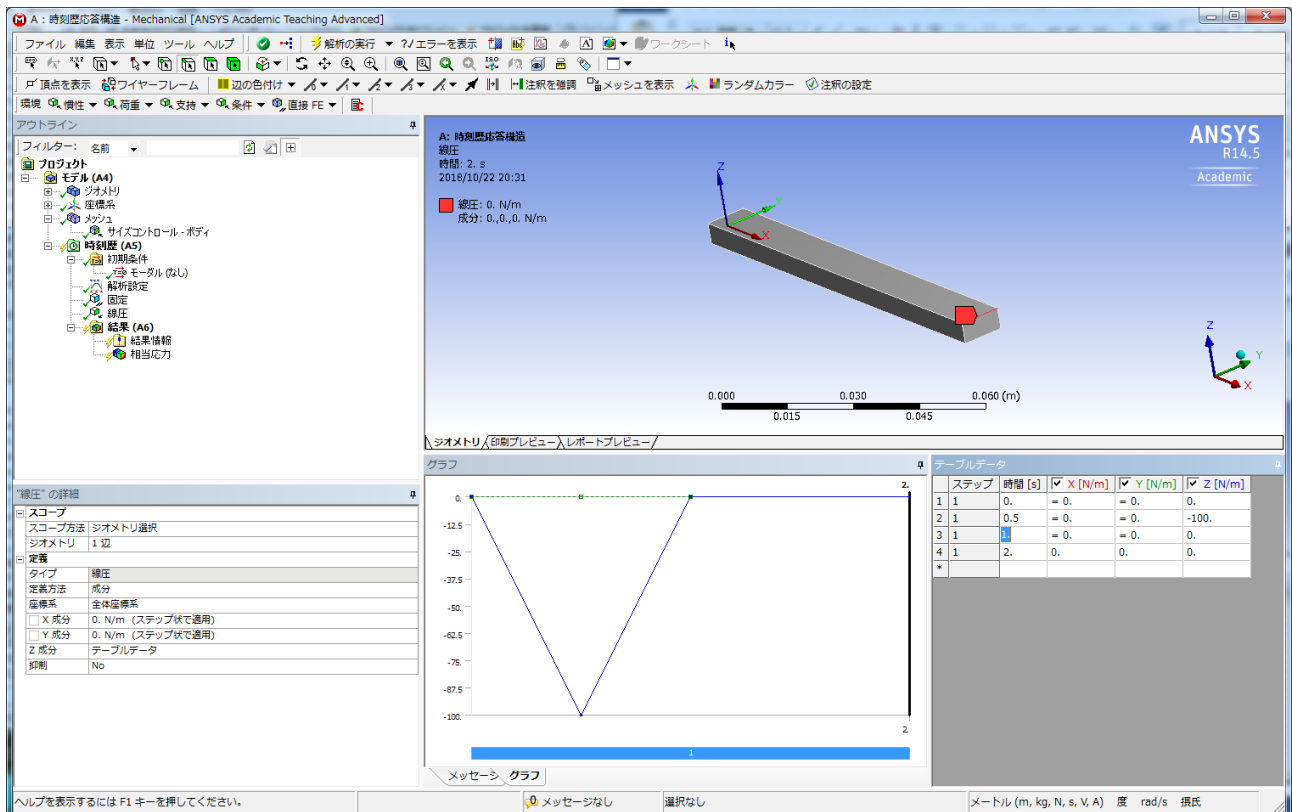
Workbench を立ち上げ、ツールボックスから「時刻歴応答構造」をドラックし、プロジェクト概念図にドロップする。「ジオメトリ」を右クリックし、「ジオメトリのインポート」を選択し、CAD モデルファイルを読み込み ("cantilever.ipj"), 「モデル」ダブルクリックする。アウトラインの「メッシュ」をクリックして「挿入」で「サイズコントロール」を選択する。画面のモデルをボディで選択してジオメトリを「適用」し、要素サイズを"0.001"m として「メッシュ生成」する。



アウトラインの「解析設定」を選択し、左下の画面のステップコントロールのステップの終了時間を”2”sに、自動時間ステップを”OFF”にし、時間ステップを”0.05”sに設定する。

画面のモデルの固定面を選択し、右クリックで「挿入」を選択し、「固定」を選択する。

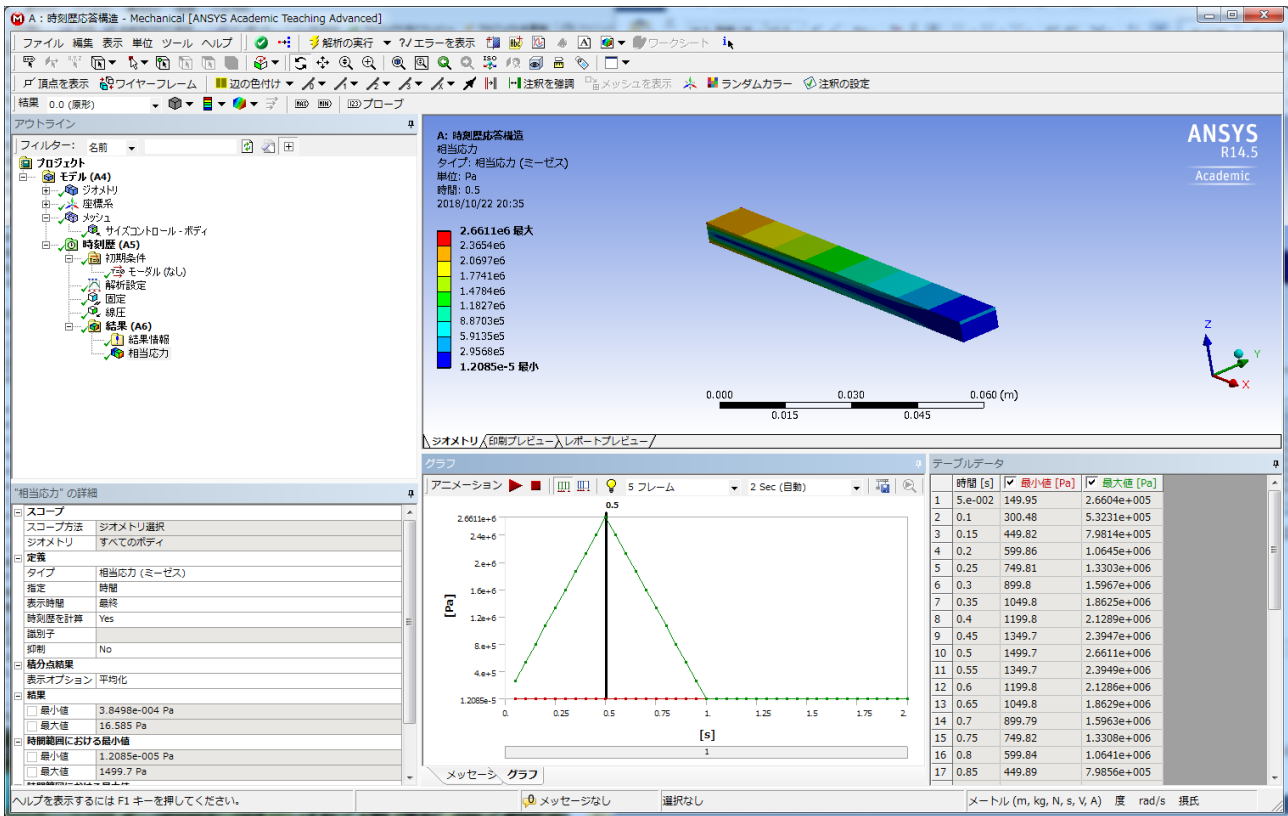
同様に、モデルの右端辺を選択し、右クリックで「挿入」を選択し、「線圧」を選択する。 ”線圧”の詳細画面の定義方法を”成分”にし、z成分で”テーブルデータ”を選択し（時系列データを設定するため）、画面右下のテーブルデータの2行目に、時間[s]に”0.5”，z[N/m]に”-100”[N/m]を入力する。3行目の時間[s]に”1”，z[N/m]に”0”[N/m]，4行目に時間”1”，z[N/m]に”0”を入力する。グラフが表示され、線圧が線形補完されて入力されることが分かる。



また、力を時間の関数として入力することも可能で、この場合は、「テーブル形式（時間）」ではなく、「関数」を選択し、例えば、 $y=100*\sin(2.0*3.141592*10*time*180/3.141592)$  のように入力する。振幅 100N で、10Hz. time が時間変数で、sin の引数の単位は rad ではなく、deg.

可視化：

アウトラインの「応力」を選択し、プルダウンメニューの「相当（フォンミーゼス）」を選択し、「解析の実行」をクリックする。「相当応力」をクリックすると、結果が表示される。

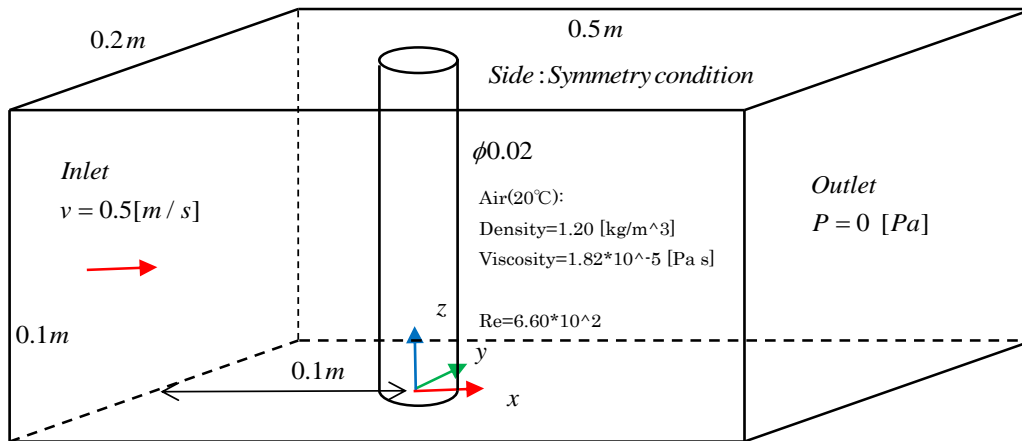


下の画面の「アニメーション」をクリックすると動画として再生される。変位はデフォルトで表示されるため、メニューの「結果」で「0.0（原形）」を選択すると変形無し、「1.0」で実際の変位が表示される。

### 3 流体解析（Fluid analysis）：円柱の周りの流れの例（定常解析）

CFX は、汎用有限体積法熱流体解析ソフトであり、一般的な流体の流れや熱伝達から、回転機械や多相流、化学反応まで様々な流体工学問題に適用することが出来る。

Fluent は、汎用熱流体解析ソフトであり、流体、乱流、熱伝達、反応のモデリングに必要な各種の物理モデリング機能を備えている。航空機の翼に流れる気流の他、炉内燃焼、気泡塔、石油プラットフォーム、血流、半導体製造、クリーンルーム設計、廃水処理プラントなどの様々な工業用途に適用することが出来る。



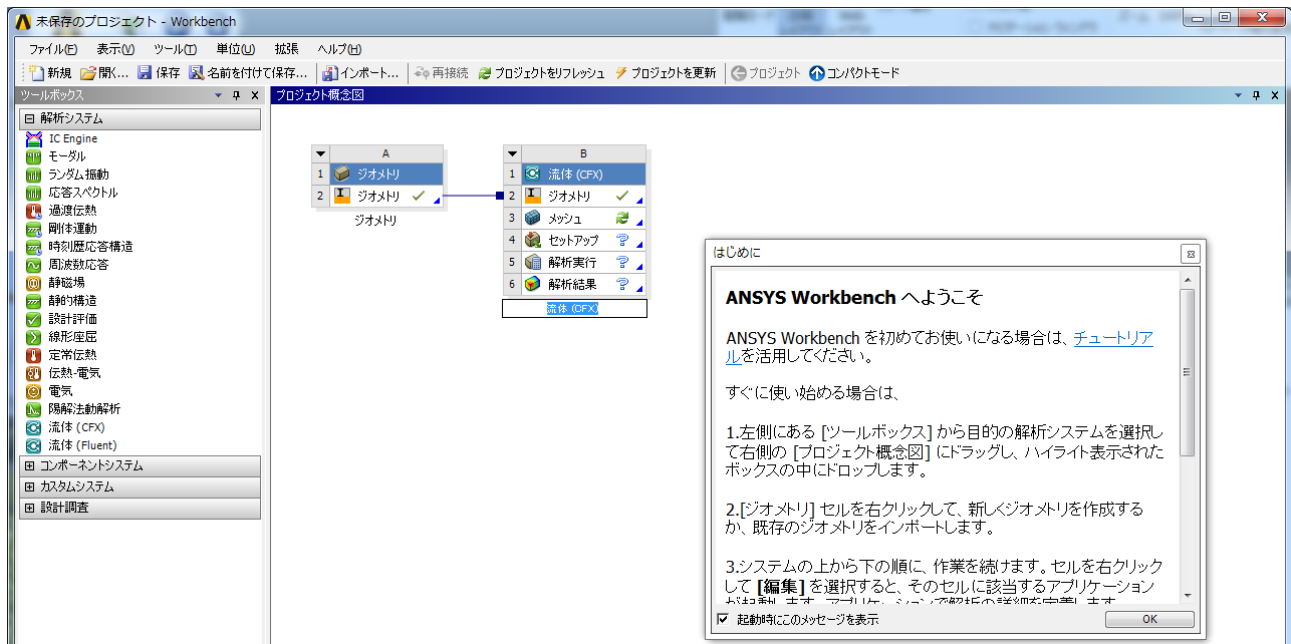
### 3.1 CAD モデル生成

$\phi 2\text{cm}$ 、高さ  $20\text{cm}$  の円柱モデルを作成し、Inventor のメニューから「ANSYS14.5」を選択し、メニューバーから「Workbench」をクリックし、ANSYS Workbench を立ち上げる。なお、計算空間は、この場合は、Solid 内部のみ。側面は、**面対称（面の法線方向の速度 0）** とする（壁面で滑り有条件でもよい）。

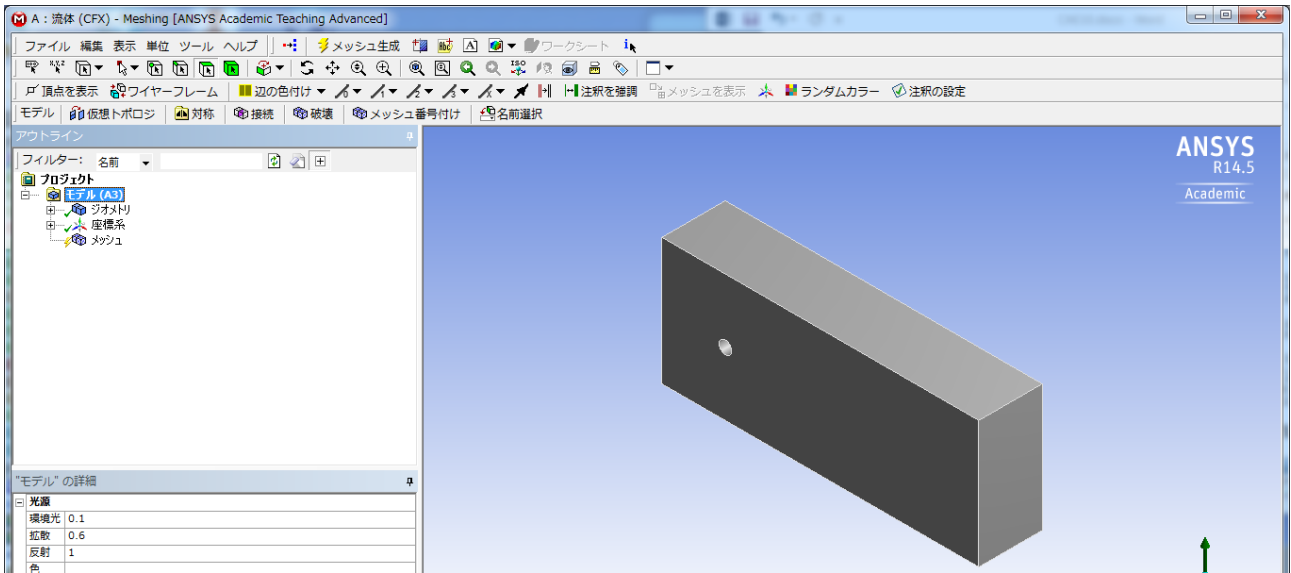
### 3.2 ANSYS (CFX) による流体解析

#### (a) Meshing

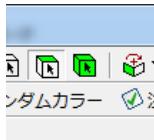
左のツールボックスから「流体 (CFX)」をドラッグし、画面 A 項目の「ジオメトリ V」へドロップすると、CFX が立ち上がる。



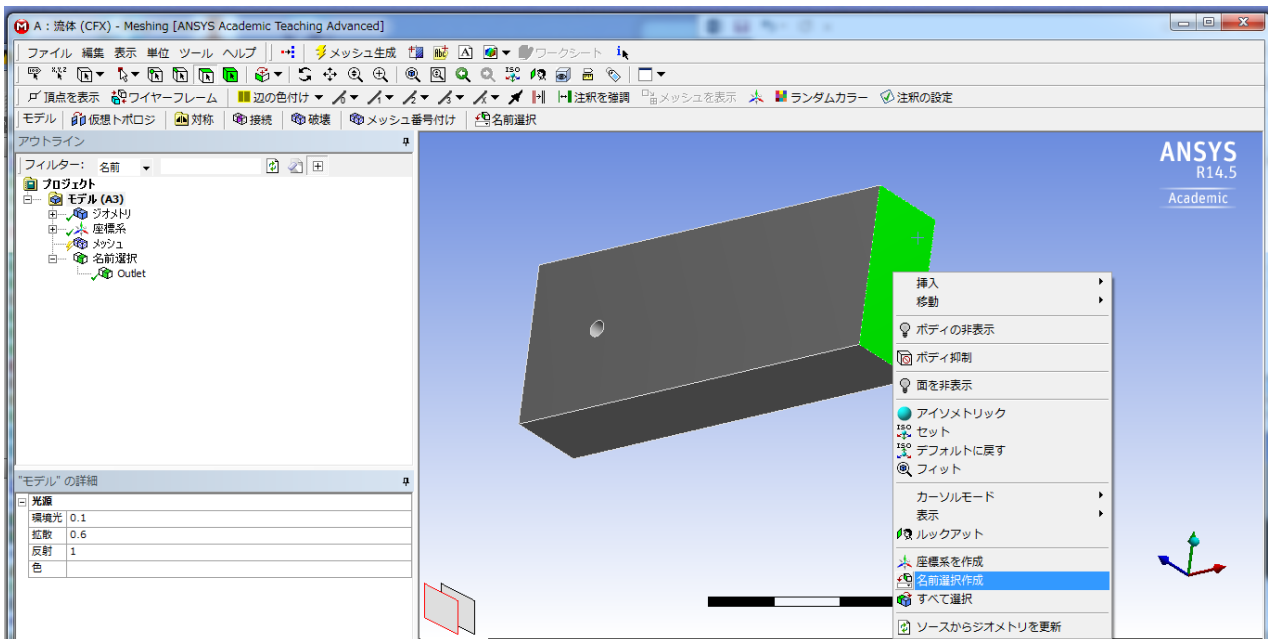
画面 B 項目の「メッシュ」をダブルクリックすると、CFX の Meshing ウィンドウが立ち上がる。

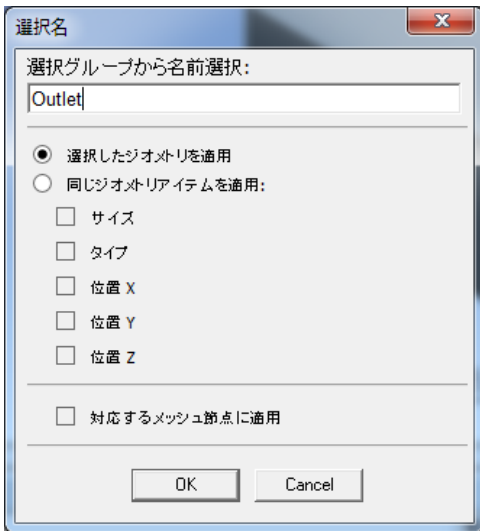


境界条件の名称の設定を行うために、メニューバーの「面」ボタンを選択して、画面モデルの流出面（無限遠）を右クリックし、「名前選択作成」を選択すると、選択面 Window がオープンするので、「Outlet」という名前をつけて「OK」を押す。

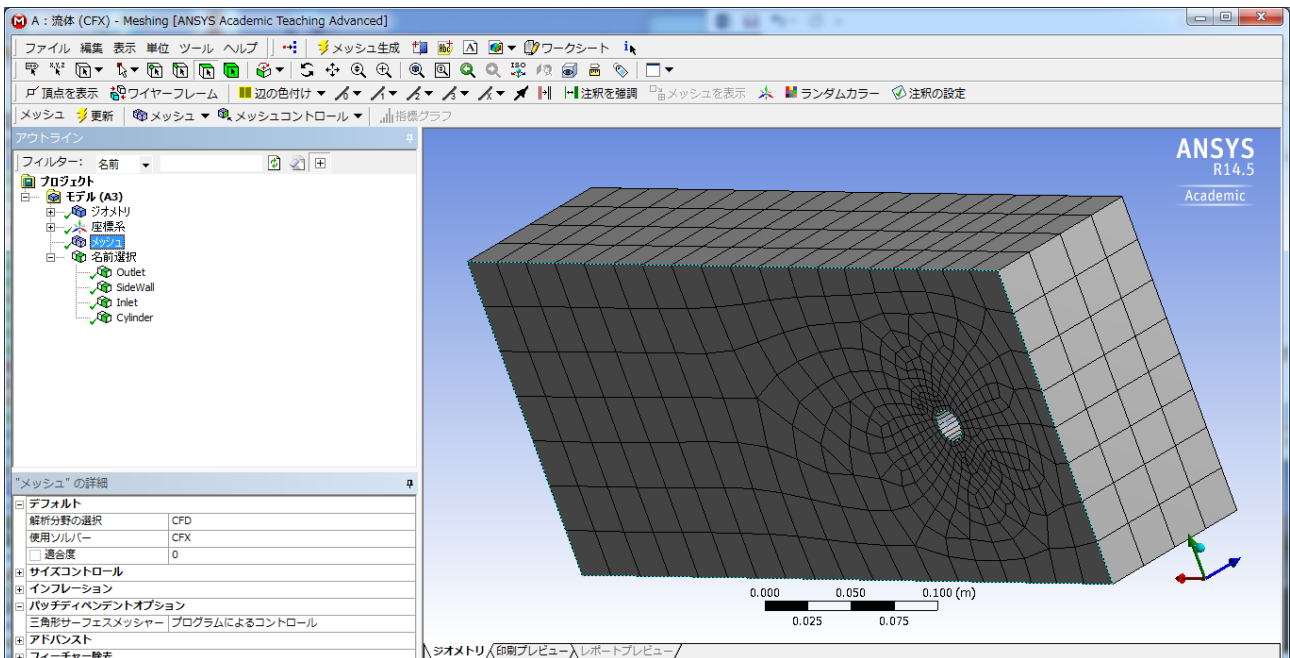


「面」ボタン

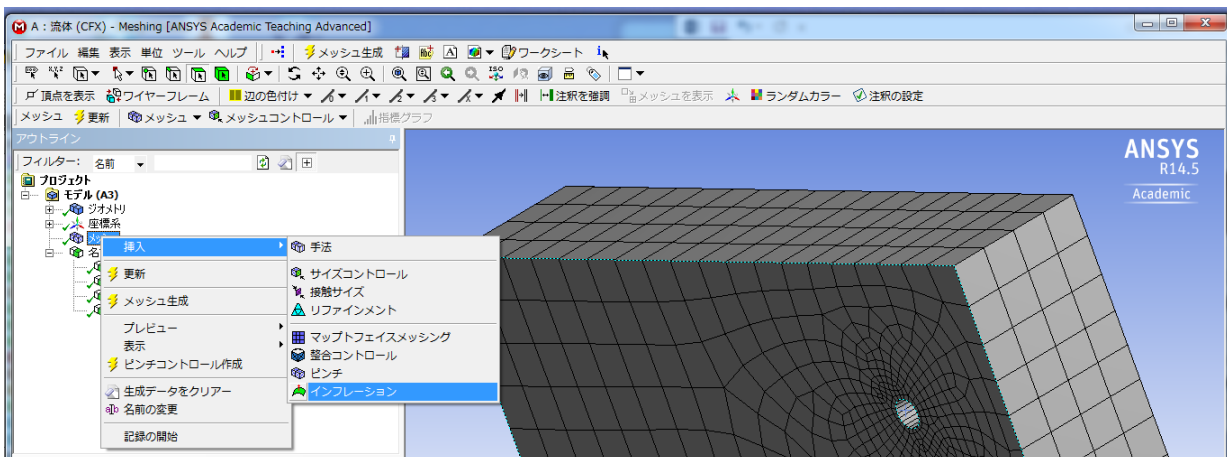


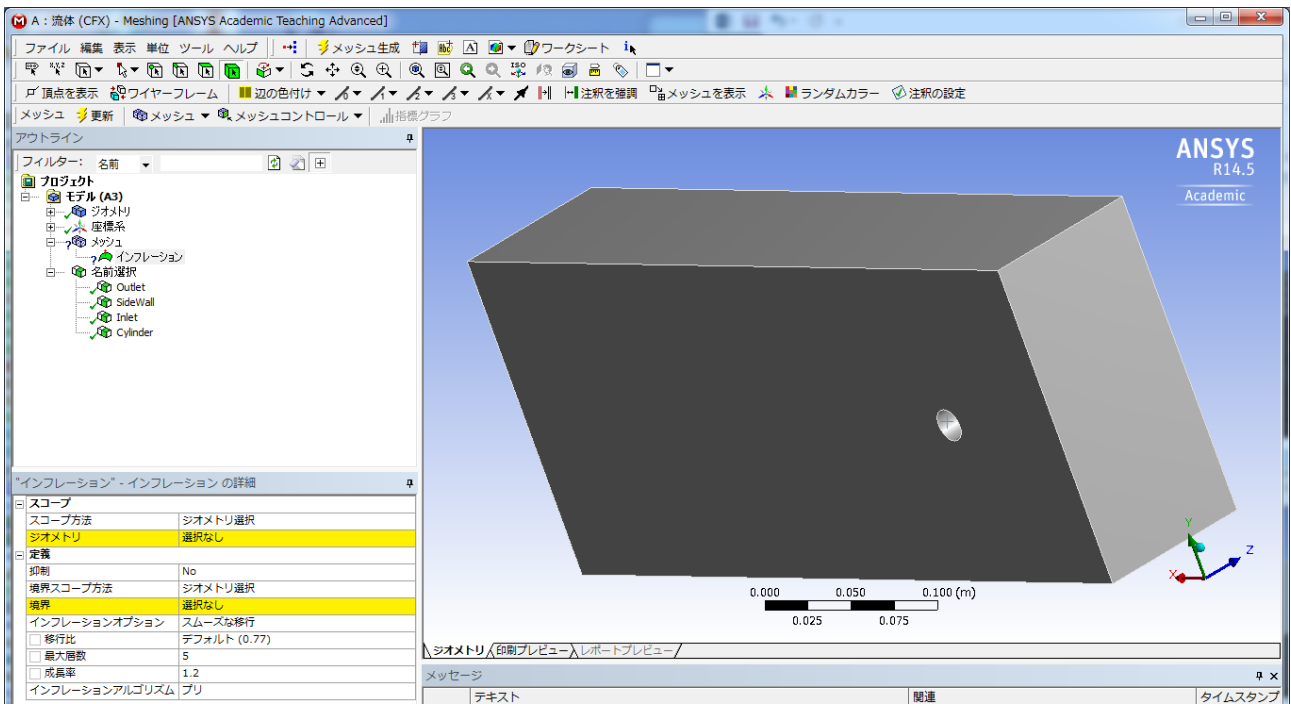


同様に、側面、上下面には”Side wall”，支柱には”cylinder”，流入面には”Inlet”という名前をつけておく。メニューバーの「メッシュ生成」をクリックすると、自動でメッシュが生成される。複数の面を選択したいときにはキーボードの「ctl」を使う。

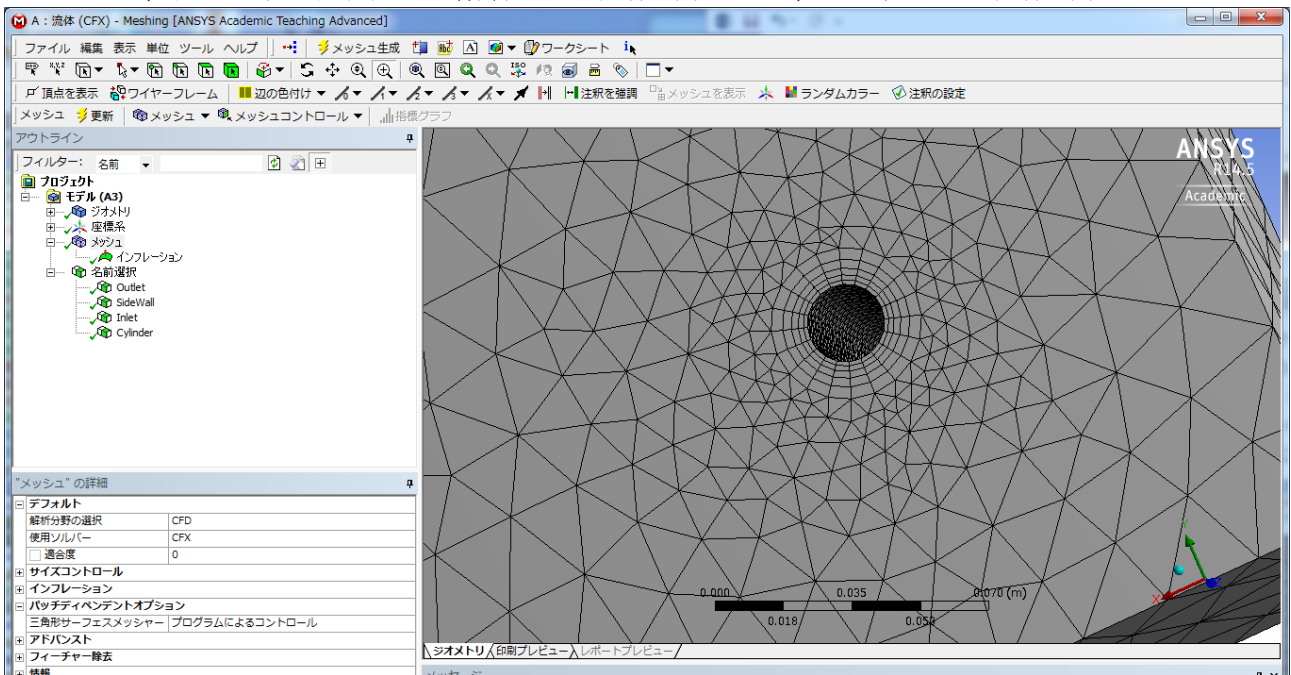


円柱の周りのメッシュは整った形状 (uniform) にし、階層的に分割するために、円柱を膨張させるインフレーション機能を使う。左のアウトラインの「メッシュ」を右クリックして「挿入」を選択して、「インフレーション」を選択する。階層はデフォルト5になっている。

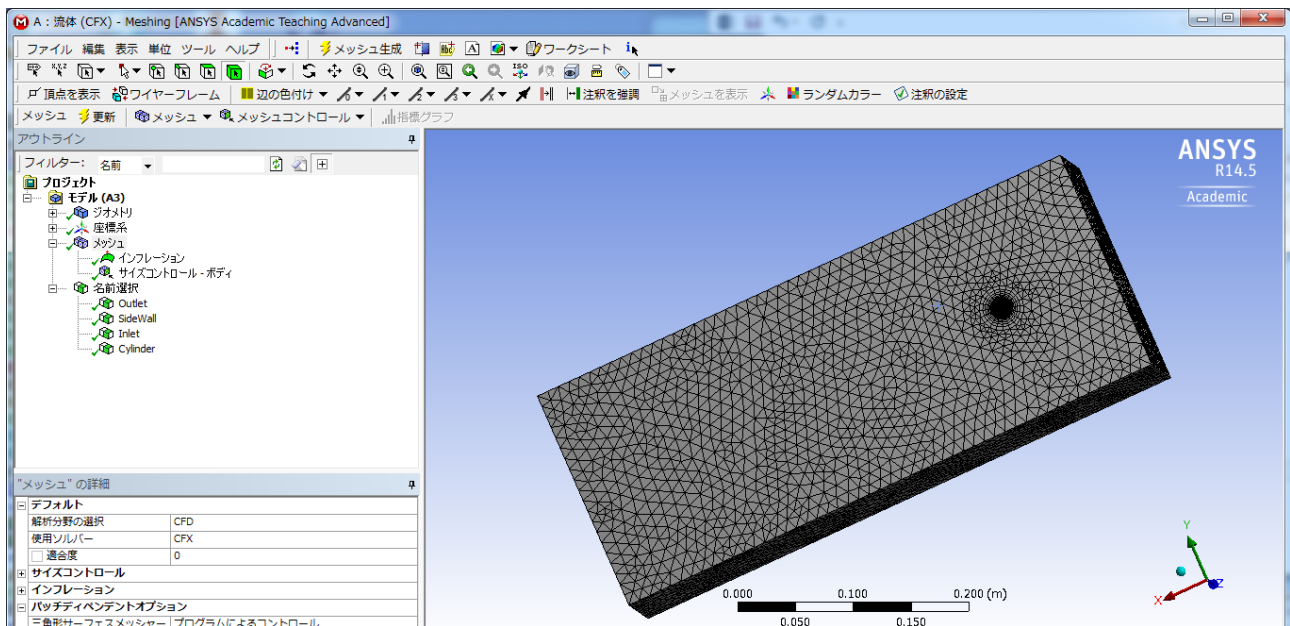




メニューバーの「ボディ」ボタンをクリックして画面のモデルを選択し、左下のジオメトリの「選択なし」を選択して「適用」をクリックする。メニューバーの「面」を選択して、画面の円柱内部の面をクリックし、左下の境界の「選択なし」を選択して「適用」をクリックする。階層の数や比率などが設定できる。メニューバーの「更新」を選択し、アウトラインの「メッシュ」をクリックしてメッシュを表示させると、図のように円柱周りは階層的な六面体要素になり、それ以外は四面体要素になっている。

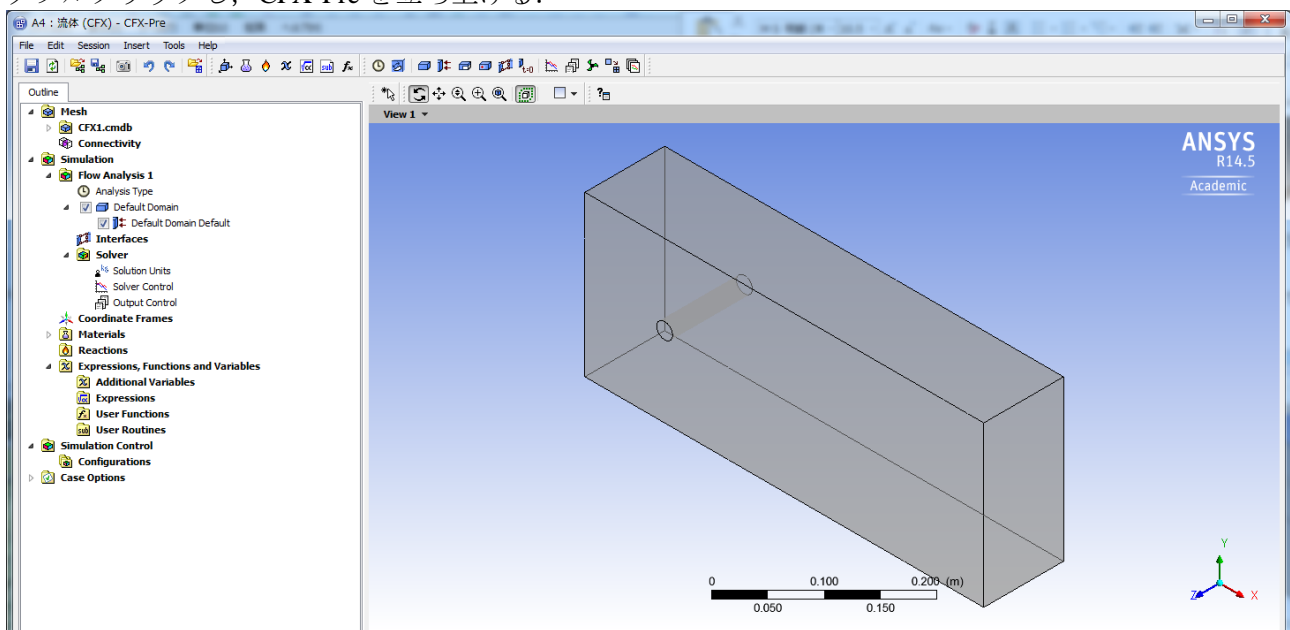


メッシュサイズもコントロール可能である。アウトラインの「メッシュ」を右クリックして「挿入」を選択し、「サイズコントロール」を選択する。画面のモデルを選択してジオメトリを「適用」し、要素サイズの「デフォルト」に"0.01"mを入力すると、要素サイズがほぼ1cmでメッシングされる。「更新」しておく。

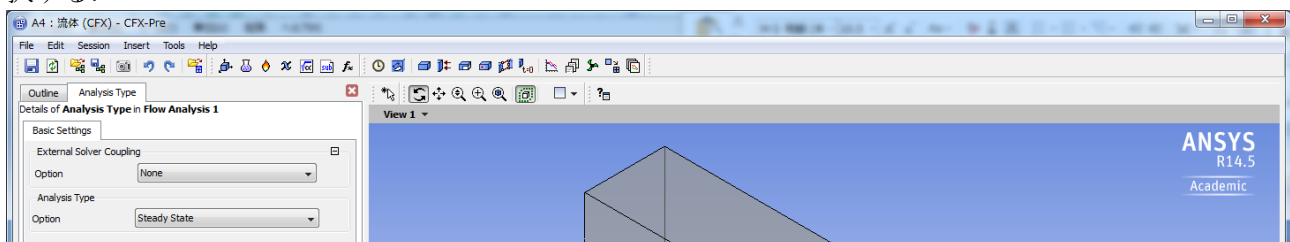


(b) 物性値の入力

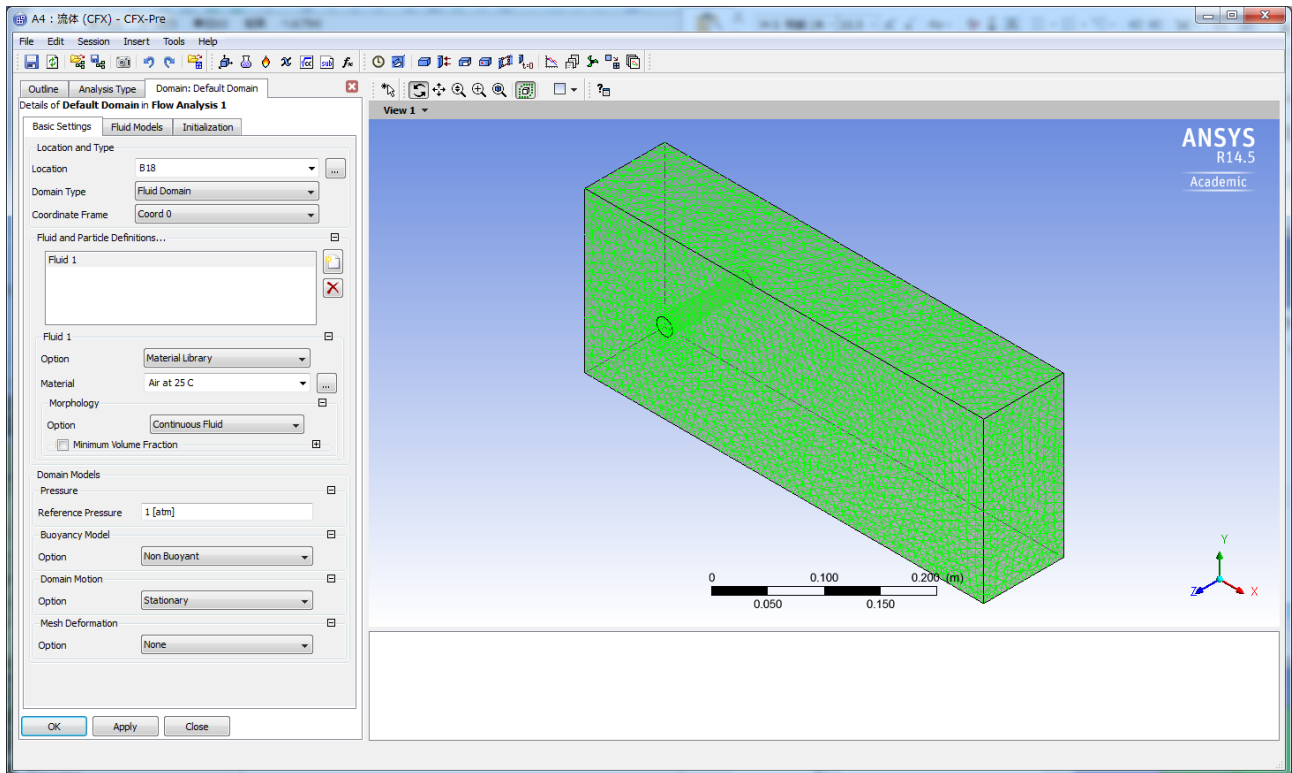
次に、Workbenchに戻り、「メッシュ」を右クリックし、「更新」しておく。その後、「セットアップ」をダブルクリックし、CFX-Preを立ち上げる。



Outlineの「Analysis Type」をダブルクリック (or 右クリックし、「Edit」を選択) すると、Analysis Type タグが表示され、定常”Steady State”や非定常”Transient”が選択できる。ここでは、定常”Steady State”を選択する。

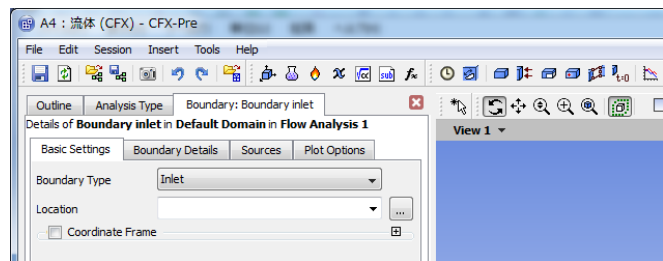
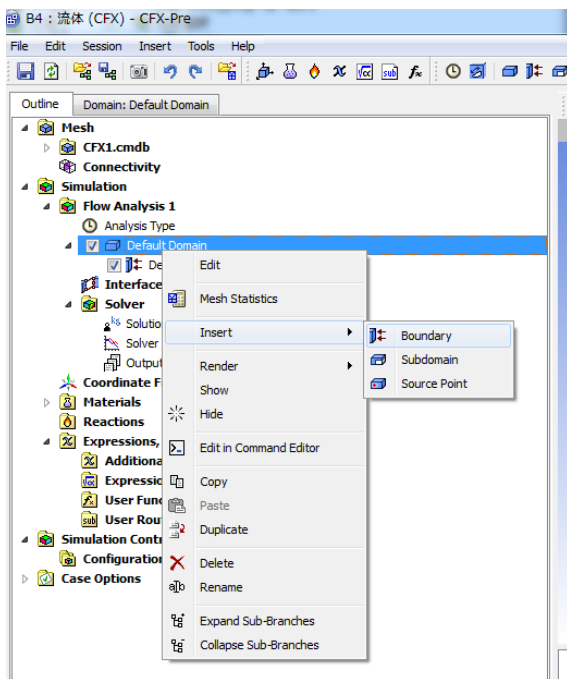


Outlineの「Default Domain」をダブルクリックすると、Domain:タグがOutlineの右に表示される。Materialで「Air at 25°C」を選択する。参照圧力などもここで設定できる。デフォルトは 1atm. その後、左下の「OK」を押す。

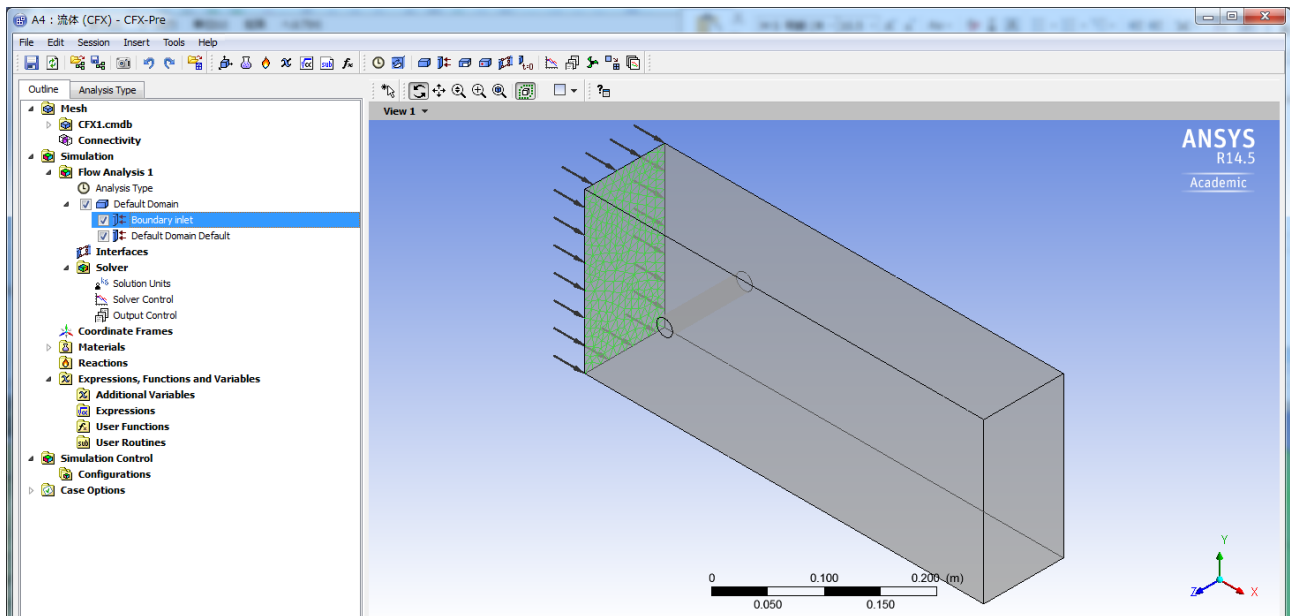


### (c) 境界条件の設定

Outline に戻り、「Default Domain」を右クリックし、「Insert」の中の「Boundary」をクリックし、名前を「Boundary inlet」とつけておく。Basic Setting タグがオープンする。



Boundary Type は、流入条件の「Inlet」を選択し、Location では、メッシングにおいてネーミングしておいた「Inlet」を選択する。次に、タグの「Boundary Details」に切り替え、Mass And Momentum の Option で「Normal Speed」を選択し、”0.5” m/sを入力し、左下の「OK」をクリックする（もしくは、Cart. Vel. Components で、U に”0.5”[m s<sup>-1</sup>], V に”0”[m s<sup>-1</sup>], W に”0”[m s<sup>-1</sup>]を入力してもよい）。



Outline に戻り、「Default Domain」を右クリックし、「Insert」の中の「Boundary」をクリックし、名前を「Boundary outlet」とつけると、Basic Setting メニュータグがオープンする。Boundary Type の「Outlet」を選択し、Location で、予めメッシュで名前をつけておいた「Outlet」を選択する。Boundary Details タグに移り、Mass And Momentum の Relative Pressure に、「0」Pa を入力し、「OK」をクリックする。Pres. Profile Blend が 0.05 の意味は？

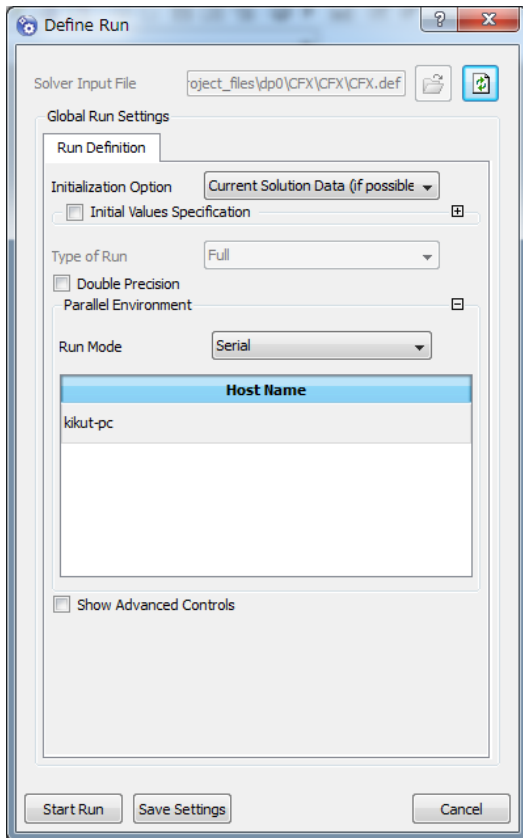
→ The value of Pres. Profile Blend is used to blend between the specified pressure profile and a floating pressure profile where only the average is constrained. For a value of zero, the specified pressure is used only to enforce the average pressure. This allows a transverse pressure profile to develop according to upstream influences, which is much less reflective than specifying the pressure profile itself. For some flows, setting only the average pressure does not constrain the flow enough; in this case, a small amount of blending, the default value of 0.05, or 5%, may be appropriate. [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/15.0.7/en-us/help/cfx\\_mod/i1301138.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/15.0.7/en-us/help/cfx_mod/i1301138.html)

Outline に戻り、「Default Domain」を右クリックし、「Insert」の中の「Boundary」をクリックし、名前を「Boundary side」とつけると、Basic Setting メニュータグがオープンする。Boundary Type の「Symmetry」を選択し、Location で予めメッシュで名前をつけておいた「SideWall」を選択する。面対称（法線方向の流速 0）を指定することになる。

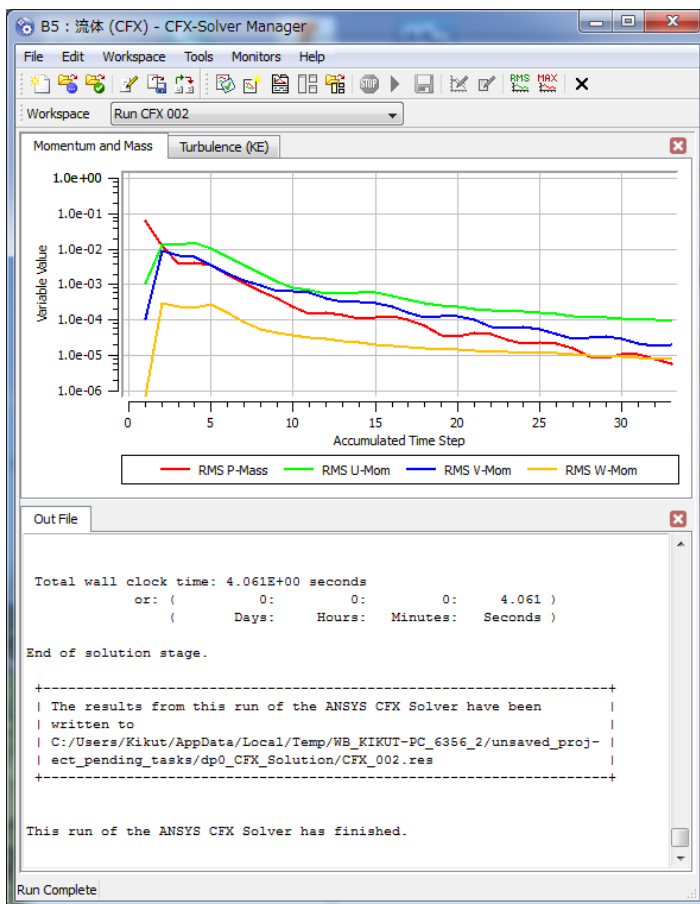
Outline に戻り、「Default Domain」を右クリックし、「Insert」の中の「Boundary」をクリックし、名前を「Boundary cylinder」とつけると、Basic Setting メニュータグがオープンする。Boundary Type の「Wall」を選択し、Location で予めメッシュで名前をつけておいた「Cylinder」を選択する。Boundary Details タグに移り、Mass And Momentum の「No Slip Wall」を選択し、「OK」をクリックする。

#### (d) 解析の実行

Workbench に戻り、B 項目の「解析実行」をダブルクリックする。Host Name にあるコンピュータ名「kikut-pc」を選択し、左下の「Start Run」ボタンで解析を実行する。

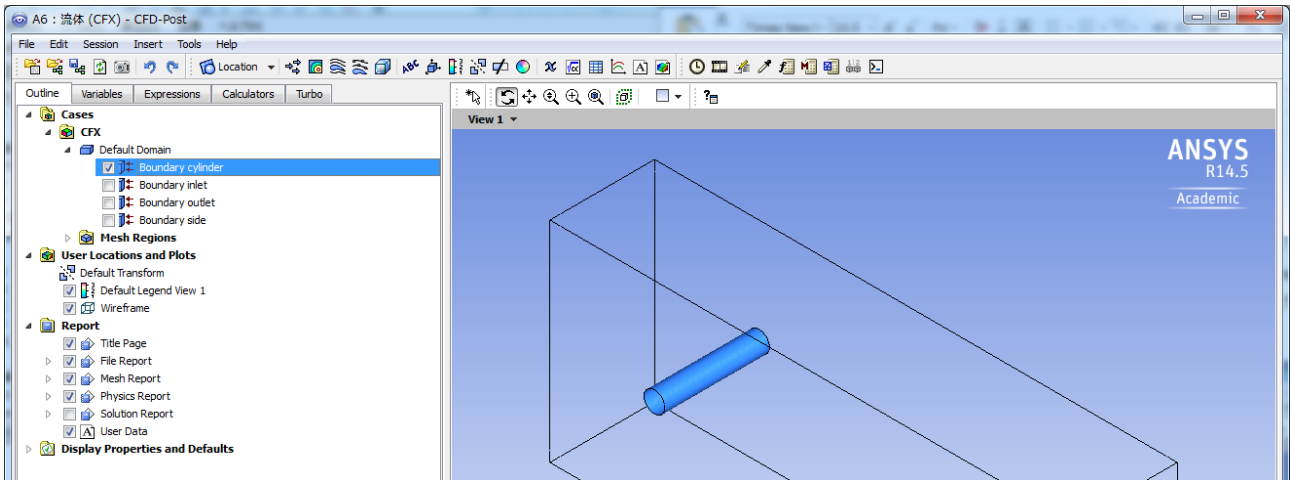


計算が開始され、圧力 P、速度 U, V, W の誤差が小さくなり、計算が終了した旨のメッセージが出るので、「OK」する。



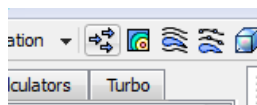
(e) 可視化

次に、Workbenchに戻り、B項目の「解析結果」をダブルクリックすると、CFD-Postが立ち上がる。左のOutlineの境界、「Boundary cylinder」、「Boundary inlet」、「Boundary outlet」、「Boundary sidewall」をクリックすると、左の画面で色づけされる。これらの境界名をダブルクリックすると、左下にDetails of \*\*\*\*タグがオープンし、色設定が可能になる。

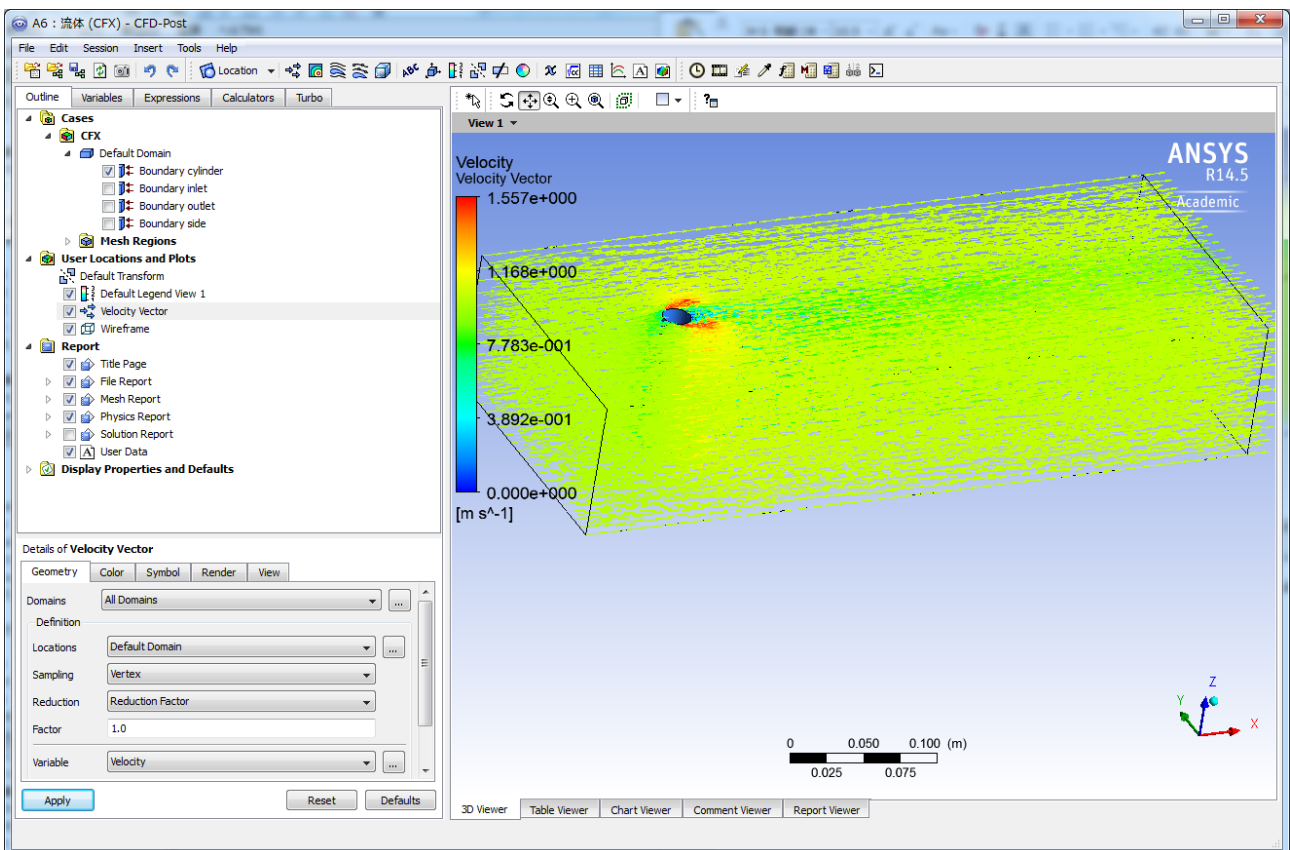


### 速度ベクトル：

メニューバーの「Vector」ボタンをクリックすると、Inset Vector Windowが開かれるので、Nameに”Velocity vector”と入力すると、左下にDetails of Velocity vectorタグが現れるので、速度ベクトルを表示したい領域”Default Domain”を選択し、「Apply」する。また、領域内部を見るためにOutlineの”Boundary cylinder”以外はオフ（非表示）にしておく。

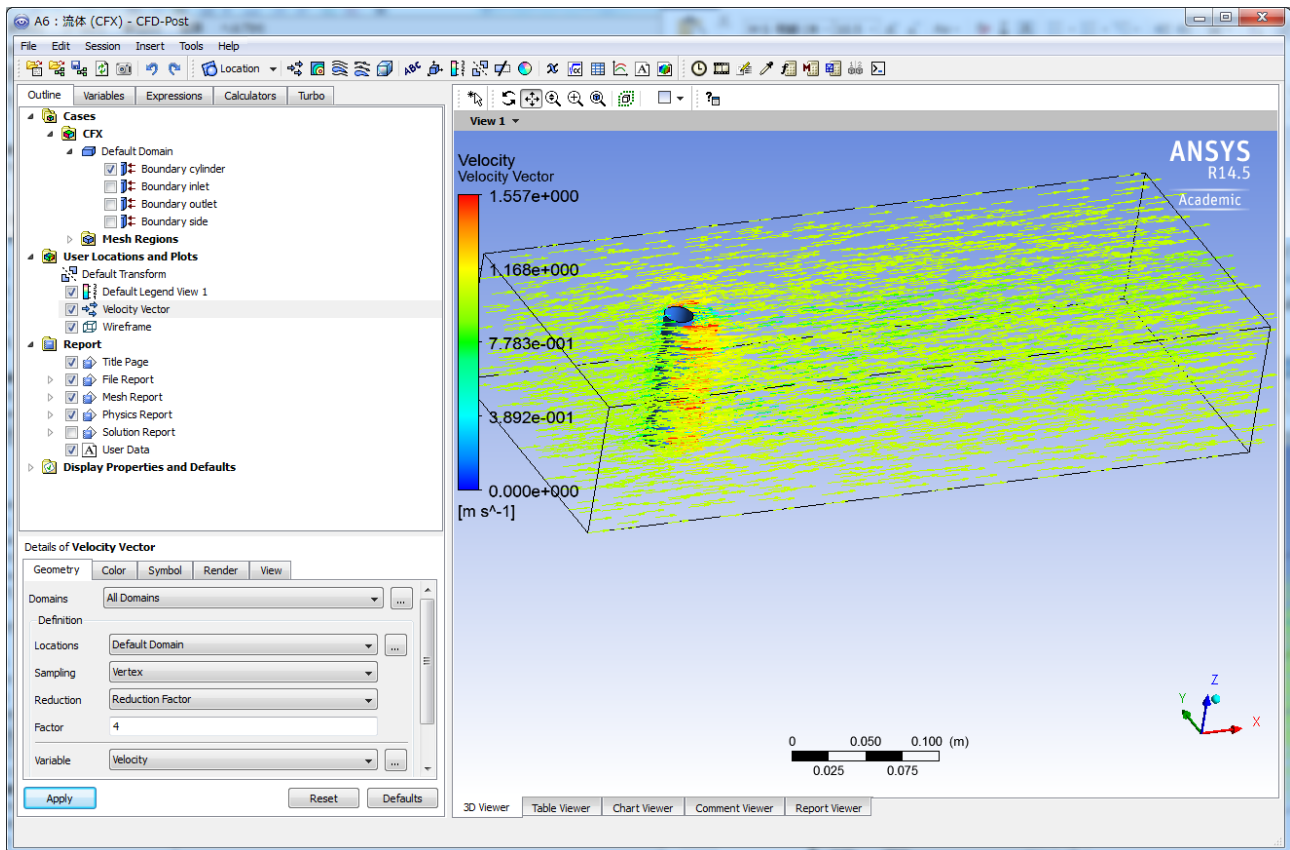


「Vector」ボタン



節点のベクトルがすべて表示されているので、Detail of Velocity vectorタグのFactorを”4”にして表示ベ

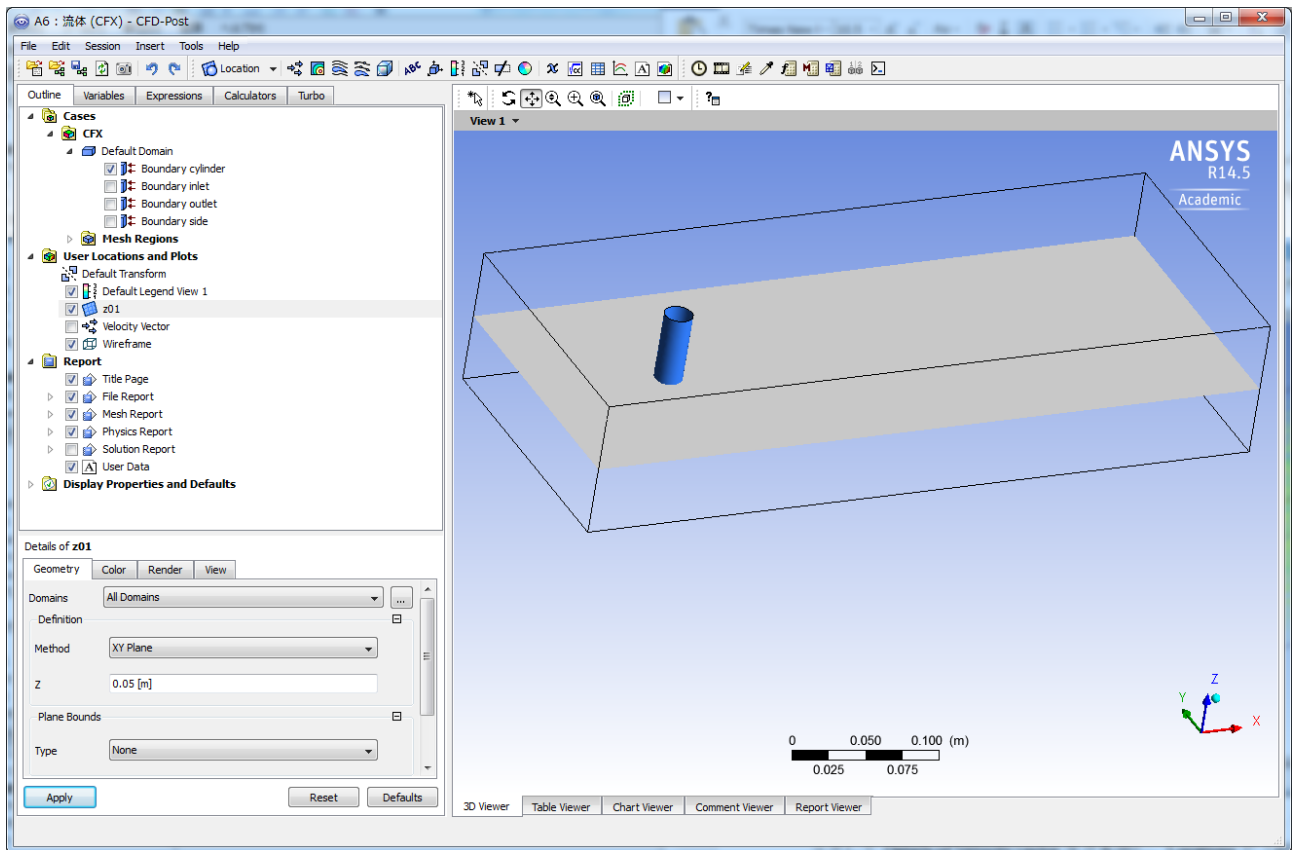
コントロール数を減らして「Apply」する。



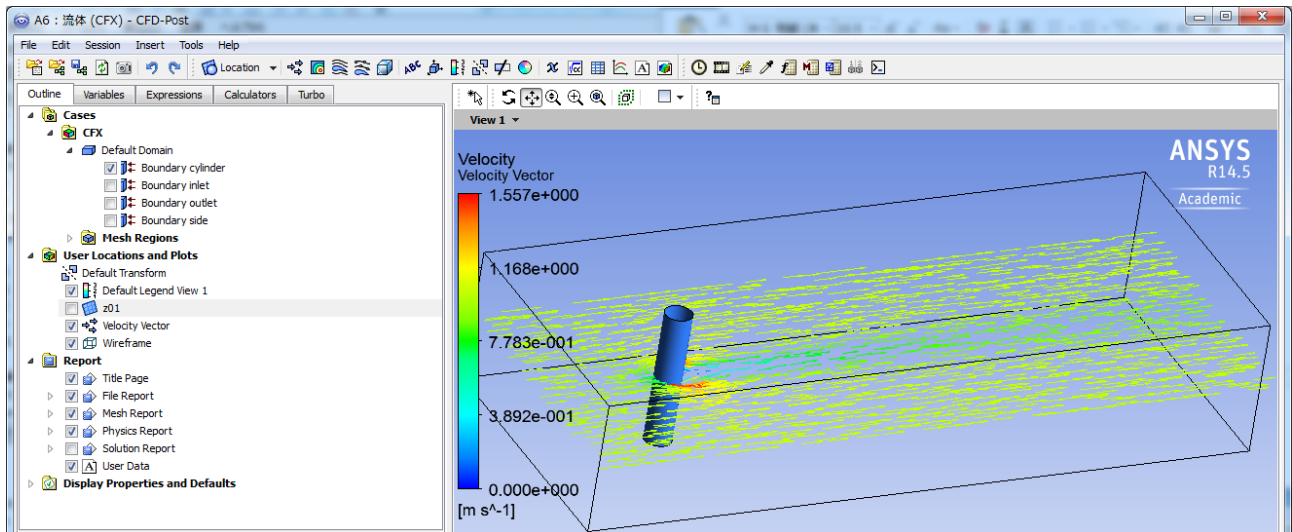
円筒周りの流速が 0.8m/s 程度として赤く表示されている。Outline の Velocity vector のチェックを外すと、流線は表示されなくなる。

#### 任意平面の速度ベクトル：

メニューバーの「Location」を選択し、プルダウンメニューから「Plane」を選択し、名前を”z01”と入力すると、Details of z01 タグが左下に現れる。z=0.05 [m]のXY平面に表示面を作成するために、Zに”0.05”mを入力する。

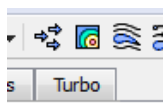


Render タグで、Show Faces のチェックを外し、「Apply」する。Outline の「Velocity vector」をダブルクリックして Details of Velocity vector タグを出し、Locations で「z01」平面を選択し、「Apply」すると、 $z=0.05$  平面における流速が表示される。上下の面が対称なので  $z$  のどの面も同じ流れ場となっているはず。



任意平面の圧力コンタ :

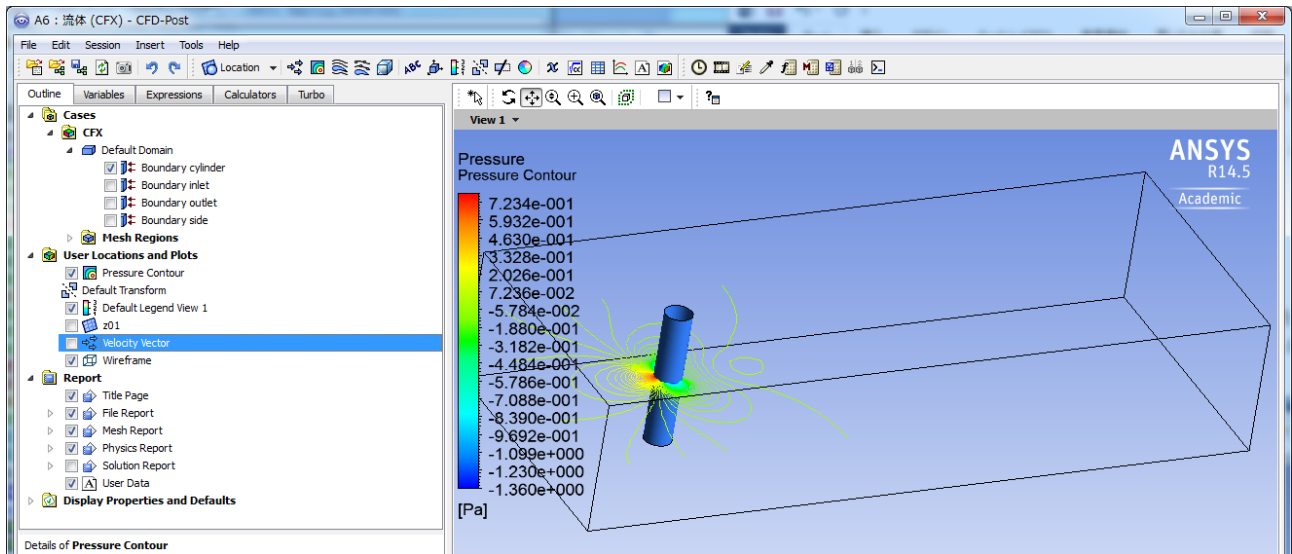
メニューバーの「contour」をクリックし、「Pressure contour」という名前をつけて「OK」すると、左下に Details of Pressure contour タグが現れる。



「contour」ボタン

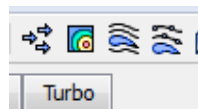
Details of Pressure contour タグの Locations で「z01」を選択し、# of Contours を「100」に設定して等圧線を 100 本にし、Render タグにおいて Show Contour Bands のチェックを外し、「Apply」する。Outline の velocity

vector のチェックを外しておく.

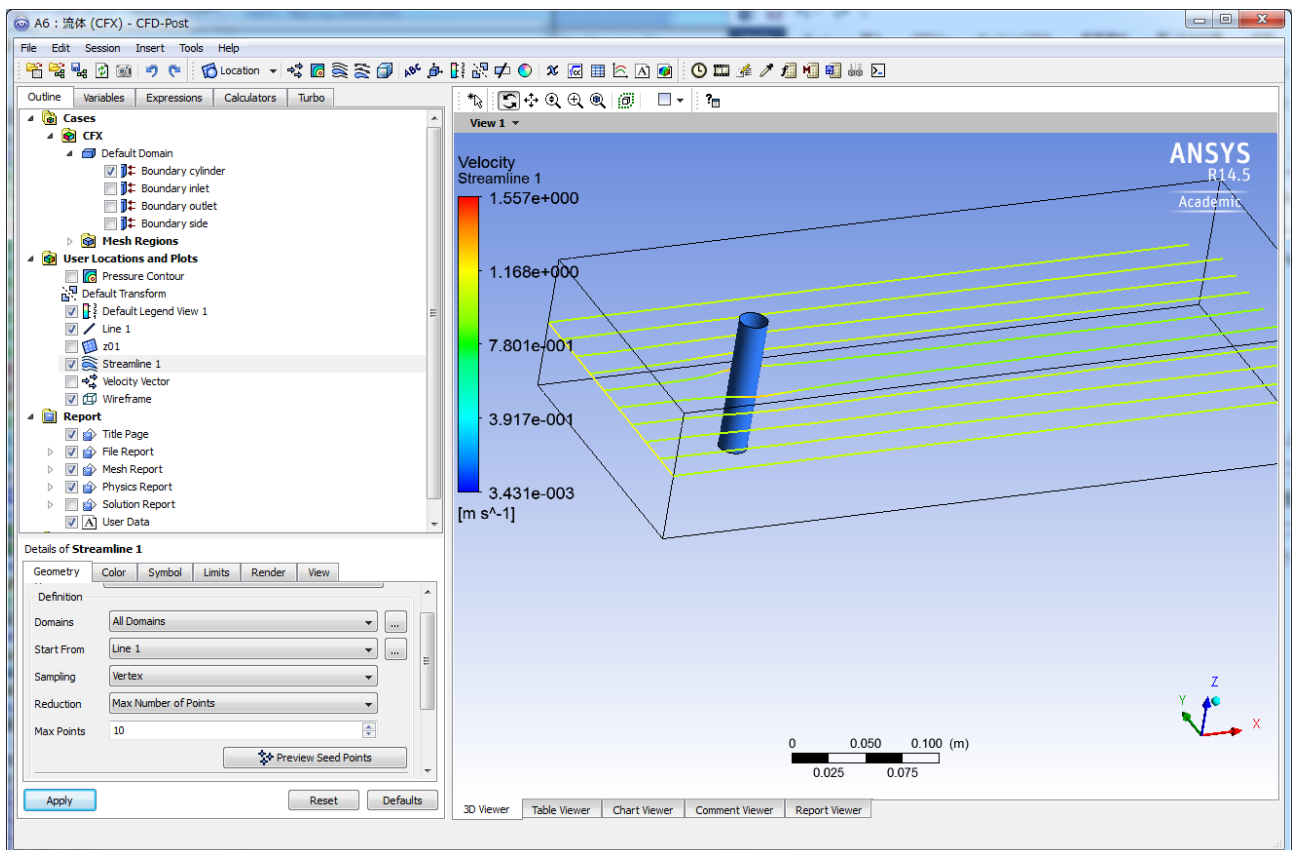


流線の表示 :

メニューバーの「Location」で「Line」を選択し, "Line 1"という名前をつけると, Details of Line 1 タグが表示されるので, Point 1 に"-0.1", "-0.1", "0.05", Point 2 に"-0.0", "0.1", "0.05"を入力して「Apply」する. メニューバーの「Streamline」をクリックし, "Streamline 1"という名前をつけて, 「OK」すると, 左下に Details of Streamline 1 タグが現れるので, Start From で「Line 1」を選択し, 「Apply」する.

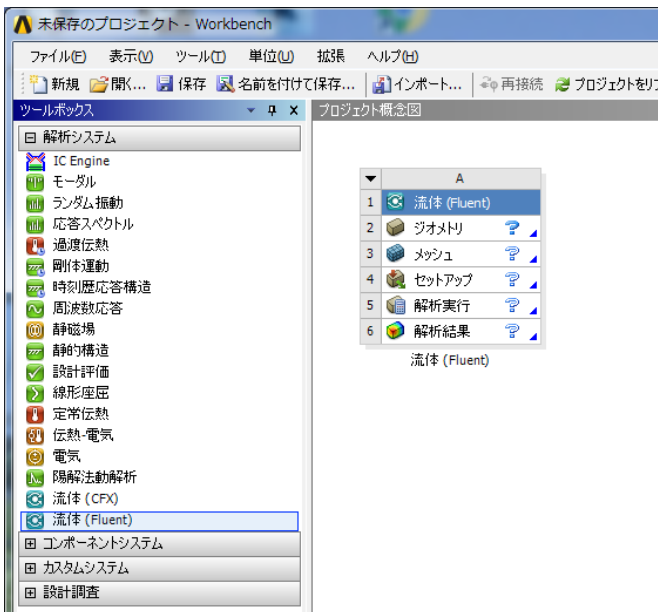


「Streamline」ボタン

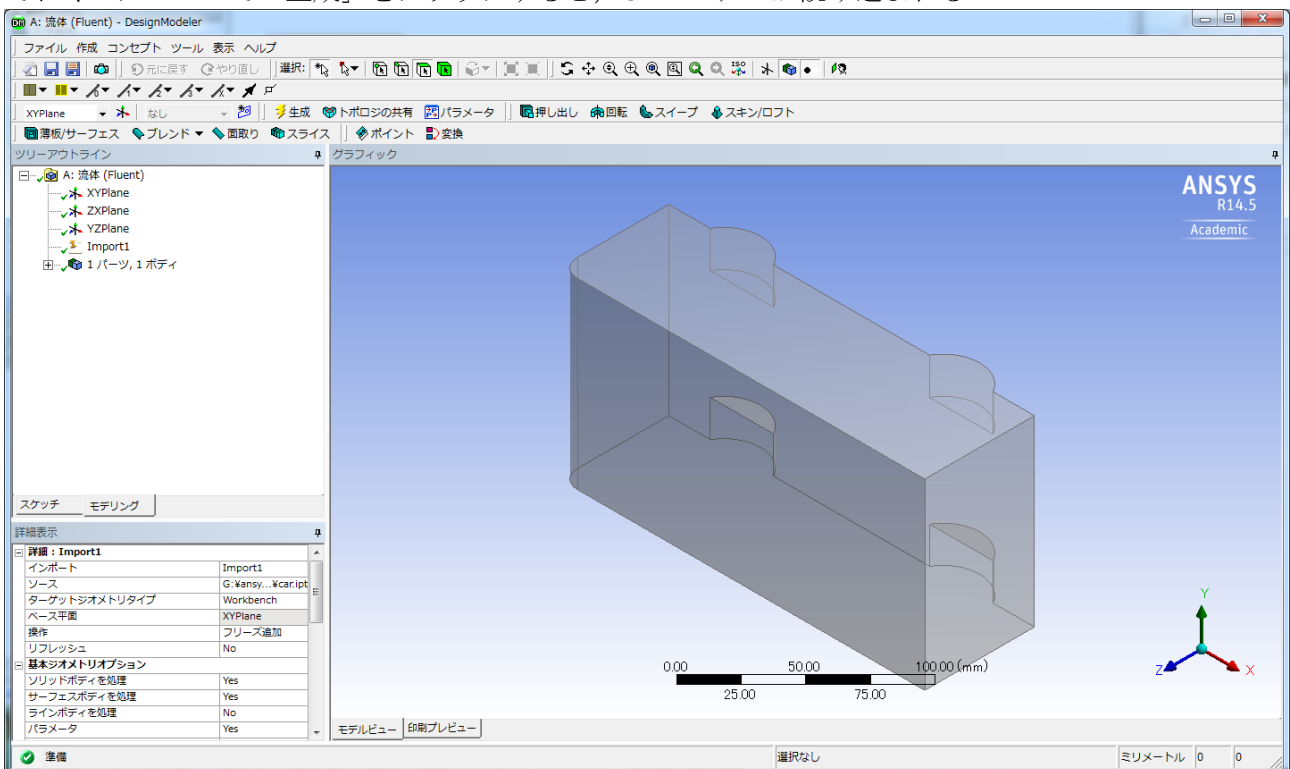


#### 4 流体解析 (Fluid analysis) : 3D スキャンした物体周り流れ場の例 (非定常解析)

CFX も Fluent もほぼ同じような解析が出来る。ここでは、Fluent を使って、スキャンした物体の非定常流体解析を行う。Workbench を立ち上げ、画面のプロジェクト概念図に、左のツールボックスの「流体 (Fluent)」をドラック & ドロップする。このとき、画面には、四角い破線のボックスに赤い字で (スタンダードアロンシステムを作成) と表示される。

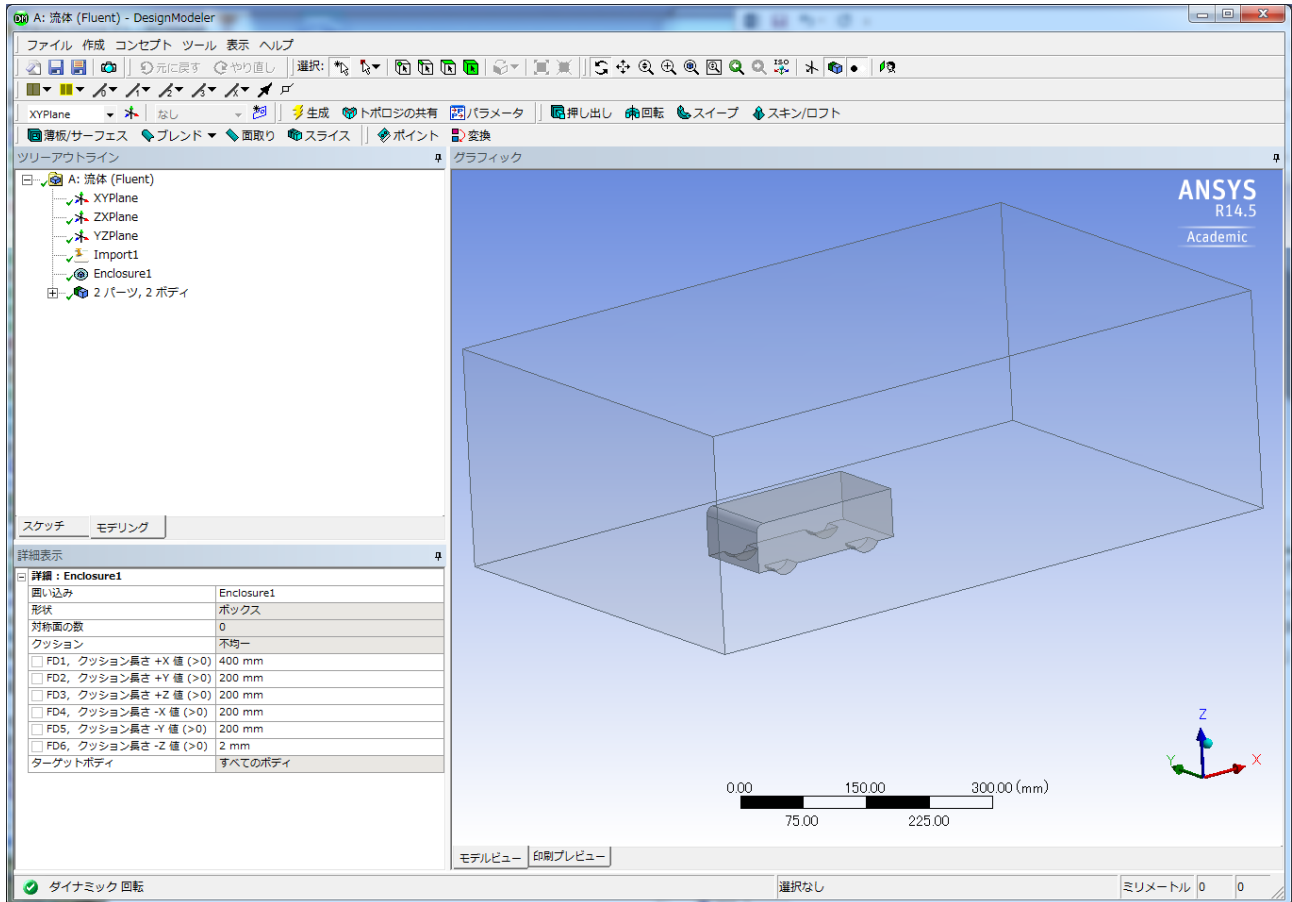


プロジェクト概念図内の A 項目の「ジオメトリ?」を右クリックし、「ジオメトリをインポート」の「参照」をクリックし、CAD データを読み込む。過去の履歴から選んでもよい。ここでは、「car.ipt」ファイルを選択した (.stp ファイル, .igs ファイルも OK. .stl は、ソリッドデータする必要があり、ソフトは、ANSYS SpaceClaim や、Autodesk Mesh Enabler 等)。次に、A 項目の「ジオメトリ?」を右クリックし、「ジオメトリを編集」を選択すると、DesignModeler が立ち上がるので、単位は「ミリメートル」を選択しておく。メニューで「生成」をクリックすると、CAD モデルが読み込まれる。

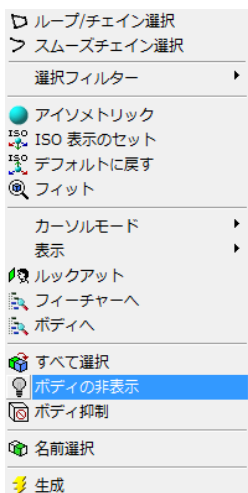


解析空間は、Solid の内部のみであるので、物体の外側に計算空間を作成し、物体をその計算空間からくりぬく必要がある。メニューの「ツール」のプルダウンメニューの「囲い込み」を選択し、左下の Enclosure

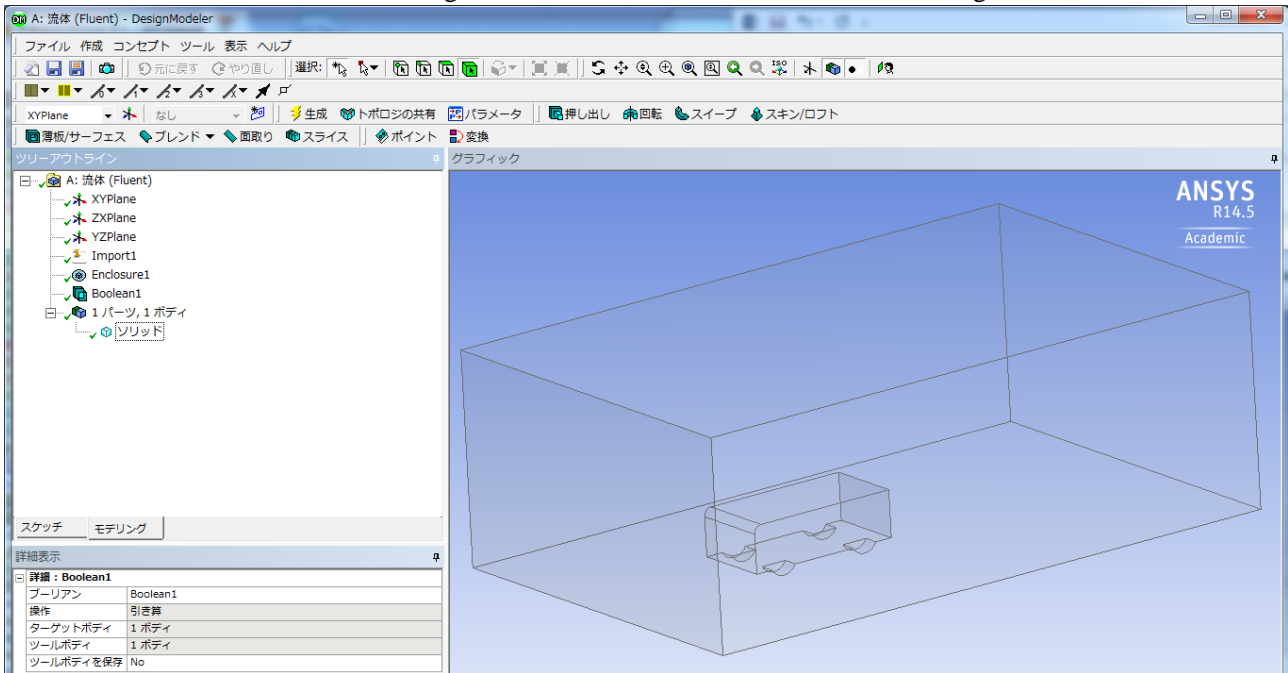
1 のクッション長さを”600”mm, ”200”mm, ”200”mm, ”200”mm, ”200”mm, ”2”mm にして風洞のサイズを決定し、メニューの「生成」をクリックすると、モデルの周りに計算空間が構築される．ここでは、走行するミニカーを想定し、解析を行う．タイヤは地面から 2mm 浮いている設定になっている．代表長さ 0.2m, 代表速度 0.05m/s, 空気の動粘性係数を  $1.51 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$  として、 $Re=6.62 \cdot 10^2$  (層流) である．



メニューの「作成」のプルダウンメニューから「ブーリアン」を選択する．左下の Boolean2 の操作の「引き算」を選択し、ターゲットボディで計算空間を選択して「適用」し、ツールボディで CAD モデルを選択して「適用」する．このとき、風洞内の CAD モデルは、画面上で右クリックして「ボディの非表示」で計算空間を非表示にすることによりクリックできるようになる（もしくは、ツリーアウトラインの 2 パーツ, 2 ボディの「car.ipt」を選択してもよい）．その後、メニューの「生成」をクリックし、ブーリアン演算を実行する．その後、画面上の右クリックで「すべてのボディの表示」をする．



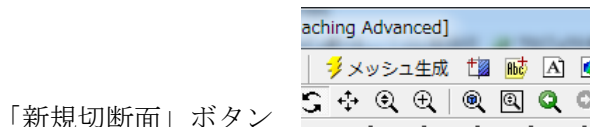
ツリーアウトラインの「1 パーツ, 1 ボディ」を開き「ソリッド」を選択し、下の画面で流体/ソリッドが”流体”になっていることを確認する。メニューの「ファイル」のプルダウンメニューから「Design Modeler を閉じる」を選択して Design Modeler を終了する。これ以降、Meshing などは、上記同様。

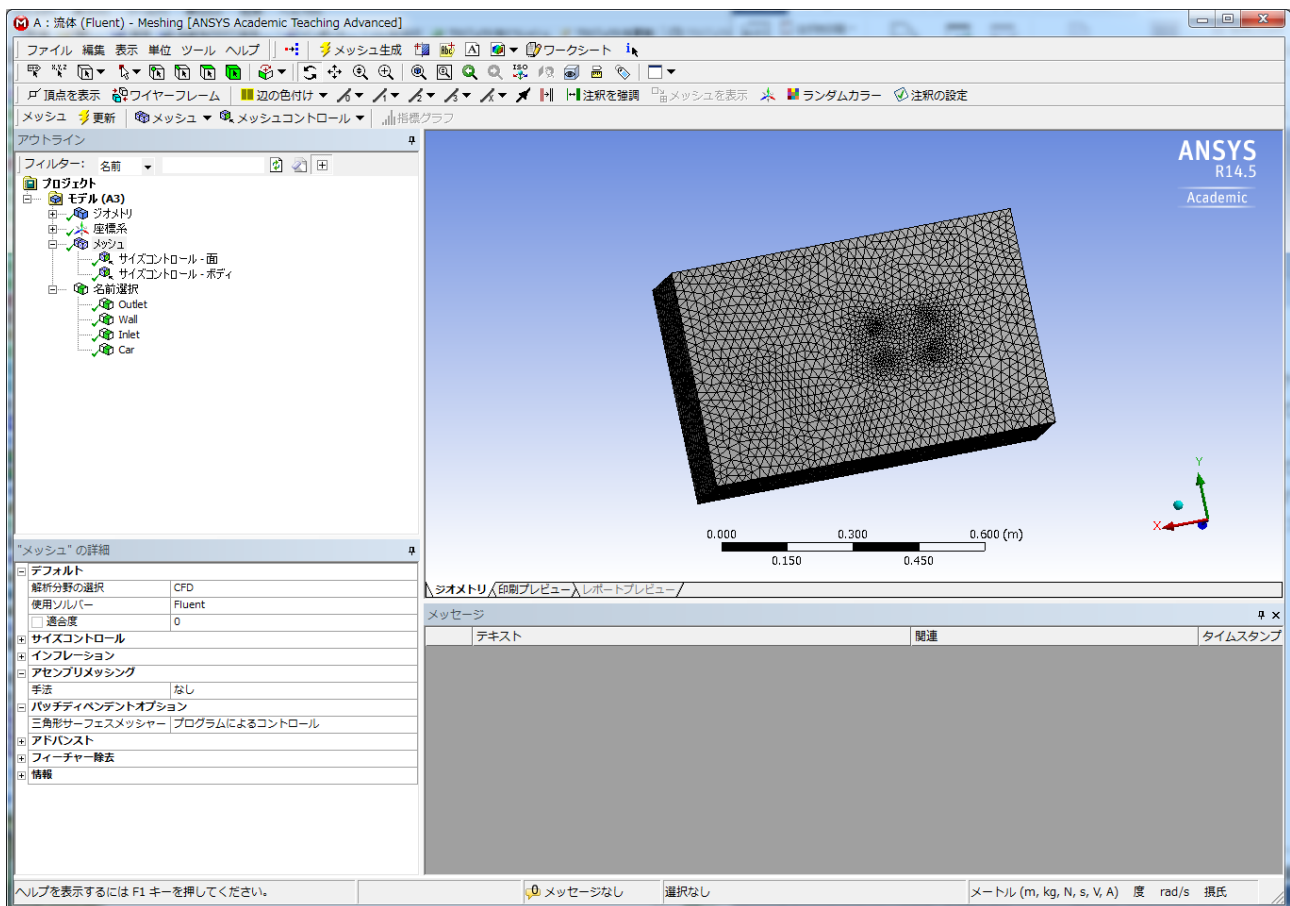


#### 4.1 Meshing

プロジェクトに戻り、「メッシュ」をダブルクリックすると、Meshing が立ち上がるので、上記同様、境界条件を設定する領域に名前をつけて、定義しておく。

流入面に”Inlet”，流出面に”Outlet”，側面に”Side”，地面に”Ground”，車に”Car”と名前をつけておく。車は、全てを選択したあと、壁面を選択から解除することで選択できる。その後、「メッシュ」-「挿入」-「サイズコントロール」で、車の面を選択し、サイズを”0.01”m と設定しておく。また、「メッシュ」-「挿入」-「サイズコントロール」で、全体を選択し、サイズを”0.02”m と設定しておく。メニューの「メッシュ生成」でメッシュが生成される。メニューの「新規切断面」をクリックし、画面上で線を引くと、メッシュされたボディが切断され、内部のメッシュの状態を確認することが出来る。左下の断面 Window の「断面 1」のチェックを外すと元に戻る。

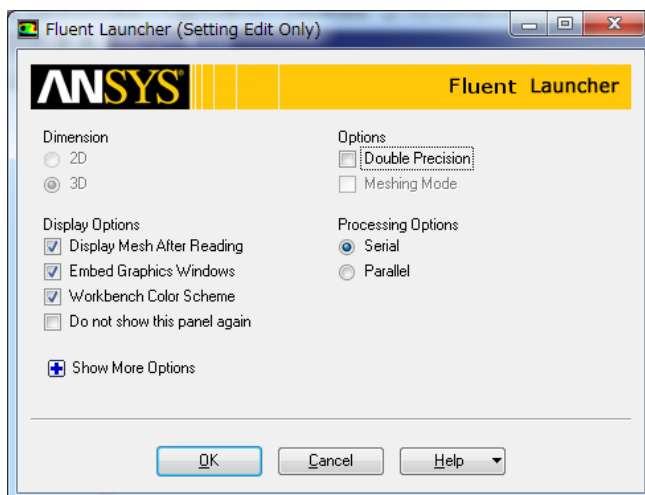




ANSYS 教育版の上限は、約 51.2 万セルほど。これを超えると、この後解析できない。

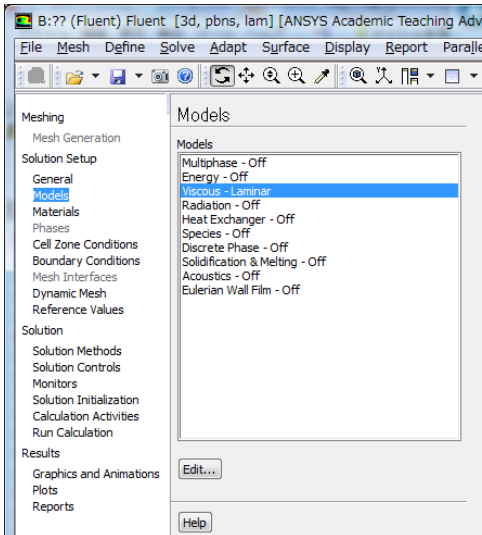
## 4.2 物性値の設定

次に、Workbenchに戻り、「メッシュ」を右クリックし、「更新」しておく。その後、「セットアップ」をダブルクリックし、Fluent Launcher を立ち上げる。計算精度を上げる場合には、Double Precision をチェックする。「OK」すると、Fluent が立ち上がる。

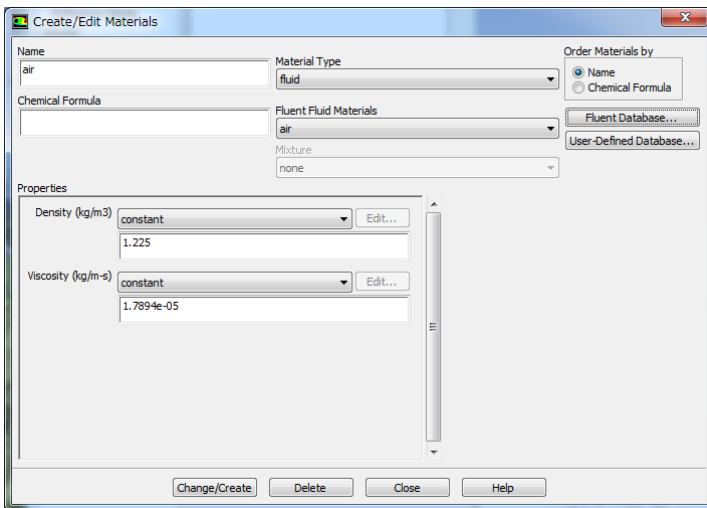


ここで、左のメニューの General で右のメニューの Solver の Type が選択できる。Time は、定常 ("Steady") と非定常 ("Transient") が選択できる。ここでは、"Transient" を選択する。

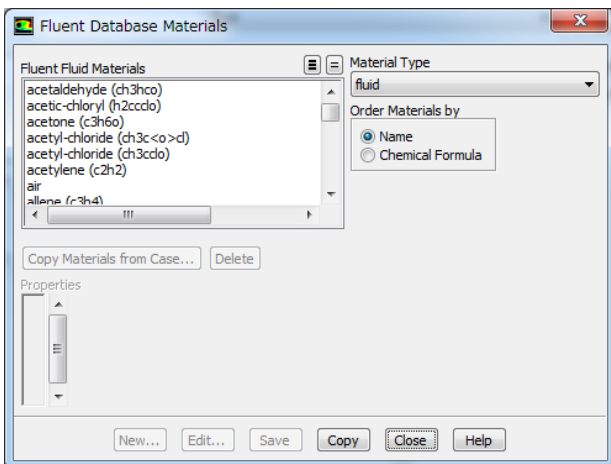
次に、左のメニューの Models で、右のメニューの Models から粘性流体 "Viscous-Laminar" を選択する。Edit で計算スキームが選択できる。他にも、Models では、輻射 "Radiation"、熱交換 "Heat Exchanger"、音響 "Acoustics" などが選択できる。



次に、左のメニューの **Materials** で、右のメニューの **Materials** から流体-空気”air”を選択し、左下の「Create/Edit」をクリックすると、Create/Edit Materials Window がオープンする。



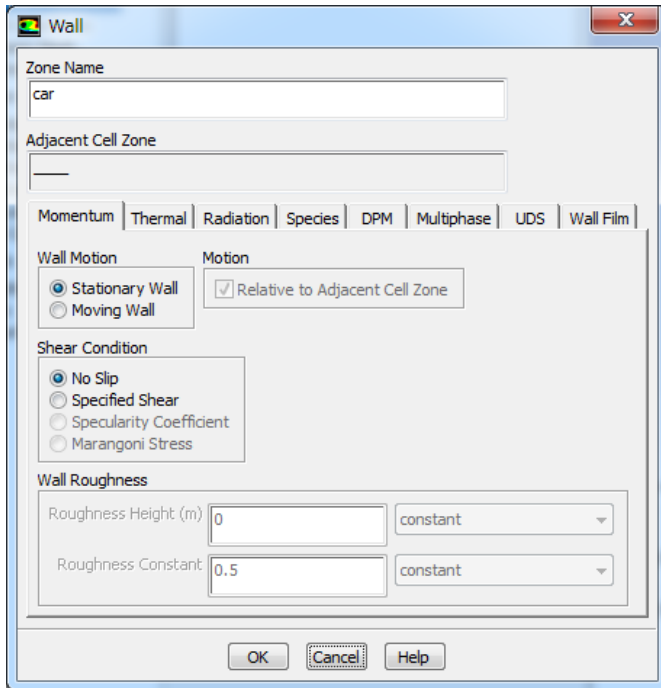
ここで、右の「Fluent Database...」をクリックすると、Fluent Database Materials Window がオープンするので、水”Water-liquid(h2o<|>)”を選択し、「copy」をクリックすると、Materials-Fluid に water-liquid が追加される。空気”air”の他、様々な液体、気体が選択できる。



その後、Fluent Database Materials Window を「close」し、Create/Edit Materials Window の「Change/Create」をクリックし、「Close」する。

### 4.3 境界条件の設定

左のメニューの Boundary Conditions を選択し, 右の Zone の "car" を選択し, Type を "Wall" にする. 「Edit...」をクリックすると, Wall Window がオープンするので, Shear Condition の 「No Slip」 ボタンを選択し, 「OK」 する.



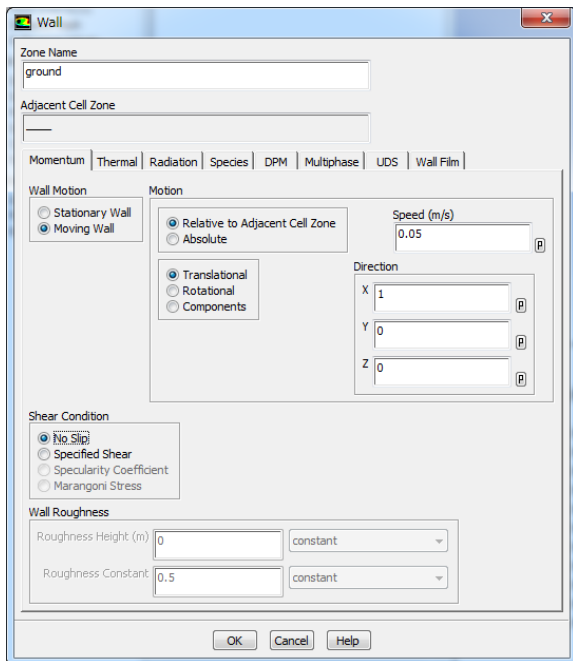
Zone の inlet を選択し, Type を "velocity-inlet" にし, 「Edit...」をクリックすると, Velocity Inlet Window がオープンするので, Velocity Specification Method を "Components" にし, X-Velocity(m/s) に "0.05" m/s, Y-Velocity(m/s) に "0" m/s, Z-Velocity(m/s) に "0" m/s を入力し, 「OK」 する.

Zone の Outlet を選択し, Type を "pressure-outlet" にし, 「Edit...」をクリックすると, Pressure Outlet Window がオープンするので, Gauge Pressure (Pascal) に "0" を入力し, 「OK」 する. ゲージ圧は, 絶対圧から大気圧のこと.

**An outlet vent is considered to be infinitely thin, and the pressure drop through the vent is assumed to be proportional to the dynamic head of the fluid, with an empirically determined loss coefficient which you supply. That is, the pressure drop,  $\Delta P$ , varies with the normal component of velocity through the vent,  $v$ , as follows:  $\Delta P = k_L \frac{1}{2} \rho v^2$**

Zone の "Side" を選択し, Type を "symmetry" にする. 面对称条件で, 面の法線方向の速度のみ 0 という意味.

Zone の "Ground" を選択し, Type を "wall" にし, "Edit" で, "Moving Wall" を選択し, Motion で Speed(m/s) に "0.05" を入力し, Direction に X"1", Y"0", Z"0" を入力する. Shear Condition は "No Slip" とし, 「OK」 する.



次に、左のメニューの **Reference Values** を選択し、右の **Compute from** を”inlet”にする。この操作の意味が分からず... 初期値に係わっているとか... You can control the reference values that are used in the computation of derived physical quantities and non-dimensional coefficients. These reference values are used only for postprocessing.

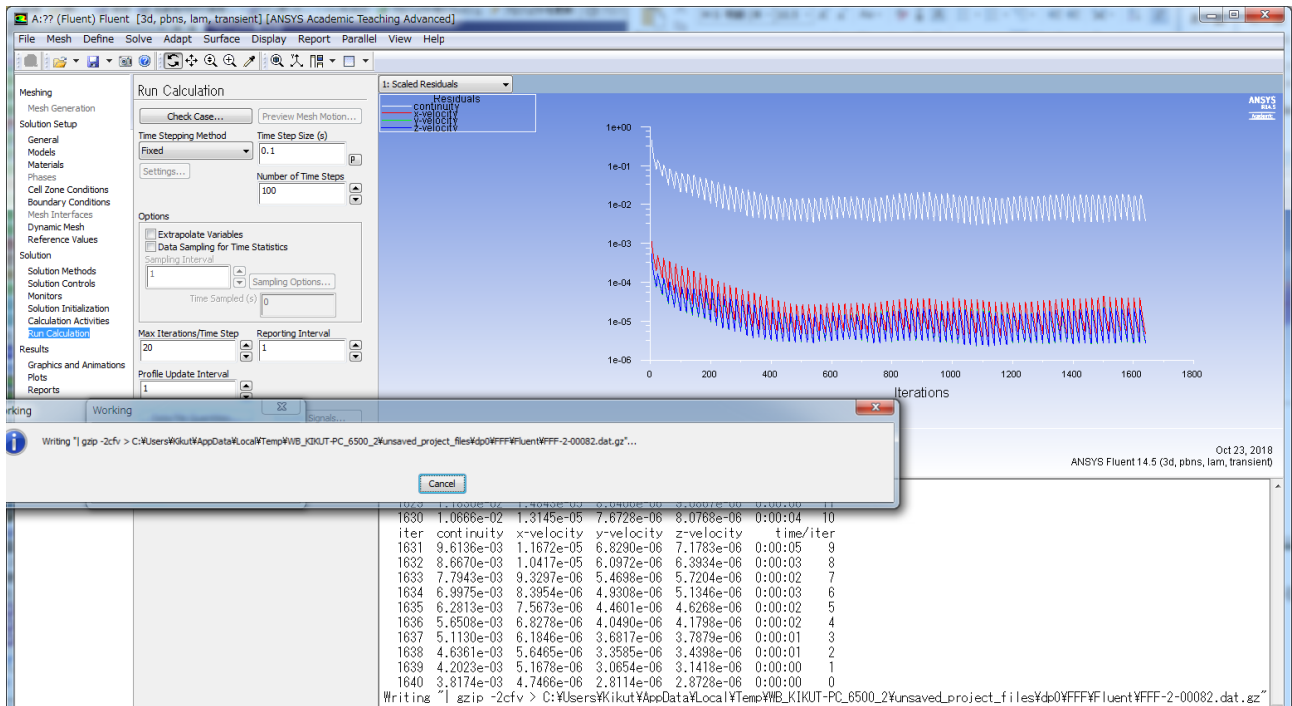
#### 4.4 解析の実行

左のメニューの **Solution Methods** では、計算スキームを変更できる。

左のメニューの **Solution Initialization** を選択し、**Initialization Methods** で”Hybrid Initialization”ボタンを選択し、「initialize」する。計算の初期値として **Inlet** の流速が一様に全体に流れているように設定する。

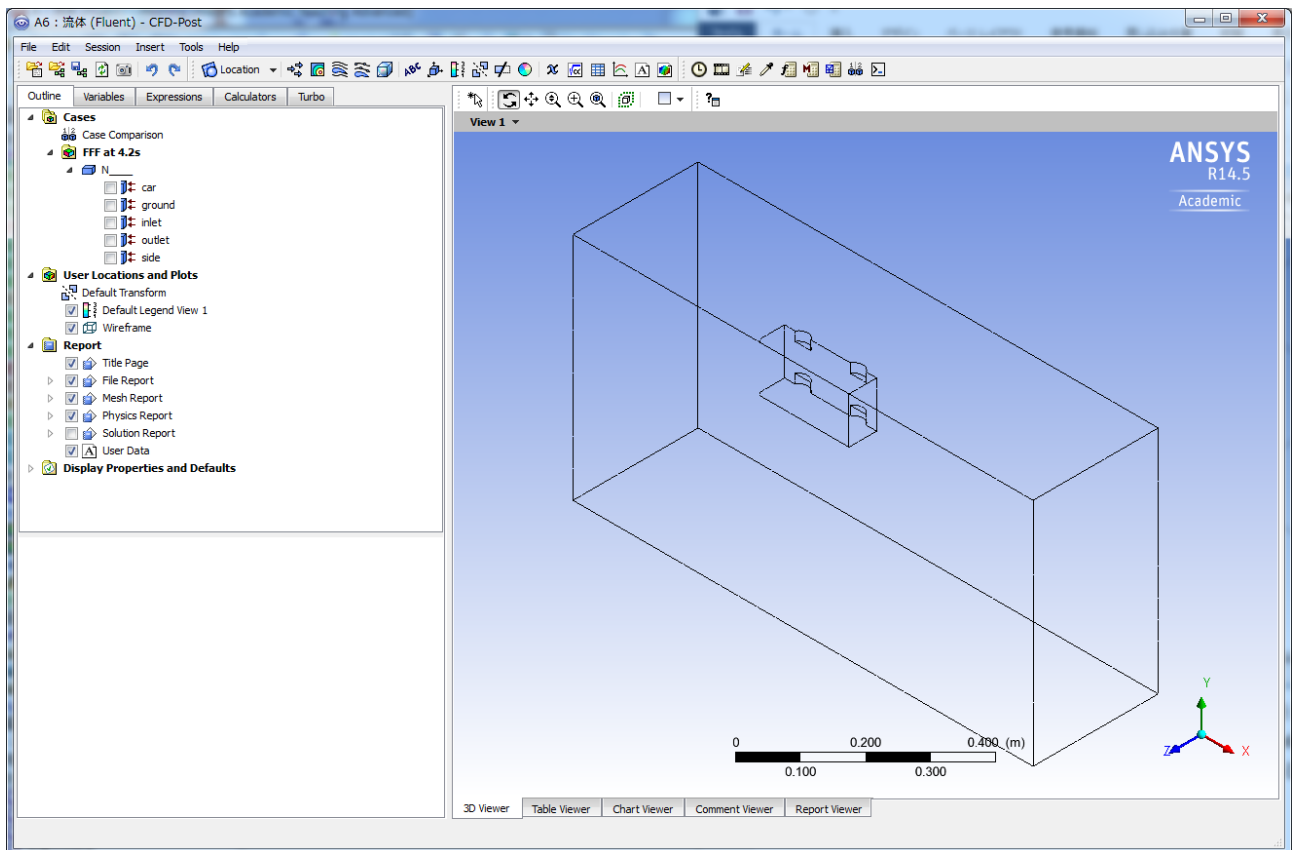
左のメニューの **Calculation Activities** を選択し、**Autosave Every (Iterations)**に”10”を設定し、10step 毎セーブする。動画を作成するときのフレームになる。

左のメニューの **Run Calculation** を選択すると、繰り返し計算数が設定できる。**Time Step Size** に”0.02” [s] を入力し、**Number of Time Steps** を”500”にし、**Max Iteration/Time Step** を”20”にし、「Calculate」すると、計算が開始される。**Max Iteration/Time Step** は、収束計算の繰り返し数の最大値の設定。0.02 秒×500step で 10 秒間のシミュレーションとなる。車が 0.05m/s で進んでいるので、 $0.05 \times 10 = 0.5\text{m}$  (2.5 車体) の運動における流れ場の解析となる。



#### 4.5 可視化

Workbenchに戻り、「解析結果」をダブルクリックすると、CFD-Postが立ち上がる。

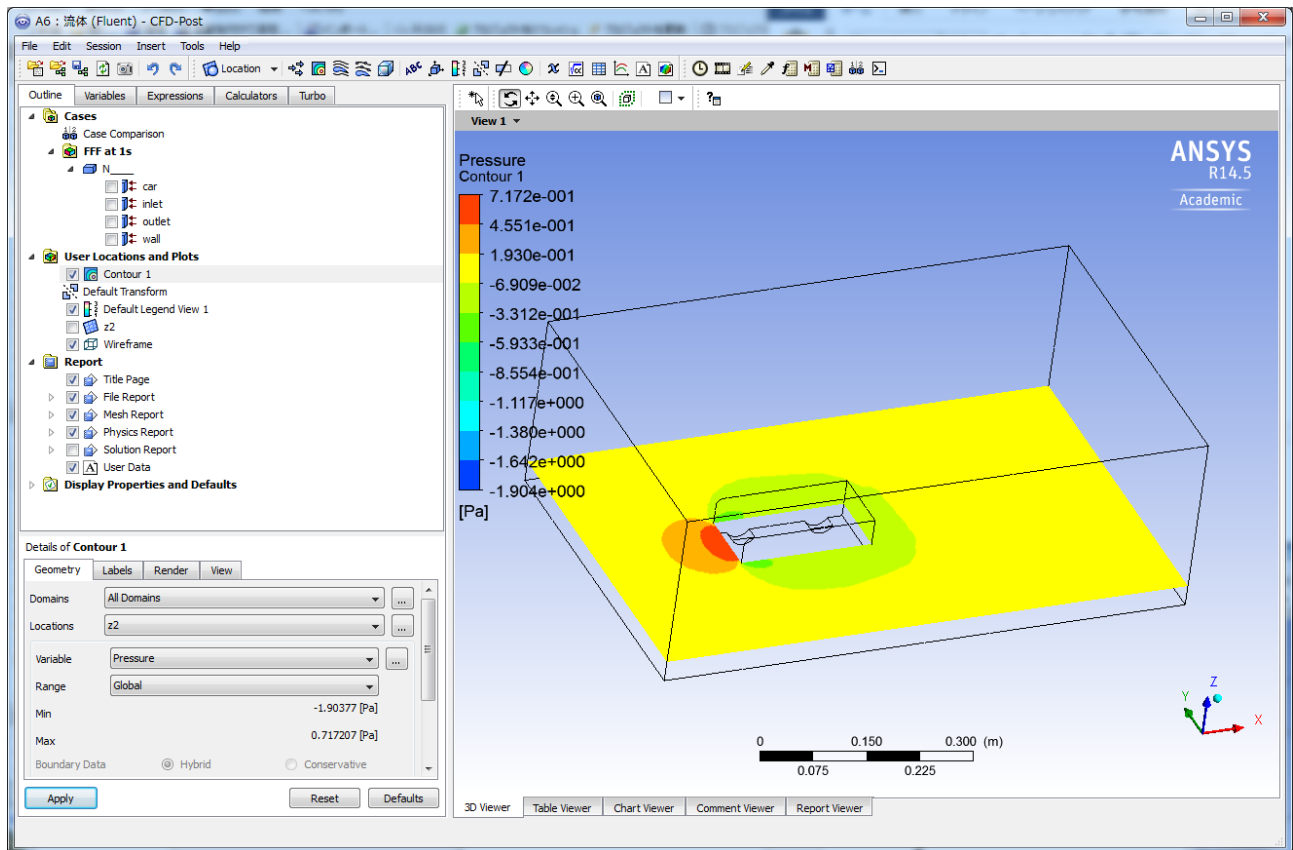
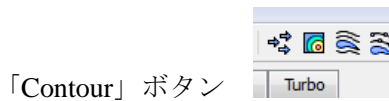


メニューの「Location」のプルダウンメニューで「Plane」を選択し、Nameに「Z2」と入力する（Z=2平面と言う意味）。左下のDetails of z100のGeometryタグのMethodで「XY Plane」を選択し、Zに「0.02」[m]を入力し、「Apply」すと、Outlineにz2メニューが追加される。チェックを外すと、画面上の平面は非表示になる。

圧力の表示：

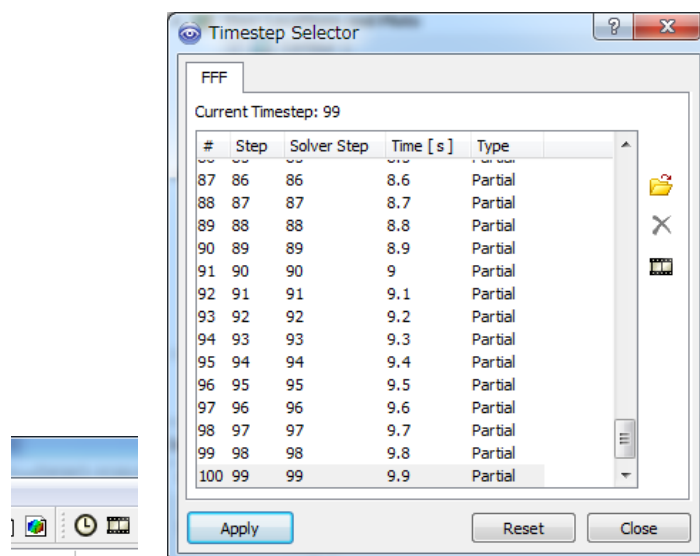
メニューの「Contour」をクリックし、Nameを「Contour 1」と入力し「OK」すると、Details of Contour 1が

オープンされる。Details of Contour 1 の Geometry タグの Locations の”z2”を選択し、Variable を”Pressure”にして「Apply」すると、等圧力線図+コンタ図が表示される。最大圧力から最小圧力までを 10 分割して表示している。



Details of Contour 1 の Range を”User Specified”にすると、圧力の最小値、最大値が入力できる。また、# of Contours で等圧線の本数を指定できる。

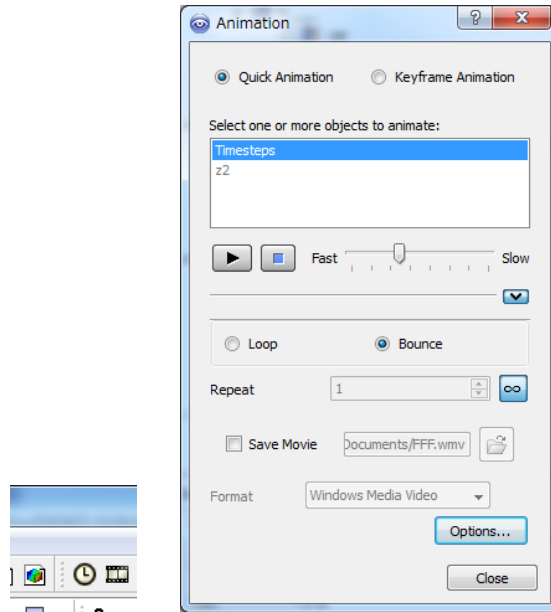
メニューの「Timestep Selector」をクリックすると、10Step 毎保存されたデータが表示され、Step 数を選択して「Apply」すると、その時間におけるデータが表示される。



「Timestep Selector」ボタン

メニューの「Animation」をクリックすると、Animation Window がオープンする。動画として再生可能で

あり、動画ファイルも作成可能である。"Timesteps"を選択すると時系列の動画、"z2"を選択すると z 方向に移動する xy 平面を動画となる。



「Animation」ボタン

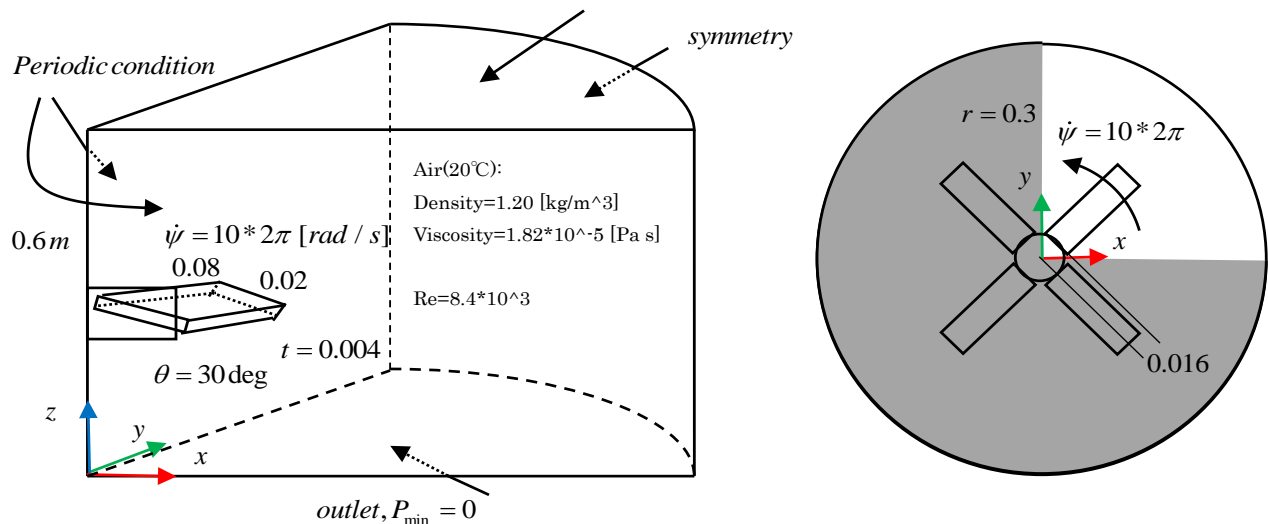
Outline メニューの Contour 1 のチェックを外し、圧力を非常時にしておく。

流速ベクトルの表示：

メニューの「Vector」をクリックし、Name に"Vector 1"を入力し、「OK」すると、Details of Vector 1 が開くので、Geometry タグの Locations で"z2"を選択、Sampling で"Rectangular Grid"を選択、Spacing に"0.02"を入力して「Apply」すると、流速ベクトルが表示される。

## 5 流体解析 (Fluid analysis) : 回転体の解析の例 1 (軸対称計算)

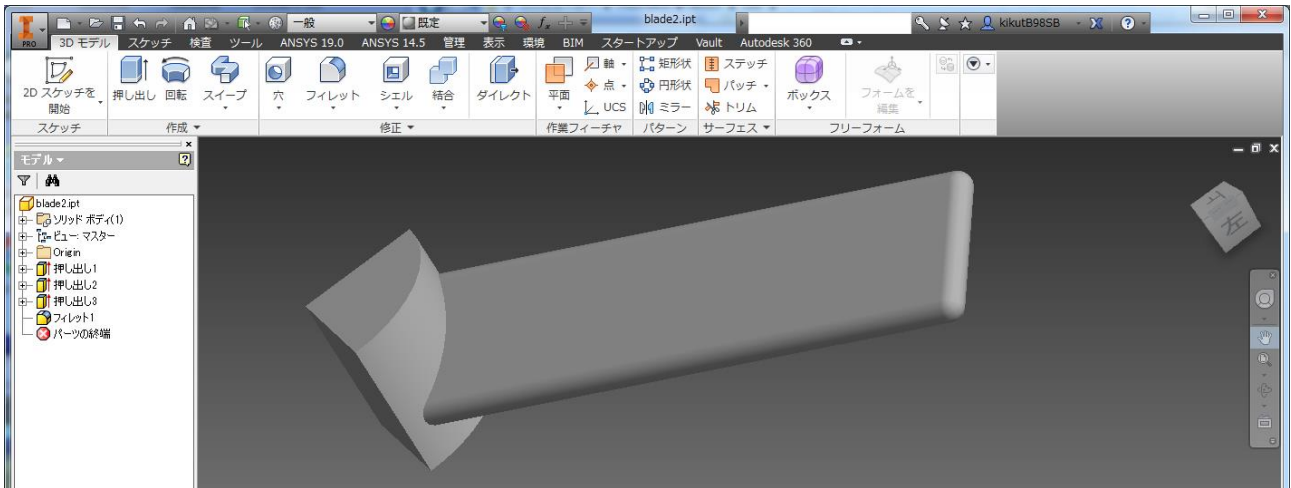
Pressure outlet :  $P_{\min} = 0$



ヘリコプタのブレードの解析を行う。4ペラを想定し、ホバリング、計算空間は軸対称で1/4。空間座標系でブレードが回っているモデルで計算する(ブレード座標系で、空間が回るようにすると、慣性座標系ではなくなるので、遠心力とコリオリ力を考慮する必要が出てくる)。もう少し本来の現象を捉えた境界条件設定があると思うが、よく分からないのでとりあえず今回はこの設定。

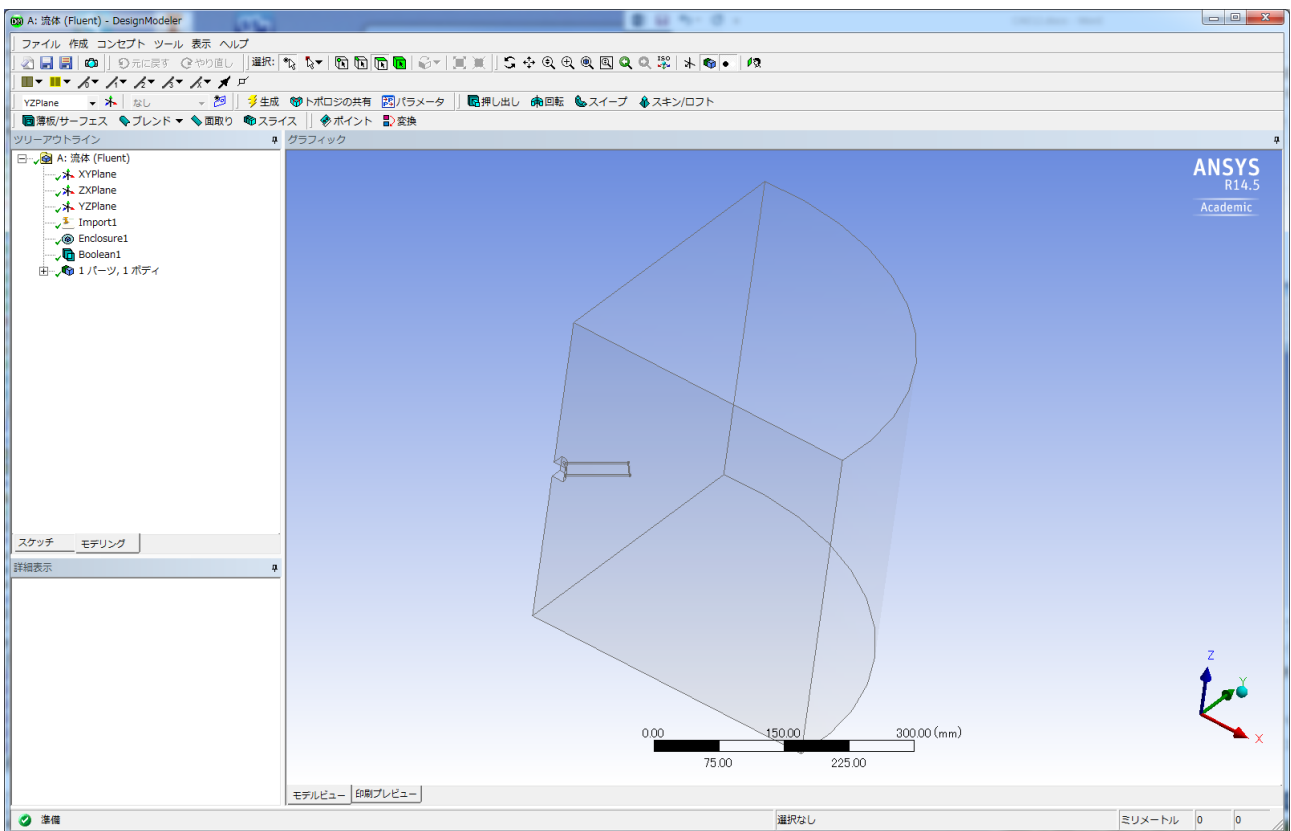
### 5.1 CAD モデル生成

Inventor でブレードの 1/4 モデルを作る。Z 軸が回転の中心。2mm のフィレット有。



## 5.2 メッシング

Workbench を立ち上げ、「流体 (Fluent)」をドラッグしてジオメトリにドロップし、Fluent の項目の「ジオメトリ」から、CAD モデルを読み込み、「ジオメトリ」をダブルクリックし、DesignModeler を立ち上げる。「ミリメートル」を選択して「生成」を行った後、ツールの「囲い込み」をクリックする。詳細表示で、形状で「円筒」を選択し、円筒アライメントを「Z 軸」にし、対称面の数を「2」面にし、対称面 1 でツリーアウトラインの「ZXPlane」を選択し、対称面 2 でツリーアウトラインの「YZPlane」を選択する。これで、境界条件をこの両面を周期境界条件として選択できるようになる。空間は適当に、「300」、「300」、「300」にして、「生成」する。



メニューの作成で「ブーリアン」を選択し、引き算して計算空間を作っておく。次に、プロジェクトに戻り、「メッシュ」をダブルクリックして、Meshing を立ち上げ、各境界面に、右クリックの「名前選択作成」で、「SideA」、「SideB」、「Top」、「Bottom」、「circle」、「blade」と名づける。Blade 面は選択しにくいので、

面を全選択した後、側面を解除して、選択する。

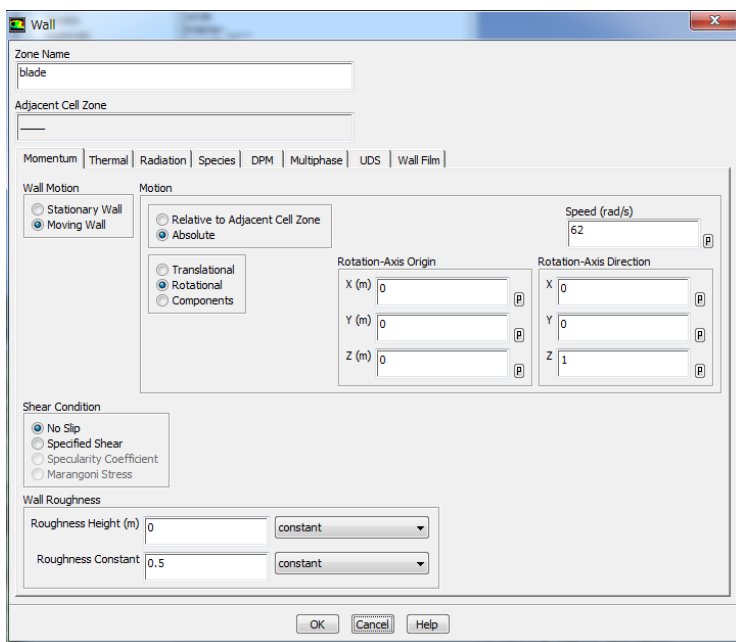
「インフレーション」で、blade の内側を 12(?)面選択する。ジオメトリからは選択しにくいので、境界スコープ方法の「名前選択」にし、境界のプルダウンメニューから「blade」を選択する。「サイズコントロール」で全体のボディを「適用」し、要素を「0.015m」にして、メッシュを「生成」する。

### 5.3 セットアップ：周期境界条件の設定

プロジェクトに戻り「メッシュ」を更新し、「セットアップ」をダブルクリックし、「Double precision」で Fluent を立ち上げる。Solution Setup の General で定常「Steady」を選択し、Model は「Edit」で乱流モデル「k-epsilon」を選択し、「OK」する。Material は「air」を選択する。

Boundary Conditions で「side a」を選択し、Type を「Interface」にして「OK」し、名前をつけて「OK」する。同様に、「side b」を選択し、Type を「Interface」にして「OK」し、名前をつけて「OK」する。これで、Mesh Interfaces が選択できるようになる。

「blade」の Type は「Wall」にし、Edit で「Moving wall」を選択し、Motion で「Absolute」、「Rotational」を選択し、角速度 Speed(rad/s)を「62」(62rad/s=10rps)に、回転の原点 Rotation-Axis Origin の X(m)を「0」、Y(m)を「0」、Z(m)を「0」に、回転軸 Rotation-Axis Direction を X「0」、Y「0」、Z「1」にし、「OK」する。なお、壁面粗度 (Wall Roughness) に関するパラメータ (乱流モデルにおける表面の粗さに関連する抵抗増加を考慮した係数) が存在するが、ここでは無視する。→ **ところが結果を見ると、ブレードが Z 軸回転していない。ブレード壁面に沿った流れになっている。このため解析できず。なぜかはわからないまま。**

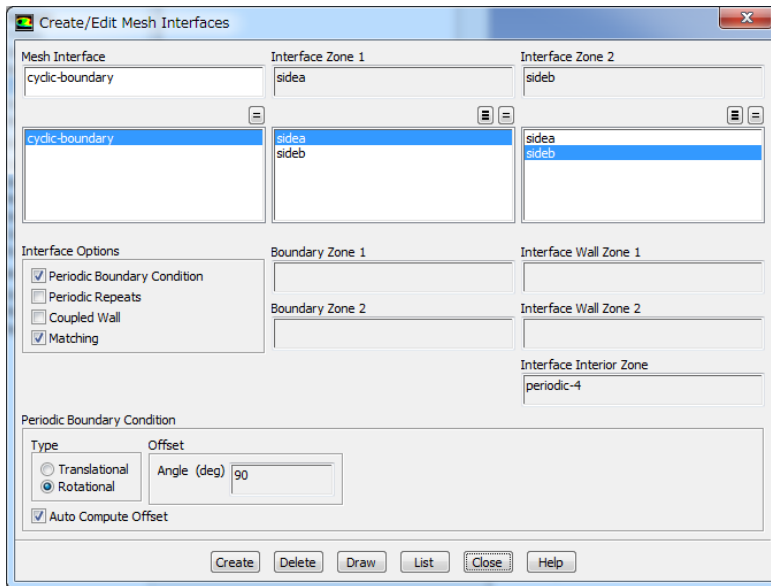


「bottom」の Type は「Pressure-outlet」にし、Edit で、「Radial Equilibrium Pressure Distribution」をチェックし、ゲージ圧 Gauge Pressure (Pascal)は「0」にして、「OK」する。ゲージ圧 (動圧) =絶対圧力 (全圧, 総圧, total pressure) -大気圧 (静圧)。

Circle の Type は「symmetry」(法線方向の流れなし) にし、「OK」する。

「top」の Type は「Pressure-outlet」にし、Edit で、「Radial Equilibrium Pressure Distribution」をチェックし、ゲージ圧 Gage Pressure (Pascal)に「0」を入力し、「OK」する (「pressure-inlet」は、gauge total pressure となっており、総圧を入力するようになっているため止めた.)。

次に、Mesh Interfaces で「Create/Edit」をクリックし、Mesh Interface に「cyclic-boundary」と名前をつけ、Interface Zone 1 で「side a」を、Interface Zone 2 で「side b」を選択し、Interface Options で、「Periodic Boundary Condition」と「Matching」を選択する。Matching は、周期境界面内のメッシュサイズ等が異なるときに、対応付けをする。Periodic Boundary Condition は、Type で「Rotational」を選択し、Auto Compute Offset のチェックを外し、Angle (deg)に「90」を入力して、「Create」し、「Close」する。



なお, "Translational"を選ぶことで, 平行な分割領域, Offsetの角度を"180"にすることにより円筒座標系の1/2モデルなどを計算領域として設定することが出来る.

Reference Valuesは, Compute fromで"blade"を選択しておく.

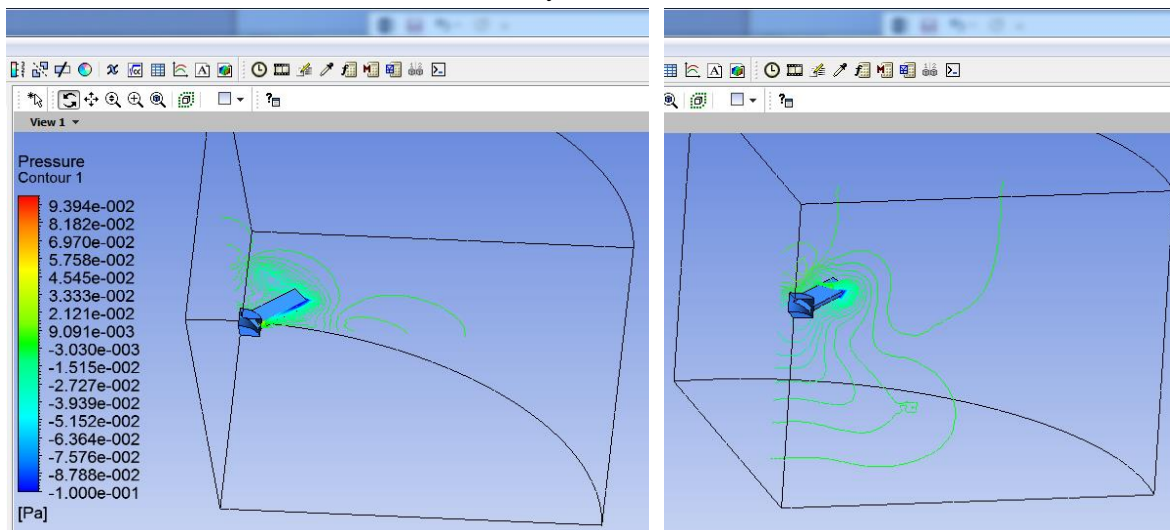
#### 5.4 計算

Solution InitializationでInitialization Methodで"Hybrid Initialization"を選択し, 「Initialize」しておく.

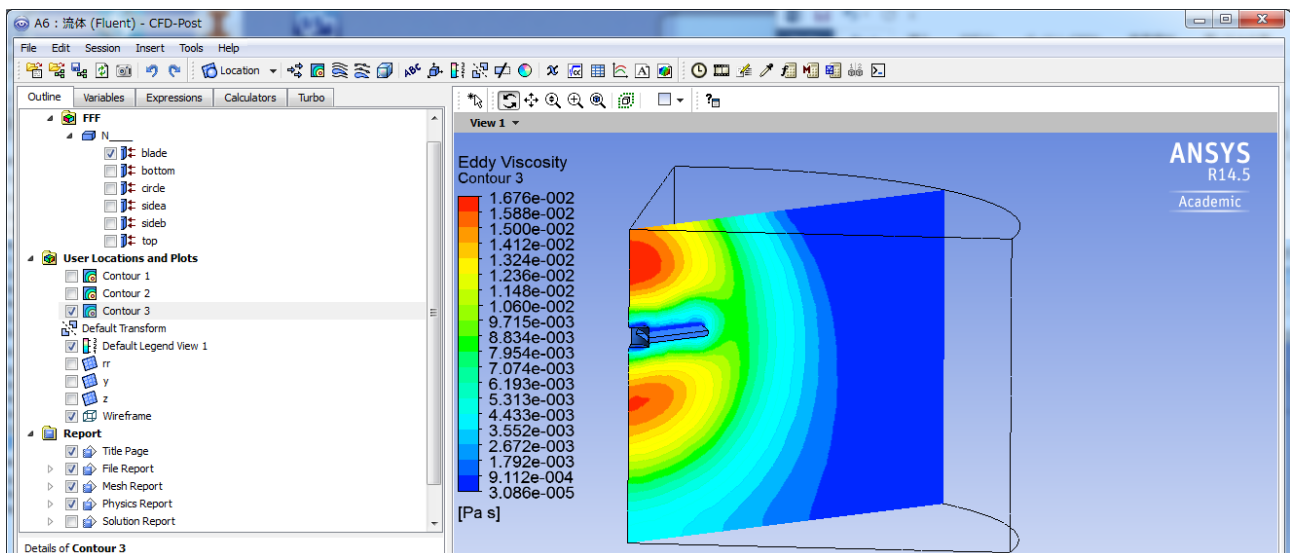
Run CalculationでNumber of Iterationsを"200"にし, Reporting Intervalを"10", Profile Update Intervalを"10"にして, 「Calculate」する.

#### 5.5 可視化

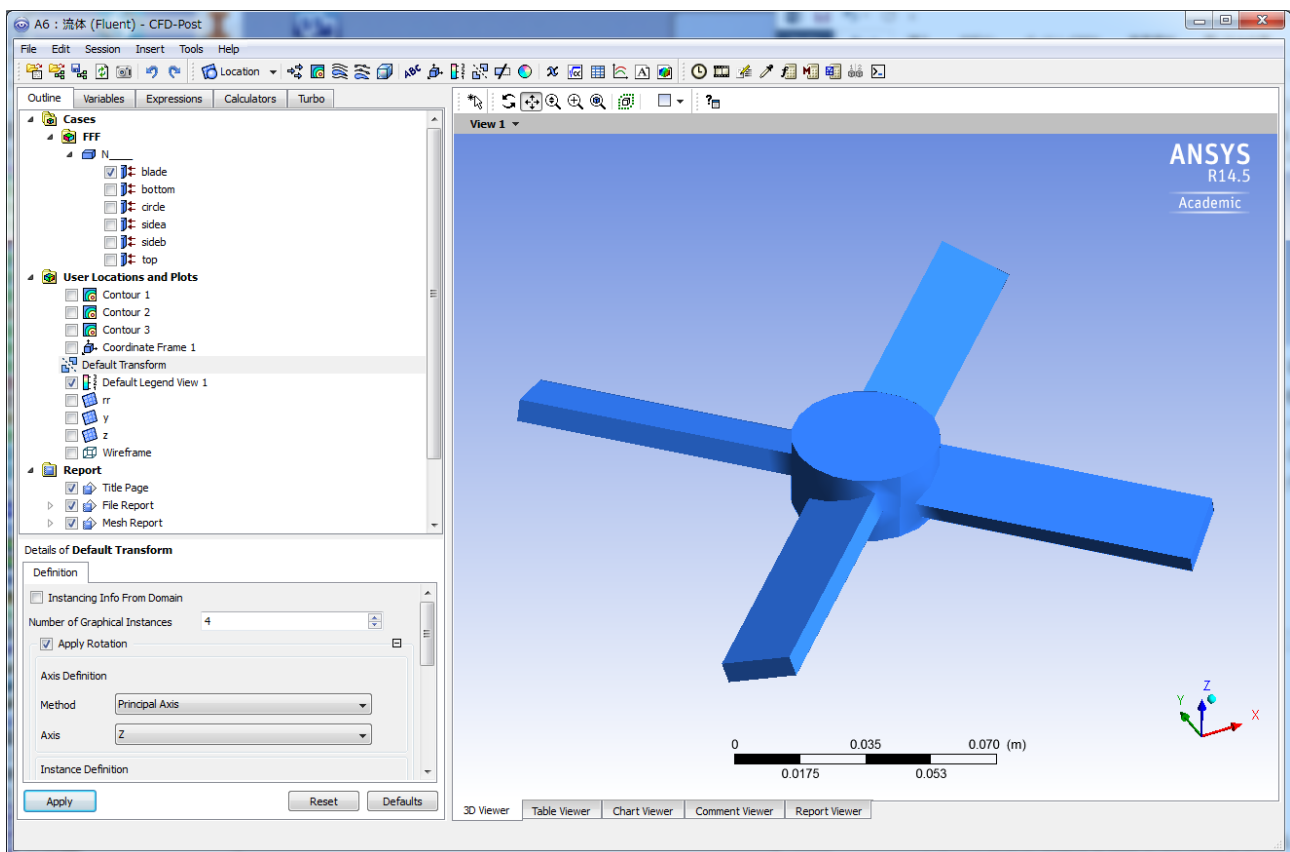
プロジェクトに戻り, 適当な平面 ( $z=0.01, y=0.05$ ) で圧力分布を表示すると以下のとおり.



半径方向の面を設定するために, メニューの「Location」から, "plane"を選択し, 適当な名前"RR"をつけ, Methodを点と法線"Point and Normal"にし, 点として"0", "0", "0"を, Normalとして"1", "-1", "0"を入力して, 「OK」する. 法線ベクトルは単位ベクトルである必要はない. 次に, ContourのVariableで渦粘性係数"Eddy Viscosity"を選択を表示し, RR面を選択すると, すると以下のとおり. **値がおかしいので間違っている...**



1/4 の計算領域をコピーして全領域として表示する．アウトラインの「Default Transform」をダブルクリックし，Instancing Info From Domain のチェックボタンを外し，Number of Graphical Instances を  $360\text{deg}/90\text{deg}=4$  にする．Apply Rotation をチェックし，Method を”Principal Axis”，Axis を”Z”に選択すると，コピーする領域を Z 軸で回転させることが出来る．Instance Definition の Full Circle をチェックすることで，4 つの領域を生成できる．アウトラインの Wireframe を外すと，全体のモデルが表示される．



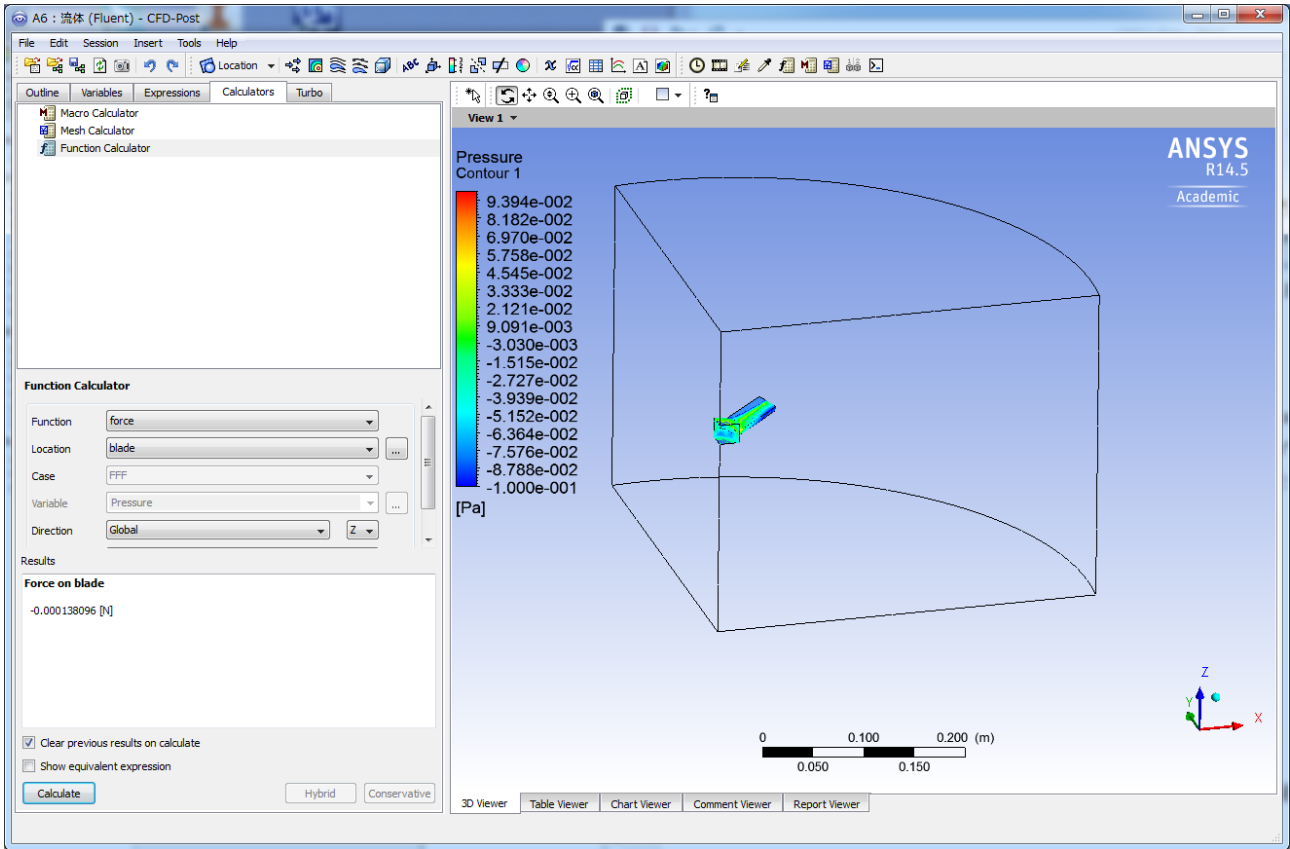
## 5.6 圧力解析

ブレードにかかる圧力を積分して，外力を求める．Function Calculator ボタンを押すと，Calculator のタグが表示される．Function で”Force”を選択し，Location で”blade”を選択し，Direction で”Z”を選択し，「Calculate」すると，Force on blade 画面で，”-0.00138105 [N]”と表示される（計算されているのは，1/4 の領域の値）．**下向きの風が 0.1m/s で吹き降ろしている(機体が上昇しようとしている)とき，ブレードを**

秒速 10 回転程度させても揚力が発生しないことが示されている。計算に失敗している。



Function Calculator ボタン：



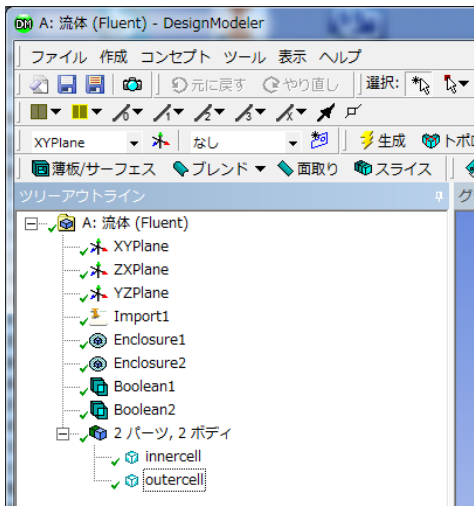
また、Function の”area”で表面積が計算できる。トルク”Torque”，最大速度，平均速度なども計算できる。

## 6 流体解析 (Fluid analysis) : 回転体の解析の例 2 (Sliding Mesh の例)

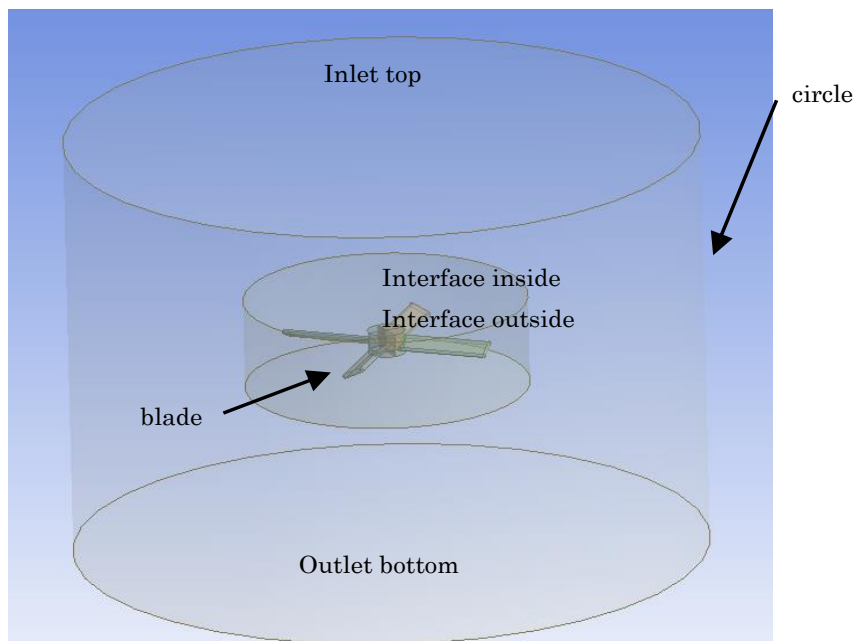
回転する計算空間 A (ブレード座標系) と、それを取り囲む回転しない計算空間 B (慣性座標系) をつくり、これらが境界面で接する (重合はさせない) ようにして計算する。定常問題でも非定常で計算することになる。

### 6.1 モデル設定

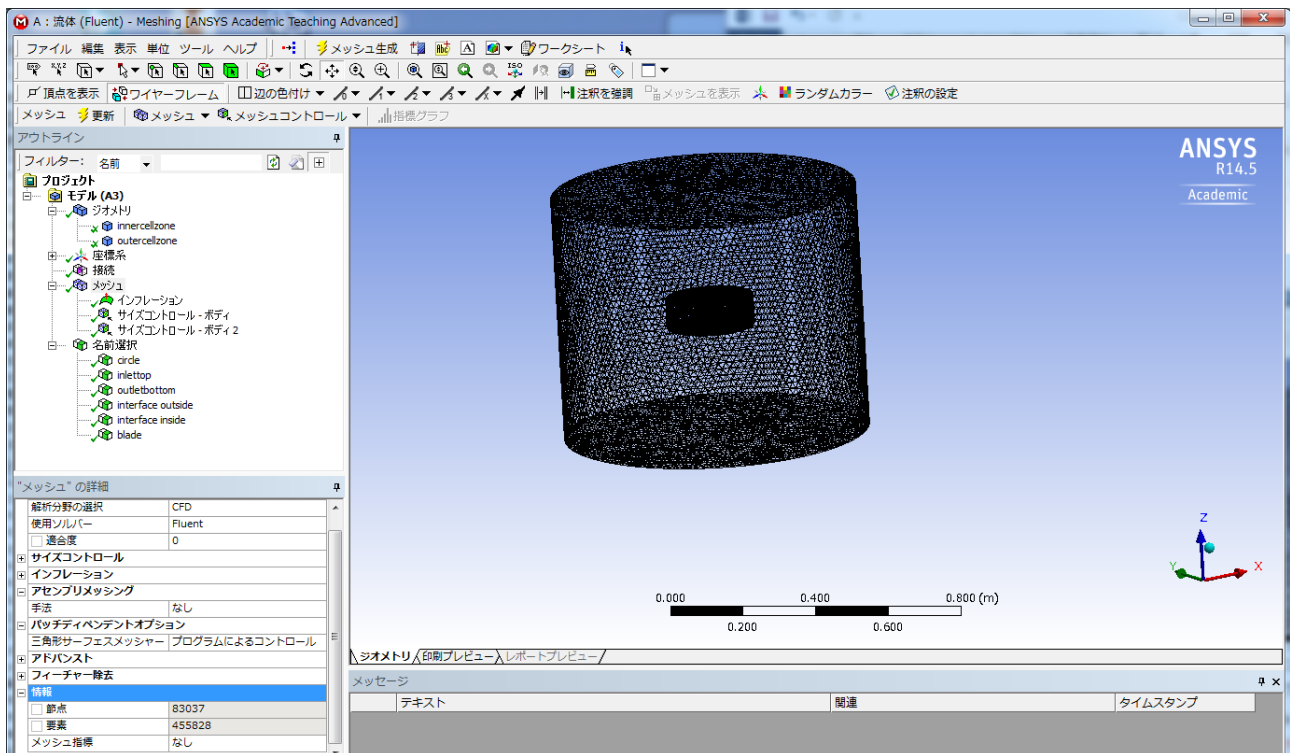
上記モデルをアセンブリし、全体モデルにしてから読み込む (ブレードにフィレットがついたモデルは自動的にメッシュが細くなるので、セル数に制約がある学生版では計算できなかった)。「囲い込み」で”円筒”，”Z 軸”を選び、サイズを”30”，”30”，”30”で「生成」し、さらに、「囲い込み」で”円筒”，”Z 軸”を選び、サイズを”300”，”400”，”400”で「生成」する。ブーリアンで、B-A を B 空間にし、ツールボディを保存を「Yes」で A 空間はそのまま残しておく。もう一度ブーリアンで A 空間-ブレードを行う。ここで、アウトラインの 2 パーツ、2 ボディの”ソリッド”の名前を内側計算空間 A”innercellzone”と外側計算空間 B”outercellzone”として名前をつけておく。これが cell zone となる。名前を付け替えないと、後のセットアップで認識されない。



プロジェクトに戻り、「メッシュ」をダブルクリックし、下図のように外側の計算空間の境界面に名前をつけておく。計算領域 A の境界は、計算領域 B を非表示にして名前をつけておく。Interface inside は内側の計算空間の境界面。Interface outside は、外側の計算空間の境界面。ジオメトリで一方のボディを抑制 (suppression) しながら、境界面の選択を行う (接合面がこれぐらい明確だと自動で行った interface 境界で十分だが、今回は明示的に自分で行うためわざわざ選択して名前をつけた)。



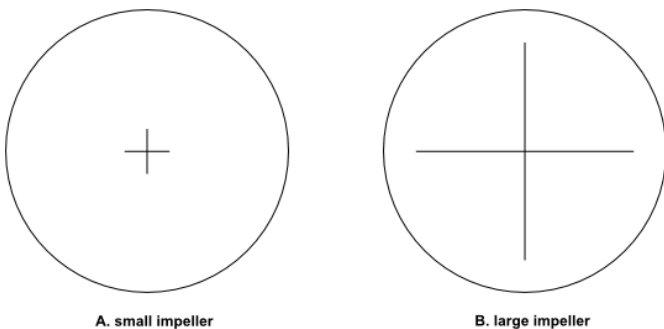
次に、アウトラインの「メッシュ」をクリックし、「メッシュ」の詳細の解析分野の選択で「CFD」を選択する。Blade の周りには「インフレーション」しておく。内側の計算領域は、サイズコントロールで要素サイズを「0.01」、外側の領域は、サイズコントロールで、「0.022」にしておく。アウトラインのメッシュをクリックし、情報で「+」をクリックして展開し、要素数を確認すると、440,000 となっている。学生版の上限は 512,000。



プロジェクトに戻り、メッシュを「更新」し、「セットアップ」をダブルクリックして、「Double precision」で立ち上げる。Generalで、「Transient」を選択する(定常問題を非定常計算する)。Modelsで「Viscous-Laminar」を選択し、「Edit」で「k-epsilon(2 eqn)」を選択、k-epsilon Model は Standard をチェック、RNG Options は「Standard Wall Functions」をチェックして「OK」する。Material は「air」を選択する。

## 6.2 境界条件

Cell Zone Conditions で Zone の「innercellzone」を選択し、「Edit...」をクリックし、Material Name は「air」を選択し、内部計算領域の座標系 Frame Motion と内部計算領域のメッシュ Mesh Motion をチェックする。Reference Frame タグで、Relative To Cell Zone で「absolute」を選び、Rotation-Axis Origin は X(m), Y(m), Z(m) に「0」,「0」,「0」を入力して回転の原点を決め、Rotation-Axis direction は X, Y, Z に「0」,「0」,「1」を入力して Z 回転、Rotational Velocity の Speed (rad/s)には「62」を入力する。「Copy to Mesh Motion」をクリックして、「OK」する。内部の座標系もメッシュも同じ運動をすることになり、内部座標系から見ると、内部メッシュは回っていないことになる。外部座標系から見ると、回っている。合ってる？



A の場合 (計算空間に対してペラが小さいとき、回転運動している空間が全体に対して小さいとき)、「Absolute」を選択し、B の場合 (計算空間の殆どが運動しているとき)、「Relative to adjacent cell zone」を選択する。

[https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu\\_ug/flu\\_ug\\_sec\\_move\\_setup.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_ug/flu_ug_sec_move_setup.html)

なお、座標系を周期的に移動させるときは、ファイル (Standard Transient Profiles フォーマット) を読み込ませる。

[https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu\\_ug/flu\\_ug\\_sec\\_bcs\\_transient.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_ug/flu_ug_sec_bcs_transient.html)

Boundary Conditions において, Blade は wall にし, 「Edit」で”Moving Wall”にし, 外部から見て回転しているように, Motion は”Absolute”にチェック, Rotational をチェック, Z 軸回転で Speed(rad/s)を”62”とし 「OK」する (“Stationary Wall”で壁を止めても計算結果では 62rad/s で動いていることになっている. 結局どちらでも同じ回転になる. なぜ? 計算結果に影響しているかどうかはわからず.).

Circle は, ”Symmetry”にする.

Inlet top は, ”pressure outlet”にし, ”Radial Equilibrium Pressure Distribution”をチェックし, ゲージ圧 Gauge pressure は, ”0”にする. 圧力勾配も 0 になっているはず.

Interface\_inside, Interface\_outside は, Type を”interface”に設定する.

Outlet bottom は, ”Pressure outlet”にし, ”Radial Equilibrium Pressure Distribution”をチェックし, ゲージ圧”Gauge pressure は 0 にする. 圧力勾配も 0 になっているはず.

ANSYS Fluent also provides an option to use a radial equilibrium outlet boundary condition. This option is used to model the exit flow in turbomachinery flow problems. To turn on this option, enable Radial Equilibrium Pressure Distribution. When this feature is active, the specified gauge pressure applies only to the position of minimum radius (relative to the axis of rotation) at the boundary. The static pressure on the rest of the zone is calculated from the assumption that radial velocity is negligible, so that the pressure gradient is given by

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\rho v_{\theta}^2}{r}$$

where  $r$  is the distance from the axis of rotation and  $v_{\theta}$  is the tangential velocity. Note that this boundary condition can be used even if the rotational velocity is zero. For example, it could be applied to the calculation of the flow through an annulus containing guide vanes.

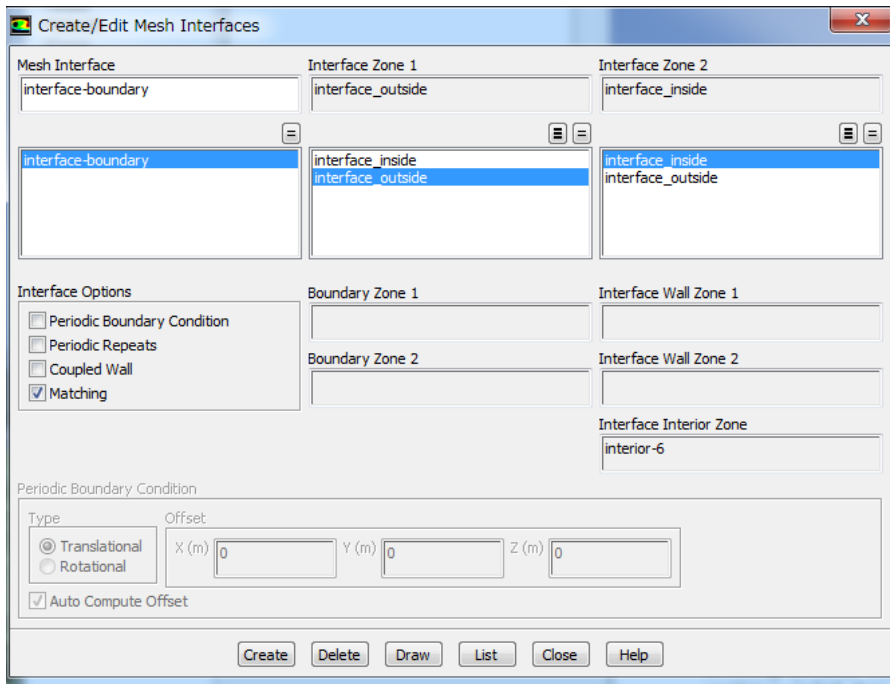
[https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu\\_ug/flu\\_ug\\_sec\\_bc\\_poutlet.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_ug/flu_ug_sec_bc_poutlet.html)

次に, Mesh Interface で「Create/Edit」し, Mesh Interface で”interface boundary”と名前をつけ, Interface Zone1 で”interface outside”を選択し, Interface Zone2 で”interface inside”を選択し, Interface Options で, ”Matching”を選択し, 「Create」する (接合面が明確なので matching しなくてもよいようだ).

### Matching

is relevant if only interface interior zones should be created, that is, the interface boundary zones should be empty because the interface zones on both sides are aligned. With the Matching option, even interface zones that are not perfectly aligned are treated as if they would be, however, if the discrepancy between the interface zones on both sides exceeds default thresholds, then warning messages will be displayed. Note that the Matching option is also compatible with periodic boundary conditions. See Matching Option for more information about the recommended uses of this option.

[https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu\\_ug/flu\\_ug\\_Create\\_Edit\\_Mesh\\_Interfaces.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_ug/flu_ug_Create_Edit_Mesh_Interfaces.html)



Reference Values は、Compute from で”blade”を選んでおく。

### 6.3 計算条件

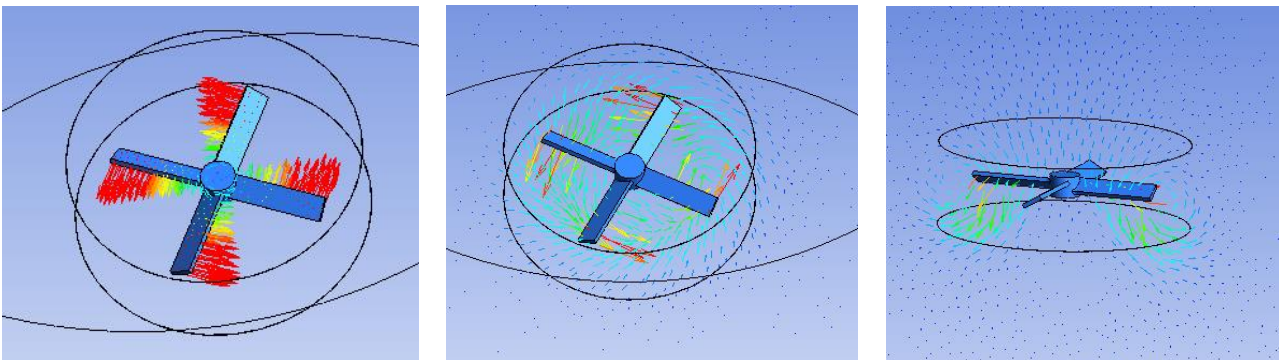
Solution Initialization の Initialization Method で”Standard Initialization”を選び、Compute from で”all-zone”を選択し、Reference Frame は”Absolute”を選択し、Gauge Pressure, X velocity, Y Velocity, Z Velocity が”0”になっていることを確認し、「initialize」する。非定常計算の場合、初期条件によって最終的な定常状態へ遷移するまでの時間が変わる。今回は計算空間の流速を 0、つまり、止まっている状態から計算を開始する。計算開始時はブレードが無限大の加速度で突然トップスピード 62rad/s になることになるので、圧力は非常に大きくなるが、時間の経過と共に定常状態に近づいていく。

Calculation Activities で Autosave Every (Time Steps)を”1”にしておく。

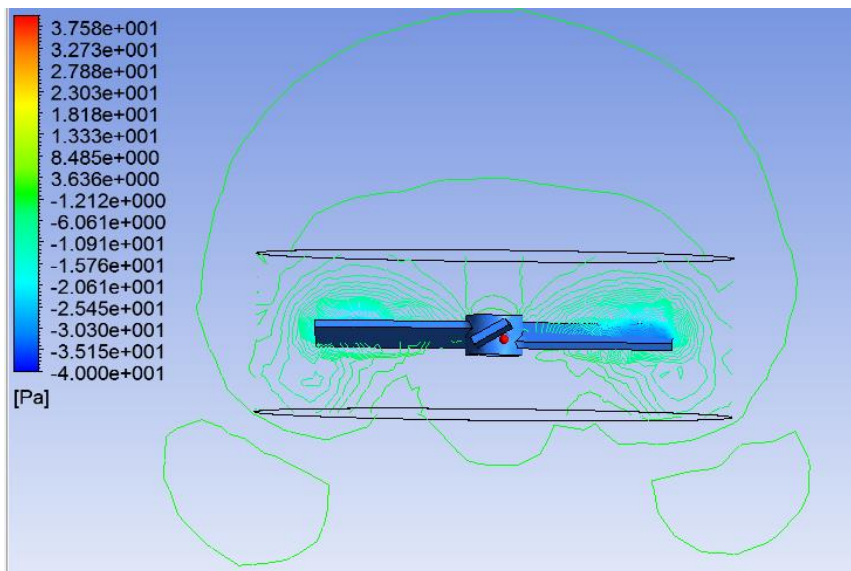
Run Calculation の Time Step Size (s)を”0.001”にし、Number of Time Steps を”1000”にし、Reporting Interval を”1”，Profile Update Interval を”1”にして「calculate」する。62rad/s=>10rps なので、0.001 秒で 3.6° 毎計算することになる（計算途中で reversed flow in \*\*\*の警告が出て、入出力面で流れの逆戻りが発生しているが、流れが遅いのでたぶんしょうがない。誤差が 10<sup>-4</sup> 程度のようなので、メッシュも粗いのでこんなもん。理想は 10<sup>-7</sup> ぐらいとのこと）。

### 6.4 計算結果可視化

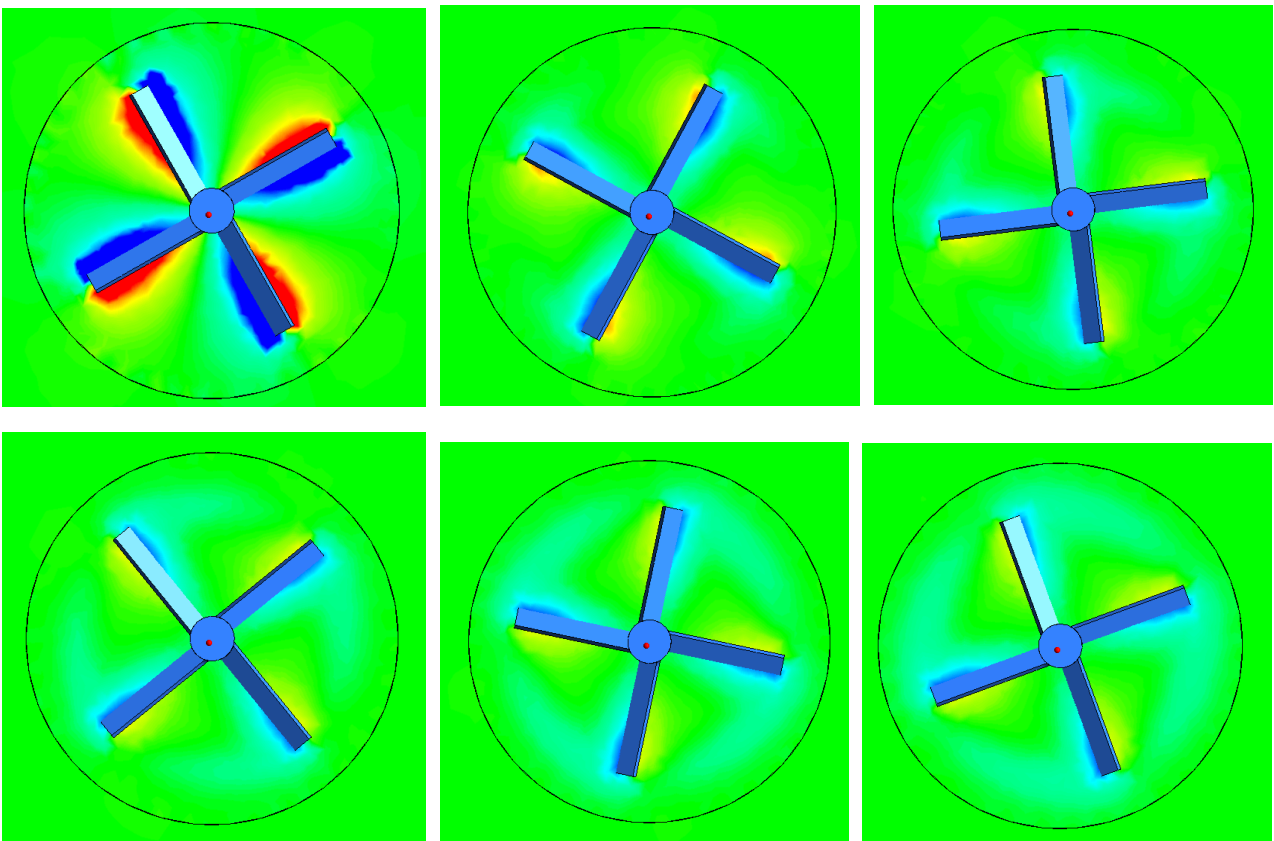
t=0.129 のブレードの速度 (red 7m/s)、Z=0.01 面の流速分布、ブレードを通る面の流速ベクトルは以下のとおり。ブレード先端の速度が、 $r\dot{\theta} = 0.1 * 62 = 6.2[m/s]$ で (7m/s ぐらいの色) なのでほぼ一致。

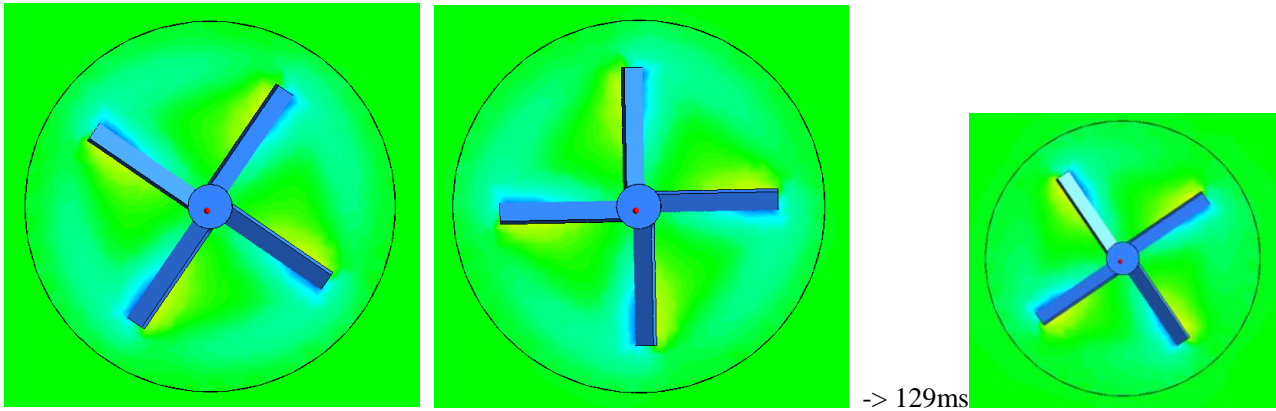


t=0.129 のブレードを通る面の圧力コンタ図(-40 to 40 Pa). Sliding mesh との境界面で不連続性が目立ち、メッシュが粗いことが分かる。内側の計算領域に対して、外側は倍粗い。

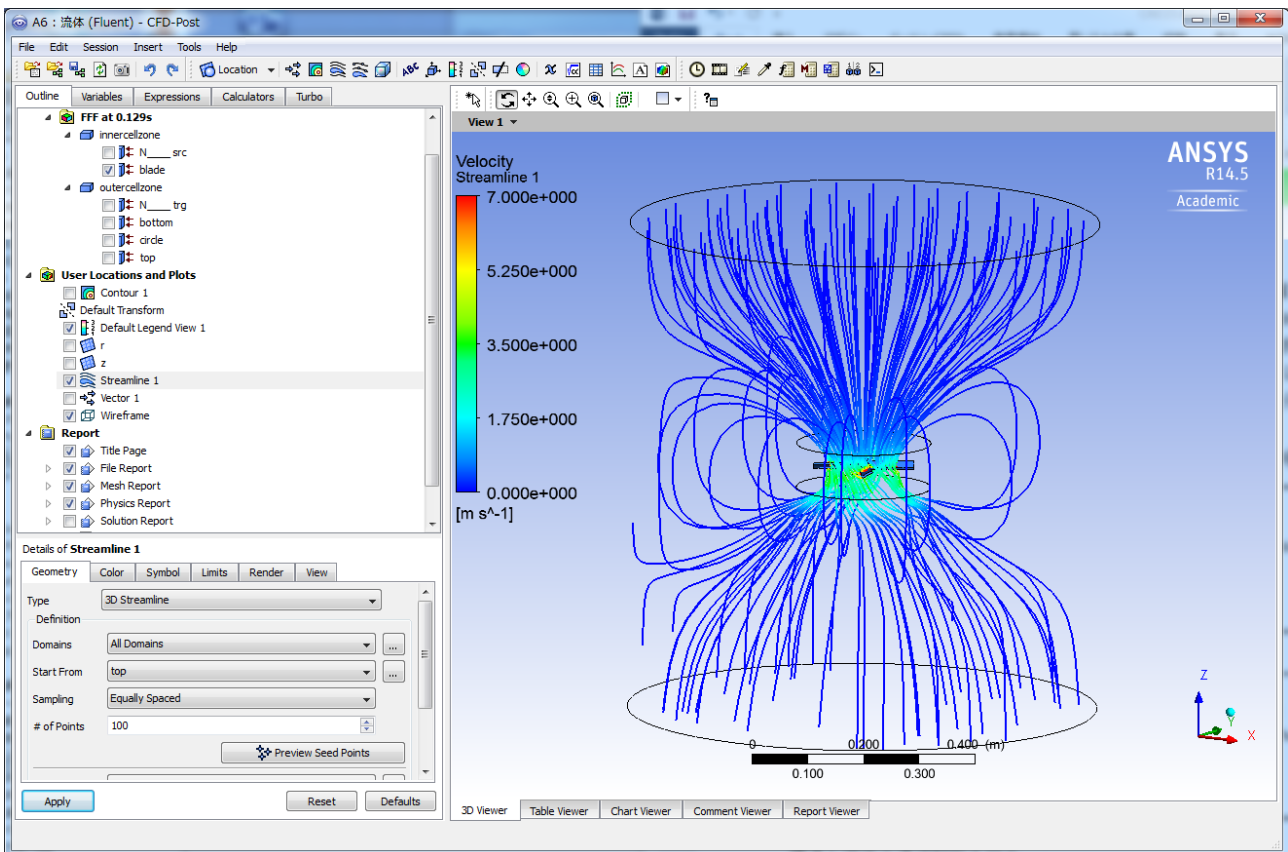


$t=0.01$  to  $0.129$  ( $\theta = 0\text{deg}$  to  $464\text{deg}$ , every  $36\text{deg}$ )を示す ( $-40$  to  $40$  Pa). 時間の変更は, メニューの「Time step selector」を利用する. 回転し始めの時は, 流体が止まっている状態から計算が始まっており, 流体が加速し始めているので圧力の絶対値は大きい. その後, 定常になるはずなので, 回転角度に関わらず同じになる. この状態になるまで計算する (たぶん 10 回転ぐらい). なお, この過渡状態は, 実際の物理現象とは異なり, 数値計算における現象. そもそも最初の状態が力学的に正しい状態ではない.





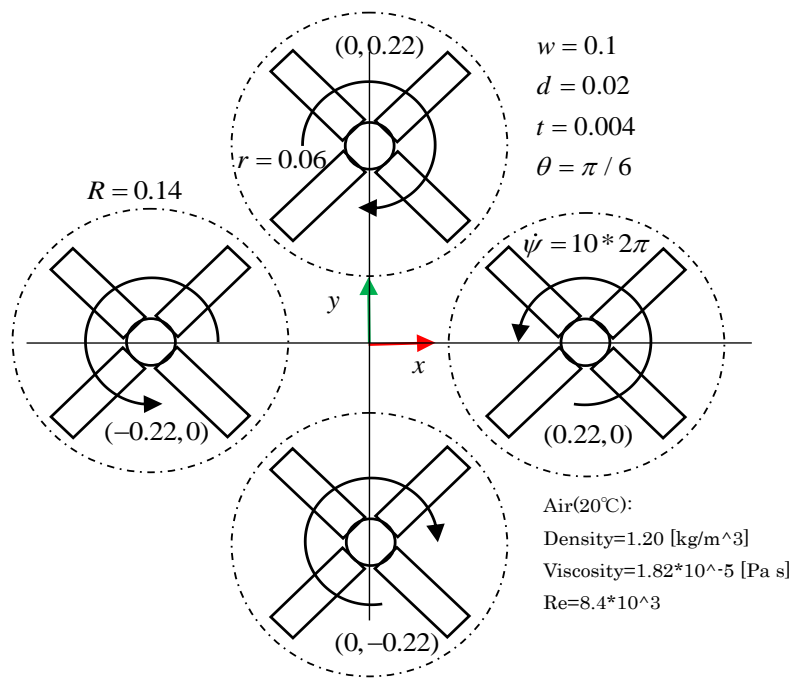
Streamline で上面 (top) から流線を示すと以下のとおり.



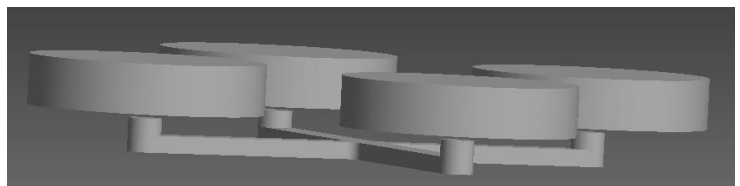
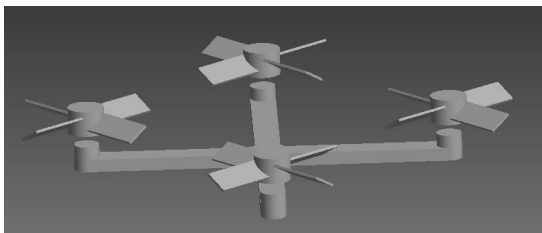
なお、メニューの「Function Calculator」で  $z$  方向の揚力を計算すると  $0.115798\text{[N]}$ 、体積を計算すると、 $V=3.9 \cdot 10^{-5}$  なので、ABS の密度  $1500\text{kg/m}^3$  として、 $mg=1500 \cdot 3.9 \cdot 10^{-5}=0.0585\text{ [N]}$ . ということで、ブレードだけなら飛ぶ. なお、Function で "torque" を選択して求めると、 $z=-7.6 \cdot 10^{-3}\text{ [Nm]}$ . 定常回転しているとすると、モータは  $10\text{rps}$  において  $7.6 \cdot 10^{-3}\text{Nm}$  のトルクを出せるモデル ( $7.6 \cdot 10^{-2}\text{W}$ ) を選択する必要があることが分かる.

## 7 流体解析 (Fluid analysis) : 回転体の解析の例 3 (ドローンの例)

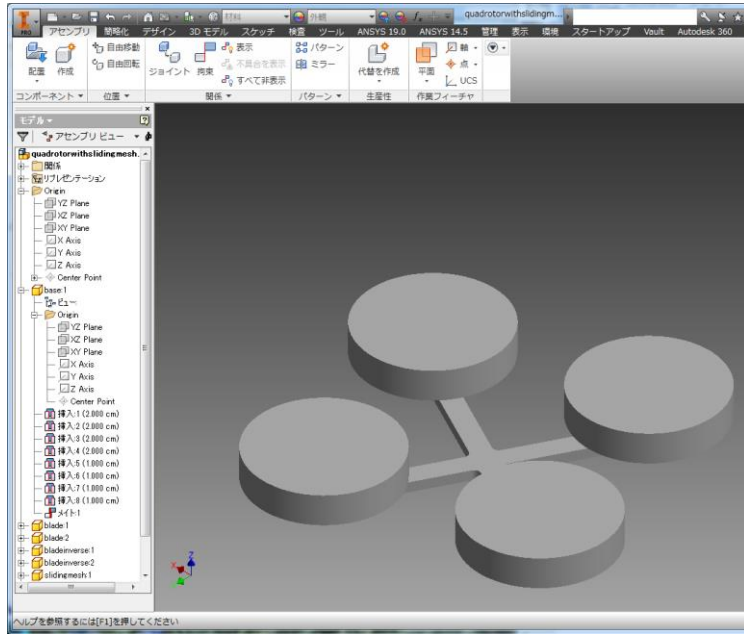
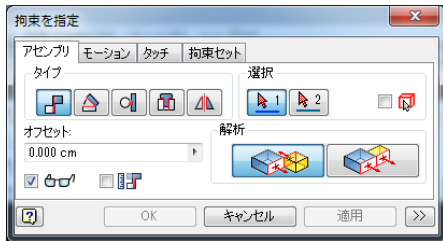
### 7.1 モデル化



Sliding mesh はブレードの数だけつくる。また、囲い込みコマンドでは対応できないため、CAD 側でブレード回りの計算空間もアセンブリ（ベース，ペラ 4，sliding mesh 4=9 モデル）する。全体の計算空間は囲い込みコマンド。左は物理モデル。対角のペラは逆ピッチ。右は sliding mesh の空間をアセンブリした状態。計算空間は本体から少し浮かせてある。

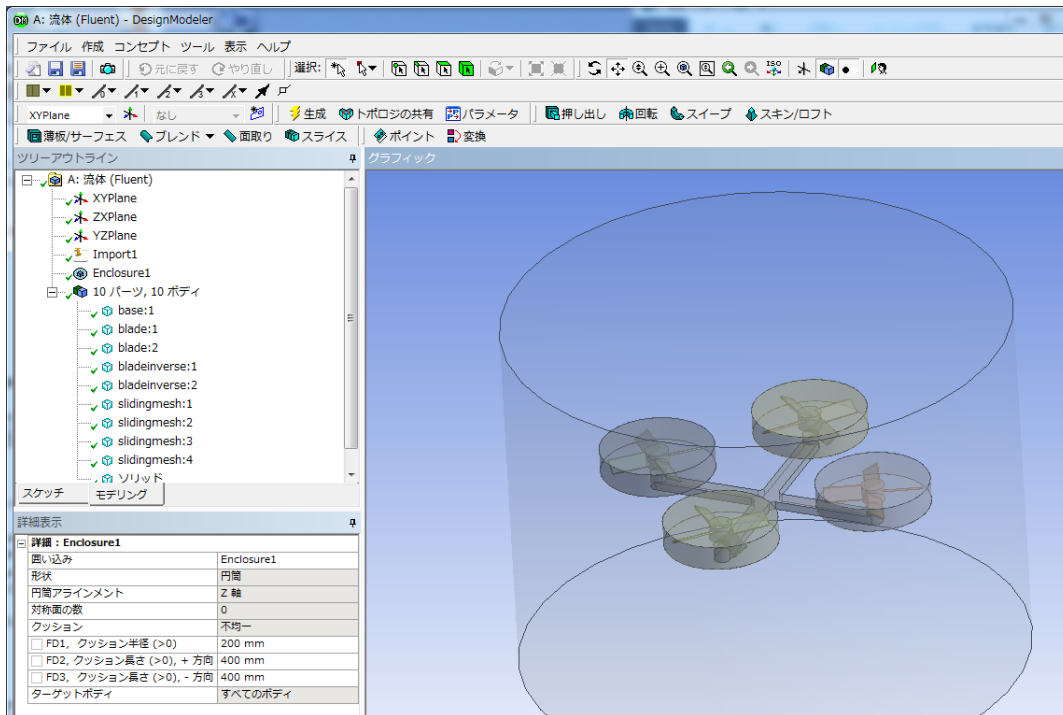


注： アセンブリ時，座標系の原点がずれるので，拘束の「メイト」で Origin の Center Point と，base:1 の Origin の Center Point を選択し，「適用」して，原点合わせをしておく。また，Origin の X Axis と，base:1 の Origin の X Axis を選択して「適用」し，Origin の Z Axis と，base:1 の Origin の Z Axis を選択して「適用」し，Origin の Y Axis と，base:1 の Origin の Y Axis を選択して「適用」し，回転軸合わせをしておく。

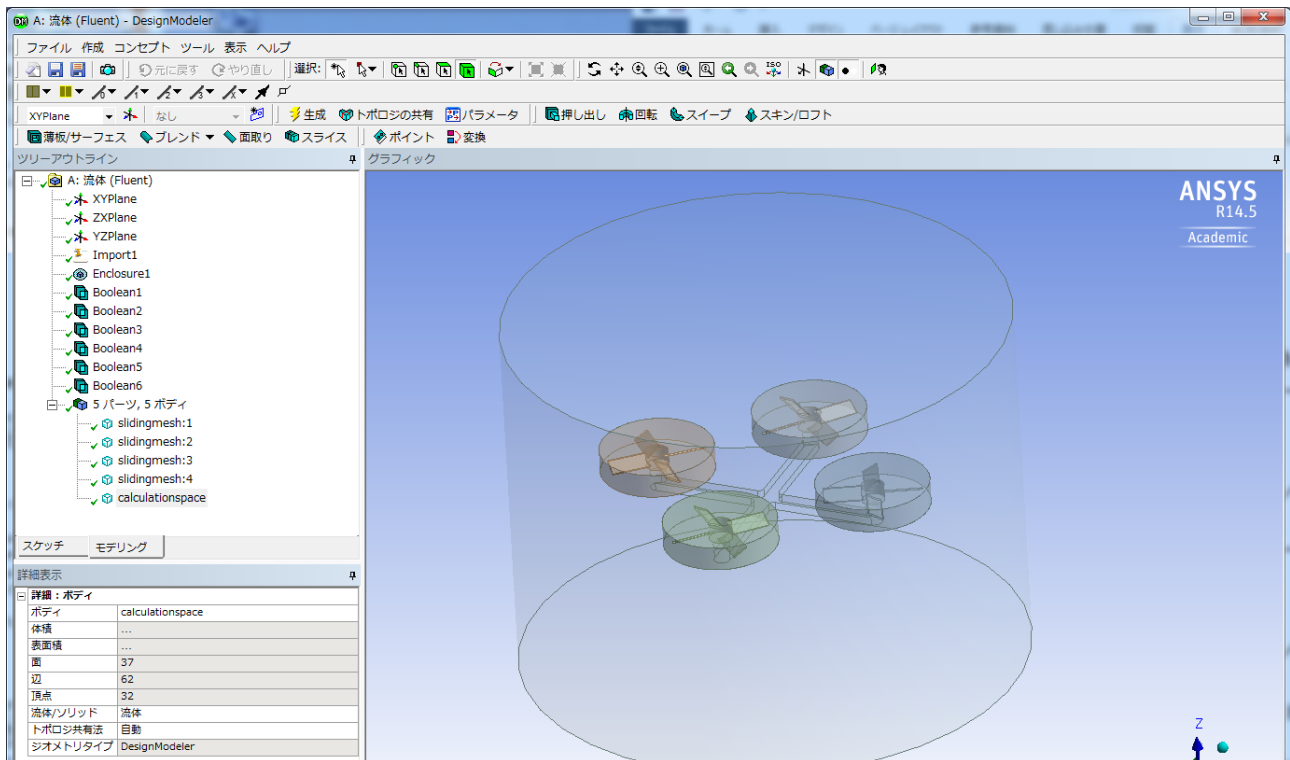


## 7.2 Fluent

Workbench を立ち上げ、Fluent のジオメトリで CAD モデルを読み込み、Designmodeler を立ち上げ、円筒、Z 軸で囲い込みする。



ブリーアンで計算空間”ソリッド”からクアッドの”base:1”を引き、その後、4つの sliding mesh の空間を残して引く。計算空間には、”calculation space”と名前をつけておく。次に、各 slidingmesh から blade を引き、右上から反時計回りに”blade 1”, ”blade 2”, ”blade 3”, ”blade 4”と名前をつけておく。最終的に、ひとつの計算空間と、4つの sliding mesh の空間が残る。また、各流体/ソリッドは、”流体”にしておく。

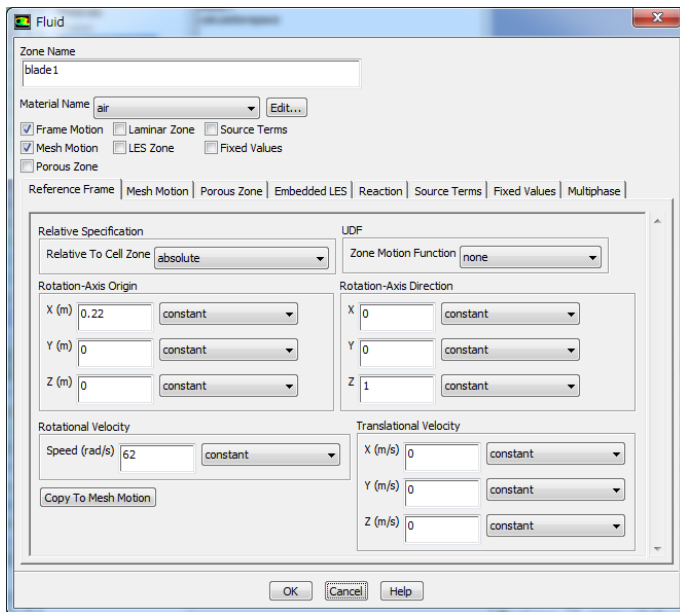


### 7.3 メッシング

プロジェクトに戻り、メッシュをダブルクリックして、Meshing を立ち上げる。上面に”inlet”，下面に”outlet”，側面に”circle”，ベースに”base”，ブレードに”blade 1”，”blade 2”，”blade 3”，”blade 4”と名前をつけておく。Sliding mesh の境界面は自動に任せる。アウトラインの接続—接触を見ると、”接触領域”，”接触領域 2”，”接触領域 3”，”接触領域 4”があるので，blade 番号に対応させ、”contact 1”，”contact 2”，”contact 3”，”contact 4”と名前をつけておく。ベース，ブレードの回りは階層 3 でインフレーションしておく。Sliding mesh の内側外側もインフレーションしておく。それ以外は，サイズコントロールで 51.2 万要素以下に制御する。なお，内部の面は，「新規断面」で切りながら選択する。

### 7.4 境界条件

プロジェクトに戻り，メッシュを「更新」し，セットアップをダブルクリックして，fluent を立ち上げる。General で”transient”，Model で”Viscus-laminar”，”k-e”，Material で”air”を選択し，Cell Zone Conditions で，「Edit」し，”Frame Motion”，”Mesh Motion”をチェックし，blade 1 は，原点(0.22, 0, 0.0)で Z 回転で 62rad/s，blade 2 は，原点(0, 0.22, 0.0)で Z 回転で -62rad/s，blade 3 は，原点(-0.22, 0, 0.0)で Z 回転で 62rad/s，blade 4 は，原点(0, -0.22, 0.0)で Z 回転で -62rad/s にする。

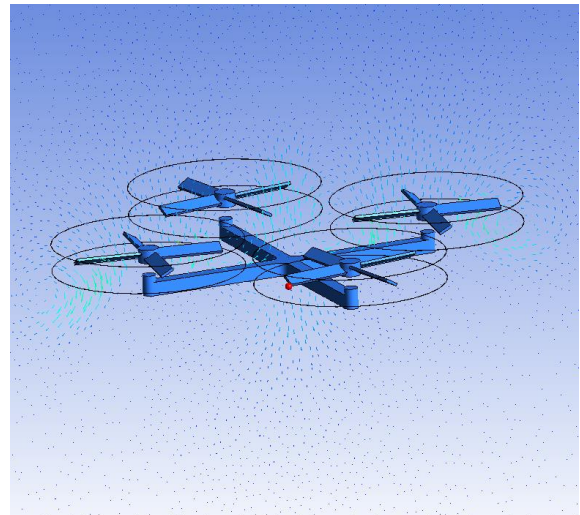
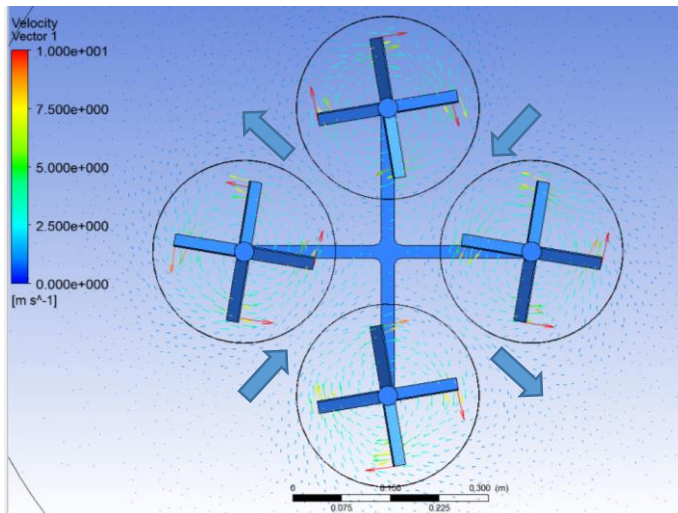


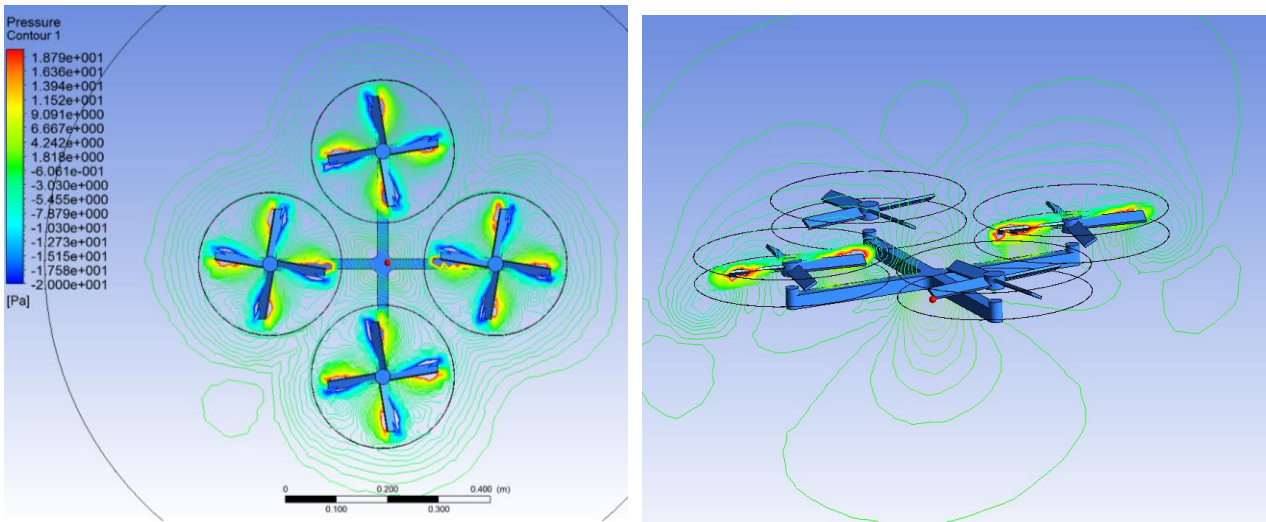
Boundary conditions は、base が”wall”で”stationary wall”，circle が”symmetry”，inlet と outlet は”pressure-outlet”で、”Radial Equilibrium Pressure Distribution”をチェックする。

Solution Initialization は、圧力、流速共に”0”で初期化する。Calculation Activities は、Autosave Every を”1”に、Run Calculation は、Time Step Size を”0.001”に、Number of Time Steps は”100”に、Max Iterations/Time Step は”50”にして「calculate」する。

### 7.5 計算結果可視化

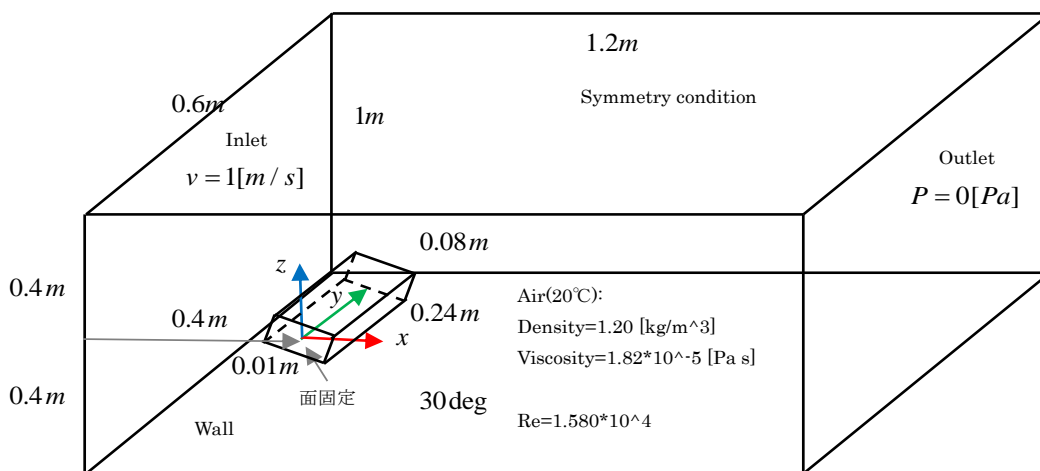
$t=0.2$  の流速分布と圧力分布 ( $z=0.06, y=0.06$ ) は以下のとおり。ブレードの側面は噴出し面と吸い込み面があることが分かる (当然ですが...).





ブレード一枚の揚力は, 0.201158 [N], 0.193667 [N], 0.189062 [N], 0.20035 [N]. ブレードとベースの位置関係によるか, 精度が粗いのかは分からず. ベースは, -0.0382421 [N]であるので, 結局, クアッドコプターとしては, 0.746N の揚力が出ていることになる.

## 8 構造流体解析 (Fluid Structure Interaction) : 翼周りの流れ場による翼の変形



翼周りの流れにより翼が変形する, 定常流体計算後に静的構造解析を行う一方向連成解析 (1 way FSI) を行う. CAD で上記のモデルを作っておく. 計算空間と翼部は部品図として作成し, アセンブリしておく.

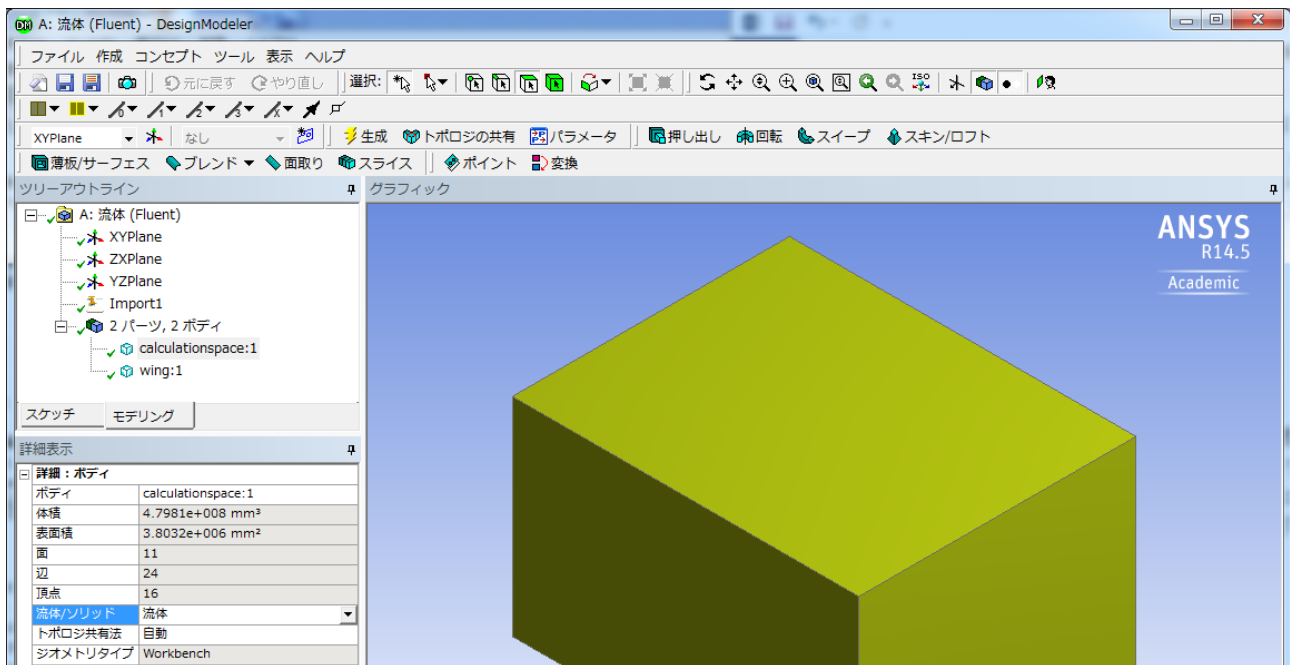
ツールボックスからプロジェクト概念図へ, 「流体(Fluent)」, 「静的構造」をドラック&ドロップする. 流体 (Fluent) の項目の「ジオメトリ?」をドラックし, 静的構造の項目の「ジオメトリ?」にドロップして結合し, 構造と流体の幾何モデルを共通にする. 次に, 流体 (Fluent) の項目の「解析実行?」をドラックし, 静的構造の項目の「セットアップ?」にドロップして結合する.



## 8.1 定常流体解析

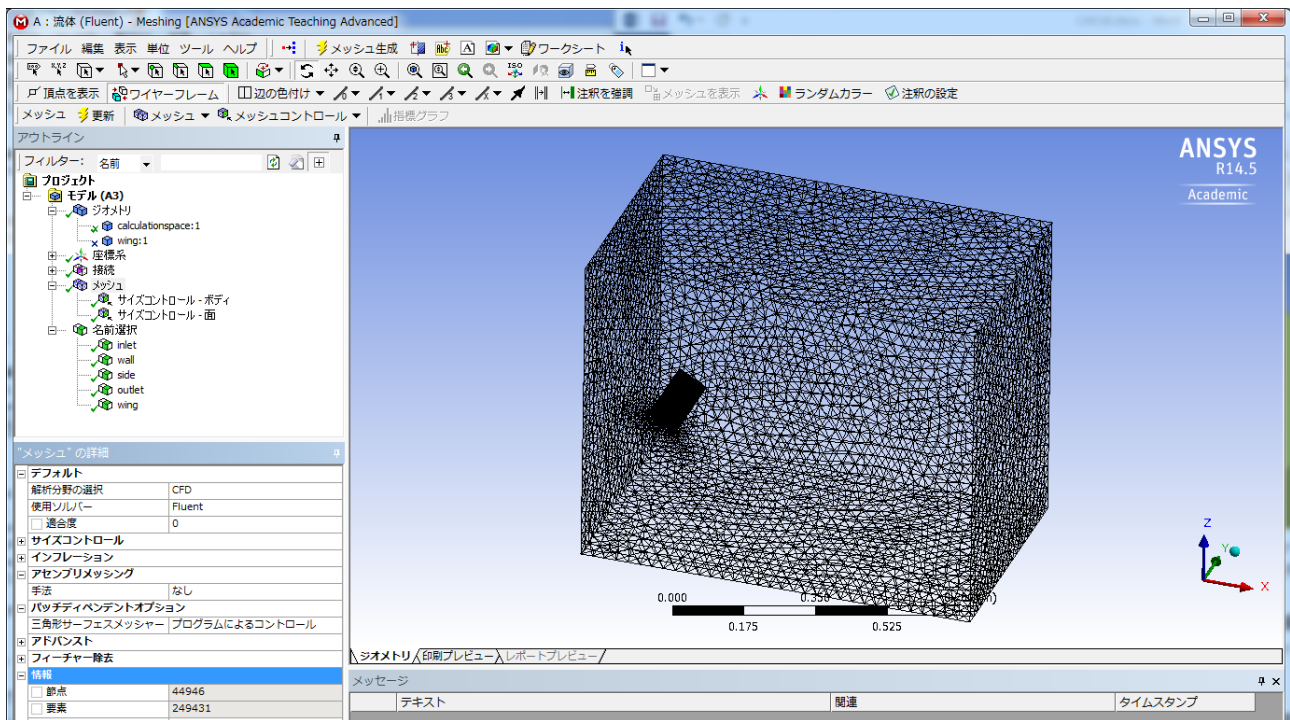
Fluent による定常解析を行う。

「ジオメトリ?」を右クリックし、予め流体計算空間と翼構造をアセンブリしておいたファイル（"Assembly1.iam"）を読み込む。「ジオメトリ?」を右クリックして「編集」を選択し、Design Modeler を立ち上げ、「ミリメートル」を選択し、メニューの「生成」をクリックする。ツリーアウトラインの 2 パーツ、2 ボディを展開し、流体計算空間（「calculationspace:1」）の「流体/ソリッド」を「流体」にしておく。



Workbench に戻り、流体 (Fluent) の項目の「メッシュ」をダブルクリックし、Meshing を立ち上げる。アウトラインのジオメトリを展開し、構造計算部分（「wing:1」）を「ボディ抑制」しておく。境界条件を設定する面に、名前をつけておく。Ex: inlet, outlet, wall, side, wing

「メッシュ」の「挿入」で「サイズコントロール」を選択し、計算空間を選択して、要素サイズは"0.03"m に設定、翼周りは要素サイズ"0.005"m に設定する。メッシュを右クリックして「メッシュ生成」する。

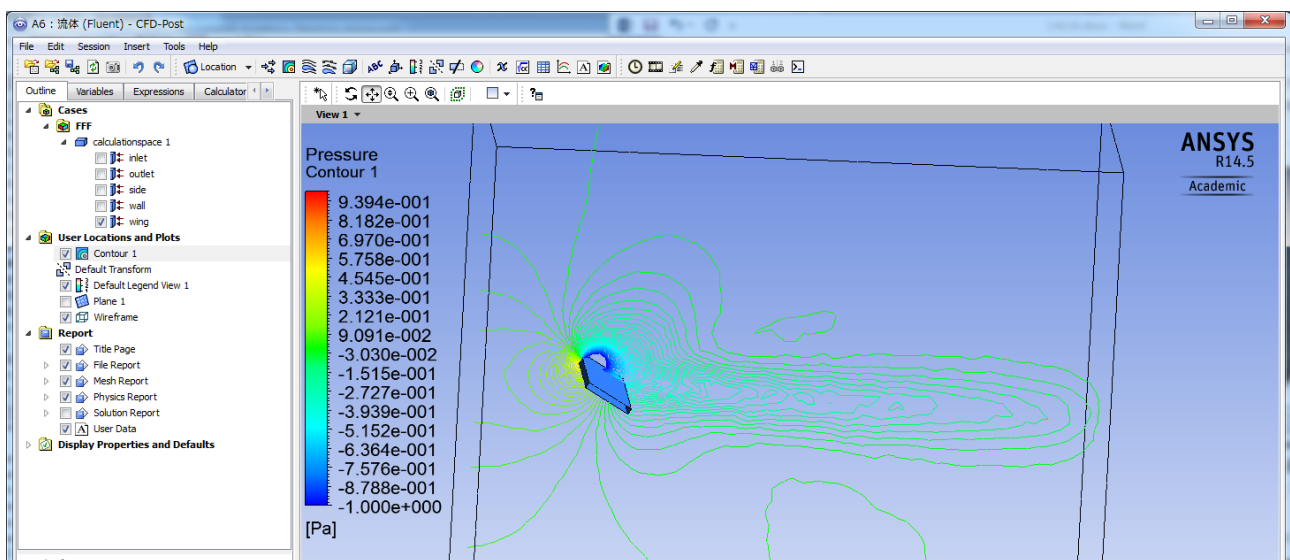


Workbenchに戻り、「セットアップ」をダブルクリックし、「Double Precision」を選択して「OK」し、Fluentを立ち上げる。Generalで定常「steady」を選択し、ModelsでViscous-Laminarを「Edit」して、「k-epsilon(2 eqn)」を選択して「OK」する。Materialsは「air」を選択する。

Boundary Conditionsは、inletを「velocity-inlet」にして「Edit」で「1」m/s, outletを「pressure-outlet」にして「Edit」で「0」Pa, sideは「symmetry」, wallは、「wall」にして「Edit」で「stationary wall」, wingも「wall」にして「Edit」で「stationary wall」にする。

Solution Initializationで「Hybrid Initialization」で「Initialize」する。Run Calculationで適当にNumber of Iterationを「100」にして「Calculate」する。

Workbenchに戻り、「解析結果」をダブルクリックしてCFD-postを立ち上げ、圧力表示すると、例えば、以下のとおり。



## 8.2 静的構造解析

Workbenchに戻り、静的構造の項目の「エンジニアリングデータ」を右クリックし、「編集」を選択する。新しい材料を登録するために、アウトライン概念図：エンジニアリングデータのA項目の\*に樹脂

材”Resin”と入力する。ツールボックスの物理特性の「密度」をドラックし、「Resin」にドロップ、線形弾性の「等方性弾性」をドラックし、「Resin」にドロップすると、右の Window に「テーブル特性行 \* : \*\*\*」が、下に「プロパティアウトライン行 \* : Resin」がオープンするので、下のプロパティの密度に”900” [kg/m<sup>3</sup>]を、ヤング率に”30,000,000” [Pa]、ポアソン比”0.4”を入力する。右の Window では温度特性などが設定できる。その後、「プロジェクトに戻る」。

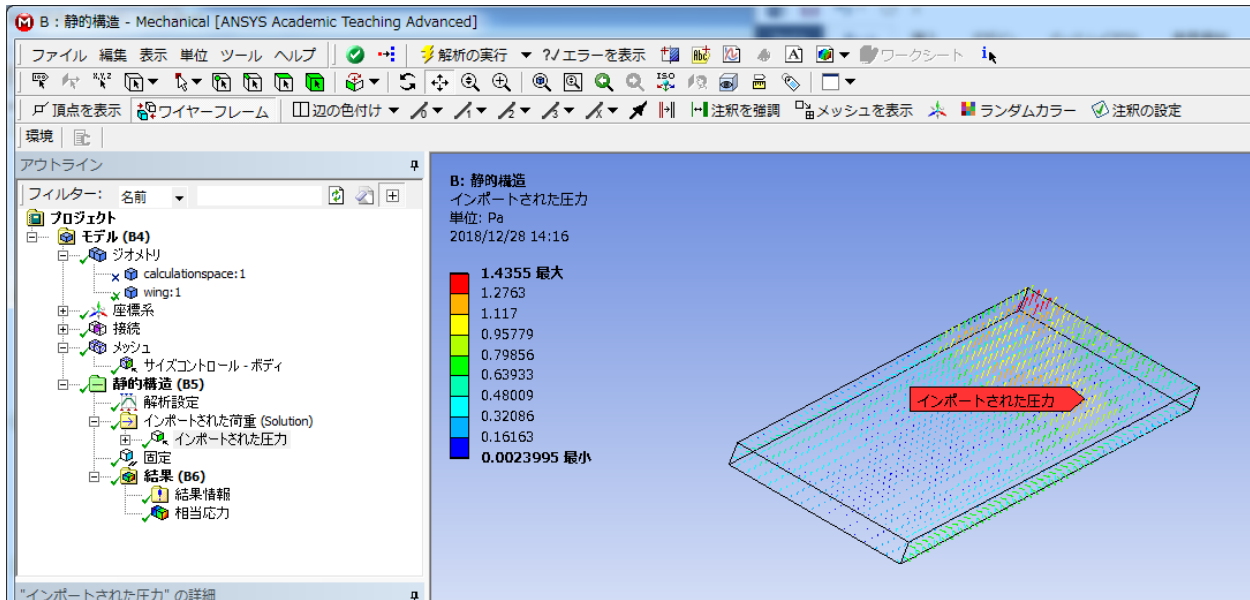
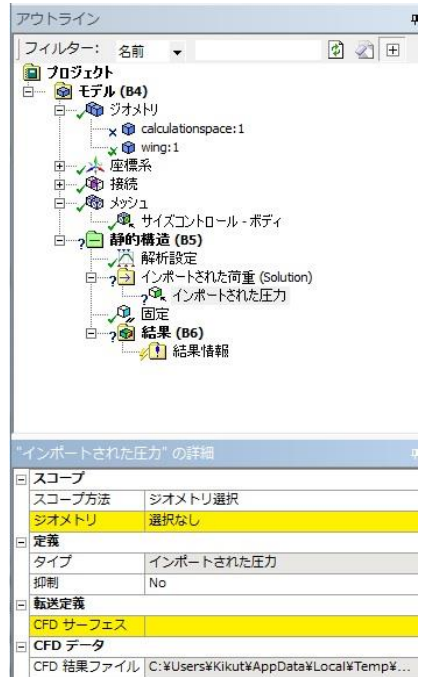
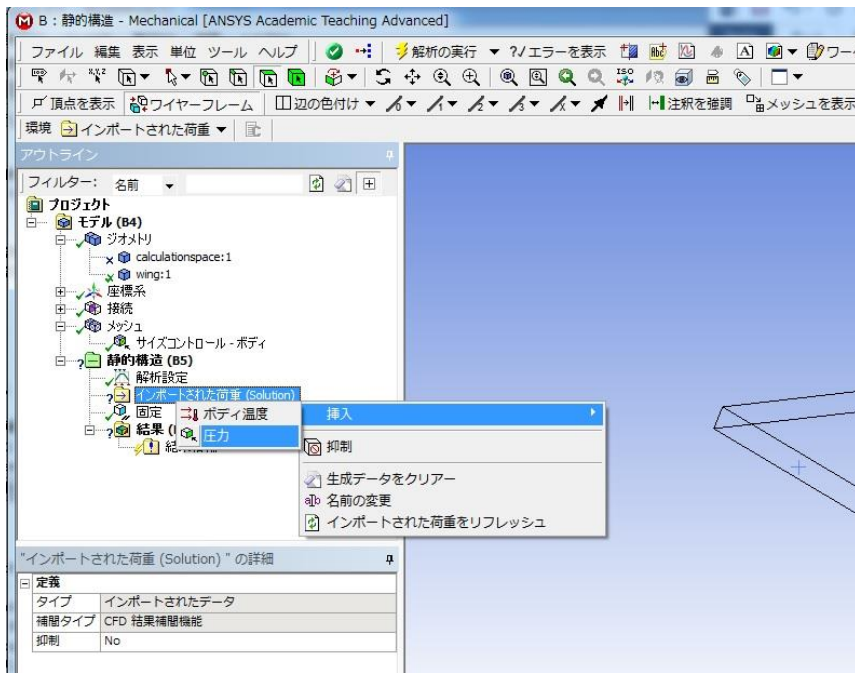
The screenshot shows the ANSYS Workbench interface. On the left is the 'Toolbox' with 'Physical Properties' expanded. The 'Outline' shows a material named 'Resin'. The 'Properties' window for 'Resin' is open, showing the following table:

特性	値	単位
密度	900	kg m <sup>-3</sup>
等方性弾性		
派生		
ヤング率	30	MPa
ポアソン比	0.4	
体積弾性率	5E+07	Pa
せん断弾性係数	1.071E+07	Pa

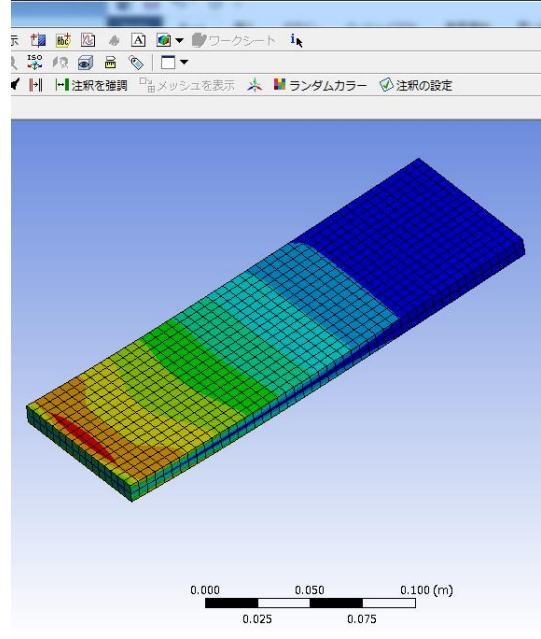
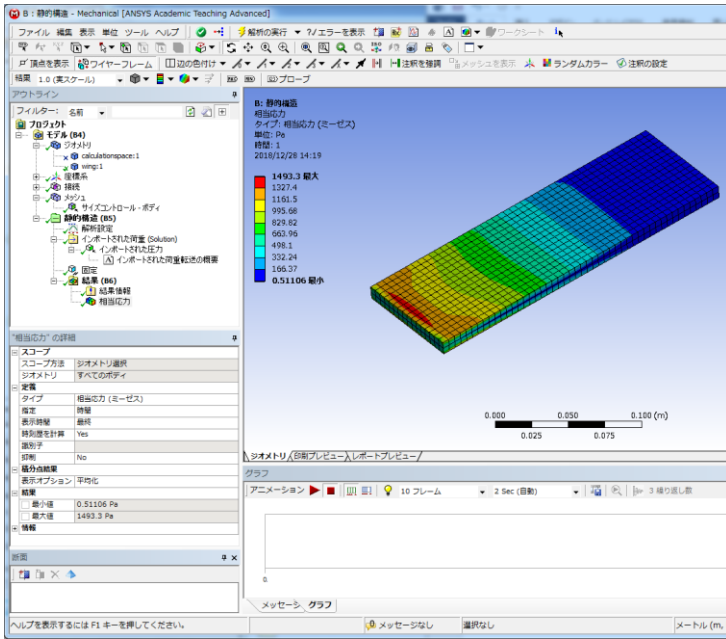
On the right, the 'Table Properties: Isotropic Elasticity' window is open, showing a table with columns for Temperature (C) and Bulk Modulus (Pa). The Bulk Modulus is set to 5E+07. Below the table is a graph titled 'Characteristic 7 Chart: Isotropic Elasticity' showing Bulk Modulus (Pa) on the y-axis (ranging from 2.5 to 7.5) versus Temperature (C) on the x-axis (ranging from -1 to 1). A red dot is plotted at (0, 5E+07).

静的構造の「モデル」をダブルクリックして、Mechanical を立ち上げる。アウトラインのジオメトリを展開し、流体計算空間は「ボディ抑制」しておく。メッシュを右クリックして「挿入」から「サイズコントロール」を選択し、翼全体を選択して要素サイズは、上記計算空間で設定した翼周りのサイズ”0.005”m にし、「メッシュ生成」する。

次に境界条件を設定する。メニューから「支持」から「固定」を選択し、ジオメトリ選択で、翼の端面を選択する。また、アウトラインの「インポートされた荷重 (solution)」を右クリックし、「挿入」を選択して、「圧力」をクリックする。「インポートされた圧力」の詳細のジオメトリで、流体との境界面を選択する。CFD サーフェイスにおいて、Fluent において定義した”wing”境界を選択する。アウトラインのインポートされた圧力を選択すると、CFD から送られた圧力分布が表示され、翼先端部が最も圧力が大きいことが示されている。



メニューの「応力」から「相当応力 (ミーゼス)」を選択しておく。メニューの「解析の実行」を行う。相当応力の結果は以下のとおり。右は変位を  $10^5$  倍にデフォルメしてある。



## 9 構造流体解析 (Fluid Structure Interaction) : 翼の振動と翼周りの流れ場の例

双方向から構造と流体の連成解析 (2 way FSI) を行う。CAD で上記のモデルを作っておく。計算空間と翼部は部品図として作成し、アセンブリしておく。

ツールボックスからプロジェクト概念図へ、「時刻歴応答構造」(Transient Structural), 「流体(Fluent)」, 「System Coupling」をドラック&ドロップする。時刻歴応答構造の項目の「ジオメトリ?」をドラックして結合し、流体 (Fluent) の項目の「ジオメトリ?」にドロップし、構造と流体の幾何モデルを共通にする。時刻歴応答構造の項目の「セットアップ?」をドラックし、System Coupling の項目の「Setup?」にドロップし、同様に、流体 (Fluent) の項目の「セットアップ?」をドラックし、System Coupling の項目の「Setup?」にドロップする。



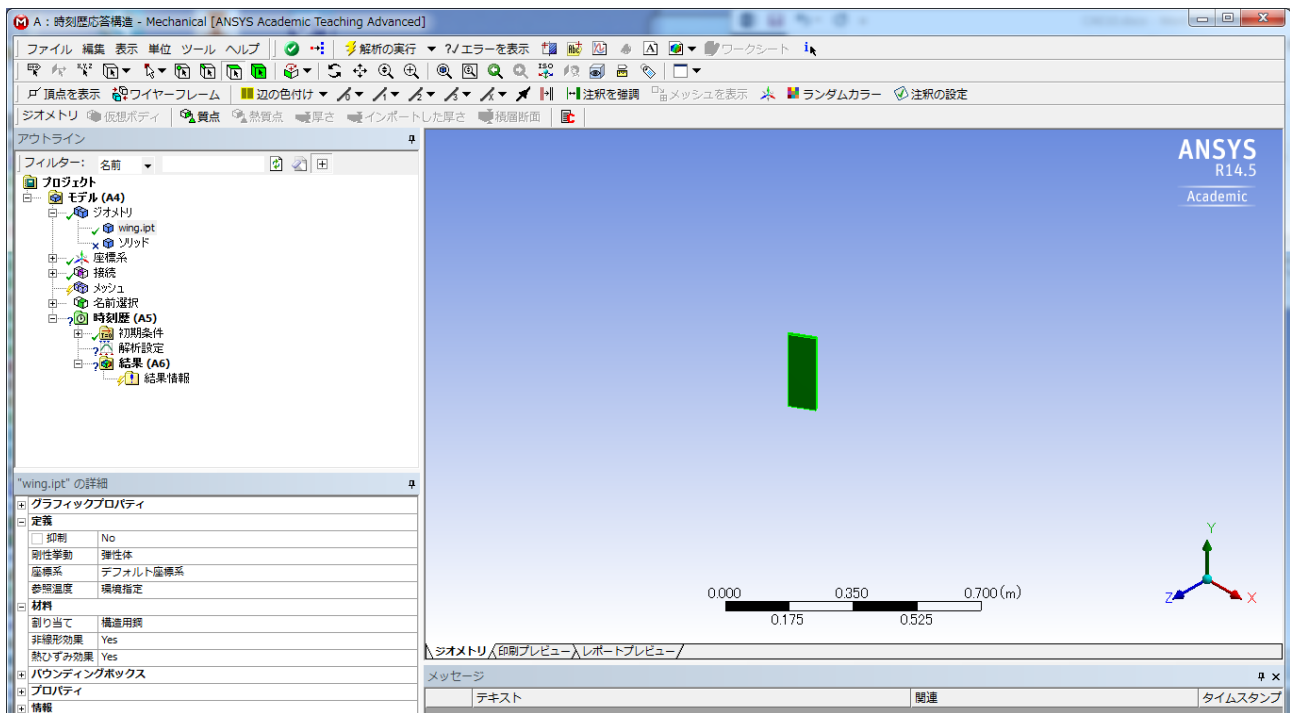
### 9.1 構造解析設定

次に、時刻歴応答構造の項目の「エンジニアリングデータ」を右クリックし、「編集」を選択する。新しい材料を登録するために、アウトライン概念図：エンジニアリングデータの A 項目の\*に樹脂材”Resin”

と入力する. ツールボックスの物理特性の「密度」をドラックし, 「Resin」にドロップ, 線形弾性の「等方性弾性」をドラックし, 「Resin」にドロップすると, 右の Window に「テーブル特性行 \*:\*\*\*」が, 下に「プロパティアウトライン行 \*:Resin」がオープンするので, 下のプロパティの密度に”900” [kg/m<sup>3</sup>] を, ヤング率に”30,000,000” [Pa], ポアソン比”0.4”を入力する. その後, 「プロジェクトに戻る」.

時刻歴応答構造の項目の「ジオメトリ?」を右クリックして「ジオメトリをインポート」を選択し, 「参照」から CAD データ (部品がアセンブリされているデータ) を選択する. ここでは, 翼構造”Assembly1.iam” を選ぶ. 「ジオメトリ」をダブルクリックして DesignModeler を立ち上げ, サイズは”mm”を選択し, 「生成」する. ツリーアウトラインの 2 パーツ, 2 ボディの”+”をクリックして展開し, 詳細表示で計算空間”calculationspace:1”の詳細表示の流体/ソリッドを”流体”にしておく. CAD のデータは自動的に”ソリッド”になっている. ”calculationspace:1”は, 名前を”space”に, ”wing:1”は”wing”に変更しておく. プロジェクトに戻り, 時刻歴応答構造の項目の「モデル」をダブルクリックすると, Mechanical がオープンするので, アウトラインのジオメトリを展開して「space」を右クリックし, 「ボディ抑制」を選択し, 非表示にしておく. ボディ抑制により, メッシングなどの計算対象にならなくなる. 削除した訳ではない. 抑制部は流体計算において利用する.

アウトラインのジオメトリの「wing」をクリックする. 左下の”wing”の詳細の, 剛性挙動は, ”弾性体”を選択し, 材料の割り当てでは樹脂材として”Resin”を選択する.



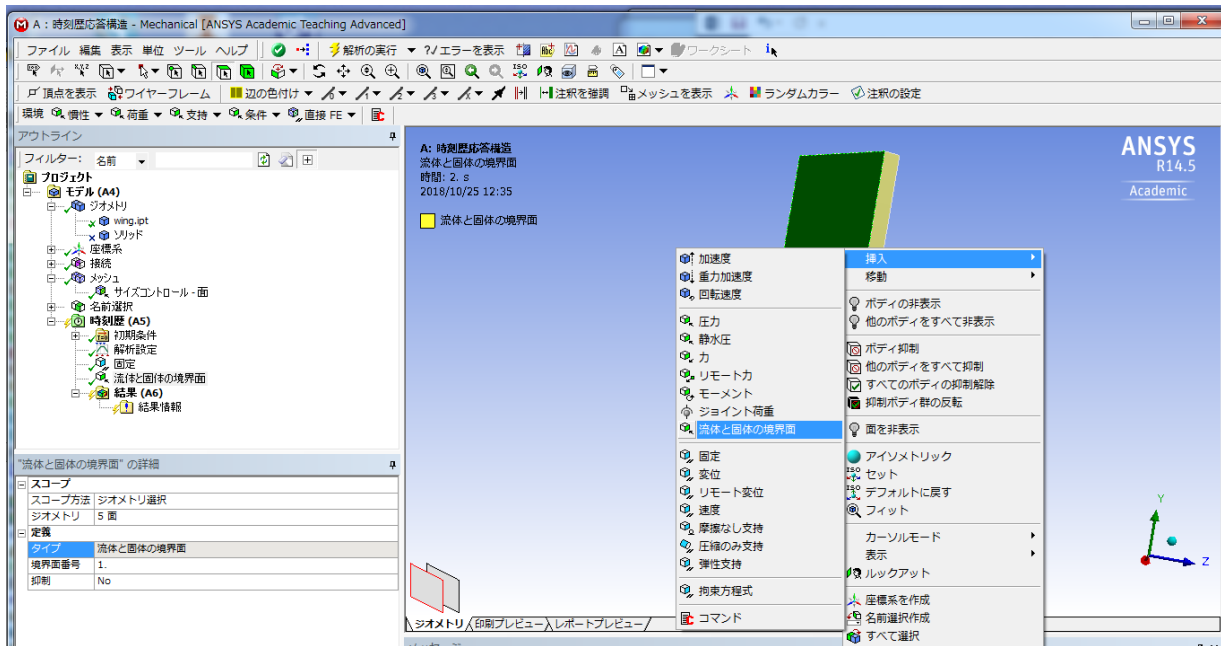
アウトラインの「メッシュ」を右クリックして「挿入」で「サイズコントロール」を挿入する. モデルのボディを選択して「適用」し, 要素サイズを”0.005”m に設定する. 「メッシュ」を右クリックして「メッシュ生成」する. アウトラインの「解析設定」をクリックする. 左下の解析設定の詳細 Window で, ステップの終了時間を”2”s にし, 自動時間ステップを”OFF”にし, 時間ステップを”0.01”[s] に設定する.

#### 拘束条件の設定:

メニューの「支持」をクリックし, プルダウンメニューから「固定」を選択し, 画面のモデルの翼の根本の面を選択し, 左の”固定”の詳細のジオメトリを「適用」する.

画面においてモデルの固定面以外の面を全て選択 (「ctl」を使う) し, 右クリックでメニューから「挿入」を選択し, プルダウンメニューから「流体と固体の境界面」を選択する (メニューの「荷重」から「流体と固体の境界面」を選択してもよい).

アウトラインの「名前選択」の「開放領域」の意味が分からず.



プロジェクトに戻り、時刻歴応答構造の項目の「セットアップ」を右クリックし、「更新」する。

## 9.2 流体解析設定

プロジェクト概念図の流体 (Fluent) の項目の「メッシュ」をダブルクリックし、Meshing を立ち上げる。アウトラインの「ジオメトリ」を展開し、翼モデル「wing」を「ボディ抑制」する。

次に、上記同様、モデルの各面に名前をつけておく。流入面に「Inlet」、圧力が 0 の流出面に「Outlet」、翼が取り付けられている壁面に「Wall」、その他の面に「side」、翼部分は「DeformableWing」としておく。

「メッシュ」を右クリックし、「挿入」で「サイズコントロール」を選択し、ジオメトリで計算空間を選択し、要素サイズを「0.021」m に設定する (51.2 万要素の上限を超えないようにした)。「メッシュ」の「挿入」の「インフレーション」のジオメトリで計算空間を選択し、名前選択を使って翼周り「deformablewing」を選択する。「メッシュ」を右クリックし、「メッシュ生成」する。

プロジェクトに戻り、「メッシュ」を「更新」し、「セットアップ」をダブルクリックすると、Fluent が立ち上がるので、Options で「Double Precision」を選択して「OK」する。

General の画面で非定常 (過渡応答)「Transient」を選択する。

Models の画面で粘性層流「Viscous - Laminar」を選択する。「Edit」をクリックし、乱流モデル「k-epsilon(2 eqn)」を選択し「OK」する。

Materials の画面で「air」を選択する。

### 境界条件入力：

メニューの Boundary Conditions の Zone の「inlet」を選択し、「Velocity-inlet」を選択し、「Edit」をクリックして、Velocity Specification Method で「Components」を選択し、X-Velocity(m/s)に「1」m/s、Y-Velocity(m/s)に「0」m/s、Z-Velocity(m/s)に「0」m/s を入力して「OK」する。Zone の「Outlet」を選択して、「pressure-outlet」を選択し、「Edit」をクリックして、Gauge Pressure に「0」Pa を入力して「OK」する。Zone の「Wall」を選択して「Wall」をクリックし、「YES」し、「OK」する。Zone の「Side」を選択して面対称条件「symmetry」をクリックし、「YES」し、「OK」する。Zone の「DeformableWing」をクリックして Type に「wall」を選択し、Edit で「No Slip」を選択する。DeformableWing はこのあと、System Coupling で構造計算の翼と結合する。境界条件で、Type に「Wall」を選択した Zone のみが、System coupling で選択できるようになる。

メニューの Dynamic Mesh を画面で「Dynamic mesh」をチェックし、「Settings」をクリックすると Mesh Method Settings Window がオープンするので、Method で「Diffusion」を選択し、Diffusion Parameter に「2」を

入力して「OK」する。次に、Dynamic Mesh の「Create/Edit」をクリックし、Dynamic Mesh Zone Window で Zone Name の「DeformingWing」を選択し、Type の「System Coupling」を選択し、「Create」をクリックし、「Close」すると、Dynamic Mesh Zones に「deformablewing-System Coupling」が表示される。

Reference Values の Computer from で「inlet」を選択する。Reference Zone で「space」を選択する。

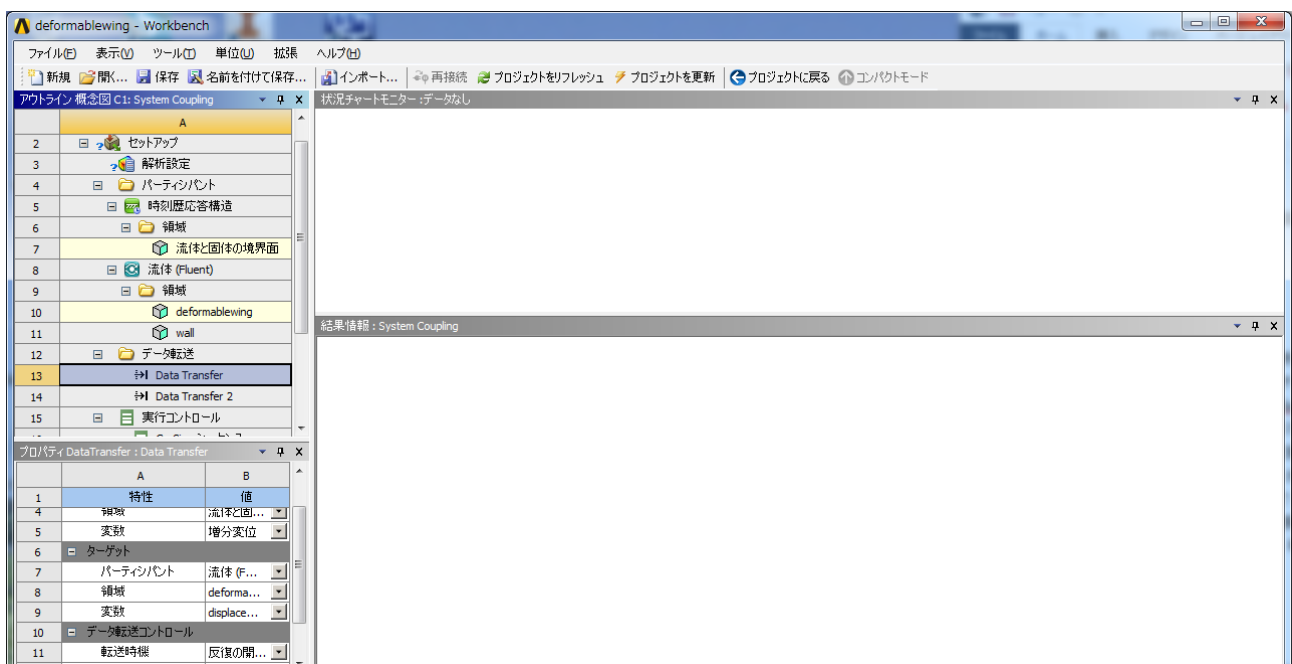
Solution Initialization の Initialization Methods で「Hybrid Initialization」を選択し、「Initialize」する。

Calculation Activities で Autosave Every を「1」にする。

Run Calculation で Time Step Size(s)を「0.01」に、Number of Time Steps を「200」に、Max Iteration/Time Step を「20」に設定する。構造計算が 0.01s 毎で、2 秒間なので、交互に計算させるためにこのように設定する。

### 9.3 連成解析実行

プロジェクトに戻り、プロジェクトを更新し、Coupling System において「Setup」をダブルクリックする。



アウトライン概念図の「解析設定」を選択し、解析タイプは「時刻歴」(Transient)を選択し、終了時間に「2」sを入力し、ステップサイズに「0.01」sを入力し、最小反復に「1」、最大反復に「20」を入力する。

アウトライン概念図の「DeformableWing」と「流体と固体の境界面」を選択し、右クリックで「データ転送を作成」を選択する。作成された Data Transfer を見ると、時刻歴応答構造から変数として「増分変位」が送られ、流体 (Fluent) が変数として変位「displacement」を受取っているのが分かる。また、Data Transfer 2 を見ると、流体 (Fluent) から変数として力「force」(圧力と面積の積)が送られ、時刻歴応答構造が変数として「力」を受取っているのが分かる。「リスタート中間データの出力」は、出力周期を「ステップ間隔ごとに」、ステップ間隔を「1」にしておく。

ここで、「プロジェクトに戻る」で Workbench に戻り、「プロジェクトを更新」し、System Coupling の「解析」を右クリックし、「更新」を実行すると、計算が開始される (System coupling 内で解析を右クリックし「更新」することでも実行できる)。どうやら、学生版では連成問題は利用できないようになっているようだ。License error がでる。

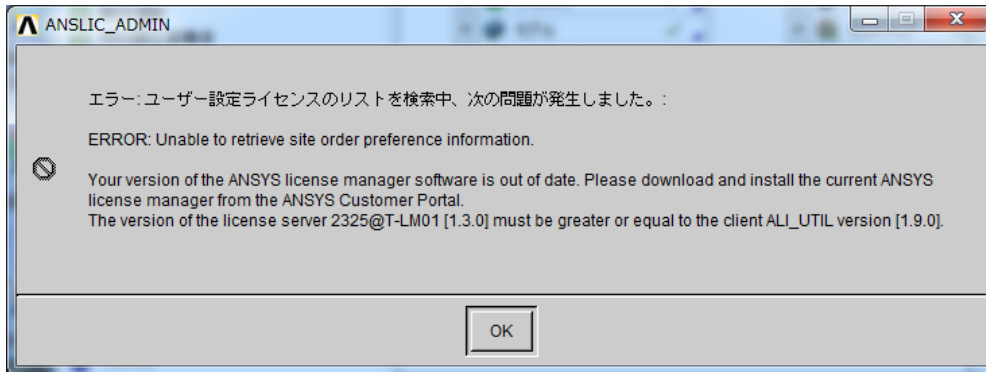
#### Errors:

- ・ 入力ファイルを書き込むのに共有ライセンスは利用できません。
- ・ A solver failure occurred during the run in the 時刻歴応答構造 system.
- ・ System coupling run completed with errors. System Coupling Service reported: System coupling run aborted

by user: A solver failure occurred during the run in the 時刻歴応答構造 system. Please do not save the project if you would like to recover to the last saved state.

・ システム 時刻歴応答構造 におけるセル 解析 の更新エラーです。

ツールのライセンス設定を見ると、以下のとおり。大学のライセンスサーバーが古すぎるようだ。Web 上では、ライセンスサーバーを通さない学生版は連成解析が出来るとのこと。



#### 9.4 解析結果の可視化

流体 (Fluent) のコンポーネントの解析結果をダブルクリックすると、

### 10 構造流体解析 (Fluid Structure Interaction) : 翼の振動と翼周りの流れ場の例

前章の Fluent による FSI が出来ないので、CFX でも挑戦。

が、そもそも system coupling で、CFX を結合できず...

CFX 側の連成境界面も設定できず...

## その他もろもろ

.reversed flow: inlet や outlet の境界条件なのに流れが逆流する warning. 少ない or 無い方がいい. Backflow の設定で何とかなる場合も.