

CFD 基礎課題

株式会社 日本アムスコ
名古屋 CAE 技術室

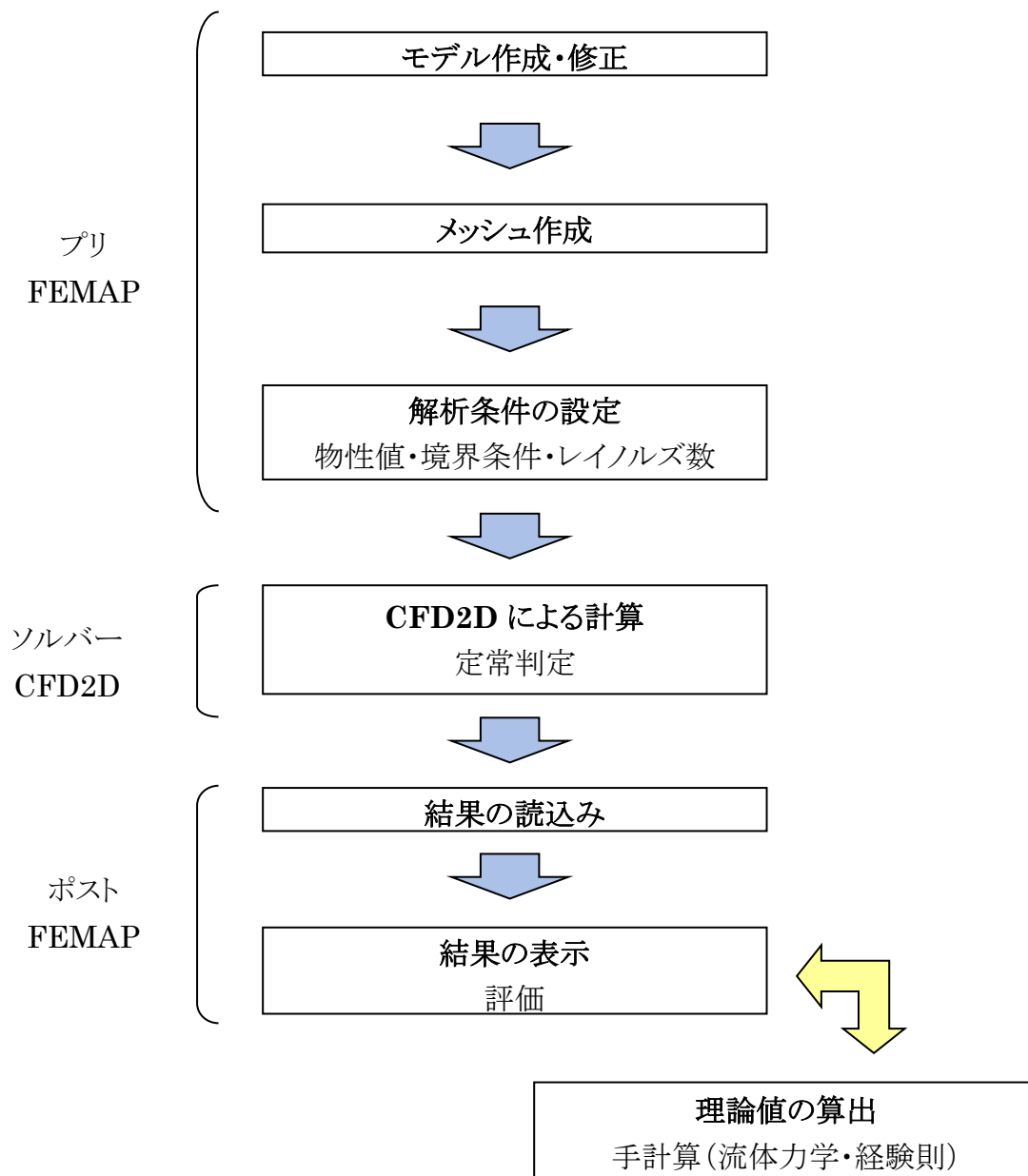


目次

1. CFD 基礎課題の流れ.....	2
2. 課題.....	3
■課題 1 連続式の確認.....	3
メッシュの作成.....	3
境界条件の設定.....	9
ABAQUS への書出し (FEMAP)	11
定常と非定常	13
レイノルズ数.....	14
ABAQUS インプットファイルへの追加入力	15
計算実行.....	16
計算状況の確認.....	18
結果の読み込みと表示	20
連続の式の確認.....	30
■課題 2 平板上の 2 次元流れ.....	31
結果の読み込みと表示	32
手計算との比較 (流体力学)	37
■課題 3 物性値比較	41
結果比較.....	42
■課題 4 メッシュサイズ比較.....	45
結果比較.....	46
■課題 5 クエット流れ(境界条件変更).....	48
結果比較.....	49
■演習問題 2 次元ポアズイユ流れ.....	51

1. CFD 基礎課題の流れ

CFD とは Computational Fluid Dynamics の略で、数値流体力学と訳します。
CFD 基礎課題は FEMAP および 2 次元非圧縮性粘性流体解析プログラム[以下 CFD2D]を使用し、以下の工程に沿って各課題を実施します。



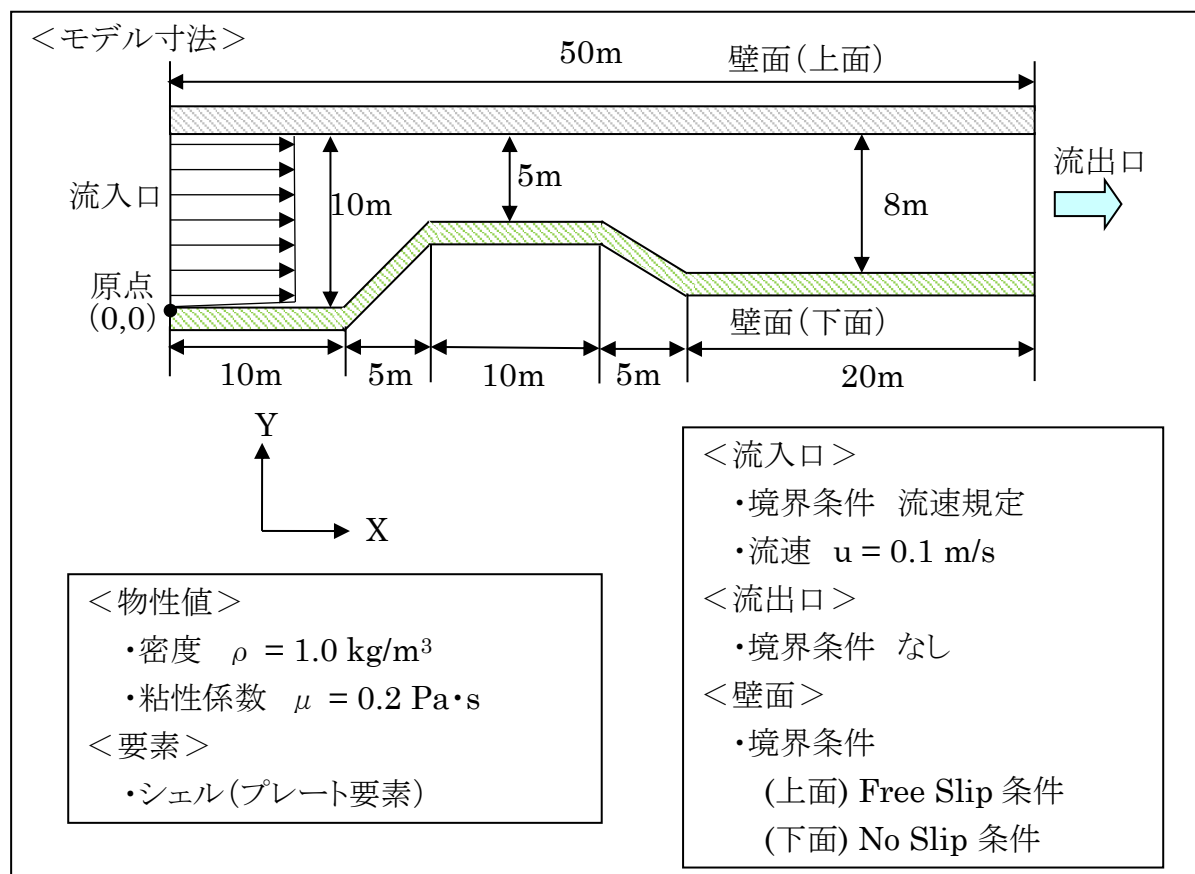
CFD により求めた解を手計算で求めた値と比較し、結果の妥当性を判断します。

2. 課題

■課題 1 連続式の確認

それでは CFD を実際に行っていきましょう。

下記のモデルに対し、条件を定義して解析を行います。

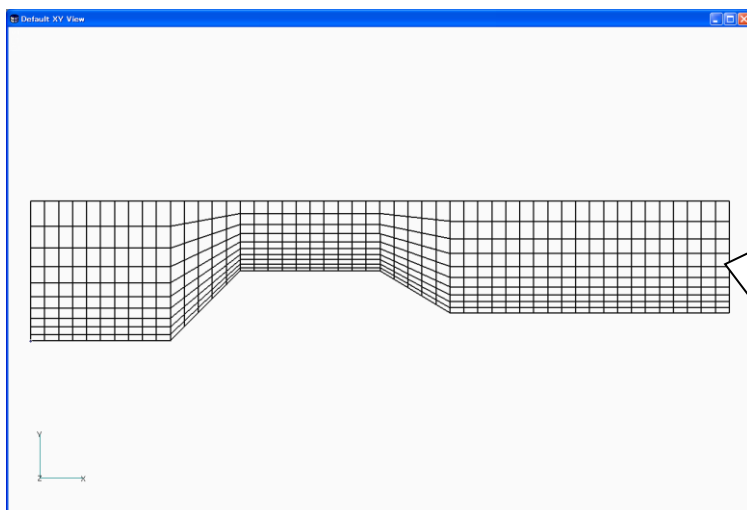


メッシュの作成

CFD2D プログラムでは、解析領域を三角形要素に分割して解析を行います。

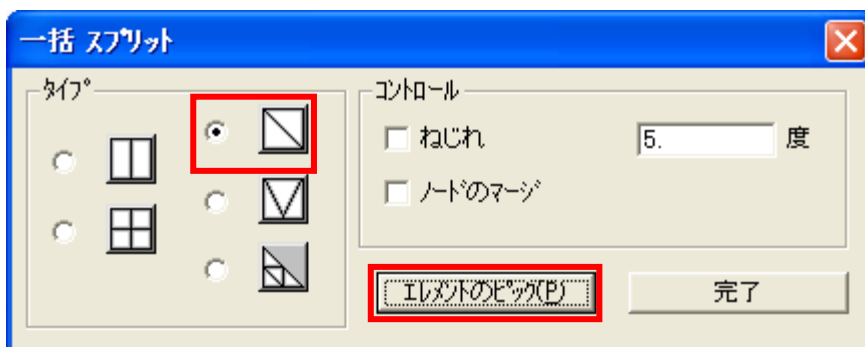
この課題においては X 方向、Y 方向における流速分布および圧力分布を見るので、まず X 方向、Y 方向に平行な四角形要素を作成し、それをスプリットして三角形要素にするという方法でメッシュを作成します。

※今回 FEMAP でマテリアルを作成する際には物性値は入力しません。密度や粘性係数は、後ほどインプットファイルに直接書き込みます(全て 0 のまま作成してください)。また、プロパティ作成においても、プレート要素を使用していますが、ヤング率等今回の解析と関係の無い物性値や板厚などを入力しても、プログラムに反映されることはありません。



下面の壁面抵抗の影響を詳しく見るため、
 上面 (Free Slip 条件) よりメッシュサイズを細かくします。
 [メッシュコントロール]—[カーブ上のサイズ]で、
 等比バイアスを選択します。
 (バイアスファクタに 4 を入力)

[メッシュ]—[スプリット]—[一括]を選択します。

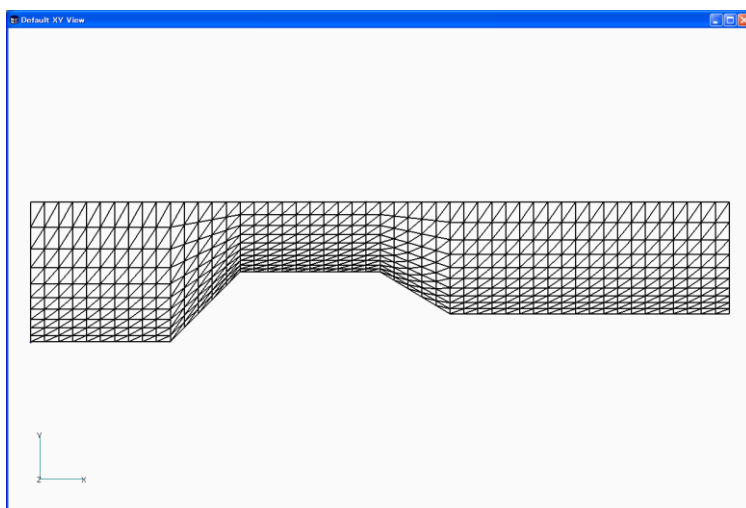


ダイアログボックスでタイプを選択し、[エレメントのピック]を押します。

エンティティ選択画面で[全選択]を選び、[OK]を押します。

[完了]を押します。

(※「一括」を指定すると、要素の法線方向によってスプリットの向きが自動的に決められてしまいます。向きを合わせる場合は要素の向きを修正してください。ただし、最終的にはすべての要素の向きを+Z 方向にそろえておく必要があります。)

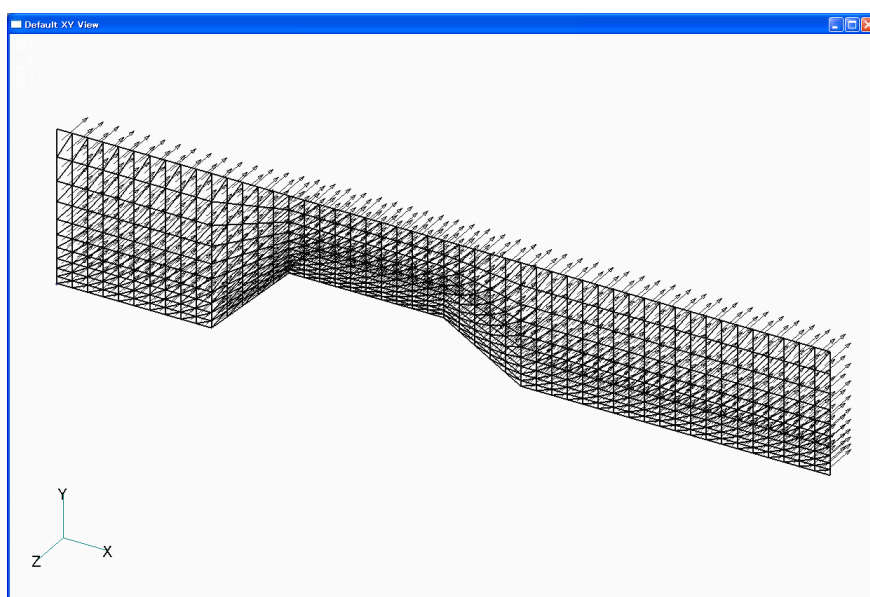
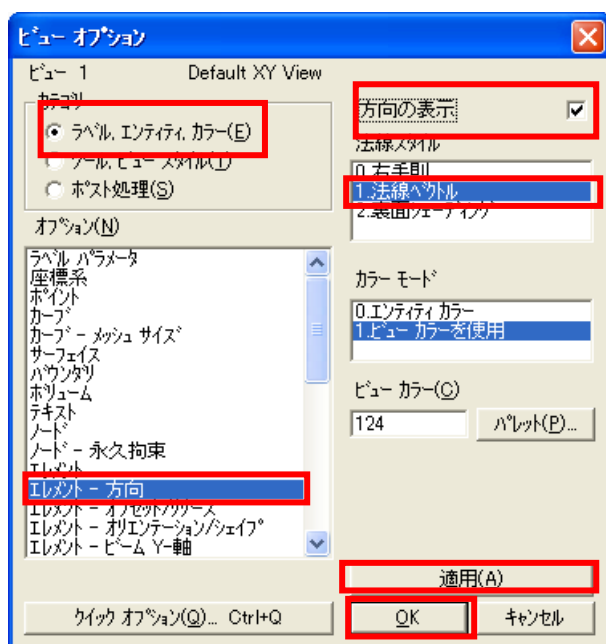


要素の向き修正

まず、要素の向きを確認します。

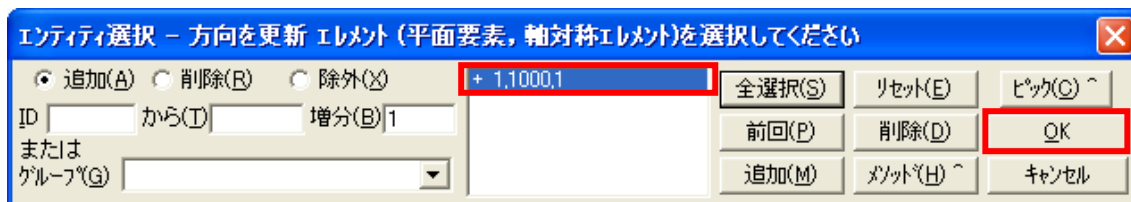
「ビューオプション(F6)」を開き、「ラベル、エンティティ、カラー」から「エレメント方向」を選びます。

方向の表示チェックボックスにチェックを入れ、スタイルから「法線ベクトル」を選択し、「適用」、「OK」を押します。

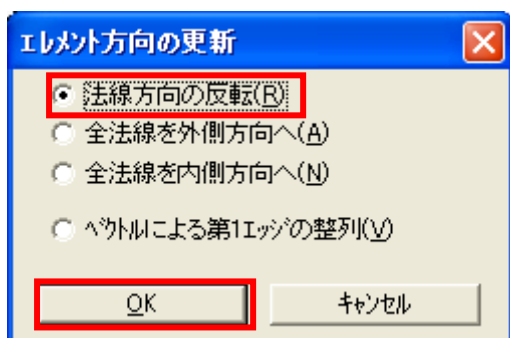


上図の状態では要素が $-Z$ 方向を向いているので、要素の向きを修正します。

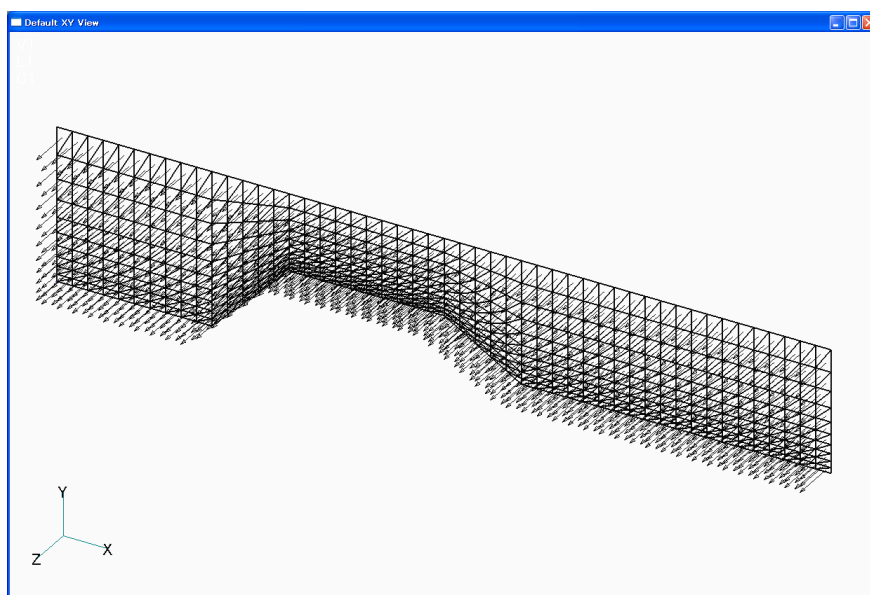
メニューから「修正」-「エレメントの更新」-「リバーズ」を選択します。
 エンティティ選択ダイアログボックスが現れるので、向きを修正したい要素を選択し
 「OK」を押します。



エレメント方向の更新ダイアログボックスが現れるので、法線方向の反転を選択して
 「OK」を押します。



画面をダブルクリックして再表示させると、法線方向が修正されています。



要素の向きが+Z 方向に全てそろっていれば修正は完了です。

リナンバ

モデル作成過程で作成したノードや要素には、全て自動的に ID が割り振られています。これらの ID は途中でノードや要素の削除などを行うと、欠番となります。また、モデルの作成手順によっても ID の与えられ方が変わってくるため、通常モデルの作成が終了した時点で、解析やポスト処理に都合が良いように ID を与え直します。これをリナンバと言います。

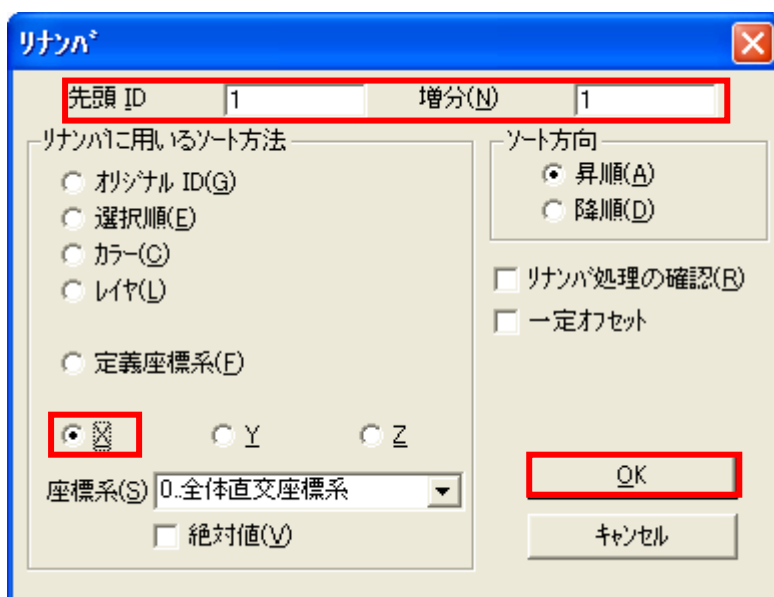
今回は要素 ID が連番になっていないとプログラムが正常に要素を認識することができないためリナンバを行います。

メニューから「修正」-「リナンバ」-「ノード」を選択します。

エンティティ選択ダイアログボックスで「全選択」を選び「OK」を押します。



リナンバダイアログボックスが現れるので先頭 ID、増分が「1」になっていることを確認し、リナンバに用いるソート方法を選択します。ソート方法は任意ですが、ここでは X 座標を選択します。



選択後「OK」を押すとノードのリナンバは完了です。

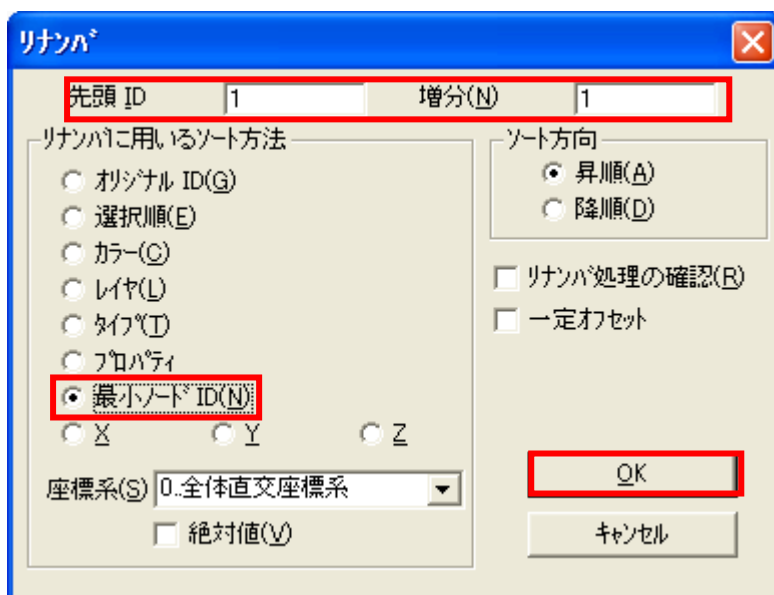
同様に要素 ID のリナンバを行います。

メニューから「修正」-「リナンバ」-「エレメント」を選択します。

エンティティ選択ダイアログボックスで「全選択」を選び「OK」を押します。



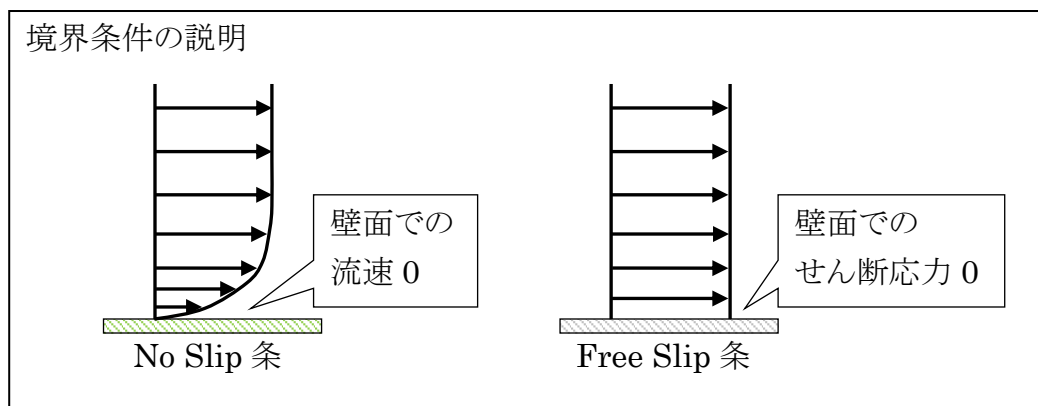
リナンバダイアログボックスが現れるので、先頭 ID、増分が「1」になっていることを確認し、リナンバに用いるソート方法を選択します。ソート方法は任意ですが、ここでは「最小ノード ID」を選択します。



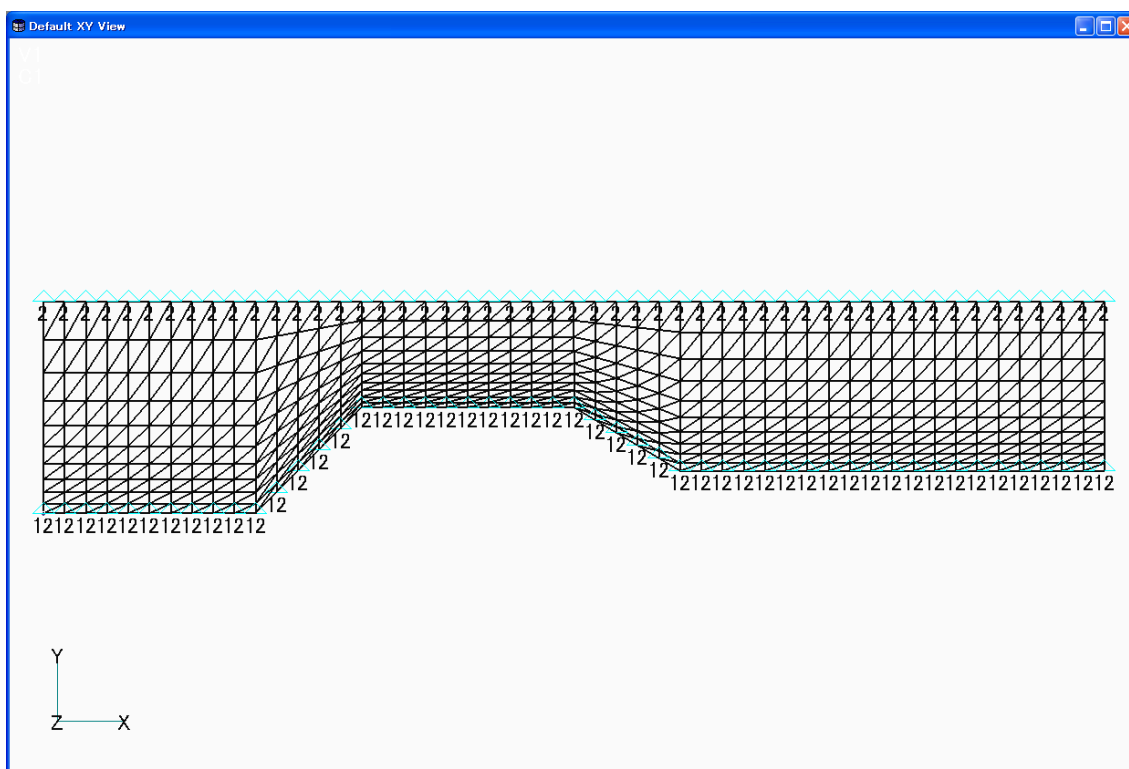
選択後「OK」を押すとリナンバ完了です。

境界条件の設定

壁面

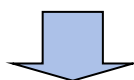
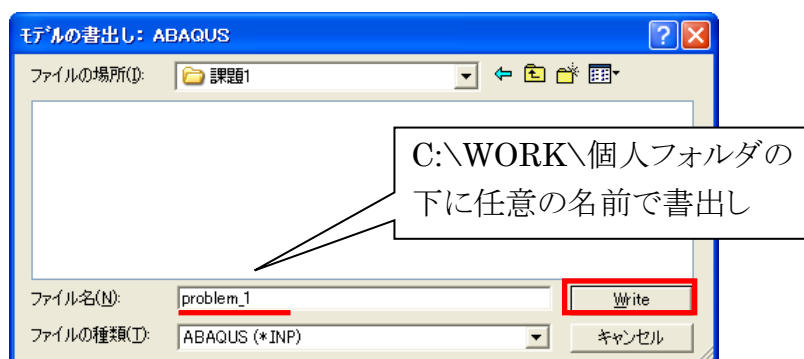
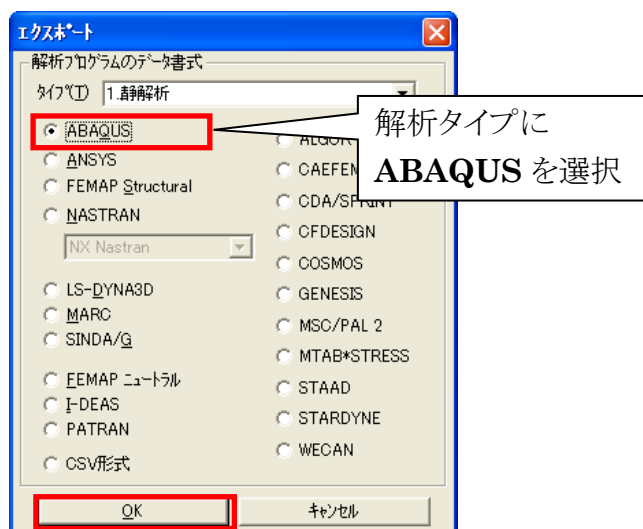
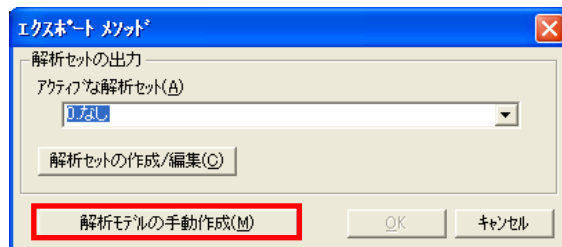


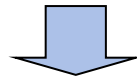
モデル上面のノードには Y 方向の並進自由度の拘束、下面のノードには X 方向および Y 方向の並進自由度の拘束条件を設定することで境界条件とします。



ABAQUS への書出し(FEMAP)

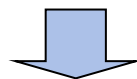
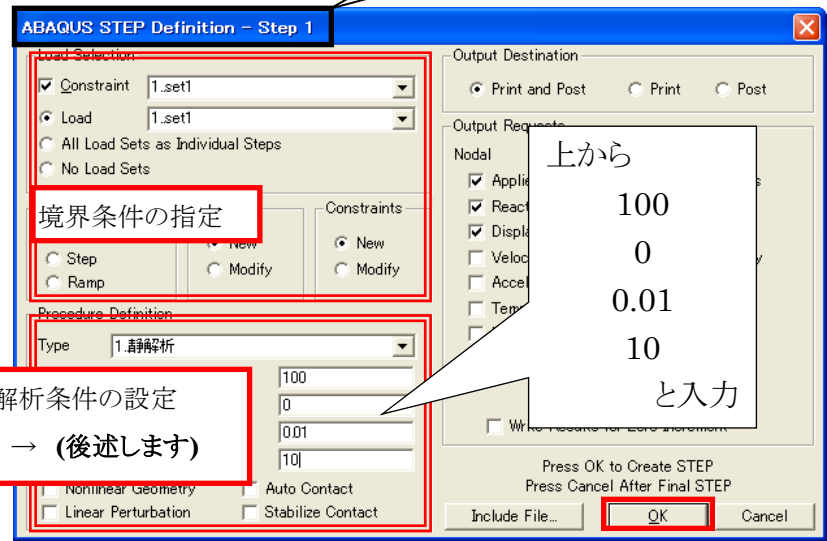
メニューより、「ファイル→エクスポート→解析モデル」を選択。



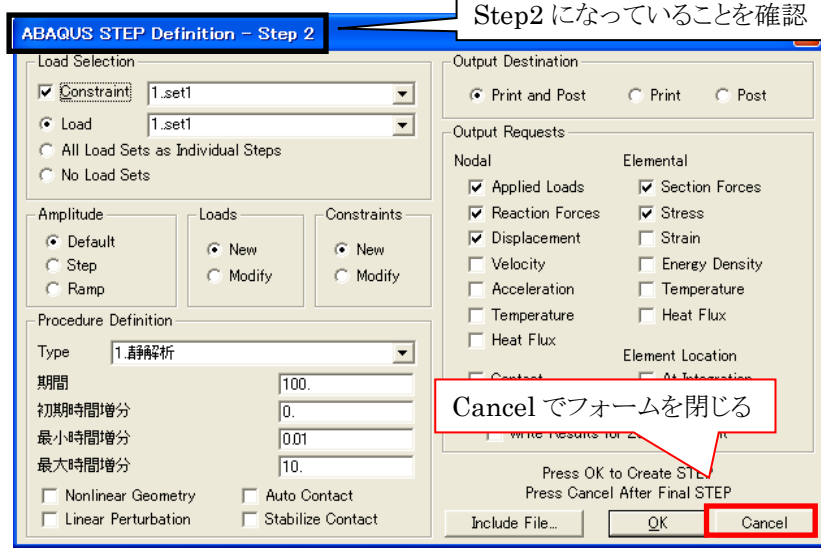


Step1 になっていることを確認

※本課題で用いるプログラム CFD2D は、ABAQUS のインプットファイルを使用していますが、実際ソルバーに ABAQUS を用いるわけではありません。従って、後述するように、入力欄と実際に入力する値は必ずしも同じ意味を持つものではありません。



Step2 になっていることを確認



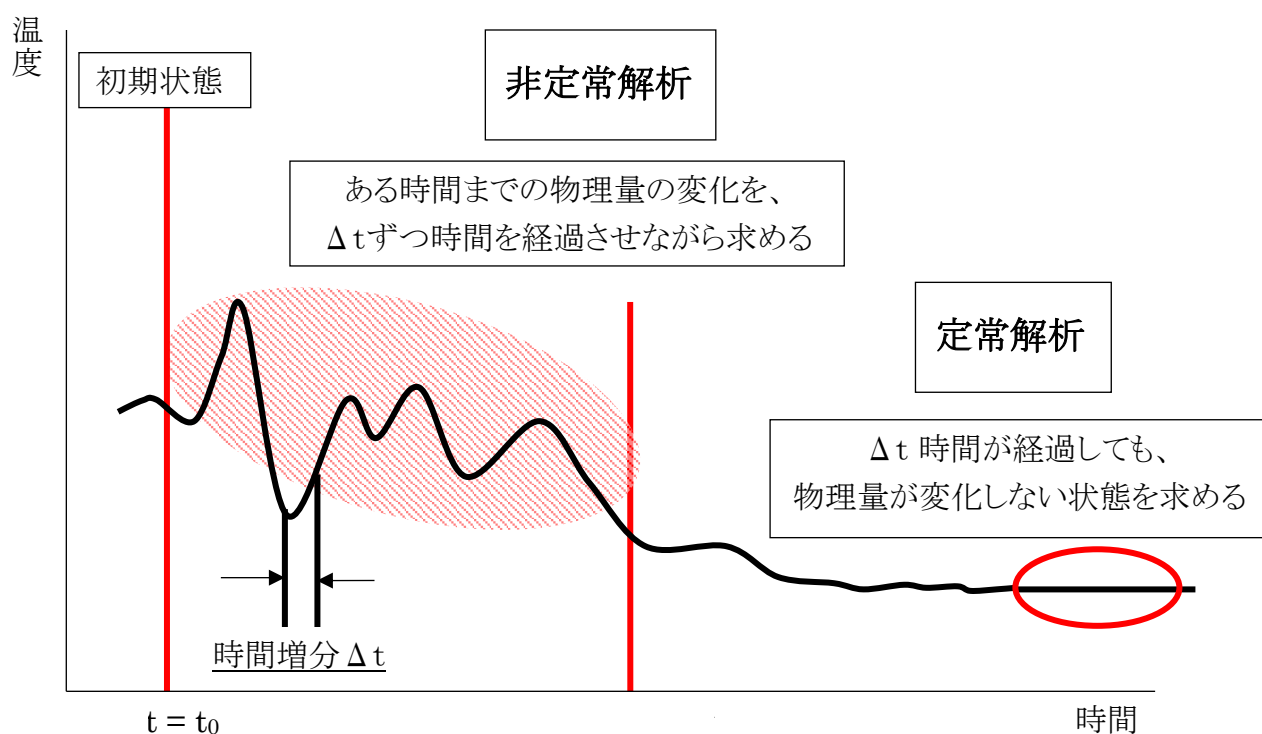
C:\WORK\個人フォルダの下に指定した INP ファイルが作られます。

定常と非定常

川の水の流れや、煙草の煙が室内へ広がるというように、CFD で扱う現象には時間の経過と結びついたものがほとんどです。

たとえばエアコンで室内を冷やす場合を考えます。

初期状態から、室内のあるポイントの、1時間後の温度を予測するのは難しいですが、1秒後であれば、ある程度予測ができるかもしれません。



そのように十分に小さい時間増分 Δt ずつ時間を変化させて、物理量の変化をみる解析を非定常解析といいます。

一方、エアコンの冷気が部屋中に十分行き渡ると、時間が経過しても温度がほとんど変化せず、平衡状態になると考えられます。

そのように、時間が変化しても物理量が変わらなくなった状態を定常と言い、その状態を求める解析を定常解析といいます。

※解析条件の設定欄での入力についての補足

- 「期間」欄に入力した値 …………… 終了時間(上図 T)
- 「初期時間増分」 …………… 開始時間(上図 t_0 、通常は 0 を入力)
- 「最少時間増分」 …………… 時間増分(上図 Δt)
- 「最大時間増分」 …………… 結果ファイルへの出力間隔時間

レイノルズ数

CFD2D プログラムでは、計算にレイノルズ数を用いています。

レイノルズ数は流れの性質を示す無次元数で、次のように定義されます。

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

レイノルズ数 Re の大きさによって、一般的に次のように言われています。

$Re < 2000 \Rightarrow$ 層流

$Re > 2000 \Rightarrow$ 乱流

層流と乱流では流れの特徴は大きく異なります。

このことは、レイノルズ数が十分に小さい場合には、乱流の流れの特徴が無視できるほど小さいからである、と考えることもできます。

各記号の意味は以下のとおりです。

ρ : 密度
 μ : 粘性係数 (または粘度)
 ν : 動粘性係数 (または動粘度)
 U : 代表流速
 L : 代表長さ

ABAQUS インプットファイルへの追加入力

書出したインプットファイルは以下のように構成されます。

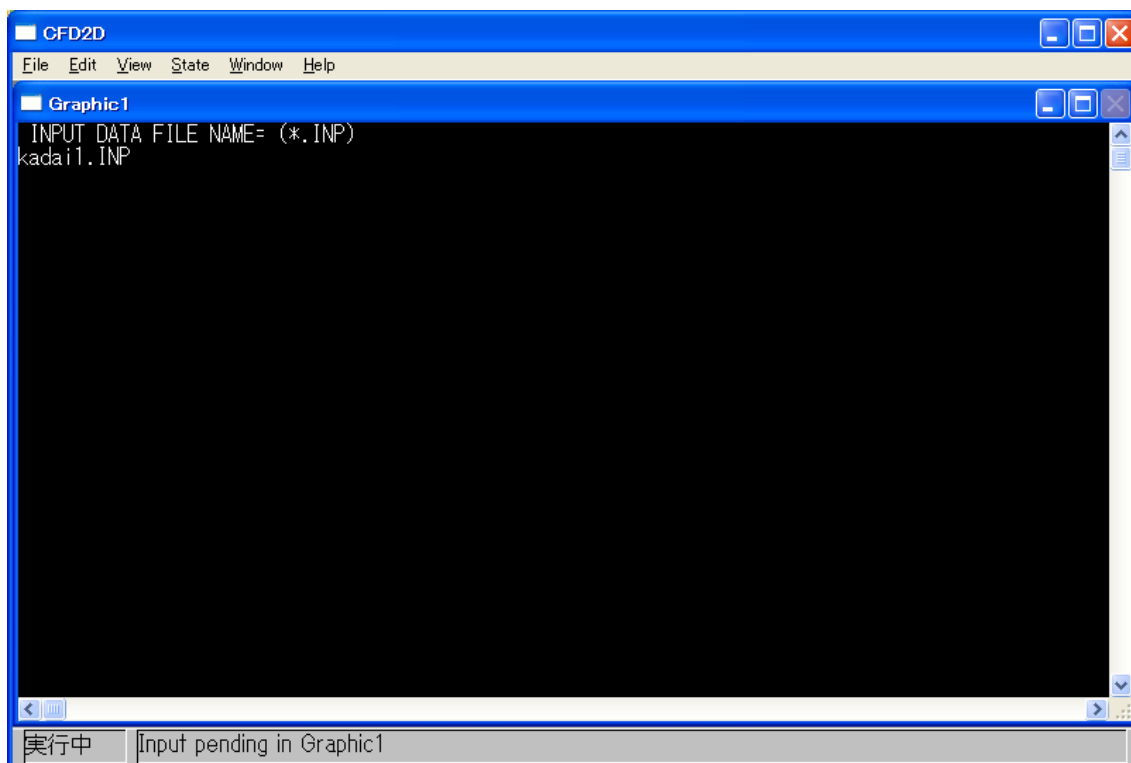
先程エクスポートしたインプットファイルのままでは、CFD2D プログラム上で解析できないため、密度、粘性係数を[*FLUID PROPERTY]カードで追加します。

<pre> *NODE, NSET=GLOBAL 1, 0., 0., 0. 2, 1., 0., 0. 3, 2., 0., 0. (省略) *ELEMENT, TYPE=S3R, ELSET=P1 1, 2, 1, 101 2, 3, 2, 102 3, 4, 3, 103 (省略) ** FEMAP Property 1 : Prop_1 *SHELL SECTION, ELSET=P1, MATERIAL=M1 0., ** FEMAP Material 1 : Mat_1 *MATERIAL, NAME=M1 *ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC 0. 0. 0. *FLUID PROPERTY, TYPE=USER 1.0, 0.2 ***** Load Step 1 ***** *STEP, INC=100 *STATIC 0., 100., 0.01, 10. (省略) *BOUNDARY, OP=NEW 1, 1 1, 2 1, 3 (省略) *BOUNDARY, TYPE=VELOCITY, OP=NEW 91, 1, , 0.1 92, 1, , 0.1 93, 1, , 0.1 94, 1, , 0.1 (省略) *END STEP </pre>	<p>ノード/要素</p> <ul style="list-style-type: none"> *NODE…ノードデータ *ELEMENT…要素データ
<p>材料/特性</p> <ul style="list-style-type: none"> *SHELL SECTION…物理特性 *MATERIAL…材料特性 	
<p>流体のプロパティ(ユーザー定義)</p> <p>密度, 粘性係数</p>	
<p>解析条件の指定 ※実際の ABAQUS とは異なる</p> <p>開始時間, 終了時間, 時間増分, 結果出力間隔時間</p>	
<p>拘束/荷重条件 → 境界条件</p> <ul style="list-style-type: none"> *BOUNDARY…拘束条件 *DLOAD…荷重条件 	
<p>拘束/荷重条件</p> <ul style="list-style-type: none"> TYPE=VELOCITY→流速規定 *DLOAD…荷重条件 	

計算実行

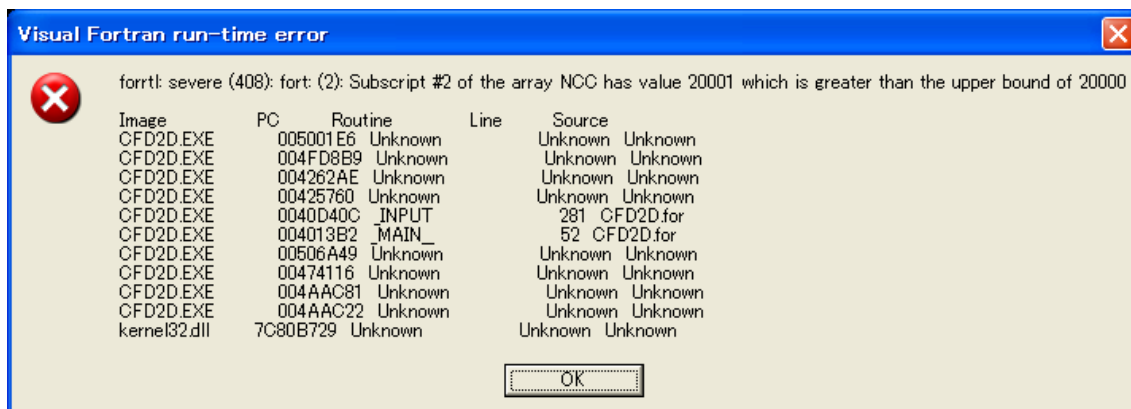
インプットファイル(.INP)があるフォルダに「CFD2D.EXE」をコピーし、ダブルクリックで実行します。

インプットファイル名(***.INP)を入力して「ENTER」キーを押すと計算が実行されます。



解析に重大な問題が生じた場合は次のような終了メッセージが表示されます。エラー内容を確認して対処してください。

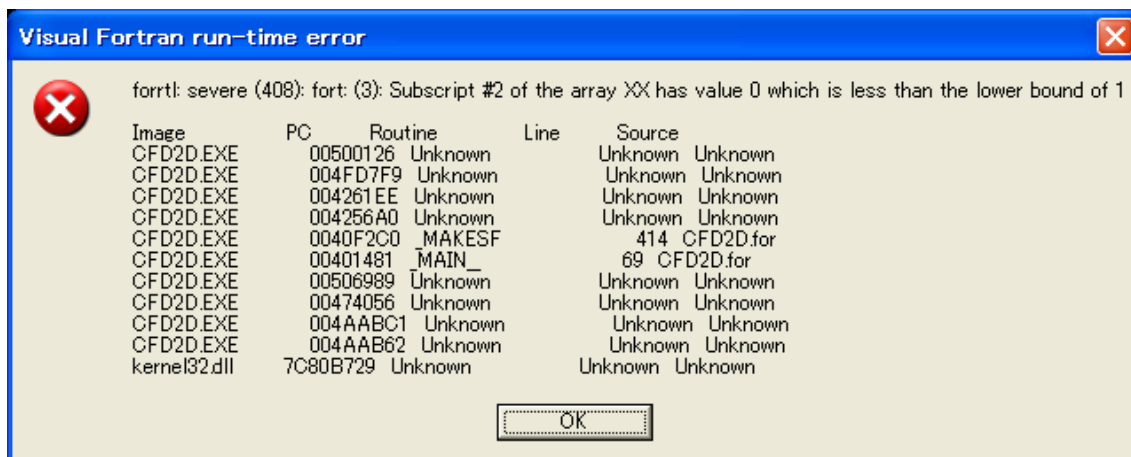
(※入力したファイル名がフォルダ内に見つからない場合のエラーメッセージ例)



メッシュ作成上要素 ID が連番ではなくなると、以下のエラーメッセージが現れてプログラムが停止してしまいます。

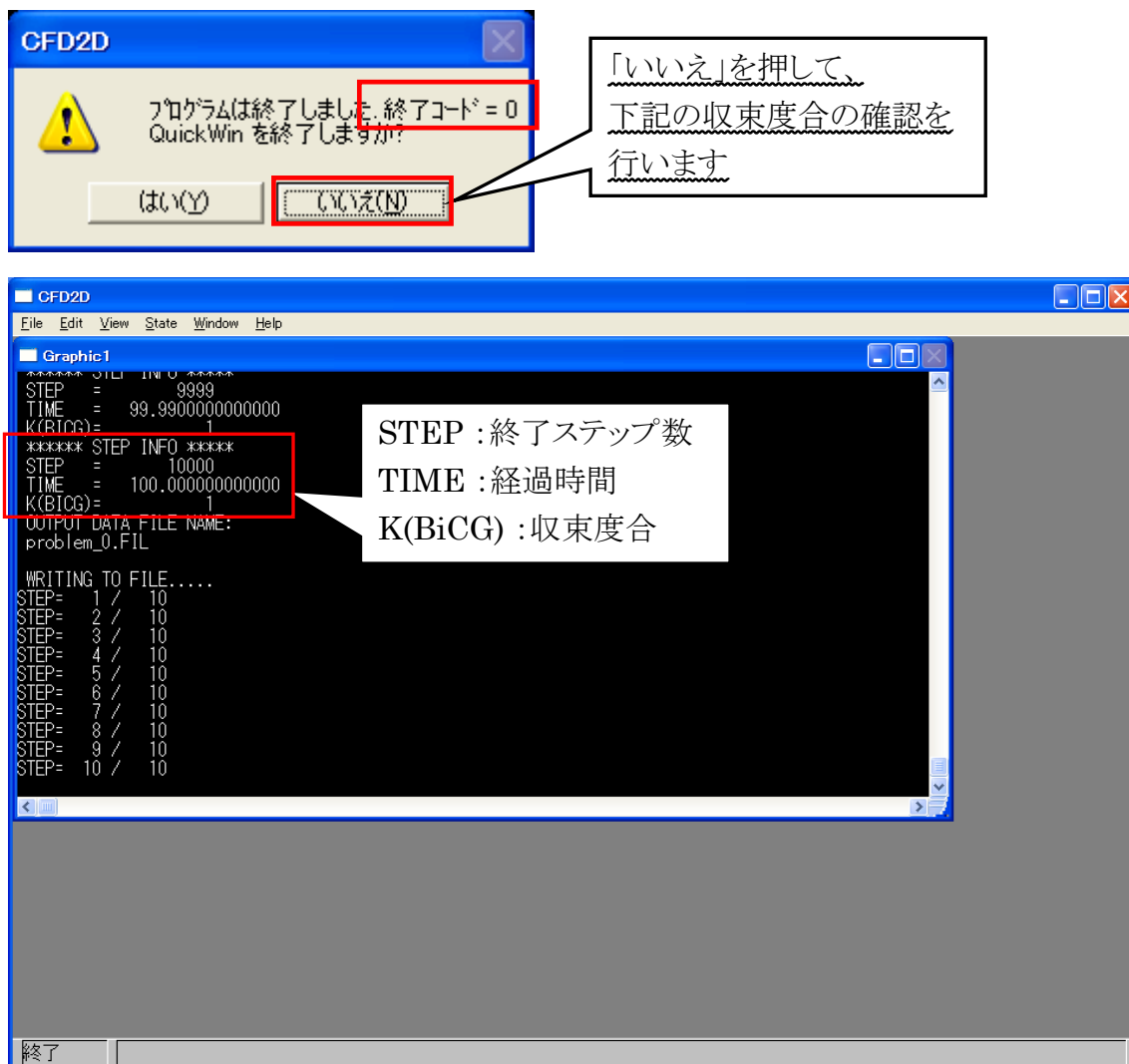
その場合は、「修正」―「リナンバ」―「エレメント」で要素 ID をリナンバしてください。

(※要素 ID が連番ではない場合のエラーメッセージ例)



計算状況の確認

正常に終了すると以下のダイアログが現れます。
収束状況の確認のため、ここでは「いいえ」を選択します。



上記画面の「STEP INFO」にて、「K(BiCG)」の値を確認します。「K(BiCG)」の値が 0 に近づくほど、値が定常に近づいていることを表します。
ここでは「K(BiCG)」の値が 0 ではないため、解析を継続させます。

プログラムを終了し、フォルダに以下のファイルができていることを確認します。
(*****はインプットファイル名)

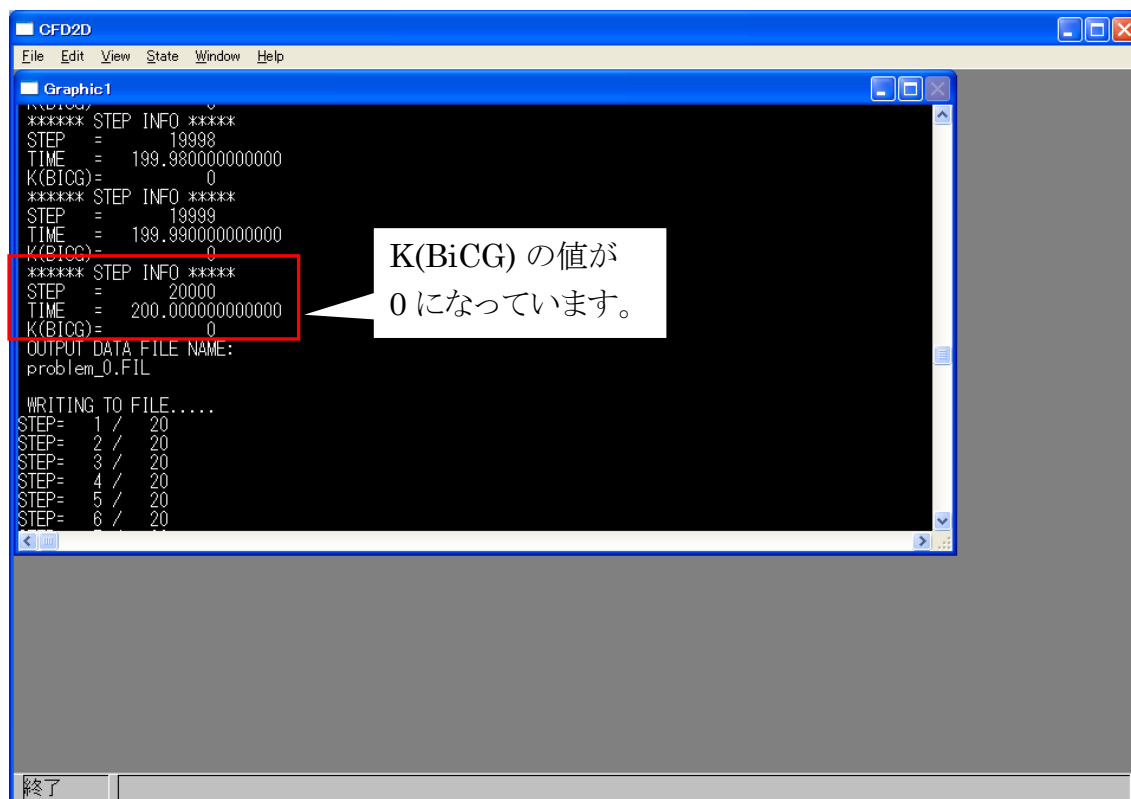
- 「*****.FIL」 …… 結果図化用ファイル
 - 「*****.res」 …… 各ステップ結果ファイル
 - 「*****.end」 …… 最終ステップ結果ファイル
- (end ファイルは継続解析の際にプログラムから参照されます)

インプットファイルを開き、[*STATIC]カードを以下のように書き換えます。

```
*STATIC
100., 200., 0.01, 10.
```

書き換えたインプットファイルで解析を実行します。

再び解析が正常に終了したら、収束度合を確認してください。



```
CFD2D
File Edit View State Window Help
Graphic1
K(BiCG)
***** STEP INFO *****
STEP = 19998
TIME = 199.98000000000000
K(BiCG)= 0
***** STEP INFO *****
STEP = 19999
TIME = 199.99000000000000
K(BiCG)= 0
***** STEP INFO *****
STEP = 20000
TIME = 200.00000000000000
K(BiCG)= 0
OUTPUT DATA FILE NAME:
problem_0.FIL

WRITING TO FILE.....
STEP= 1 / 20
STEP= 2 / 20
STEP= 3 / 20
STEP= 4 / 20
STEP= 5 / 20
STEP= 6 / 20
終了
```

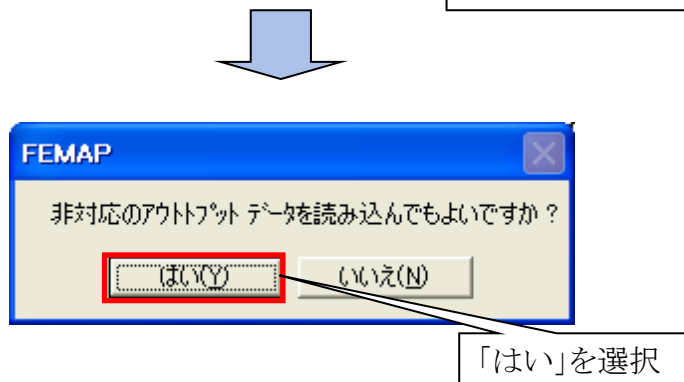
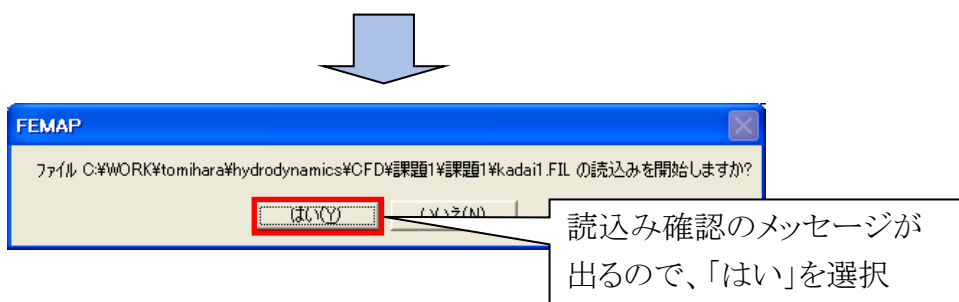
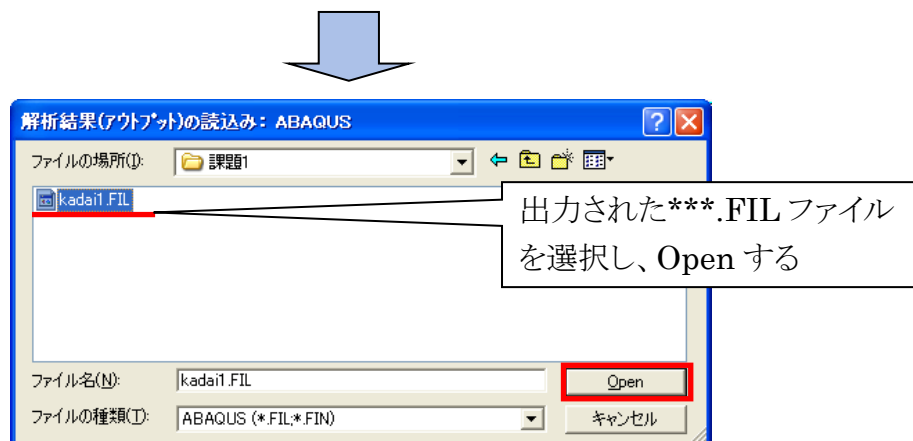
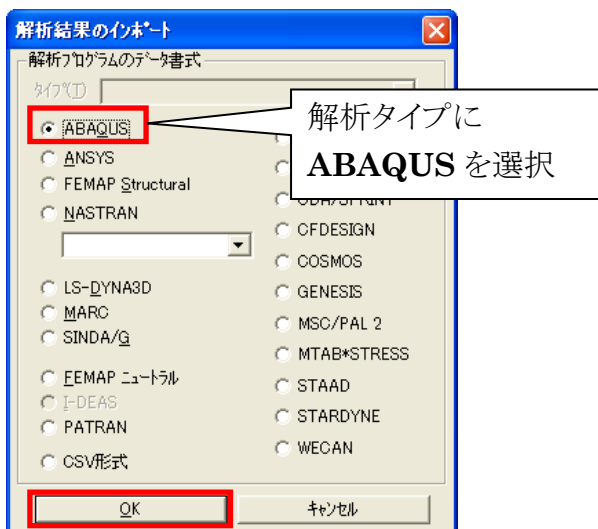
「K(BiCG)」が0になっていることを確認して、プログラムを終了します。

FILファイルができていることを確認します。

(収束の確認は、この後実際にファイルを読み込んでから、各アウトプットセットの値を比べることで確認することもできます。)

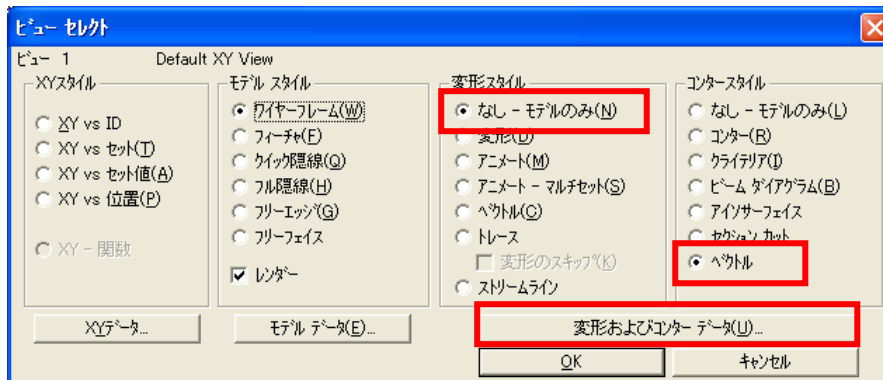
結果の読み込みと表示

メニューより、「ファイル→インポート→解析結果」を選択。



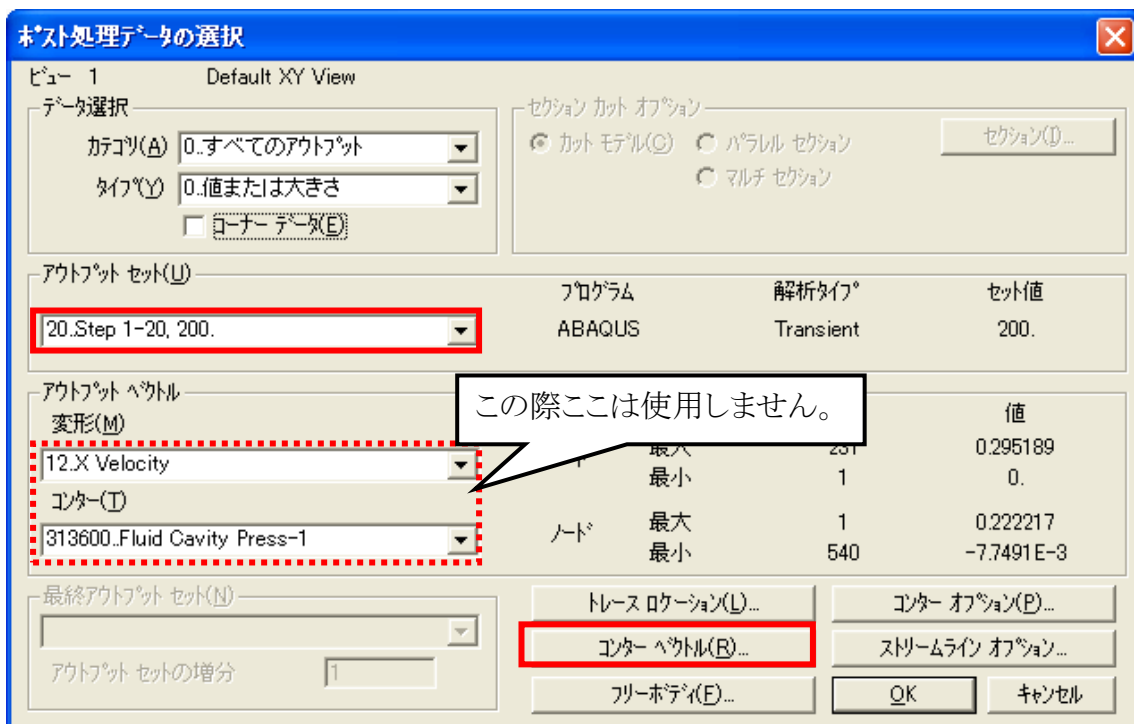
まず、モデル全体の流速ベクトル図を見てみましょう。

ビューセレクト (F5) より結果表示方法を指定し、「変形およびコンタデータ」を選択します。

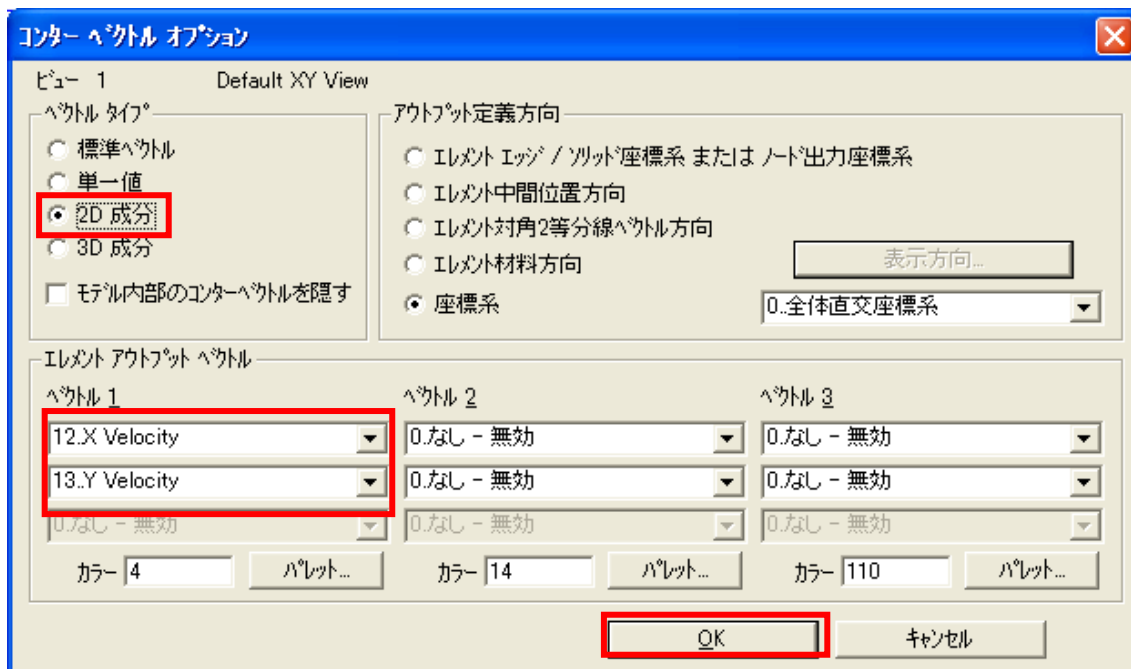


ポスト処理データの選択ダイアログボックスが現れるので、

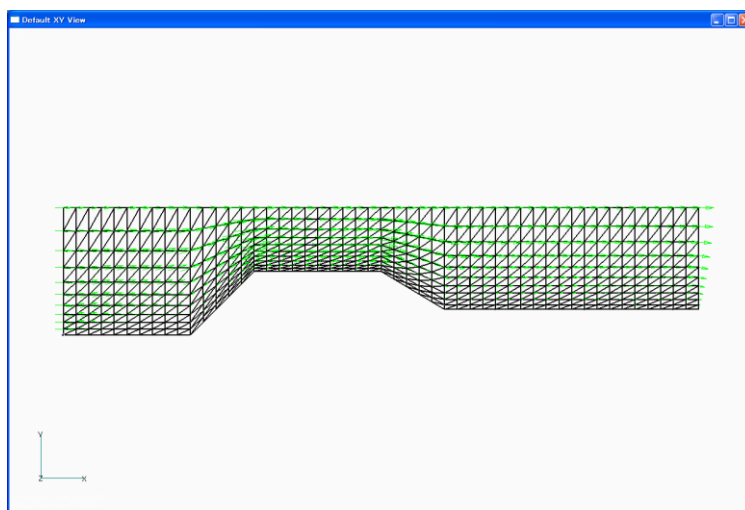
アウトプットセットに「Step 1-20, 200」を選んで、「コンターベクトル」を押します。



コンターベクトルオプションダイアログボックスが開くので、ベクトルタイプに「2D 成分」、ベクトル 1 に「12. X Velocity」、ベクトル 2 に「13. Y Velocity」を選択して「OK」を押します。

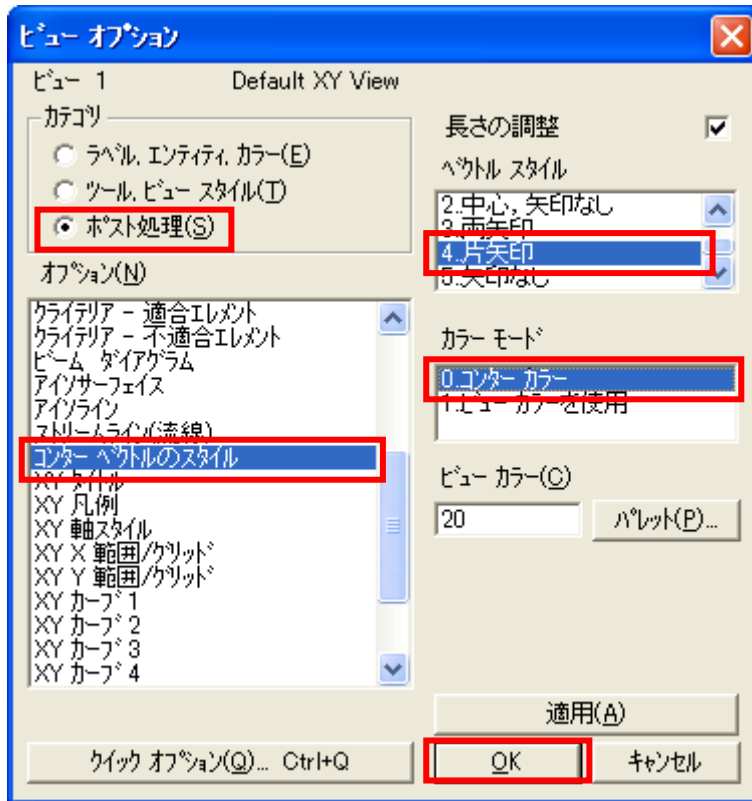


再びポスト処理データの選択、およびビューセレクトダイアログボックスが現れるので、それぞれ「OK」を押します。

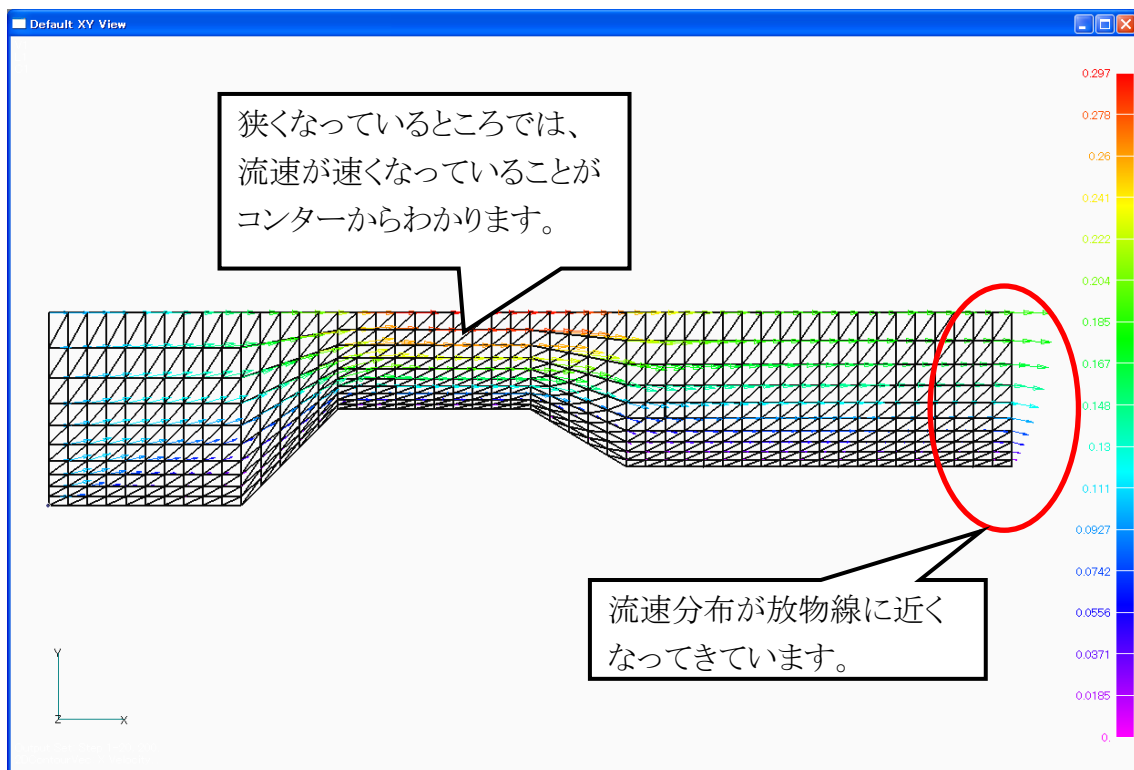


流速ベクトル図が現れますが、そのままだと見にくいので、コンターベクトルのスタイルの設定を変更します。

ビューオプション (F6) を開いて、「ポスト処理」の中から「コンターベクトルのスタイル」を選択し、「片矢印」、「コンターカラー」を選択して「OK」を押します。

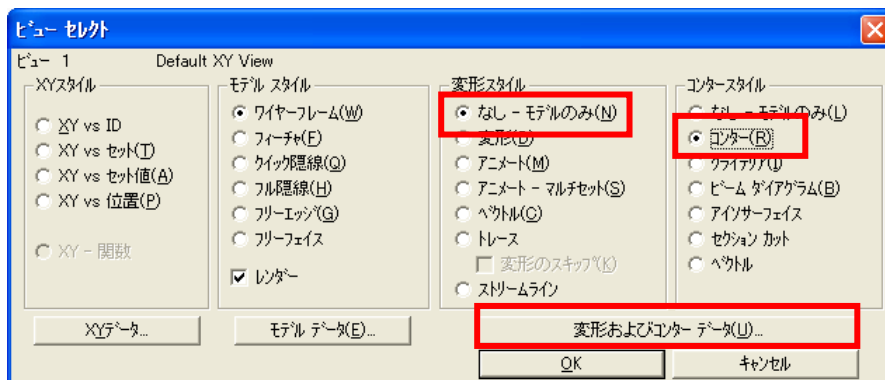


すると、以下のように流速ごとに色分けされたベクトルコンター図が現れます。



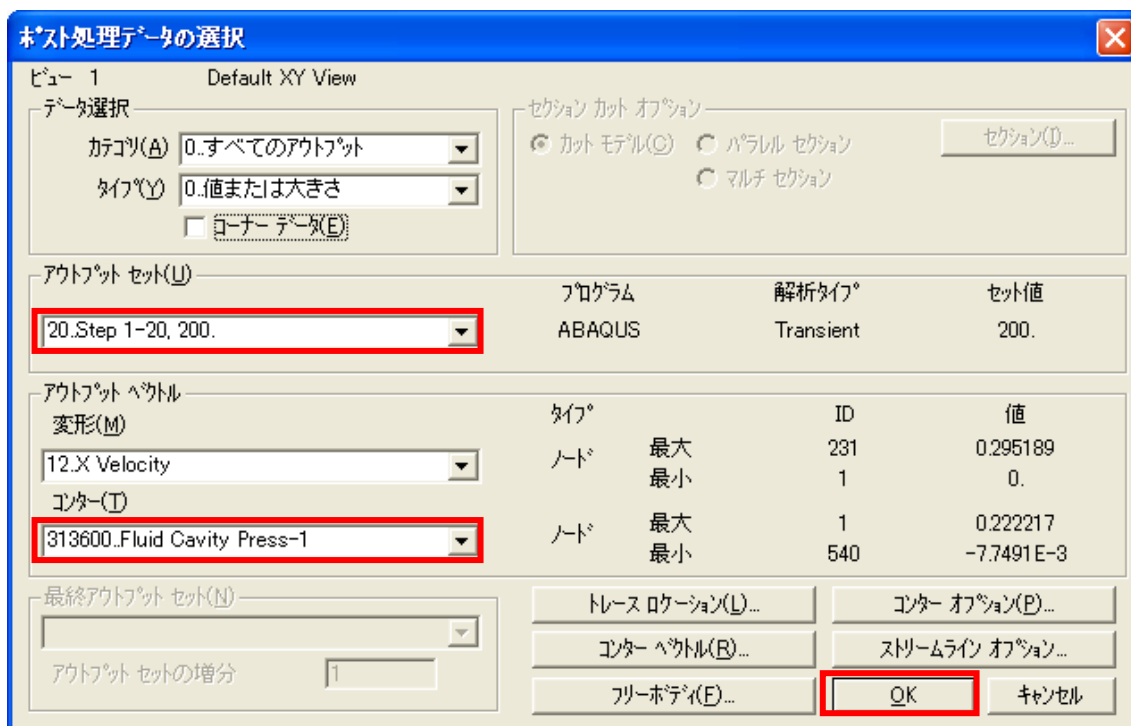
次に圧力コンター図を見てみましょう。

ビューセレクト(F5)より結果表示方法を指定し、「変形およびコンタデータ」を選択します。



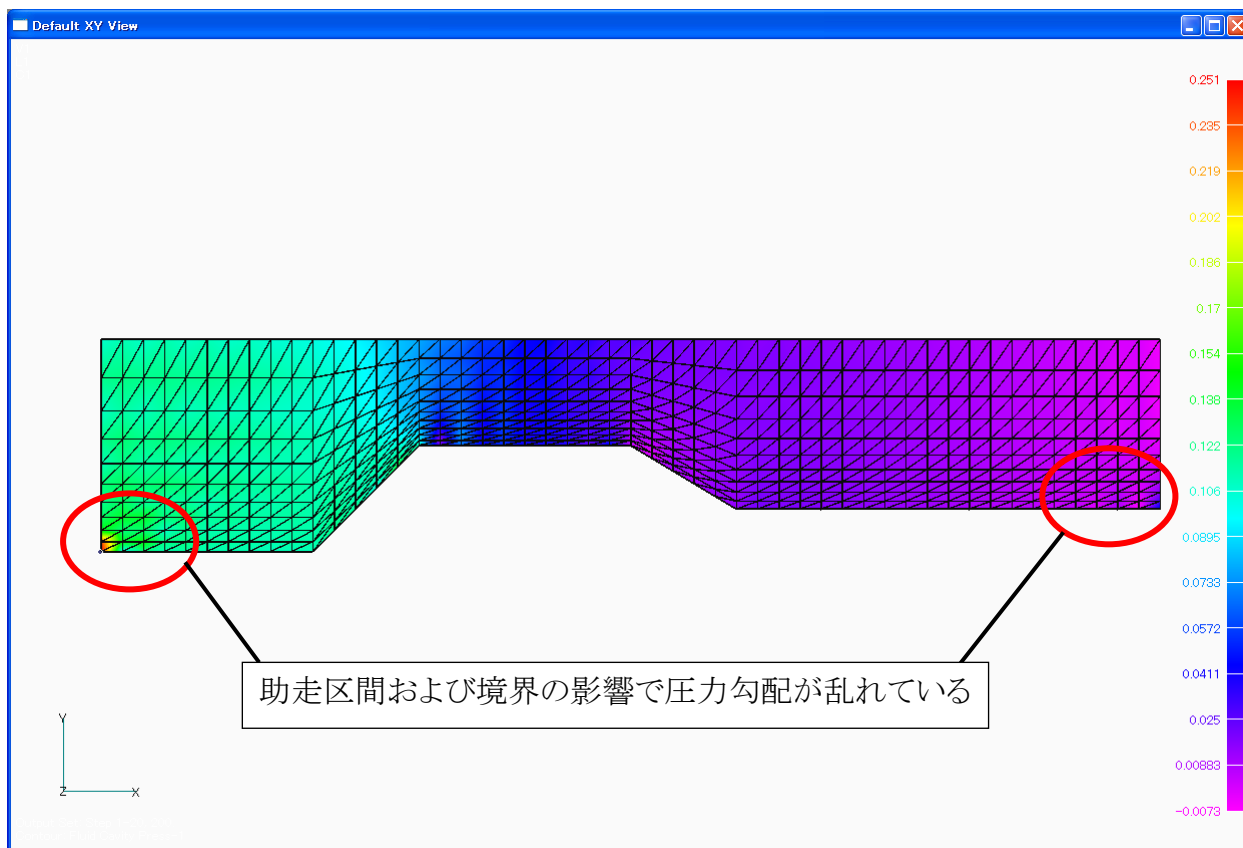
ポスト処理データの選択ダイアログボックスが現れるので、

アウトプットセットに「Step 1-20, 200」、コンターに「Fluid Cavity Press-1」を選択して、「OK」を押します。



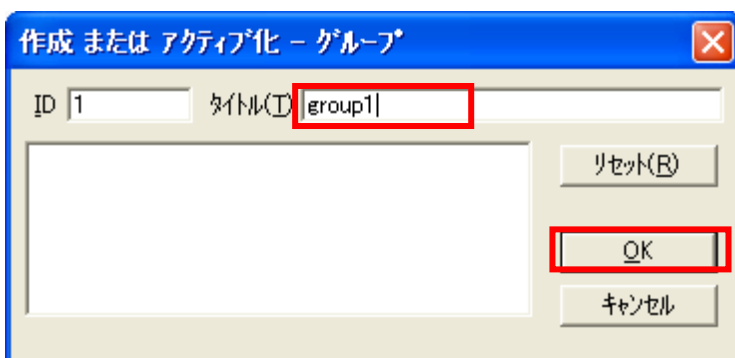
再びビューセレクトダイアログボックスが現れるので、「OK」を押します。

圧力コンター図が下図のようにあらわれます。



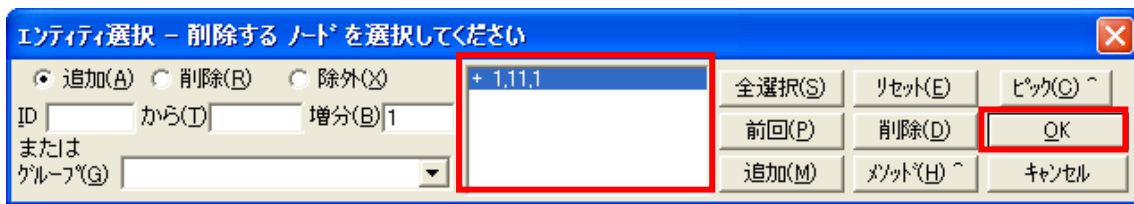
ここで、連続の式を確認するために、 $X = 0 \text{ m}$ のノードの「グループ」を作成して、その値だけ取り出します。

「メニュー」-「グループ」から「セット」を選択します。



タイトルを任意に入力して、「OK」を押します。

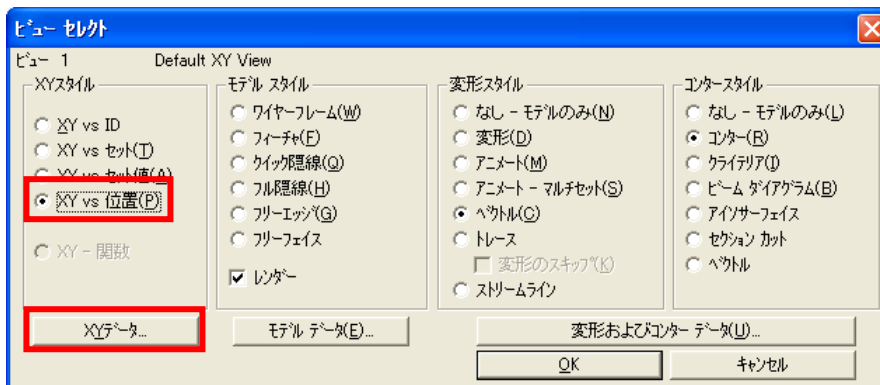
「メニュー」-「グループ」から「ノード」-「ID」を選択します



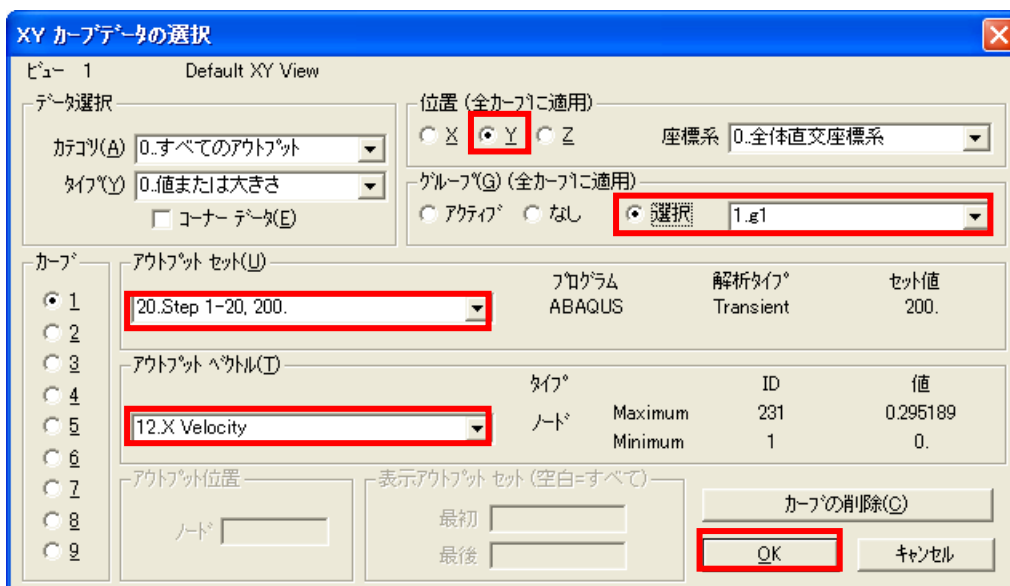
エンティティの選択ダイアログボックスがあらわれるので、 $X = 0 \text{ m}$ のノードをピックして「OK」を押します。これでグループの作成は完了です。

次に今作成したグループを使ってグラフを表示します。

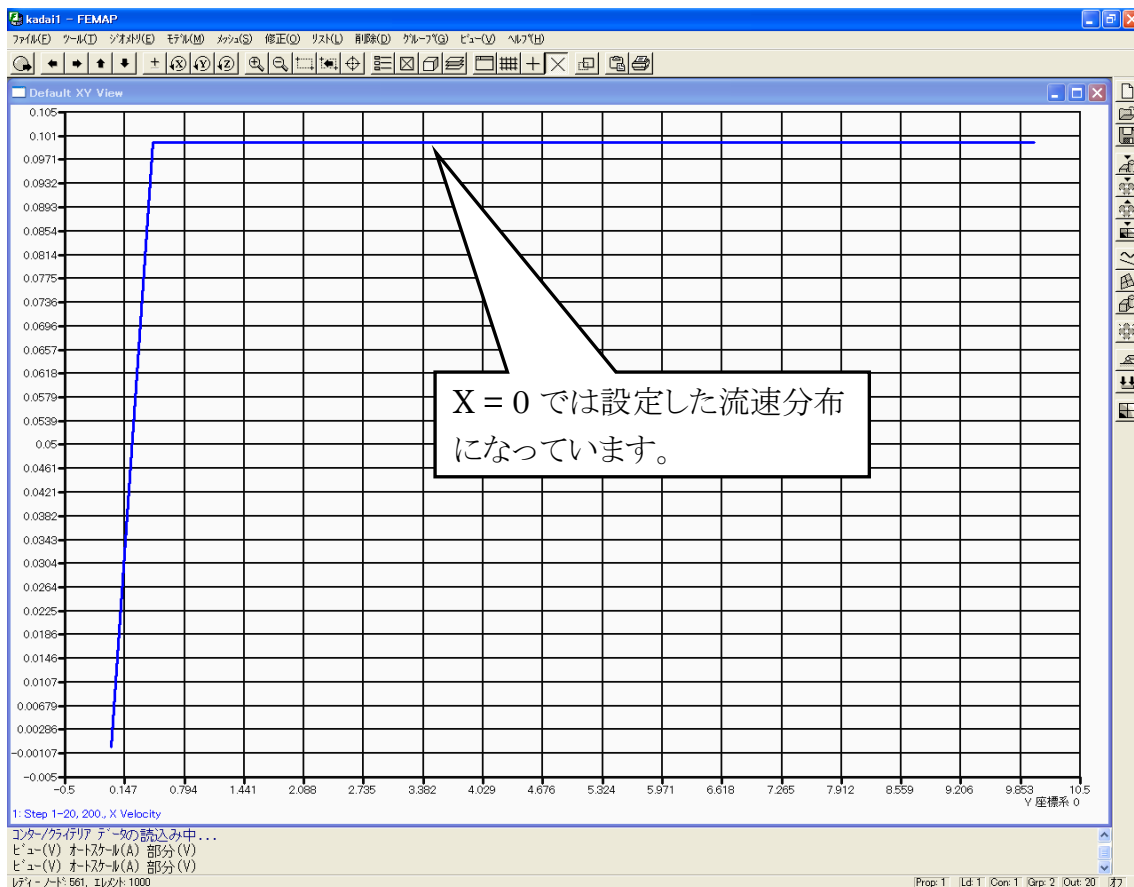
ビューセレクト(F5)より、「XY vs 位置」を選択して「XY データ」ボタンを押します。



XY カーブデータの選択ダイアログボックスで、位置に「Y」、グループセクションで「選択」と先程作成したグループ、アウトプットセットに「Step 1-20, 200」、アウトプットベクトルに「X Velocity」をそれぞれ選択して、「OK」を押します。

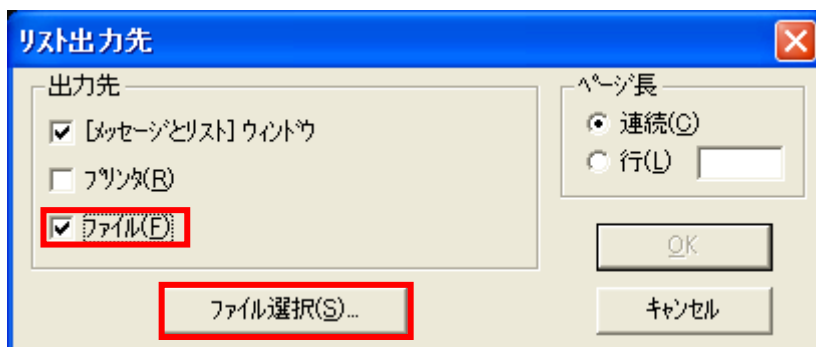


再びビューセレクトダイアログボックスが現れるので、「OK」を押します。



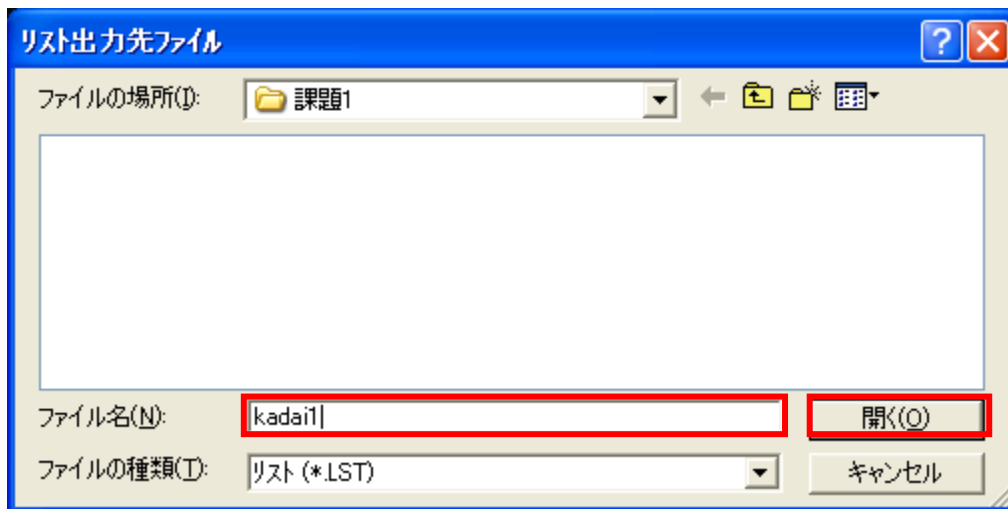
後ほど理論値との比較で数値データを使用するため、グラフの値をファイルに出力します。

まず、「メニュー」-「リスト」から出力先を選択します。



「ファイル」のチェックボックスをオンにして、「ファイル選択」ボタンを押します。

出力先を求められるので、「C:\WORK\個人フォルダ」に任意でファイル名を入力して「開く」を押します。

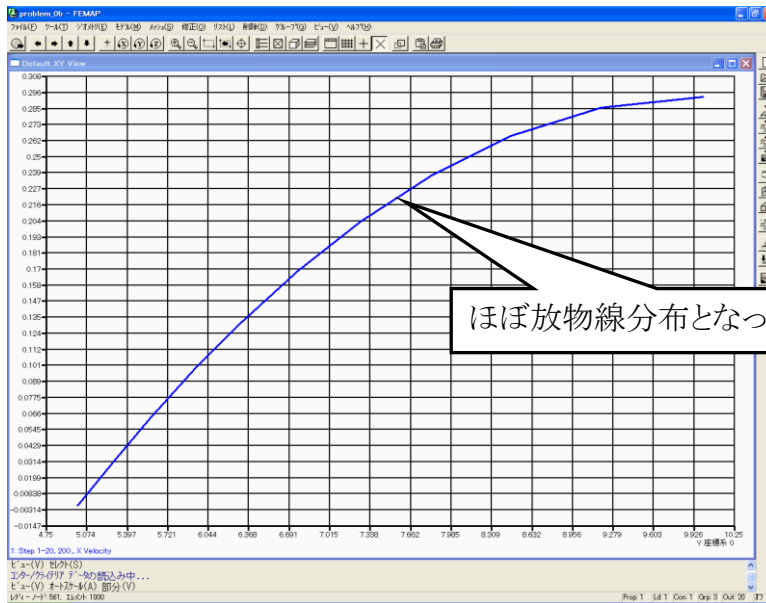


再びリスト出力先ダイアログボックスがあらわれるので、「OK」を押します。

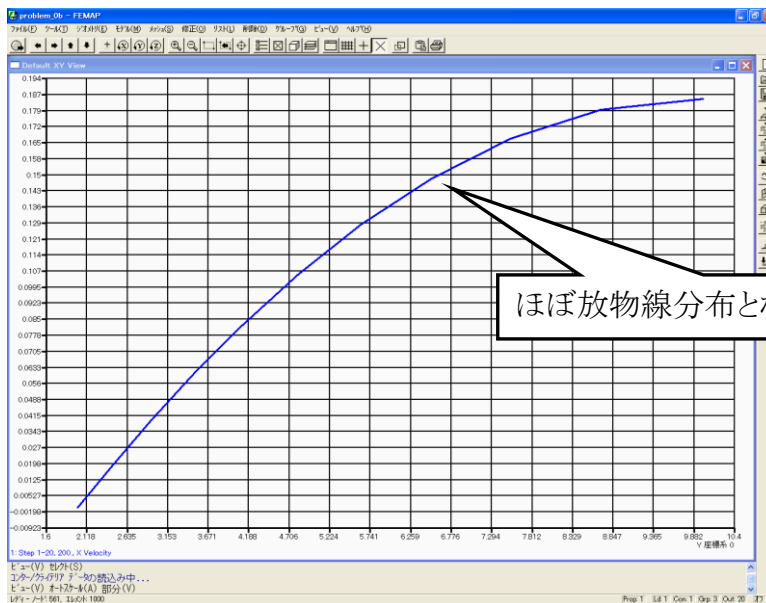
「メニュー」-「リスト」-「アウトプット」-「XY プロット」を選択します。
これでリストにデータが出力されました。

同様に、グループ 2、グループ 3 を作り、 $X = 21 \text{ m}$ および $X = 45 \text{ m}$ のグラフを作成し、リストを出力しましょう。(リストの出力設定は 1 度設定すれば追加されていくようになっています。)

X = 21 m



X = 45 m



連続の式の確認

連続の式とは、流体力学における質量保存則です。

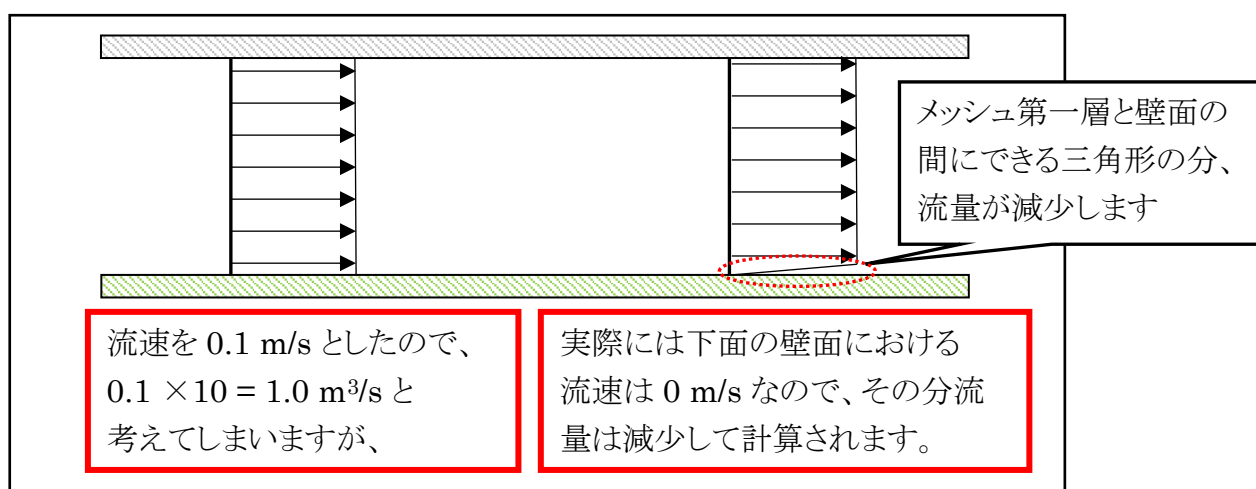
非圧縮性流体の場合、流量 Q m^3/s 、高さ H m 、平均流速 U m/s としたとき、

$$Q = HU = \text{一定}$$

が成り立ちます。これを連続の式と言います。

まずは流入口における流量を考えてみましょう。

流入口における流量 Q は、壁から一層目のメッシュ間隔によって決まります。



では、上図より求められる流入口での流量が、他のところでも保存されているのか、 $X = 21 \text{ m}$ および $X = 45 \text{ m}$ における平均流速を求めて確認してみましょう。

平均流速は、簡単のため Y 方向の流速分布が放物線分布であると仮定し、最大流速の $2/3$ とします。

先程出力したリストファイルから $X = 21 \text{ m}$ および $X = 45 \text{ m}$ の最大流速を読み取って、流量 Q を計算してみると以下のような結果となります。

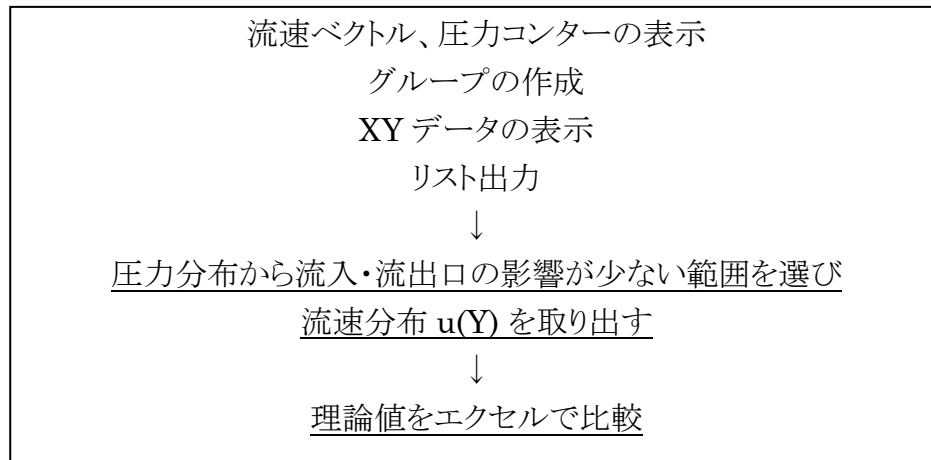
※流入口の要素分割数 10、等比バイアスファクタ 4 でモデルを作成した場合

位置	流量	誤差
$X = 0 \text{ m}$	$0.977288 \text{ m}^3/\text{s}$	—
$X = 21 \text{ m}$	$0.982700 \text{ m}^3/\text{s}$	0.55 %
$X = 45 \text{ m}$	$0.989387 \text{ m}^3/\text{s}$	1.24 %

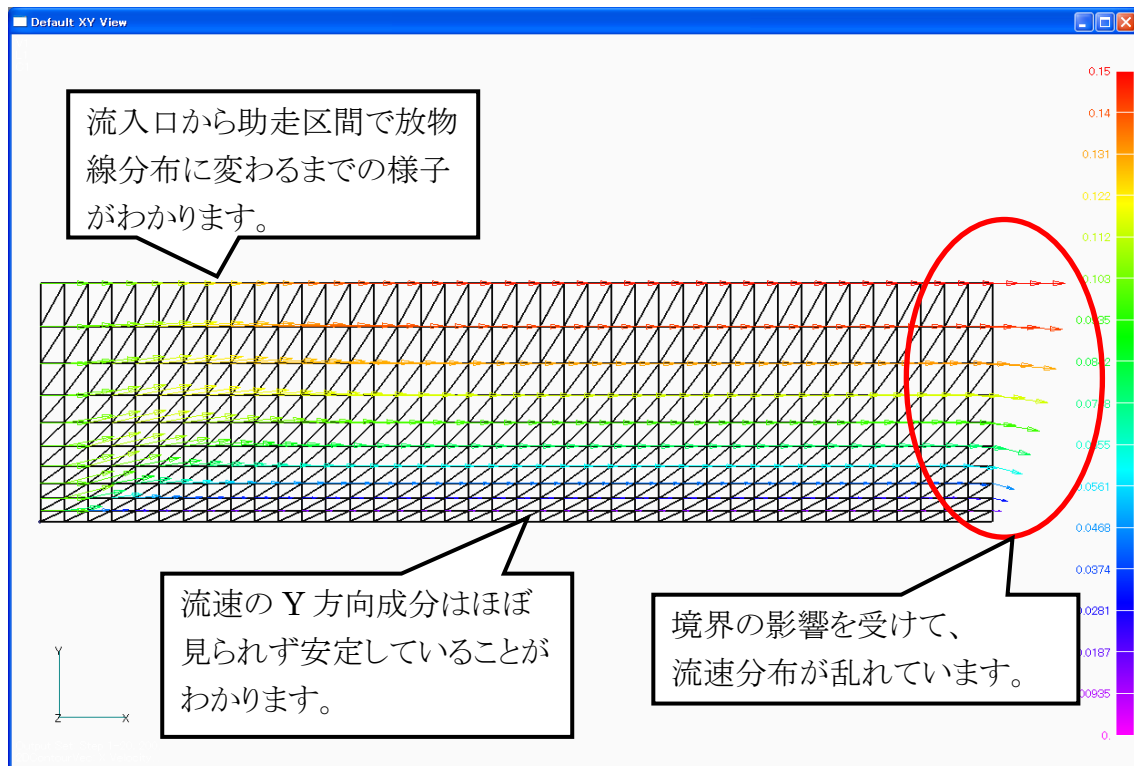
各位置における流量が、ほぼ一致していることが確認できます。

結果の読みみと表示

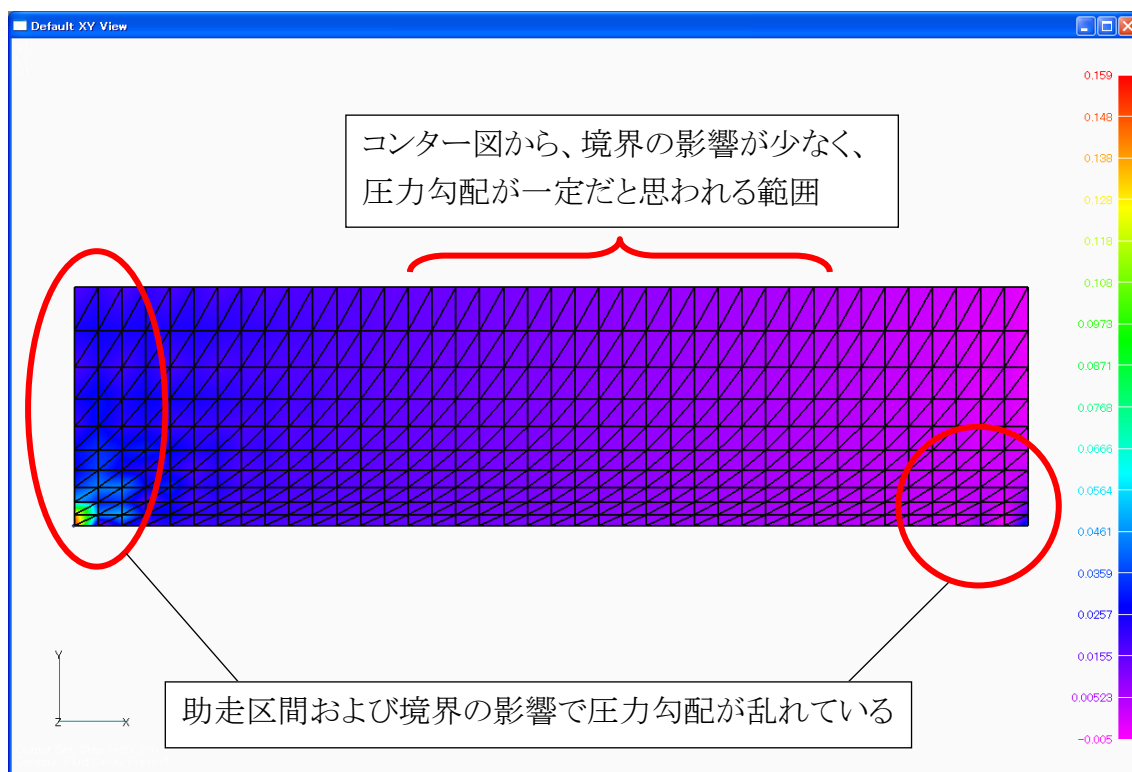
解析結果検証の流れ



まず、モデル全体の流速ベクトル図を見てみましょう。

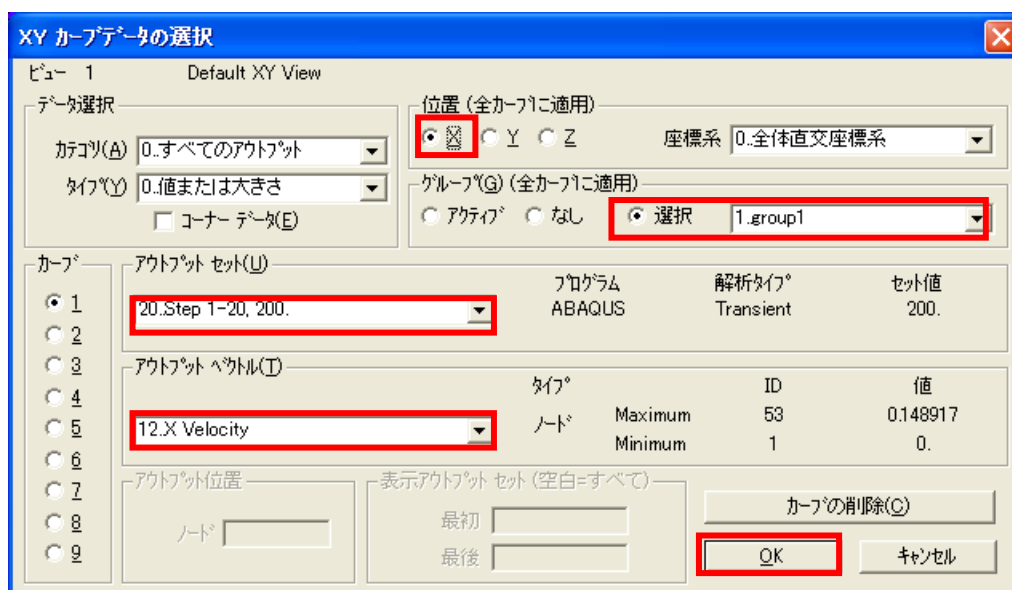


次に圧力コンター図を見てみましょう。

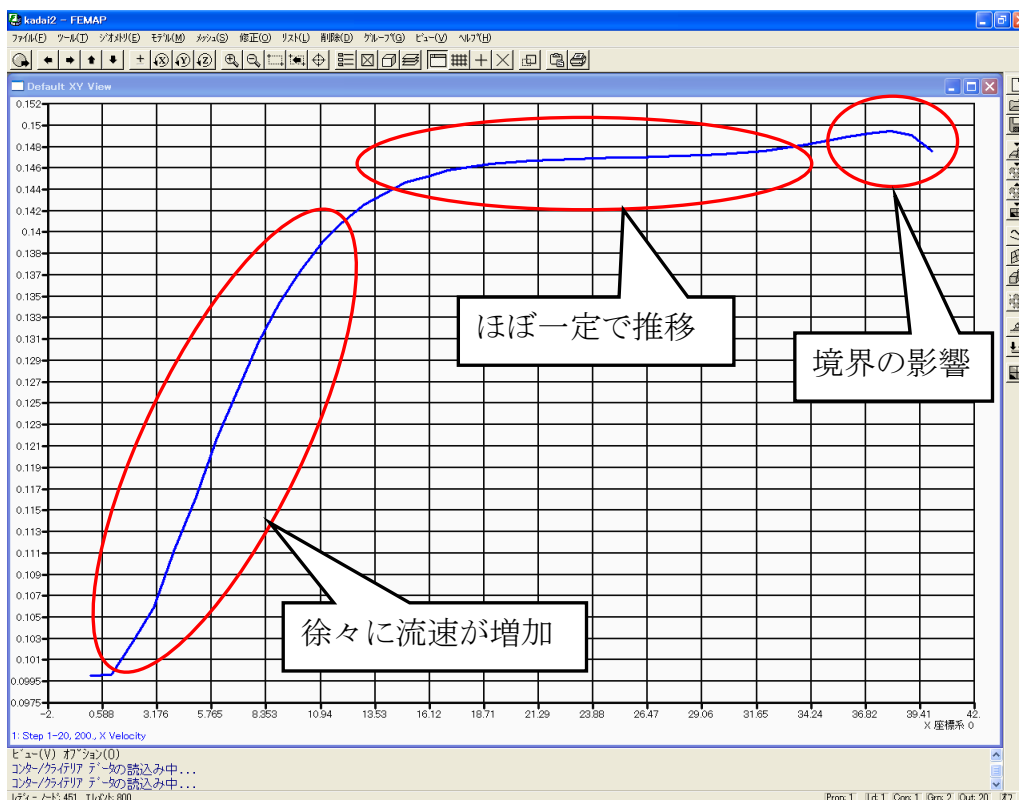


ここで、さらに具体的な数値を見ていくために、 $Y = 10 \text{ m}$ のノードの「グループ」を作成して、その値だけ取り出します。作成手順は課題 1 と同様です。

XY カーブデータの選択ダイアログボックスで、位置に「X」、グループセクションで「選択」と先程作成したグループ、アウトプットセットに「Step 1-20, 200」、アウトプットベクトルに「X Velocity」をそれぞれ選択して、「OK」を押します。

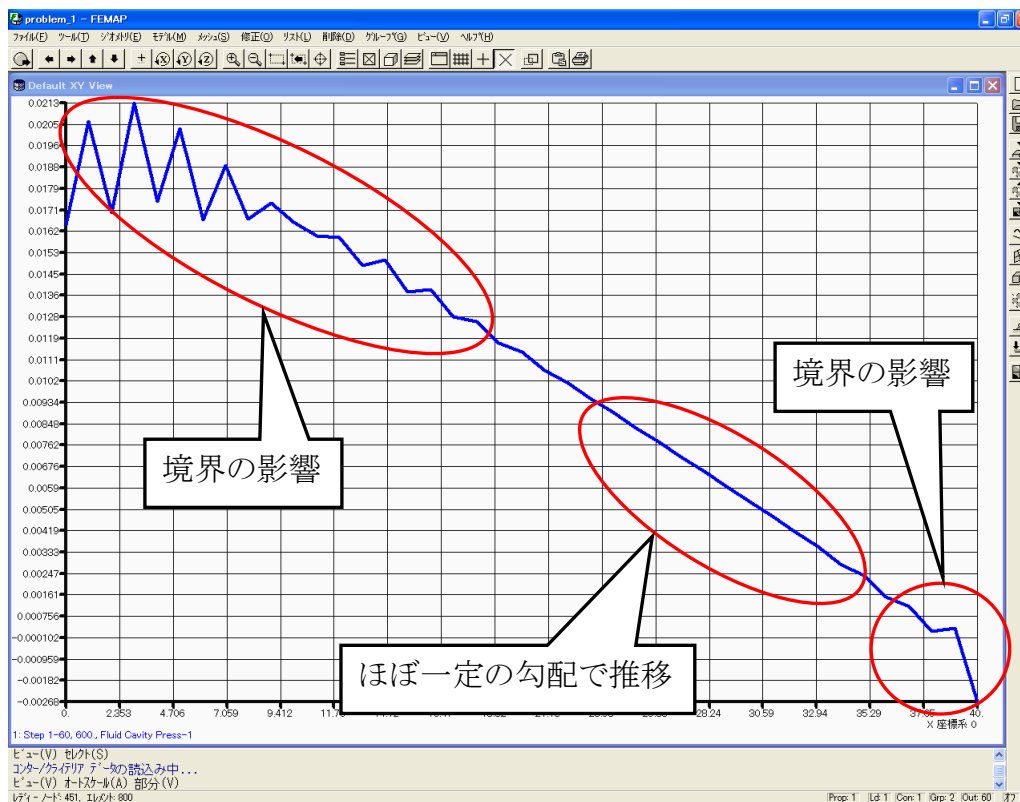


再びビューセレクトダイアログボックスが現れるので、「OK」を押します。



後ほど理論値との比較で数値データを使用するため、グラフの値をファイルに出力します。

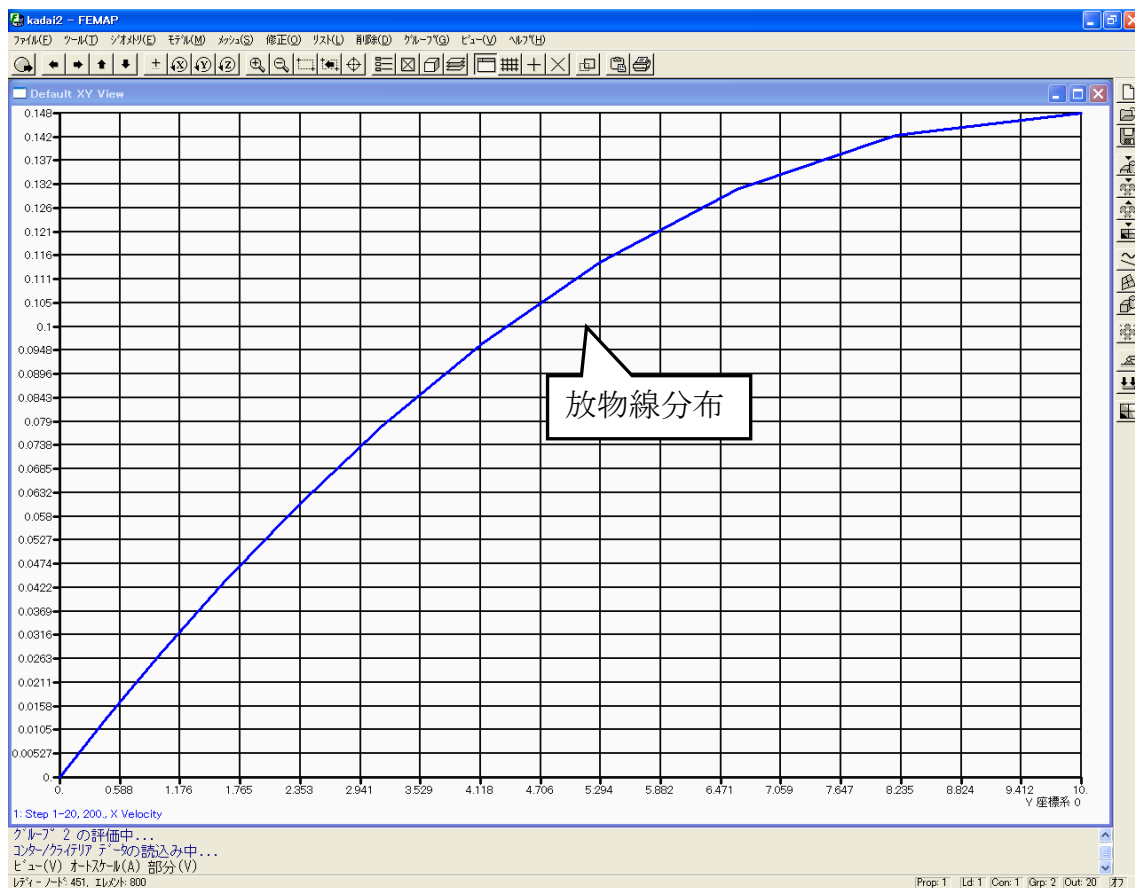
同様に、アウトプットベクトルに「Fluid Cavity Press-1」を選んで圧力グラフを表示します。



グラフの値をファイルに出力します。

流速および圧力のグラフから、境界の影響を受けていない範囲においては、流速および圧力勾配が一定であることがわかります。

そこで、境界の影響を受けていないと思われる、 $X = 30 \text{ m}$ のノードでグループを新たに作成し、流速の Y 方向の分布を確認します。



確認後リストを出力しておきます。

手計算との比較(流体力学)

ビルや車などの物体周りの風の流れや、室内の温度分布の時間変化といった現象をシミュレーションによって再現するプログラム内では、現象を表す基礎方程式を、与えられた境界条件や初期条件のもとで解くことを行っています。

流体解析において解くべき方程式は以下の 2 つがあげられます。

- ・ 連続の式(質量保存式)
- ・ ナビエ-ストークス方程式(運動量保存式)

X-Y 平面の 2 次元流れにおける連続の式およびナビエ-ストークス方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial X} + \frac{\partial v}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial X} + v \frac{\partial v}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial Y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

ここで u は X 方向の流速、 v は Y 方向の流速、 p は圧力、 ν は動粘性係数(粘性係数 μ / 密度 ρ) です。

流れは定常で X 方向に一様であるとする、連続の式(1)から

$$\frac{\partial v}{\partial Y} = 0 \quad \left(\because \frac{\partial}{\partial t} = 0, \frac{\partial u}{\partial X} = \frac{\partial v}{\partial X} = 0 \right) \quad (4)$$

が与えられます。(4)式より、 $Y = 0$ での境界条件 $v = 0$ を用いると、全領域にわたって $v = 0$ になることから、ナビエ-ストークス方程式は以下のように書き換えることができます。

$$(2)より \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \quad (5)$$

$$(3)より \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial Y} \quad (6)$$

ここで(6)式は、Y 方向には圧力勾配がないことを表しています($\partial p / \partial X = dp / dx$)。

ところで、 $Y = h$ における境界条件である Free Slip 条件は、力学的にはせん断応力 τ が 0 であることを示しています。そこで、ニュートン流体の定義より

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial Y} = 0, \text{ at } Y = h \quad (7)$$

となるので、以上の境界条件から(5)式の偏微分方程式を解くと、速度分布

$$u(Y) = \frac{1}{2\rho\nu} \frac{dp}{dX} (Y - 2h)Y \quad (8)$$

が得られます。また、速度分布 $u(Y)$ より、流量 Q は以下のように与えられます。

$$Q = -\frac{1}{3\mu} \frac{\partial p}{\partial X} h^3 \quad (9)$$

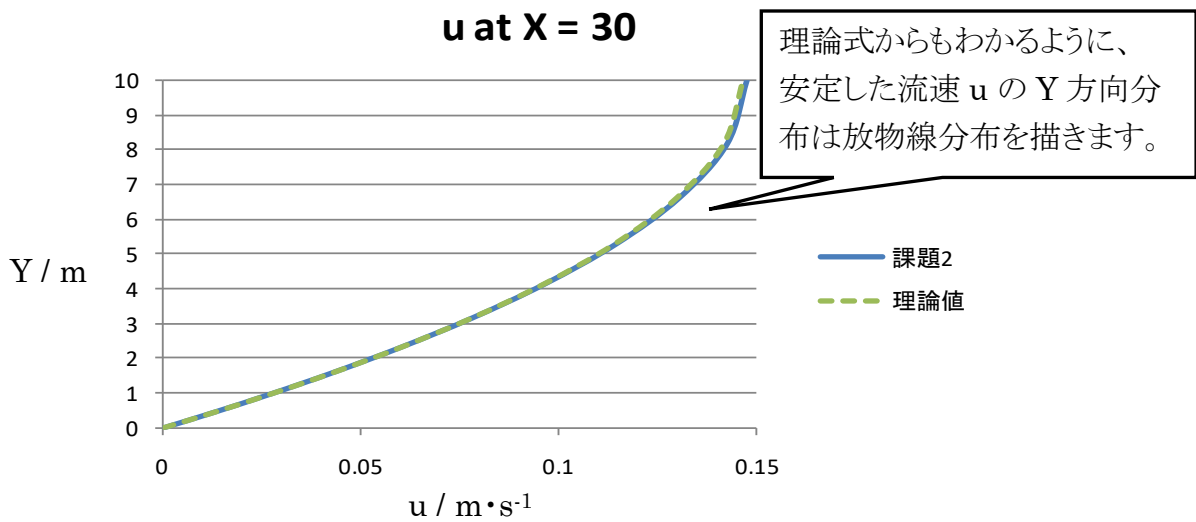
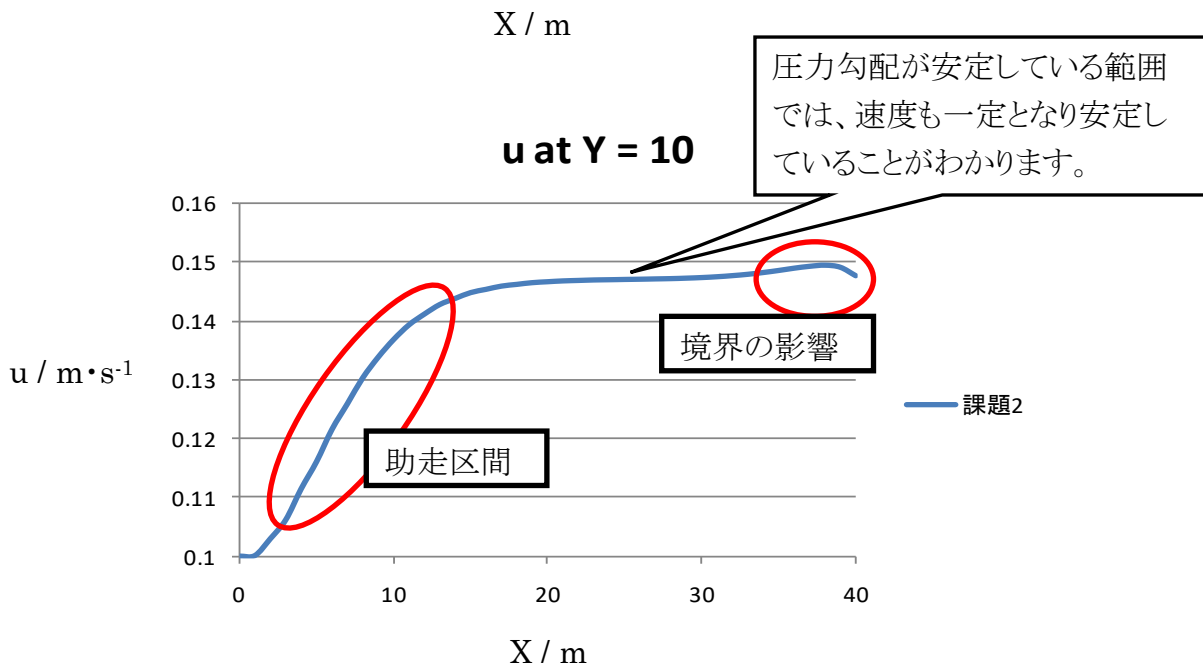
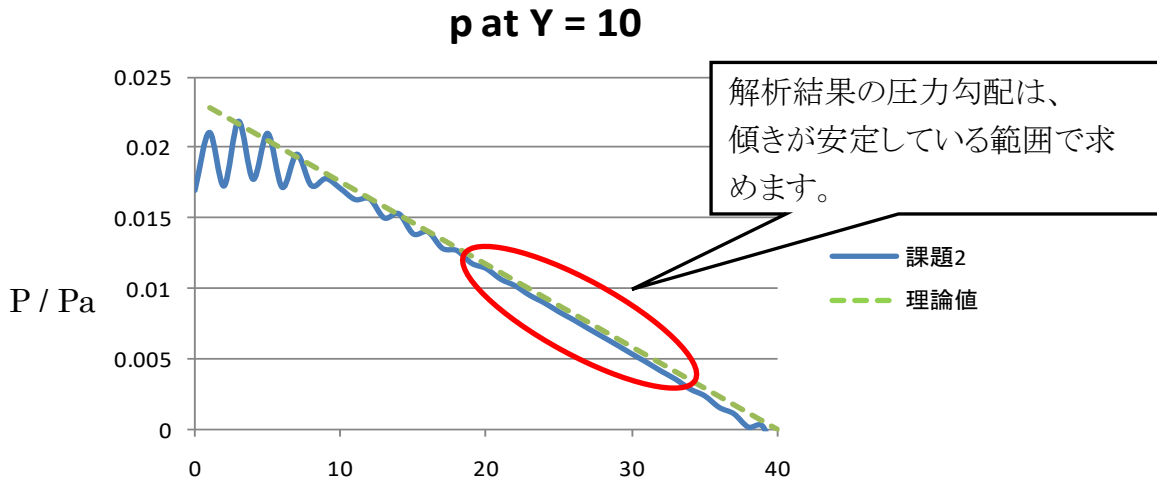
流量 Q は流入条件よりわかっていることから、 X 方向の圧力勾配は

$$\frac{dp}{dX} = -\frac{3\mu}{h^3} Q \quad (10)$$

で与えられることがわかります。流量 Q を用いて速度分布 $u(Y)$ を表すと、

$$u(Y) = -\frac{3}{2h^3} Q (Y - 2h)Y \quad (11)$$

となり、これで速度分布の理論値が求められることとなります。



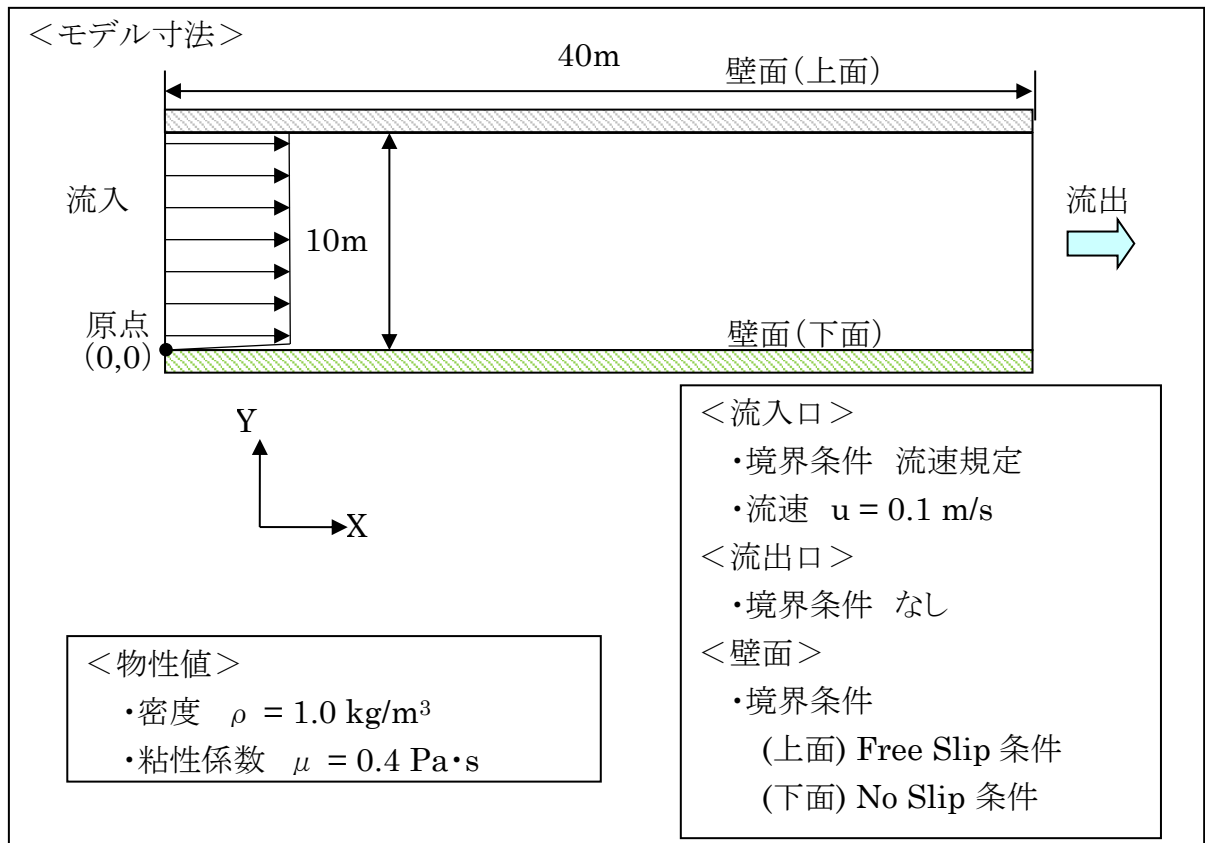
解析から求められた圧力勾配	6.00×10^{-4} Pa/m
理論値	5.86×10^{-4} Pa/m
誤差	2.29 %

X = 30 m における最大流速	0.148 m/s
理論値	0.147 m/s
誤差	0.64 %

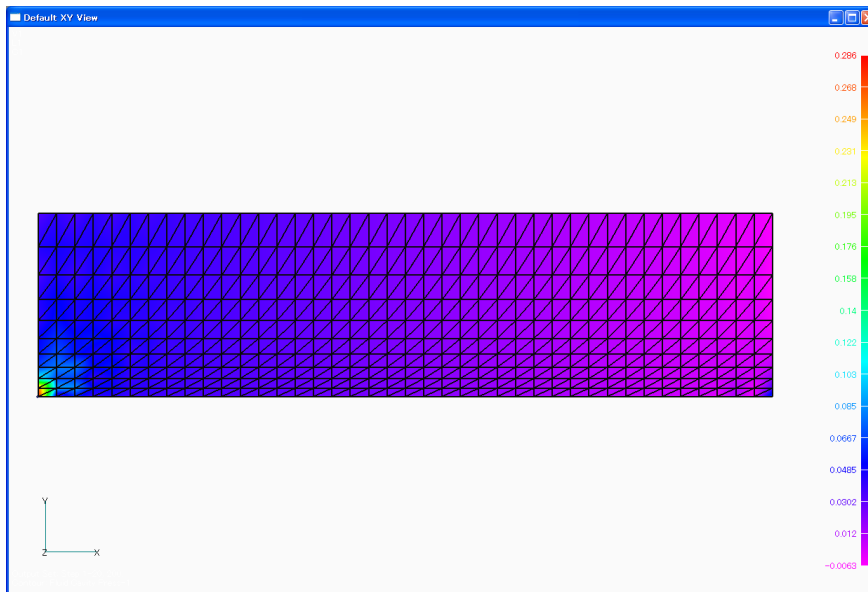
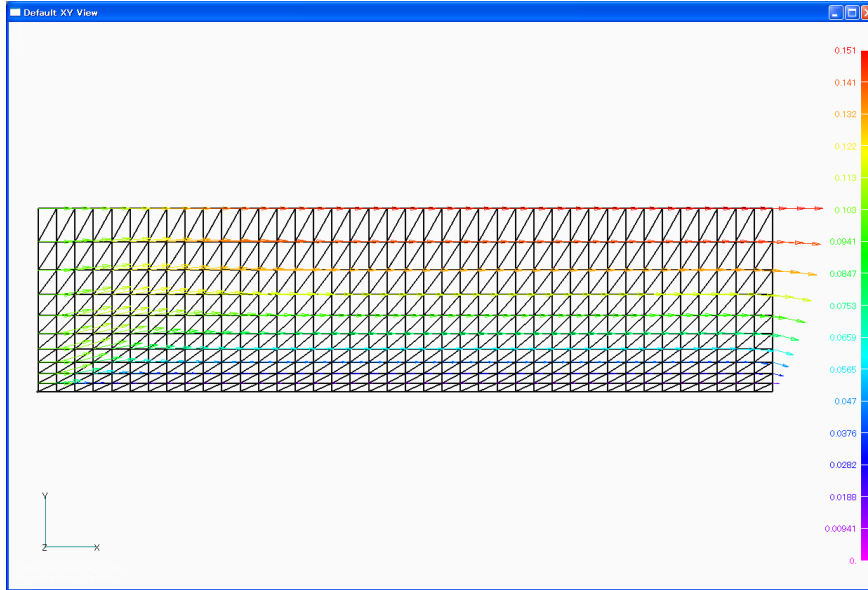
解析結果が理論値とほぼ一致していることが確認できます。

■課題 3 物性値比較

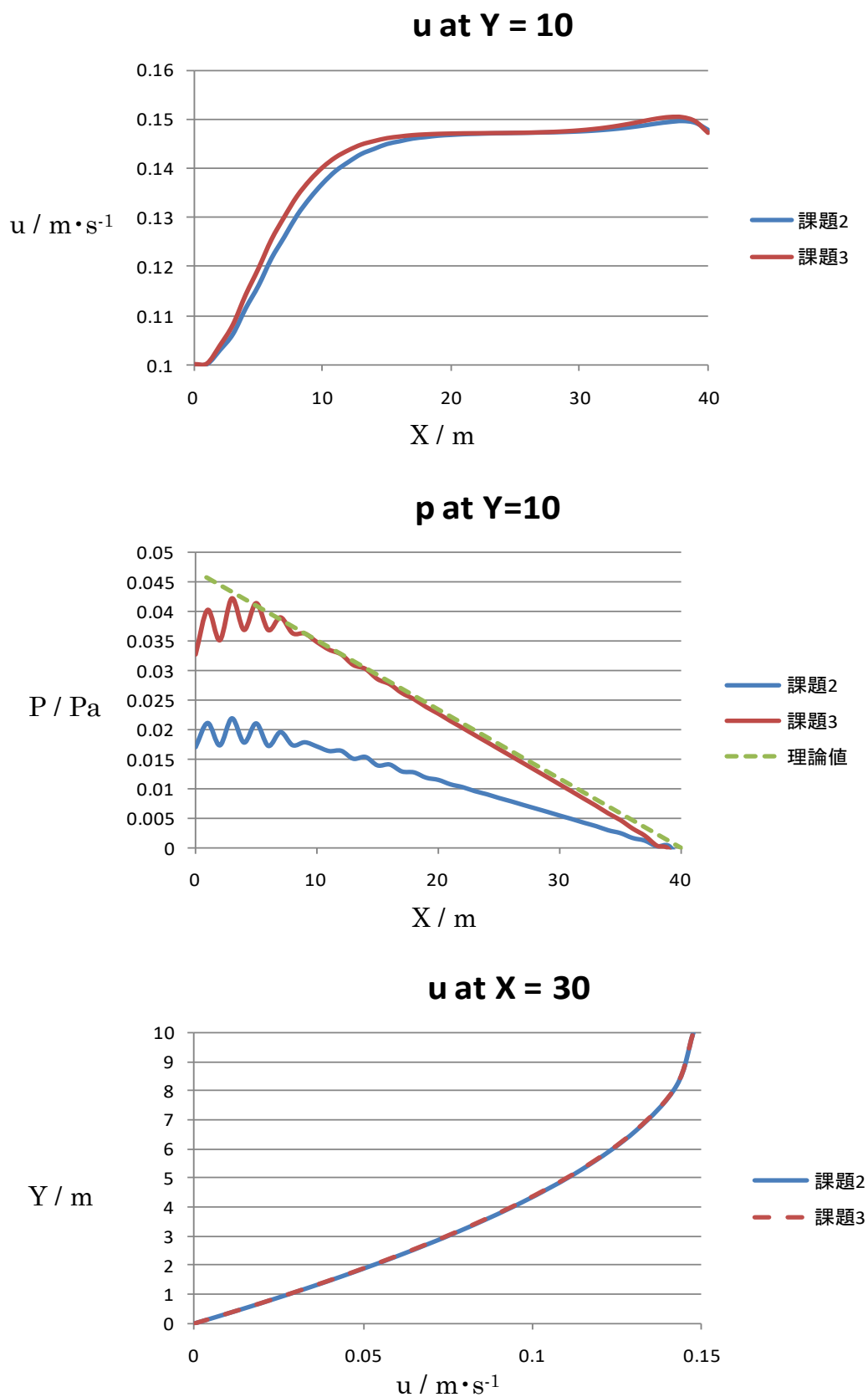
課題 3 では、課題 2 と同じモデルを使い、粘性係数を 2 倍にした場合どのような解析結果が得られるのか、結果を比較してみましょう。



結果比較



課題 2 と同じように結果をエクセルでまとめて、それらの結果を比較してみましょう。



流速分布は変化しませんでした、圧力勾配は変化しています。

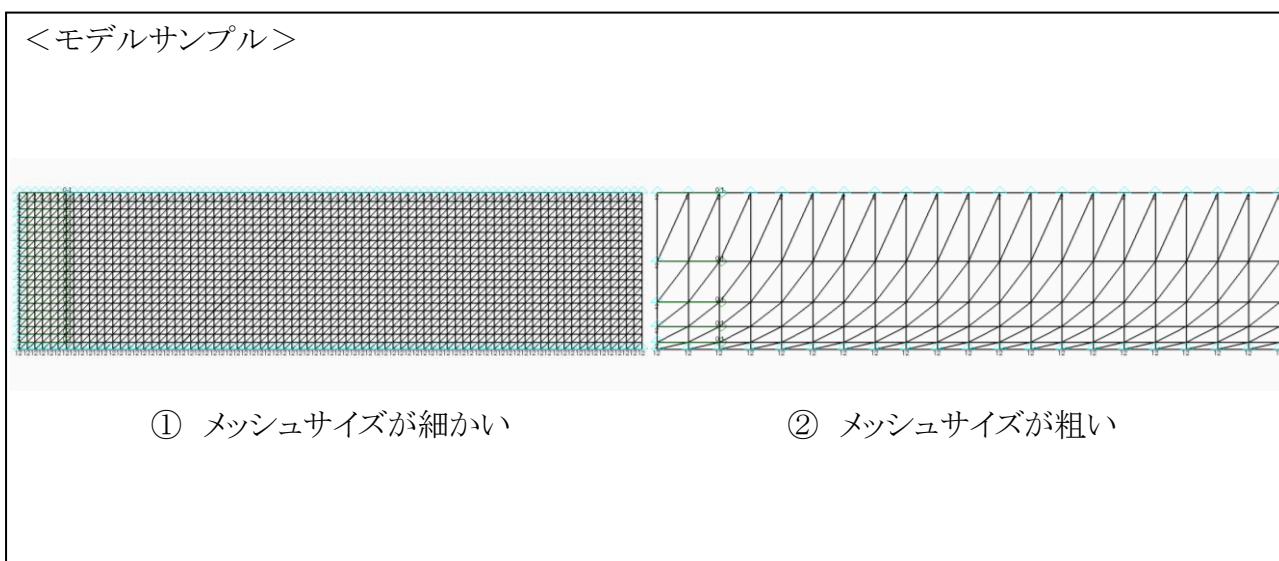
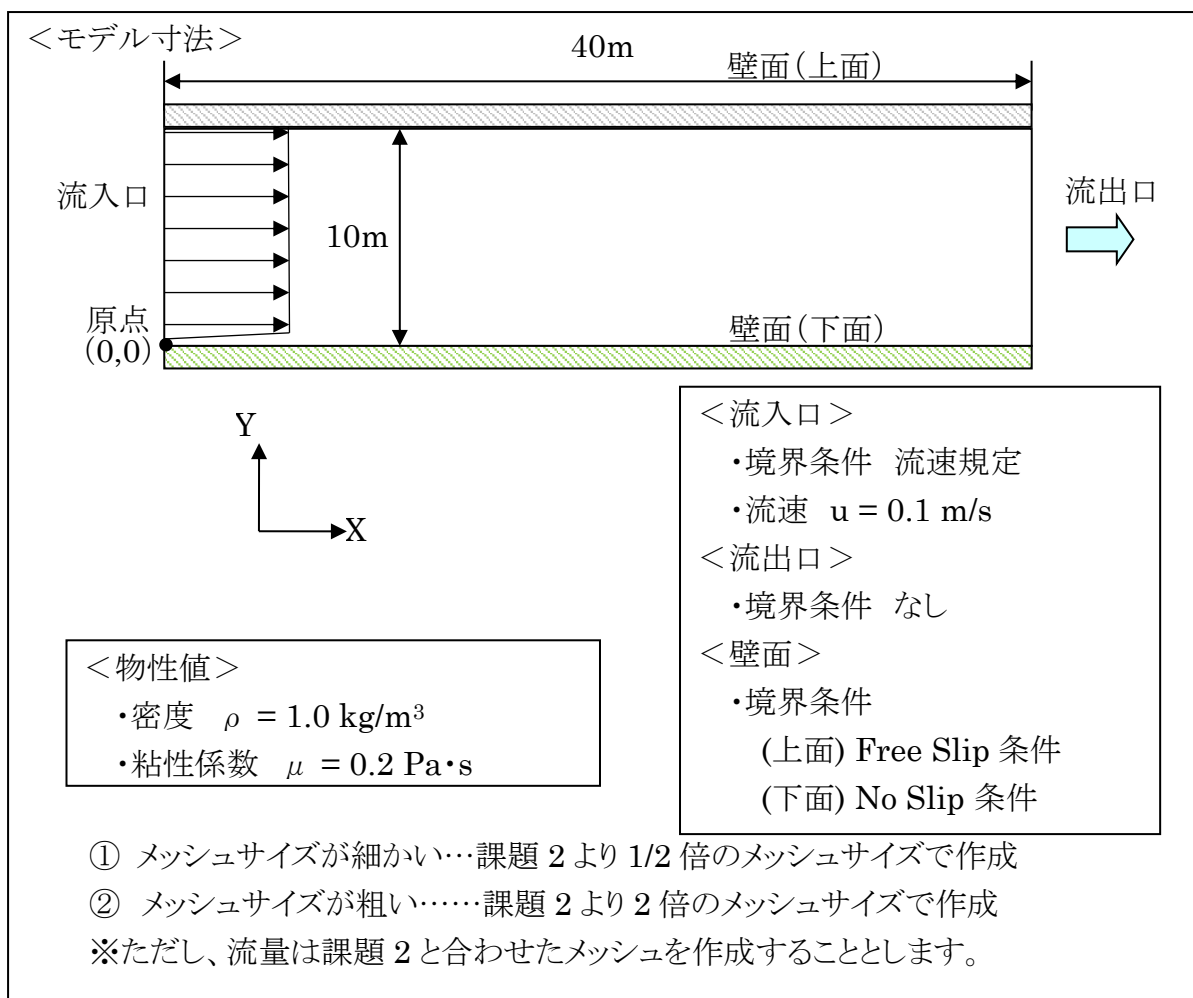
課題 2 で行った理論値の計算式より、原因を考えてみましょう。

課題 3 の圧力勾配	$1.20 \times 10^{-3} \text{ Pa/m}$
課題 2 の圧力勾配	$6.00 \times 10^{-4} \text{ Pa/m}$
課題 3 / 課題 2	2.00

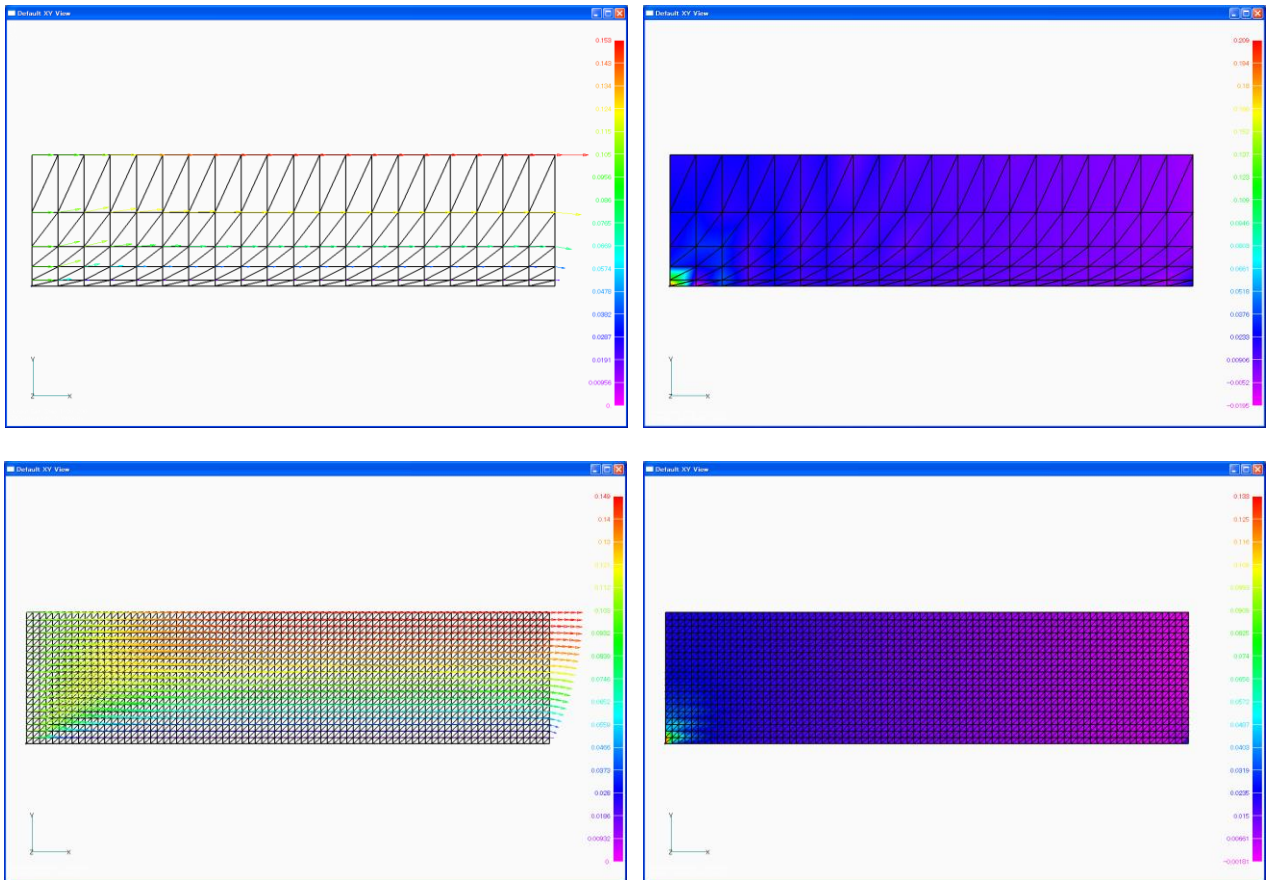
課題 3 の最大流速	0.148 m/s
課題 2 の最大流速	0.148 m/s
課題 3 / 課題 2	1.00

■課題 4 メッシュサイズ比較

ここではメッシュサイズに着目し、課題 2 と同モデル、同条件下で、①メッシュサイズを細かくした場合、②メッシュサイズを粗くした場合の解析を行い、メッシュサイズが変わることによる圧力分布、速度分布の違いを比較してみましょう。

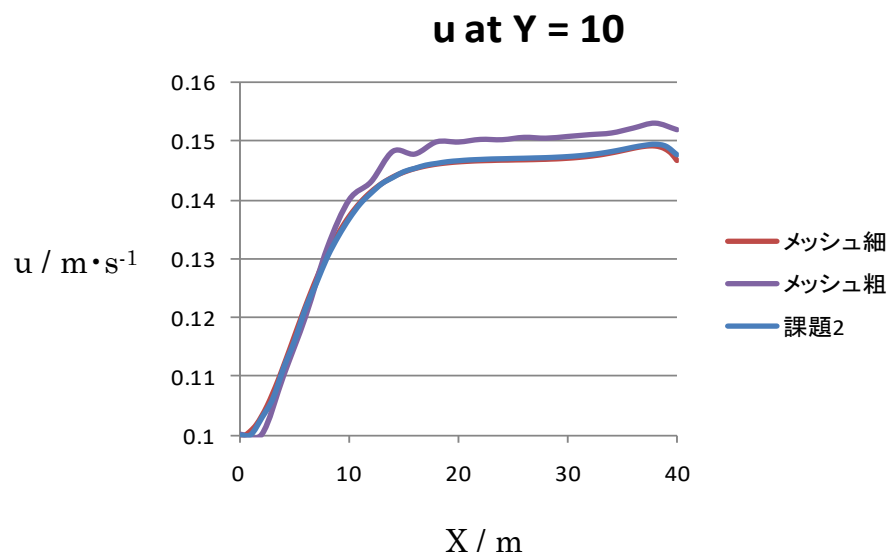


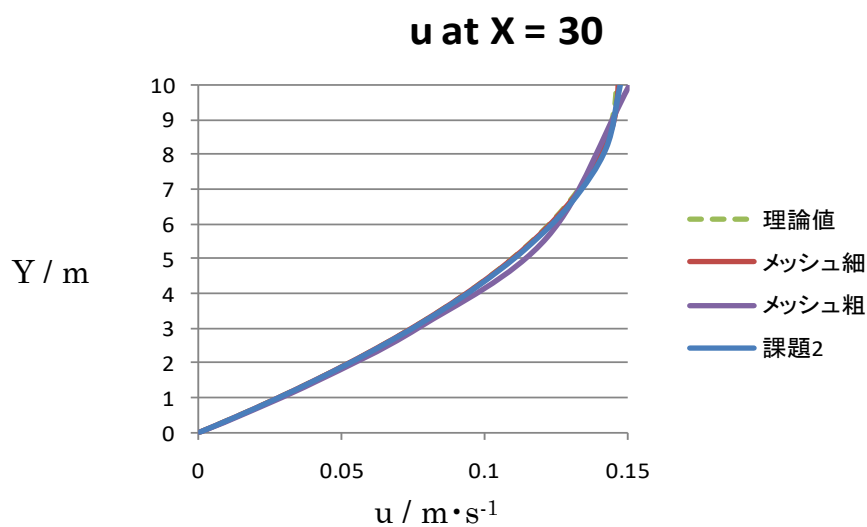
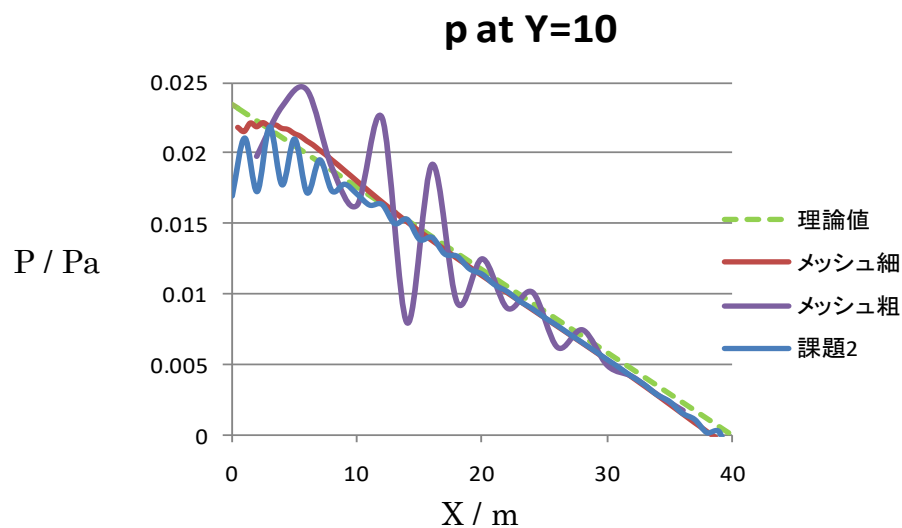
結果比較



課題 2 の結果と比べてみましょう。

流量を全て同じ値にそろえてあることから、理論値は同じであると言えます。





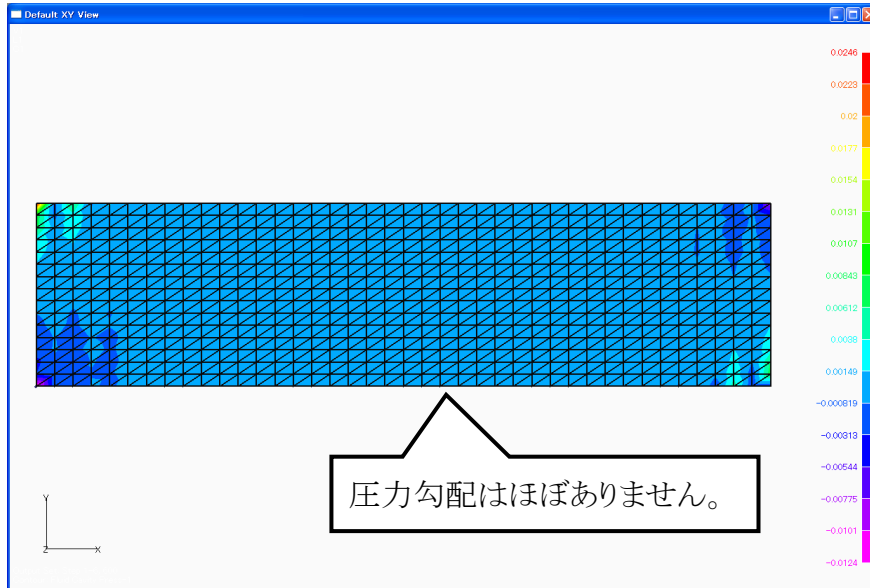
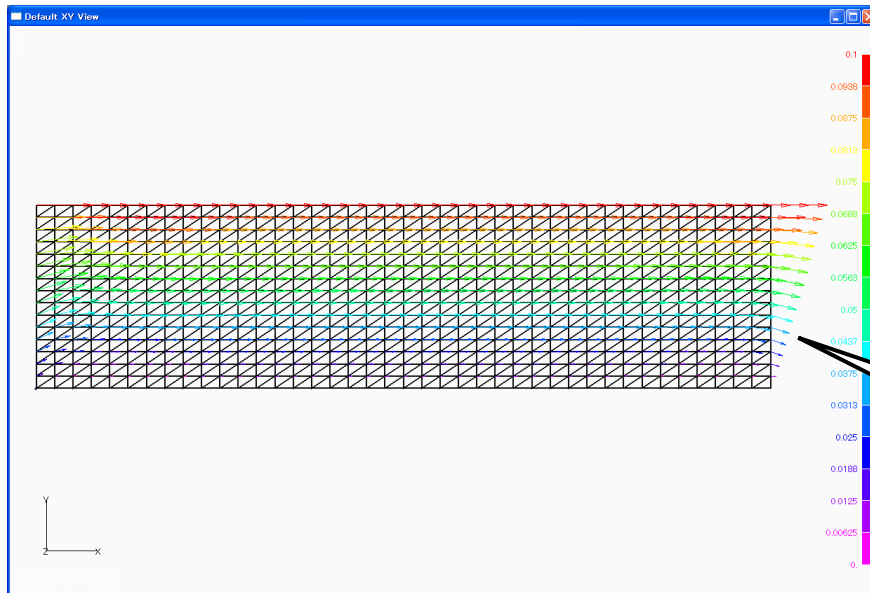
	課題 2	メッシュ細	メッシュ粗
解析から求められた圧力勾配	$6.00 \times 10^{-4} \text{ Pa/m}$	$6.00 \times 10^{-4} \text{ Pa/m}$	$6.42 \times 10^{-4} \text{ Pa/m}$
理論値	$5.86 \times 10^{-4} \text{ Pa/m}$		
誤差	2.29 %	2.41 %	9.56 %

	課題 2	メッシュ細	メッシュ粗
X = 30 m における最大流速	0.148 m/s	0.147m/s	0.151 m/s
理論値	0.147 m/s		
誤差	0.64 %	0.30 %	2.80 %

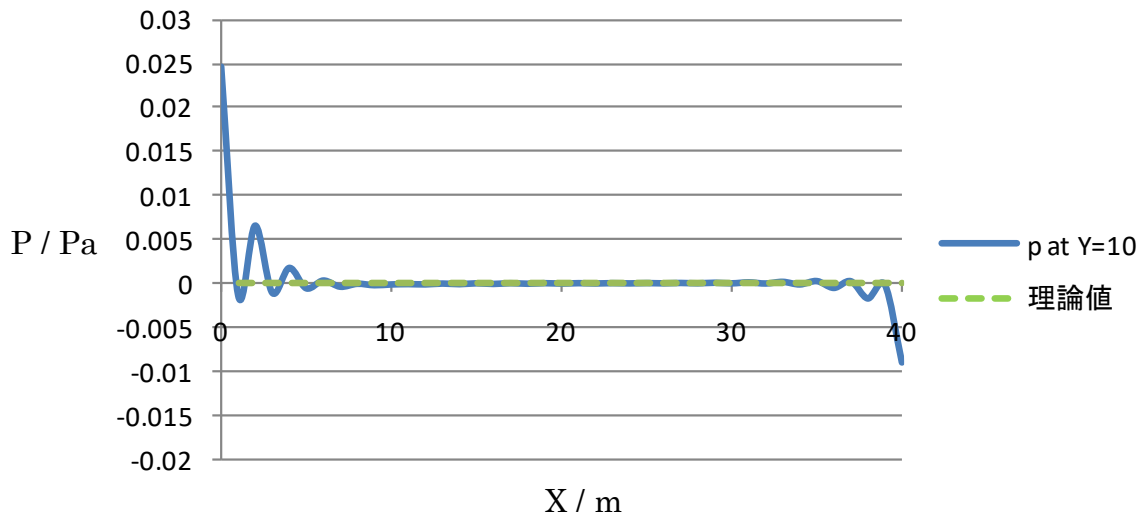
結果比較

解析結果を FEMAP で確認しましょう。

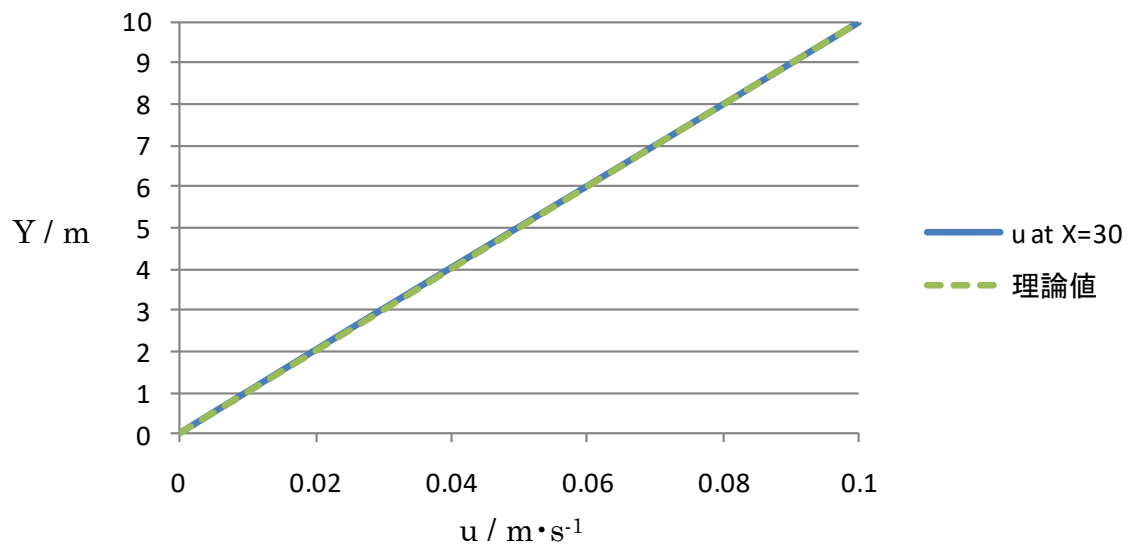
また、課題 2 での理論式の導出を参考に、解析結果と理論値を比べてみましょう。



p at Y=10



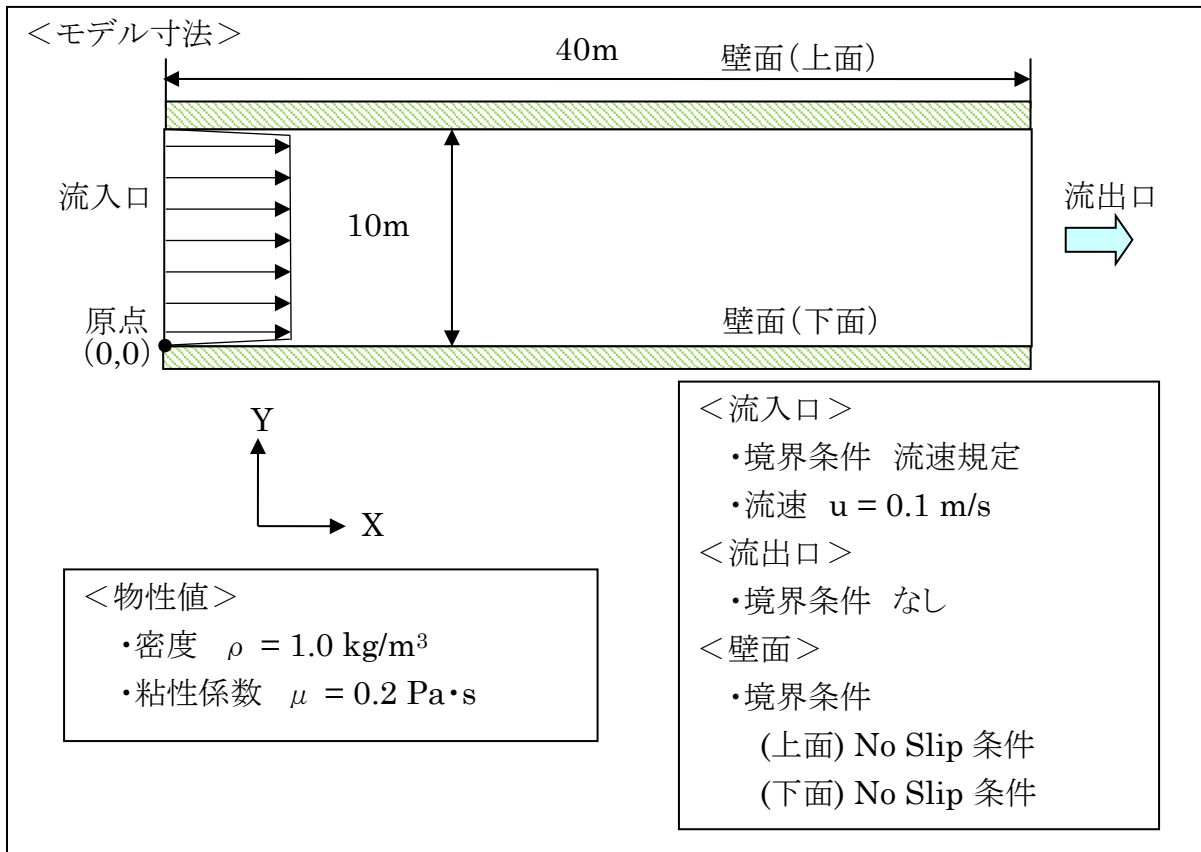
u at X = 30



■演習問題 2次元ポアズイユ流れ

課題 2 から 4 の平板上の 2 次元流れモデルにおいて、上下面とも No Slip 条件の場合を 2 次元ポアズイユ流れと言います。

以下の条件に基づき解析を行い、理論値と比較した結果をレポートにまとめましょう。



- <解析条件>
- ・メッシュモデル作成
課題でのメッシュモデル作成を参考にすること
 - ・メッシュサイズ比較
メッシュサイズが細かい場合、粗い場合を含めた 3 水準を比較
 - ・流速変更
流速を 2 倍にした場合(基準となるメッシュサイズのみで可)
 - ・物性値変更
粘性係数を 2 倍にした場合(基準となるメッシュサイズのみで可)
 - ・理論値との比較

※レポートは Word、Power Point どちらを使用しても構いません。