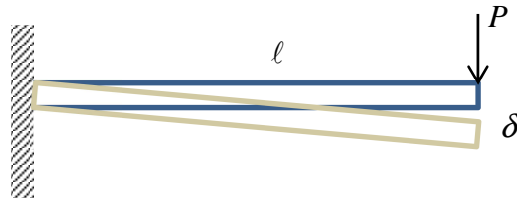


有限要素法による弾性変形解析 (Gmsh+Calculix)

海洋エネルギー研究センター 今井

問題

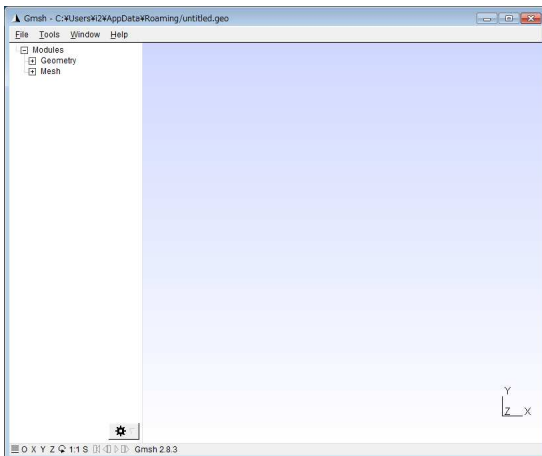
断面が $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 、長さ 20 mm の鋼の一端を固定、他端に点荷重をかけた場合の先端変位および最大応力を求める。



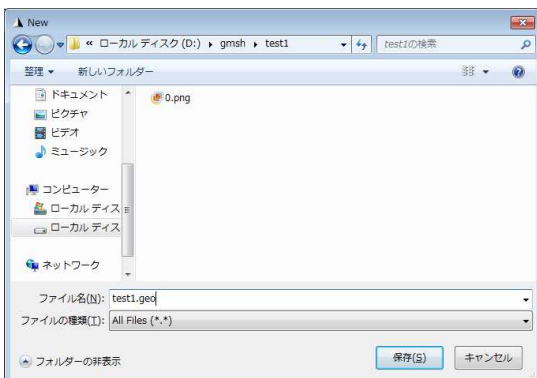
1 形状の作成 (Gmsh)

`c:\gmsh\test1` フォルダを作る。

<http://geuz.org/gmsh/#Download> から 32 ビット あるいは 64 ビット用のソフトをダウンロードする。
2014/1/6 現在の最新版は `gmsh-2.8.3-Windows64.zip`。`c:\gmsh` に解凍する。`gmsh.exe` を実行する。
起動画面は以下ようになる。

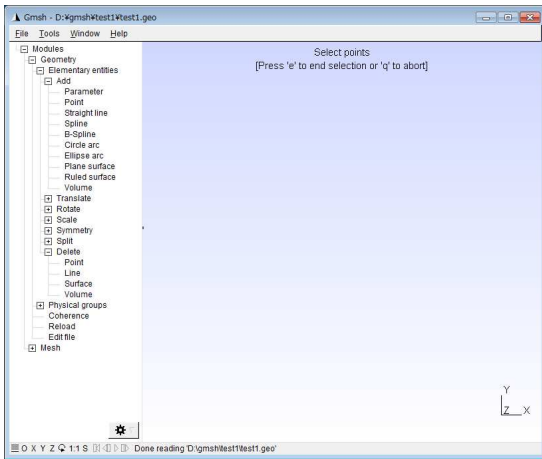


File/New で `c:\gmsh\test1` フォルダに Gmsh のファイル `test1.geo` を保存する。

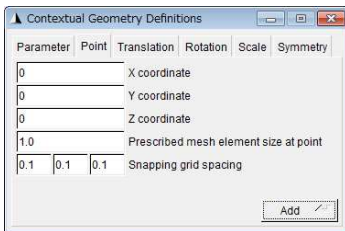


1.1 断面の 4 頂点をつくる。

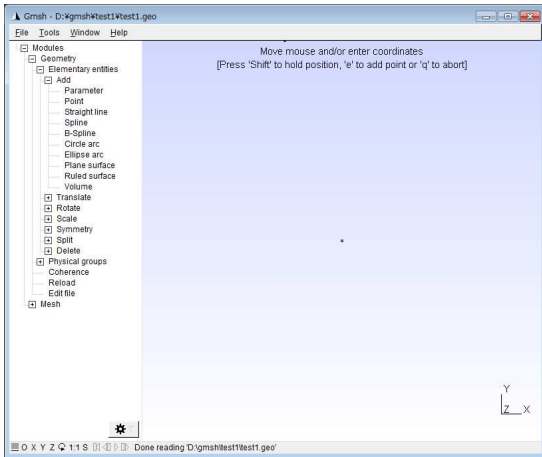
Modules/Geometry/Elementary_entities/Add/Point



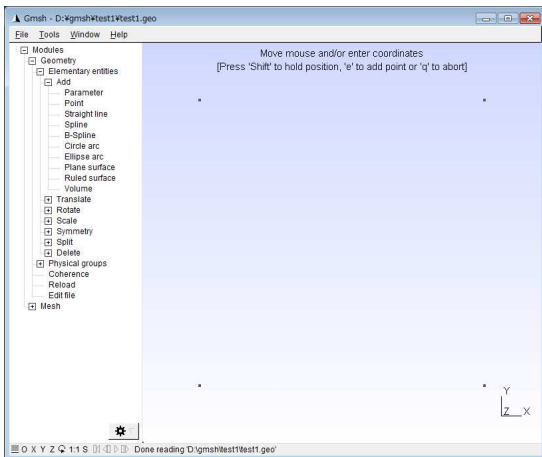
1 番目の点(0,0,0)を入力する。右下の Add ボタンで確定。



点が 1 個できる。



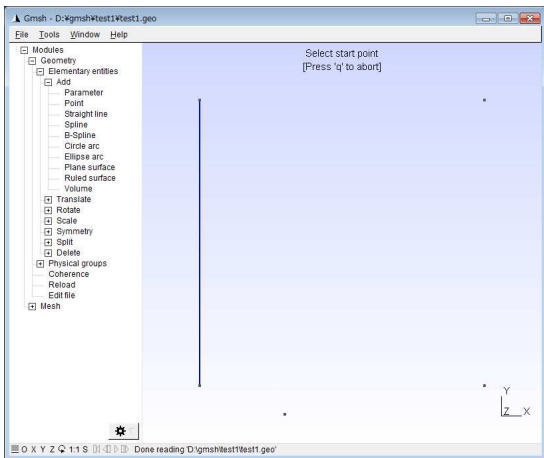
同様に点(1,0,0), (1,1,0), (0,1,0) を確定する。



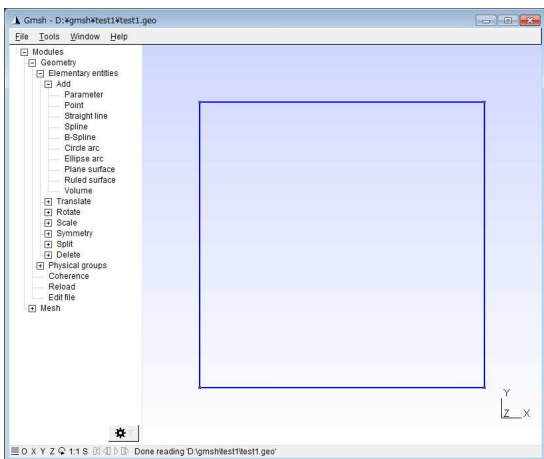
1.2 頂点を4つの線で結ぶ

Modules/Geometry/Elementary_entities/Add/Straight_line

Select start point と表示される。始点と終点を選択すると線ができる。



繰り返して四角形を作る。

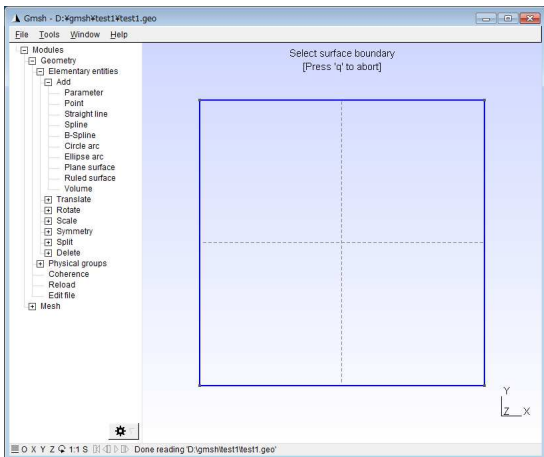


これは枠だけのため、平面に変換する。

Modules/Geometry/Elementary_entities/Add/Plane_surface

Select surface boundary と表示されるので画面上の4辺をクリックする(4辺全てが赤色に変わる)。

キーボードの”E”で終了。

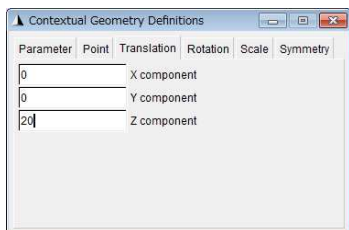


上図のように、面が作成されたことを示す点線が入る。

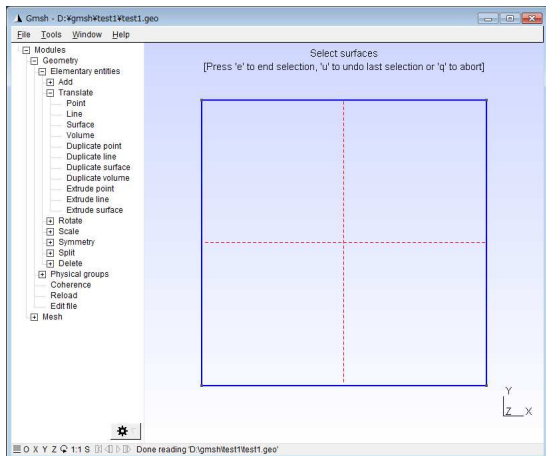
1.3 平面を押し出して角柱を作る。

Modules/Geometry/Elementary_entities/Translate/Extrude_surface

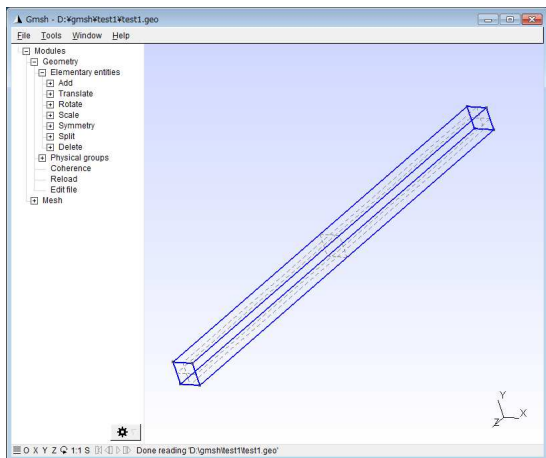
z 方向に 20 を入力。



面の中の点線を選択し（赤くなる）、キーボードの”E”で終了。



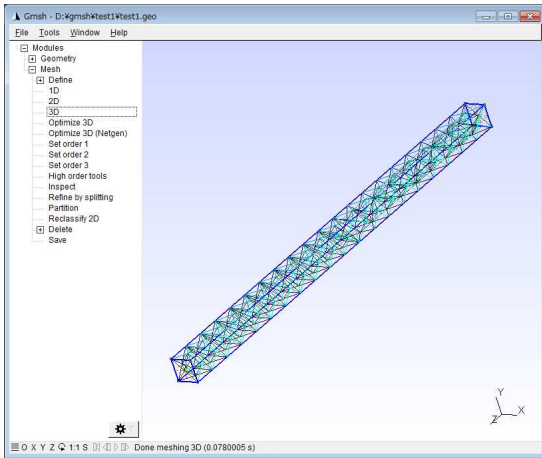
下図のように長さ 20 の角柱が生成される。



1.4 三角錐（テトラ）要素分割

Modules/Mesh /3D

自動的にテトラ要素に分割される。



File/Save As で **Abaqus INP形式**、test1.mesh の名前で保存する。

File/Save As で test1.geo を保存する。test1.geo は物体形状ファイルである。

2. Calculix ファイルの作成

2.1 節点要素 mesh ファイルの作成

保存した test1.mesh ファイルをエディタで開き、以下の通り修正する。緑字はコメント。

```
*Heading
*Node ,NSET=Nall      (下記修正 1) Nall という名前をつける
:
*Element , type=T3D2, ELSET=Line1      線要素
*Element , type=T3D2, ELSET=Line2
*Element , type=T3D2, ELSET=Line3
:
*Element , type=T3D2, ELSET=Line22
*Element , type=CPS3, ELSET=Surface6   面要素
*Element , type=CPS3, ELSET=Surface15
:
*Element , type=CPS3, ELSET=Surface28
:
*Element , type=C3D4, ELSET=Volume1   体積要素。Volume1 という名前がついている。
:
```

削除（下記修正 2）

上記ファイルを修正する。

1. *Node を*Node,NSET=Nall に追加修正
2. 線要素と面要素は解析に不要のため削除する（上図）。

2.2 Calculix 入力ファイル (INP) の作成

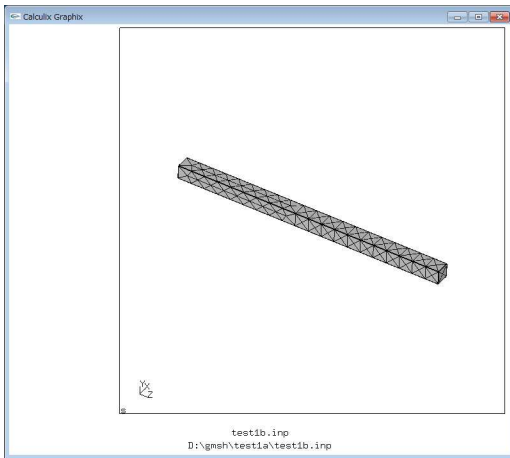
エディタで test1b.inp を新規作成し、以下記述する。緑字はコメントのため入力不要

```
*INCLUDE, INPUT=test1.mesh   メッシュファイルを読み込む
*MATERIAL, Name=steel        材質を定義する
*ELASTIC
206000, 0.3   ヤング率 (N/mm2), ポアソン比
*SOLID SECTION, Elset=Volume1, Material=steel   要素群 Volume1 に材質適用
*STEP   計算ステップ開始
*STATIC
*BOUNDARY   境界条件の指定
1,1,3,0     節点 1 の方向 1~3 の変位をゼロ
2,1,3,0
3,1,3,0
4,1,3,0
*CLOAD      荷重の指定
7,2,-1.0    節点 7 の方向 2 に -1.0N の荷重をかける
8,2,-1.0
*NODE FILE   節点の変位情報を test1.frd に出力
U
*EL FILE     要素の応力情報を test1.frd に出力
S, E
*END STEP   計算ステップ終了
```

3.Calculix 計算実行

Calculix を起動して C:\gmshtest1 フォルダに cd コマンドで移動

cgx -c test1.inp メニューから Viewing/Toggle Element Edges を選択。入力要素分割の様子が表示される。エラーなく表示されることを確認する。



確認後 cgx 終了。

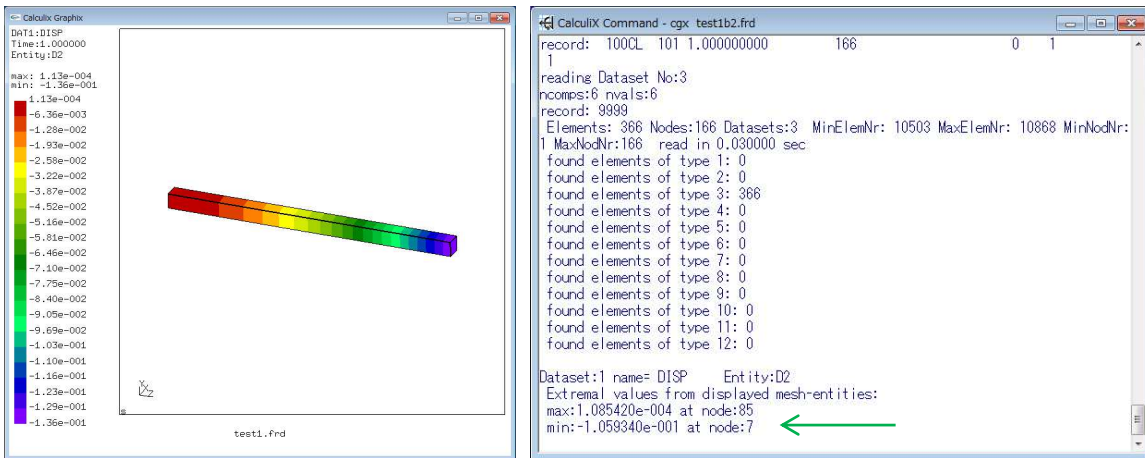
ccx test1b

FEM 計算実行

cgx test1b.frd

計算結果の表示。

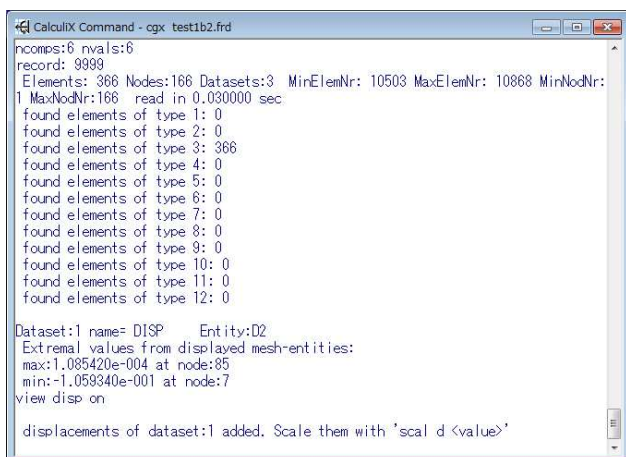
y 方向 (方向 2) の変位を表示するため、メニューから Datasets/Disp を選択。
さらにメニューから Datasets/Entity/D2 を選択。



Y 方向の変位は節点 7 において -0.11mm である。Y マイナス方向に 0.11mm 変位することを示す。

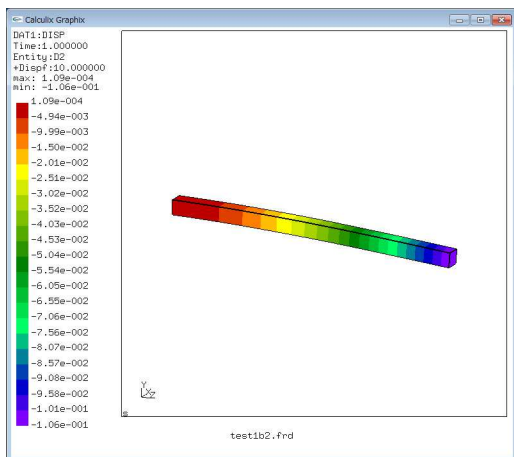
変位を拡大して表示する。キーボードで以下コマンドを入力

view disp on

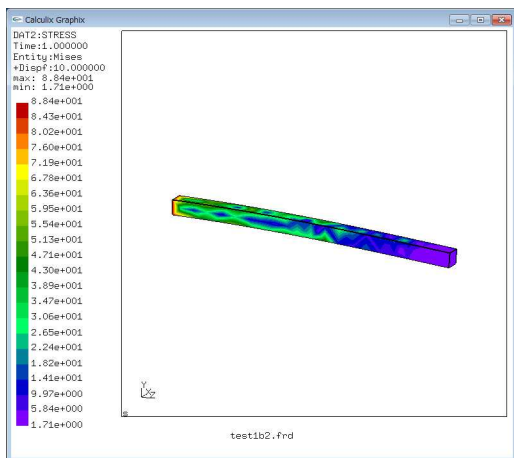


変位倍率を入力して変位を拡大表示する。

scal d 10



変位拡大した状態で応力を表示する。メニューから Datasets/Stress を選択。メニューから Datasets/Entity/Mises を選択。固定端で 88.4 N/mm² が発生する。



4.結果の検証

自由端の変位の理論値 δ (mm) は次式で表される。

$$\delta = \frac{P\ell^3}{3EI} \quad (1)$$

P は荷重 (N)、 ℓ は角柱長さ (mm)、 E はヤング率であり、鋼の場合 206 GPa ($= 206 \times 10^9 \text{ N/m}^2 = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$) である。 I は断面 2 次モーメントであり、長方形断面の場合次式で表される。

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

b は断面幅 1 mm、 h は断面高さ 1 mm である。

	単位	値
荷重 P	N	2
はり長さ ℓ	mm	20
ヤング率 E	N/mm ²	206000
断面 2 次モーメント I	mm ⁴	0.083
先端変位 δ	mm	0.31

5.結果の評価

FEM 構造解析における代表的な評価方法

- ・ 剛性の指標として変位を評価
- ・ 強度の指標として応力を評価

変形形態、変形量および母材応力値が予測と合っているかどうかチェックする。[弾性力学、材料力学の知識が必須](#)

- ・ 変位や応力のオーダーから荷重条件が間違っていないかチェックする。
- ・ 拘束条件を間違えた場合、明らかに変な方向に変形。応力分布がおかしい。

精度を上げるために

- ・ 1) 要素数の増加 2) 二次要素 (またはより高次な要素) の導入
- ・ → 計算時間の増加: いかに精度と計算コストのバランスをとるかが問題

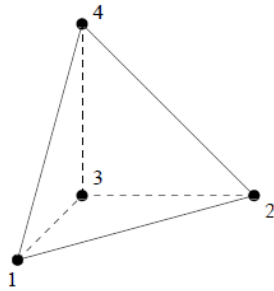
応力集中部位で起こる FEM の問題

- ・ 要素サイズにより応力値が変わる。
- ・ 要素サイズを細かくしていくと応力集中が際限なく大きくなる。

6. 2次要素による再計算

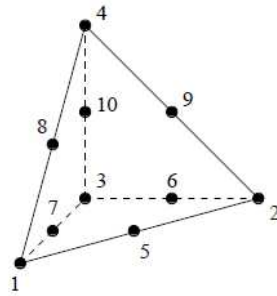
6.1 Gmsh

- ・ Gmsh で test1.geo を開く。
- ・ Modules/Mesh /3D
- ・ Modules/Mesh /Set order 2 二次要素の指定
- ・ File/Save As Abaqus INP 形式、 test2.mesh 名で保存



test1.mesh (一次要素)

test2.mesh (二次要素)



166 節点、366 要素

861 節点、366 要素

6.2 入力ファイルの修正

- ・ test2.mesh を 2.1 節と同じようにエディタで修正。
- ・ test1b.inp をコピーして test2b.inp の名前をつけて保存。test2b.inp 中の入力メッシュファイルを test2.mesh に変更。

6.3 Calculix 計算実行を 3 節と同様に実行

- ・ ccx test2b
- ・ cgx test2b.frd

変位 (下左) : 最大変位は 0.336mm であり、理論値 (0.31) により近づいた。

応力 (下右) : 応力分布がより滑らかになった。応力分布の対称性が向上した。最大応力 511N/mm²。

