

これから Marc を使う方へ

効率的な解析モデルの作成過程

佐藤 多佳子*1 山下 毅*2

1 はじめに

センターでは、有限要素法解析プログラムMSC.Marc*3（以下 Marc）のサービスを行っています。Marcは、線形／非線形解析、大変形解析、接触解析、定常／非定常熱伝導解析を行う有限要素法（Finite Element Method：FEM）解析ソフトです。大学での研究においては、機械系や建築系をはじめ、医療系からの利用も増え、幅広い分野で使われています。

Marcをはじめとする構造解析ソフトは、一般的には工業製品の設計・開発時の試作や実験の代わりに使われています。このような、工業製品を設計・開発する際にコンピュータによる解析やシミュレーションを活用することは、そのためのツール（ソフト）も含めて、CAE（Computer Aided Engineering）と呼ばれています。近年はソフトやハードの機能も向上し、より使いやすくなってきていますが、やみくもに解析を行っただけでは有益な結果が得られないのが、これら CAE ソフトの難しいところです。

うまくいかない事例としてよくあるのが、はじめから実物通りの複雑な形状モデルによって解析を行ってしまうというものです。はじめから実物の形状そのままにモデルを作成し解析しようとする、

- 複雑な形状のため CAD ソフトで作図するが、データ受け渡しが失敗してしまう
- 大きなモデルを解析することになるため、メモリ不足で計算できない
- 結果に不具合があっても、様々な要因があるため切り分けが難しく、解決方法を見つけにくいなどの理由で解析がうまくいかず、解析モデルの作成とテスト計算に膨大な時間をかけているのに研究がなかなか進まない、ということになりがちです。

このような問題ができるだけ生じないように解析を順調に行うには、まず簡略化したモデルから解析を始め、徐々に複雑にしていくという手順が効率的です。

*1 東北大学情報シナジーセンター システム運用係

*2 東北大学工学研究科博士後期課程

*3 MSC.Software社（<http://www.mssoftware.co.jp>）

そこで本稿では、有限要素解析における典型的な解析プロセスに沿って、効率的な解析モデル作成過程について具体的な例を挙げ説明します。

2 有限要素解析における解析プロセス

有限要素解析における典型的な解析プロセスの一例を示します。

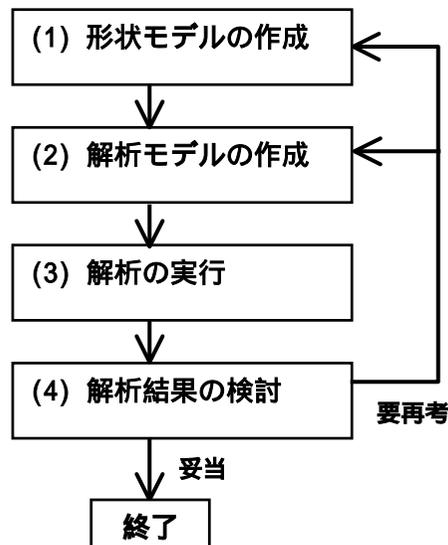


図 2-1 有限要素解析による解析プロセスの一例

(1) 形状モデルの作成

解析対象となる構造物の形状を作成します。Marcで解析を行う場合には、MSC.Marc mentat^{*4}（以下 mentat）やMSC.Patran^{*5}（以下 Patran）など、解析の実行を行うソフト（ソルバー）用の解析命令コードを作成できるプリポストプロセッサ（以下 プリポスト）を利用して形状を作成します。

CADソフトで形状を作成する場合は、IGESやSTEPなどの汎用データフォーマットでプリポストに受け渡すこととなりますが、CADの独自の機能を利用して作図を行ったり、形状がとても複雑な場合などに、ギャップや面の欠損などの不具合が起きることがあります。これらのことは、CADでの作図時に注意することで、ある程度防ぐこともできます。

^{*4} ^{*5} MSC.Software社（<http://www.mssoftware.co.jp>）

(2) 解析モデルの作成

解析すべき力学現象をモデル化します。ここでの判断により解析の大部分が決定するので、適切な解析モデルを作成するには工学知識が重要となります。

まず、有限要素法を適用するために形状を要素で分割します(この作業は「メッシュを切る」などと言われます)。要素の形状は、モデルが平面の場合は三角形や四辺形、立体の場合は四面体や六面体を用いることが一般的です。

ここで、要素に何を選擇するかで計算の精度が変わってきます。四辺形や六面体以上でメッシュを切ることができれば精度的に問題はありますが、形状によっては四辺形(六面体)要素での分割が難しいことがあります。その場合は、三角形(四面体)要素での分割になりますが、積分点が少ない三角形一次要素および四面体一次要素ではあまり精度がよくなく、三角形二次(四面体二次)かそれ以上を使うことがよいとされています。

次に、これらの作成された要素に対して、材料特性、荷重・拘束条件を設定します。

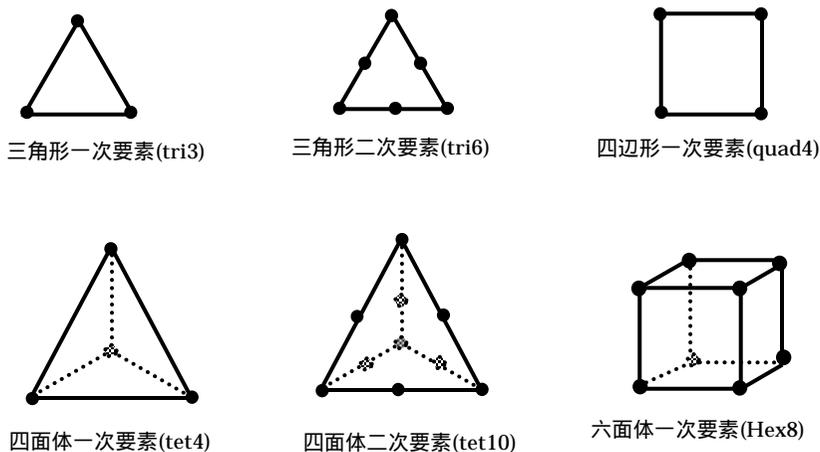


図 2-2 要素の種類の一例

(3) 解析の実行

Marc での実行方法については、センターホームページ「MSC.Marc」に詳細がありますので、<http://www.cc.tohoku.ac.jp/service/AP/soft/marc.html> を参照ください。

(4) 解析結果の検討

実行結果は、プリポストの mentat や Patran 上で、さまざまな方法により表示することができます。ここから読み取った情報をもとに解析結果の検討を行います。この判断は(2)での作業でなされた判断と密接に関係しているため、結果の検討もまた工学知識が必要な作業です。また、解析モデルと解析結果との対応関係を見極めるための経験も必要となります。

この後(1)または(2)に戻り、解析条件を修正して解の精度を上げ、意図する結果が得られるまで何度か繰り返します。

次に具体的な解析結果の検討と解析モデルの修正についての例をあげます。

3 解析プロセスの具体例

3 - 1 解析内容

サイコロの1の目の面を平面として、この面に対して球形の工具によって1の目を付ける際に、他の面でそれぞれの目があることによって変形量にどのような影響があるか検証します。

- 本体形状は、立方体で大きさは 20mm × 20mm × 20mm
- 材料特性は、ヤング率 1500Mpa、ポアソン比 $\nu = 0.3$ の弾性体
- 1の目の印をつける工具は半径 4mm の球形の剛体
- 他の目に既につけられている目は、半径 2mm の半球体をくり抜いたもの

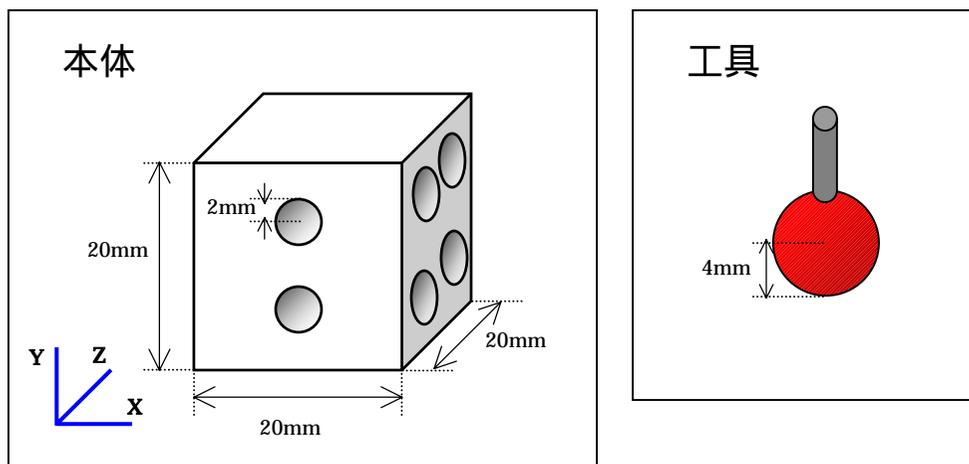


図 3-1 本体と工具の形状

拘束条件と荷重

- 6の面上の節点に対し、x、y、z軸方向の移動を拘束した上で、工具をサイコロの1の面との接触位置から、y軸の負の方向に1mm移動させる
- 加工されるサイコロの面は、工具との接触面が考慮されながら変形する

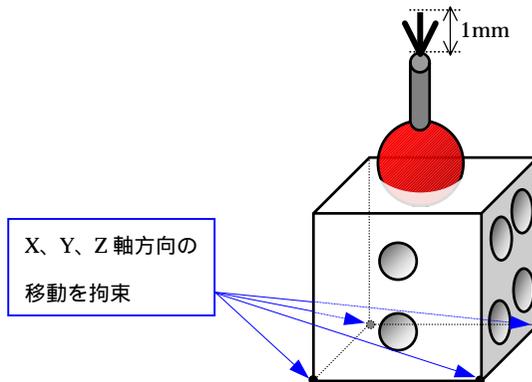


図 3-2 拘束条件と荷重

解析結果の比較は、y軸方向の変位を示した三次元の等高線図(コンター図)で行うこととします。

3 - 2 プロセス1 単純な形状

まず、他の目が見つけられていない単純な立方体での解析を行います。これにより「材料特性」、「拘束条件」、「剛体との接触による変形」の設定が妥当であることを確認します。

この場合モデル形状が単純なので、六面体要素での分割が可能です。そのため要素数が比較的少なく、計算時間もあまりかからずに済みます。

ここで、形状の作成と要素の分割には、MSC.Patranを使用します*⁶。MSC.Patranは、mentatと比べCAD機能、特にソリッドモデルの作成が容易に行えるという点で優れており*⁷、自動メッシュ生成機能も強力、という特長があります。

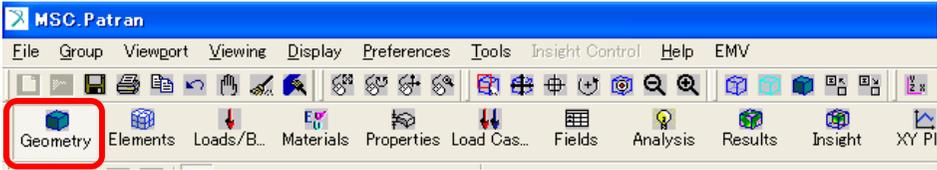
MSC.Patranでの形状作成の手順を以下に示します。

*⁶ 利用には申請が必要です。システム運用係(s-unyo@isc.tohoku.ac.jp)までお問い合わせください

*⁷ CAE Solid Modelingオプションを追加した場合

本体： 一辺が 20mm の立方体で、座標(0,0,0)を原点とする

Main メニューの  [**Geometry**] をクリック

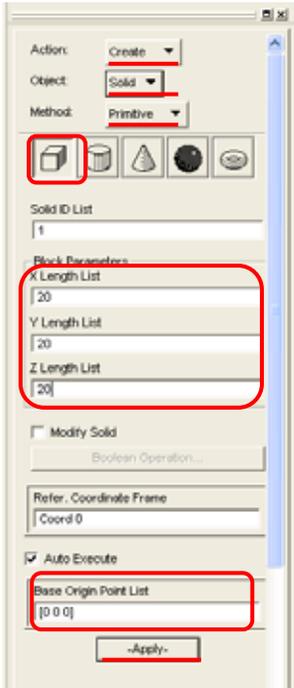


Action:
Object:
Method:

 **Block** を選択

X Length List
Y Length List
Z Length List

Base Origin Point List



立方体 (Solid1) が作成されま

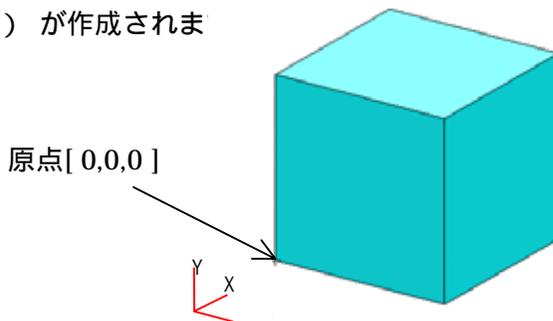


図 3-3 立方体 (Solid1)

工具： 半径 4mm の球形で、中心の座標は (10,24,10)

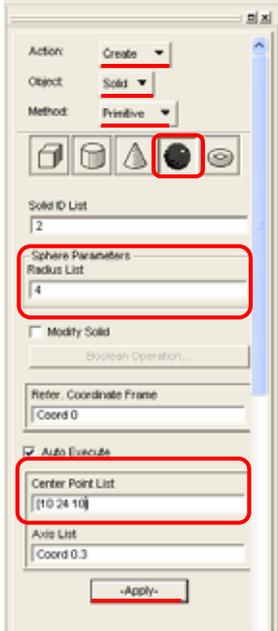
[Geometry]、Action: **Create**、Object: **Solid**、Method: **Primitive**

 Sphere を選択し、

Radius List: **4**

Center Point List: **[10 24 10]**

Apply



球体 (Solid2) が作成されます。

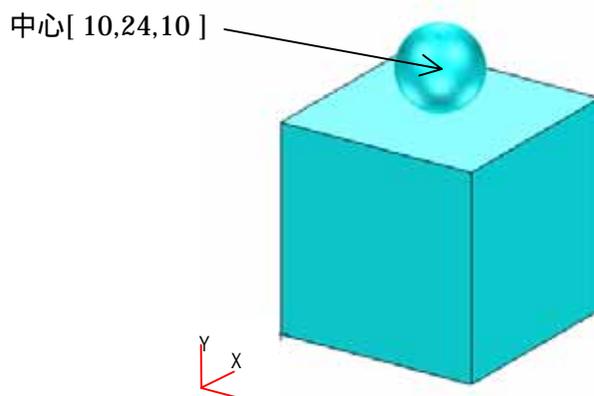


図 3-4 プロセス 1 の形状モデル

次に作成した形状を六面体一次要素で分割します。

Method : **Primitive** で作成した立方体を、六面体要素に分割するためには TriParametric という形式に変換する必要があります。

[Geometry]

Action: **Edit**

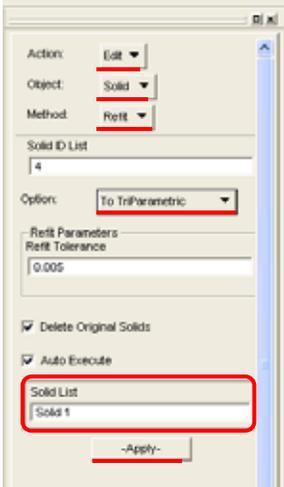
Object: **Solid**

Method: **Refit**

Option: **TriParametric**

Solid List に、立方体 (Solid1) を指定
(Solid List 内にカーソルがある状態で
立方体をクリックする)

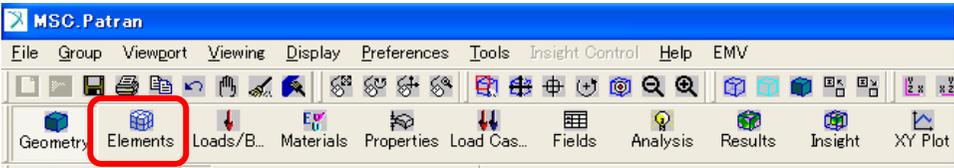
Apply



立方体が TriParametric 形式に変換され、Solid3 となりました。

立方体を六面体一次要素で分割します。

Main メニュー  **[Elements] をクリック**



Action: **Create**

Object: **Mesh**

Type: **Solid**

Element Shape: **Hex**

Mesher: **ISOMesh**

Topology: **Hex8**

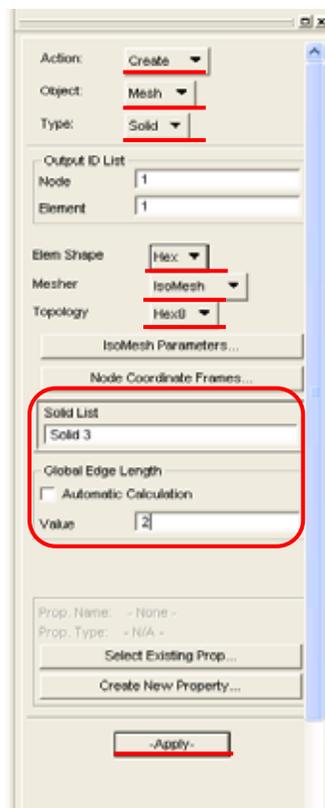
Solid List に、本体の立方体を指定
(Solid List 内にカーソルがある状態で
立方体をクリックする)

Automatic Calculation を off

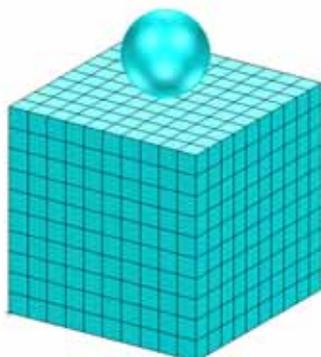
Global Edge Length

Value: **2**

Apply



立方体が六面体一次要素で分割されました。



要素数 1,000

節点数 1,331

図 3-5 プロセス 1 六面体一次要素での分割

拘束条件を設定、荷重の設定、接触の設定を行った後、Marc インットファイル (.dat ファイル) を出力し、解析を実行します。

解析結果は以下の様になりました。変位量をコンター図で表しています。

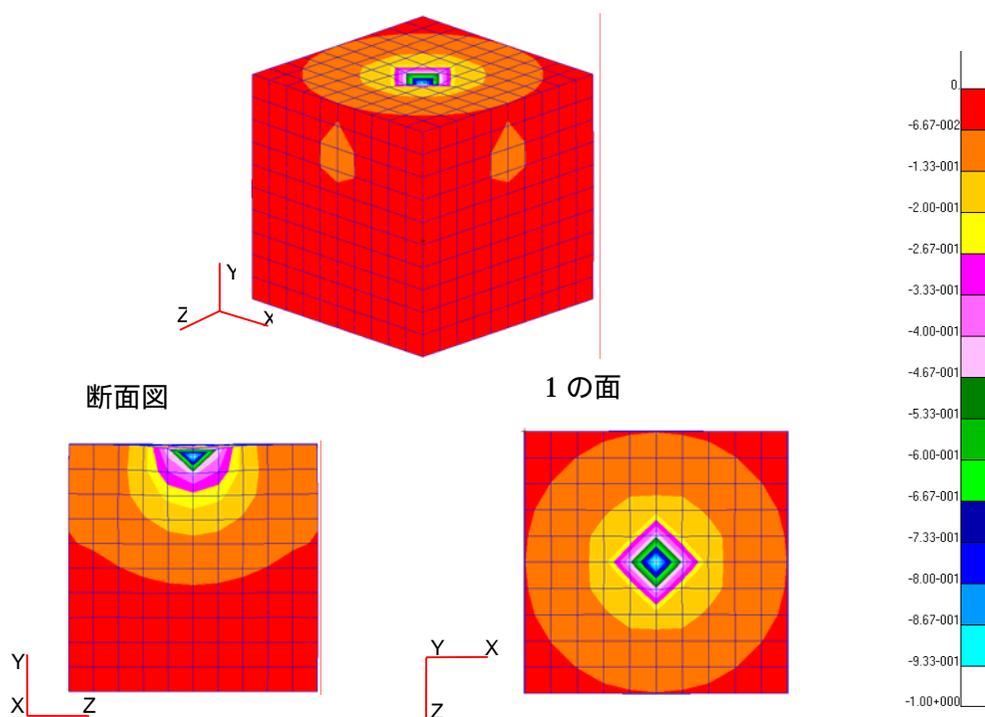


図 3-6 プロセス1 解析結果

このモデルの解析により、「材料特性」、「拘束条件」、「剛体との接触による変形」の設定が妥当であることが確認できました。次は、他の面の2から6までの各目をつけた状態で解析してみることにします。

3 - 3 プロセス2 各目をつけた形状

2から6の各目がある形状での解析により、「四面体二次要素作成方法の確認」、「詳細メッシュの必要部位の推定」を行います。まずメッシュを荒く切って様子を見ることで、全体に詳細メッシュを作成することによる解析コストの増加を抑えることができます。

本体形状と工具の形状は3 2と同じものを使用します。各目は、Patran のソリッドモデルのブーリアン演算機能を用いて、立方体から半球部分を削除することにより作成します。

各目の半径は 2mm で、中心の座標はそれぞれ以下のとおりです。

2 の目 : (0,5,10),(0,15,10)

3 の目 : (5,5,0),(10,10,0),(15,15,0)

4 の目 : (5,5,20),(5,15,20),(15,5,20),(15,15,20)

5 の目 : (20,5,5),(20,5,15),(20,10,10),(20,15,5),(20,15,15)

6 の目 : (5,0,5),(5,0,10),(5,0,15),(15,0,5),(15,0,10),(15,0,15)

2 の目をつける手順を示します。

[Geometry], Action: **Create**, Object: **Solid**, Method: **Primitive**

 Sphere を選択し、

Radius List: **2**

Center Point List: **[0 5 10]**

Apply

Center Point List: **[0 15 10]**

Apply



半径 2 の球体が、
2 の面上に作成されます。

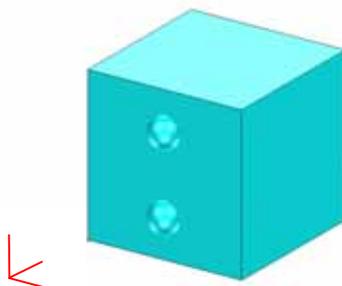


図 3-7 立方体と球体

立方体から球体部分を削除します。

[Geometory]、Action: **Edit**、Object: **Solid**、Method: **Boolean**

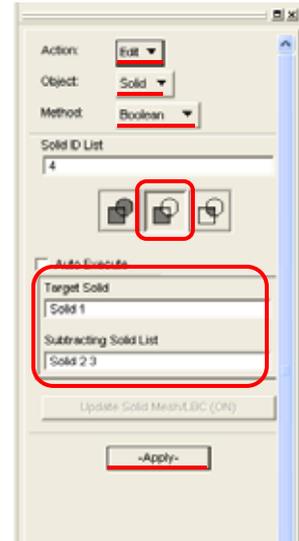


Subtract を選択し、

Auto Execute を **off**

Target Solid に本体の立方体を、
Subtracting Solid List に 2 つの球体を指定
(Shift キーを押しながらクリックすることで
複数選択が可能)

Apply



2 の面にサイコロの目が作成されます。

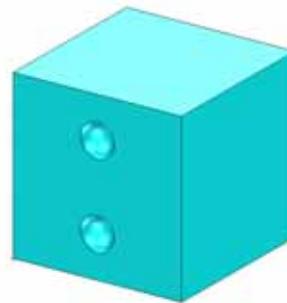


図 3-8 立方体から球体を削除した状態

3 から 6 の目も、同様の手順で作成します。

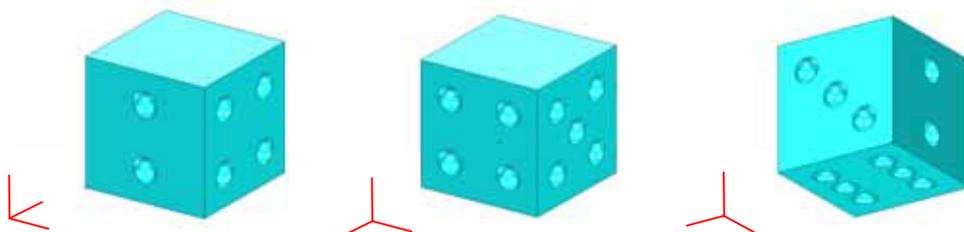


図 3-9 2 から 6 の目を作成した状態

次に要素分割を行います、各目をつけたことにより六面体要素での分割が困難になってしまったので、四面体二次要素で分割します。

[Elements]、Action: **Create**、Object: **Mesh**、Type: **Solid**

Element Shape: **Tet**

Mesher: **TetMesh**

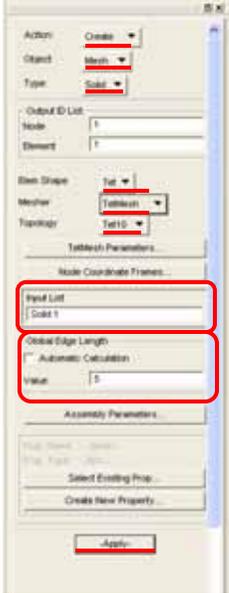
Topology: **Tet10**

Solid List に、本体の立方体を指定

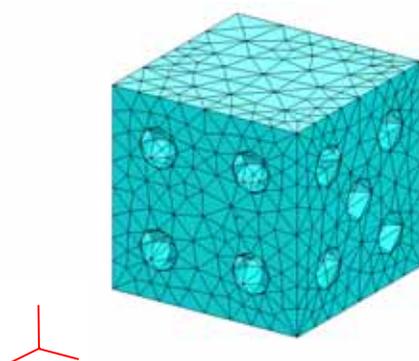
Automatic Calculation を off

Global Edge Length
Value: **5**

Apply



各目がある形状を、四面体二次要素で分割しました。



要素数 9,445
節点数 14,047

図 3-10 プロセス2 四面体二次要素での分割

解析結果は以下のようにになりました。

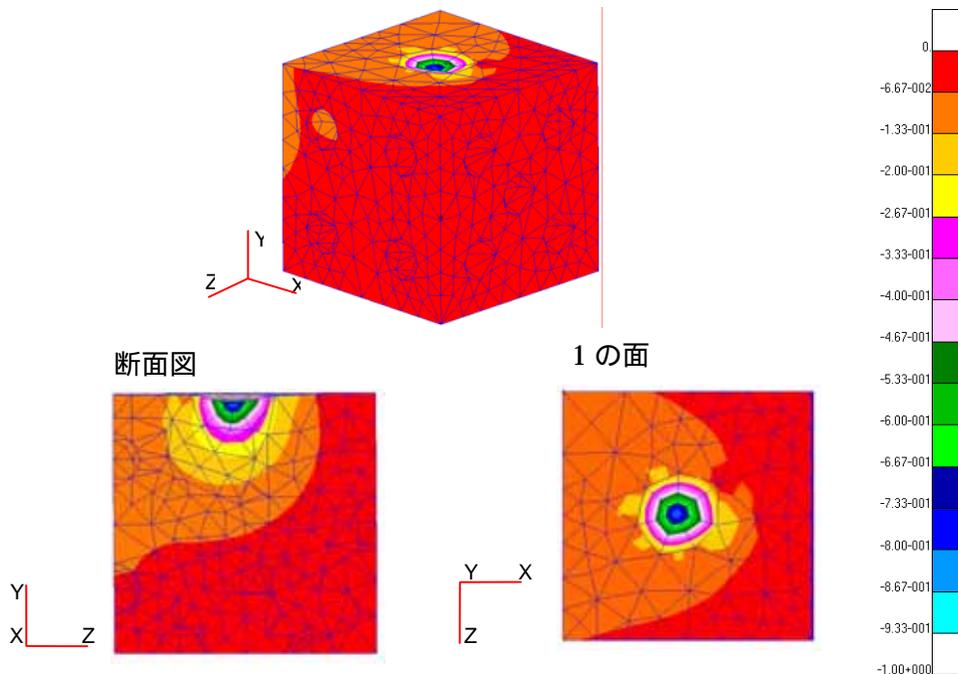


図 3-11 プロセス2 解析結果

メッシュ密度が大きいため、各面の目の形状を再現できていません。また1の面の変形が不均一です。次に、必要なところのメッシュ密度を上げる方法を示します。

3 - 4 プロセス3 必要部分のメッシュ密度を上げる

プロセス2により、1の面および各面の目の部分の要素分割を細かく行う必要があることがわかりましたので、要素分割をやり直します。

一部の要素を細かくして要素分割を行う手順を示します。

まず、1の面および各目の曲面を、密度を上げた二次元要素 (Surface メッシュ) で分割します。

[Elements]、Action: **Create**、Object: **Mesh**、Type: **Surface**

Element Shape: **Tria**

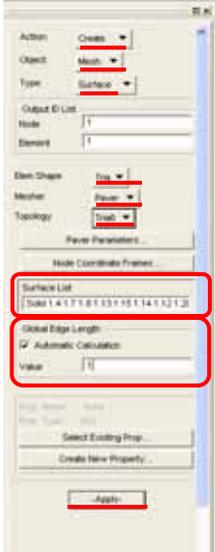
Mesher: **Paver**

Topology: **Tri6**

Surface List に、1 の面および各目の曲面を指定

Global Edge Length
Value: **1**

Apply



1 の面と各目の曲面に、密度の高い Surface メッシュが作成されます。

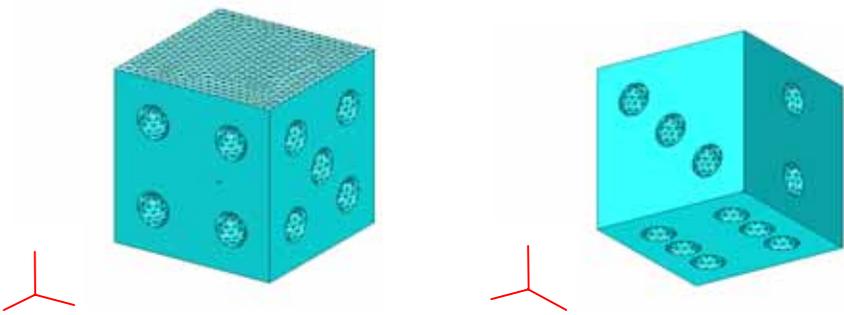


図 3-1 2 一部に密度の高い Surface メッシュを作成

この二次要素の節点を基準として、三次要素(四面体二次要素)で分割します。

[Elements]、Action: **Create**、Object: **Mesh**、Type: **Solid**

Element Shape: **Tet**

Mesher: **TetMesh**

Topology: **Tet10**

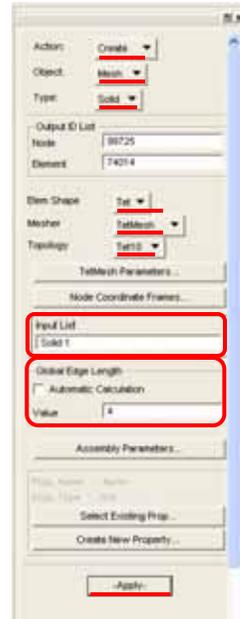
Solid List に、本体の立方体を指定

Automatic Calculation を off

Global Edge Length

Value: **4**

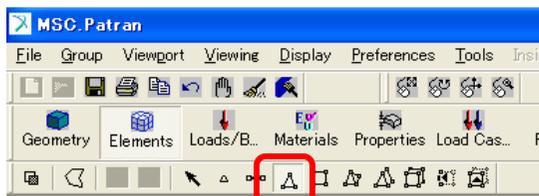
Apply



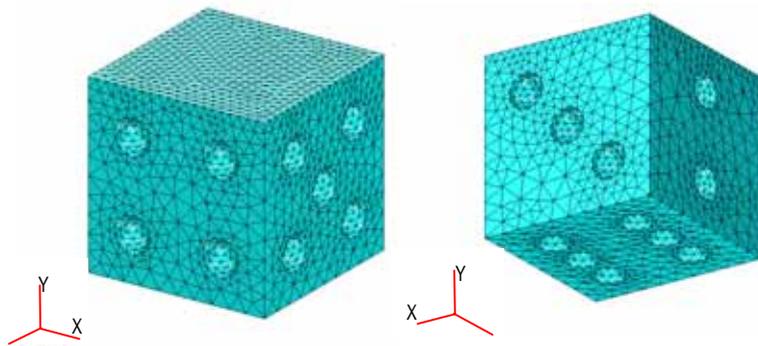
三次元要素での分割後、はじめに作成した二次元要素を削除します。

[Elements]、Action: **Delete**、Object: **Element**

セレクトメニューより  [TriElement] を選択し、Element List に削除する Surface Element を指定



マウスをドラッグして、表示される選択領域で本体全体を囲むと、Surface メッシュだけが選択されます。



要素数 73,918
節点数 102,738

図 3-13 プロセス3 要素分割

この解析モデルでは要素数がかかなり多くなり、プリポストのデフォルトの設定のまま解析を行ったのでは、膨大な計算時間とメモリを消費してしまいます。今回は、Marc の反復 Sparse ソルバおよび ELSTO オプションを使用することにより、計算時間とメモリ使用量を減少させることができました。(CPU 時間 約 18 時間、使用メモリ量 2GB)

解析結果は以下のようにになりました。

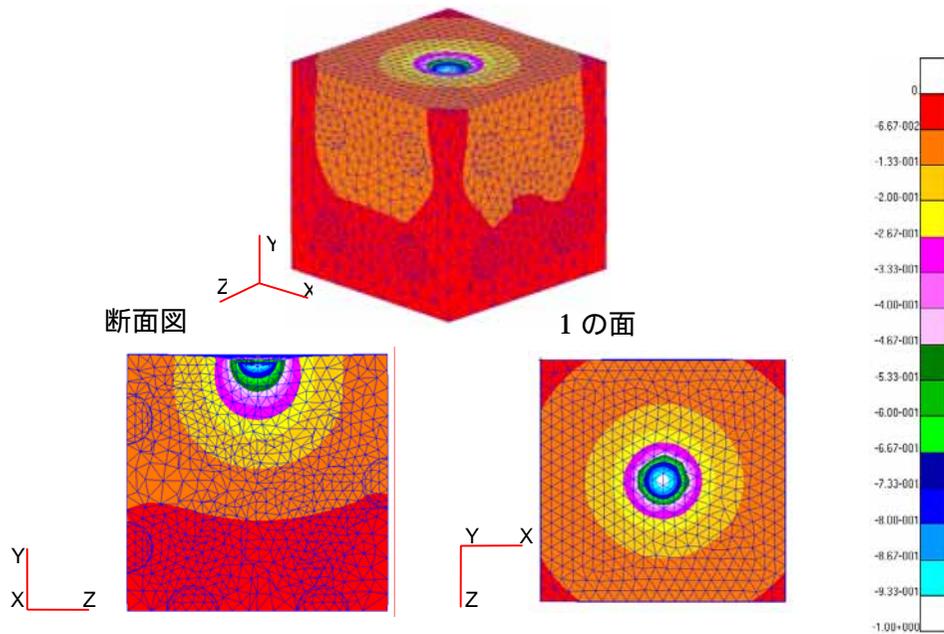


図 3-14 プロセス3 解析結果

メッシュ密度を上げることにより、各面の目の形状が良く再現されています。また、1の面の変形が均一となり、各面の目の位置によって変形量が異なることを解析することができました。

この段階で、意図する結果が得られたので、解析作業はここで終了とします。

4 おわりに

この例は解析対象自体が単純なので、解析条件を修正する繰り返しが少ないですが、実際の問題ではさらに繰り返しのプロセスが多くなることが考えられます。以上で示したプロセスは何度もやり直しを行うため、一見遠回りに見えますが、実は研究の成果を得るためには一番の近道となるのです。

まず、プリポストを使う前に、対象とする問題をじっくり観察して、解析モデル作成の方向性を捉えることが大切です。

研究の目的とは、解析（計算）を行うことではなく、得られた結果を基に現象の本質を掴むことにあるはずで、特に学生さんの場合、研究時間は限られていますので、作業時間をかけるポイントを見極めることが、良い研究成果を得る近道となるでしょう。

Marc、mentat、Patran の各ソフト操作法については、センター利用相談 sodan@cc.tohoku.ac.jp で承ります。

皆様において素晴らしい研究成果が得られますよう、Marc、mentat、Patran をはじめ、情報シナジーセンターをご活用いただければ幸いです。