令和８年 10 月 18 日

# FreeCAD による強度解析 ― メッシュの細かさと解析結果の関係 ―

## １．はじめに

前回の記事では、無料で利用できる 3 次元 CAD ソフトウェア「FreeCAD」を使って、中央に円形の穴がある板の強度解析を行いました。その結果、穴の周辺に応力が集中する様子を確認しました。

FreeCAD の強度解析では、モデルを小さな要素に分割して計算を行います。この要素分割を「メッシュ」と呼びます。一般に、メッシュを細かくすると応力分布をより詳しく表現できますが、計算に必要な時間も長くなります。このため、得られた解析結果が妥当であるかを確認することが重要です。

そこで今回は、FreeCAD でメッシュの設定を変更して強度解析を行い、最大応力がどのように変化するかを調べました。

## ２．解析モデルと解析条件

今回の解析には、前回と同じ中央に円形の穴がある板を使用しました。モデルの寸法は表 1 に示すとおり、長さ 100 mm、幅 40 mm、厚さ 5 mm、穴径 10 mm です。

解析条件も表 2 に示すとおり前回と同じとし、一方の端面を固定して、反対側の端面に 20,000 N の引張荷重を加えました。材料には FreeCAD に登録されている鋼材の物性値を使用しました。

解析には FreeCAD 1.1.4 の FEM ワークベンチを使用し、メッシュの生成には Netgen、強度解析には CalculiX を使用しました。今回比較する応力は、最大フォンミーゼス応力です。

**表１　モデルの寸法**

| | |
|---|---|
| 長さ | 100 mm |
| 幅 | 40 mm |
| 厚さ | 5 mm |
| 穴径 | 10 mm |

表２　解析条件

| | |
|---|---|
| 材料 | 鋼 |
| 拘束条件 | 一方の端面を固定 |
| 荷重条件 | 反対側の端面に、面に垂直に 20,000 N |
| 解析 | 静解析 |

## 3. メッシュの設定

FreeCAD の Netgen では、メッシュの「細かさ」や「最大サイズ」などを設定できます。今回は、次の２種類の条件でメッシュを生成しました。

**①　細かさの変更**

最大サイズを 1000 mm、最小サイズを 0 mm に設定し、「非常に粗い」「粗い」「中程度」「細かい」「非常に細かい」の 5 種類についてメッシュを生成しました。最大サイズは、生成するメッシュの要素寸法の上限を指定する設定値です。今回のモデルの長さは 100 mm であるため、最大サイズ 1000 mm という設定は、実質的に要素寸法の上限を制限しない条件となります。したがって、この５条件では、主として「細かさ」の設定による違いを比較しました。

**②　最大サイズの変更**

次に、「細かさ」を「非常に細かい」に固定したまま、最大サイズを 5 mm、2 mm、1.5 mm に変更しました。これにより、最大サイズの指定が生成されるメッシュと解析結果に与える影響を調べました。

なお、①、②のいずれの条件についても「2 次精度」と「最適化」を有効にしました。




図１　テトラパラメーター設定画面

## 4．メッシュの比較

図 2 に、今回作成したメッシュの一例を示します。また、各条件で生成された節点数と四面体要素数を表 3 に示します。

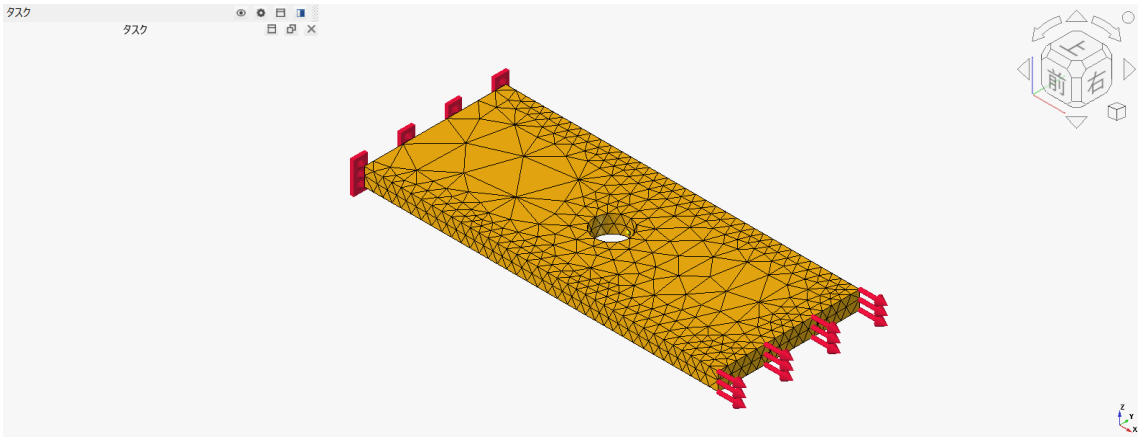



**図 2　作成したメッシュの一例（細かさを非常に粗いに設定）**

**表 3　メッシュの設定と生成結果**

| 細かさ | 最大サイズ（mm） | 節点数 | 四面体数 |
|---|---|---|---|
| 非常に粗い | 1000 | 4,626 | 2,148 |
| 粗い | 1000 | 4,821 | 2,257 |
| 中程度 | 1000 | 5,385 | 2,531 |
| 細かい | 1000 | 3,320 | 1,698 |
| 非常に細かい | 1000 | 10,450 | 6,038 |
| 非常に細かい | 5 | 10,361 | 5,984 |
| 非常に細かい | 2 | 49,685 | 32,410 |
| 非常に細かい | 1.5 | 75,446 | 48,972 |

今回の解析では、3 次元モデルを四面体要素に分割しています。表中の四面体数は、解析に使用する要素の数です。表 3 を見ると、「非常に粗い」、「粗い」、「中程度」と変更していくと四面体数は増加しましたが、「細かい」では逆に減少し、一般的な予想とは異なる結果となりました。また、「非常に細かい」では四面体数が大きく増加しました。このように、メッシュの「細かさ」の設定と、実際に生成される要素数は必ずしも単純な対応関係にはありませんでした。

ここで、図 2 を見ると穴の周辺が比較的細かく分割されていることが分かります。これは、形状の曲率などを考慮して局所的に細かいメッシュが生成されているためと考えられます。また、「非常に細かい」の設定で最大サイズを 1000 mm から 5 mm に変更しても、四面体数はほとんど変化しませんでした。一方、最大サイズを 2 mm、1.5 mm と小さくすると、四面体数は大幅に増加しました。

## 5．メッシュの設定と最大応力

作成した 8 種類のメッシュを使用して強度解析を行い、最大フォンミーゼス応力を比較しました。結果を表 4 に示します。

**表 4　メッシュの設定と最大フォンミーゼス応力**

| 細かさ | 最大サイズ（mm） | 四面体数 | 最大応力（MPa） |
|---|---|---|---|
| 非常に粗い | 1000 | 2,148 | 314.8 |
| 粗い | 1000 | 2,257 | 295.6 |
| 中程度 | 1000 | 2,531 | 309.3 |
| 細かい | 1000 | 1,698 | 321.5 |
| 非常に細かい | 1000 | 6,038 | 322.6 |
| 非常に細かい | 5 | 5,984 | 325.3 |
| 非常に細かい | 2 | 32,410 | 327.2 |
| 非常に細かい | 1.5 | 48,972 | 326.3 |

図 3 に、四面体要素数と最大フォンミーゼス応力の関係を示します。最大サイズ 1000 mm の 5 条件を比較すると、最大応力は 295.6〜322.6 MPa の範囲で変化しました。特に、「粗い」の最大応力は 295.6 MPa となり、「非常に粗い」の 314.8 MPa よりも低い値となりました。このように、最大応力は「細かさ」の設定に対して単調に変化するわけではありませんでした。

一方、「非常に細かい」の設定で最大サイズを変更した場合、最大応力は 322.6MPa から 325.3 MPa、327.2 MPa、326.3 MPa と変化しました。最大サイズを 2 mm から 1.5 mm に変更すると、四面体要素数は 32,410 から 48,972 へ約 51%増加しましたが、最大応力は 327.2 MPa から 326.3 MPa へとわずかに減少しました。

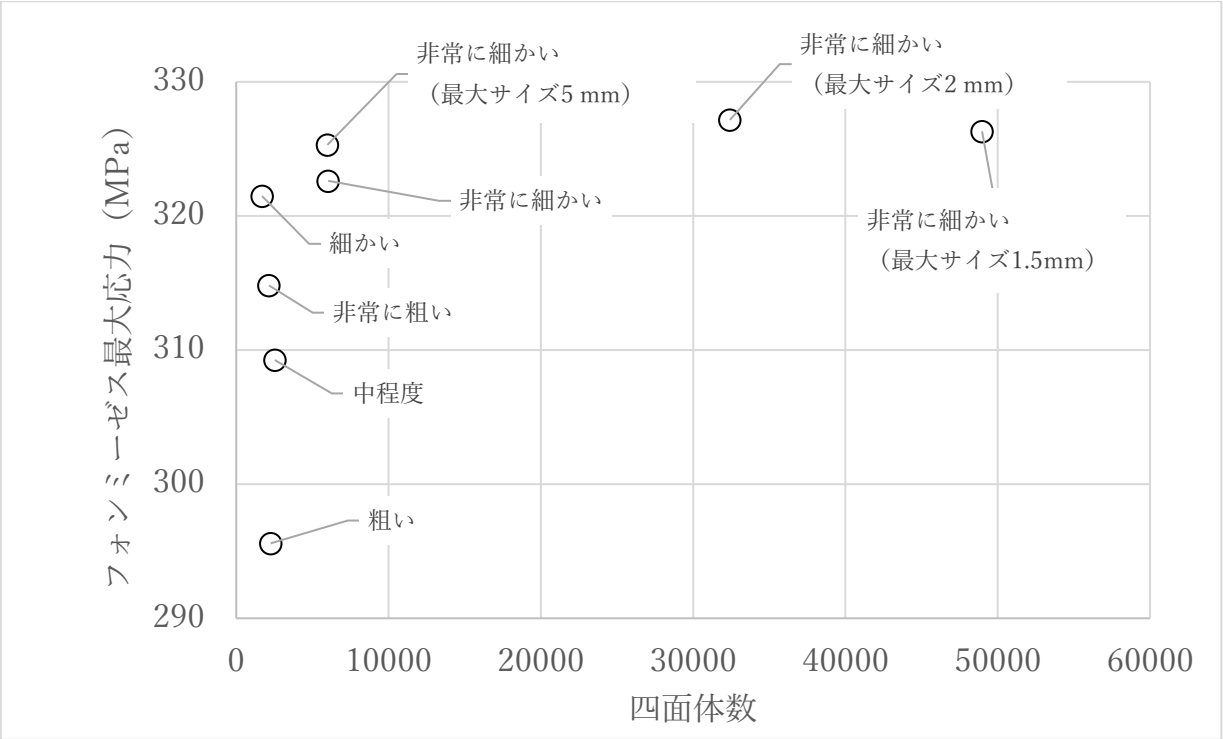



**図３　四面体要素数と最大フォンミーゼス応力の関係**

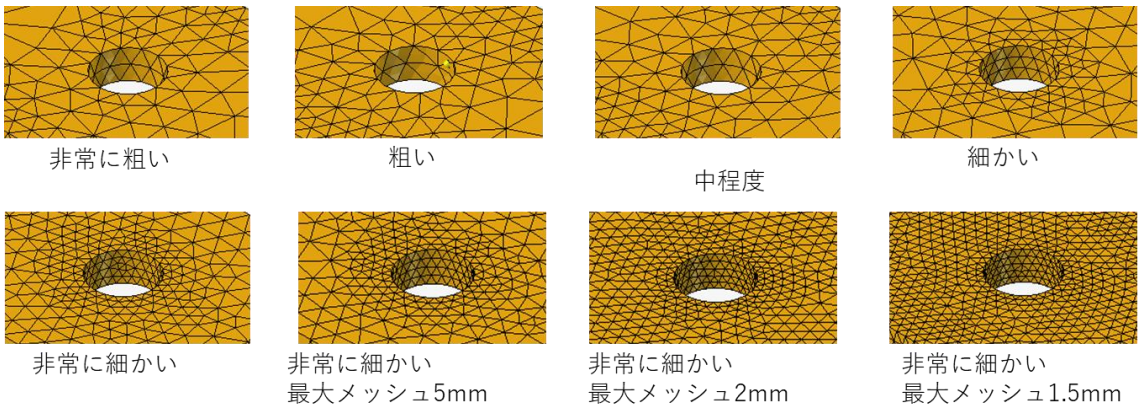



**図４　各条件における穴周辺のメッシュ**

図４に、各条件における穴周辺のメッシュを拡大して示します。「細かい」の条件では、「粗い」の条件よりもモデル全体の四面体要素数が少なくなっていますが、穴周辺には比較的細かなメッシュが形成されています。ここで、「細かい」の最大フォンミーゼス応力は 321.5 MPa であり、より細かいメッシュで得られた値に近くなっています。このことから、応力集中部の解析では、モデル全体の要素数だけでなく、応力が集中する部分のメッシュの細かさや配置が重要であると考えられます。

最大フォンミーゼス応力の発生位置を確認するため、解析結果から最大応力を示す節点の座標を取得し、図５に示すようにその位置に球を表示しました。最大応力は穴の内周面付近に発生していることが確認できます。なお、最大応力が発生した位置は、いずれのメッシュ条件でもほぼ同じでした。

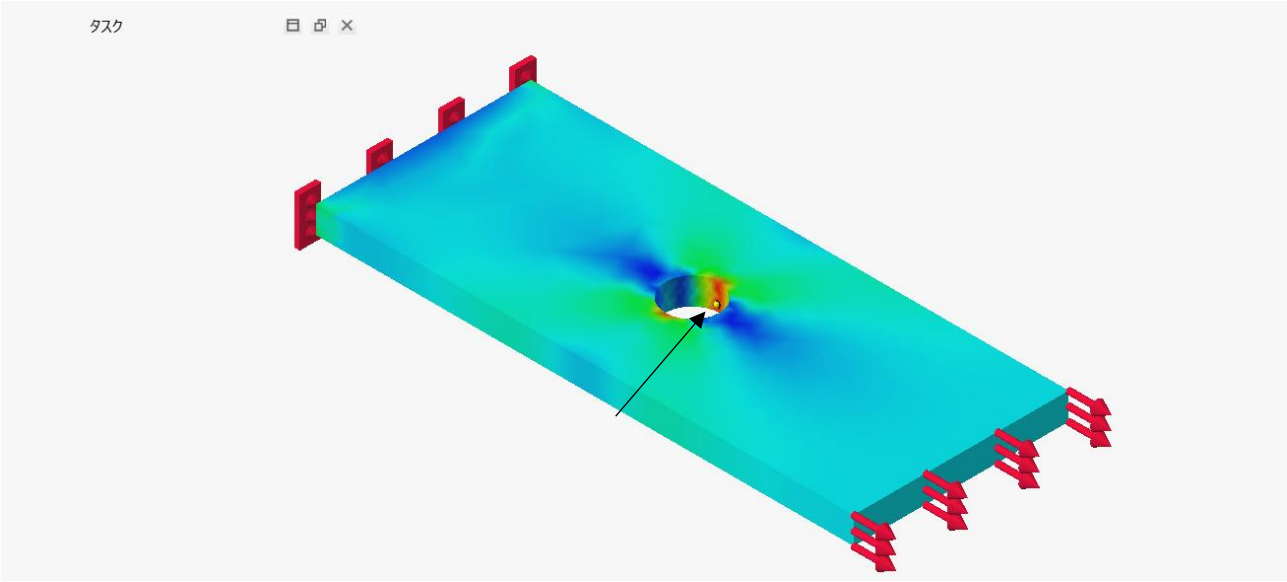



**図５　最大フォンミーゼス応力の発生位置（矢印で示す球の中心）**

これらの結果から、今回の解析では、メッシュを細かくすることで最大応力値の変化が小さくなる傾向が認められました。ただし、今回の結果だけで最大応力値が完全に収束したと判断することはできません。

## 6．解析結果を評価する際の注意点

有限要素法では、メッシュを細かくすることで解析結果が一定値に近づくことが期待されます。このような解析結果の変化を確認することを、一般に「メッシュ収束性の確認」と呼びます。

今回の解析では、最大サイズを小さくするにつれて最大応力値の変化は小さくなり、最大サイズ 2 mm と 1.5 mm の条件では、要素数は約 51%増加したにもかかわらず、最大応力の差は約 0.26%でした。このことから、今回の解析条件では、最大応力が 326～327 MPa 付近で安定しつつあると考えられます。

ただし、要素数が多ければ必ず正しい結果が得られるというわけではありません。例えば、穴の周辺のように応力が大きく変化する部分では、局所的なメッシュの細かさが解析結果に影響します。また、要素の形状や配置によっても計算結果が変化する場合があります。このため、解析結果を評価する際には、単に要素数を比較するだけでなく、応力が集中する部分のメッシュの状態を確認することが重要です。

さらに、鋭い角部や点荷重などが存在する場合には、メッシュを細かくしても最大応力値が収束しないことがあります。このような場合には、最大応力値だけでなく、解析モデルや荷重条件についても検討する必要があります。今回のような円形の穴では、穴の縁に応力集中が発生します。最大応力の発生位置と、その周辺のメッシュの状態を確認することも、解析結果を評価するうえで有効です。

## 7．おわりに

今回は、FreeCAD でメッシュの設定を変更して強度解析を行い、要素数と最大フォンミーゼス応力の関係を調べました。その結果、メッシュの「細かさ」の設定と実際の要素数は必ずしも対応せず、最大応力値も単調に変化するわけではないことが分かりました。また、「非常に細かい」の設定で最大サイズを小さくしたところ、最大応力値の変化が小さくなる傾向が認められました。

有限要素法による強度解析では、計算によって得られた数値をそのまま使用するのではなく、メッシュの状態や解析結果の変化を確認することが重要です。今回の検証では、応力集中部に注目しながらメッシュを評価することの大切さを確認しました。

今回の検証が、FreeCAD を使用して強度解析を行う際の参考になれば幸いです。

## 参考資料

(1) FreeCAD による部品の強度解析

pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/512430.pdf

問い合わせ：新潟県工業技術総合研究所
技術統括センター　斎藤 雄治
TEL：025-247-1320