

# ダイヤカット折り紙円筒の FEM モデル化におけるソルバー依存性

環境構造工学講座 修工 12-139 仲山 史晃

指導教員 : 後藤 文彦

徳重 英信

長谷部 薫

## 1. 目的・背景

折り紙構造は宇宙工学、自動車、構造物、医療分野といった広い領域での利用が進んでおり、折りたたみ機能やばね性能などの付加性能がある。しかしその構造は複雑で実際に模型を作った実験はなかなか困難であり、有限要素法による数値解析が有効である。過去の先輩方もダイヤカット円筒の研究を行なっているが、CalculiX のみでの解析であった。構造研究室では CalculiX と Marc.mentat の 2 種類の有限要素解析ツールを利用しており、Marc.mentat でのダイヤカット円筒の解析及び両者の解析結果の比較というは今まで行われていない。そこで、本研究では 2 つある解析ツールの比較を有限要素解析で重要なメッシュ分割の影響がみられるものか調べる。対象とするモデルについてはダイヤカット円筒及びそれを簡略化した角柱で解析を進める。

## 2. 解析方法・解析モデル

解析手法として、有限要素解析ツール CalculiX と MSC/Marc.mentat を用いて、6 節点シェル要素で角柱及びダイヤカット円筒をモデル化し解いていく。境界条件は、下端開口部の各接点を  $x, y, z$  方向変位を拘束し、上端開口部の各接点の  $x, y$  方向変位を拘束する。上端から 1KN で圧縮し、変位から求めるバネ定数と座屈荷重、座屈モードを求めて比較を行う。また、周方向分割パターン数と高さ方向分割パターン数をそれぞれ 4 から 20 まで変化させる。ただし、角柱モデルでは高さ方向分割を 300 まで増やす。ダイヤカット円筒では三角形 1 要素の分割を細かくする 1, 4, 16 分割というものを加える。使用するモデルを図-1、材料特性を表-1 に載せる。昭和アルミニウム缶 350 ml の寸法を参考にしてモデル化した。

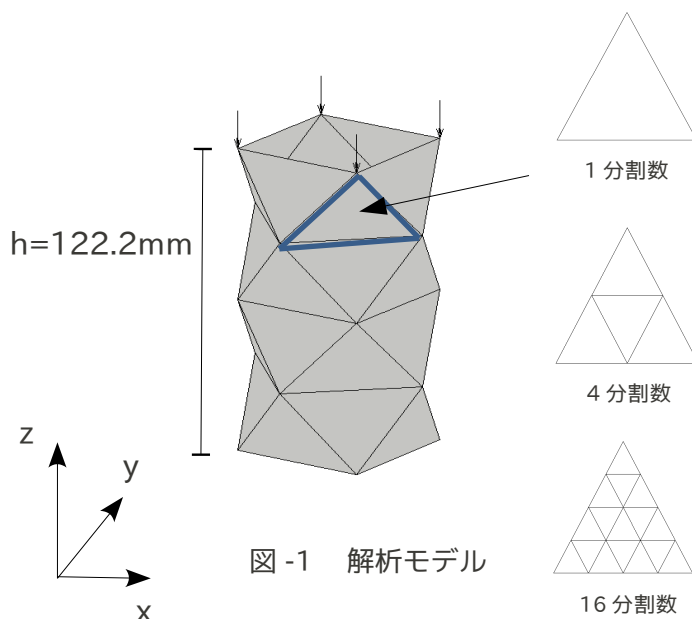


図-1 解析モデル

高さ $h$	122.2mm
半径 $r$	33mm
厚さ $t$	1mm
ヤング率 $E$	69GPa
ポアソン比	0.3

表-1 材料特性

### 3. 解析結果

#### (1).角柱モデル

##### (a) バネ定数

図-2.aに Marc.mentat でのバネ定数を、図-2.bに CalculiX でのバネ定数を載せる。最も分割したモデルである(周,高さ) = (20,300) 分割のバネ定数を見てみると、Marcでは 117.14 MN/m、CalculiXでは 105.23 MN/mであった。材料のヤング率から求めた円断面円筒のバネ定数(EA/l で求まる)は 117.01 MN/mであり、Marcで 0.111%、Calculixで 11.2%の誤差という結果が得られた。CalculiXで大きな誤差が生じているが、バネ定数の収束が見られた高さ分割を 50 で固定し、周方向分割を増やし断面を真円に近づけていきバネ定数の収束についてみてみた。周方向分割とバネ定数収束の関係のグラフを図-3に示す。(周,高さ) = (100,50) で見てみると 116.19 MN/m(CalculiXでのバネ定数)となり、誤差は 0.701%にまで縮小した。高さ分割よりも周方向分割を細かくとることにより、Marc.mentatと CalculiXで漸近した値を得られる結果となった。

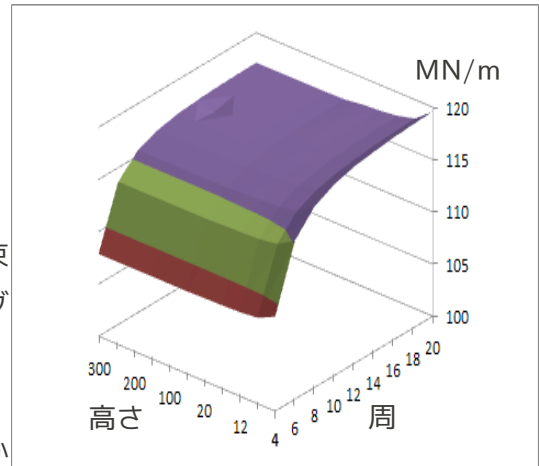


図 -2.a バネ定数 (Marc)

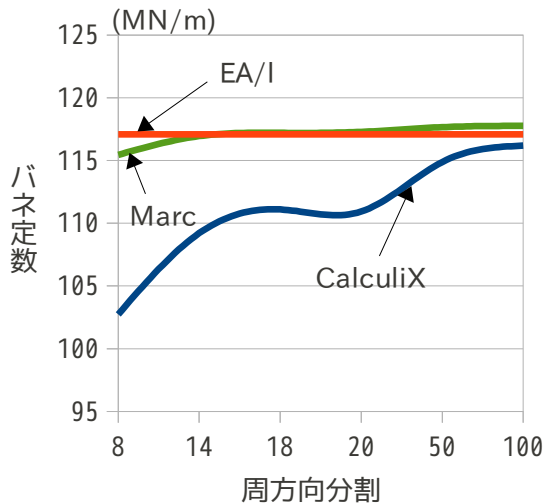


図 -3 バネ定数の収束

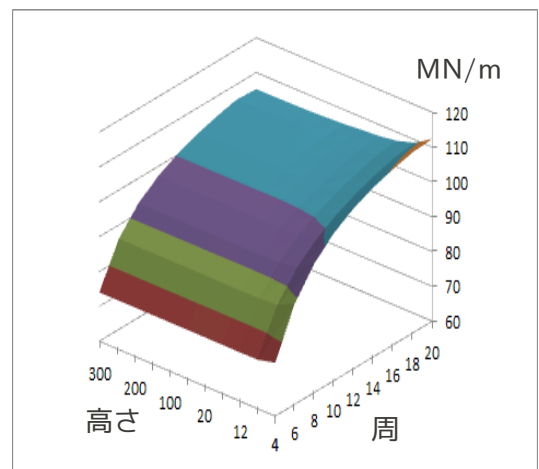


図 -2.b バネ定数 (CalculiX)

##### (b) 座屈モード

まず座屈荷重を見てみると、Marcの方で周方向分割6の時に他の周分割と比べて大きな値となっていたが全体で見るとほとんど一様であった。CalculiXにおいては分割数を増やしていくことで一定の値に収束していくことが見れる。(周,高さ) = (20,300)においてMarcにて 0.201 MN、CalculiXで 0.234 Mnの値であった。バネ定数と同様、周方向分割を多くすることにより漸近していくことがみられる。

図-4.aに Marc.mentat での座屈モード、図-4.bに CalculiX での座屈モードを示す。また、座屈の様子の下に座屈荷重を記載した。座屈モードは、高さ分割 50 と固定して周方向分割を変えていくことで違いを見たところ、周方向分割を増やしていくにつれて似たモードが得られることがわかった。図-4は周方向分割 100 に増やしたモデルであり、これから 1 次では長形状の凹凸が卓越し、2 次でねじれ座屈が起こるといった結果が CalculiX 及び Marc.mentat で得られた。

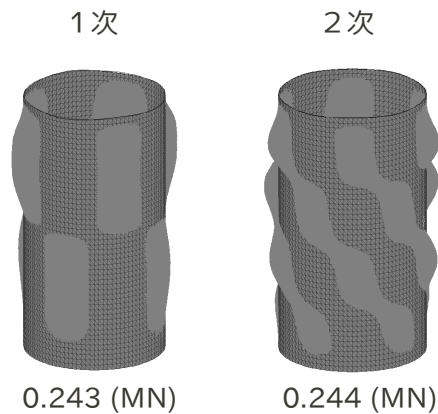


図 -4.a 座屈モード (Marc)

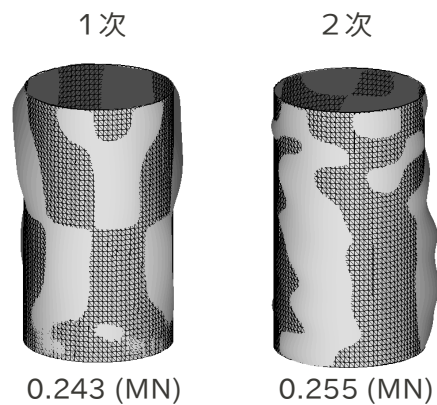


図 -4.b 座屈モード (CalculiX)

## (2).ダイヤカット円筒

### (a) バネ定数

図-5.aに三角形分割 1 のときの Marc のバネ定数を、図-5.bに三角形分割 1 のときの CalculiX のバネ定数のグラフを載せる。また、図-5.cに三角形分割 16 のときの Marc のバネ定数を、図-5.dに三角形分割 16 のときの CalculiX のバネ定数のグラフを載せる。

(周,高さ) = (20,20) のモデルで三角形分割 1 と 16 のときを CalculiX と Marc.mentat で比較すると三角形分割 1 では誤差が 5.71%であったのに対し、三角形分割 16 のときでは 5.23%となった。他のモデル (周,高さ) = (12,12) で誤差を見てみると三角形分割 1 では 9.00%、三角形分割 16 では 5.86%という結果であり、メッシュ分割による依存性はみられることがわかる。

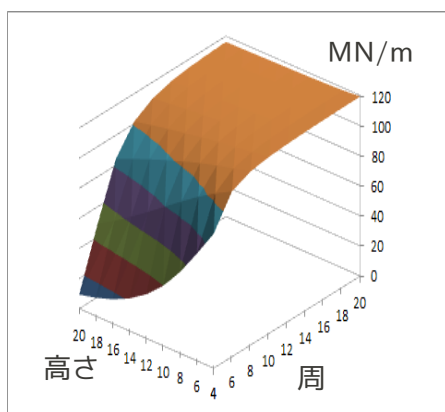


図 -5.a バネ定数 (Marc)  
三角形分割 1

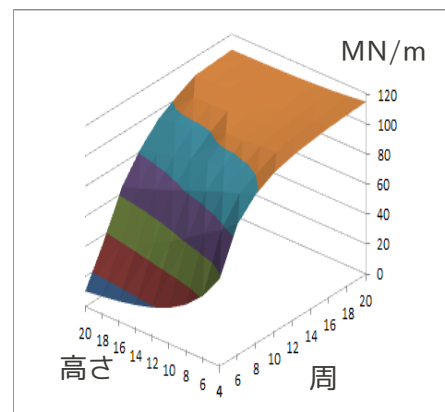


図 -5.b バネ定数 (CalculiX)  
三角形分割 1

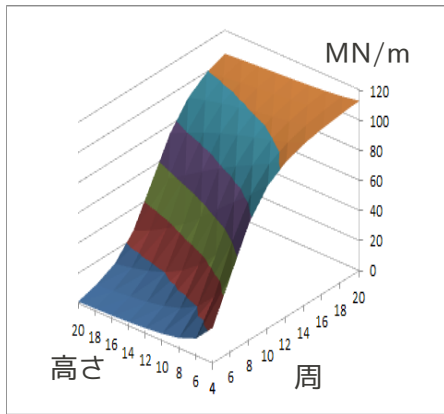


図 -5.c バネ定数 (Marc)  
三角形分割 16

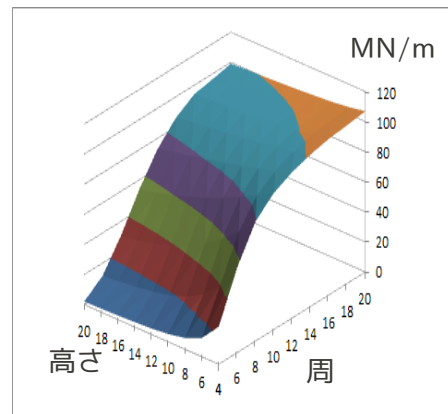


図 -5.d バネ定数 (CalculiX)  
三角形分割 16

### (b) 座屈荷重

三角形分割 1 のときの座屈荷重の分布を図-6.a、b 記す。三角形分割 16 のときの座屈荷重の分布を図 6-c、d に記す。図-6.a、c は Marc.mentat を図-6b、d は CalculiX の結果である。

バネ定数と同様に、(周,高さ) = (20,20) のモデルにおいて三角形分割 1 と 16 のときの座屈荷重を CalculiX 及び Marc.mentat で比較すると三角形分割 1 では誤差が 28.2%であったのに対し、三角形分割 16 のときでは 4.14%と縮小した。数値で見ると三角形分割 1 のとき、0.192MN (Marc.mentat)、0.255MN (CalculiX)であり、三角形分割 16 のときは、0.237MN (Marc.Mentat)、0.227 MN (CalculiX)であった。また (周,高さ) = (12,12) のモデルで比較したところ、三角形分割 1 で 19.4%、三角形分割 16 では 6.68%となった。座屈荷重においてもメッシュ分割による依存は見られるといえるが、固有値解析は変位を求めるとは違い、特に Marc.mentat で値の変動が大きかったように思う。図-6.a では値の変動が大きいのに対し、図-6.c の Marc.mentat における三角形分割 16 での座屈荷重分布のようにメッシュを細かく取ることにより、なだらかなグラフとなったため Marc.mentat での固有値解析はメッシュ依存が高いと考えられる。

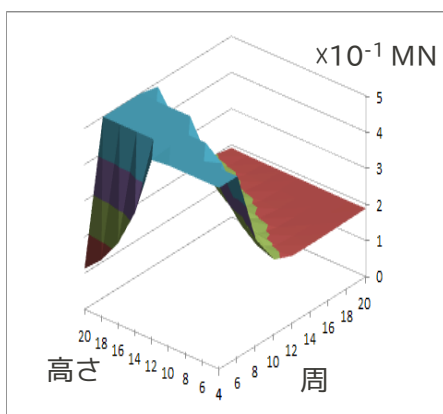


図 -6.a 座屈荷重 (Marc)  
三角形分割 1

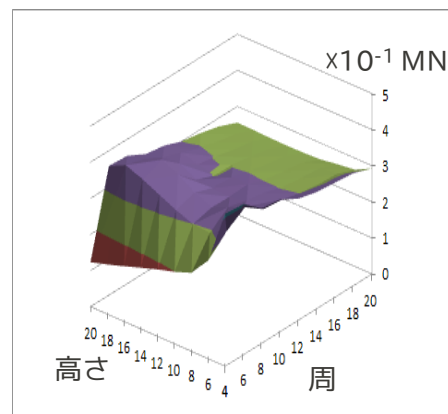


図 -6.b バネ定数 (CalculiX)  
三角形分割 1

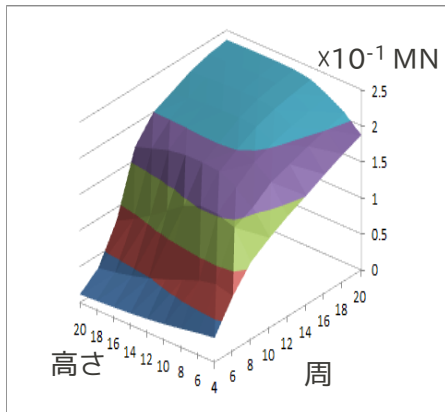


図 -6.c 座屈荷重 (Marc)  
三角形分割 16

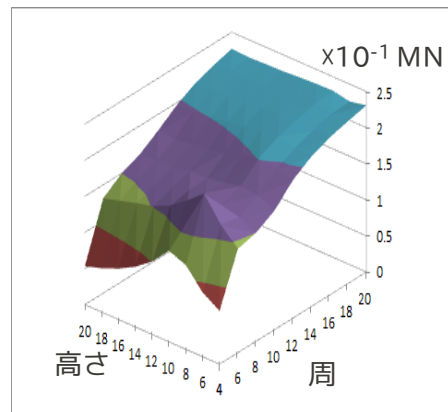


図 -6.d 座屈荷重 (CalculiX)  
三角形分割 16

### (c) 座屈モード

三角形分割 1 のときの座屈モードの様子を図-7.a に、三角形分割 16 のときのを図-7.b に記す。

CalculiX においては図-7.a、b から見られるように局部座屈が重なり、全体に広がっていることがわかる。Marc.mentat では固有値解析にランチョス法とインバース・パワー法の 2 種類の算出法があり、それぞれで違う座屈荷重、座屈モードが得られた。角柱のモデルはランチョス法で解いていたが、インバース・パワー法でも解いてみたところ同じような値であった。ダイヤカット円筒モデルでは異なる値を示しており、ランチョス法で解いた場合、凹凸が卓越したものとなり、インバース・パワー法で解いた場合、ねじり座屈が先行する結果となった。また、座屈モードの下に記してある数字は座屈荷重である。

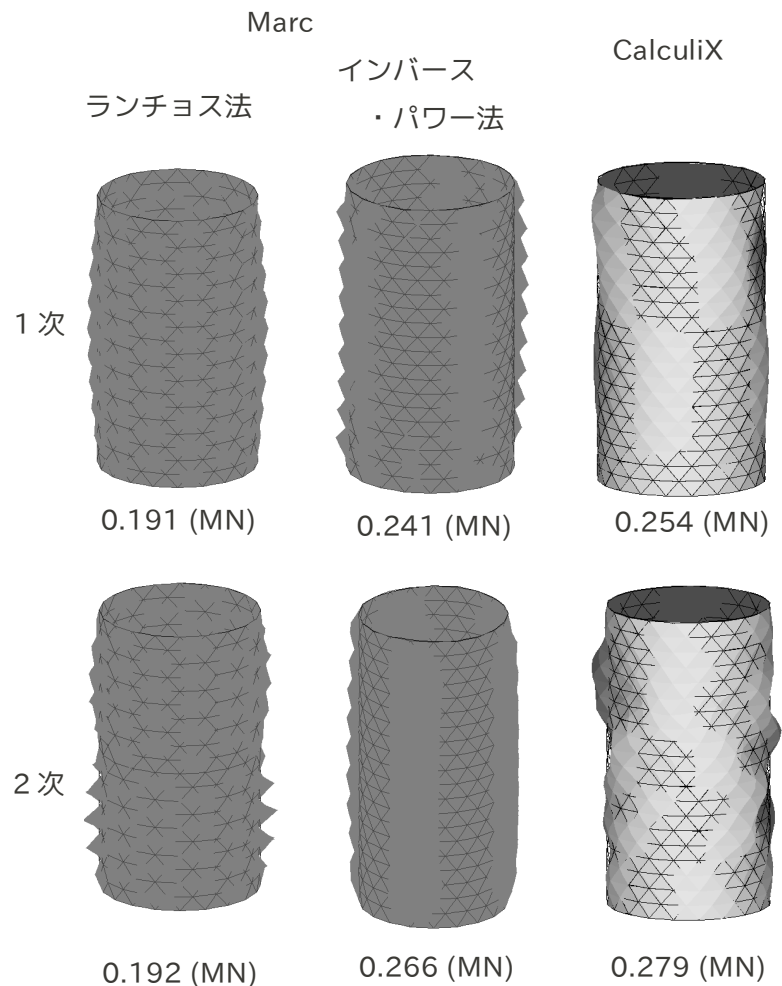


図 -7.a 座屈モード  
(三角形分割 1)

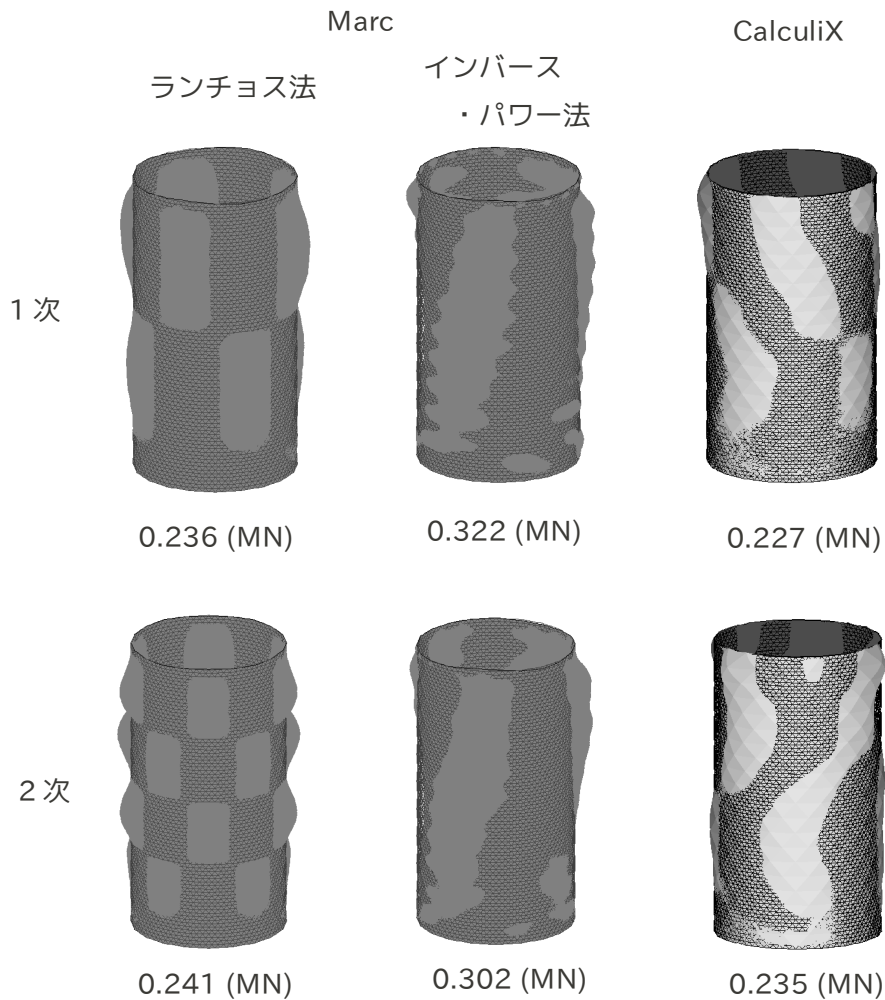


図 -7.b 座屈モード  
(三角形分割 16)

#### 4. まとめ

解析ツールによって値が異なることは想定していたが、バネ定数及び座屈荷重においては周方向分割、高さ方向分割及び三角形分割を増やすことで値が近づくことがわかった。バネ定数については周、高さ方向分割が荒くても1つの三角形要素を細かく分割することで漸近していった。

座屈荷重についても分割数を増やすことで Marc.menat と CalculiX で漸近し、断面が円に近づくほど座屈荷重が大きくなることがわかった。座屈モードにおいて角柱モデルは似たようなものであったが、ダイヤカット円筒のような複雑なモデルでは固有値解析の算出法によって異なるものが得られた。

ランチョス法、インバース・パワー法ともに固有値解析の手法であり、それぞれで算出されたものは間違っているものではないと考える。今後の展望として他の解析ツールで解いた場合と、解析手法によって偏りがあることを知った上で、3D プリンター技術の発展により実験値との比較ができることが望ましい。

#### 参考文献

- 1)構造解析よもやま話
- 2)工藤康平：円筒折り紙構造のパターンと挙動
- 3)井比宏幸：ダイヤカット円筒の FEM 解析におけるメッシュ依存性