

有限要素シミュレーション検証手段としての3Dプリンターの可能性

環境構造工学講座 9011156 江村 拓郎
指導教員 後藤 文彦・徳重 英信

1. はじめに

近年、吉村パターン¹⁾やミウラ折り²⁾に代表される折り紙構造や、蜂の巣からヒントを得ているハニカムパネルなどが、宇宙構造物や医療機器をはじめ、多くの分野で利用されている。こうした構造物は製作して実験するのが困難であり、その力学的挙動を予測・評価するためには有限要素法等の数値シミュレーションを用いざるを得ない。しかし一方で、有限要素法は、要素選択やメッシュ分割、境界条件、ソルバーの種類などに極めて敏感で、それらの条件が適切に設定されていないと、いわゆる「大はずれ」の解を出してしまうこともある。そのため有限要素法によって得られる数値解と実験によって得られる実測値を比較することは、こうしたシミュレーションの妥当性を検討する上で非常に根本的な検証手段である。従来は、こうした複雑な構造の試験体を製作することは困難であったが、昨今、3Dプリンターの普及が進み、解析用の有限要素モデルを作成すれば、それをそのまま樹脂材料で成形することができるようになった。本研究では、こうした3Dプリンターによる成形モデルを用いた実験で、有限要素シミュレーションの妥当性の検証を行う可能性について論じる。

2. 材料試験

(1) 引張試験

まず本研究で使用する3Dプリンターの樹脂材料のヤング率を求めるため、引張試験を行う。材料はStratasys社³⁾のObjet FullCure720を使用する。

引張試験の試験体寸法と、同試験体に1kgfの重りを載荷・放置した際の、27時間のひずみと時間

の関係を図-1に示す。試験体の両端には、それぞれ自身を吊り下げるため、及び重りを載荷するための孔があいている。上記の試験体に1kgfの重りを載荷

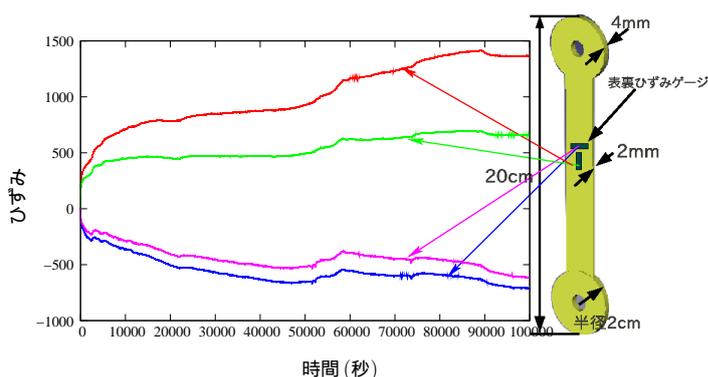


図-1 ひずみ-時間関係

し、そのまま27時間のひずみと時間の関係を図-1に示す。図のように、載荷後、一向に試験体の変形が落ち着かず、クリープひずみが進行しており、この材料を弾性体として扱うことが難しいと考えられるが、本研究で扱う有限要素シミュレーションには試験開始後30分間のひずみの平均から1.40GPaと設定する。

(2) 圧縮試験

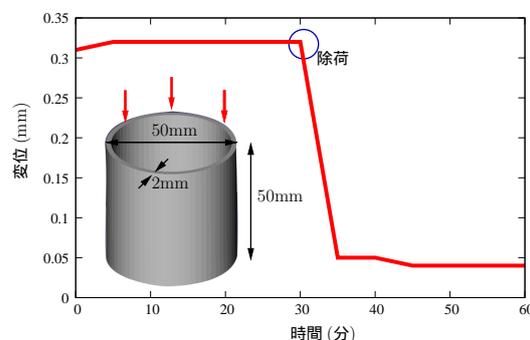


図-2 圧縮試験結果

次に外径50mm、厚さ2mm、高さ50mmで成形した円筒について軸方向の圧縮試験を行った結果を図-2に示す。

試験は図-3 の載荷装置を用いて 20kgf の重りを載荷し、30 分間 5 分毎の変位を測定した。その後除荷し、載荷時と同じく変位を測定した。圧縮試験では載荷後のクリープひずみはほとんど発生せず、なおかつ重り除荷後はほぼ弾性回復していることがわかる。この実験の最大変位を用いて算出したヤング率は 102MPa 程度であった。

このように 3D プリンター樹脂材料は、引張に対して極めて大きなクリープを発生する特殊な材料であり、FEM シミュレーションの検証目的に応える材料とは言い難いが、今回は参考までに、特徴的ないくつかの解析例に対して 3D プリンター成形モデルで実験を行った例を示す。



図-3 圧縮試験装置

して 3D プリンター成形モデルで実験を行った例を示す。

3. 3D プリンター成形モデルの実験

(1) ダイヤカット円筒

a) 変位の比較

ダイヤカット円筒とは、円筒に近い構造にダイヤ型の折り目 (吉村パターン) が交互に施された折り紙構造の一つである。これまでの有限要素解析を用いた研究から、ダイヤカット円筒は周方向と高さ方向のパターン数の組み合わせで剛性が特徴的に変わることがわかっている。本研究ではそのダイヤカット円筒について、3D プリンター成形モデルを作成して実験してみた。3D プリンターで成形したダイヤカット円筒について図-3 の装置を用いて 20kgf の重りを載荷して行った軸方向圧縮試験の結果を図-4 に示す。試験体は一方が周方向パターン数 12、高さ方向パターン数 4、もう一方が周方向パターン数 4、高さ方向パターン数 10 となっている。ここでのパターン数とはダイヤパターンを成す三角形の、円筒の周方向・高さ方向の個数を表す。試験は前述の圧縮試験と同様に、載荷後 30 分間の変位を測定、その後除荷し、同じく 30 分間の変位を測定

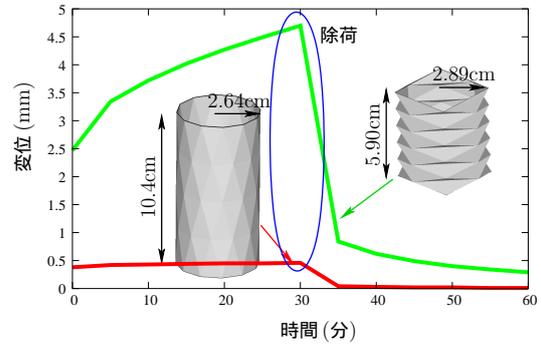


図-4 ダイヤカット円筒圧縮試験の時間-変位関係

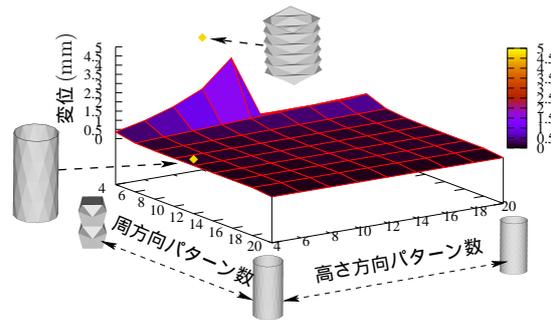


図-5 FEM による数値解と実測値

した。周方向パターン数 12 の試験体は変位量が少なく、また除荷後はその変位がほとんど回復していることから、図-2 の円筒に似た挙動を示している。周方向パターン数 4 の試験体はクリープひずみが進行しており、他方の試験体と比較すると変位の回復も鈍い。この結果より、周方向パターン数 12 の試験体の方が、より一般的な円筒の形状に近いことから、ダイヤカット円筒の軸方向圧縮に対する強さは円筒に劣るのではないかと考えられる。次に GPL ライセンスの有限要素解析ツール CalculiX⁴⁾ で、実験と同様の境界条件を設定して求めたダイヤカット円筒の各パターン数と変位の関係を図-4 の各試験体の最大変位をプロットしたグラフを図-5 に示す。周方向パターン数 12 の試験体の変位と FEM の値との相対誤差は 3% 程度であったのにも関わらず、周方向パターン数 4 の試験体では 40 倍程度、FEM の値より大きい値を示している。円筒に近いモデルのほうが硬い挙動を示していることから、数値シミュレーションの傾向と同様である。

b) 座屈モードの比較

次に軸方向の圧縮試験と有限要素シミュレーションで得られるダイヤカット円筒の座屈荷重と座屈モードについて比較・検討する。試験は前述した周

方向パターン数 12、高さ方向パターン数 4 のモデルと周方向パターン数 4、高さ方向パターン数 10、及び折り目のない一般的な円筒に対して、図-6 の圧縮試験機を用いて行う。各モデルの荷重と変位の関係を図-7 に示す。また、試験体が破壊する直前の様子と有限要素シミュレーションで描いた座屈モード図を周方向パターン数 4 のモデルについては図-8 と図-9 に、周方向パターン数 12 のモデルについては図-10 と図-11 に、円筒モデルについては図-12 と図-13 にそれぞれ示す。 図-7 では、周

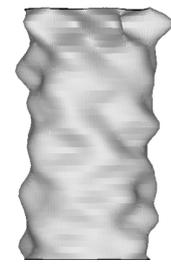
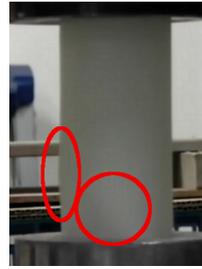


図-12 破壊直前の試験体 図-13 FEM での座屈モード

方向パターン数 12 のモデルと円筒モデルの挙動が非常に似ていることがわかる。全試験体中、円筒が最も大きな荷重に耐えられる。しかし、引張試験では大きなクリープひずみが発生したにも関わらず靱性がなく、非常に脆い性質だと、圧縮に関しては言える。周方向パターン数 12 のモデルは図-10 で丸で囲った箇所に局部座屈が現れ、それがグラフで見られるわずかな粘りの要因になっていると考えられる。周方向パターン数 4 のモデルは他のモデルと比較して、極端に弱く、また円筒と同様に靱性がみられない。座屈モードの比較では、図-10 と図-12 の円で囲った箇所にわずかな局部座屈が現れたが、どのモデルも靱性が乏しく、今回の実験では FEM での座屈モードと比較し得るだけの十分な座屈を確認することができなかった。次に CalculiX で実験と同様の境界条件を設定して求めたダイヤカット円筒の各パターン数と座屈荷重の関係に図-7 の周方向パターン数 4 の最大荷重、周方向パターン数 12 の円で囲った荷重をプロットしたグラフを図-14 に示す。ここでも、周方向パターン数 12 のモデルは 12% 程度 FEM の結果より小さい値であるのに対し、周方向パターン数 4 のモデルは 58% も小さい値となった。



図-6 圧縮試験機

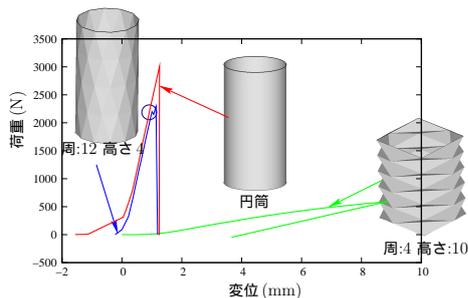


図-7 圧縮試験 荷重-変位関係



図-8 破壊直前の試験体

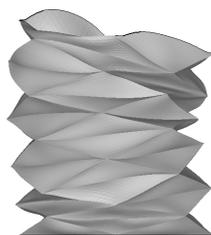


図-9 FEM での座屈モード



図-10 破壊直前の試験体

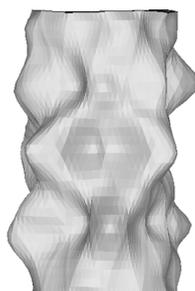


図-11 FEM での座屈モード

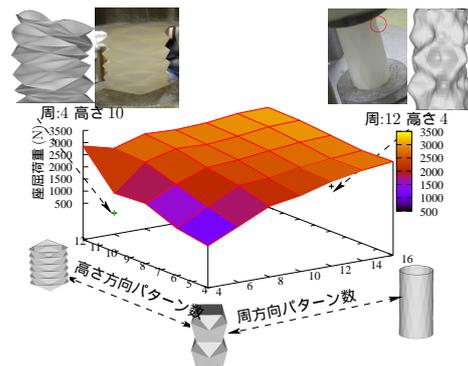


図-14 FEM による数値解と実測値 (座屈荷重)

(2) 蛇腹折り円筒

a) 変位の比較

蛇腹折り円筒とは、円筒に近い構造に互い違いの台形の折り目が交互に施された折り紙構造の一つであり、これまでの研究からダイヤカット円筒と同様に、周方向パターン数と初期高さの組み合わせでバネ定数が特徴的に変わることがわかっている。ここでの初期高さとは図-15に示すように、折りたたまれて軸方向の高さが0の状態を”初期高さ=0”とし、折りたたまずに高さが1の角柱の状態を”初期高さ=1”とする。本研究ではその蛇腹折り円筒について、3Dプリンター成形モデルを作成して実験してみた。3Dプリンターで成形した蛇腹折り円筒に

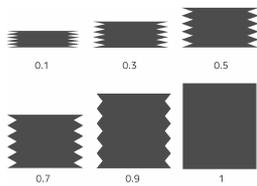


図-15 初期高さ

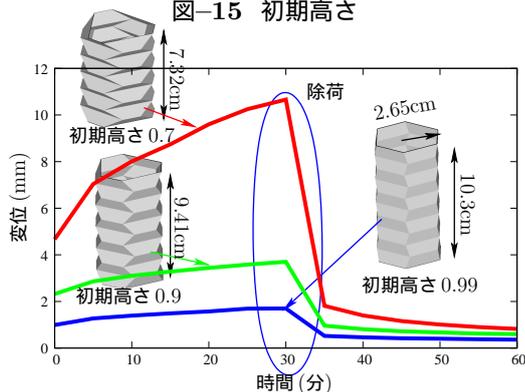


図-16 蛇腹折り円筒圧縮試験の時間-変位関係

ついて図-3の装置を用いて10kgfの重りを载荷して行った軸方向の圧縮試験の結果を図-16に示す。試験体は周方向パターン数6、高さ方向パターン数10で初期高さをそれぞれ0.7、0.9、0.99の三つの試験体を用意した。試験はダイヤカット円筒の場合と同様に、载荷後30分間の変位を測定、その後除荷し、同じく30分間の変位を測定した。グラフをみると、試験体の初期高さが高いほど変位が小さく、またクリープひずみも少ないことがわかる。除荷後の変形の回復も、初期高さが高いほうが回復量大きい。これらのことから、蛇腹折り円筒に関してもダイヤカット円筒と同様に、折り目のない一般的な円筒に近い形状の方が、軸方向の圧縮に対しては強

いのではないかと考えられる。次に初期高さ0.9と

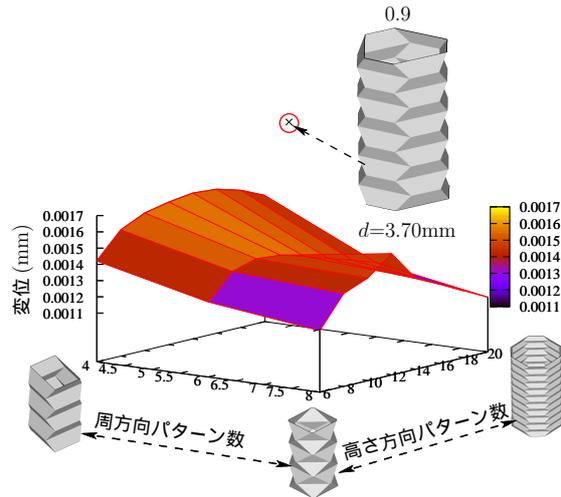


図-17 蛇腹折り円筒圧縮試験の時間-変位関係

して有限要素シミュレーションで求めた変位と各パターン数の関係に、図-16の初期高さ0.9の試験体の最大変位をプロットしたグラフを図-17に示す。グラフが示すように、3Dプリンター成形モデルの実験値は有限要素法で求めた数値解を150%程度も上回っており、この結果からは実験による有限要素シミュレーションの結果の検証は難しいと考えられる。

b) 座屈モードの比較

次に軸方向圧縮試験と有限要素シミュレーションで得られる蛇腹折りの座屈荷重と座屈モードについて比較・検討する。試験は前述した周方向パターン数6、高さ方向パターン数10で初期高さをそれぞれ0.7、0.9、0.99の三つの試験体で行う。各モデルの荷重変位関係を図-18に、蛇腹折り円筒の周方向パターン数の4,6,8と変え、有限要素シミュレーションで求めた軸方向のバネ定数を円筒のバネ定数で無次元化したグラフを図-19に示す。また、試験体が破壊する直前の様子と有限要素シミュレーションで描いた座屈モード図を、初期高さ0.7のモデルについては有限要素シミュレーションの座屈モード図のみ図-20に、初期高さ0.9のモデルについては図-21と図-22に、初期高さ0.99のモデルについては図-23と図-24にそれぞれ示す。図-18では、試験体の初期高さが高くなるほど大きな荷重に耐えることができると言える。初期高さ0.99の試験体は初期高さ0.7、及び0.9の曲線とは違う挙動をし

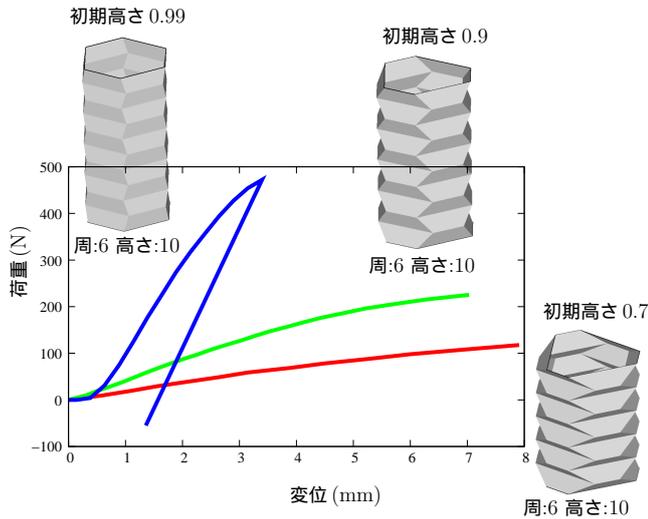


図-18 圧縮試験 荷重-変位関係

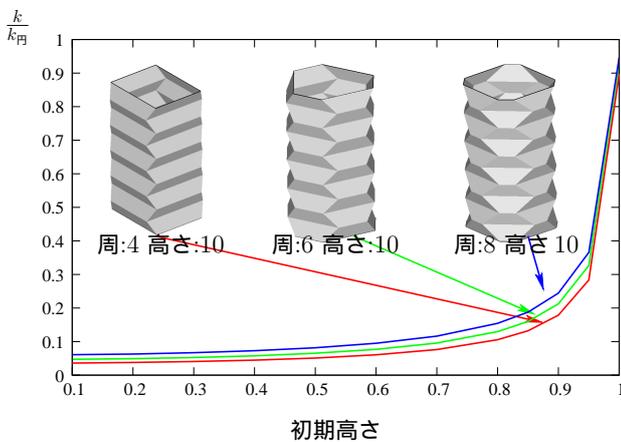


図-19 バネ定数-初期高さ関係



図-20 FEM での座屈モード (初期高さ 0.7)



図-21 破壊直前の試験体 (初期高さ 0.9)



図-22 FEM での座屈モード (初期高さ 0.9)

ており、特に高い値を示している。また、図-19を見ると、どのモデルも初期高さが 0.9 を越えたあたりからバネ定数が急激に大きくなっており、図-18の結果と似たような現象が起こっていると言える。



図-23 破壊直前の試験体 (初期高さ 0.99)



図-24 FEM での座屈モード (初期高さ 0.99)

一方座屈モードは、図-21 の初期高さ 0.9 の载荷中に円で囲った箇所 (拘束側) に飛び移り座屈が確認されたものの、FEM で飛び移り座屈が発生するのは载荷側であるため、座屈そのものの形状は似ているが、発生箇所に食い違いがみられた。その他の試験体では、ダイヤモンド円筒と同様に、靱性が乏しく、FEM での座屈モードと比較し得るだけの十分な座屈は確認できなかった。

ダイヤモンド円筒・蛇腹折り円筒共に、図-1 の引張試験のような粘りがみられなかったため、本研究で使用している材料が圧縮と引張で異なる性質があるのではないかと考えられる。

(3) ハニカムパネルと格子パネル

a) 曲げ剛性の比較

ハニカム構造とは蜂の巣にみられるような、正六角形が隙間なく並べられた構造であり、本研究で用いる格子パネルとはその正六角形が正方形、または長方形の形状をしている構造である。

有限要素解析では、ハニカムパネルの曲げ剛性は、格子パネルよりも明らかに低くなるが、3D プリンターモデルでハニカムパネルと格子パネルを成形し、曲げ試験を行なってみる。有限要素シミュ



図-25 曲げ試験

レーションで求めた正方格子の曲げ剛性で、図-25を用いて実験した 3D プリンターモデル、及び有限

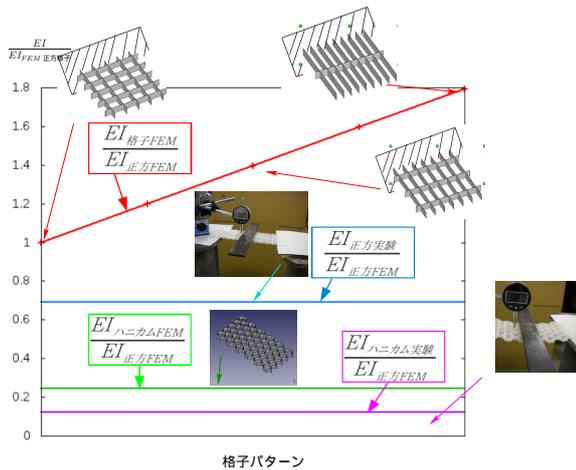


図-26 FEM による数値解と実測値

要素シミュレーションモデルのハニカムパネルと各パターン数の格子パネルの曲げ剛性を無次元化した値を図-26 に示す。有限要素モデルの格子パネルはハニカムパネルの材料量に合わせて、格子のパターン数を変えており、軸方向の壁の数が多いほど、曲げ剛性は高い値を示す。図-26 における、有限要素シミュレーションで求めたハニカムパネルの値は実験で得られたハニカムパネルの値より 2 倍程度大きく、格子パネルにおいても、FEM 値のほうが実測値より大きな値を示している。格子パネルとハニカムパネルの比較では、格子パネルがハニカムパネルの FEM 及び実測値よりはるかに高い値を示しており、有限要素シミュレーションの結果と同様の傾向を示す。

b) 座屈モードの比較

次に有限要素シミュレーションで求めたハニカムパネルと各パターン数の格子パネルについて座屈解析を行った結果を図-27 に示す。縦軸は各モデルの座屈荷重から求めた曲げ剛性を正方格子パネルの曲げ剛性で無次元化した値を、横軸は格子パターンの変化を表す。ハニカムパネルの座屈は固定端側に局部的に発生しており、格子パネルについては基本的に軸方向の壁の座屈が卓越して発生し、軸直角方向の壁の減少に伴い、広くなる壁と壁の間に座屈が起きていることがわかる。曲げ剛性についてはハニカムパネルの値が正方格子パネルの 6 割程度で、図-26 と同様に格子パネルより座屈に対してもハニカムパネルの方が有効であるとは言えない。格

子パネルの曲げ剛性は正方格子パネルの値が最も大きく、軸直角方向の壁が 1 枚のパターンが最も小さい。必ずしも軸直角方向の壁の減少に伴い曲げ剛性も小さくなるとは言えず、格子のパターン数に応じて値は上下する。

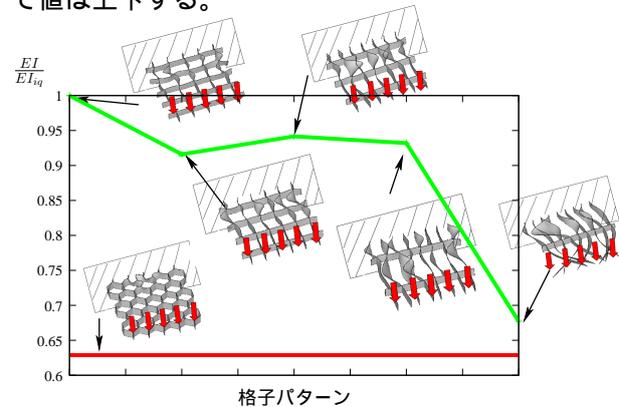


図-27 FEM による座屈解析

4. まとめ

本研究では有限要素モデルを 3D プリンターで成形して、実際に実験をすることにより、数値シミュレーションの妥当性を検討することがねらいであった。現状では、用いられる材料の不安定な性質から、必ずしも 3D プリンター成形モデルでの実験が、数値シミュレーションの精確な検証に対して有効であるとは言えない。しかし、ダイヤカット構造やハニカム構造といった生活圏内でしばしば応用されているような構造については、有限要素シミュレーションの結果と同様に、3D プリンター成形モデルでの実験からも、それらの構造が軸方向の圧縮や曲げに対して有効であるとは言えず、それらの傾向は確認することができた。

3D プリンターの材料や成形技術は日増しに進歩しており、金属材料の成形なども可能になってきているので、今後、3D プリンター成形モデルにより数値シミュレーションの妥当性を検証する手法は、十分に有効な手段になっていくものと期待される。

参考文献

- 1) Yoshimaru YOSHIMURA : On the Mechanism of Buckling of a Circular Cylindrical Shell under Axial Compression, 東京大学理工学研究所報告 5(5), 179-198, 1951-11-30
- 2) koryo MIURA : Proposition of Pseudo-Cylindrical Concave Polyhedral Shells, ISAS report, Vol.34, No.9, pp. 141-163, 1969.
- 3) <http://www.stratasys.com/>
- 4) <http://www.calculix.de/>