

薄膜からなる正多面体の平坦折り手法の研究

指導教員 須藤 正時 准教授

山下 翔平

【1】研究の背景と目的

近年、紙を折る行為から生まれる幾何学的特徴の、工学的分野での応用が注目されている。実例として、ミウラ折り¹⁾と呼ばれる手法を用いた、宇宙空間で使用する太陽光発電パネルが挙げられる。宇宙は真空であり自重や風の影響を受けないため、薄い膜を材料に使用し小さく折り畳むことで、省スペースでの輸送が可能である。

既往研究では、多面体を折り畳み小さな立体へ収縮させスペースの効率化を図る手法²⁾が研究されている。そこで、三次元構造物を二次元平面に折り畳み、さらなる効率化を追求することで、宇宙空間にとどまらず様々な分野の発展に寄与できるのではないかと考えた。本研究は薄膜の正多面体を、効率よく、平面的に折り畳む(以下、平坦折り)手法の発見と、その合理性の検証を目的とした。

【2】実験計画

2.1 対象物の設定 対象とする立体は、正多面体の内、任意の面を底面に設定したときに、底面と平行な上面が存在するものとした。この条件に該当する正多面体は、正六面体、正八面体、正十二面体、正二十面体の4種である。

ここで、本研究の目的とする平坦折りモデルは、厚みを考慮しない薄膜構造とし、完全に折り畳まれたときの条件を以下のように設定した。[条件I] 上面と底面の、高さ及び向きが一致する。[条件II] 上面及び底面に折り目が見つからない。[条件III] 全ての側面が上面(底面)の外周内部で折り畳まれる。また例外として、以上3つの条件を満たすことができない多面体が存在する場合、多面体の辺上の任意の点において滑節点の追加を許すことで実験を進めた。

2.2 実験I 対象とする正多面体4種の、各頂点を滑節点とした平坦折りフレームモデルを、綿棒を用いて作製し、正多面体の平坦折り手法について検討した(図1)。例外として追加する滑節点をモデルにおいても設け、モデルを手にとって自由に動かしたときの、フレームの折り畳まれ方の挙動を詳細に観察し、合理性の検証をした(図2)。

2.3 実験II 実験Iにおいて作製した平坦折りフレームモデルをもとに、和紙を用いて平坦折り面モデルを作製した(図3)。また、モデルには折り畳んだ際に隣り合う面同士で干渉が起こらないよう折り目をつけた。

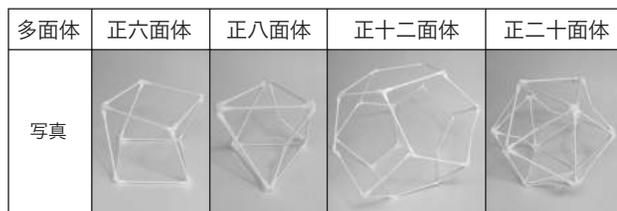


図1 綿棒を用いた平坦折りフレームモデル

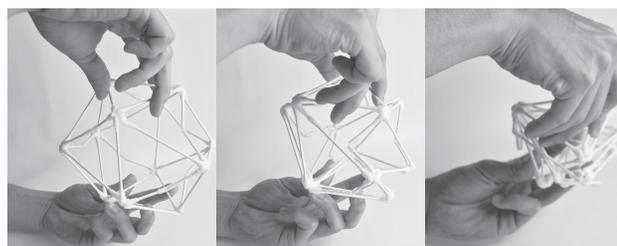


図2 平坦折りフレームモデルの観察

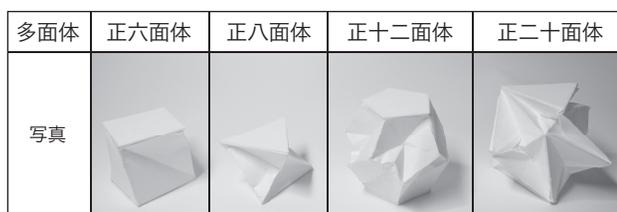


図3 和紙を用いた平坦折り面モデル

2.4 実験III 実験I、IIにおいて作製した、平坦折りフレームモデル及び平坦折り面モデルを3D CADソフトCATIA V5上で設計し、静解析を行なった。それぞれの3Dモデルの平坦折り動作における応力分布を解析することにより、作製した平坦折りフレーム及び面モデルの合理性を検証した。以下のように2つのモデルを設定した。

[3Dフレームモデル] 実験Iの平坦折りフレームモデルを参考とした、剛節点をもつフレーム構造の底面を固定し、上面全ての頂点に鉛直荷重と右回りモーメントを外力として加えた。また、追加した滑節点は他より弱い部材に設定した。

[3D面モデル] 実験IIの平坦折り面モデルを参考とした、薄膜シェル構造を、底面を固定し水平投影面に鉛直分布荷重を、また上面のみに右回りモーメントを外力として加えた。

【3】結果と考察

3.1 実験I及びII

[正六面体] 側面に対角線の折り目を付け、上面を90度回転させ頂点を繋ぎ合わせるように畳むことで平坦折り可能である(図4)。

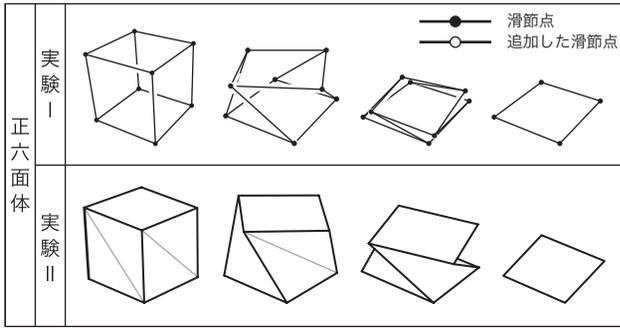


図4 正六面体の平坦折りモデル

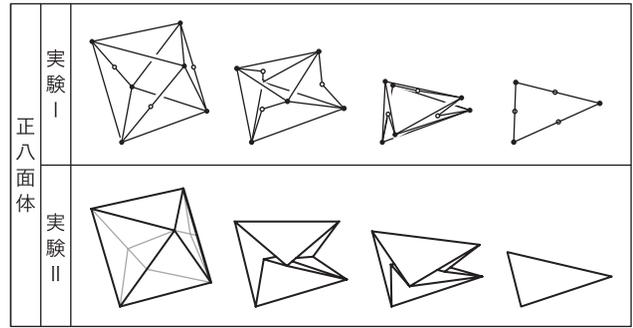


図6 正八面体の平坦折りモデル

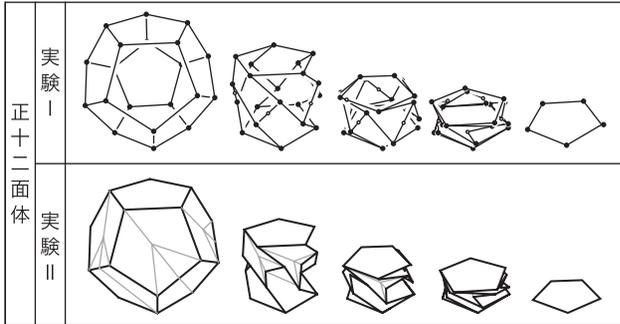


図7 正十二面体の平坦折りモデル

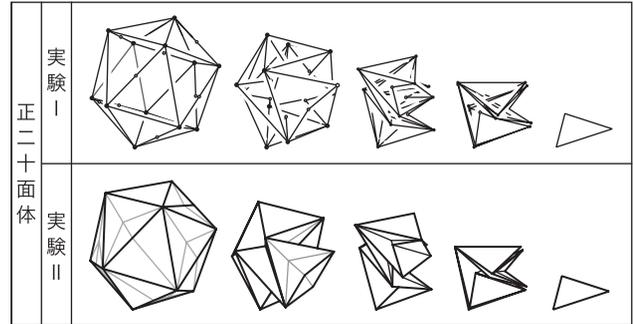


図8 正二十面体の平坦折りモデル

[正八面体] 上面と底面を除く隣り合う側面を2面で1つのユニットと考えることで、計3組のユニットができる。ここで各ユニットの接合辺の中点を滑節点とすることで、変形可能な立体となる。図5のように折り線をつけることで、上面を60度回転させながら押し下げたとき平坦折り可能であった(図6)。

[正十二面体] 実験Iにおいては新たな滑節点を設けなくとも側面を内部に折り畳むことは可能である。しかし、実験IIにおいて面同士の干渉により平坦折りができないため、追加の滑節点を設けた。正八面体の場合と同様に隣り合う側面を2面で1つのユニットと考え、計5組の各ユニットの接合辺の中点を滑節点とした。ここで、図5のように折り線をつけ、上面を180度回転させながら押し下げたとき平坦折り可能であった(図7)。

[正二十面体] 正八面体の場合と同様に、2つの正三角形を1つのユニットと考え、計9組の各ユニットの接合辺の中点に滑節点を設けた。図5のように折り線をつけることにより、上面を180度回転させながら押し下げたとき平坦折り可能であった(図8)。

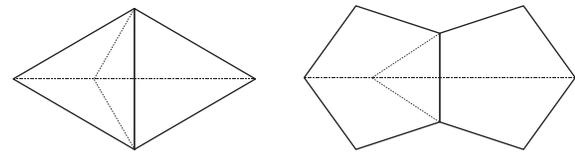


図5 ユニット折れ線図

3.2 実験III 2種類のモデルにおける応力分布の解析結果は、各正多面体において同様の傾向であった。正十二面体における解析結果を図9、図10に示す。

[3D フレームモデル] 中点を弱い部材にした全ての辺において応力の集中が確認された。解析モデルが剛節点であるのに対し実験Iにおけるモデルは滑節点であり、追加した滑節点から優先的に折れていくため、ユニット毎にみたときの折り畳みやすさ、つまり平坦折り手法の容易さを向上させているといえる。そのため、平坦折りフレームモデルは合理的な構造体であると考えられる。

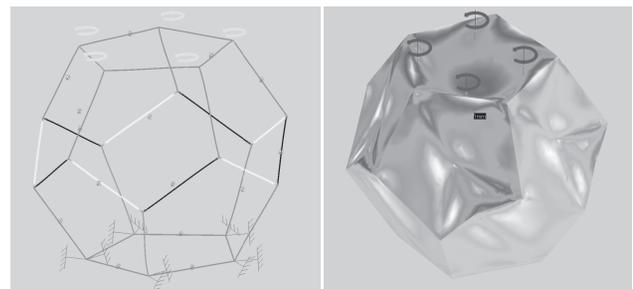


図9 応力分布図
(3D フレームモデル)

図10 応力分布図
(3D 面モデル)

[3D 面モデル] 実験IIにおいて発見した折り目付近に、応力が集中していることが確認された。これは剛体の場合における解析結果であるが、紙の折り目は折り曲げ変形が容易に可能であるので、折り目への応力の集中は平坦折りの容易さを向上させるものであるといえる。そのため、平坦折り面モデルは合理的な構造体であると考えられる。

【4】結論 フレームモデルを作製することで薄膜面構造の正多面体の平坦折り手法の発見ができた。また、折り畳みモデルの応力を解析することにより、発見した手法の合理性を示すことができた。今後は立体から平面への収縮だけでなく、平面から立体への展開についても検証する必要がある。

【参考文献】

- 1) 三浦公亮：大型宇宙構造物における材料，高分子学会，32(8)，570-573，1983
- 2) 杉山文子，野島武敏：多面体型膜構造の収納モデル，Dynamics & Design Conference 2010，"557-1"-"557-5"，2010