

半正多面体の平坦折り手法の研究

指導教員 藤岡 伸子 教授

山下 翔平

【1】研究の背景と目的

今や「ORIGAMI」は世界共通の言葉として認知され、数学分野や工学分野、さらには医学分野への応用が盛んに研究されており、問題解決のための先端技術として日々注目されている。その中でも、宇宙分野への研究開発は特に注目されており、アメリカ航空宇宙局（NASA）では太陽電池パネルの折り畳み機構への応用が進められている¹⁾。宇宙空間へ一度に運搬できる積載量は非常に限られているため、軽量の構造体で構成され、構造物を大きく収縮させて輸送できる折り畳み手法は最適である。

折り畳み手法を応用した構造体の研究は、平面構造物だけでなく、既往研究²⁾において、正多面体を効率よく平面的に折り畳む手法が考案されているが、汎用性を考慮したさらに複雑な三次元構造物の折り畳み特性について検証の余地があると考えた。

本研究は、新たな多面体において、効率よく平面的に折り畳む（本研究では平坦折りと呼ぶ）手法を検討することにより、平坦折り手法の実用化への更なる一助とすることを目的とした。

【2】実験計画

2.1 対象多面体の設定 実験対象となる多面体を設定した。既往研究²⁾において、対象多面体を正多面体群から4種（正六面体、正八面体、正十二面体、正二十面体）が、平坦折り可能であることが検証されている。これらの多面体はすべての面が同一種の正多角形により構成され、かつ各頂点形状が等しいことから、無数に存在する多面体群に於いての基礎研

究の根源として位置づけられる。以上のことから本研究では、次なる基礎研究の流れとして、半正多面体と呼ばれる多面体群から5種（立方八面体、切頂六面体、切頂八面体、切頂十二面体、切頂二十面体）を選定した（図1）。半正多面体は、すべての面が2種類以上の正多角形により構成され、かつ各頂点形状が等しい多面体である。

2.2 平坦折りモデルの条件 次に本研究の目的とする平坦折りモデルの条件を図2および以下に記す。
 [条件I] 本研究における平坦折りモデルは、各頂点において自由に可動する辺により構成されるフレームモデルについて検討する。

[条件II] 多面体を構成する、角数が最小となる任意の多角形面を底面に設定したとき、天面と底面が同一種の多角形となり、2面が平行に面する。

[条件III] 平坦折りモデルが完全に折り畳まれたとき、天面と底面の向きが重なり、天面と底面を除く全ての面が、天面と底面の外周内部へ折り込まれる。

[条件IV] 各多面体で正奇数角形が存在する場合、辺上の任意の点において滑節点を追加し、新たな可動点を設けることで平坦折り可能か検討する³⁾。

なお、これらはモデルを収縮させ折り畳む際の効率化、および完全に折り畳まれた際の多面体モデルの端正化のための条件設定である。

2.3 実験モデル 検討実験にて使用する平坦折りモデルとして、紙軸綿棒を多面体の辺としたフレームモデル、また同じくストローに糸を通し多面体の辺として結合したフレームモデルを作成した（図3）。

多面体					
	立方八面体	切頂六面体	切頂八面体	切頂十二面体	切頂二十面体
構成面					
	8枚 6枚	8枚 6枚	6枚 8枚	20枚 12枚	12枚 20枚
頂点形状					

図1 対象多面体

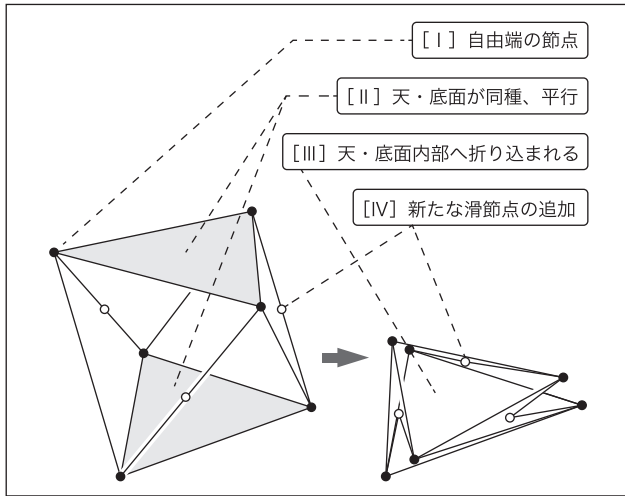


図2 平坦折りモデルの条件

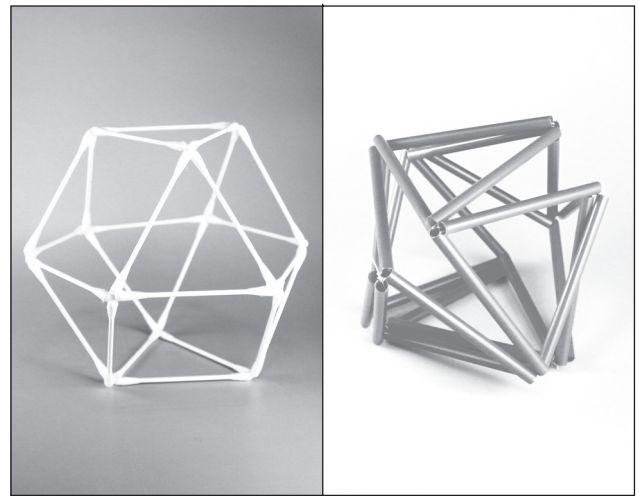


図3 実験フレームモデル

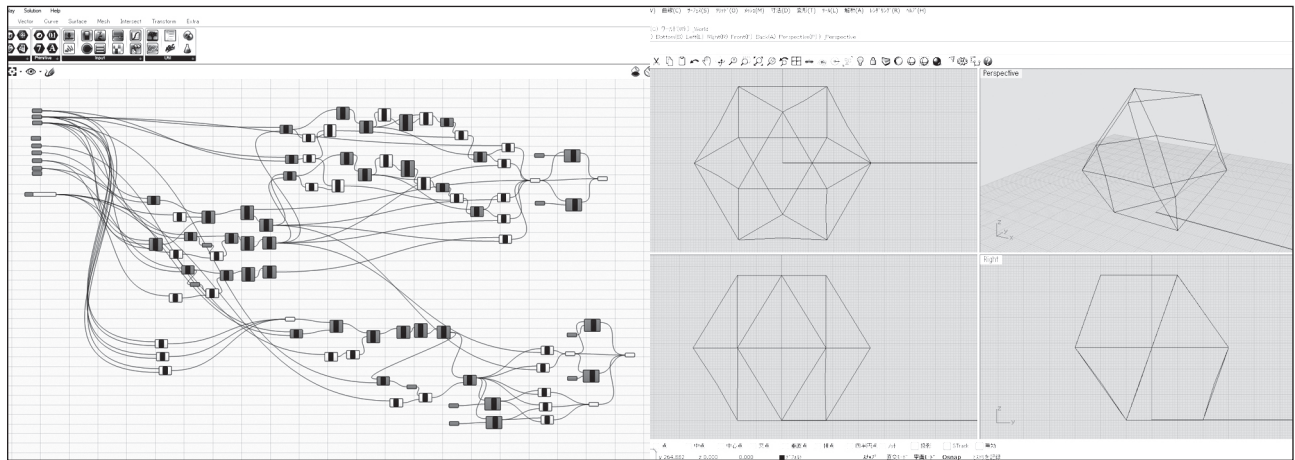


図4 Grasshopper によるアニメーション化

2.4 実験の流れ 前述の実験モデルを対象多面体5種において作成し、図2の条件を満たす半正多面体の平坦折り手法を検討した。モデルを用いフレームの挙動を立体的に把握することで、モデルを手に取り自由に動かしたときの、折り畳まれ方の挙動を詳細に観察し、平坦折り手法の検討を行なった。また[条件IV]の滑節点を追加する場合、フレームモデルにおいても同様に設けることで、平坦折り手法の検討の助けとした。その後、3D CADソフトRhinceros3DプラグインGrasshopperにて、実験により検出した平坦折り動作を入力し、平坦折り手法のアニメーション化および検証を行なった(図4)。

[3] 結果と考察

3.1 既往研究の平坦折り手法 既往の研究²⁾により確認されている、正多面体4種の平坦折り動作を図5に示す。図1より、本研究の対象多面体は複数種類の正多角形により構成されているが、その内の単一種の正多角形の種類・枚数に注目すると、各正多面体の種類・枚数と合致していることが確認できる。そのため、正多面体の平坦折り手法が、本研究の対象多面体の平坦折り手法に何らかの関係があると推察される。よって本研究においてこれらのアプローチ手法を基に平坦折り動作の検証を行なった。

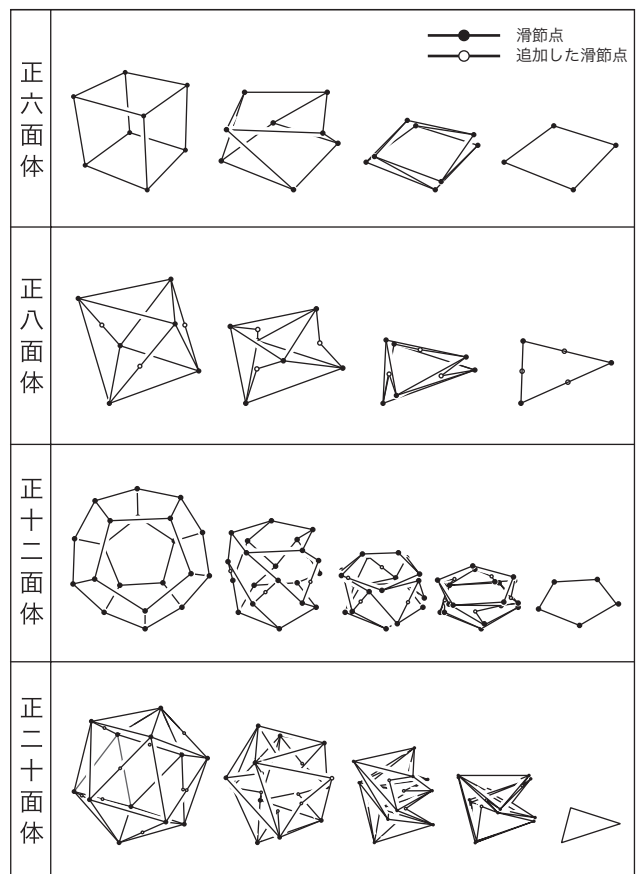


図5 正多面体4種の平坦折り動作

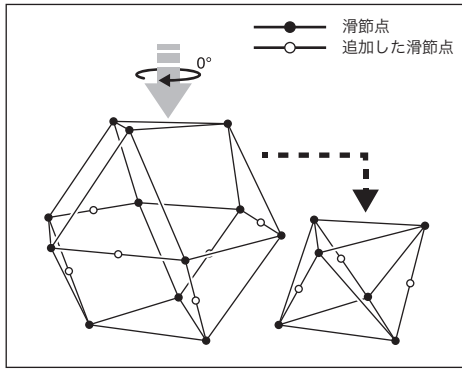


図6 立方八面体の変形

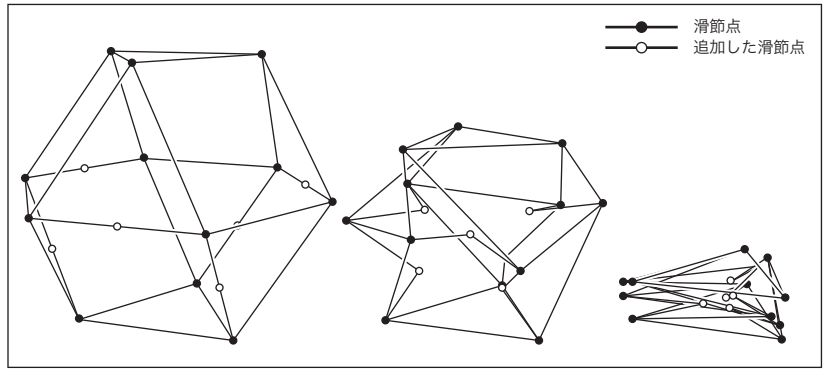


図7 立方八面体の平坦折り動作

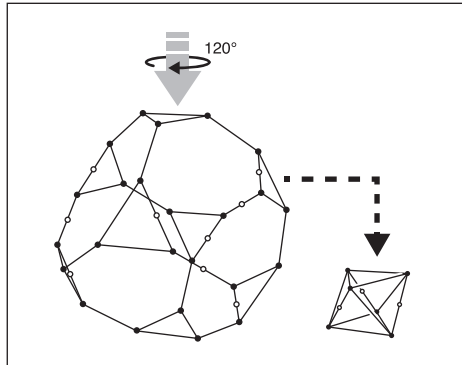


図8 切頂六面体の変形

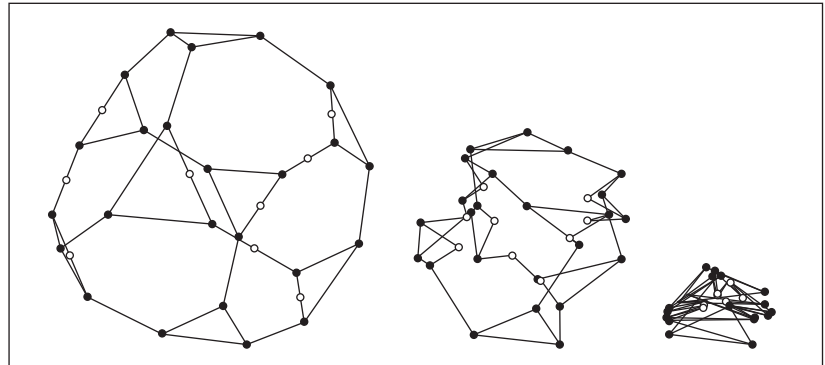


図9 切頂六面体の平坦折り動作

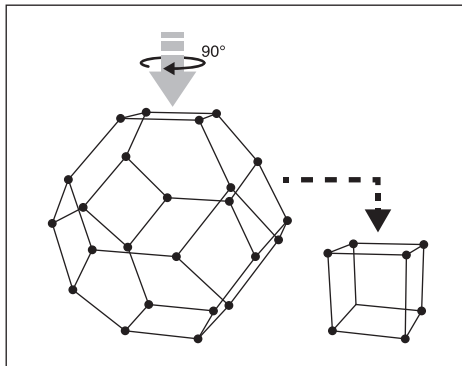


図10 切頂八面体の変形

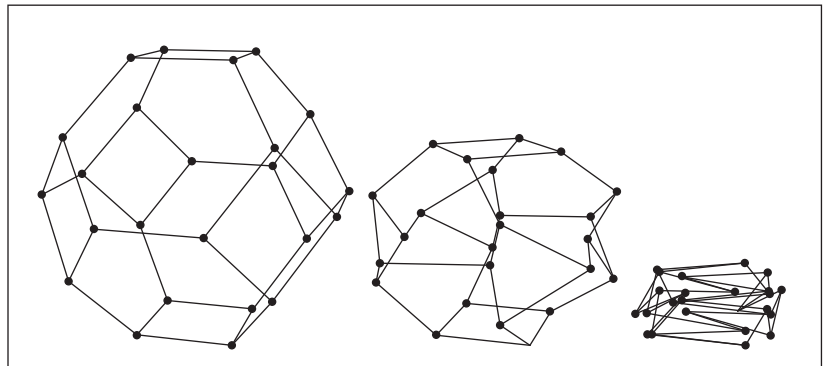


図11 切頂八面体の平坦折り動作

3.2 立方八面体 図6のように新たな滑節点を6ヶ所追加することで正八面体へ変形でき、平坦折り可能であった。天面、底面を任意の正三角形に設定し、天面を無回転で鉛直下方に押し下げた際、側面の正方形が折り畳まれ、正三角形8枚により構成される正八面体へ変形した(図6)。図5より、正八面体は天面を時計回りに60度回転させつつ鉛直方向へ押し下げることによって平坦折り可能である。よって切頂六面体は、天面を時計回りに60度回転させながら鉛直下方に押し下げたとき、完全に折り畳まれ、天面と底面が重なりかつ内部へ折り込まれる。また、完全に折り畳まれたときの底面の辺に注目すると、それぞれ8本の辺が集約されている。立方八面体の平坦折りにおける一連の動作を図7に示す。

3.3 切頂六面体 図8のように新たな滑節点を9ヶ所追加することで正八面体へ変形でき、平坦折り可能であった。天面、底面を任意の正三角形に設定し、天面を時計回りに120度回転させながら鉛直下方に

押し下げたとき、側面の正八角形が折り畳まれ、正三角形8枚により構成される正八面体へ変形した(図8)。図5より、正八面体は天面を時計回りに60度回転させつつ鉛直方向へ押し下げることによって平坦折り可能である。よって切頂六面体は、天面を時計回りに180度回転させながら鉛直下方に押し下げたとき、完全に折り畳まれ、天面と底面が重なりかつ内部へ折り込まれる。また、完全に折り畳まれたときの底面の辺に注目すると、それぞれ12本の辺が集約されている。切頂六面体の平坦折りにおける一連の動作を図9に示す。

3.4 切頂八面体 図10のように正八面体へ変形でき、平坦折り可能であった。新たな滑節点は不要であった。天面、底面を任意の正方形に設定し、天面を時計回りに90度回転させながら鉛直下方に押し下げたとき、側面の正六角形が折り畳まれ、正方形6枚により構成される正六面体へ変形した(図11)。図5より、正六面体は天面を時計回りに90度回転

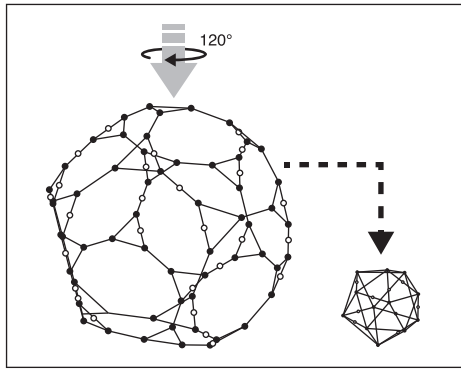


図 12 切頂十二面体の変形

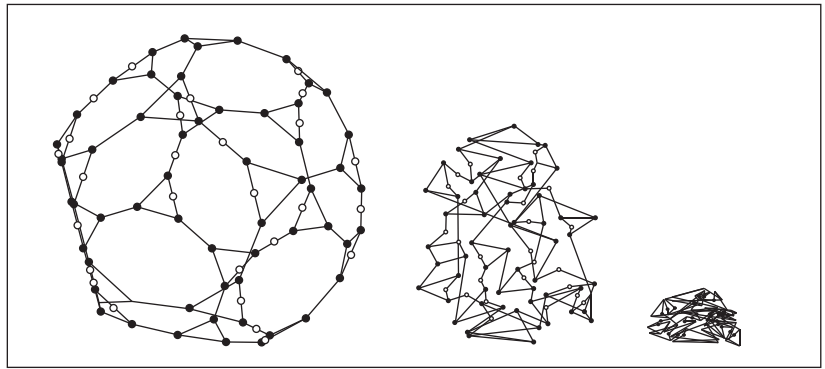


図 13 切頂十二面体の平坦折り動作

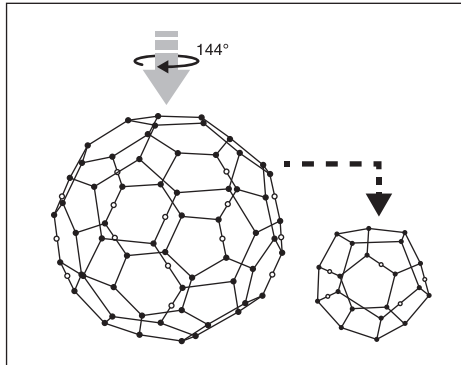


図 14 切頂二十面体の変形

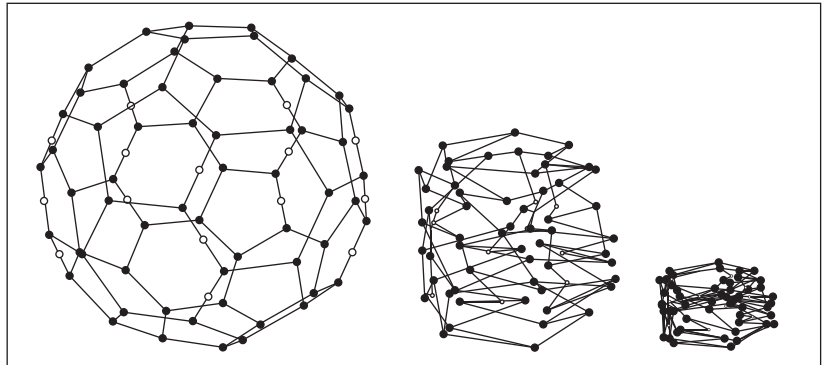


図 15 切頂八面体の平坦折り動作

させつつ鉛直方向へ押し下げること平坦折り可能である。よって切頂八面体は、天面を時計回りに180度回転させながら鉛直下方に押し下げたとき、完全に折り畳まれ、天面と底面が重なりかつ内部へ折り込まれる。また、完全に折り畳まれたときの底面の辺に注目すると、それぞれ9本の辺が集約されている。切頂八面体の平坦折りにおける一連の動作を図11に示す。

3.5 切頂十二面体 図12のように新たな滑節点を27ヶ所追加することで正二十面体へ変形でき、平坦折り可能であった。天面、底面を任意の正三角形に設定し、天面を時計回りに120度回転させながら鉛直下方に押し下げたとき、側面の正十角形が折り畳まれ、正三角形20枚により構成される正二十面体へ変形した(図12)。図5より、正二十面体は天面を時計回りに180度回転させつつ鉛直方向へ押し下げること平坦折り可能である。よって切頂十二面体は、天面を時計回りに300度回転させながら鉛直下方に押し下げたとき、完全に折り畳まれ、天面と底面が重なりかつ内部へ折り込まれる。また、完全に折り畳まれたときの底面の辺に注目すると、それぞれ30本の辺が集約されている。切頂十二面体の平坦折りにおける一連の動作を図13に示す。

3.6 切頂二十面体 図14のように新たな滑節点を15ヶ所追加することで正十二面体へ変形でき、平坦折り可能であった。天面、底面を任意の正五角形に設定し、天面を時計回りに144度回転させながら鉛直下方に押し下げたとき、側面の正六角形が折り畳

まれ、正五角形12枚により構成される正十二面体へ変形した(図14)。図5より、正十二面体は天面を時計回りに180度回転させつつ鉛直方向へ押し下げること平坦折り可能である。よって切頂二十面体は、天面を時計回りに324度回転させながら鉛直下方に押し下げたとき、完全に折り畳まれ、天面と底面が重なりかつ内部へ折り込まれる。また、完全に折り畳まれたときの底面の辺に注目すると、それぞれ18本の辺が集約されている。切頂二十面体の平坦折りにおける一連の動作を図15に示す。

【4】結論

多面体のフレームモデルを作成し平坦折り動作の検討を行なう中で、半正多面体5種の平坦折り手法を発見することができた。また、その平坦折り動作をアニメーション化することで手法の検証を行なった。本研究における平坦折り手法の共通点として、底面と向きを合わせるように天面を回転させながら押し下げること、元となる多面体から正多面体と同様の形状へ変形することが確認された。そこで既往の研究²⁾において検証された平坦折り手法(図5)を適用することで、手法の検討を進めることができた。今後の課題として、さらに複雑な構成の多面体においても平坦折り可能であるか、また今回の結果同様の規則性が検出されるか検証の余地がある。

【注釈および参考文献】

1) NASA : Solar Power, Origami Style, <http://www.nasa.gov/>

2) 山下翔平 : 薄膜からなる正多面体の平坦折り手法の研究, 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科 2012年卒業論文梗概集, 121-122, 2012

3) 2)の研究結果より得られた滑節点の追加条件