

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 安達 瑛翔

本論文は折紙テセレーションの一種である四辺形グリッド双対タイリング折紙に関する研究をまとめたものである。折紙テセレーションとは、折り目パターンが一定の規則で反復しつつ全体を構成する折紙であり、その工学的応用の可能性から近年注目を集める研究分野となっている。双対タイリング折紙は折り状態において表裏の両面がタイリングされるという特徴を持つもので、論文提出者が新たに提案した折紙テセレーションである。本論文は、両面が同一の平行四辺形グリッドでタイリングされ、全体として一定の厚みを持った平面状の構造をなすものを基礎として、柱面形状への拡張や変形動作の解析について論じている。

本論文は全5章から構成されている。第1章では、折紙テセレーションの3つの工学的性質と、応用としての折紙コアについて議論している。第1の性質は折りによる剛性である。たとえば、トタンなどに用いられる波板構造は平行な折りが反復したものと考えられるが、その折りによって曲げや圧縮に対する剛性を上げられる。この波板を中間構造として用い、表裏に表面材を接着して折り状態を固定したものが段ボールである。軽量で高剛性なパネルを実現するために、折紙テセレーションを中間構造に用いた折紙コアが注目されている。第2の性質は折りによる曲面形状の実現である。折り目パターンのトポロジーは不変でも、折り目の寸法や方向を変化させることで折り状態の形状が変えられる。第3の性質は展開状態から折り状態へと遷移する変形の過程である。特に、折り目によって囲まれた面要素が歪むことなく平面を保ったまま変形することを剛体折りと呼ぶが、金属などの剛性の高い材料にも適用可能である。以上のように、折紙コアとしてより高い剛性を実現すること、全体が曲面を構成すること、剛体折り可能であることなどが、重要な性質として指摘されている。

第2章では、両平面双対タイリング折紙について議論している。従来の折紙コアの多くは、表面材との接着箇所が折り目のみであることが多いのに対して、双対タイリング折紙ではタイリング面全体を接着面とできるため高剛性を期待できる。両平面双対タイリング折紙は、表裏両面のグリッドを構成する平行四辺形を底面とした四角錐とその隙間を埋める四面体によって構成されるが、四角錐の形状を定める3つのパラメータ、すなわち平行四辺形の2辺の長さの比と2辺のなす角度、四角錐の高さによって、構造を規定できる。ここでは3自由度空間において、両平面双対タイリング折紙の実現可能性や性質を明らかにすることに成功している。四辺形グリッドで構成される両平面双対タイリング折紙の実現可能性や性質を網羅的に解析したことは重要な成果と言える。

第3章では、両平面双対タイリング折紙を柱面へと拡張する方法について議論している。平行四辺形グリッドの一行をなす四角錐列とその間の四面体を並べたものはくさび形をなしており、両平面双対タイリング折紙は同じ形のくさび形列が表と裏から組み合わせられたものとみなせる。ここで1つのくさび形の開き角を変えることで、全体として曲がった柱面をなす柱面双対タイリング折紙を実現する方法を提案している。この際、組合せ可能なくさび形の開き角は高々2種類であること示すとともに、この2つの開き角とシフト量という3パラメータを用いて柱面双対タイリング折紙を規定し、その3自由度空間において実現可能性や構成可能な柱面の性質を明らかにした。さらに、3つのパラメータとくさび形の組合せ順序によって、柱面双対タイリング折紙を設計するシステムを構築し、いくつかの典型的な設計戦略と設計結果の例を示している。表裏の2面をタイリングしつつ柱面を構成する折紙テセレーションは、これまでに知られていなかったばかりか、柱面形状の設計において有用な3自由度空間を示し、具体的な設計手法を示したことは大きな貢献である。

第4章では、両平面双対タイリング折紙の剛体折り可能性について議論している。これまで折紙の剛体折り可能性を判定する一般的な手法は知られていない。ここでは両平面双対タイリング折紙の折り目パターンを、四角錐が連なった領域の“フレーム”と個々の四面体

に対応する“モジュール”とに分離して、それぞれの変形状態の整合性によって剛体折り可能性を判定する方法を提案している。モジュールを1種類と仮定すると、その対象性からフレームは特定の2自由度剛体折りが可能となる。一方、モジュールは1自由度剛体折り可能で、その変形状態はモジュール内部の折り目パターンによって定まる。したがって、両平面双対タイリング折紙の剛体折り可能性は、フレームの変形に整合するモジュールの折り目パターンを求める問題に帰着できる。フレームとモジュールの境界となる空間四辺形の形は、その2つの対角線の長さで定まることから、2つの対角線の長さでフレームの折り角の一方を用いた配置空間を定義し、この空間内でフレームとモジュールの共通変形状態を求めることで、剛体折り可能な折り目パターンを得ることに成功した。剛体折り可能性を判定する方法は非常に限定されたものがいくつか知られるのみであり、両平面双対タイリング折紙全般に適用できる剛体折り可能性の判定法を示したことは特筆できる。最後に第5章では、本論文の貢献をまとめるとともに、今後の発展について議論している。

以上のように本論文は、四辺形グリッドで構成される双対タイリング折紙について、両平面双対タイリング折紙の存在可能性や性質を網羅的に解析し、折り状態が柱面を構成する柱面双対タイリング折紙の実現法と設計法を提案するとともに、両平面双対タイリング折紙の剛体折り可能性の判定法と剛体折り可能な具体例を示すことに成功している。折紙コアとして表面材と全面で接着可能という特徴を持つ四辺形グリッド双対タイリング折紙について、多くの発見と提案を行ったものであり高く評価される。したがって、本審査委員会は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。