論文の内容の要旨

論文題目　四辺形グリッド双対タイリング折紙

―柱面への拡張及び折り変形の解析―

氏名　安達　瑛翔

数学や工学の分野において折紙テセレーションに着想を得た構造が注目されている。折紙テセレーションとは、折り目の繰り返しやパラメータ化されたユニットの集合により、平面的な模様や立体構造、曲面形状などを作る折紙である。折紙テセレーションが科学的な興味を引く性質として、１．形状２．変形３．剛性の三つがある。

一つ目の性質は、折紙が一枚のシートから様々な形状を作ることができる点である。例えば吉村パターンは円筒形を近似し、Pleated hyperbolic paraboloid は鞍型曲面を近似する。折り状態の形状をデザインする手法としてミウラ折りなど既存のパターンをパラメータ化して変化を見る方法がある。狙った形状からパターンを導く逆問題を解く研究もあり、Origamizer は汎用的なユニットを組み合わせることで任意のディスク同相なポリゴンメッシュを作るパターンを計算する。以上のシートから形状への変形はスケールに依存しない。マイクロスケールの折り紙や建築など様々な分野で折紙が研究、利用されている。

二つ目の性質は、折紙が折りと展開を繰り返し行えることである。折り目以外が歪まない折り変形を剛体折りと言う。ミウラ折りなど一自由度で剛体折りされる折紙は理想的には一つの折り目を折るだけで全体が連動するため製造上有利である。反対に円筒ねじり折りは剛体折りできない構造だが、安定状態間の遷移エネルギーを利用した免震や衝撃吸収が注目されている。またミウラ折りの面内方向での負のポアソン比など折紙はメタマテリアルとしても研究されている。

三つ目の性質は、折紙の折り変形以外への剛性である。ミウラ折りやナマコ折りなどに上下から表面材を貼り付け固定したものを折紙コアパネルと言う。折紙コアパネルに用いられる折紙構造は折紙コアと呼ばれ、構造をパラメータ化し剛性を比較する研究や曲面形状を作る研究などがなされている。

しかしながら既存の折紙コアパネルの多くで接着面は折り目であり面積 0 である。折紙コアと表面材との接着力は折紙コアの形状を固定するために重要であり、パネルの剛性に大きく関わる。そこで筆者は修士研究において表面材の全面をのりしろにする折紙コア、双対タイリング折紙を提案した。双対タイリング折紙は Lang の折り紙作品 ”Octet Truss, opus 652” を一般化した折紙である。双対タイリング折紙は内部に折り目を梁とした角錐と四面体によるトラス構造を持つ。そのため折り状態が開かないよう表面材を貼ることで折紙コアパネルとしての利用が期待できる。修士研究においては二回転対称な角錐を用い、図１のように上下の接着面に平行四辺形のグリッドができる大域的に平坦な双対タイリング折紙を扱った。この双対タイリング折紙を両平面双対タイリング折紙と呼ぶ。本論文では両平面双対タイリング折紙を柱面形状を作るように拡張し、また両平面双対タイリング折紙について剛体折り変形の解析を行う。

双対タイリング折紙を柱面に拡張するために、両平面双対タイリング折紙を図２のようなくさび形のユニットに分解する。くさび形は二回転対称な四角錐の列に四面体を嵌め込んだ構造をしている。両平面双対タイリング折紙は合同なくさび形を上下から噛み合わせるように接続して作られる。もし複数種類のくさび形を接続できるならば、大域的に柱面を作る双対タイリング折紙が得られる。これを柱面双対タイリング折紙と呼ぶ。異なるくさび形が折り状態と展開状態で接続される条件を考え、接続可能なくさび形は作図によって得られることがわかった。接続可能なくさび形は自身の他に高々一つである。くさび形の形状はくさび形のペアを決めると二種類のいずれか制限されるが、くさび形を接続する順番は任意であり筒型(図４)や波型(図５)など自由な柱面を作ることができる。図３の三つのパラメータでくさび形のペアを表し、さらに接続するくさび形の順番を指定することで柱面双対タイリング折紙をデザインするツールを作った。このパラメータについて双対タイリング折紙が成立する条件の解空間を明らかにした。解空間を参考にパラメータをとり、双対タイリング折紙のトラス構造を確認しながら形状を編集できる。柱面双対タイリング折紙のデザインの参考として、１．緩やかに曲がり円筒を近似するもの、２．角柱を作り閉じるもの３．一方のくさび形が縮退するもの、の三つの特殊なパターンを紹介した。

両平面双対タイリング折紙を剛体するために、網目状のフレームと内部の折り目が不定の四角形モジュールに分解する。フレームは折り目を追加することで二自由度の剛体折りが可能である。モジュールは一自由度の剛体折りとなる。フレームとモジュールの境界形状は二変数で表すことができる。フレームとモジュールの剛体折り挙動における境界形状のプロットは図６のようにフレームが面領域、モジュールが曲線となる。境界形状が一致していればフレームとモジュールを再接続できるため、フレームの描く領域内のモジュールの描く曲線によって全体の形状が決定される。この手法により、モジュール内部の折り目ごとに境界形状の変化をフレームと比較することで自己交差を除いた剛体折り可能性を判定できる。剛体折り可能な両平面双対タイリング折紙を得やすいと思われるヒューリスティックなモジュール設計手法として、モジュールが対角線で折られるものと菱形モジュールを平坦折りするものを紹介した。多自由度のフレームの変形を一自由度のモジュールが制御するという考え方は双対タイリング折紙に限らず変形挙動の設計への応用が期待される。その他今後の研究の発展として、１．剛体折りできない bi-stable な両平面双対タイリング折紙、２．柱面双対タイリング折紙のフレームの剛体折り、３．モジュールがスリットになりフレームのみを考える双対タイリング折紙、の三つを紹介する。

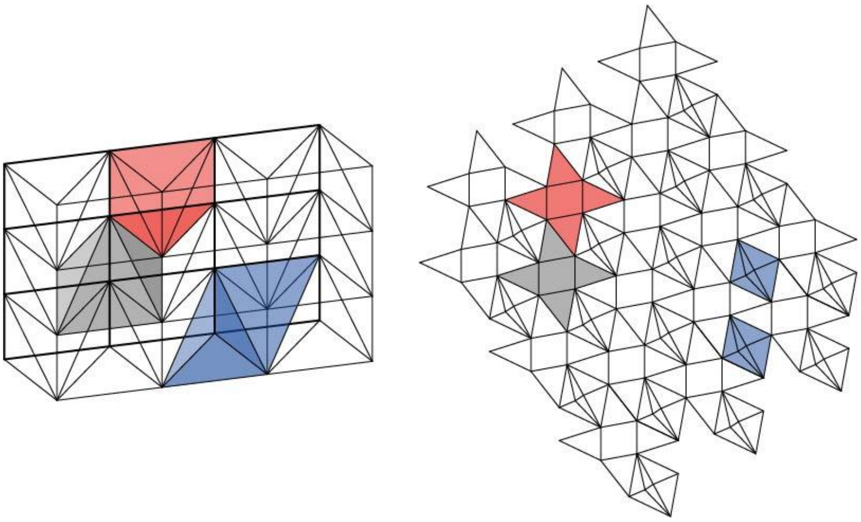

図１．両平面双対タイリング折紙。
左: トラス構造　右: 展開図

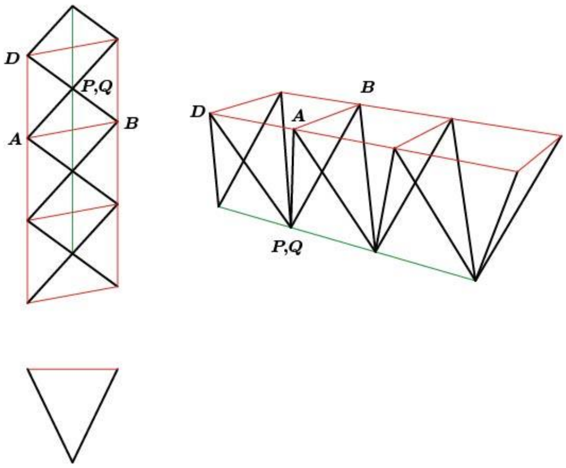

図２．くさび形ユニット。
頂辺: 緑の辺　台形側面: 頂辺を含む面

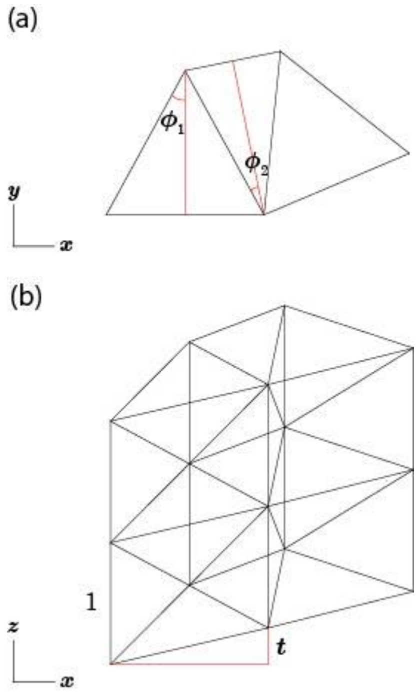

図３．デザインパラメータ

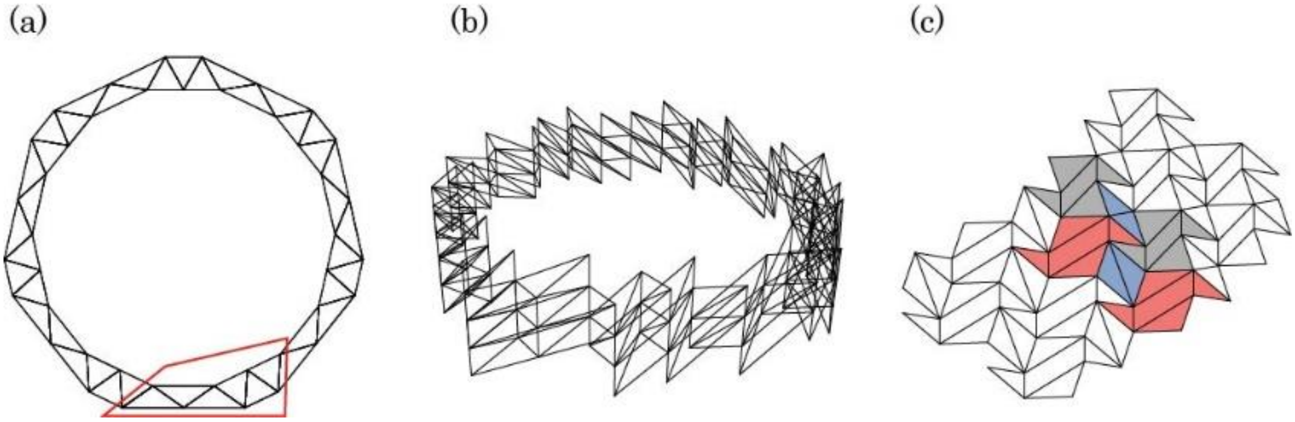

図４．１４角柱を作る柱面双対タイリング折紙。$\Phi_1 \cong 0.958378$, $\Phi_2 \cong 0.509579$, $t \cong 1.4762$.
(a) 頂辺方向の視点。(b) 頂辺に垂直な視点。(c) (a)において赤枠で囲んだ部分の展開図。

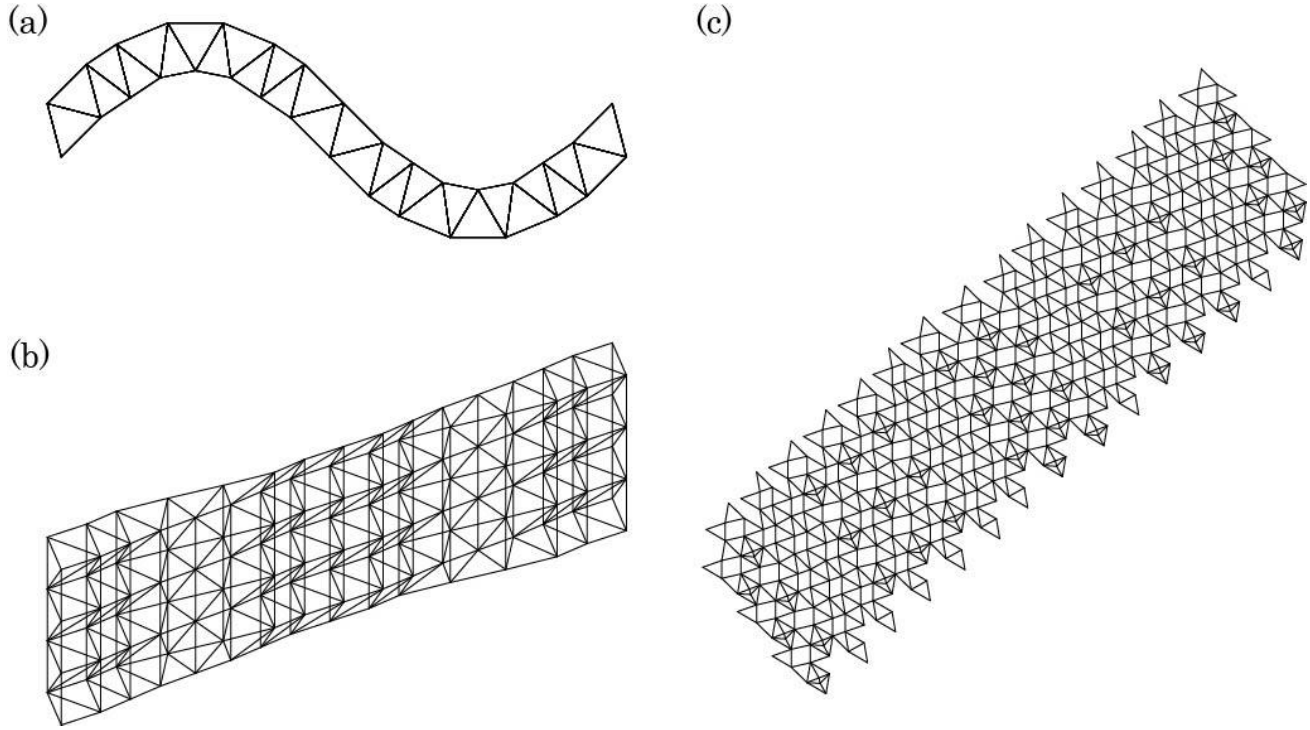

図５．サインカーブを近似する双対タイリング折り紙。$\Phi_1 \cong 0.528429$, $\Phi_2 \cong 0.332079$, $t = \frac{1}{4}$.
(a) 頂辺方向の視点。(b) 頂辺に垂直な視点。(c) 展開図。

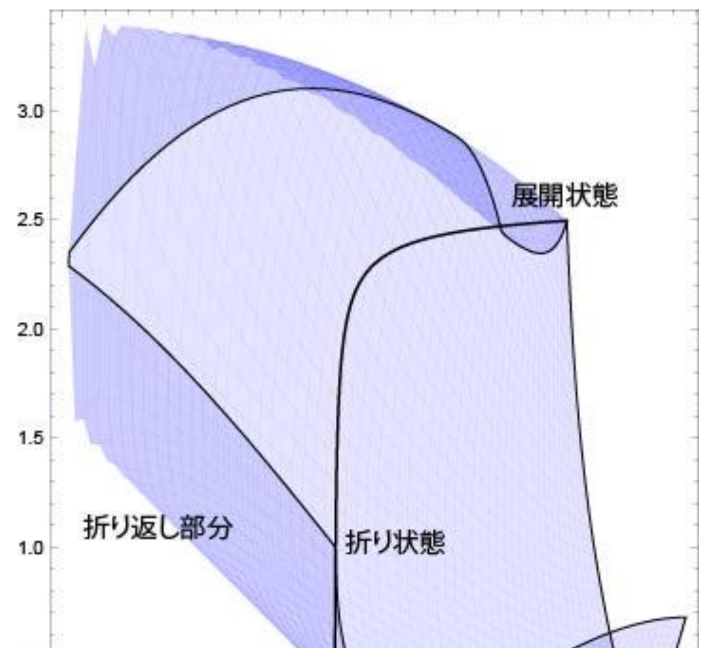

図６．フレームとモジュールの境界形状をプロットしたもの。
青い面: フレームのプロット
黒い曲線: モジュールのプロット
曲線が展開状態・折り状態・折り返し部分を通るとき両平面双対タイリング折紙は自己交差を許して剛体折り可能。