

京都大学	博士（工学）	氏名	堺 雄亮
論文題目	柔軟な変形機構を有する格子状曲面の解析と形状設計法		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、負のポアソン比を持つ構造（オーゼティック構造）と離散微分幾何学の方法を用いて、柔軟な変形機構を有する格子状曲面の大変形解析と形状設計のための方法を提案したものであり、5章からなっている。各章の要旨は以下のとおりである。</p> <p>第1章は序論であり、柔軟な変形機構を有する格子状平板に面内の強制変位を与えて生成される格子状曲面（ベンディングアクティブ・グリッドシェル）の解析法、建築の大空間を覆う構造物への機械的メタマテリアルの利用、メタマテリアルの一つであるオーゼティック構造を用いた曲面の解析と設計法およびオーゼティック構造を用いた円筒機構の幾何特性と力学特性に関する研究の現状を概説し、本論の目的と構成を示している。</p> <p>第2章では、面内変形に対して負のポアソン比を持つオーゼティック構造の力学特性を利用して、柔軟な格子状平板に一方向の面内強制変位を与えてベンディングアクティブ・グリッドシェルを生成する方法を提案している。その際、シェブロン・ロッドとタイ・ロッドで構成されるリエントラント・ハニカムとリエントラント四辺形の2種類の負のポアソン比を持つ格子パターンを用いることにより、さまざまな正のガウス曲率を持つ凸な曲面形状を生成できることを示している。また、1種類の格子パターンの一方向への非周期的な組合せで構成される非周期型の格子状曲面や、2種類の格子パターンの組合せで構成されるハイブリッド型の格子状曲面、およびそれらの特性を複合させて設計した格子状曲面における幾何形状パラメータと、強制変位によって得られる曲面形状の関係を明らかにしている。</p> <p>上記の定性的評価に加えて、オーゼティック構造に面内の強制変位を与えて生成される離散曲面の形状の特性を定量的に評価するため、離散微分幾何学の手法を用い、角度欠損として計算される離散ガウス曲率と Cotangent formula で定義される離散平均曲率ベクトルを用いて最適化問題を定式化している。シェブロン・ロッドの角度と断面せいに関するパラメータを設計変数とし、最適化問題を発見的手法の一つである粒子群最適化法で解くことによって、パラメトリックな曲面定義を用いずに、特定領域で凸性を有する複雑な形状の曲面を生成できることを示している。また、リエントラント・ハニカムとリエントラント四辺形を用いて最適形状を求めて、局所的に凸な領域ではシェブロン・ロッドと水平軸の角度が小さくなる傾向があることを示している。さらに、上記の最適化問題によって非周期型の格子状曲面の最適形状を求めることで、局所的に凸な領域では格子パターンの非周期性を決定するサブ領域の幅が小さくなる傾向があることを示している。</p> <p>第3章では、均一な2回回転対称性を有する六角形ユニットで構成された離散円筒機構を対象として、構成部材を梁材あるいは板材として設計するための手法を提案している。まず、正六角形格子を有するカーボンナノチューブの設計式に対し、ユニット形状の角度の範囲を拡張することにより、リエントラント・ハニカムを含む2回回転対称性を有する六角形格子で構成される離散円筒機構の基本構造（辺と頂点の集合）を生成するための設計式を導いている。次に、頂点オフセットを用いること</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	堺 雄亮
------	---------	----	------

で、中心方向オフセットによる方法で設計した機構と比べて板材のねじれ量とねじれた四辺形の数を低減する手法を提案している。また、梁材からなる離散円筒機構の軸方向に強制圧縮変形を与えて静的構造解析を行い、円筒のねじれ変形および座屈特性と幾何形状パラメータの関係を明らかにしている。その結果、六角形格子の形状パラメータを変更することにより、梁材で構成される離散円筒機構の円筒中心軸方向の反力と軸方向変形の等価弾性係数（等価軸方向ひずみの等価応力に対する比）を調整できることを示している。さらに、螺旋モデルの軸方向変形とねじれ変形のカップリングについて、幾何学的カイラリティと動的カイラリティの概念に基づいて考察し、オーゼティック構造をユニットに持つ螺旋モデルがカイラル・メタマテリアルとして成立することについて述べている。

第4章では、柔軟な格子状曲面の大変形解析のための3次元弾性梁モデルを開発している。このモデルは、平面から大変形を経て生成される曲面上の節点での単位法線ベクトルを用いて接合部の回転と部材の曲げおよびねじれ変形を表現しており、回転ベクトルの増分形式を用いずに幾何学的非線形性を表現できる。また、このモデルは、エネルギー原理に基づき内力と外力の釣合い式を導出し、陽解法に分類される動的緩和法を用いて、あるいは全ポテンシャルエネルギー最小化問題を非線形計画法を用いて解くことによって釣合い形状を求めるため、接線剛性行列の導出が不要である。提案したモデルを用いてベンディングアクティブ・グリッドシェルの大変形解析を実施し、平面から生成される曲面形状が有限要素解析の結果と良好な精度で一致することを示すとともに、このモデルをリエントラント・ハニカムで構成されるオーゼティック構造を用いたグリッドシェルに対しても適用できることを示している。

第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、負のポアソン比を持つ構造（オーゼティック構造）と離散微分幾何学の方法を用いて、柔軟な変形機構を有する格子状曲面の大変形解析と形状設計のための方法を提案している。以下、その内容と得られた結果を記す。

(1) 負のポアソン比を持つオーゼティック構造の力学特性を利用して、柔軟な変形機構を有する格子状平板に面内の強制変位を与えて生成される格子状曲面（ベンディングアクティブ・グリッドシェル）の形状を設計するための方法を提案した。

(2) 非均一あるいは複合的な格子パターンを用いることにより、正のガウス曲率を持つ凸な曲面形状を生成できることを示した。また、格子パターンの組合せや幾何形状パラメータと、強制変位によって得られる曲面形状の関係を明らかにした。

(3) オーゼティック構造に面内の強制変位を与えて曲面を生成する際に、離散微分幾何学の手法で計算される離散ガウス曲率と離散平均曲率ベクトルを用いて最適化問題を定式化し、それを発見的な手法で最大化することによって、パラメトリックな曲面定義を用いずに、特定領域で凸性を有する複雑な曲面を生成できることを示した。また、局所的な凸性とオーゼティック構造の幾何形状パラメータの関係を明らかにした。

(4) 均一な2回回転対称性を有する六角形で構成された離散円筒機構を対象として、離散幾何学に基づく既往の理論式を拡張した。また、頂点オフセットを用いて構成部材を板材として設計する手法を提案し、板材のねじれを低減することで製作性を向上できることを示した。さらに、梁材からなる円筒機構の軸方向に強制圧縮変形を与えた静的構造解析を通じて、円筒のねじれ変形および座屈特性と幾何形状パラメータの関係を明らかにした。

(5) 柔軟な格子状曲面の大変形解析を目的として、エネルギー原理に基づき幾何学的非線形性を考慮した3次元弾性梁モデルを開発した。そのモデルは、曲面上の節点での単位法線ベクトルを用いて接合部の回転と部材の曲げおよびねじれ変形を表現しており、動的緩和法を用いることによって接線剛性行列や回転ベクトルの増分形式が不要である。

(6) 上記(5)のモデルを用いてベンディングアクティブ・グリッドシェルの大変形特性を良好な精度で求めることができ、オーゼティック構造を用いたグリッドシェルに対しても適用できることを示した。

本論文は、オーゼティック構造と離散微分幾何学の方法を用いて、柔軟な変形機構を有する格子状曲面の大変形解析と形状設計のための方法を提案したものであり、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。