

製作・施工性に優れる自由曲面近似木造ラチスシェルの形状設計法

Design method for efficient fabrication and construction of freeform timber lattice shells

和多田 遼（Watada Ryo）

本研究では、接合部でねじれ・キンクが生じないエッジオフセット（EO）ラチスシェルの幾何学的特性を活かし、特殊な加工設備や煩雑な製作工程を必要とせず、低コストかつ高効率で製作・施工が可能なラチスシェルの設計手法を提案する。また、提案する設計手法の有効性を小規模パビリオンの試設計・製作を通じて確認する。

1. はじめに

大規模な建築曲面を覆うシェル構造は、近年、生産コストや環境負荷低減の観点から、直線部材を三角形・四角形・六角形などの多角形格子として組み合わせるラチスシェル構造によって近似的に設計される例が増えている。図 1 に示す箱型断面や T 型断面など対称性を持つ規格部材を用いたラチスシェルにおいて、コストや施工性に大きな影響を及ぼすのは、接合部で発生するねじれ（図 1 左）やキンク（図 1 右）である。任意の自由曲面をラチスシェルで表現しようとした場合、接合部を曲面上に無秩序に配置し直線材で結ぶだけでは、複数の部材の対称面が一点で揃わず、あるいは接合部の軸と梁の取り付け角が一致しないため、必然的にねじれやキンクが生じる。その結果、特殊仕様の接合部を設計・製作する必要性が生じたり、梁自体にねじり加工を施す必要が出てくる。こうした対応は製作コストを押し上げるうえ、高度な生産技術や専門設備を前提とするため、対応可能な人材や工場に限られてしまう。さらに、ガラスなどの仕上げ材を設置する場合には、ラチスシェルで囲まれるパネルが平面であることが不可欠であるが、4 辺以上の多角形パネルでは一般に平面性を満たさない。その場合、曲げ加工したガラスを使用するなど追加の処理が求められ、生産性の低下やコスト増加の要因となる。自由曲面をラチスシェルで実現する場合、これらの要素により、梁のコストは平面構造の最大 12 倍、ガラスパネルのコストは 35 倍に達するともいわれている。

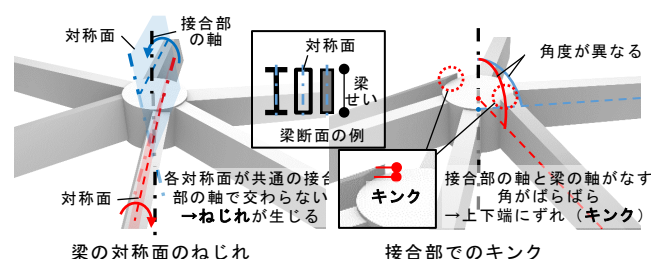


図 1 ラチスシェルの接合部での梁のねじれ・キンク

ラチスシェルの幾何特性は 2 つのメッシュの組み合わせで表現できる（図 2）。

Pottmann らは、図 3 に示すような特性を有するエッジ・ノード・面で構成されるエッジオフセットメッシュ (EO メッシュ) を定義し、その形状を基にラチスシェルを設計すれば、全て同一の梁せいで構成でき、かつ前述した「ねじれ・キンク・非平面性」が生じないラチスシェル (以下、EO ラチスシェルと呼ぶ) が実現可能であることを示し、ノード位置を設計変数として EO メッシュに近似するメッシュを求める手法を提案している [1]。著者はこの手法をさらに拡張し、メッシュ全体の形状を 5 つのメビウス変換パラメータで制御しつつ、各面のエッジ長を変数として設定し、新たな面を加えるごとに逐次的に最適化を行うことで、目標とする曲面形状に近似しながら厳密な EO メッシュを効率的に生成する方法を提示している [2,3]。しかし、著者がこれまでにやってきた EO メッシュ生成手法に関する研究は、幾何学的条件に基づく数理的検討にとどまっており、実際のラチスシェル製作を想定したディテールの検討や、それに伴い定まる部材・接合部の力学的性能の評価には十分に踏み込めていない。接合部にねじれが生じないという EO ラチスシェルの特性を、実際の設計・施工における条件 (納まりや必要耐力など) へ適切に反映させた、新たなディテールの提案が求められている。

本研究では、EO ラチスシェルの持つ幾何学的特性を活用し、特殊な加工機や複雑な製作工程を伴うことなく、低コストかつ高効率で製作・施工が可能となるラチスシェルの全体形状およびディテール設計法の提案を行う。また、提案するラチスシェル設計法の妥当性を、小型パビリオンの試設計・試製作により確認する。

2. 接合部ねじれの無い EO ラチスシェルの特性を活かしたディテールの提案

EO ラチスシェルの特性を活かした製作効率性の高いディテールについて考察する。EO ラチスシェルの持つ幾何特性として、以下の内容が挙げられる。

- ・ ラチスシェルの各梁の対称面は対応するエッジが平行かつ同一距離 d となる EO メッシュ M および M' で表現される。
- ・ 各接合部に接する全ての対称面は面内に同一の軸 (ノード軸) を含む。
- ・ EO メッシュ M の同一接合部に接する全てのエッジは、当該接合部のノード軸を軸とする同一円錐上に存在する。

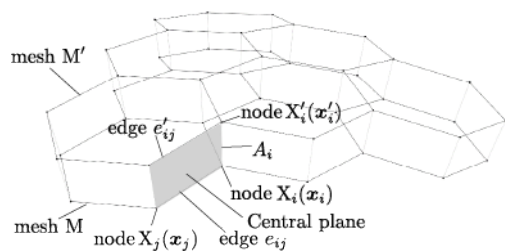


図 2 ラチスシェル梁の対称面を表現する 2 つのメッシュ

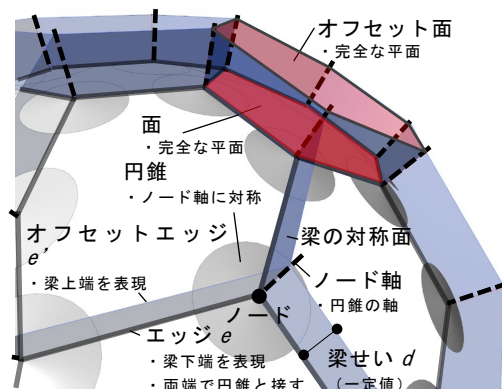


図 3 接合部でねじれ等の無いラチスシェルを表現する EO メッシュ

ここでは、木造、かつ合板や LVL 等の板状の材を用いたラチスシェル（図 4(a)）の設計・製作を想定し、上記の EO ラチスシェルの特性を利用しつつ、部材の製作・施工が容易なディテールとして、ほぞ接ぎを用いるディテール（図 4(b)）、および相欠き接ぎを用いるディテール（図 4(c)）の 2 種類を提案する。これらのディテールからなるラチスシェルは、全ての梁および接合部を、合板や LVL などの板状部材からの切り出し加工のみで製作可能な形状である。これらの接合部はいずれも、上下二枚のプレート（以下、これらを上下ダイヤフラムと呼称する）で各梁と接合する。前述の EO メッシュの幾何特性より、全ての梁材の対称面は上下ダイヤフラムと垂直に交わり、かつ全ての梁の材軸はこれらのダイヤフラムが含まれる平面と同一の角をなす。このとき、上下ダイヤフラムおよび各梁に設けるほぞ穴・相欠きは全て、板材の垂直切断（図 5）のみにより加工されるため、比較的安価で広く普及している 3 軸 CNC 加工機やレーザー加工機による製作が可能であり、人の手による加工時にも特殊な治具が不要、精度管理が容易などの利点がある。

本研究では、ノード軸および隣接する各梁のエッジから、図 4(b)および図 4(c)のディテール形状を自動的に生成する 3D-CAD ソフト Rhinoceros プラグイン Grasshopper 用コンポーネントを開発した。



図 4 接合部でねじれが無い EO ラチスシェルの幾何形状を活かしたディテール案



図 5 切断の種類

3. 試設計・試製作による検討

3.1 形状設計

前述の提案ディテールを用いて、木合板によるラチスシェル構造を設計し製作を行う。ここでは、接合部と梁部材の応力伝達に優れるほぞ接ぎ（図 4(b)）のディテールを採用する。EO メッシュの生成には著者らの提案手法[1,2]を用い、パラメトリックに生成した回転対称なターゲット曲面に沿うよう形状を列挙し（図 6）、力学的安定性、製作性、意匠性の観点から採用デザインを定めた。その後、得られた EO メッシュから、図 4(b)のほぞ接ぎのディテールに基づき各梁と各接合部の形状を生成した。生成には前述の Grasshopper 自作プラグインを用いた。採用したラチスシェルのデザインを図 7 に示す。

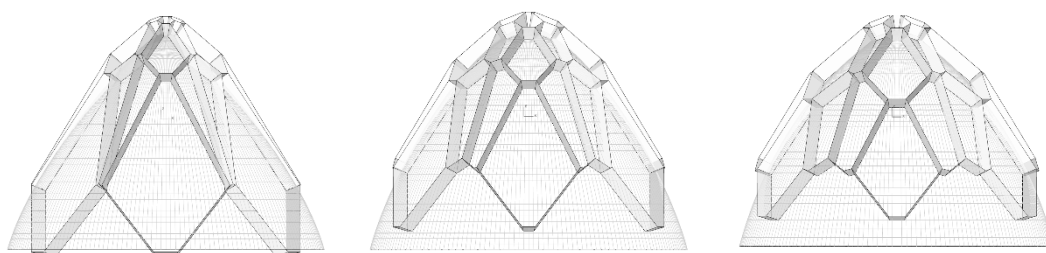


図 6 逐次生成法[1, 2]により生成列挙された EO ラチスシェルの例

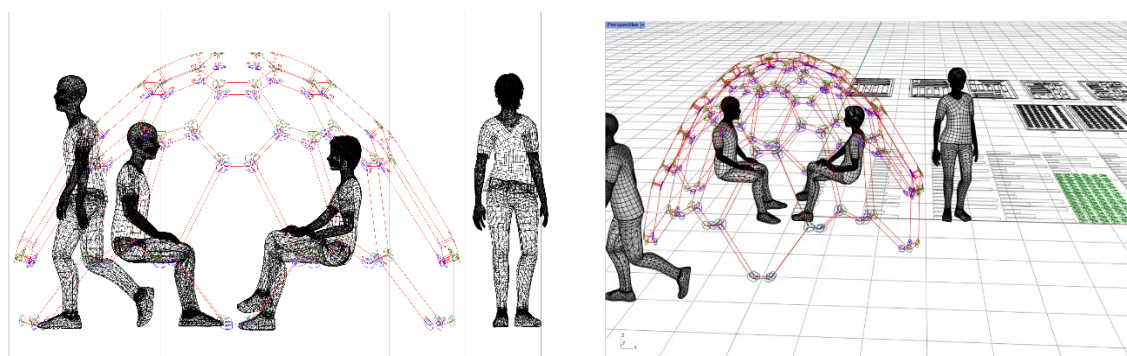


図 7 採用した EO ラチスシェルのデザイン

3.2 製作

ラチスシェルの設計データからカットデータを作成し、CNC ルータを用いて木合板から自動制御による切り出しを行う。木合板からの切り出しの様子、および切り出した部材形状を図 8 に示す。切り出した部材の組立は、組立・解体のため繰り返しの着脱が必要な一部の接合部をのぞき、ほぞとほぞ穴の嵌合による摩擦・支圧のみで固定する計画とし、ゴムハンマーのみで製作を行う。試製作時の組立状況を図 9 に示す。

製作されたラチスシェルを図 10 に示す。同図から確認できるとおり、製作されたラチスシェル形状は計画時の形状（図 7）と合致している。

以上のとおり、本研究で提案する EO ラチスシェルの全体形状・ディテールの設計手法により、自由曲面形状の木造ラチスシェルを人の手による複雑な加工製作の必要なく実現できることを、試設計・試製作により確認した。



図 8 CNC ルータによる部材の切り出し

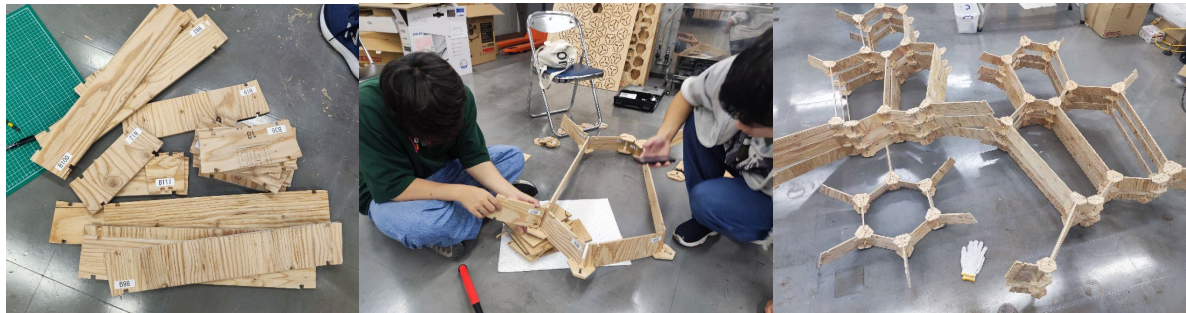


図 9 ラチスシェルの製作状況

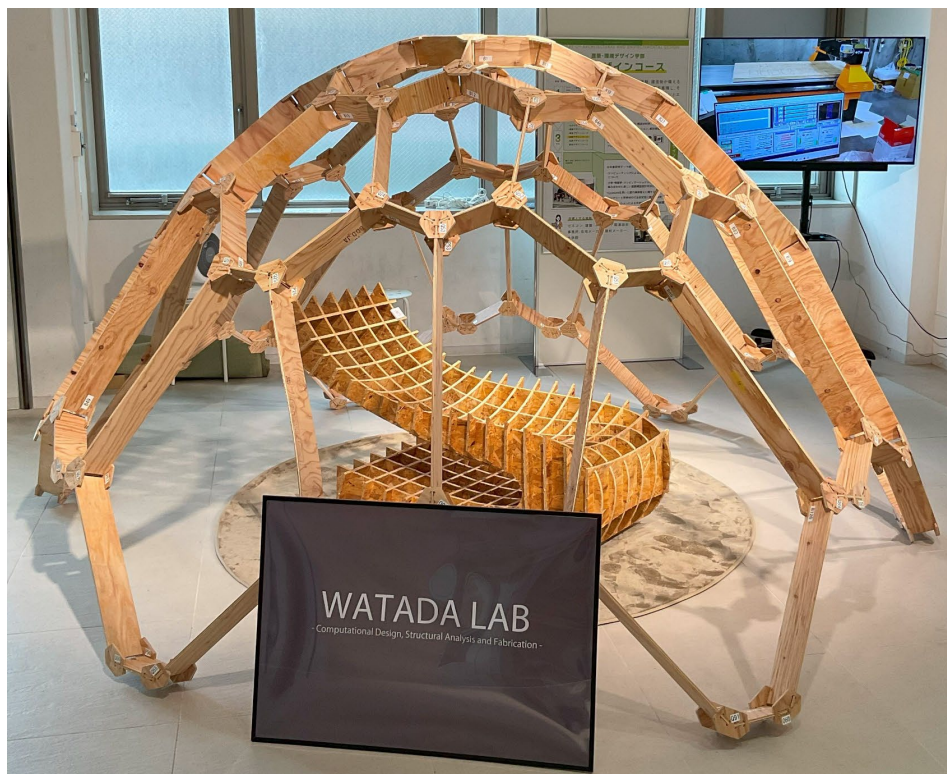


図 10 完成したラチスシェル

4. まとめ

本研究では、EO ラチスシェルの持つ幾何特性を活用し、特殊な加工機や複雑な製作工程を伴うことなく、低コストかつ高効率で製作・施工が可能となるラチスシェルの全体形状およびディテール設計法の提案を行い、提案するラチスシェル設計法の妥当性を、小型パビリオンの試設計・試製作により確認した。

提案したディテールは、EO ラチスシェルの幾何学的特性を有効に活用し、自由曲面形状に沿う複雑な幾何形状にも関わらず、合板等の板材から 3 軸 CNC 加工機のみで切り出しでき、特別な技能や工数の必要なく製作可能であることが確認された。

なお、今回はほぞ接ぎや相欠き接ぎが可能な木質材料を前提としたが、他の材料への展開も重要である。鉄骨造の場合、ねじれが生じるラチスシェル接合部の製作は鋳物を用いる場合が多く、製作コスト増の原因となるが、EO ラチスシェルの幾何特性を活用すれば、板材の組立溶接のみによるディテールも可能と考えられる。今後は、木質材料以外の材料でのディテール提案も合わせて検討していきたい。

参考文献

1. Pottmann, H., Liu, Y. Wallner, J., Bobenko, A., Wang, W., Geometry of multi-layer freeform structures for architecture, in: ACM SIGGRAPH 2007 papers, 2007, pp. 65–es.
2. Watada, R. and Ohsaki M., Sequential generation method for hexagonal lattice shells with edge offset mesh, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2024, Zurich, Switzerland, 2024.
3. Watada, R. and Ohsaki M., Shape generation of hexagonal lattice shell consisting of edge offset mesh, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023, Melbourne, Australia, 2023.