

## 引張り圧縮混合型シェル構造の建設可能性の実証

Feasibility study on construction of tension-compression mixed shells

東京大学総合文化研究科広域科学専攻・広域システム科学系 助教 三木優彰

### (研究計画ないし研究手法の概略)

本研究は令和4年度に Computer Graphics のトップカンファレンスである Siggraph Asia 2022 (正確にはアジアで行われる Siggraph の姉妹会議) に採択された論文” Interactive Exploration of Tension-compression Mixed Shells” をさらに発展させようという趣旨でした(論文リストの[2])。本論文は連続なシェル構造の形状決定手法を提案したもので、従来難しいと指摘されてきた引張り圧縮混合型を正しく解ける画期的なものです。ただし、本手法はパネルや直線部材への置換を考慮しておらずそのまま直ちに建築に応用できるわけではありません。そこでパネルや直線部材への置換を考慮した手法へ発展させようというのが本研究の出発点になります。

まず、Siggraph Asia 2022 で発表した” Interactive Exploration of Tension-compression Mixed Shells” は卓越した研究業績とみなされますので、令和4年度は招待講演として第23回情報科学技術フォーラム FIT と、Visual Computing 2023 で研究発表を行いました。

並行してパネルや直線部材への置換を考慮した手法への発展も進めました。実は連続なシェルの離散部材への置換は主曲率線や主応力線に沿って行うと良いことが度々指摘されており、また主方向の代わりに共役方向を選択することで両方の特徴を兼ね備えた分割を見つけることができる、といったアイデアも Helmut Pottmann の研究グループを中心に度々発表されています。したがってこれらの既存の知見を我々の手法と組み合わせればよい、と楽観的な見通しを持って研究を開始しました。しかしながら我々の目論見ははずれ、既存手法はそのままでは引張り圧縮混合型には適用できないということがわかりました。不本意ではありましたが、この結果をシェルと空間構造の国際学会 IASS(オーストラリア/メルボルン)で報告しました。

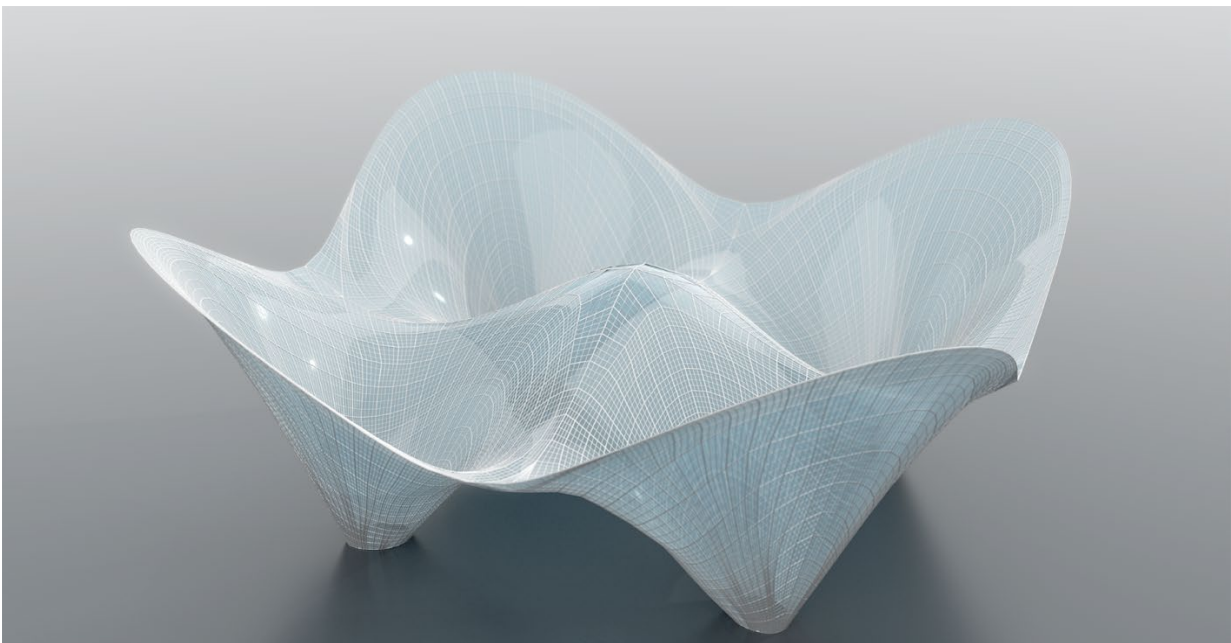
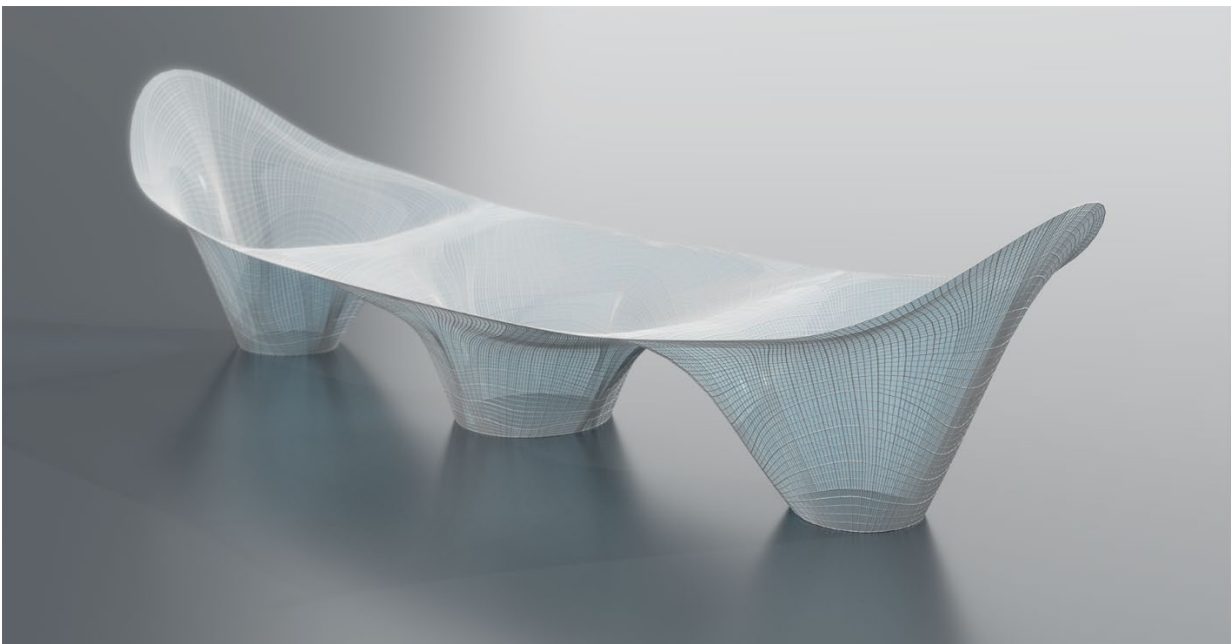
その後共同研究者である米国 Thornton Tomasetti の構造エンジニア Toby Mitchel と議論を重ね、引張り圧縮混合型においても曲率方向と応力方向の性質を兼ね備えた共役方向(doubly-conjugate grid と呼んでいます)を必ず見つけることができる条件を探求しました。大変厳しい道のりでしたが最終的に我々が現在 Alignment Conditions と呼んでいる一連の新しい微分方程式の導出に成功しました。これは双線形の微分方程式で驚くべきことに” Interactive Exploration of Tension-compression Mixed Shells” で解いた釣り合い方程式と同じ形式で与えられます。つまり我々の既に保有している既存のコード、変数射影法であっさりと解くことができます。

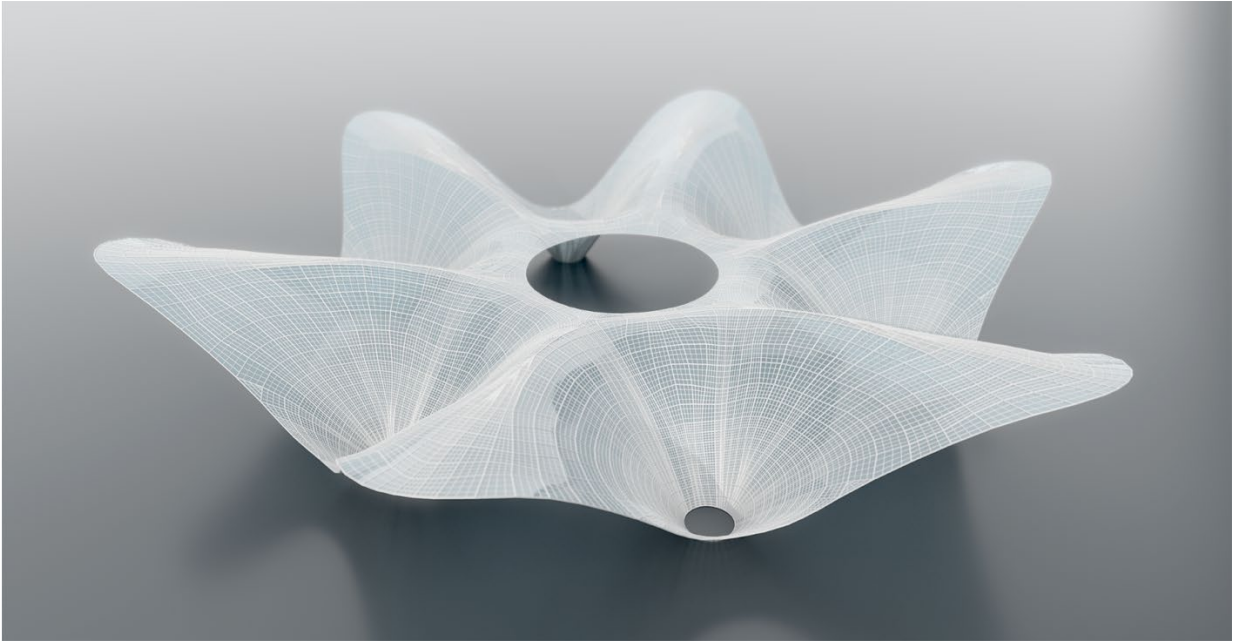
我々はこの新しい微分方程式の発見を中心に新しい論文の執筆を行い、再び Computer Graphics のトップカンファレンスである Siggraph 2024 (今度は北米の本家の方です)に投稿を行いました。本論文は査読者から絶賛と言ってよい高い評価を受け最終的に採択の通知を受け取りました。令和6年7月に国際会議での発表(米国 Denver)と学術ジャーナル

(Transactions on Graphics、通称 ToG)からの出版物が予定されています(論文リストの[1])。

本手法によって計算された doubly-conjugate grid を用いると、力学的に合理的でかつ施工のしやすい曲面の分割が得られます。例えばコンクリートシェル型の型枠が簡単に製作できたり、平坦なガラスで覆われたグリッドシェルの設計が可能になるなどとても大きなインパクトが想定されます。本研究の最終的なゴールは実際に建築を建設することでその建設可能性を実証することです。頂いた助成金を無駄にしないようこれからも精進してまいります。

最後に本手法により計算したグリッドシェルの CG によるレンダリングを掲載します。





### （実験調査によって得られた新しい知見）

連続なシェルの形状決定結果をグリッドシェルに変換するためには応力と曲率の主もしくは共役な方向を揃えると良いことが指摘されてきました。本研究ではこの‘揃える条件’が釣り合い式と同じシェルと応力関数の間の対称な 2 階の双線形微分方程式で書けることを指摘しました。また、その数値解法として釣り合い式と同じ変数射影法で解けることを指摘しました。特に釣り合い式と‘揃える条件’を連立して解くことで力学的に合理的でかつ施工のしやすいグリッドシェルの形状決定が可能となります。構造デザインの世界に大変大きなインパクトが想定されます。

### （発表論文）

[1] M. Miki and T. Mitchell, “Alignment conditions for nurbs-based design of mixed tension-compression grid shells (to appear),” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 43, no. 4, Jul. 2024, ISSN:0730-0301.

↓本研究助成以前の研究だが本研究の直接の出発点となった論文

[2] M. Miki and T. Mitchell, “Interactive exploration of tension-compression mixed shells,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 41, no. 6, Nov. 2022, ISSN: 0730-0301.

\*いずれも *Computer Graphics* の最高峰の学会である *Siggraph* で発表した論文で卓越した業績とみなされます。*Siggraph* は近年 *Digital Fabrication* や *Computational Design* 関連のハイレベルな論文が増えています。