

# OpenSees for Grasshopper と Wallacei による CLT 折版構造のパラメトリックスタディ Parametric study in CLT folded-plate structure by Opensees for Gresshopper and Wallacei

○齋藤 魁利\*<sup>1</sup>, 藤田 慎之輔\*<sup>2</sup>  
Kairi Saito\*<sup>1</sup>, Shinnosuke Fujita\*<sup>2</sup>

\*1 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 大学院生

Graduate Student, Graduate School of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

\*2 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 准教授 工博

Associate Professor, Graduate School of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu, Dr. Eng.

**キーワード** : CLT 折版構造 OpenSees for Grasshopper Wallacei 遺伝的アルゴリズム  
**Keywords** : CLT folded-plate structure OpenSees for Grasshopper Wallacei GA

## 1. 概要

折紙工学は近年目覚ましい発展を遂げており、対話的に折紙の設計や折り畳みのシミュレーションができるインターフェースやソフトウェアが開発されている<sup>1,2)</sup>。それらは主に作品としての折紙が想定されている。

一方、建築構造物の設計においても、折紙工学の知見を利用した事例は多く存在する。折紙の性質を利用した構造形式として最も単純なものは折版構造であろう。折版構造は、古くは九州工業大学記念講堂や群馬音楽センターなどが有名であるが、RC で大スパンを可能にする構造形式として用いられてきた。近年では、合板を積層接着した厚型パネルである Cross Laminated Timber(以下, CLT) が登場し、2016 年の告示改正以降、CLT パネル工法により建築構造物を建てるのが可能となった。CLT パネル工法で大スパンを飛ばすためには形態剛性を利用する方法が考えられるが、シェルなどのように曲線要素を含まず直線要素のみで架構を構成可能な折版構造は CLT パネル工法と相性が良い。例えば、第 2 著者は CLT パネル工法としては日本で初めて折版構造による木質大空間を構造設計しており、8m 超の階高と 8m 超の無柱空間をわずか 90mm の CLT パネルのみで実現している<sup>3)</sup>(図 1)。

折版構造はパネル同士の角度によって剛性が材積が



図 1 北九州市立大学メディア高機能木材研究所

変化するほか、モジュールが存在するためパネルサイズによっては歩留まりが悪くなるなど、コスト面とトレードオフの関係にあり、最適なパネル組み合わせを人間の直感と感性で決定するのは難しい。そこで本研究では、ケーススタディとしてアーチ型の折版構造を対象とし、GA により多目的最適化を行い、特に折版構造の剛性と表面積の関係について考察する。

## 2. 解析モデルの概要と最適化問題

本研究では、次のようなアーチ型の折版構造を取り扱う。工学的応用が可能な折りパターンとしてはミウラ折りや吉村パターン、ナマコ折りなどが有名であるが、本モデルは吉村パターンを四辺形要素の拡張したものとなっている。

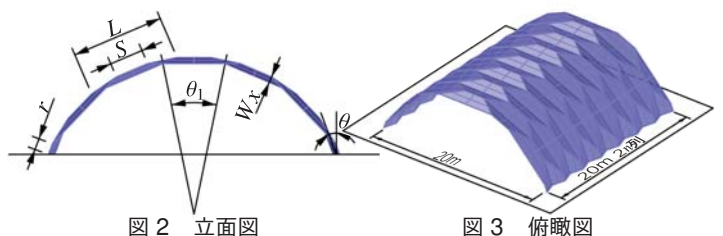


図 2 立面図

図 3 俯瞰図

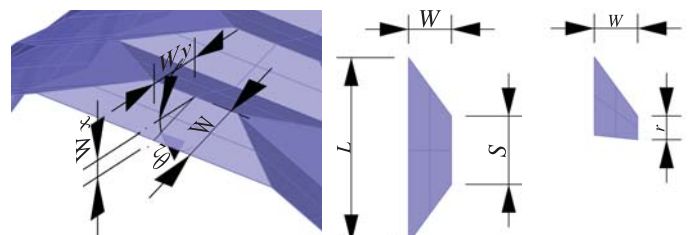


図 4 俯瞰図詳細

図 5 部材

図 6 根元部材

$$L = \frac{20 \cdot 2(2 - S/L)}{\sin \theta_r \cdot \left\{ 1 - \frac{1 - S/L}{\tan^2 \theta_r \cdot \tan^2 \frac{\theta_1}{2}} + \frac{r' \cdot S/L}{\tan \theta_r \cdot \tan \frac{\theta_1}{2}} \right\}} \quad (1)$$

$$\theta_1 = \frac{2}{\text{Pit} - 1} \left( \frac{\pi}{2} + \theta_r \right) \quad (2)$$

$$W_x = \frac{L - S}{2} \tan \left( \frac{\theta_1}{2} \right) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \pi - \arccos(W_x/W) \quad (4)$$

$$W_y = W \sin(\theta_2) \quad (5)$$

$$r' = 0.5 - r/S \quad (6)$$

Pit: 一列における部材の個数 (7個)

$\theta_r$ : モデル根元の角度

$L$ : 部材の長手長さ

$S$ : 部材の短手長さ

$W$ : 部材の幅

図3)に示すような2種類の部材(図5, 図6)で構成される折版アーチを考える. 20m × 20mを覆うように大きさを調整し, 2*n*列で形成されている. なお, 3層3プライのCLTを想定し, 板厚90mm, 単位重量4.0kN/m<sup>3</sup>, ヤング係数4.0 × 10<sup>6</sup>kN/mとする. ジオメトリはgrasshopper(以下, gh)により生成し<sup>4)</sup>, 弾性解析はOpenSees, 最適化にはGAによる多目的最適化のghプラグインであるWallacei<sup>5)</sup>を用い, 式(7)に示す歪みエネルギー*E*と表面積*V*を目的関数とした多目的最適化を行う.

部材の短手方向の長さ*S*は長手方向の長さ*L*より小さくし(式(7b)), 部材幅の連続方向の長さ*W<sub>y</sub>*は20mスパンを覆う最小限の長さとし(式(7c)), 根元の部材長さ*r*は*S*以下とし(式(7d)), 根元の部材角度 $\theta_r$ は $-\pi/6$ から $\pi/6$ までに制約した(式(7e)). そして, GAの集団サイズは50, 世代数は100とした. なお, 要素の辺長が小さくなりすぎると弾性解析がエラーを起こすため, *S*, *r*, *r*の反対側の辺は節点間の距離が極端に小さくならないような処理を解析中で施している.

$$\text{minimize} \quad \begin{cases} V(S/L, r', W, \theta_r) \\ E(S/L, r', W, \theta_r) \end{cases} \quad (7a)$$

$$\text{subject to} \quad 0 \leq S/L \leq 1.0 \quad (7b)$$

$$2(n-1)W_y < 20 < 2nW_y \quad (7c)$$

$$-0.5 \leq r' \leq 0.5 \quad (7d)$$

$$-\pi/6 \leq \theta_r \leq \pi/6 \quad (7e)$$

### 3. 最適化結果と考察

*n* = 7~17の全11パターンについて多目的最適化を行った結果を図7~図28及び表1にそれぞれ示す. 図7~図28は, 左にパレートフロントを示し, 右の(a), (b), (c)にそれぞれ「*V*が最小となる解」, 「*V*と*E*がバランスよく最小化されたパレートフロントにおける中央部の解」, 「*E*が最小となる解」の形状図を示している. また, 表1にそれぞれの最適解の目的関数値をまとめている.

表1 最適化結果

<i>n</i>	(a)		(b)		(c)	
	<i>V</i> [m <sup>2</sup> ]	<i>E</i> [kNm]	<i>V</i> [m <sup>2</sup> ]	<i>E</i> [kNm]	<i>V</i> [m <sup>2</sup> ]	<i>E</i> [kNm]
7	456.63	0.1248	477.77	0.0458	563.33	0.0298
8	456.21	0.1246	477.64	0.0435	581.91	0.0300
9	455.90	0.1244	477.02	0.0425	596.89	0.0302
10	455.64	0.1243	477.08	0.0410	609.91	0.0306
11	455.44	0.1243	475.52	0.0415	612.37	0.0317
12	455.26	0.1242	476.57	0.0401	645.12	0.0313
13	455.11	0.1242	470.32	0.0438	562.75	0.0330
14	454.99	0.1241	470.62	0.0437	557.89	0.0330
15	454.88	0.1241	470.07	0.0437	554.18	0.0330
16	454.78	0.1241	468.28	0.0440	553.06	0.0329
17	454.70	0.1241	468.67	0.0429	552.27	0.0329

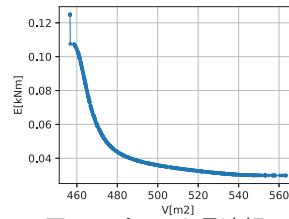


図7 パレート最適解

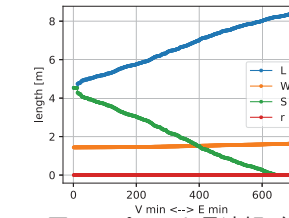


図8 パレート最適解ごとの各寸法

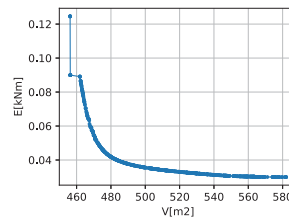


図9 パレート最適解

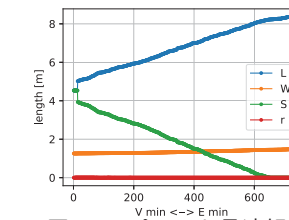
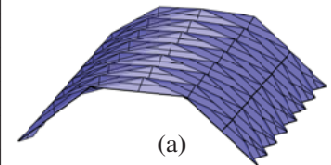
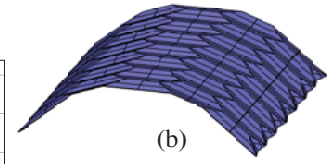


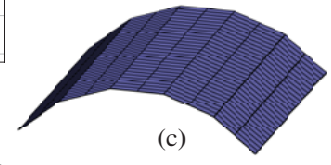
図10 パレート最適解ごとの各寸法



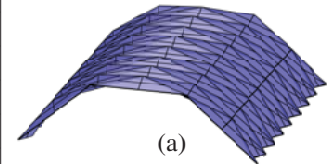
(a)



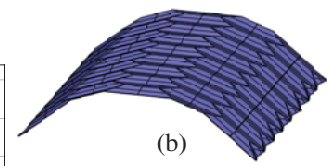
(b)



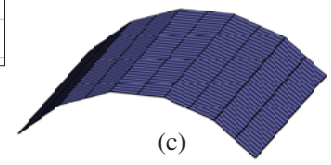
(c)



(a)



(b)



(c)

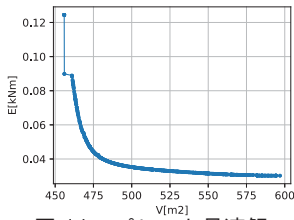
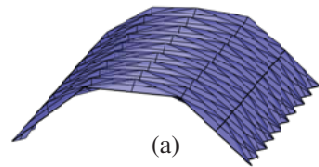


図 11 パレート最適解



(a)

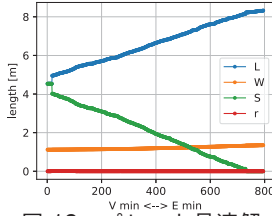
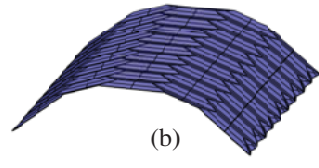
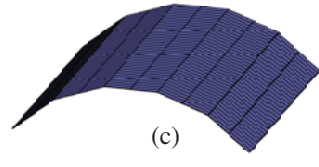


図 12 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

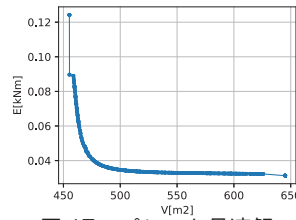
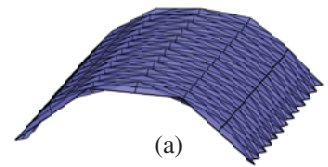


図 17 パレート最適解



(a)

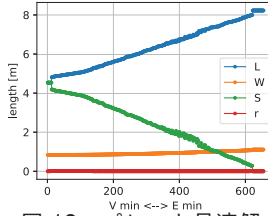
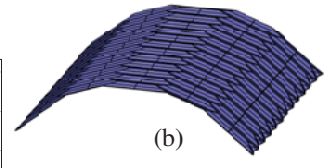
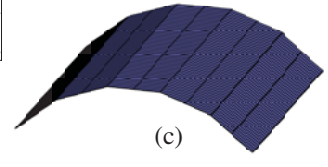


図 18 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

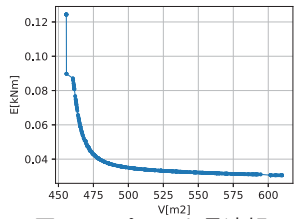
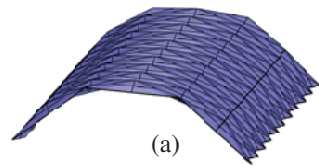


図 13 パレート最適解



(a)

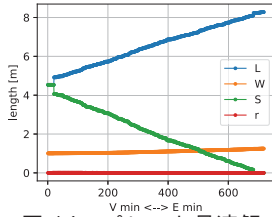
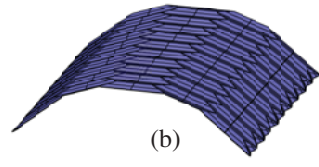
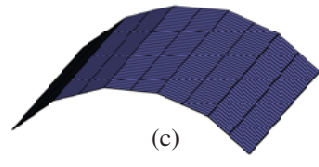


図 14 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

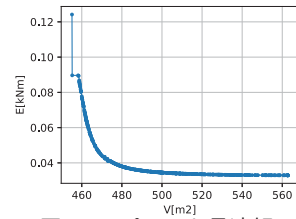
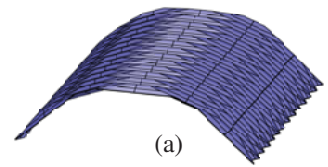


図 19 パレート最適解



(a)

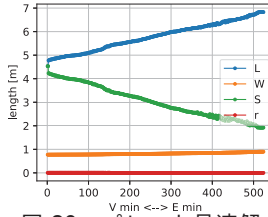
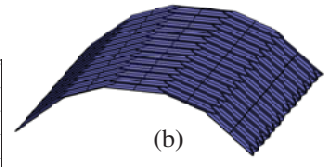
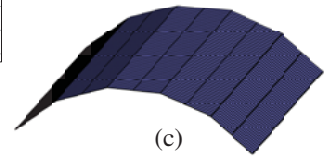


図 20 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

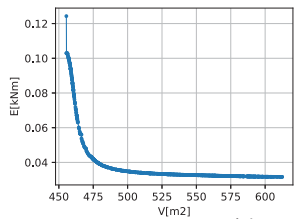
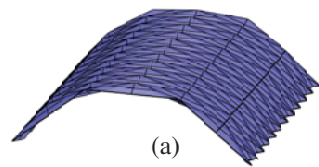


図 15 パレート最適解



(a)

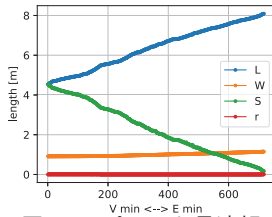
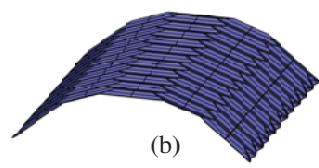
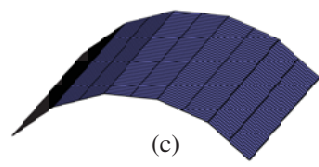


図 16 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

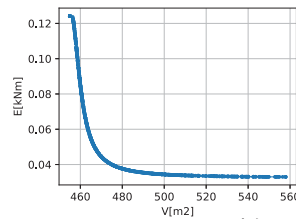
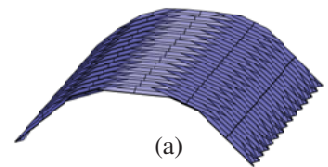


図 21 パレート最適解



(a)

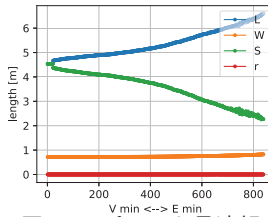
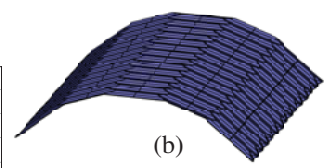
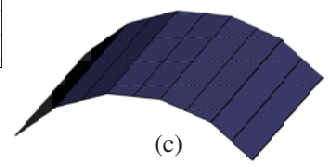


図 22 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

最適化の結果，表面積が最小となるものは， $L = S, \theta_r = \pi/6, r = 0$  のときで，歪エネルギーが最小となるのは， $n$  が 7 から 10 と 12 までは  $S = 0, \theta_r = \pi/6, r = 0$  のときであった。一方で  $n$  が 11 と 13 から 17 の場合は，実際には  $S$  は下限値をとることができ，その時に歪みエネルギーは最小となるのだが， $S = 0$  とは異なる解に収束した。これらのケースにおいて，

歪エネルギーが大きく従属する  $S/L$  のパラメーターを変化させたとき，歪エネルギーが単調減少したが，前述の収束解からは増加に転じ， $S=0$  の場合に不連続に最小値をとることを確認した。このことから， $S \neq 0$  の解は局所的最適解であると判断される。また，表面積が最小となる場合，パレート解が連続しない理由としては， $S, r, r$  の反対側の辺は節点間の距離が極端に



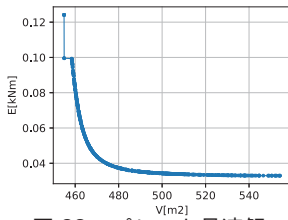
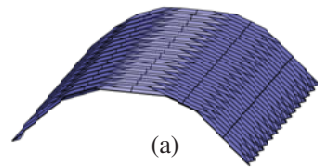


図 23 パレート最適解



(a)

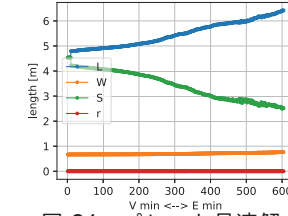
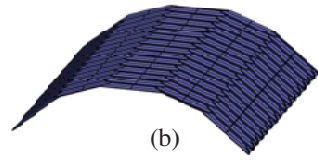
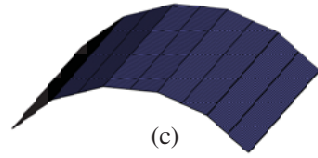


図 24 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

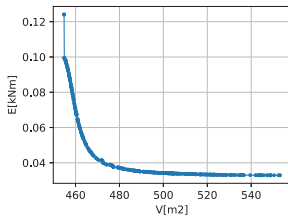
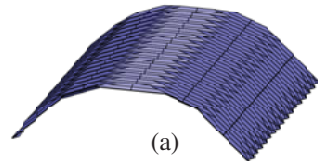


図 25 パレート最適解



(a)

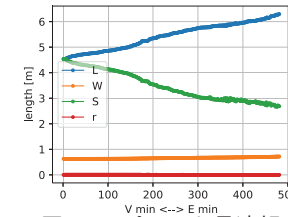
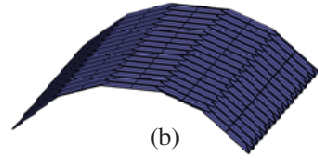
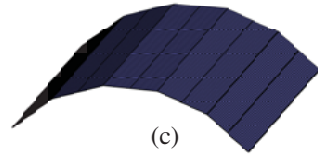


図 26 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

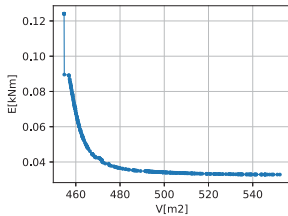
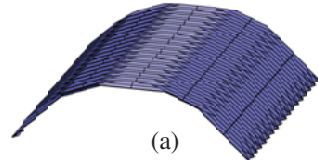


図 27 パレート最適解



(a)

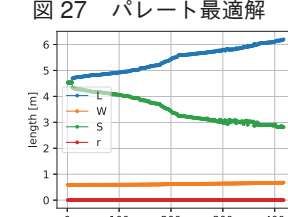
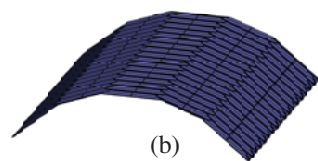
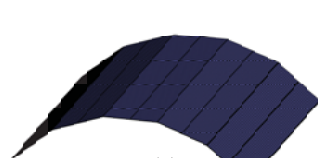


図 28 パレート最適解

ごとの各寸法



(b)



(c)

小さくならないような処理を解析中で施しているためと考えられる。

#### 4. まとめ

GA を使って、折版構造の剛性と表面積の相関関係を考察することができた。表面積と歪エネルギーはト

レードオフの関係であり、今回扱った設計変数下で最適化を行うと、列数によっては、歪エネルギーは局所最適解を持つことが分かった。

#### 5. 今後の展望

本研究では、直線上に同じパターンの繰り返しにより構成されているモデルのみを扱ったが、斜め方向に繰り返すことでずらす、円弧状にするなどの操作で形状にも少し自由度を持たせることも可能と考えられる。また、今回の解析では1つのパネルに対して1つの有限要素で解析をおこなっていたが、解析精度の観点から、有限要素分割の細分化を行う必要があると思われる。また、CLT パネルに限らず、木質構造物は全体剛性に対する接合部の剛性の影響が大きい。今回の解析モデルでは接合部は無視して連続体として扱っているため、剛性のより正確な評価のためには接合部ばねをモデル化する必要があると考えられる。本研究では支持点はピン支持として水平方向変位は拘束されているが、基礎の作り方次第ではスラスト力の影響が無視できなくなるため、支点反力をコントロールできるような仕組み作りも必要と考えられる。その他、将来的に折り畳みを可能とするような構造への展開を考えた際には、折り畳み時の部材の重なりなどの検討などが今後の課題としてあげられる。

#### 【参考文献】

- 1) 古田陽介, 木本晴夫, 三谷純. マウスによる仮想折紙の対話的操作のための計算モデルとインターフェース. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, pp. 3658-3669, 2007.
- 2) Tomohiro Tachi. Freeform origami, [www.tsg.ne.jp/TT/software/](http://www.tsg.ne.jp/TT/software/). (accessed 2020-06-20).
- 3) 藤田慎之輔, 松本匡弘, 福田展淳, 茨田一平. CLT 折版構造で構成される木質大空間の構造デザイン. コロナ構造形態の解析と創生 2019, 2019.11.
- 4) D. Rutten. Grasshopper -computing architectural concepts-. *the conference Advances in Architectural Geometry, Vienna, Austria*, pp. 18-21, 2010.9.
- 5) M. Makki, M. Showkatbakhsh, and Y. Song. Wallacei -an evolutionary multi-objective optimization and analytic engine for grasshopper 3d-, <https://www.wallacei.com/>. (accessed 2020-06-20).