

# 切り欠き位置最適化手法を適用した kerf bending ベンチの制作報告

## Production Report of a Kerf Bending Bench Applying the Notch Position Optimization Method

○齋藤 魁利\*<sup>1</sup>, 渡辺 哲平\*<sup>1</sup>, 小林 広樹\*<sup>1</sup>, 遊佐 太貴\*<sup>2</sup>, 藤田 慎之輔\*<sup>3</sup>

Kairi SAITO\*<sup>1</sup>, Teppei WATANABE\*<sup>1</sup>, Hiroki KOBAYASHI\*<sup>1</sup>, Taiki YUSA\*<sup>2</sup>, Shinnosuke FUJITA\*<sup>3</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, Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

\*2 北九州市立大学 国際環境工学部 学士課程

Under Graduate Student, Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

\*3 北九州市立大学 国際環境工学部 准教授 工博

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

**キーワード** : Kerf bending; 形状最適化; Kangaroo; Galapagos; 進化的アルゴリズム

**Keywords** : Kerf bending; shape optimization; kangaroo; galapagos; evolutionary algorithm.

### 1. 概要

曲面を作る方法として, kerf bending を用いる方法がある. kerf bending とは, 平板を図3のように互い違いに切欠いて元の平板と違う特性とする手法で, メタマテリアルの一種とよぶこともできる. 大嶋らの研究<sup>1)</sup>では, 切欠き位置が同一幅なモデルの構造的な特性について述べられている. SLUSH BENCH<sup>2)</sup>では, kerf bending を利用した3次元曲面のベンチが制作されている. この報告では, それらの研究, 構造物を参考に目標となる形状に沿うように切欠きの位置を最適化し, CNC ルーターである木工加工機 ShopBot<sup>3)</sup> 4) (以降 CNC ルーターと呼ぶ) で切り出し, 組立したベンチを紹介する.

### 2. モデル

今回のモデルは図1のようなモデルを想定しており, 人が横になったり, 座ったりとすることができるようなデザインとしている. このモデルの曲率は図2のようになっており, 脚部から腹部までは緩やかな曲率で, 頭部に大きい曲率となるモデルである.

### 3. 最適化

今回の最適化では, 大嶋らの論文<sup>1)</sup>を参考に, パラメーターを図3, 4のように設定した. ここで  $j a$  は「局所的な梁」と呼ばれる変形可能な梁の幅,  $b$  は板厚を示し ( $b \leq j a$ ),  $l$  は梁の長さ,  $S$  は梁どうしをつなぐ剛体部分の空き,  $g$  は切欠きの幅,  $A$  は全体の幅,  $L$  は全体の長さ,  $m$  は局所的な梁が並ぶ本数を示している. さらに  $L$  は図3の形状から得られる式(1)により算定するこ

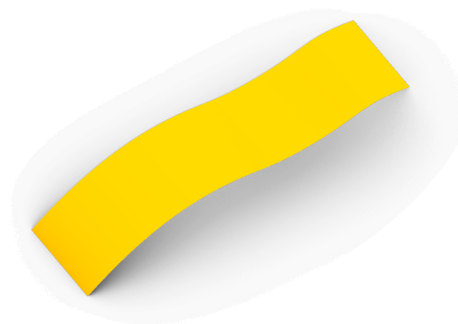


図1 モデル

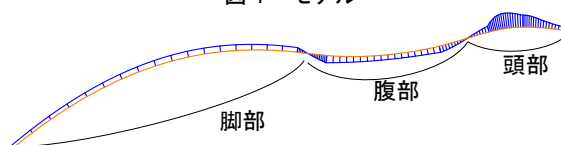


図2 モデルの曲率

とができる.

$$L = (m - 1)g + \sum_{j=0}^m j a \quad (1)$$

大嶋らの論文<sup>1)</sup>では,  $j a$  は全て同じ幅としていたが, それらの幅が個々に変形することで局所的な梁の剛性が変わり, 目標となる形状に沿うよう結果が得られるとして,  $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  と直し,  $\mathbf{a}$  を設計変数とする最適化を行った. なお,  $\mathbf{a}$  が実数だと最適化や解析に時間がかかるため  $\mathbf{a} \in \mathbb{N}^m$  のように自然数とした.

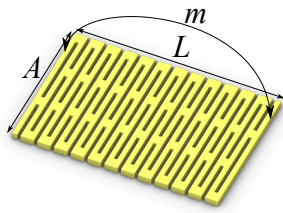


図3 パラメータ設定

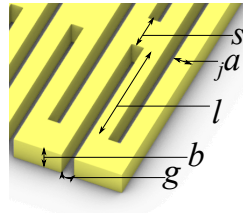


図4 パラメータ設定詳細

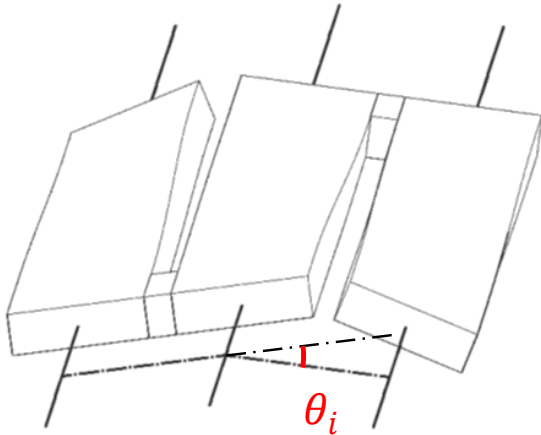


図5 勾配の変形角

次に隣り合う梁の勾配差から表される変形角に着目する。梁の勾配とは図5の一点鎖線の勾配のことでその勾配差を表したものが変形角  $\theta_i$  である。  $\theta_i$  が全体的により小さい値を取ることがとれば、目的の形状に収束しやすい。  $\theta_i$  の総和の最小化とする最適化では端部の梁の勾配差が支配的となり目的の形状に収束せず、  $\theta_i$  の分散の最小化とする最適化では平均値に引っ張られ曲率の低い部分の変形角が大きくなってしまふ。そこで、  $\theta_i$  の二乗和の最小化（面勾配の勾配差二乗和<sup>5)</sup>）を使用することで、目的の形状に収束する目的関数を得られた。それらを考慮した目的関数の式を式(2)に示す。

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{a} \in \mathbb{N}^n}{\text{minimize}} && f = \sum_{i=1}^{m-1} \theta_i^2 \\ & \text{subject to} && L_{\min} \leq L \leq L_{\max} \\ & && a_{\min} \leq ja \leq a_{\max} \quad (j = 1, \dots, m) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、  $a_{\min}$ 、  $a_{\max}$  は局所的な梁の幅  $ja$  の上下限值であり、  $L_{\min}$ 、  $L_{\max}$  は全体の長さの上下限值である。

最適化ソルバーは Grasshopper3d<sup>6)</sup> の Galapagos<sup>7)</sup>、 evolutionary algorithm をデフォルトの設定で使用する。 Galapagos は制約なしの最適化しかできないため、制約条件を入れるためのペナルティ関数  $c$  を追加した。式(3)、(4)

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{a} \in \mathbb{N}^n}{\text{minimize}} && f + c \\ & \text{subject to} && a_{\min} \leq ja \leq a_{\max} \\ & && (j = 1, \dots, m) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで

$$\begin{aligned} f &= \sum_{i=1}^{m-1} \theta_i^2 \\ c &= \begin{cases} (L - L_{\min}) \times 10^3 + 10^5 & (L \leq L_{\min}) \\ (L_{\max} - L) \times 10^3 + 10^5 & (L_{\max} \leq L) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

## 4. 試作1

### 4.1. 解析概要

$29 \leq ja \leq 47$  で無作為に決定した梁を配置した長手方向長さ 1734.27mm の解析モデル、解析モデルにおける  $\theta_i - i$  関係を図6に示す。梁同士の間隔を CNC ルーターのビットの大きさから  $g$  は 6.35mm、局所的な梁の個数  $m$  は 40 とする。物理演算は Kangaroo<sup>8)</sup> を使用し、局所的な梁でのねじれモーメントの合計値を示している。

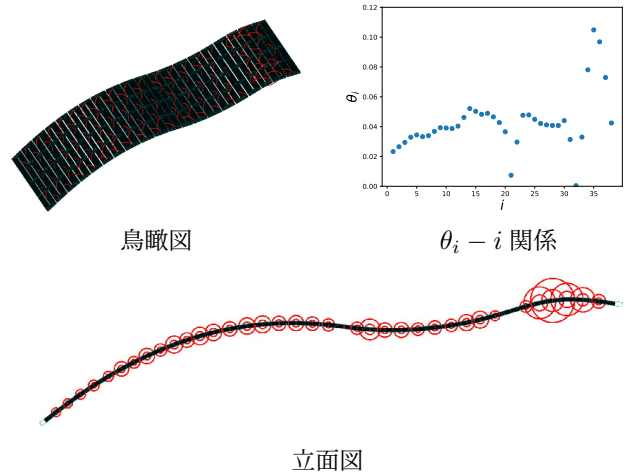
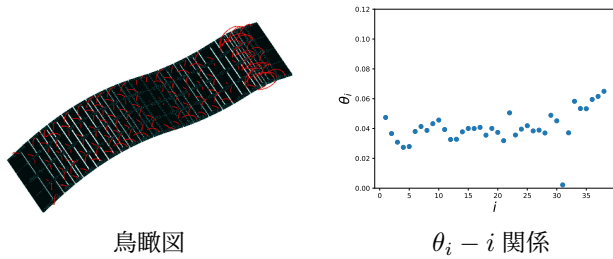


図6 解析モデル

### 4.2. 最適化結果

$a_{\min} = 12\text{mm}$ 、  $a_{\max} = 100\text{mm}$ 、  $L_{\min} = 1734.27\text{mm}$ 、  $L_{\max} = 1800.00\text{mm}$  として式(3)、(4)を解いて得られた kerf bending モデルと  $\theta_i - i$  関係を図7に示す。  $L_{\min}$ 、  $L_{\max}$  はカーブの長さ、  $3 \times 6$  板の長手方向長さから、  $a_{\min}$  は板厚  $b$  から決定している。図6の  $\theta_i - i$  図を見ると頭部の  $\theta_i$  が大きくなっていることがわかる。これは、モデル頭部の曲率が高いためであり、  $\theta_i$  の値が大きくなってしまったからだと思われる。一方、最適化後は初期条件と比較し小さな値となっていた。図6立面図では最適化後は初期条件に比べて赤い円の大きさを示す局所



立面図  
図7 最適化結果



写真1 組み立て後 写真2 詳細

的な梁のねじりモーメントの合計値が頭部で大きくなっているが、これは、頭部の梁の  $j_1 a$  が下限値をとり、変形しやすい（コンプライアンスの高い）形状になったと考えられる。

#### 4.3. 試作

CNC ルーターで切欠き、組み立てを行ったものを写真1に示す。試作は板厚12mmの合板を使用した。しかし、合板に写真2に示すような割れが生じたため、さらに最適化や素材などを検討する余地があると確信した。

### 5. 試作2

#### 5.1. 修正

試作1では、板厚12mmの合板を使用した。試作2では板厚9mmのMDF（中密度繊維板）を使用することとした。また、試作2では  $m$  の数を増やし、求める形状に収束させるようにした。さらに、写真3に示す SLUSH BENCH<sup>2)</sup> を参考にし、 $a$  の偶数番号時が  $a_{\min}$  となる梁を互い違いに入れた。

以上のことを式(3)、(4)に適応し、定式化しなおしたものを式(5)、(6)に示す。

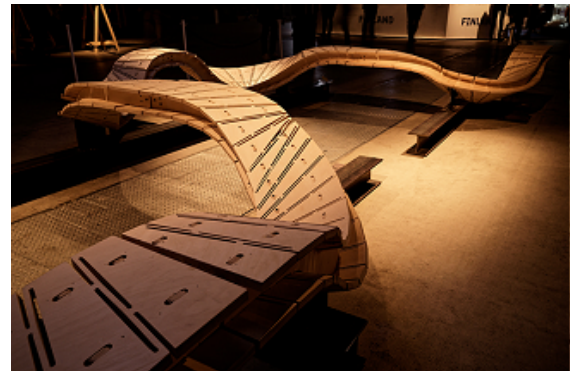


写真3 SLUSH BENCH<sup>2)</sup>，設計・施工：VUILD 株式会社，構造設計：藤田慎之輔（北九州市立大学），大嶋 泰介（Nature Architects 株式会社）

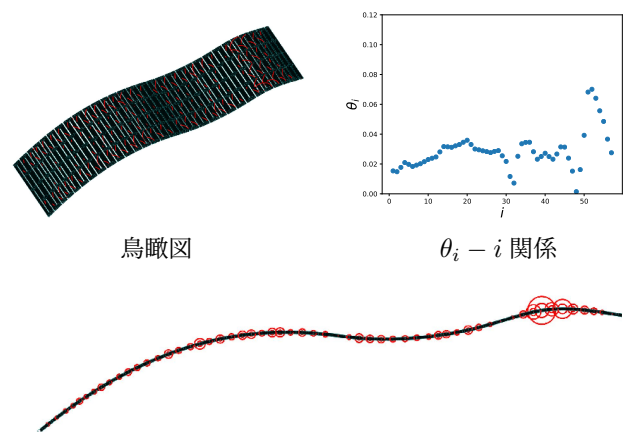
$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{a} \in \mathbb{N}^n}{\text{minimize}} && f + c \\ & \text{subject to} && a_{\min} \leq j_1 a \leq a_{\max} \\ & && (j_1 = 1, 3, 5, \dots, m_{\text{ODD}}) \quad (5) \\ & && j_2 a = a_{\min} \\ & && (j_2 = 2, 4, 6, \dots, m_{\text{EVEN}}) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{cases} m_{\text{EVEN}} = m, & m_{\text{ODD}} = m - 1 & (m \text{ が奇数}) \\ m_{\text{EVEN}} = m - 1, & m_{\text{ODD}} = m & (m \text{ が偶数}) \end{cases} \quad (6)$$

#### 5.2. 解析概要

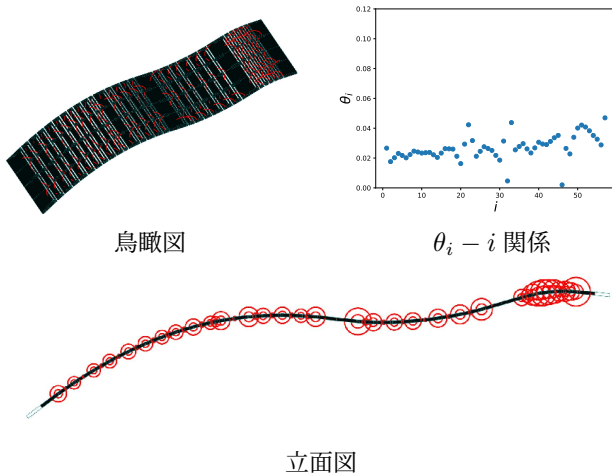
$29 \leq j_1 a \leq 47$  で無作為に決定した梁と  $j_2 a = a_{\min}$  の梁を交互に配置した長手方向長さ 1734.27mm の解析モデルにおける  $\theta_i - i$  関係を図8に示す。梁同士の間隔を CNC ルーターのビットの大きさから  $g$  は 6.35mm、局所的な梁の個数  $m$  を今回は 59 とする。こちらも物理演算は Kangaroo<sup>8)</sup> を使用し、局所的な梁でのねじりモーメントの合計値を示している。



立面図  
図8 解析モデル

### 5.3. 最適化結果

$a_{\min} = 9\text{mm}$ ,  $a_{\max} = 100\text{mm}$ ,  $L_{\min} = 1734.27\text{mm}$ ,  $L_{\max} = 1800.00\text{mm}$ として式(5), (6)を解いて得られた kerf bending モデルと  $\theta_i - i$  関係を図9に示す.



立面図  
図9 最適化結果

図8, 9の  $\theta_i - i$  図は試作1同様, 最適化後は初期条件と比較し小さな値となっていた. 立面図でも最適化後は初期条件に比べて局所的な梁のねじりモーメントの合計値も頭部で大きくなっている.

### 5.4. 試作

CNC ルーターで切欠き, 組み立てを行ったものを写真4に示す.



写真4 組み立て後

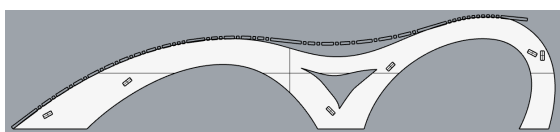


図10 立面図



写真5 kerf bending の浮きの様子

本来は図1を目的として制作をしていたが, 図10のように座面下部材の曲線を座面の曲線より低くし座面を浮かせることで, 座面に弾力をもたせ, 体へのフィット感を促そうとした. しかし, 写真5のように湿気により座面下部材へ接した.

これは, 最適化の中で偶数番号の  $a$  を小さくしたことが原因だと考えられる. 大嶋らの動画<sup>9)</sup>でも, 塑性破壊をさせるために行っていたため, この試作2でも塑性破壊が起こり, ばねのような弾力は失われてしまったと考えられる.

### 6. まとめ

この報告では kerf bending を使用したベンチを紹介した. kerf bending のベンチは変形角の二乗和やMDFを使用することで, 目指した変形ができ制作が行えた. kerf bending は実施事例が少ないため, 様々な使用方法について模索したいと考える.

#### [参考文献]

- 1) T. Ohshima, T. Tachi, H. Tanaka, and Y. Yamaguchi. Analysis and design of elastic materials formed using 2d repetitive slit pattern. *IASS Symposium 2015*, 2015.1.
- 2) 設計・施工: VUILD 株式会社: 構造設計, 藤田慎之輔 (北九州市立大学), 大嶋泰介 (Nature Architects 株式会社). SLUSH BENCH, <https://architects.vuild.co.jp/works/slush-bench/>. (accessed 2021.9).
- 3) VUILD 株式会社. ShopBot, <https://shopbot.vuild.co.jp/>. (accessed 2021.9).
- 4) ShopBot Tools, Inc. ShopBot, <https://www.shopbottools.com/>. (accessed 2021.9).
- 5) 藤田慎之輔, 齋藤魁利. 面勾配の変化量を用いた四角形要素で構成される離散曲面の形状制御汎関数の提案. 日本応用数理学会 2020 年年会講演予稿集, 2020.9.
- 6) D. Rutten. Grasshopper -computing architectural concepts-. *the conference Advances in Architectural Geometry, Vienna, Austria*, pp. 18–21, 2010.9.
- 7) D. Rutten. Galapagos: On the logic and limitations of generic solvers. *Architectural Design*, Vol. 83, No. 2, pp. 132–135, 2013.3.
- 8) Daniel Piker. Kangaroo –a live physics engine for interactive simulation, form-finding, optimization and constraint solving–, <http://kangaroo3d.com/>. (accessed 2021.9).
- 9) NatureArchitects 株式会社. 溶接なしで板金に動きをデザインする nature architects の設計技術, <https://www.youtube.com/watch?v=Rjz7VQyII5U>. (accessed 2021.9).