

## 薄板素材を用いた仮設展開構造物の動的造形シミュレーションツールの開発

○廣瀬 寛騎\*1 下川 雄一\*2

キーワード：仮設空間 オブジェ パラメトリックデザイン 生産性 レーザーカッター

### 1.はじめに

近年では、BIM やコンピューショナルデザインの発達によりデザインの幅は大きく広がり、建築の様々なフェーズで情報化が進んでいる。コンピューショナルデザインは動的に3次元の空間や構造の造形デザインの検討を進める手法であり、デザインの大枠に沿った上でプログラミングを行い形態を生成する。可変パラメータを任意に組み込み、操作することで様々なデザインパターンを短時間に創り出すことができる。更に、最近では力学的安定や物性、施工性などを踏まえたシミュレーション機能やデザインツールに対する期待が高まっており、多様な試みが見られる。

一般に、自由な形態になるほど材料の加工や施工が困難になり、施工期間が伸びるだけでなく費用がかさむ。したがって、自由度の高い造形デザインを支援するツールは必然的に、その実現性を高めるための各種シミュレーション機能を備えることが重要となってくる。

### 2.目的

ここでは、実際の加工や施工も含めた動的な造形デザインツールの開発を目的としている。

開発の動機は、毎年、研究室で取り組んでいるライティングオブジェの制作プロジェクトである。コンサートイベントの会場において、来場者に見て、触れて、入って楽しんでもらうための場をデザイン・演出することが求められ、そのオブジェ案の1つとしてスタディを始めたことがベースにある。

実寸大のプロトタイピングを繰り返し行えるよう、安価な薄板素材を用いた仮設展開構造物を題材とした。仮設オブジェとしての利用や、室内におけるフレキシブルな可動式のミーティングスペースとしての利用も想定している。

実際の制作や運用を行うことが前提であり、予算も限られているため、目的とするフォルムや大きさを実現しながら、いかにコストを下げるかを大きな目標とした。デザイン検討とツール開発、及びモックアップの制作を繰り返しながら、ツールの機能性向上と制作物のクオリティ向上を目指す。

### 3.方法

折り紙模型によって初期スタディを繰り返した結果、仮設展開構造物（以下、オブジェ）の基本的な形態はドーム型とし、それに一番適切と思われる折り方「風船の基本形」

1) を原型としてツール開発をする。この折り方は、平面上に敷き詰めることで独立したひとつの球体に形を変えることができ、折りたたむことでコンパクトになることが大きな特徴である（図1）。

開発環境としては、3次元モデリングソフト「Rhinoceros」と、そのプラグインソフトである「Grasshopper」を使用しツール開発を行った。



図1 風船の基本形

### 4.ツール開発のためのワークフロー

今回、ツール開発を行うにあたって図1のようなデザイン・制作のワークフローの達成を目標とした（図2）。

現時点では①,③,④,⑤,⑥に対応する基本機能を開発した段階であり、②は未着手である。次章以降で、これまでに開発したツールの機能と活用方法を紹介する。

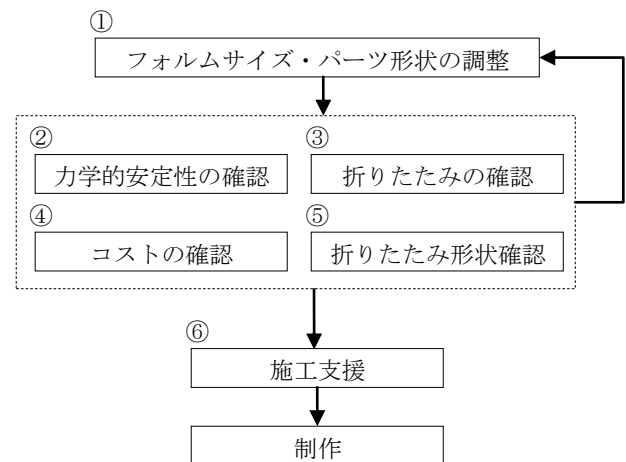


図2 デザイン・制作のワークフロー

### 5.ツール開発の概要

#### 5-1.現在の全体構成

開発したツールで、現時点においてパラメトリックに操作可能な変数は「ドームの半径」、風船の基本形の「ユニットの数」、その1マスにおける「辺の長さ」と「凹みの深さ」、そしてドーム全体の「曲率」の5つである。これ

らの変数によってドームの形状をパラメトリックに操作し、リアルタイムにデザイン検討が行えるツールとした。「ドーム半径」及び「辺の長さ」で主にドーム全体の大きさを操作でき、「曲率」でドームのフォルムを操作する。「凹みの深さ」はドームを形成する際の材料の無駄を減らすための変数である。これらは図2の①に対応する。

更に、モデルから折りたたむことが可能かを判断する「折りたたみ判断」、「折りたたみ形状確認」「コスト計算」「パーツ切出し図」の4つを必要に応じて随時視覚的に確認できる機能を設けた。これらはそれぞれ、図2の③,④,⑤,⑥に対応する。

### 5-2.ユニットの凹凸の深さ

図1で示したように、1枚の紙を風船の基本形を折ることでドーム形状は完成する。しかし、この状態だとドーム上部ではほとんど折り込まれた状態になりパーツのサイズに無駄が多い。したがって、風船の基本形で折れる形を1ユニットとし、折った際のユニット中心部の「凹みの深さ」をパラメトリックに操作できるようにした。これは、最下層の凹みの深さを入力し、それを初項とした等差数列を組むことで、上部へ行くに従って浅くなるようにしている。それにより、できるだけ無駄がないようにすることを目指した(図3)。

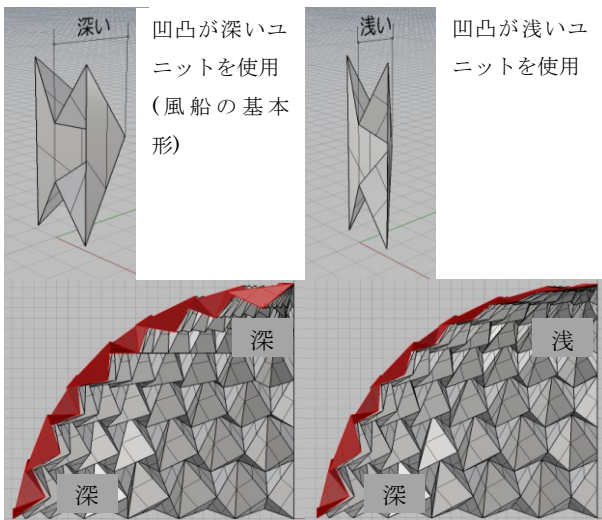


図3 ユニットの凹凸

但し、凹凸の深さが風船の基本形から外れた場合、平面上に展開することが出来なくなる。これに対し、今回は平面状態から折り上げてドーム形状を作成する事は条件とせず、収納や移動を踏まえ、コンパクトに折りたためればよいものとしてツール開発を進めた。

### 5-3.折りたたみ可能性の確認

今回開発した折りたたみ判断機能では、ユニットを折りたたんだ状態で上下のパネルがぶつからないかどうかを判断している。1ユニットを半分にしたものを1パーツとする。1つのパーツには3つの三角形があり、図4で示し

ている3つの角度 $\alpha, \beta, \gamma$ の角度が数式(1)のように成り立っている必要がある(図4)。

$$\alpha \geq \beta + \gamma \cdots (1)$$

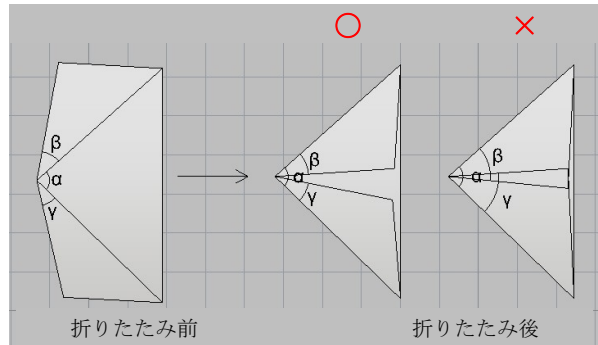


図4 折りたたみの判断

ドームは各層ごとに同じユニットが水平に並ぶため、折りたたみ判断機能は各層のユニットにおいてこの条件を満たしているかどうかをチェックする。条件を満たしている層は青く表示され、条件を満たしていない層は赤く表示される(図5)。

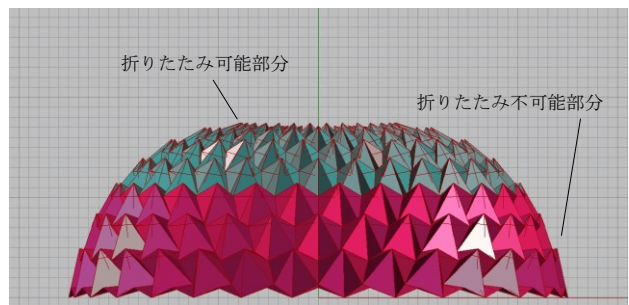


図5 「折りたたみ判断」の機能利用イメージ

### 5-4.折りたたみ時の形状確認

制作するオブジェは、できるだけ幅広い使用方法を検討したいと考えている。その点で重要になるのが収納や運搬である。このことから、折りたたみ時の形状を確認できる機能を設けた。ドームは、垂直方向に脱着可能な部分を一箇所に設け、水平方向に折りたたむことを想定しており、それに対応し、折りたたんだ時の断面形状とサイズを確認できる機能とした。折りたたんだ状態の全体の厚みについては、パネルの厚みと水平方向のパネル枚数を乗じて、数値情報として確認できるようにした。これにより、どの程度の収納スペースが必要なのかをリアルタイムに把握することができる(図6)。

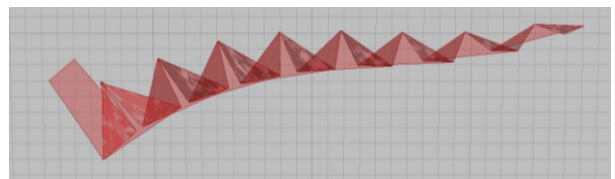


図6 折りたたみ形状の確認

折りたたんだ状態の形状の正しさを検証するため模型と比較し、データの形状と一致していることを確認した(図7)。

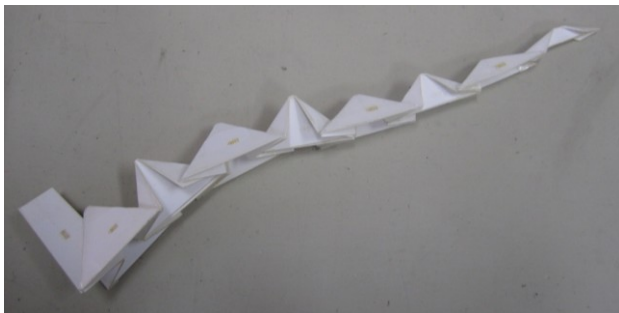


図7 検証模型の折りたたみ形状

### 5-5.製作のためのパーツ切出し図

今回使用する素材は、厚さ4mmのプラスチックダンボール材(以下、プラダン)を想定して機能開発を進めた。実際のプラダンで部分モックアップの制作を繰り返した結果、切り出されたパーツ同士を柔らかい面状のジョイントでつなぎ合わせる方法が妥当であると判断した。これは、大学所有のレーザーカッターで一度に切り出せる最大サイズも考慮した結果でもある。図8は「パーツ切出し図」機能によって作成されたパーツである。

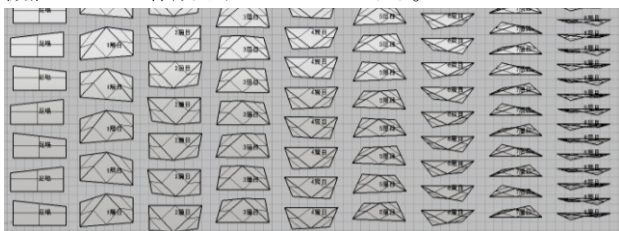


図8 「パーツ切出し図」機能の利用イメージ

### 5-6.コスト計算

今回、ドームを制作するにあたって必要となる材料を「プラスチックダンボール」「包装用ビニルテープ」「接着剤」の3つとした。

プラダンの規格としては910mm×1820mmの一般的な市販規格サイズのもの(以下、36板)を使用することを想定した。パーツはそれを内接する単純な長方形(マス形状)として考え、そのマス形状を36板内に収めることのできる個数を求める。プラダンにはリブと呼ばれる筋が通っており、リブの方向によっては曲げに対する強度が変わる。このリブ方向の使用方法を考慮し、36板の必要枚数からリアルタイムにコスト計算できるようにした(図9)。



図9 「コスト計算」機能の概念図

テープ及び接着剤はパーツ同士を繋げる際に使用する。モデルからパーツ同士の接合部の長さの総計を求めて、材料の単価を乗じることで、それらのコスト計算に対応した(図10)。

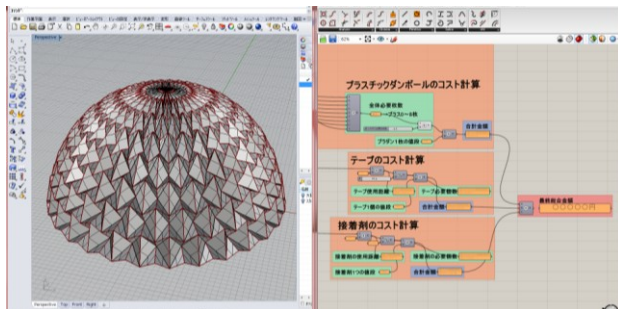


図10 「コスト計算」画面

## 6.ケーススタディ

### 6-1.凹凸の深さの比較

現時点では、力学的な強度や安定性を確認できるようなツール開発には至っていないため、強度については縮尺模型で縦方向のユニット数が異なるものを複数作成し、縦方向のユニット数(8層)を決定した。また、折りたたみが可能かどうかや、コスト計算結果等も随時確認しながら、およそ妥当と考えられるパターンを決定した。

ここでは、決定したパターンを「確定案」とする。一方、風船の基本形のように、1枚の平面からそれと同様のドームサイズとして折り上げられるドーム形状を「未調整案」として、その両者を比較した。まず、未調整案より確定案の方が上層部にパネルサイズの無駄がなくなっていることが分かる。また、同じドームサイズでも、ドーム内の空間をより広く使用できると考えられる。現在は直径5mのドームを想定しており、そのサイズで、ドーム上部の厚みを約203mm薄くできる可能性があることが分かった(図11)。

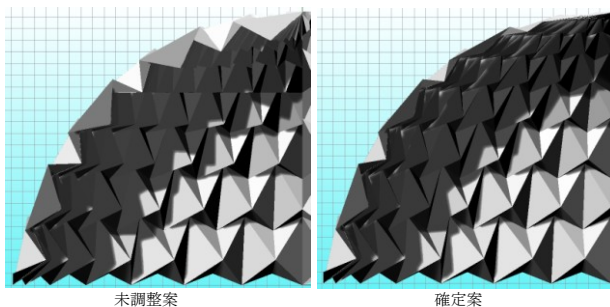
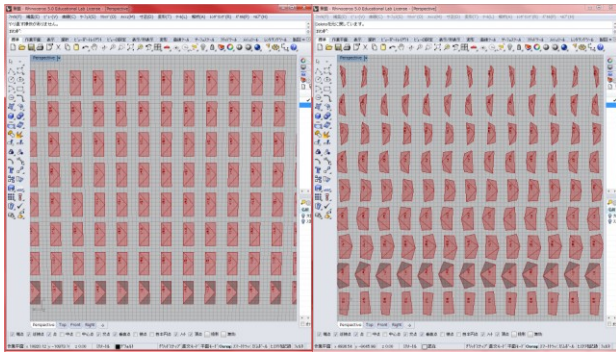


図11 ドームの凹凸比較

### 6-2.パーツ切出し図の比較

未調整案に比べて確定案の方がパーツ形状は複雑になり、アナログな加工方法であればパーツ作成の手間と時間が増えるところであるが、ここではレーザーカッター加工機を利用することが前提であり、大きな問題にならないと考える(図12)。





未調整案 確定案

図 12 パーツ切出し図の比較

### 6-3. 折りたたみ時の形状比較

折りたたみ時の形状は、未調整案に比べて確定案の方が不規則になっており、且つ全体のサイズも大きくなっている。そのため、確定案は持ち運びや収納に関してはやや難があると言える（図 13）。

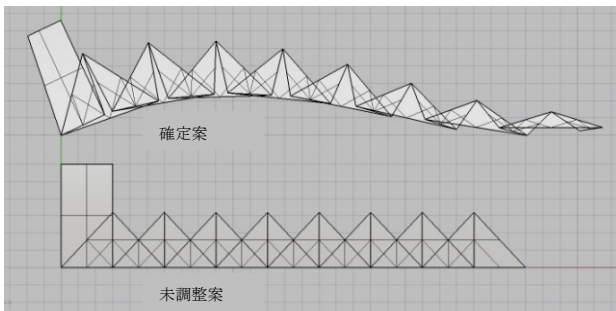


図 13 折りたたみ時の断面形状比較

### 6-4. コスト比較

使用するプラスチックダンボールの枚数は確定案の方が少なく、使う枚数としては未調整案から比べて約 11% の削減が可能となった。接合部の距離も確定案の方が短くなっており、未調整案と比べて、テープの使用個数は約 11% の削減、接着剤の使用個数は約 8% の削減になっている。コストの総額としては、未調整案に比べて確定案の方が約 9% の削減となった。

### 6-5. 切出し加工と組み立て実験

パーツに何層目のパーツかを文字データとして入れておき、レーザーカッターで文字彫刻を行うことで、円滑に組立を行える（図 14）。

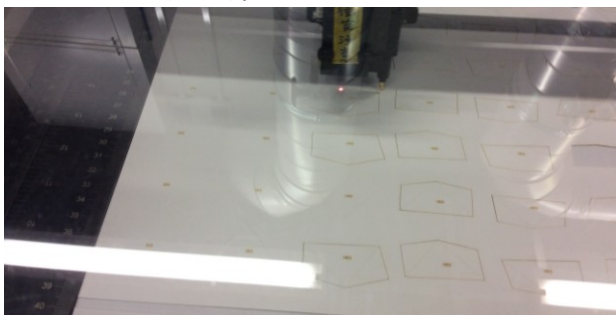
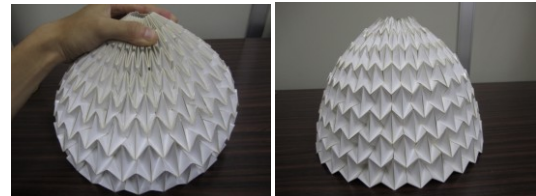


図 14 レーザーカッター加工時の様子

実寸大のドームを作成する前に 15 分の 1 サイズの模型で検証を行った。使用した材料はケンラン紙 B3 サイズで使用枚数は 6 枚であった。切出しにはレーザーカッターを使用し、カットに要した時間は紙 1 枚につき約 30 分で、トータル約 3 時間であった。手作業で行うよりも圧倒的に効率も良く精度も高いことが確認できた。また、未調整案と確定案の検証模型を比較したところ、確定案の方は形状が安定しているのに対し、未調整案の方は手で押さえてないと形状が保てない状態であった。（図 15）。



未調整案

確定案

図 15 検証模型比較

この模型では、パーツの厚みを深く考慮せずに制作を進めた。その結果、折りたたんだ時に、パーツ同士が重なり合い、接合部の収まりに無理が生じていることが分かった。実寸大のオブジェを制作する場合は材料の厚さと折りたたみ時の収まりを考慮し、接合部に遊び幅を設ける必要がある。（図 16）。



1/15 模型

遊び幅を設けた接合部の一部

図 16 接合部における隙間

## 7. おわりに

今回、開発したツールによって、仮設展開構造ドームのモデル生成とその評価項目の確認が短時間で出来るようになった。これにより、デザインの再検討やモデルの作り直し作業等の手間を大幅に減らすことが可能になった。

しかし、現時点では、力学的な安定性を評価する機能や、材料の厚みを考慮した折りたたみ時の収まりを確認する機能などは実現できていない。今後、その点を踏まえたツール開発を行い、実際の制作を進めていきたい。

### 【参考文献】

- 1) 三谷純, “折り紙研究ノート”, <http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/origami/>, (参照 2015-10-01)
- 2) Kostas Terzidis, 「Algorithmic Architecture」, 田中浩也監訳, 荒岡紀子, 重村珠穂, 松川昌平訳, 彰国社, 2010 年

- \*1 金沢工業大学大学院工学研究科建築学専攻 博士前期課程  
\*2 金沢工業大学環境・建築学部 建築デザイン学科 准教授