

Architectural Softness

○隈 太一*1

キーワード：素材 フォーム・ファインディング パビリオン

1. はじめに

建築設計において、「やわらかさ」の意味について考えてみたい。一般的な建築の教育では、まず模型はスタイロボード、ボール紙などの素材によってつくることを学ぶ。それらの素材は、柱、壁、屋根といった水平、垂直な平面をつくることには適している。しかし、いざ、曲面をつくるとなると、それらの素材でつくことは難しい。もちろん、果たして建築に、空間にどこまで曲面が必要なのかという議論はここではおいておこう。ここで述べたいことは、建築設計の可能性をその素材によって限定してしまう必要はないということだ。そして、それ以上に、用いる素材の特性によって、より多様な形態を生成する可能性がある。ここでの素材の特性とは、主に、幾何学的な形状と力学的な挙動の二つの側面についてである。

素材の特性から、建築の形態を決定する例としては、Antonio Gaudi のハンギングチェーンや Heinz Isler の布を用いた実験、Frei Otto の一連の Form Finding などがある 1)2)3)4)。それらの主な目的は、構造的に合理的な形態の探求が第一義にある。もちろん、それは力学的な条件をいれて、答えが一意に定まるという単純なものではなく、建築家の目指す形態、空間を、構造的な合理性を担保しながら探す試みとも言えるかもしれない。それを可能にするツールとしてのやわらかい素材を、彼らは用いた。しかし、この素材特性をつかった模型は、それを建築化、つまりスケールアップする際に、難易度が高い。その理由は、大きくわけて二つあり、一つめは、三次元的な形状二次元的な図面などによって記述しなすなければならないこと、二つめは、曲面の施工の難しさである。

2. 目的

本論で、紹介する事例では、それら難しさを以下のような手段で解決し、少なくともパビリオンスケールやテンポラリーな空間として、建築に応用している。まず、三次元的な曲面はコンピュータによって容易に生成可能となっている。中でも、アニメーション制作にも用いられる「パーティクルスプリングシステム」という方法では、物理的な挙動をシミュレーションできる。そのため、3D モデリングソフトでつくった形状を、素材化するという順序ではなく、素材の変形などの性質を、模型でのテストと並行しながら、コンピュータ上で再現することができる。それに

よって、その曲面のデータは、二次元化する必要はなく、そのまま三次元のデータとして使用可能となる。もちろん、現在は 3D スキャンなどの技術もあり、模型でつくった三次元的に複雑な形状を、そのまま 3D モデリングソフト上にデータとして、再現することは可能であるが、この場合、コンピュータ上のモデルはもちろん、素材の特性、つまりかたさややわらかさは持っていない。なので、単純にこの形状を 3D プリントすることはできても、そこからさらにコンピュータ上で操作を加えて、変形をみるというようなことはできない。つまり、パーティクルスプリングシステムを用いて、物理的な挙動をシミュレーションできた場合にはそもそも、模型による実験を省略することができるともいえる。

また、施工の難易度に関して、三次元的な曲面を作る場合には、型枠が必要となり、それを制作するコスト、時間が大きな問題となるケースが多い。本論での実験の中では、素材の特性を用いることによって、その型枠をなくす試みを行っている。

3. パビリオンによる実践

本論では、以下の 3 つのパビリオン 1_Minimal Surface Pavilion [2011]、2_Spacer Fabric Architecture [2013]、2_Spacer Fabric Architecture [2013] を対象とし、建築設計における「やわらかさ」について説明する。

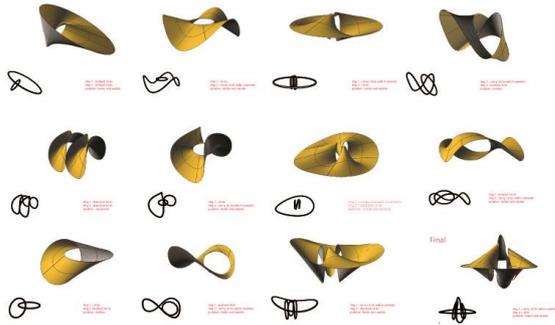
3.1 Minimal Surface Pavilion [2011]

まず、シュリンクフィルムという熱で収縮するフィルムを用いた、パビリオン 5) について説明する。この素材は主に、梱包材料として用いられる。それは、熱で収縮することで、複雑な形状であろうとそれにフィットするように収縮するからである。そして、このフィルムを用いて、極小曲面(Minimal Surface)をつくるというのが、このプロジェクトの目的であった。極小曲面とは、Frei Otto の石鹸膜を用いた実験などで知られるように、閉じた領域をあらかじめつくり、そこに膜を張ると、その面内に最も小さな曲面を生成するという原理である。石鹸膜はもちろん模型のみのスケールのみで可能であって、それをスケールアップすることは不可能である。そこで、ここでは、熱によって収縮するシュリンクフィルムを用いて、極小曲面をパビリオンスケールで制作した。

構造としては、二つのリングを用い、その内側に膜が張

られることで、自立する構造を模型と 3D モデリングソフトをつかいスタディを行った。そして、最終的に、

湾曲した内側のリングが三点で基礎に設置し、円形上の外側のリングはフィルムによって、吊られるというものを採用した。シュリンクフィルムは熱で縮んでしまうと、その後、伸びることがほとんどないので、このように引張材としてしようすることが可能となる(図 1)。そうしてできた、フィルムの下空間は、日よけの休憩スペースとして利用される。



【図 1】二つのリングの間の極小曲面のスタディ

施工は、3D モデリングソフトから、二次元に展開したフィルムのパターンを得る。リングは鉄製のロッドを、シュリンクフィルムは模型より厚手の、船舶やヘリコプターを梱包する用のものを使う。シュリンクフィルムは、石鹸膜と違い、収縮率に限界があるため、最終的な三次元的な曲面にある程度、近似した面をフィルムによって立体裁断し、つくる必要がある。しかし、実際にモックアップを制作してみると、模型や 3D モデリングとは違い、外側のリングが自重によってたわみ、かつフィルムのテンションによって変形し、全体形状が歪んでしまった。それによって、フィルムが縮み切らない部分がでてきてしまった。そこで再度、そのフィルムのしわになって縮みきらない場所を、その場でカットし、そのフィルムを二次元に展開し、そのパターンを均等にスケールアップし、次のモックアップのパターンを生成した。それを行うことで、当初、模型や 3D モデリングで作成した形状とは異なるものになったが、フィルムがしわなく均等に収縮し、外側のリングが宙に浮いたパビリオンが完成した(図 2)。

ここでは、このような三次元的な曲面をパビリオンスケールでつくるのに、型枠を使わずに、フィルムの収縮という「やわらかい」特性を用いた。もちろん、これはそのまま恒久的な建築スケールに適用はできないが、極小曲面をより大きなスケールでつくる方法としての一つの方法をしめすことができた。形状のコントロールということに関しては、あらかじめ、外側のリングの変形を含めて、3D モデリング上でシミュレーションしておけば、より高い精度で可能になる。それには、前述のパーティクルプリン

グシステムなどの物理シミュレーションを用いる必要がある。



【図 2】 Minimal Surface Pavilion 外観

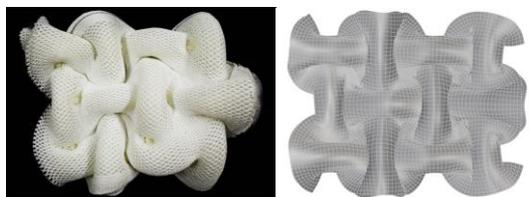
3.2 Spacer Fabric Architecture [2013]

布素材の特徴は、やわらかく自由な形状をつくることができるという大きな特徴がある。その一方で、それだけでは自立する構造をつくるのは難しく、ほかのフレームや柱などの部材と組み合わせる必要がある。そして、また、一般的な布は、伸び縮みせず、すぐにしわができるという特徴を持っている。このプロジェクトであつかったスパーサーファブリック 6) という布は、布そのものが三次元的に編まれており、二重のメッシュの構造の間に、三次元的な縦糸が編み込まれている構成である。そのために厚みがあり、布だけによって自立する構造をつくるのが可能となり、かつ、複雑な形状にしてもしわができないという特徴がある。この布は本来、ベッドなどに使われる一方で、グラスファイバーの糸で編まれたものは、それを樹脂含浸することで、FRP となり、船や電車のような複雑な形状のボディに使われている。このような場合、もちろん、型枠を使い、そこにこの布をかぶせ、真空にすることで、密着させ、そこに樹脂を流しこむというプロセスがとられる。しかし、ここでは、型枠を使わずに、厚みを持った布に操作を加えながら、形状を変形させ、三次元的な曲面かつ自立する構造をつくるという目的である。

ここでの操作は、プラスチック製の結束バンドによって、布をピンチ(つまむ)することの繰り返しである。そのつまむ、スパンの大きさと連続性の違いによって、形状をコントロールし、構造的に補強を行う。大きく分けて、3つの操作をつくりそれらを組み合わせる。1 つ目は、Local Manipulation という部分のみを変形させる操作。2 つ目は、Regional Manipulation という、部分の Local Manipulation を連続させることで、線形の変形をつくり、構造的にリブのような働きをつくる操作、3 つ目は、Global Manipulation という、布の端部と端部をつなげるなどして、全体を変形させる操作。

プロセスとしては、まず模型実験によって、ピンチの幅

によって、どのような変形の違いがおこるかを検証する。そして、それを 3D モデリングソフト上で、シミュレーションを行う。シミュレーションの方法は、三次元的なスパーサーファブリックの編み込み構造を、パーティクルスプリングシステムによって、再現する。図 3 のようなトラス構造のスプリングを構成すると、シミュレーション上でピンチの操作(新たなスプリングを設け、それを縮める)をすると、実際の模型と同様の弾力性をもった挙動をしめす。このような、Local Manipulation を連続させ、Regional Manipulation もシミュレーションを行う。そして、Global Manipulation に関しては、布全体を二重構造でつくる代わりに、簡易的なシミュレーションのために、三角形メッシュをつくり、しわができないように、メッシュを構成する面に、隣り合う面との角度が 180 度になるような力を加えておく。



【図 3】スパーサーファブリック模型とシミュレーション

全体形状はまず、この Global Manipulation のシミュレーションによって決定を行い、3つのアーチが連結したものを、プロトタイプとして、制作することとした。この 3D モデルを、有限要素法によって構造解析し、そこに必要なリブを Regional Manipulation によってあたえる。そして、そこに内部の細かな視覚効果のための Local Manipulation を加える。そして、得られた三次元のピンチのパターンを二次元へと展開する。そして、このパターンをプロジェクターによって、スパーサーファブリックに投影し、このパターンにそって、結束バンドによってピンチしていく。

完成した形状は、布によってできていることで、やわらかさを残しつつも、ピンチによって自立するかたさをもった有機的な状態となる。このプロトタイプは、ポリエステルスパーサーファブリックでできているが、前述のように、グラスファイバーで編まれたものを使うことで樹脂含浸し、スケールアップが可能になると考えられる(図 4)。

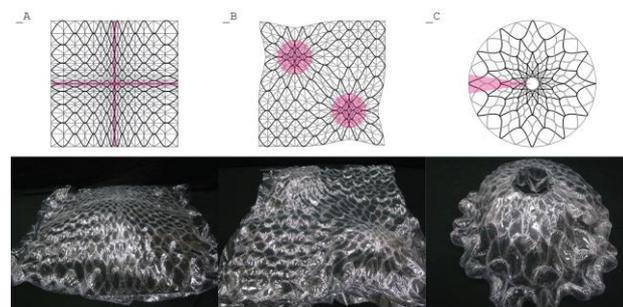


【図 4】Spacer Fabric Architecture 内観

3.3 Weaving Carbon-fiber Pavilion [2015]

このプロジェクトは、3.1 の Minimal Surface Pavilion と同様に、シュリンクフィルムを用いた模型実験からスタートした。ここでは、鉄のリジッドなリングによって、形状を規定するのではなく、細く、しなる、ピアノ線と組み合わせることで形状をコントロールする。

具体的な方法としては、グリッドや編み込みのパターンで、ロール状になっているピアノ線をシュリンクフィルムの上にテープで固定していく。そして、そのフィルムとピアノ線が一体化したものを、ドライヤーによって収縮させる。そうすることによって、二次元から三次元へと変形する。ワイヤーのグリッドのスパンが小さいと Local(部分的)な変形はおこらないが、逆にスパンが大きすぎるとコントロールできないという問題がある。実験を繰り返し、あるスパンにおいては、Local には変形しながらも、それらの変形が均一に連続するため、Global(全体的)にはフラットになる。このパターンを基準として、ここに密度差を与え、Local に変形する部分としない部分をつくる。周縁部は、部分的に変化するよう、中心部に行くにしたがって変化をしないようにすると、Global に変形し、ドーム形状をつくることことができる。つまり、ピアノ線による、二次元パターンの密度のグラデーションを変化させることで、三次元的な曲面形状を変化させる。



【図 5】シュリンクフィルムとピアノ線による模型実験

模型実験としては(図 5)、シュリンクフィルムとピアノ線で、自重によって、変形することは少ないが、これをパビリオンスケールにするには、この二つの素材では、構造的に難しい。そこで、この素材と同じ素材特性を持ちながら、より構造的特性が高い素材を使い、スケールアップを試みる 7)。収縮する素材として、シュリンクフィルムの代わりに、伸縮性の高いスパンデックスという素材を使う。これをあらかじめ引っ張って伸ばした状態にしておくことで、常に収縮しようとする力が働く。そして、ピアノ線と同じく、しなり、かつ軽量で強度があるものとして、カーボンファイバーのストランドロッドを使用する。これは直径 9mm ほどで、グリッドの交点を、結束バンドで固定しながら編み込む。

モックアップによって、模型実験と同様に、Local に変

形し、Global にはフラットになる、基準となるグリッドのスパンを見つける。そして、そのスパンをもとに、密度差を変化させ、さらにモックアップをつくる。制作方法としては、ストランドロッドのグリッドをあらかじめつくりおき、そこにそのグリッドの大きさに比べて、小さなスパンデックスを、伸ばしながら固定していく。このスパンデックスの収縮する力は、形状として、グリッドを二次元から三次元へと変形させるだけでなく、構造的にプレテンションとして働く。

3Dモデリングソフトでのシミュレーションは、パーティクルスプリングシステムを用い、ストランドロッドは、ポリラインにし、それを構成する点と線に力を加える。隣り合う三点の点のはつねに直線状に並ぶような角度固定の力を加え、線はスプリングにし、長さを固定するような力を加える。膜材の部分は図のメッシュを生成し、それを構成する線分をスプリング化し、一定の割合で長さを縮める。そうすることによって、模型、モックアップと同様の、二次元から三次元の変形がみられる。

プロトタイプとして制作したパビリオンでは、Global形状をドーム状にし、平面は一辺 5m の正方形で、高さ約 3m の空間とした。ベースはアルミのパイプに、カーボンファイバーを差し込み、四隅の一か所を高くし、入り口を設けた。スパンデックとカーボンファイバーロッドというやわらかい二つの素材がバランスし、できた形状は浮遊感のある外観と、浮遊感の内部空間をつくりだした(図 6)。



[図 6] Weaving Carbon-fiber Pavilion(内観)

4. 結論

3つのパビリオンともにやわらかい素材をつかい、その素材特性、もしくは素材の組み合わせによってできる形態の可能性を示した。それはどのプロジェクトにおいても型枠を使用せずに形状を生成しているという点からも明らかである。それぞれのプロセスを比較すると、以下のような共通点がみられる。

①素材の力学的な挙動、幾何学的な挙動に着目し、新規性のある素材の組み合わせを見つける。

②模型実験において、素材に対して、シンプルかつ Local

な操作を加え、また、素材の組み合わせ方をテストし、三次元的な形態の生成のルールを直感的に探す。そして、

③コンピュータ上、3Dモデリングソフトによって、素材がつくる形状、挙動をシミュレーションし、パラメータを変えながら、バリエーションをテストする。

④素材の置換。模型からモックアップへのスケールに際して、同じ素材特性を持ちながら、構造的に強度のあるものに素材を変更する。

⑤素材特性によって可能となる Globalな形状、そして、構造的に可能なサイズの中で、プロトタイプとして適切な空間、サイズを決定する。

このように、やわらかい素材をあつかった建築設計、施工のプロセスは、通常の建築設計とは異なるものとなる。とくに大きな違いは、プロセスへの素材の関与のタイミングである。通常の建築設計では、空間が決定したあとで、素材を選択するところを、本論で提案する。「やわらかい素材」を用いた設計・施工プロセスでは、空間という Globalな形状は部分の操作の連続として、プロセスの最後に立ち現れてくる点であろう。今後、素材特性を持った建築の設計、施工は、恒久的でより大きなスケールへの展開を模索する一方で、デザイン教育などにおいて広く取り入れられていくことに可能性があると考えられる。

[参考文献]

- 1) Otto, Frei: 1995, Finding Form : Towards an Architecture of the Minimal, Edition e1 .Meng es, Berlin.
- 2) 佐々木睦郎『FLUX STRUCTURE』TOTO出版, 2005年
- 3) Piker, D.:2013, Kangaroo: Form Finding with Computational Physics, Architectural Design doi:10.1002/ad.1569
- 4) 斎藤公男『新しい建築のみかた』エクスナレッジ, 2011年.
- 5) Taichi Kuma, Proceedings of the 19th International Conference of the Association of Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2014, Kyoto, p. pp. 181-190 “Shrink Film Architecture” May 2014
- 6) Taichi Kuma, Moritz Dörstelmann, Marshall Prado and Achim Menges, Proceedings of the 32nd eCAADe Conference - Volume 2, Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering and Environment, pp. 283-292 “Integrative Computational Design Methodology for Composite Spacer Fabric Architecture, September 2014.
- 7) TAICHI KUMA, ITERATIVE DESIGN PROCESS BETWEEN PHYSICAL MODELING AND COMPUTATIONAL SIMULATION FOR PRE-TENSIONED GRID SHELL STRUCTURE, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016.

*1 フリーランス 博士(工学)