

ジオメトリックエンジニアリング

○城所竜太*¹ 後藤 一真*¹ 天野 裕*¹

キーワード：ジオメトリックエンジニアリング パラメトリックモデリング

1. 諸言

3DCAD の出現により、定型の形状から自由な不定形と変わりゆき、「不定形な定形」を導出しようとする動きがある。「不定形な定形」とは、マクロ的には不定形であるが、ミクロレベルでは定形な形態やシステムで成立することで、コンセプトをキープしつつ、実現可能な工期・コストに収める思想を意味する。どの時代の建築においてもこの思想は工夫を重ね試行錯誤されてきたが、近年のコンピュータツールにより、「不定形な定形」を飛躍的に発展させる潜在力がある。不定形な形態の創出のみならず、整理、定義、操作を通じて「施工性」や「経済性」にも焦点をあてたアプローチを「Geometric Engineering」と呼ぶ。

ここでは Geometric Engineering から導かれたソリューションを幾つか挙げる。

2. 組むというソリューション

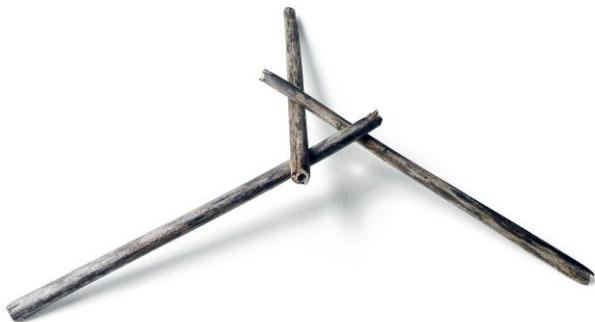


図 2.1 組む

組むことの難しさは組む位置や組み方次第で全ての部材の要素の空間座標が変化するという点である。その形状を設計のプロセスにおいて実現しようとする1か所接合部が変わると、他の部材との幾何学関係に影響が生じる。一方で、接合部に集まる部材同士の関係性が決まっていれば、製作上まるで3次元のパズルのように、「組む」行為は然程難しいことではない。

組むソリューションは、以前本会で紹介した「自然体感

展望台六甲枝垂れ」(兵庫県神戸市六甲山頂、三分一博志氏設計)がその一例である。

三分一氏からは自然界と同様に樹木が着氷する葉脈のようなドーム状の空間が求められた。φ50 mmのステンレス部材を「最小の部材長で組む」ことで、限られた予算・シンプルな施工方法で直径 16m、高さ 10m のドームを実現した。

一般的にパイプ同士を接合する際には、ボールジョイントなどの機械的な接合になったり、パイプを切欠いたりする手間などが膨大になるが、部材同士を点で接触させながら組むことで立体化が図れれば、パイプ同士をシンプルに接合できると考え、部材をずらしながら組むことにした。軽量の部材かつシンプルな施工手順が功を奏し、当初のコンセプトを保ったまま、限られた予算とタイトな施工期間内に竣工させることができた。

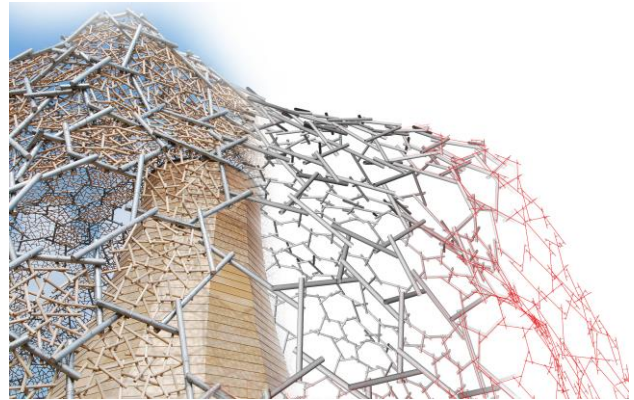


図 2.2 自然体感展望台六甲枝垂れ

他の組むソリューションの事例として、「東北大学片平キャンパスレストラン」(宮城県仙台市内、山本・堀アーキテクト設計)の屋根である。

部材長が異なる集成材を六角形と三角形が交互に出来るように互いに組みながら屋根の重量を支える架構システムである。集成材の接合部に相欠きを施し、「組む」ことを実現している。高さ方向の幾何形状のコントロールは部材の組み方と、相欠きの深さを調整しながら自由曲面状に部材を組むことを実現している。



図 2.3 東北大学片平キャンパス

何れのケースにおいても、設計者と施工者の情報共有は3次元 CAD を用いた。一方で、ジオメトリを構成する情報は、社内開発のプログラムと構造解析で用いた解析モデルと連動させており、おのおのの部材の長さ、接合する相手の部材 ID、接合先の角度が解析的に計算されていることから、製作者とのやりとりは、部材リストとして、部材長/接合角度/接合する相手の部材番号をリスト化して伝えた(図 2.4)。そうすることで、製作者の施工図の作図期間を短縮するばかりでなく、監理者と製作者との間で図面をチェックする時間を大幅に短縮した。

要素番号 E#	J#	部材端距離 (mm)	回転角 R [°]	回転側長 R (mm)
1	---	0.000	---	---
1	2	50.000	-58.996	-25.021
1	3	218.978	-81.881	-34.727
1	305	603	725.910	101.906
1	---	775.910	---	---
2	---	0.000	---	---
2	3	50.000	79.064	33.532
2	1	179.588	-121.184	-51.396
2	194	549	309.176	-141.415
2	---	359.176	---	---
3	---	0.000	---	---
3	1	50.000	-130.816	-55.481
3	2	201.653	-150.863	-63.583
3	26	30	504.958	26.658
3	25	28	656.611	-132.069
3	---	706.611	---	---
4	---	0.000	---	---
4	5	4	50.000	109.515
4	6	6	197.429	127.818
4	52	71	492.288	119.552
4	53	72	639.717	-78.783
4	---	689.717	---	---
5	---	0.000	---	---
5	6	5	50.000	-124.282
5	4	4	191.898	76.129
5	203	539	333.787	-26.749
5	---	383.787	---	---

図 2.4 施工者と共有したリスト表

3.面を揃えるソリューション

直線では表現不可能な建築はこれまで、単純な幾何学に置き換えられ、実現されてきた。しかし、近年になり、コンピュータ技術の発展に伴い、自由な曲面を描画可能な 3DCAD のツールの出現によって、自由な曲面形状を単純な幾何形状に置換することなく、デザインした形状がそのまま建築として、実現しつつある。たとえば、ポーランドワルシャワの Zlote Tarasy (The Jerde Partnership) など、ガラス張りの自由曲面の場合、実情は自由曲面に見えるように三角形の平面パネルに分割して、自由曲面を表現している。面に対して多角形分割を行うと、幾何学的に捩じれが生じてしまうためである。それと同時に、三角形分割によ

る弊害は、サッシの数が増えるのみならず接合部においても 5 方向ないし 6 方向から部材が寄り集まるため、接合部分にも一工夫が必要となる。

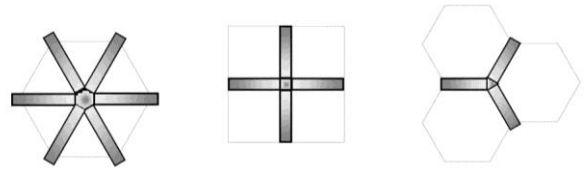


図 3.1 接合部に集まる部材が少ない方がシンプルになる

接合がよりシンプルで、サッシのフレームを減らすことができれば、より透明度の高い空間が実現できる。そのために、少し曲面の形状を調整して、「ねじれのない四角形以上の多角形で曲面近似を行う」ことで、接合部に集まる部材を減らしフレームを減らせ、上記の問題を解決に導く事が可能となる。さまざまな自由曲面を実現する社内開発したプログラム「Planar Polygon Generator」を紹介する。多角形が三角形の集合体である点に着目し、それらの三角形の面が同じ方向を向いていれば、多角形の平らな面が構成されるというアイデアである。

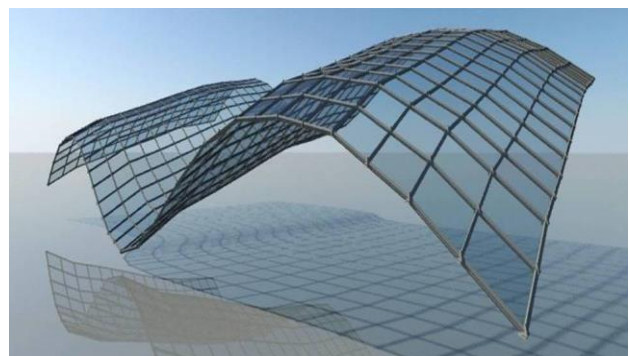
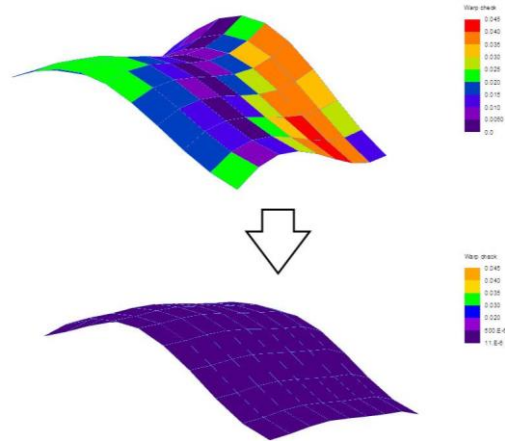


図 3.2 PPG を適用し捩じれの無い自由曲面を実現

3DCAD を用いるデザイナーの増加に伴い、限られた予算のなかで、接合部を減らしながら面で 3次元曲面を構成する需要は、設計・施工の両観点から、今後ますます高まると考えられる。

4.重なりを許容するソリューション

前節の二つのソリューションはどちらかというと、あるミクロスケールの定型な要素を前提にして、マクロスケールの不定型曲面を生成する、というアプローチであったが、ここではその道順を逆にして、あるマクロスケールの不定型曲面から出発して、ミクロスケールの構成要素を定型化していく手法を考えてみる。

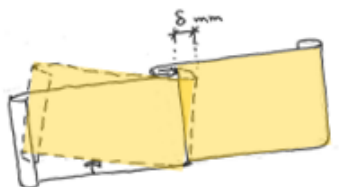


図 4.1 重なりを許容するソリューション

具体的にこのようなアプローチが必要とされるのは、曲面の形状そのものが造形としての強い意味を持っていて、外形を変形させないことが重要である場合、あるいはより実際に、設計がかなりの段階まで進んでいて、全体形状を変えることが広範囲に影響を及ぼしてしまう場合などである。そうした状況で自由曲面を形成するのに、最も一般的な方式は、まず<骨>となる下地材をコンクリートや鉄骨で作り、その上に<皮>としてのパネル材を被覆していくというアプローチである。

一般的に、曲率が様でない自由曲面を細分割してパネル要素を敷き詰めていくと、球面や一方方向に流れる曲面などと違い、個々のパネル形状が不定型なものになってしまう。しかし建築の壁面・屋根面のような大きな曲面にとって、仕上材に使うような個々のパネルサイズから見ると、曲率の変化が微小なことが多く、また個々のパネル形状をより単純なものに近似したとしても、全体的な外観に与える影響は無視できるほどわずかなものであることが考えられるので、その許容範囲内であれば、パネル形状を近似的に単純化することが可能と考えられる。つまり、同一部材を用いるが、その境界部分においては一定の誤差を許容するアプローチである。

ここで、金属板一文字葺によるパネルライゼーションの事例を紹介する。自由曲面のパネルライゼーションは、一般的に、パネル同士の縦横に隣接する目地が、スムーズに連続するようなパターンでの配置することと、できるだけ多くのパネルを一定の長方形や台形といった定型サイズに保つ意匠性と施工性を高めることが主たる目的である。

まず意匠性の向上のために、自由曲面上のパネル相互の縦横の隣接関係をゴム紐でつながれた網状のネットワーク

と見立て、この縦横のラインがスムーズに連続するような状態の探索を行う。これはゴム紐の網が互いを引っ張り合う力が釣り合う状態の探索と同義であり、これはダイナミックリラクゼーション、もしくはメッシュリラクゼーションと呼ばれる解析手法である。

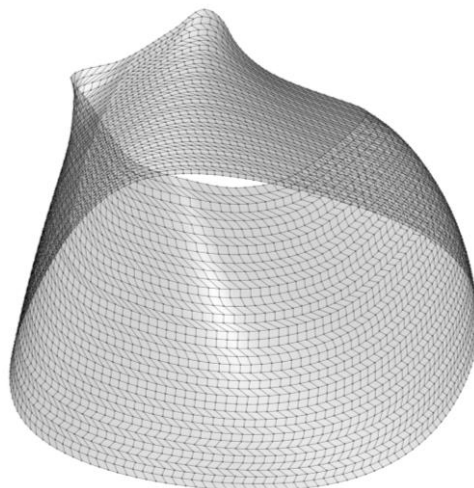


図 4.2 ダイナミックリラクゼーション前

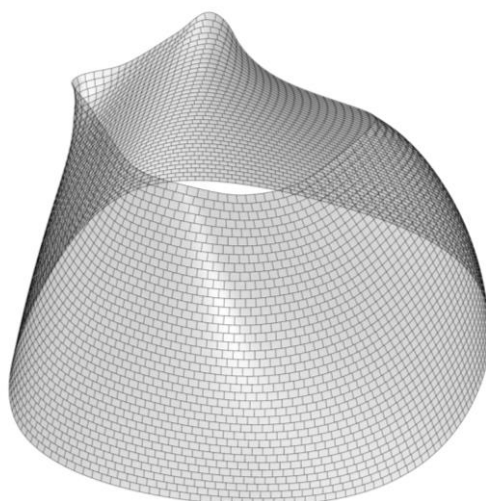


図 4.3 ダイナミックリラクゼーション後

金属板のサイズは 400mmx500mm を用いているが、全て同一の屋根パネルで葺くと目地配列が綺麗に繋がらない箇所が残るため(図 4.2)、ダイナミックリラクゼーションを施すことで、図 4.3 のような滑らかな網目模様を得る。この時点では、個々のパネルはほぼ同じ形状を保っているものの、実際にはわずかに異なった形状となっている。

そして、一文字葺パネルが端部の折り返しによる接合であり、若干量の位置や傾きのズレを一定量(今回は 5mm を想定)吸収可能であるという施工性を考慮して、個々に微妙に異なる形状をしたパネルを分類し、台形や長方形といった定型パネルへの近似を行っている。

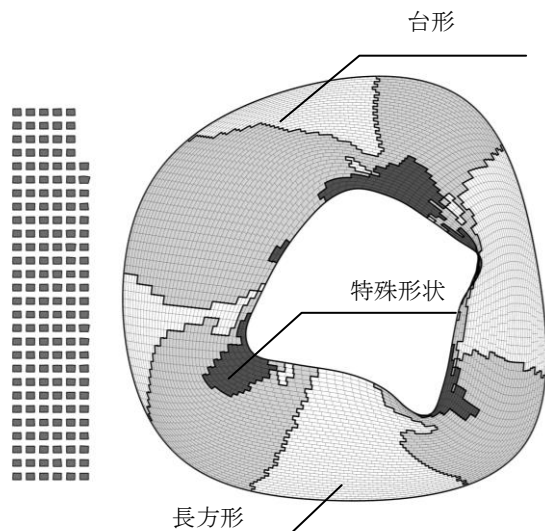


図 4.4 葺き材の分類

許容可能な重なり量を横方向に $\pm 5\text{mm}$ 、回転方向に $\pm 2.5\text{mm}$ とすると、全体で約 5000 枚のパネルの内、長方形が 2000 枚(7 種類)で、台形は 2700 枚(65 種類)で、特殊パネルは 300 枚となり、長方形・台形を合わせた定型サイズは全体の 95%とすることが可能となっている。

また、この手法では、実際の設計ディテールや採用工法の詳細検討により、許容可能な重なり量をより大きくすることで、定型パネルの形状や、そのバリエーション数をさらに少なくしていくことも可能である。

5. 解析結果をフィードバックするソリューション

建物を設計する場合、数多くのエンジニアリングによって、建築の機能性の確認が行われる。たとえば、構造解析や温熱環境解析、光環境解析といった様々な解析が行われ、与えられたデザインに対して、定量的な結果が出てくる。しかし、得られる定量的な結果は、各のエンジニアリングによって時として相反することがある。得られる定量的な結果は、建物の形状と相関性があるケースが多く見受けられることから、ジオメトリックエンジニアリングが、形態をパラメトリックに制御している限り、建築機能面の評価と同時に形状をコントロールすることが可能となる。つまり、相反する定量的な結果のなかから、形と機能の両面から優れたオプションが選択できるのである。

たとえば、構造解析と環境制約条件による結果を形状にフィードバックで最適化した事例として平田晃久氏設計による LEXUS Amazing in motion 2013 がある。



図 5.1 LEXUS Amazing in motion in Milan

また、著者らは構造解析と光環境解析を組み合わせる結果を形状にフィードバックするケーススタディとして、2013 年に開催されたマテリアライジング展において、アクリルでツール兼照明を作成した(図 5.2)。詳細については、本シンポジウム報告内、パラメトリックモデリングによる光環境と構造の多目的形状最適化を参照されたい。



図 5.2 アクリル ツール兼 照明

6. 結言

ジオメトリックエンジニアリングは複雑な形状をデザインする設計者とシンプルな方法で製作する施工者のギャップを埋めるエンジニアリングである。本稿では経済的・時間的制約の中において、デザインの幅を広げる事例を幾つか紹介した。

[参考文献]

- 1) Ryota Kidokoro, Kazuma Goto, Rokko Mountain Observatory, The Arup Journal 2/2011 pp20-26
- 2) 城所竜太+後藤一真+天野裕, Geometric Engineering 幾何学操作から生まれる新たな可能性と技術, 建築技術 2013

*1 オーヴ・アラップ・アンド・パートナーズ・ジャパン・リミテッド