

不規則的平面デザインの立体形状への展開

○阿部 和輝*1 前 稔文*2
小林 竜一*3

キーワード：アルゴリズムックデザイン ハニカム構造 骨組解析 変形 立体形状 屋根

1. 序論

近年、計算技術の進歩による設計及び建設技術の向上から、これまでにない建築手法が発達した。その中でも、コンピュータ・アルゴリズムを用いて形態を生成させるアルゴリズムック・デザインという手法を建築へ適応した多くの事例が報告されている¹⁾。

その中の一例として、筆者らの一人は、自然界に存在するかたち及び現象のもつ特徴や合理性を建築形態に用いることを試みており、樹形図の生成システムを数理的に扱い、IFSコードを用いた反復関数システムから積層状のアーチ構造を提案している²⁾。

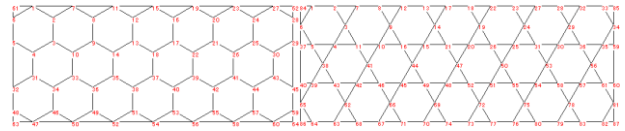
その一連の研究のひとつとして、自然界に存在するかたちの中で、正六角形を隙間なく充填した形状であるハニカム構造に着目した。この構造は蜂の巣や亀の甲羅など、自然界に多くみられる形状であり、各々の環境の変化に柔軟に対応しながら、そのかたちをより合理的な独自のものに变化させてきたと推測される。そこで、これまでは幾何学図形の平面充填形状に乱数による微量の不規則性を与えることで、より自然におけるハニカム構造に近づくのではないかと考えた。さらに、不規則性を与えた平面充填形状を壁面と設定し、その最上辺の各節点到鉛直荷重を作用させた骨組解析を行い、面内荷重に対する変形量の少ない壁面を生成した。

本報告では、不規則性を与えた平面充填形状を立体形状へ誘導し、構造体としての強度を持つ構造デザインの提案を目的とした。また、得られた立体形状のパターンと各形状の最大変位量を比較し、考察する。

2. 基本平面形状の作成

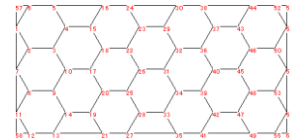
まず、立体形状へ誘導するための基本となる幾何学図形の平面充填形状を設定する。ここでは、序論で述べたハニカム構造を形成する正六角形の平面充填形状(2方向)、および正六角形と三角形の平面充填形状の3種類を基本形状とした(図-1)。また、基本形状はいずれも左上を基点とし、右方向にX軸、下方向にY軸を取得し、X軸方向に7個、Y軸方向に3個、図形を敷き詰めた形状となっている。

次に、自然に近い形状へ誘導していくために、設定した基本形状に乱数による不規則性を与え、四辺上以外の節点を移動させたものを初期形状とする。これに骨組解析を行い、不規則性と強度の高い形状を生成する。また、評価方法として、評価値 E が高いほど不規則性を持ち、より高い



(a) 平面充填形状 1

(b) 平面充填形状 2



(c) 平面充填形状 3

図-1 平面充填形状

強度を有する形状となることがこれまでの研究より明らかになっている³⁾。評価値 E は(1)式で表される。

$$E=R1+D1 \quad (1)$$

ここで、式(1)より $R1$ は乱数に対する評価、 $D1$ は移動量に対する評価としている。初期形状の生成条件として、部材は $5 \times 5 \text{cm}$ の矩形断面の鋼材とし、各節点を剛接とした。ここで、ランダム率 r は図形の1辺の長さに対する乱数の割合とし、0%、5%、10%、15%の乱数を発生させ、不規則性を与えた初期形状を生成した。その初期形状に骨組解析を行い、評価値 E を算出する。その中で評価値 E の値が高い5個を保存し、これをランダム率ごとに2回ずつ行うことで各形状モデルの基本平面形状を作成する。なお、ランダム率0%の形状は不規則性を持たないため作成される形状は一個のみとなる。以上の骨組解析をすべての基本形状に対して行い、基本平面形状を生成した。

さらに、生成された基本平面形状を壁面と見なした骨組解析を通じて、最適化処理を行い、高い強度の形状へと誘導した。最適化処理に関しては既往の研究⁴⁾で明かされているため省略するがその誘導された形状からも立体形状を生成する。

3. 骨組解析による立体形状への誘導

前章で生成した基本平面形状に対して骨組解析を行い、立体形状へ誘導する。まず、基本平面形状を水平に配置し、面に対して垂直な鉛直方向の荷重 0.1kN を各節点到作用させた骨組解析を行う。その際、四辺中で長い二辺上の各節点をピン支持、内部の節点を剛接とし、四辺中の長い二辺上に存在する節点には荷重は作用させないものとする。

次に、立体形状を生成する方法について述べる。作成し

た基本平面形状の骨組データを読み込み、荷重による最大変位量と節点の座標を取得する。その取得した節点 (x_1, y_1, z_1) を荷重方向と逆方向の点 (x_1, y_1, z') に移動させ(図-2)、荷重による対象節点の変位を抑制し、データを更新する。移動した z 軸上の点を式 (2) で定義する。

$$z'_1 = z_1 + A \quad (2)$$

ここに、 A は設定した移動量であり、解析の際に設定できる。以上の操作を繰り返し行い、節点が移動することで、フラットな状態の面から節点が浮き上がり、凹凸の見られる立体形状が生成される。

ここでの解析条件は、節点の移動量を 1cm、繰り返し回数を 500 とした。その条件のもと、乱数を発生させた基本平面形状とそれに最適化を行った基本平面形状に対して骨組解析を行い、立体形状へ誘導する。

図-3 と図-4 は解析例であり、それぞれ初期状態と 500 回目の解析により生成された形状である。生成された形状の骨組とその周囲には荷重による変形が示しており、図-3 ではフラットであった骨組が、解析によって凹凸のある立体形状へ誘導されたことが図-4 から確認できる。また、図-4 の 2 つの線がほぼ重なっていることから生成された立体形状は面に垂直な荷重に対して変形しにくいものになったことがわかる。

4. 解析結果と考察

(1) 立体形状の分類化

生成された立体形状 183 個について骨組解析を行い、各立体形状を、そのかたちから Type1 (ノコギリ型)、Type2 (波型)、Type3 (突出型)、Type4 (こぶ型)、Type5 (フラット型) の 5 タイプに分類し、図-5 に示した。各立体形状の形状モデルを投影図、右側面図、上図は上から見たもので示している。Type ごとの特徴として、Type1 は面の中央がギザギザに突出した形状である。Type2 は節点の移動量が小さく波のような形状である。Type3 は一つの節点が大きく突出した形状である。Type4 は面の中央が大きくこぶのように盛り上がった図形である。Type5 は節点

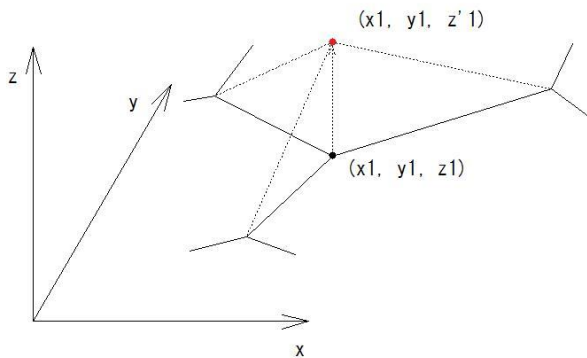


図-2 節点の移動方法

の移動量が少なく、面の中央部分がほぼフラットに盛り上がった形状である。表-1 より、生成された 183 個の立体形状は Type1 が 61 個、Type2 が 50 個、Type3 が 11 個、

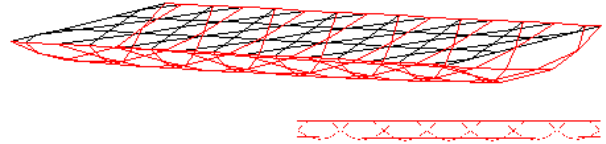


図-3 解析前

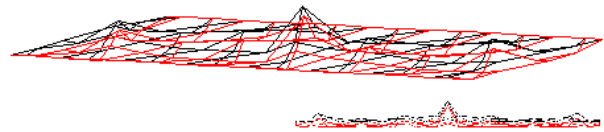
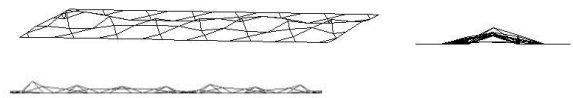


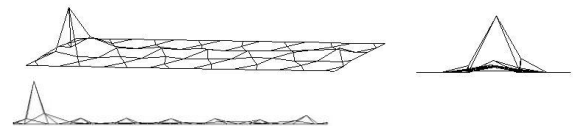
図-4 解析後



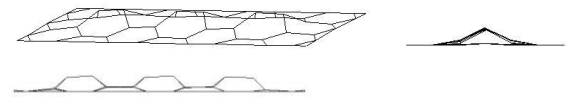
Type1 (ノコギリ型)



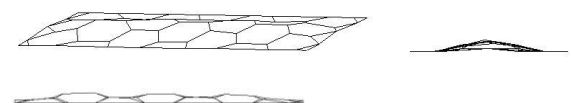
Type2 (波型)



Type3 (突出型)



Type4 (こぶ型)



Type5 (フラット型)

図-5 立体形状の分類

表-1 各条件と Type モデルの個数

形状	最適化	ランダム率	Type1	Type2	Type3	Type4	Type5
1	なし	0%	1				
		5%	10				
		10%	10				
	あり	15%	10				
		5%	10				
		15%	10				
2	なし	0%			1		
		5%		9	1		
		10%		8	2		
	あり	15%		9	1		
		5%		7	3		
		10%		8	2		
3	なし	0%				1	
		5%				10	
		10%				10	
	あり	15%				10	
		5%				10	
		10%				8	2
計			61	50	11	58	3

Type4 が 58 個、Type5 が 3 個であり、Type1 は基本平面形状 1 からのみ生成、Type2 及び Type3 は基本平面形状 2 からのみ生成、Type4 及び Type5 は基本平面形状 3 からのみ生成されていることが確認できる。以上のことから、立体形状は平面の充填するパターンによって決まるのではないかと推測できる。

(2) Type ごとの最大変位量について

本報告では骨組解析の繰り返し回数を 500 回と設定しており、各モデルの荷重による最大変位量について考察する。骨組解析の終了時における最大変位量について、生成された立体形状の Type ごとにまとめたものを表-2 に示す。Type2 の最大変位量の最小値は、他の Type の最大変位量の最小値と比べ 0.31 倍から 0.87 倍となっており、Type2 の立体形状の変形量が少ないことがわかった。また、各 Type のうち最も変形量が少ない立体形状は、最適化処理を行った基本平面形状から生成されたものが多い。このことから、最適化処理を行った基本平面形状は、変形量の少ない立体形状に誘導されやすいのではないかと推測できる。

さらに、各 Type の最も変形量が少ない形状について繰り返し回数に対する最大変位量の推移を図-6~10 に示す。曲線が繰り返し回数毎の最大変位量をプロットしたもの、直線は近似直線を示す。いずれの図も繰り返し回数が増えるに従って、最大変位量が少なくなっていることが確認でき、骨組解析により荷重に対する変形が抑制された立体形状が生成されたことがわかる。Type4、Type 5 は近似曲線の傾きが他の Type に比べ急であり、繰り返し回数を増やすことで、さらに変位量が少なくなると推測できる。一方で、Type2、Type 3 の推移をみると、曲線は繰り返し回数が 400 を超えたあたりから、曲線が横軸に対して平行に近くなっており、これ以後の変位の減少はあまり期待できない

表-2 各 Type の最大変位量 (cm)

ランダム率	モデル番号	形状1		形状2		形状3	
		Type1	Type2	Type3	Type4	Type5	
0%	1	4.4910			2.4310	4.2000	
	2	4.4730	2.0510			3.8670	
	3	4.5500	1.6990			3.9350	
	4	4.4260	1.6680			3.6630	
	5	4.3610	1.5950			4.0120	
	6	4.4680		2.3560		3.5160	
	7	4.4090	1.5710			3.3360	
	8	4.5440	1.7390			3.3860	
	9	4.4940	1.6240			3.7010	
	10	4.4460	1.8500			3.6070	
5%	1	4.4750	1.9370			3.5800	
	2	4.6640	1.3730			2.7980	
	3	4.2650	1.6380			3.5940	
	4	4.2510	1.4750			3.6820	
	5	4.3670	1.6070			3.2250	
	6	4.5020		2.0600		3.5480	
	7	4.3440	1.4840			2.9830	
	8	4.2460	1.3910			3.0610	
	9	4.4790		2.1630		3.9080	
	10	4.2880	1.6630			3.4340	
10%	1	4.3270	1.5830			3.0710	
	2	4.5610		1.6850		2.1830	
	3	4.3310	1.3560			3.0380	
	4	4.3160	1.4460			4.0280	
	5	4.1480	1.6550			2.7360	
	6	4.2050	1.6640			3.2810	
	7	4.2070	1.5060			2.9750	
	8	4.6060	1.4040			3.2040	
	9	4.3630	1.5000			3.1960	
	10	4.8920	1.3830			3.6230	
15%	1	4.4170	1.4190			3.6380	
	2	4.1480	1.3560		1.6850	2.1830	
	3	4.412	1.5877		1.9898	3.4196	
	4	4.3840	1.6700			3.6990	
	5	4.4990	1.5570			3.3190	
	6	4.2210	1.6310			3.6180	
	7	4.3610		1.5160		3.7460	
	8	4.4080		2.2280		3.0720	
	9	4.2280	1.4300			3.2370	
	10	4.5500	1.5540			3.6490	
最適化なし	1	4.3230	1.6770			3.4540	
	2	4.3960		1.6970		3.3790	
	3	4.4270	1.7760			3.3250	
	4	4.6400	1.4740			2.6220	
	5	4.0810	1.5250			3.3190	
	6	4.1980	1.4050				3.4600
	7	4.0930	1.6010			2.9850	
	8	4.4320		3.0430		3.6160	
	9	4.0670		1.9370		2.5520	
	10	4.1620	1.2200			2.6150	
最適化あり	1	4.3280	1.5500			3.8160	
	2	3.9840	1.4990			3.0690	
	3	4.3120	1.6440			3.0870	
	4	4.4300	1.3530			2.3130	
	5	3.8870	1.2660			3.3160	
	6	4.2630	1.6500			3.3910	
	7	4.1150	1.6230			2.6410	
	8	4.0670	1.3960			2.9520	
	9	4.0040	1.5630			3.6990	
	10	3.9490	1.4320			2.9960	
最小値		3.8870	1.2200	1.4090	2.6150	2.3130	
	平均値	4.2581	1.5117	1.9717	3.2793	2.6595	
全体平均		3.0268					

いと考えられる。

5. 形状の視覚化

ここで、誘導した立体形状について視覚的に捉えることにし、type2 の形状を屋根として想定した場合の画像を 3 次元 CAD で作成した。ここで作成した画像は、ランダム率 10%を与え、最適化を行ったパターン 7 の基本平面形状から生成された立体形状を用いている。図-11 は立体形状の鳥瞰図であり、変形が小さいモデルでありながらも形状の起伏を視覚的に捉えることができ、フレームが複雑に組み合わさっていることが画像から分かる。また、立体形状に誘導したため、基の平面形における規則性がより薄れた印象になったと思われる。

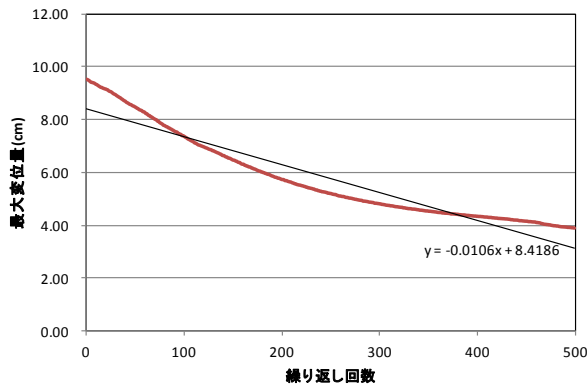


図-6 繰り返し回数と最大変位量の関係-Type1

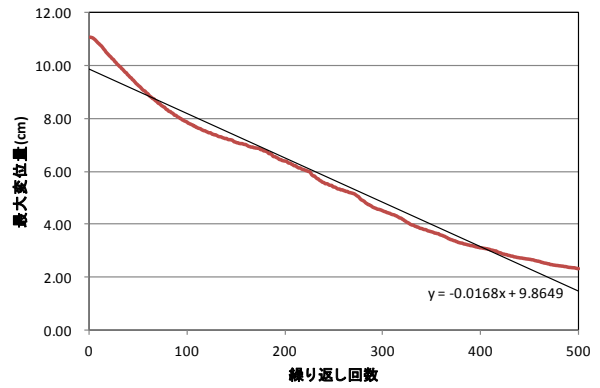


図-10 繰り返し回数と最大変位量の関係-Type5

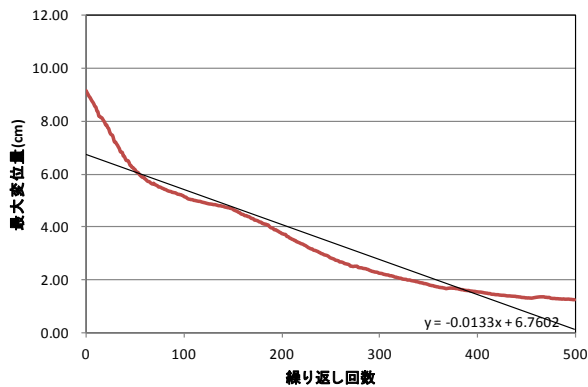


図-7 繰り返し回数と最大変位量の関係-Type2

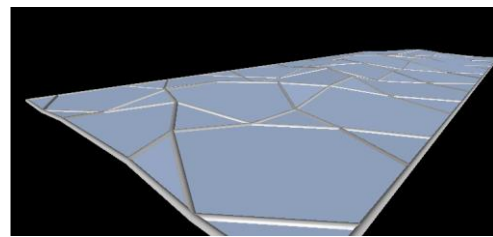


図-11 立体形状の鳥瞰図 (Type2 モデル)

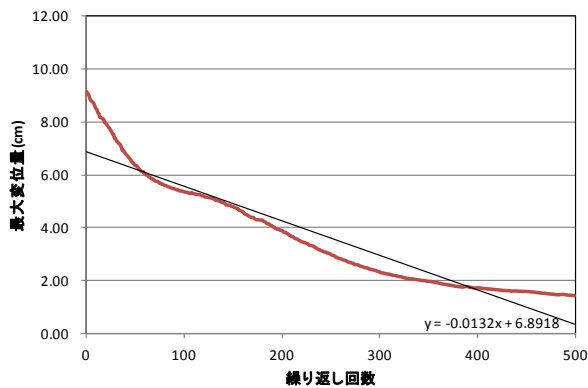


図-8 繰り返し回数と最大変位量の関係-Type3

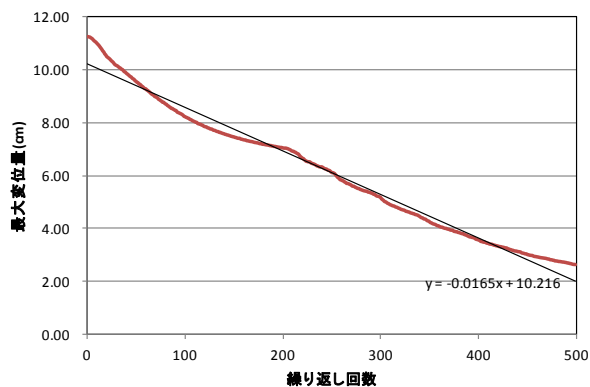


図-9 繰り返し回数と最大変位量の関係-Type4

6. 結論

節点を移動させるアルゴリズムにより、面方向への荷重による変形が抑制された立体形状を生成することができた。本研究の解析条件によって生成された立体形状のかたちは、基本形状の平面パターンにより、ある程度の傾向が決まると推測できた。また、立体形状を生成する骨組解析において、立体形状の Type による変位量の減少の推移に若干の差はあるものの、すべての立体形状で繰り返し回数が増すごとに最大変位量が少なくなっていることが確認できた。最後に、適用例を作成することで、立体形状として用いた空間の複雑さを視覚的に捉えることができた。

[参考文献]

- 1) 日本建築学会編:アルゴリズムック・デザイン、鹿島出版会、2009年
- 2) 朝山秀一、前稔文:フラクタル幾何学に基づく積層アーチの自動形状生成とその応用に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第557号、pp. 181-188、2002年7月
- 3) 前稔文、小林竜一:平面充填形に不規則性を用いた壁面デザイン、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp. 87-88、2012.
- 4) 佐藤京介、前稔文、小林竜一:平面充填形と不規則性による壁面デザインの最適化の模索、コロキウム 構造形態の解析と創生 2012、pp.51-56、2012年10月

*1 大分工業高等専門学校機械・環境システム専攻1年

*2 大分工業高等専門学校都市・環境工学科、准教授、博士(工学)

*3 無所属、修士(工学)