

# 熱可塑性樹脂を用いた実験的自由曲面シェルの 形状決定法に関する研究

建築構造学分野 M10TD056 渡邊 祥

## Abstract

構造解析技術の進歩により構造形態の創生に対する研究が認識され始め、様々な研究がおこなわれはじめた。そのため近年において実構造物にも自由曲面シェルは多用されはじめた。本論文は自由曲面シェルの作成方法の一つである逆転曲面を利用する方法を拡張した形状決定法に関するものである。ここでは荷重が載荷された熱可塑性を有するアクリル板に加熱装置で熱を加えるという方法で吊り下げ実験を行う手法を確立することを目的とし、実験において得られた課題をクリアしていくことで形状決定手法を確立する。そして本形状決定法の有用性の確認を行い、さらに反力の操作をすることによる新しい形状決定法を提案する。最後に本形状決定法を実際のシェル構造に適応し、力学性状を確認する。

## 1. 序論

構造解析技術の進歩により構造形態の創生に対する研究が認識され始め、様々な研究がおこなわれはじめた。そのため近年、実構造物にも自由曲面シェルは多用されはじめた。自由曲面シェルの作成には構造設計者の力が大きく必要であるが、その際には多くの時間と労力が必要である。

そこでここでは懸垂曲面の手法を拡張した熱可塑性樹脂の高温状態における材料特性の変化を利用したシェルの形状決定法について扱う。懸垂曲面を利用するこの手法はスペインの建築家アントニー・ガウディらにより昔から行われている。スイスの建築構造家ハインツ・イスラーも設計に際しては実際に布と石膏で模型を製作し、その寸法を図面にフィードバックする方法をとった。本形状決定手法はアルゼンチンの研究者 Oscar や O.Andres らが生物学的な原理であるホメオスタシスという言葉を用いて Homeostatic Model Technique として始めたものである。彼らは既往の研究により形状を実際に作成しているが、実験する際の各値設定方法による形状や応力の比較が行われておらず、明確な形状決定方法が確立されていない。

本研究では、熱可塑性を有するアクリル板に加熱装置で熱を加えるという方法で吊り下げ実験を行う手法の確立することを目的とし、実験において得られた課題をクリアしていくことで形状決定手法を確立する。本手法はさらに反力の操作をすることによる新しい形状決定法を提案する。最後に本形状決定法を実際のシェル構造に適応し、力学性状を確認する。

## 2. アクリル材を用いた形状作成法の実験方法の確立

### 2.1 本手法の有用性の確認と課題の抽出

#### 2.1.1 実験手順

Step1: アクリル板に支持条件を与える

Step2: 荷重パッドをアクリル板に載せて加熱装置内の滑車に吊るす

Step3: 指定温度まで徐々に熱を加えて変形させる

Step4: 温度を下げてモデルを取り出す

Step5: 反転させて形状の測定を行う

#### 2.1.2 実験条件

出来上がりの形状に影響を受けると考えた、加熱時の最高温度・アクリル材の厚み・負荷させる荷重値の大きさをパラメータとして、いくつかの吊り下げモデルを作成し、各々で比較を行う。本節において吊り下げるアクリルの形状は正方形の  $210 \times 210\text{mm}$  の大きさである。

#### 2.1.3 応力の比較

作成したモデルを反転させ 100 倍に拡大し、汎用構造解析ソフト NX-Nastran

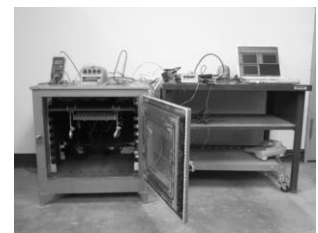


Fig.2.1 加熱装置全景

Table2.1 温度条件

Model ID	S_80_1.5	S_90_1.5	S_100_1.5
Temp. (°C)	80	90	100
Thickness (mm)	1.5	1.5	1.5
Load (kg/m <sup>2</sup> )	7900	7900	7900

Table2.2 厚み条件

Model ID	S_90_1.0	S_90_1.5	S_90_2.0
Temp. (°C)	90	90	90
Thickness (mm)	1.0	1.5	2.0
Load (kg/m <sup>2</sup> )	7900	7900	7900

Table2.3 荷重条件

Model ID	S_5000	S_90_1.5	S_15000
Temp. (°C)	—	90	—
Thickness (mm)	1.5	1.5	1.5
Load (kg/m <sup>2</sup> )	5000	7900	15000

を用いて応力解析を行った。その結果を Fig.2.3~2.5 に示し、以下で考察を述べる。なお今回作成したモデルは対称形とならず結果にバラつきが見られたため、モデルの 1/4 ごとの各主応力値、曲げモーメント値を平均化した。

3つの要素のそれぞれの条件において応力の違いが確認できたが、結果的に温度管理で応力が決まると結論付ける。温度条件はもちろんであるが、厚み条件に関しては材が厚すぎると内部まで十分に熱が行き届かず面外剛性を落とすことに不十分になる。そのため最大主応力に関して S\_80\_1.5 が、最小主応力に関して S\_90\_2.0 が極端に他のモデルよりも大きな値を示した。荷重条件に関しては、荷重が小さければ面外剛性を落とすのには低い温度で十分であるが、荷重が大きければ多少低い温度でも面外剛性を落とすことができる。ゆえに、「熱可塑性樹脂を用いた手法」では温度の管理が非常に重要である。そのため、本手法の実験には温度・形状のばらつきを抑えることが必要である。この中で応力の抑えられた最適な形状は S\_90\_1.5、S\_100\_1.5 と S\_90\_1.0 であり、S\_90\_1.5 を本手法で得られた形状として、以下の他の手法との比較を行う。

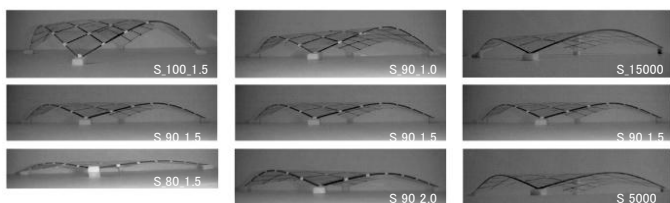


Fig.2.2 モデル ID と形状

### 2.1.4 他の手法との比較

「幾何学形状」である球を用いたシェルと懸垂系シェルの作成方法の一つでもある「一般逆行列を用いた手法」で作成したシェルの二つとで比較する。

「幾何学形状」を用いた手法と比較すると局部応力に関しては両モデルに大きな差はなく、応力分布に関

※図中の点線は圧縮側の許容応力度を示す。

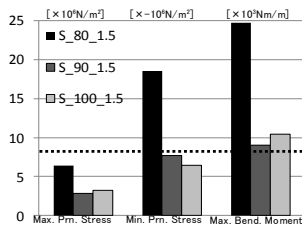


Fig.2.3 温度条件

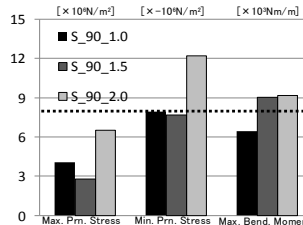


Fig.2.4 厚み条件

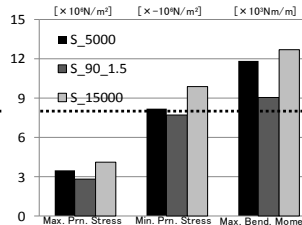


Fig.2.5 荷重条件

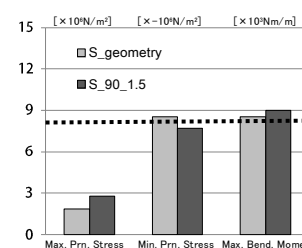


Fig.2.6 球形シェルとの比較

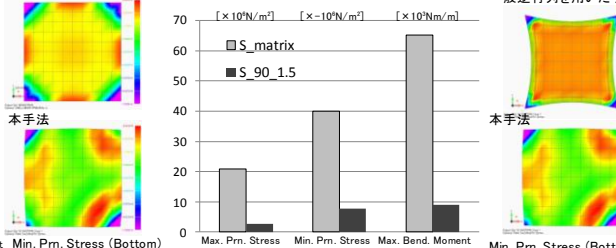


Fig.2.7 一般逆行列を用いた手法との比較

#### 解析条件

材料は設計基準強度 Fe24 の普通コンクリート。荷重条件は自重のみを考慮し、単位体積重量は 2400kg/m<sup>3</sup>、重力加速度は 9.81m/S<sup>2</sup> とする。シェル厚は均一 0.15m と設定。境界条件は四隅ピン支持である。

してはエッジ部で本手法のモデルの方が小さな引張力を示しているという有利な点が確認されたことから、シェルの作成方法の一つとして本手法は有用性があると考えられる。

また「一般逆行列を用いた手法」と比較すると局部応力に関しては本手法のモデルの方が小さな値を示したが、応力分布に関して「一般逆行列を用いた手法」のモデルのほうが中央部において応力の小さな分布を示すことを確認された。局部で著しく大きな応力値を示したことから、「一般逆行列を用いた手法」よりも本手法は有用性があると考えられる。

## 2.2 本実験の改善と温度の影響の検証

### 2.2.1 実験の改善

先の実験で形状のばらつきの問題が大きく浮かび上がった。その原因である温度管理の問題を解決するために実験装置を改善した。送風式の乾燥機で、風で循環させながら装置内部の温度を一定に保つことができる。また今回は実験装置内に土台を作成し、各寸法が測定できるようにした。

改善を行った後の実験から得られたモデルの形状を Fig.2.9 の点線にて示す。加熱装置の性能から加熱装置内の左右両側と手前奥側の形状の違いはあるが、その差は大きくなく、肉眼では確認できないほどであることから実験装置の改善を行うことで精度の良い形状を得ることができた。さらに今回は加熱誤差による座標の形状のばらつきや 3D 測定による計測誤差による応力のばらつきをできるだけ少なくするために座標の補正を行った (Fig.2.9 の実線)。

### 2.2.2 温度の影響の検証

実験に用いたアクリルの厚みは 1.0mm と 1.5mm のもので平面形状は 300×300mm の正方形、加熱装置内の設定温度は 90℃~140℃とした。実験から得られた形状を Table2.4 に示す。また応力解析結果から得ら

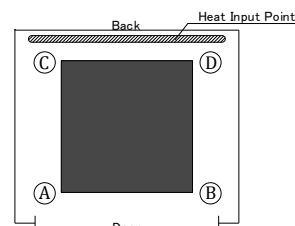


Fig.2.8 加熱装置とアクリルの位置関係

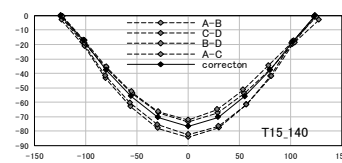


Fig.2.9 エッジ部の断面線(2.2 節)

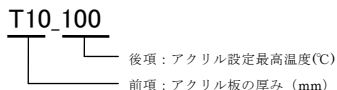


Fig.2.10 モデル ID の定義(2.2 節)

れた形状の最高の各主応力値と最大曲げモーメント値を示す。材料はアクリルの物性値を設定する。

Table2.4 各モデルの形状寸法

Model ID	Span(mm)	Raise(mm)	Raise / Span	
T10 Model	T10_90	283.25	50.35	0.178
	T10_100	270.18	69.10	0.256
	T10_110	258.73	79.75	0.308
	T10_120	255.48	85.48	0.335
	T10_130	255.83	85.85	0.336
	T10_140	253.60	87.93	0.347
T15 Model	T15_90	294.15	30.75	0.105
	T15_100	270.50	69.43	0.257
	T15_110	252.70	84.30	0.334
	T15_120	248.53	91.30	0.367
	T15_130	251.18	91.30	0.363
	T15_140	248.10	92.93	0.375

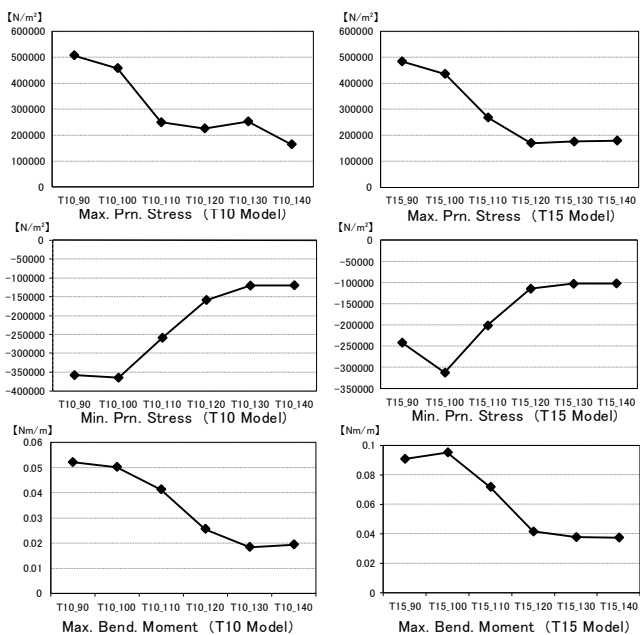


Fig.2.11 温度設定値によるモデルの応力変化 (材料: アクリル)

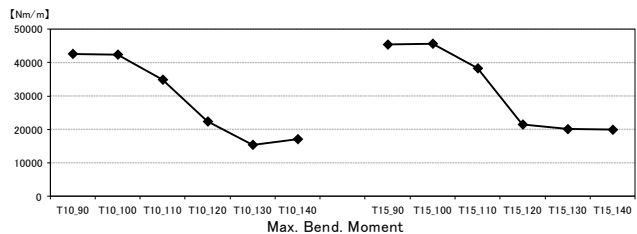


Fig.2.12 温度設定値によるモデルの応力変化 (材料: コンクリート)

両モデルとも設定温度が高いほどライズが大きくなるとともにスパンが短くなり、設定温度が高い状態ではライズ・スパン比が収束していることがわかる。それは結果的に応力の収束につながる。T10モデルでは最大主応力は110度を超えてから、最小主応力と曲げモーメントは130度を超える収束し始める。T15モデルでは、最大主応力・最小主応力・曲げモーメント全てにおいて120度を超えると収束傾向が見られる。各最大値が収束したモデルでは各応力が抑えられて、そのことにより応力分布が様となっている。曲げモーメントに関しては重力下で吊り下げられた純粋な張力場である膜面を逆転させた場合には自重下でたわみが生じて、面内の圧縮に伴う面外方向への曲げを受けてしまい、それゆえ特に境界近傍に曲げモーメントが生じ

てしまうため完全には除去できていない。なお形状を反転後100倍して材料をコンクリートとした解析結果をFig.2.12に示した。ただしシェル厚は統一して均一0.15mである。Fig.2.12を見てみると、T10とT15モデルでは各応力の収束する最大曲げモーメント値が異なる。特に最大曲げモーメント値ではT10モデルの方小さな値で収束している。これはT10モデルを製作する際に用いたアクリル材の厚みが1.0mmと薄く、初期状態から大きな曲げ剛性を有していないために荷重に抵抗するためにわずかに変形した状態となっており、加熱され変形する際にT15モデルよりもより面内抵抗する形状に移行しやすかったためと考えられる。

以上から、本手法の実験の課題である形状のばらつきについて改善を行い、また本手法の温度に関する影響を調べた。そして本手法で力学的合理性のある形状を得るためには形状の収束の必要に必要な温度が必要である。しかしながら高温にしすぎると、材料が溶ける危険性があり設定温度を予め高くすればよいものではない。また、形状の収束性から力学的合理性のある形状は1つの荷重量に対して一つの形状しか得られないため、ライズ・スパン比を操作することができないのが課題である。

### 3. 支点反力に着目したアクリル板吊り下げ実験

#### 3.1 水平荷重を作用させた実験

2.2節の実験を基に水平力を載荷させ、ライズ・スパン比の調整を行う実験を試みた。基本としたモデルはT15\_120である。2.2節

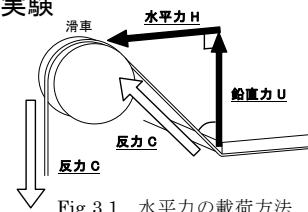


Fig.3.1 水平力の載荷方法

ではアクリルの重量を含めた吊り下げたモデル全体と同じ重量「C=U」になるように一支点あたりの支点反力荷重を設定したが、本節の実験では一支点あたりの支点反力荷重を必要鉛直力Uの11%と33%増とした。支点反力荷重を大きく設定したことは結果的に予めモデルに対して水平力を載荷させたことになる。

Table3.1 作成条件 (3.1節)

Model ID	Thickness (mm)	Temp. (°C)	Support Reaction	
H model	H1_T15_120	1.5	120	1.11U
	H2_T15_120	1.5	120	1.33U

Table3.2 各モデルの形状寸法 (3.1節)

Model ID	Span (mm)	Raise (mm)	Raise / Span	
H model	H1_T15_120	261.45	81.85	0.313
	H2_T15_120	272.65	68.93	0.253

・形状に関して

2.2節で作成した支点反力荷重以外の条件が同じであるT15\_120と比較するとライズが小さく、スパンが大きいことが分かる。これは予め水平力をアクリルに載

荷させることで、吊り下げ時に各支点が内側に入り込もうとする力を和らげたためであると考えられる。そのため予め水平力を載荷させることで、ライズ・スパン比を調整することが出来る。また、予め水平力の大きなモデル H2\_T15\_120の方がライズの小さい形状を作成できたが、反面そのライズの変化の割合が大きく、水平力の大きさにより大きく形を変えるため形状決定の際には注意が必要である。

・応力に関して

応力の比較では、2.2節で求めた形状の一部との比較を行ったが、水平力を予め作用させたモデルの方が2.2節のモデルよりも各応力が小さくなる結果が得られた。支点反力荷重以外の条件が同じである T15\_120とも比べるとわずかではあるが応力の小さな結果となった。また、水平力を予め作用させた H1\_T15\_120と H3\_T15\_120ではそれほど応力状態に差は見られなかった。

予め水平力を平板に作用させておくと、つまり面内方向の力を予め作用させておくと、面外剛性を落とすしアクリルが加熱される過程においてそれが面内方向に誘導する力となり、曲げモーメントの減少した結果表面主応力の減少につながっているのではないかと推測する。

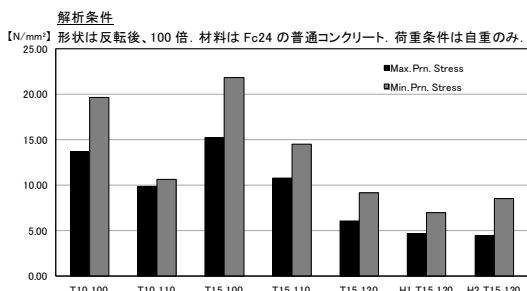


Fig.3.2 各主応力の最高値 ※最小主応力は絶対値

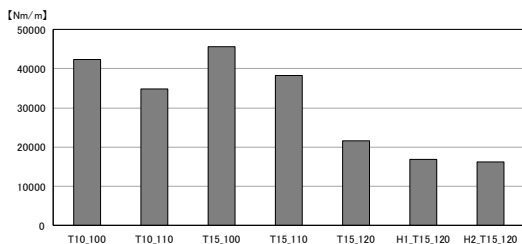


Fig.3.3 最大曲げモーメント値

### 3.2 反力操作実験

本節では出来上がりの形状の支点反力を操作する実験を試みた。アクリルに作用させる荷重は2.2節の T15モデルと同様である。ここでは支点反力に対称性を持たせたものと全く対称性を持たせないものの2種類の支点反力を設定して実験を行う。そのため以下のように支持点に与える荷重を決定した。支持点の記号は Fig.2.8を参照されたい。

Table3.3 支点反力の設定 (3.2節)

Model ID	C1_T15_120				C2_T15_120				
	Point	A	B	C	D	A	B	C	D
Reac. Force(C)	U	1.33 U	1.33 U	U	U	1.67 U	1.33 U	0.67 U	U
Load Value	150g	200g	200g	150g	150g	250g	200g	100g	
Ratio	3	4	4	3	3	5	4	2	

Table3.4 反力値【C1モデル補正前】

Point	Reac. Force (kN)	Ratio
A	1002.7	3.0
B	1295.7	3.9
C	1335.3	4.0
D	955.6	2.9

Table3.5 反力値【C1モデル補正後】

Point	Reac. Force (kN)	Ratio
A	978.4	3.0
B	1315.2	4.0
C	1315.2	4.0
D	978.4	3.0

支点反力が対称性を有する実験から作成されたモデル C1\_T15\_120は解析結果から実験で与えた比率と同様の反力の比率を示した。補正前も精度の良い支点反力の比率を示したが、補正後では非常に良い精度で実験通りの比率を示した。一方、支点反力が対称性を有しない実験から作成した C2\_T15\_120は解析結果から

Table3.6 反力値【C2モデル】

Point	Reac. Force (kN)	Ratio
A	1141.5	2.7
B	1478.0	3.5
C	1228.2	3.0
D	843.3	2.0

支点反力の比率は精度を少し欠いたものとなったが、支点反力の大きさの関係は保たれていることがわかる。精度を欠いた理由としては反力荷重が対称性を有していないために吊さ下初期状態において水平を保つことができなかつた点や滑車と紐の摩擦で生じる力が支点反力に影響したものと考えられる。

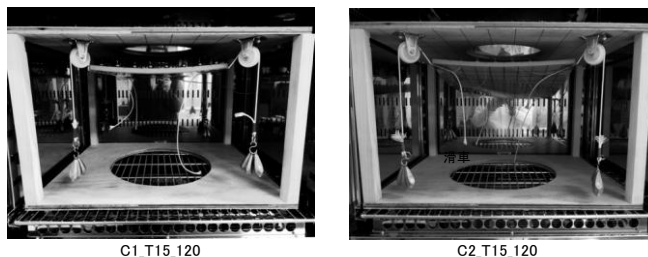


Fig.3.4 Cモデルの初期状態

## 4. シェル構造に適応したときの力学性状の確認

### 4.1 偏分布載荷

以下に示す荷重を載荷させ、力学性状の確認を行う。

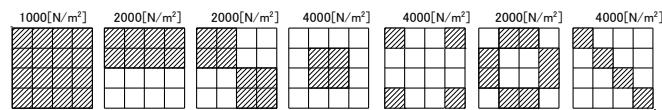


Fig.4.1 偏分布載荷位置

解析条件は前章と同様である。対象モデルは T15\_140、H1\_T15\_120、H2\_T15\_120とする。

偏分布載荷(a)と偏分布載荷(b)で比較すると単位面積当たりの荷重値は等しいけれども、最大主応力・最小主応力の値では偏分布載荷(a)の方が大きな値を示す。また、偏分布載荷(c)の中央部に載荷させたものはどのモデルも圧縮側、引張側ともにほかの載荷方法よりも大きな値を示している。一方、偏分布載荷(d)はどのモデルも圧縮

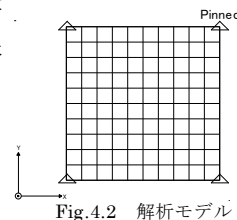


Fig.4.2 解析モデル

側・引張側ともにほかの荷重方法よりも小さな値を示している。また、偏分布荷重(f)に関しては最大主応力では他とは差が見られないが、最小主応力値は比較的抑えられた値が得られた。これらはすべて自重下における変形から説明でき、偏分布荷重(a)は荷重の重心が中心から外れているため形状の変形が進んだため応力が多く表れ、一方偏分布荷重(b)は支持部付近の外側にはらみ出そうとしている変形を少し拘束するような位置に荷重されているので応力が小さく抑えられたと考えられる。それは偏分布荷重(c)・(d)・(f)においても同様で、偏分布荷重(c)は中心部が凹となる変形を促進するような荷重であるため各主応力値が大きな値を示し、偏分布荷重(d)は支持部付近の外側にはらみ出そうとしている変形を完全に抑えようとしている位置に荷重されているので各主応力値が小さな値を示した。偏分布荷重(f)も支持部付近の外側にはらみ出そうとしている変形を少し拘束するような位置に荷重されており、またアーチ効果の見られる形状の対角線上に荷重されているので荷重を受け流しやすかったために等分布荷重よりも値が抑えられたと考えられる。

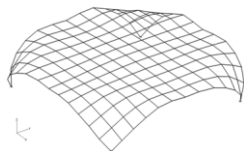


Fig.4.3 自重下変形モード3倍

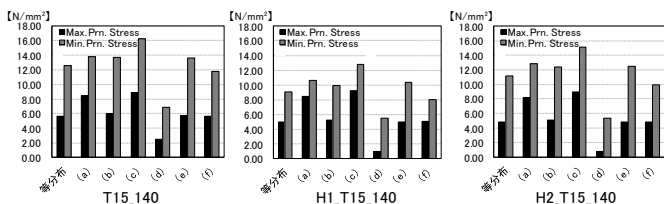


Fig.4.4 各主応力の最高値 ※最小主応力は絶対値

## 4.2 水平力の荷重

Fig.4.5 に示す方向に水平力を荷重させる。今回は水平方向に加速度として  $1.962\text{m/s}^2$  ( $0.2G$ ) を入力した。

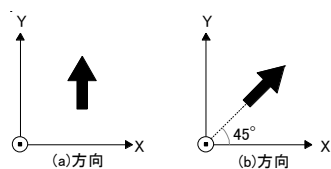


Fig.4.5 水平力の荷重方向

全モデル圧縮側は(a)の方が大きい、引張側は(b)方向の方が大きな値を示している。しかしながら最大曲げモーメント値は(b)方向の方が大きいという結果が得られた。これは水平力の荷重方向にある拘束点の数に影響するものと考えられる。(a)方向の場合は点C・Dの2支点でほぼ荷重を受け持つような形となっているが、(b)方向では点Dの1支点に大きく応力が集まるからである。

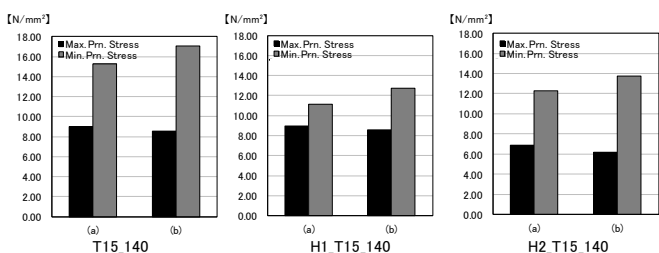


Fig.4.6 各主応力の最高値 ※最小主応力は絶対値

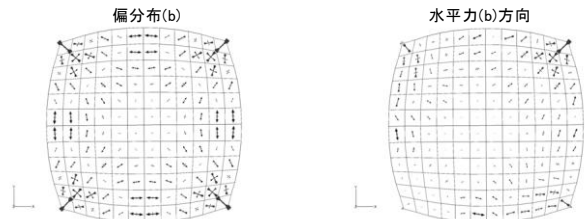


Fig.4.7 主応力線 (裏面)

また偏分布荷重と比較してみると、水平力荷重の方が等分布荷重時と比較して応力線の乱れが見られるため、本手法で作成したモデル水平力に敏感な構造である。

## 4.3 弾性座屈性状

線形座屈解析を行った結果を Fig.2.10 に示す。今回は比較のためにライズ/スパン比の異なる球形シェルを追加することとする。解析条件は3章と同様である。ここではコンクリートの剛性が一定であると仮定したときの値であり、応力度に関する検討ではない。

Table4.1 無次元弾性座屈荷重

Model ID	Dead Weight $P_W$ (kN)	Buckling Load $P_E$ (kN)	$P_E / P_W$	Raise / Span
T15_140	3051	24693	8.09	0.37
H1_T15_120	3095	19827	6.41	0.31
H2_T15_120	3109	17888	5.75	0.25
B_0.37	2418	16247	6.72	0.37
B_0.31	2690	15241	5.67	0.31
B_0.25	2829	13505	4.77	0.25

T15 モデルに関しては、自重の約8倍の弾性座屈荷重を示すが、Hモデルに関しては、H1\_T15\_120は約6.4倍、H2\_T15\_120に関しては約5.8倍とライズ/スパン比が影響している。

また本手法を用いたモデルとライズ・スパン比が同等な球形シェルと比較すると、全てのライズ・スパン比で本手法を用いたモデルの方が大きな弾性座屈荷重を示すことがわかり、本手法を用いたモデルは球形シェルの約1.2倍の無次元弾性荷重  $P_W/P_E$  を示す。これは球このことから本手法の有用性が確認できる。

## 5. さまざまな自由曲面シェルへの適応の検討

### 5.1 自由曲面シェルの作成

#### ■ 正方形—四辺中央部四点支持

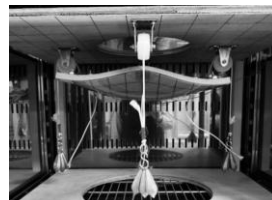


Fig.5.1 実験風景

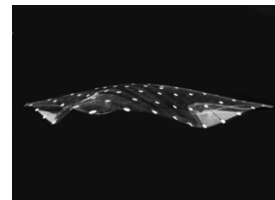


Fig.5.2 モデル写真

#### ■ 開口を有する正方形—四隅ピン支持

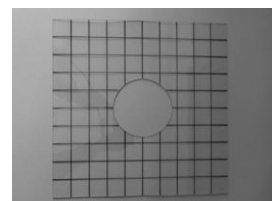


Fig.5.3 母材

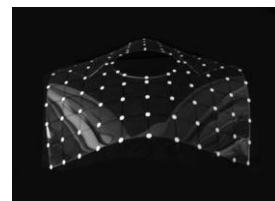


Fig.5.4 モデル写真

## 5.2 自由曲面シェルの設計例

本手法から得られた曲面と実構造物で用いられた曲面を実際に許容応力度設計とを行うことで比較する。実構造物で用いられた曲面にはアルヘシラスの市場（トロハ設計 1933 年）の作成方法を取り入れたが、この構造物には底等が設けられているが、今回はそれらを考慮せず、曲面の形状のみを考える。これを以降「トロハモデル」と呼ぶ。また本手法で作成したモデルをこれ以降「アクリルモデル」と呼ぶこととする。両モデルともスパン 47.6m ライズ 7.0m とする。

Table5.1 実験条件

Condition	Setting
Material	アクリル
Initial Form	正六角形・一辺 150mm
Thickness	1.5mm
Load	312g
Preset Temperature	120°C
React. Force	全体重量の 110%(水平力)

Table5.2 配筋表

Area	アクリルモデル		トロハモデル	
	中心方向	円周方向	中心方向	円周方向
A	@120	@90	@200	@100
	@140	@120	@200	@100
B	—	—	—	—
	@200	@200	—	—

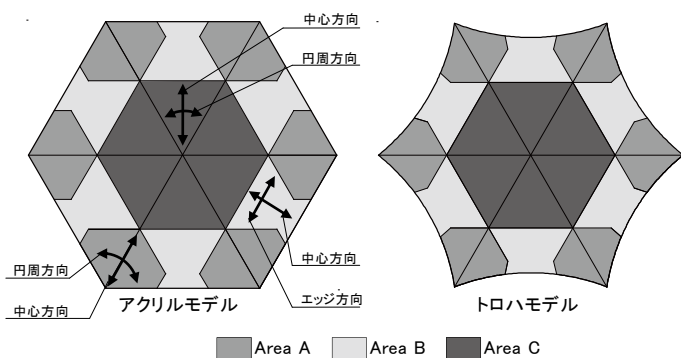


Fig.5.5 配筋の領域と配筋方向

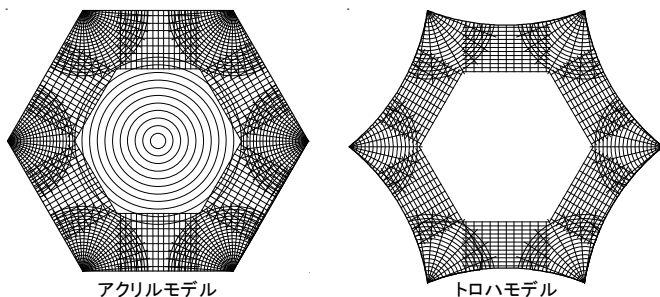


Fig.5.6 配筋イメージ図

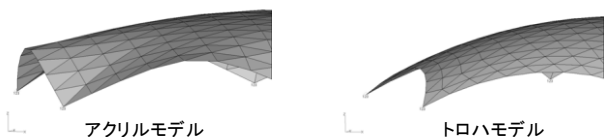


Fig.5.7 支持部付近の形状

アクリルモデルの形状は支持部付近に下に凸な部分が形成されており、その箇所引張が生じるため、その箇所に密な鉄筋が必要である。一方、トロハモデルはもとの形が球形であるために下に凸な箇所は生じずに引張が支持部近傍とエッジ部でしか生じてはいないが、球を切り取った形状であるためにエッジ部分にアクリルモデルよりも大きな引張が生まれ、そこに多くの鉄筋を配する必要がある。またトロハモデルは支持部付近に大きな圧縮応力が生じるので厚みが 0.90m も必要であるのに対し、アクリルモデルは 0.40m の厚みで設計できる。

## 6. 結論

本研究では、実験を重ねることで課題をクリアし、熱可塑性を有するアクリル板に加熱装置で熱を加えて行う吊り下げ実験による形状決定手法を確立した。また、基本的な力学性状の確認や本手法の実構造物への適応検証を行った。以下のフローを示すことによって最終結論としたい。

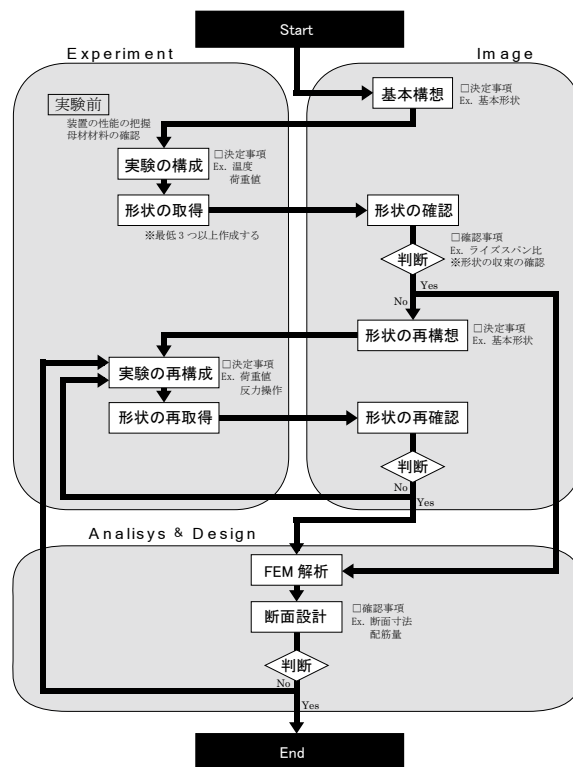


Fig.6.1 自由曲面シェルの形状決定法フロー

### [参考文献]

- BELLES P., ORTEGA N., ROSALES M. and ANDRES O., "Shell Form-Finding : Physical and Numerical Design Tools", *Engineering Structures*, Vol.31,2006,p2656-2666.
- ANDRES O., ORTEGA N. and PALOTO J., "The Homeostatic Model as A Tool for The Design and Analysis of Shell Structures", *Nature and Design*, p.145-156.
- エドゥアルド・トロハ著、川口衛監修解説、IASS2001 組織委員会訳：「エドゥアルド・トロハの構造デザイン」、相模書房、2002年9月10日

## 討 議 等

### ◆討議 [ 建築防災分野 谷池 義人 教授 ]

アクリルの実験の結果からコンクリートシェル形状を求めているが、実験からコンクリートの応力を求めることはできるのか。

◆回答：アクリルの応力からコンクリートの応力をおおよその値であれば推定することはできると考えております。ただし応力解析をせずに実験から直接求めることはできないと考えております。

### ◆討議 [ 建築防災分野 谷池 義人 教授 ]

熱する過程で残留応力は発生しないのか。アクリルとコンクリートでは材料物性値が違うが、そのあたりなど材料の違いのために特別な事項を考慮する必要はないのか。

◆回答：本手法はあくまで形状を求めるための手法でありますので今回特別に残留応力について考慮した点はありません。しかしながら本手法は荷重に対してアクリル自身が自由に変形できるようになっており、応力の大きなところはひずみが生じ、変形することで荷重に対して抵抗しますので、残留応力に関しては考慮する必要はないかと考えます。またアクリルとコンクリートの物性値の違いについてですが、材料間で異なり且つ応力に関わる物性値としてはヤング係数とポアソン比と考えられますが、ヤング係数は外力に対する変形のみに影響を与えるものであり、応力値はポアソン比の影響を受けると考えられます。今回の四点ピン支持の形状では、ポアソン比による大きな応力分布の相違は確認できませんでした。建築で用いる材料のポアソン比は0.2ないし0.4の範囲であり、その範囲では大きく応力分布には影響を与えない、形状のみが応力分布に影響を与えると考えております。

### ◆討議 [ 建築防災分野 谷口 徹郎 准教授 ]

求められている形状とは何なのか。自重下における軸力が主体の形状が良いのか。何を基準に形状を求めるのか。

◆回答：本実験は熱可塑性を有するアクリル板を熱することで面外剛性を小さくして、面外に変形させることで得られた軸力主体の構造を形成するための手法です。ゆえにその形状は面内方向の力が卓越しており、

曲げモーメントの小さな形状です。しかしそれは石膏と布で吊り下げるモデルよりも若干曲げモーメントは大きくなる傾向が見られます。しかしながら石膏を用いた実験では面外剛性を全く持たない布で形状を作成するので、作成できる形状に制約を受けますが、本手法は温度設定を行うことにより、吊り下げ時の面外剛性を調節することができ、ある程度の面外剛性を有する状態のまま吊り下げることが可能です。その本手法の特徴を活かした形状が、5.1節で示した形状です。

### ◆討議 [ 建築防災分野 谷口 徹郎 准教授 ]

面外剛性を有する状態で吊り下げると言ったが、一般的に曲げを小さくするのが良いと言われているのではないのか。この実験では何を指した実験なのか。

◆回答：ある程度の面外剛性を有する状態と言いましたが、基本的には逆転曲面の考え方を利用したもので球形シェルの形状のもの比べると曲げモーメントは小さな値になっていると考えられます。本手法は曲げモーメントの小さい、多様な自由曲面シェルの形成を目的としており、石膏と布を用いた実験だけでは形成できない範囲の形状にも適応できる手法です。また石膏の実験は純圧縮の、材料はコンクリートのみを対象としたものであるが、本手法はある程度の引張も許容でき、RC造や木造を対象とすることができます。

### ◆討議 [ 建築防災分野 谷口 徹郎 准教授 ]

初期形状に依存しているように見えるが、それでいいのか。

◆回答：基本的に支持条件によりおおよその形状は決定されるが、本手法は負荷させる荷重や設定温度によっても形状を調整することができ、それにより意匠設計者の求める形状に対応できると考えられます。