

## Morphological Analysis in Architectural Works of Felix Candela : HP Shell Structure

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-07-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田中, 正史, 吉岡, 涼 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://mu.repo.nii.ac.jp/records/1287">https://mu.repo.nii.ac.jp/records/1287</a>

# F・キャンデラの建築作品における形態分析

## HP シェル構造の形態と開口部形状

### Morphological analysis in architectural works of Felix Candela

#### HP shell structure

田中 正史 \*1 吉岡 涼 \*2  
TANAKA Masafumi\*1 YOSHIOKA Ryo\*2

HP シェル 鉄筋コンクリート FEM 解析  
開口部 構造デザイン

## 1. はじめに

フェリックス・キャンデラは、世界で初めて Hyperbolic Paraboloid Shell (以後、HP シェルと略記) を採用した構造物を建設したエンジニア<sup>1)</sup>である。特に、メキシコを中心に鉄筋コンクリート造によるシェル構造を多数建設している。キャンデラが設計した HP シェル構造の特徴は、HP シェル単体で用いる作品だけでなく、HP シェルを複数組み合わせることで一つの作品を作り上げる点にある。1940年代から始まる実験では、4つの HP シェルを組み合わせることができる傘型 HP シェルの基本システムを完成させ、多数の構造形態の創生に成功してきた。

HP シェルは、凹凸のある曲面が特徴であり、このむくりによって陰影が生じることで、独創的な空間となる。建物形状および屋外と屋内の境界の作り方や光の取り入れ方に特徴が見られる。そこで、本研究では、キャンデラの建築作品における形態的特徴、すなわち開口部の形状と HP シェル構造に着目し、それらの関係に分析を加えることを目的とする。

## 2. 研究の対象と研究方法

本研究をはじめに、既往の参考文献(2-4)より竣工写真または図面が掲載されている作品の中から、建築用途をもつ建築作品に着目した。主な建物用途としては倉

表 1 開口部の定義と形状

定義	開口部の形状
1.半円形	半円形の開口部が有る
2.開口無	開口部が無い
3.円形・正方形	円形又は正方形の開口部が有る
4.ヨコ長	水平方向へ延びる開口部が有る
5.タテ長	垂直方向へ延びる開口部が有る

庫・工場・教会・教育研究施設・商業施設である。これにより 30 作品を研究対象とした。

研究方法としては、研究対象とした建築作品を意匠的な特徴である開口部及び構造的な特徴である HP シェル構造システムについてそれぞれ分類し、考察を加える。

## 3. HP シェル構造の形態と開口部

キャンデラは、様々な形状の開口部を設計している。これら開口部の形状を「半円形」「開口無」「円形・正方形」「ヨコ長」「タテ長」の5つに定義し、表1に示した。

最も特徴的な開口部と言えるのは、「半円形」である。この開口形状は HP シェル曲面を切断した際に現れる断面を利用し、外部に向けて半円形の開口部を有する構成であり、建物の内部には開口部が無い(図1)。そして、開口



図1 ソチミルコのレストラン

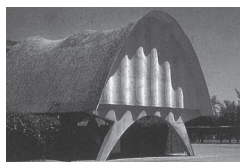


図2 宇宙線研究所



図3 ラ・フロリダ教会



図4 コヨアカン市場



図5 サンタ・モニカ教会



図6 ソレダ礼拝堂



図7 ハイ・ライフ繊維工場



図8 サンタ・モニカ教会



図9 パウル礼拝堂



図10 スポーツ・パレス

\*1 工学部建築デザイン学科 講師

\*2 武蔵野大学大学院環境学研究科 大学院生

部が必要の無い場合、この半円形の開口部を壁で塞ぐことで「開口無」となる（図2）。

「円形・正方形」は、円形の開口を平面中央部に配置し、トップライトとなる開口形状で、それを囲むよう HP シェルを架け渡している（図3）。「ヨコ長」については、主に傘型の HP シェルを並べ、屋根の高さを変化させることにより、水平方向に延びるスリット状の開口形状である（図4）。「タテ長」については、壁や屋根の部位に HP シェルを用いて、隣り合う HP シェルの間に設けた、垂直方向に延びる開口形状である（図5）。

#### 4. HP シェル構造の形態と構造システム

キャンデラは、多様な形状の HP シェルの構造システムを設計している。1つの HP シェルが自立している状態を「自立型」、複数の HP シェルで自立している状態を「連結型」として大きく分けた。さらに、自立型は「自立型・単体」と「自立型・集合」の2種類に区分けし、定義した。次に、連結型は RC の HP シェルのみが連結する場合「連結型 HP+HP」、RC の HP シェルに鉄骨フレームが付加されている場合「連結型 HP+S」、鉄骨フレームのみで HP シェルを生成している場合「連結型 S+S」の3種類に区分けし、定義した。以上を表2に示した。

「自立型・単体」については、建物自体は鉄骨にて支持され、屋根が1枚の HP シェル屋根として、自立している

（図6）。「自立型・集合」については、各傘型の HP シェルが自立してそれらが連続して並べられている（図7）。「連結型 HP+HP」については、複数の HP シェルが屋根と壁に使用されている（図8）。「連結型・HP+S」については、RC の HP シェルが複数あり、鉄骨を付加して、それらを連結することで支え合っている（図9）。「連結型 S+S」は、HP シェルを鉄骨のみで生成している（図10）。

キャンデラの建築作品について、意匠的な特徴である開口部、及び、構造的な特徴である HP シェルの構造システムについて明らかにした。その結果を纏めて表3に示した。（A-1）及び（C-1）では、「自立型・単体」HP シェルの幾何学形状特性を利用して、切断面に現れる半円形の開口部の活用と構造システムが合致する形態と言える。（C-2）では、半円形の開口部に壁を付加した形態である。

（C-3）は主にトップライトのみで、HP シェルをドーム状に架け渡すことで、圧縮場となる屋根頂部を開口部として補強した、非常に合理的な形態である。

次に、（B-4）では、自立した HP シェルを連続させて、列ごとに高低差をつけた形態である。（C-4）及び（D-4）は構造システムの違いだけである。

HP シェル同士の隙間をスチールトラスで補強した（D-5）や、HP シェルを変形させることにより、HP シェルのみで成立した（C-5）は、HP シェルの持つ構造特性に合理的な形態だけでは成立しておらず、構造システム自体に新たな操作を加えることで可能になった形態である。

表2 定義と構造システム

定義	構造システム	
自立型	A 単体	1つのHPシェルが自立している状態
	B 集合	複数のHPシェルがそれぞれ自立している状態
連結型	C HP+HP	RCのHPシェルが複数あり、支え合っている状態
	D HP+S	RCのHPシェルに鉄骨が付加されている状態
	E S+S	複数のHPシェルが鉄骨のみで生成されている状態

#### 5. 宇宙線研究所の形態分析

1951年メキシコ国立大学キャンパス内に、世界で初めて HP シェル構造を採用した宇宙線研究所が建設された<sup>5)</sup>。建築家ホルヘ・ゴンザレス・レイナと構造家フェリックス・キャンデラらによる設計である。

本研究所は、地上2階建ての鉄筋コンクリート造で、1

表3 F・キャンデラの建築作品における形態的特徴

構造システム 開口部の形状	自立型		連結型		
	(A) 単体	(B) 集合	(C) HP+HP	(D) HP+S	(E) S+S
(1)半円形	1955 ソレダ礼拝堂 1957 H・ナイトクラブ 1958 クエルナヴァカの礼拝堂		1957 ソチミルコのレストラン 1959 バカルディの瓶詰め工場 1959 H・劇場とレストラン 1962 ボタニカル大学の庭園東屋 1964 ミラグロサ教会 1965 ラ・フロリダ教会		
(2)無開口		1951 宇宙線研究所	1953 株式取引所		
(3)円形・正方形			1958 アルバニコス広場の売店 1965 ラ・フロリダ教会		1968 スポーツ・パレス
(4)ヨコ長	1955 ダンス教室	1954 リオの倉庫 1954 ハイ・ライフ繊維工場 1955 コヨアカン市場 1955 セレスティノ倉庫 1956 ハマイカ市場 1968 キャンデリア駅	1953 セダス・パリジナ工場 1961 ヴェラクルス倉庫 1964 ナショナル倉庫	1953 メキシコ税関倉庫	
(5)タテ長			1959 バカルディの瓶詰め工場 1960 サンタ・モニカ教会	1956 S・A・ウェルタス教会 1959 サン・ホセ・オブレロ教会 1959 S・V・デ・パウル礼拝堂 1961 サン・ベトロ殉教者教会 1961 N・グアダルベ教会	

階はピロティ形式で地面から持ち上げられ、2階に上る階段のみがある。2階は実験室、人工気候室およびロビーの構成となっている。平面の大きさは短辺 10.75m × 長辺 12m、建物の最高高さは 8.2m である (図 11, 12)。

最初に、宇宙線の観測において必要条件を整理するため、宇宙線観測の研究者 2 名にヒアリング調査を実施した。観測対象の宇宙線は、太陽中性子と呼ばれ、太陽フレア等の爆発現象によりエネルギーを得て加速した粒子が大気中の粒子と衝突することで生まれる中性子である。この中性子から放出されるエネルギー量を観測することにより、太陽の起源を推定することができる。一般的に、宇宙線の観測において、検出器の上部には何も無い状態が望ましいとされている。

F・キャンデラが屋根スラブをヴォールト形状から HP シェル形状に変更した理由として、中性子を遮断するコンクリートの厚さを極限まで薄くするために、屋根の構造形式を採用したと説明されている。しかしながら、中性子の特徴に基づき、分析を行うとコンクリートスラブの厚さが中性子を遮断しているのではなく、コンクリート内部に存在する水の分子が問題であると考えられる。この理由として、中性子は質量の近い水素原子核と衝突することにより、減衰したエネルギーを検出器で計測しているからである。これは、飛騨にあるカミオカンデの減衰材として利用されている巨大貯水槽の実例からも明らかである。

更に、建物の配置と屋根について考察する。図 11 に示す通り、3つのアーチは南北方向に 4.85m 間隔で並んでいる。そのアーチの間に HP シェルを架け渡して屋根を形成している。即ち、観測対象である中性子は、太陽活動に由来するため、観測する時刻によって屋根の上を移動すると考えられる。太陽の軌跡は、東から西であるから、アーチとアーチの間にある HP シェルを通過するように計画され、観測条件が均一となるように設計されていることが明らかになった。

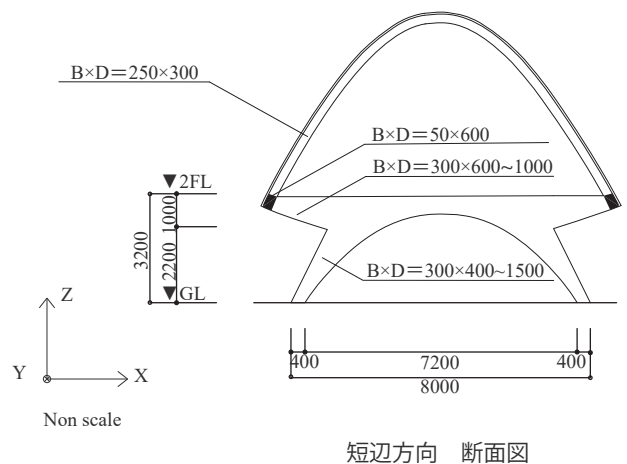
続いて、構造解析を用いた形態分析を行う。部材に生じる応力は、汎用解析プログラム (Midas iGen) を用いた弾性応力解析により求めた。使用した材料定数は、コンクリートのヤング係数  $E(20\text{kN/mm}^2)$ 、ポアソン比  $\nu (=0.16)$  と設

定した。そして、部材のモデル化について、屋根面のスラブは板要素を、2階のアーチは梁要素を、1階のアーチと片持ち梁はソリッド要素を適用した。これらの部材断面を図 12 に示す。荷重条件は、重力加速度  $g(=9.80665\text{m/s}^2)$  を鉛直方向 (Z 方向) へ与えた。支持方法は直接基礎のため、1階のアーチ端部をピン支持として節点を拘束した。

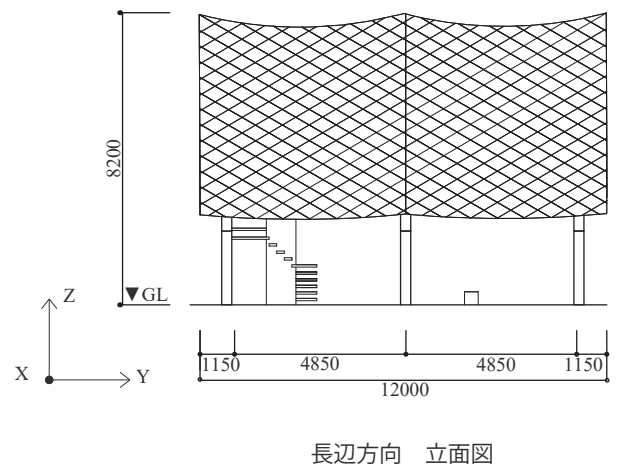
図 13 には、解析結果の応力図を示した。通常、アーチの応力度分布では、圧縮場が支配的となり軸力によって建物の荷重を基礎へ伝達すると考えられるが、アーチ上部の範囲に応力度が生じていないことが確認できる。

この理由について考察を加える。屋根荷重は、HP シェルスラブから屋根のアーチに荷重が伝達される。このとき、屋根のアーチ端部には、水平スラストが生じるため、外側方向に開こうとする力が発生する。即ち、2階の梁に初期張力が与えられ、1階のアーチ上部の圧縮力が打ち消し合うためであると考えられる。以上のように、構造形態において、最も力の伝達効率を高めることで生じる影響を示した。

宇宙線研究所の形態と機能に着目し、それらの関係から構造デザインに及ぼす影響について考察した。



短辺方向 断面図



長辺方向 立面図

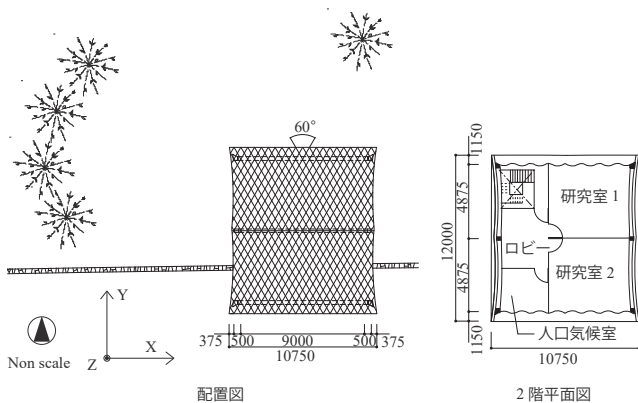


図 11 宇宙線研究所の配置図と平面図

図 12 断面図と立面図

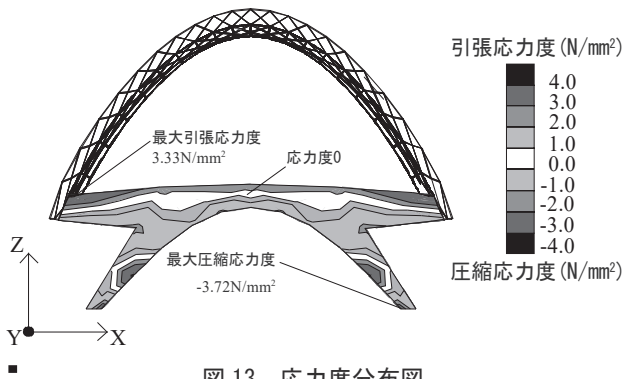


図 13 応力度分布図

HP シェルスラブは、宇宙線の中性子観測において、断面の大きな部材が遮らないように、太陽の軌跡に基づきスラブを 1 方向に架け渡していることを明らかにした。

構造形態において、最も力の伝達効率を高めることで生じる影響を示した。1 階のアーチ構造は圧縮力が支配的ではなく、屋根のアーチによってスラストが生じ応力が打ち消し合うため、断面を小さくすることが可能となる。

## 6. まとめ

本研究では、キャンデラの建築作品における形態的特

徴、すなわち開口部の形状と HP シェル構造に着目し、それらの関係について考察したことで、キャンデラの建築作品に見られる形態的特徴の一端を明らかにした。

## 謝辞

本研究の実施に際し、大成建設株式会社の出川彩純氏に協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) Enrique x. de anda alanis: Candela, Taschen gmbh, 2008. 10
- 2) 齋藤裕 : Felix Candela, TOTO 出版, 1995.08
- 3) Garlock and Billington: Felix Candela Engineer, Builder, Structural Artist, Princeton University Art Museum in association with Yale University Press, 2008.10
- 4) 坪井善勝, 木村俊彦 : P・ネルヴィ F・キャンデラ, 美術出版社, 1974.03
- 5) K. Maria e.m.g, Dp. billington: Structural Analysis of thesmic rays, laboratory, journal of the international association for shell and spatial structures, vol.51(2010), No.1, pp. 18-23, March n.163