

# 環境に則した建築形状の設計

## — 温泉施設での提案 —

### Keywords

E2CA CFD 温泉施設  
環境シミュレーション 結露

DZ20696 鳥海 尊

### 1. 研究の背景

E2CAは Environmental Engineering Configured Architecture の略である。この考えを念頭に置いて、環境に適応した人間に優しい建築を環境性能の立場から考えてみる。

### 2. 研究の目的

本研究では、3つの特徴的な形状を持つ建築物を詳細に解析し、その結果に基づいた新たな施設を計画するプロセスを検討することが目的である。特定の建築物の形状だけでなく、環境に優しい要素にも焦点を当てることが不可欠である。

人間に優しい建築を実現するには、形状だけでなく様々な側面を考慮する必要がある、その中には環境に配慮した建材の使用、断熱性能の向上、再生可能エネルギーの効果的な活用、自然光の最大化などが含まれる。全ての要素を同時に考慮するのは難しいため、ここでは効果的な研究を行うためにいくつかの要素を省き、特定の要素に焦点を当てて作業を進める。

### 3. E2CAとは

#### 3.1 E2CAの考え方

建築物の計画を行う際、通常は敷地の面積、建ぺい率、容積率をベースに全体の延床面積を算定し、そこに建築計画的な観点、あるいは意匠的な観点からプランニングを行う。またそれと同時に、窓などの3次元的な要素を加えて行く。これらの要素を考慮し、構造計画を行い、必要となる柱のスパン、その太さ、スラブの厚みなどを決定していく。これらの作業により、建築計画の概略が決まった段階で、空調負荷計算、換気計算などを行い、そこから建築設備を決定し、また同時に意匠設計者に対して必要となる断熱材の厚さなどを要求していく場合が多い。設備設計についても、基本的にはあまり自然状態に頼らず、機械空調・機械換気などを中心に考える場合が多い。

こういったプロセスでも十分に機能する建築物を設計する事は可能であり、実際大きな支障は無い。そのため通常このプロセスを辿る訳だが、逆に建築環境的な見地から見ると、「既に用意されている箱の中に環境要素を付け加えていく」といった様相となり、本来建築が持

っているはずの「風土や気候に根差した形」からは程遠いものとなりがちである。

これが現代の建築物が、「どこに建っているものかが分からない。あるいはどこに建てても同じ」といった批判にもつながり、また実際、その場所性というもののかなりの部分が無視されがちな傾向を築くことになる。

我々が提唱するE2CAは、日本語に直訳すると「環境工学によって形作られた建築」という事になる。これは文字通り、環境工学的な視点から建築計画を行うものである。特に対象建築物の形状が決定されていく際に、「建築環境工学的な合理性」から入っていく、という考え方である。具体的には、その土地での季節ごとの太陽位置、卓越風の方向、気温・湿度の変動といった要素を起点として建築を形作っていくプロセスを踏襲する。

#### 3.2 建築工学における考え方

こういった考え方は、機械工学ではむしろ「当たり前」なものである。まず要求されるスペックがあり、それに合わせてモノを作っていくという、もの作りの基本が忠実に守られているだけの事である。それが例え、自動車を代表とする輸送機械においても、大きさやエンジンのサイズといった様々な制約事項がありながらもあくまで要求されるスペックが中心的な課題である。そこにカーデザインという意匠的な要素も大きく取り入れられるが、基本はあくまでスペックである。デザインを優先するために、ヘッドライトが省略されたり、搭載するエンジンのサイズが変わったりする訳では無い。むしろそのような要求される要素を全て取り込む事を前提にデザインプロセスが行われていく。

一番顕著に表れるのが航空機であろう。航空機は空を飛ぶことが前提であるが、効率よく空を飛ぶためには完全に「流体力学」に沿って形作られていく事となり、デザイナーが関与する領域は極めて小さい。主翼の形は最も効率よく揚力を発生させるものであり、胴体の形は最も空気抵抗が少ない形となる。

#### 3.3 パッシブソーラーの限界

E2CAの考え方は決して目新しいものではない。かつて「パッシブソーラー」と呼ばれる一連の建築物があった。1970～80年代に提唱されたもので、建築の形態や各要素の設計の際に、環境工学的要素、温熱環境の形成と省エネルギー化が中心的な課題であった。その後、あまり提

唱されなくなった理由として、当時の技術では詳細な計算に限界があり、また実測においても単純に温度・湿度等に留まることが多かった。

その一方、現在ではCFDの技術の進歩が目覚ましく、実際に建設する前に非常に多くのテストモデルの解析が出来る。またCFDを使う事で、正確に計測する事が難しい圧力（気圧）や水分量（湿度）の把握が出来る。また室内に形成される気流場も事前に予測する事が可能であるため、技術的には大きなアドバンテージになる。

更に加えて、近年のPCは極めて高性能であり解析が比較的簡単に行える様になった、というのも重要な要素である。これらの状況を踏まえて、今一度「環境工学によって形作られた建築」を提唱していきたい。

#### 4. 先行解析

##### 4.1 調査概要

3つの特徴的な形状を持つ建築物として、パンテオン（ローマ）、トゥルッリ（アルペロベッコ）、東京ジャーミイ（代々木上原）の解析モデルを作成し、環境シミュレーションを行う。2022年の1年で気温が一番暑い日（夏）と一番寒い日（冬）にそれぞれ解析を行なった。

##### 4.2 資料の取得

本研究では、図面や気候データを入手することにより、4つの建築物のモデル制作において調査と準備を行い、それぞれの建築物が立地する環境における気候条件を徹底的に把握した。

##### 4.3 モデル制作

本研究では、建築物のモデルを GRAPHISOFT 社 ArchiCAD を用いて作成し、それを HEXAGON 社 CradleCFDに取り込む。ArchiCADでは作成したモデルを stlファイルで保存し、CFD側でstlファイルをインポートする作業を行なった。図3にパンテオンのCADモデルとCFDモデルを具体例として示す。

##### 4.4 解析条件

本研究では、気象条件を考慮した解析を行うために、Weather Spark<sup>1)</sup>、timeanddate<sup>2)</sup>から得られた気温、風量、風向、湿度のデータを引用した。これらの条件を1時間ごとにCFDモデルに組み込むことで現実的な解析が可能となった。また解析をするにあたって解析範囲を決めることも重要である。対象建築に影響を及ぼす範囲までの地形や周辺建物を解析条件に入れた。

具体例として図1にローマの風速（夏冬）を示す。また表1に共通する基本の解析条件、表2にローマの日射条件を例に示す。

##### 4.5 解析結果・考察

一例として温度、風速、表面温度を解析し、すべての結果の中からパンテオンでの温度の解析結果を抜粋する。図4にパンテオンの冬の温度を示した。

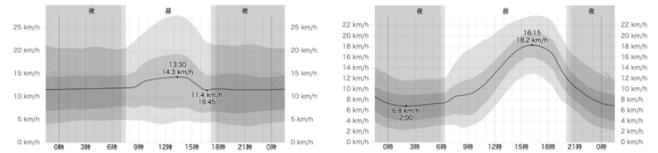


図1 ローマの風速（夏冬）

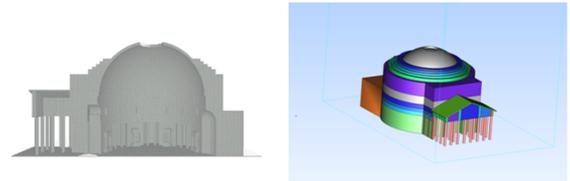


図3 パンテオンCADモデルとCFDモデル

表1 基本の解析条件

定常/非定常	非定常解析
解析時間	24 時間
気流条件	乱流
乱流条件	標準 k-ε
要素数	93,744

表2 ローマ 日射

タイプ	ASHRAE ハンドブック (2013)
地域	Italy
地点	ROMA FIUMICINO[44]
緯度	41.8
経度	12.23
標準時の緯度	15

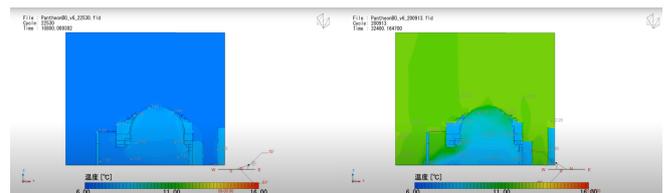


図4 パンテオン 温度 冬（左9:00、右15:00）

パンテオンの朝と昼の温度を比べると、朝に冷えた空気が室内に滞り、昼の時間で外気が温められても室内の空気は冷えたままであることがわかる。ドームの頂点に開口部があるが暖かい空気は逃げ出さないことが考えられる。

#### 5. 設計案の提案までの流れ

##### 5.1 施設の選定

E2CAの検討例となる対象施設を選択する。その一つの例として温泉を含む浴室環境を対象にした。この施設を選定した理由は、温度、湿度、気流といった一般的な環境要因に加えて、結露の問題が発生した場合において

も、事例解析で示された特徴的な形状が環境性能の向上にどのような意味を持つのかを詳細に調査したいという考えに基づく。

## 5.2 事例解析との関連性

設計案の提案を行う前に参考とする研究を用意した。事例解析から結果を設計案の提案に活かすまでの道のりを示す必要があり、事例解析に先に挙げたパンテオンを含む3つの西洋建築物の解析を行い、のちに温泉施設の提案を選択した例をまとめる。

事例解析の建築物は天井が存在せず、その代わりに屋根が室内の上部の役割を果たしていることが挙げられる。一方で、現代の建築において解析をする際、屋根と別に天井が設けられることが多く、浴室環境においては太陽からの直接的な熱の影響を評価することは困難であると判断した。この理由から、初めの段階では日射からの表面温度の影響を考慮しない方針を取る。そして事例解析の考察結果を参考にして、天井の形状を中心に室内環境を変え、温度、湿度、結露（固体面の結露のみ）を中心に解析を行う。

## 5.3 建築計画のプロセス

新たな設計案を検討するプロセスは、スタディ・解析条件などの検討を繰り返すことである。その中で環境性能の向上が不十分である可能性も加味し、その不足部分を特定し改善の余地を見出しながら計画を進める。

## 6. 一般的な浴室の解析

### 6.1 事例概要

初めに、温泉施設を含む浴室環境の解析を進めるには、一般的な家庭の浴室に焦点を当てることが不可欠である。この段階において、家庭用の浴室を考察することは一般的な環境条件や特性について理解を深めることが必要であると考えられる。

### 6.2 解析条件

図8に解析対象である一般的な浴室のCFDモデルを示す。モデルの要素として、浴室、ドア、窓がある。お湯の水温は43℃である。解析領域を壁とし、壁の材質は着目しないこととする。

### 6.3 解析結果・考察

図9に一般的な浴室の解析結果である温度、図10に相対湿度、図11に結露量を示す。図9より高い温度は上昇気流を生み出し、その動きによって室内では天井付近に暖かい空気が滞留し、下には冷たい空気が溜まる。図10では、湯面の相対湿度が低いことが確認されている。温度が低くなると、同じ水蒸気の量でもその空気が保持できる水蒸気の量が減少し、相対湿度が上昇する。逆に、温度が上がると、同じ水蒸気の量でも保持できる水蒸気の量が増加し、相対湿度が低下する。

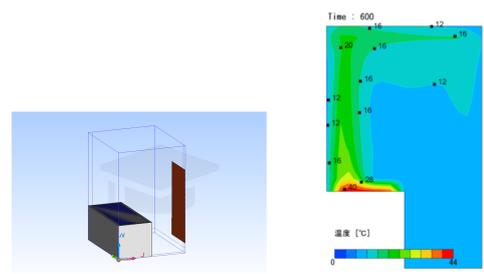


図8 一般的な浴室のモデル 図9 一般的な浴室 温度

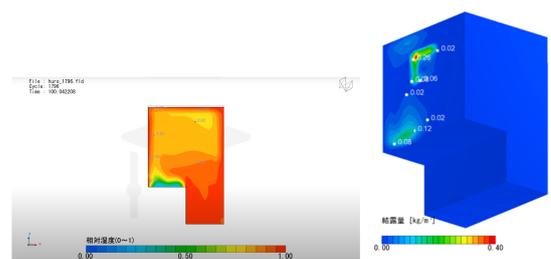


図10 一般的な浴室 相対湿度（左） 結露量（右）

表3 一般的な浴室 概要

居室面積	5,632[m <sup>2</sup> ]
天井高	2.2[m]
窓面積	0.16[m <sup>2</sup> ]
ドア面積	1.19[m <sup>2</sup> ]

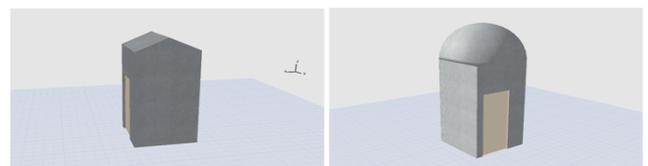


図12 切妻（左）とドームの解析モデル

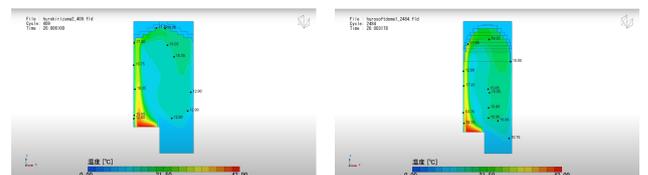


図13 切妻（左）とドーム（右）の温度比較

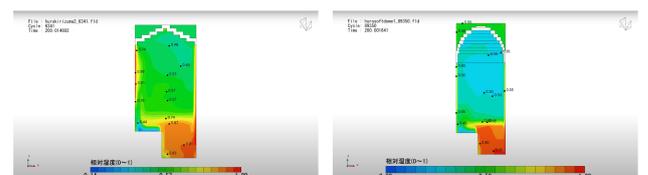


図14 切妻（左）とドーム（右）の相対湿度比較

図11からは、窓の1点の結露量が $0.26\text{kg}/\text{m}^2$ で最大であることが分かる。窓は冬の外気の影響で表面温度が低くなり、相対湿度が100%で、かつ温度が低い面の二つの要素が揃うと、結露量が大きくなることとがわかる。

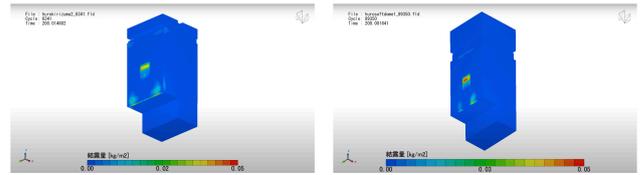


図15 切妻（左）とドーム（右）の結露量比較

## 7. 浴室の形状と快適性

温泉施設の設計案を考えるにあたって一般的な立方体の浴室の他に切妻、ドームの屋根形状を変えた2つのスタディを解析する。図12に切妻とドームの解析モデル、そして一部の結果を抜粋して図13に切妻とドームの温度比較、図14に相対湿度比較、図15に結露量比較を示す。

図13よりドームは切妻より温度が足元まで循環していることがわかる。切妻の空気中の最高温度は約 $28^\circ\text{C}$ とドームより高いが足元まで温度の高い空気が循環していない。図15より切妻は屋根と壁の隅、浴槽と壁の隅で結露量は大きいことがわかる。

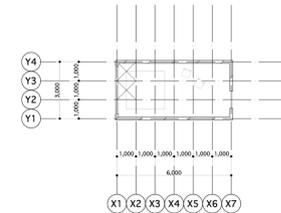


図16 温泉施設 平面図

## 8. 温泉施設の解析

### 8.1 解析概要

一般的な浴室の3倍程度の大きさを持つ温泉施設の設計案を検討した。一般的な浴室と異なる点は浴室空間にリラックスできる空間があることである。温泉施設の種類の多岐にわたる中、今回は様々な建築に適應できるようなユニットの空間を作成すること、将来的な他の建築プロジェクトにもこのユニットの空間を容易に組み込むことを目的とする。

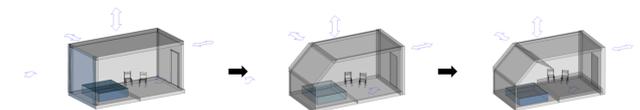


図17 温泉施設のスタディ

### 8.2 共通の解析条件

図16に温泉施設の平面図を示す。今回は平面図を共通のものにし、他の要素を変えることでより良い設計案を考える。外気温は $10^\circ\text{C}$ 、個体初期温度も $10^\circ\text{C}$ に設定し、外壁はコンクリートとした。

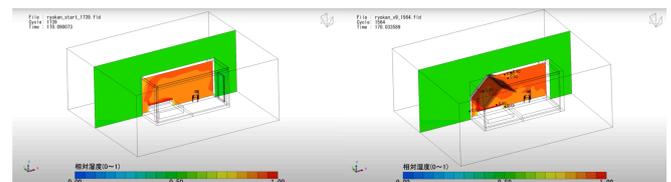


図18 第一案 第三案 相対湿度比較図

### 8.3 モデルのスタディ案

図17にモデルのスタディを示す。試行錯誤を繰り返し、少しずつ形状を変化させ解析をする。まずは立方体の形状からスタートし、湯面上の天井を斜めにしたもの、湯面の床を低くし、椅子のあるリラックス空間の床を高くしたものまでスタディ案を検討した。

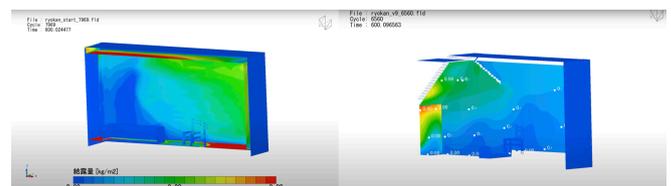


図18 第一案 第三案 結露量比較図

## 9. 温泉施設の解析結果及び検討

E2CAの考え方に沿って検討した結果、図18に第一案と第三案の相対湿度比較図、図19に結露量比較図を示す。ここでは室内容積が異なるために一概には比べられない面もあることが前提となる。図18より、水面の上部の天井を斜めにするによって水蒸気の流線が明確にされたと考えられる。立方体の場合は左壁と浴槽の間の温度、相対湿度が共に高くなっている。結露は水蒸気の通り道である左の壁、水面上部の天井に多く生じる。そのため

に天井を斜めにし、床と天井の距離を近くすることは結露の水分を拭き取りやすいという利点がある。湯面の水蒸気が循環し、時間が経った後には上に暖かい空気、下に冷たい空気と層が分かれるため、このケースにおいてはモデルごとに大きな差は得られなかった。

## 10. 今後の課題

E2CAの考えに基づいた温泉施設の解析では、気候の条件を詳細に付け加える、材質を変化させるなどが必要になる。換気をした場合の風の導線についても解析し、室内が隅々まで乾燥しうるか検討することも課題である。

### 参考文献

- 1) Weather Spark, <https://ja.weatherspark.com/>
- 2) timeanddate, <https://www.timeanddate.com/>