

建築形態と構造形態

Architectural Form vs. Structural Form

大崎 純

建築の構造合理と美しさ

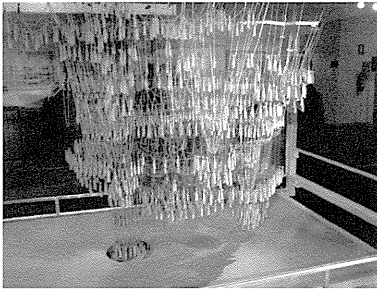


写真1： 吊り下げ曲面

(サグラダファミリア・ガウディ博物館, 著者撮影)

建築の形態と構造性能の関係については、古くから議論されてきた。日本で最初の構造デザイナーといえる坪井善勝は、「真の美は、構造的合理性の近傍にある」と言っている¹。構造表現主義にみられるような構造的に合理的な建築が必ずしも美しいとは限らない（少し異なる）という意味である。また、国際シェル空間構造学会(IASS)の創設者であるエドゥアルド・トロハは、内部の構造の健全な形が、ある程度までは建物の美的価値に貢献し、「見せる構造は、美しくなければならない」と言っている²。このように、構造的に合理的な形態と建築的に美しい形態は少し異なると考えられている。しかし、最近になって、力学原理や構造的合理性に基づいた建築デザインが多くみられるようになった。

力学的に優れた形態

写真1のような解析的に（数式で）表現されるカテナリーや吊り下げ曲面は、自重に対して引張り力のみで抵抗できる力学的に優れた形態である。したがって、カテナリーを上下反転させたカテナリーアーチは、自重に対してほとんど曲げを生じず、圧縮力のみによって抵抗することができる。曲げが存在しないと、アーチの至るところで圧縮応力が作用し、その最大値も小さくなるので、カテナリーアーチは自重に対して力学的に優れた形態といえる。とくに、組積造のように引張を許容しない材料を用いる場合には有効である。

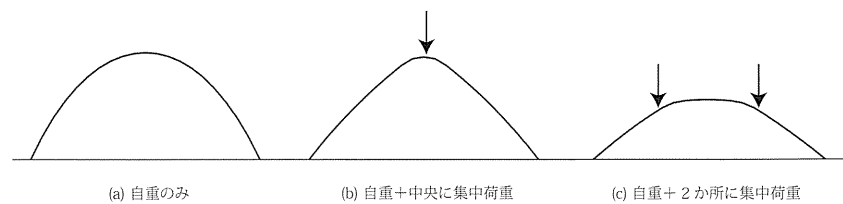


図1： さまざまな荷重条件でのアーチの最適形状

カテナリーアーチは、自重に対するひずみエネルギーを最小化することにより、図1(a)のように数値的に求めることもできる³。しかし、当然であるが、アーチの最適な形状は荷重条件に依存する。自重に加えて中央に集中荷重を作用させると、最適形状は図1(b)のようになり、2か所に集中荷重を作用させると図1(c)のようになる。周辺をピン支持されたシェル構造でも同様に、自重に対してひずみエネルギーを最小化すると図2(a)のようになり、中央に集中荷重を加えると図2(b)のようになる。以上のように、最適な形態は荷重に依存するので、荷重条件を省いて「力学的に最適な形態」と称するのは極めて不適切である。

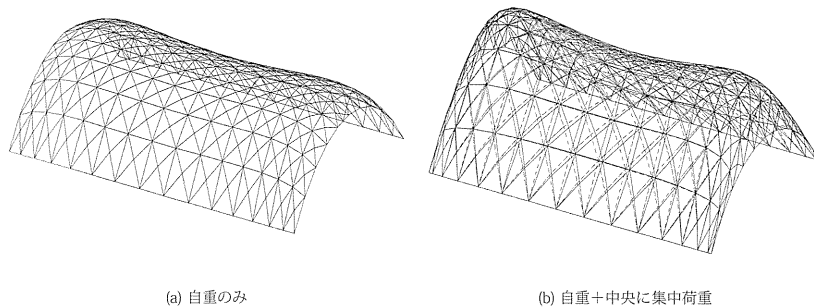


図2： さまざまな荷重条件でのシェル最適形状

一方、図3のような線織面は、直線を移動させて形成される曲面であり、施工性も考慮すると優れた形態である⁴。曲面を骨組で形成する場合には、直線部材を剛性の大きい梁部材として、荷重を妻面のアーチに伝えることができる。コンクリートシェルの場合には、いわゆる自由曲面よりは型枠制作のためのコストを低減できる。

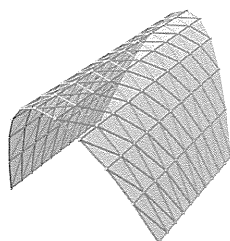


図3： 線織面シェルの例

最近になって、複雑な形状を有する建築が増えている。その理由としては、

- ・他の建築とは異なる象徴的なデザインを希望するクライアントの増加
- ・FRP、繊維補強コンクリートなどの材料の進化
- ・コンピュータ制御による施工技術の発展

などが挙げられる。将来は3Dプリンターやレーザーカッターによって生産・施工できる時代が来るかもしれない。しかし、建築家が希望するあらゆる形態の建築の設計・施工が可能になった現代において、建築形態と構造形態（構造的に優れた形態）との関係を、改めて考え直す必要がある。

設計と最適化

traverse13⁵で述べたように、設計者の意思決定過程を、何らかの評価指標を最大化する過程として数式あるいはアルゴリズムで表現できるならば、設計問題は最適化問題として定式化できる。しかし、以下のような理由で、単純な最適化問題として定式化することは事実上不可能である。

- ・設計過程を最適化問題として定式化したいと思っている建築家は稀である。したがって、何らかの明示的な問題として建築家に受け入れられる可能性は低い。
- ・設計行為は最初から確定論的に決まるのではなく、設計過程を通じて修正されるので、確定的な最適化問題として定式化できない。

しかし、最近のデザインコンセプトや、建築家のインタビューなどで、「最適」あるいはそれに準ずる言葉が多くみられるようになった。学問的には、「最適解」とは、数理計画問題として定式化される問題の解である。一方、「最適」は日常用語の一つであることも事実なので、「最適」という用語は極めて多様に解釈される。専門用語として解釈した人にとっては、初期コスト、ライフサイクルコスト、耐震性能、エネルギー効率などを定量化して最適化したと理解され、日常用語として解釈した人にとっては、美しさ、快適性、機能性などの面で優れた解としてあいまいに理解される。したがって、建築家は「最適」を安易に（後付けで）用いずに、どのような評価指標のもとで最適と言っているのか、明確に説明するのが望ましい。

構造物の最適化は、主に機械工学と航空工学の分野で発展してきた。自動車や航空機は軽量化が重要であるため、構造最適化は必要不可欠な技術である。一方、建築の分野での膜構造やケーブル構造などの張力構造は、釣合形状を求めするためにエネルギー最小原理や面積最小原理（極小曲面）が用いられ、張力構造の形状設計を、構造形態創生（Structural Morphology）とよんでいる⁶。

力学モデル

構造形態創生の手法の中に、「力学モデルに基づく手法」がある。例えば、3次元CADのソフトウェアRhinoのツールであるGrasshopper、Kangarooなどを用いて、いわゆる力学モデルにより、建築の形態を生成できる。とくに、ケーブル構造や膜構造などの張力構造や、シェル構造などの大スパン構造を対象として、力学モデルを用いてさまざまな形態を見出す試みがなされている。しかし、「力学モデル」は、力学的に最適なモデルという意味ではないことに注意しないとイケない。生物の成長や、自然現象を模擬した手法についても同様であり⁷、これらは新しい形態を見出すためのツールであると考えべきである。

例えば、図4のようなテンセグリティ・タワー（tensegrity tower）の釣合形状を求め^{8,9}。張力構造の設計にはいろいろな方法が存在するが、部材の自然長を与えて非線形解析を行う方法がもっとも簡明である。このような方法は、力学モデルに分類される。しかし、釣合形状を求める際に用いる材料は、実際の材料とは異なってもよく、構造モデルは実際の力学特性をモデル化したものではない。図5のような仮想の材料特性を、

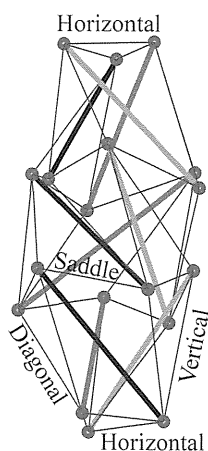


図4： テンセグリティ・タワーの部材配置

図4に示した vertical cable の1つの列に与えて、20層のタワーの釣合形状を求めた。Case 1、2、3で示した線形材料、硬化材料、劣化材料の結果を図6(a)、(b)、(c)にそれぞれ示す。このように、いわゆる力学モデルを用いて、さまざまな釣合形状を求めることができる。ただし、設定条件が望ましくない場合は、釣合い条件を満たす形状は不安定で実現不可能となることに注意しなければならない。すなわち、「力学モデル」を用いてさまざまな形態を生成する際には、力学的知識が必要不可欠である。

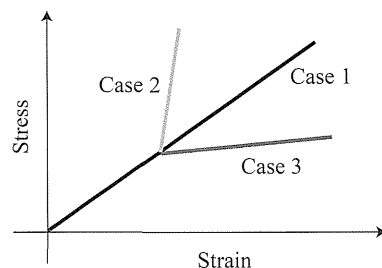


図5： 仮想の材料の応力ひずみ関係

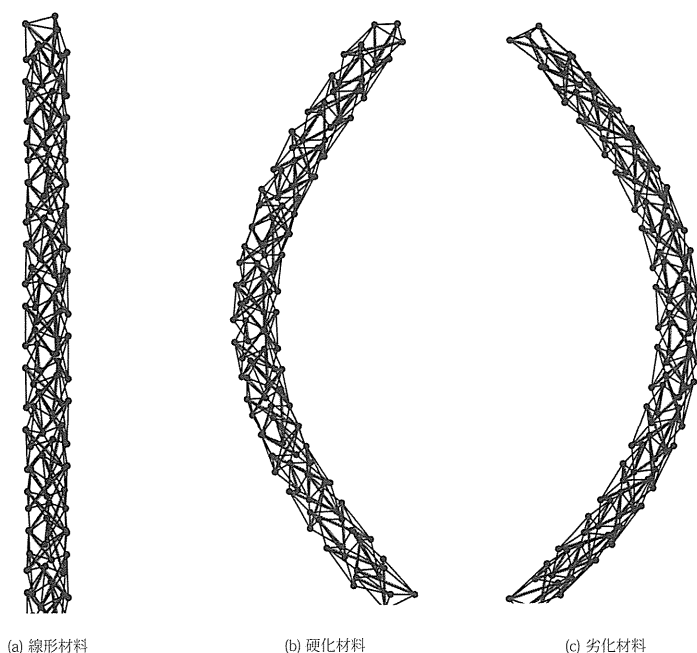


図6： テンセグリティ構造の釣合形状

力学モデルによる設計手法は、「アルゴリズムによるデザイン（アルゴリズムックデザイン）」の一つともいえる^{10,11}。アルゴリズムによって形態を生成する際には、全くランダムな試行では意味のある形態が得られないので、部材配置の均一性や不均一性、形状の複雑さ、実際の荷重とは異なる形態制御のための荷重に対する剛性など、何らかの指標を最小化あるいは最大化するのが望ましい。したがって、アルゴリズムックデザインは最適化と密接に関連している。しかし、設計過程は単なる最適化ではないので、「準最適解」や「高適化」のような用語が生み出され、その解釈にさまざまな誤解が生じる可能性がある。

建築を設計する際には、自重、地震荷重、風荷重などのさまざまな荷重が考慮される。建築の形態が、これらの荷重とは無関係な荷重を想定した力学モデルやアルゴリズムによってデザインされると、不要なコストやリスクの増加につながることを、クライアントに明確に説明するのが望ましい。

建築の公共性

コンピュータを利用することにより、斬新な形状の構造を容易に設計することができる。しかし、建築は単体で評価されるものではないことを注意しなければならない。チャールズ皇太子が、ロンドンの景観を破壊する建築家を批判したように¹²、奇抜な設計が景観の調和を失わせるようなことがあってはならない。建物の保存という意味では、地震リスクの低い国と日本では同等の議論はできないが、建築の公共性という意味では、諸外国から学ぶべきことは多く存在する。建築家と構造家は、決して個人の名声のために奇抜な設計を行ってはならず、社会的責任を負っていることを十分に留意しなければならない。しかし、いかなるデザインにも賛否はつきものであり、その意味では、建築のデザインには「最適」という言葉を使うべきではないかもしれない。

参考文献

1. 坪井善昭 他, 『広さ・長さ・高さの構造デザイン』, 建築技術, p. 125, 2007.
2. エドワード・トロハ 著, 川口 衛 監修, IASS 2001 組織委員会 訳, 『エドワード・トロハの構造デザイン』, 相模書房, p. 201, 2002.
3. 坪井義昭 他, 『力学・素材・構造デザイン』, 「5章: 経験的造形と最適形状」, 建築技術, 2012.
4. 関 和也, 大崎 純, 藤田慎之輔, 「線織面を有するラチスシェルの形状最適化」, 『日本建築学会中国支部研究報告集』, Vol. 37, pp. 81-84, Paper No. 210, 2014.
5. 大崎 純, 「建築デザインの数理的的手法」, 『traverse 13. 新建築学研究, Kyoto University Architectural Journal』, pp. 65-68, 2012.
6. Structural Morphology Group, Int. Assoc. Shell & Spatial Struct, <http://structuralmorphology.org/>
7. 日本建築学会 編, 『建築形態と力学的感性』, 丸善, 2014.
8. 藤田直人, 大崎 純, 張 景耀, 「ひずみエネルギー最小化による安定性を考慮したテンセグリティの自己釣合形状決定法」, 『コロキウム構造形態の解析と創生 2013』, 日本建築学会, pp. 107-110, 2013.
9. M. Ohsaki, J. Y. Zhang and T. Taguchi, Form-finding and stability analysis of tensegrity structures using nonlinear programming and fictitious material properties. Proc. 5th Int. Conf. on Computational Mechanics (ICCM2014), Cambridge, UK, Paper No. 89, 2014.
10. 「アルゴリズム的思考と建築の「新しいリアル」」, 『10+1』, No. 48, 2007.
11. 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.
12. 五十嵐太郎, 「チャールズ、チャールズ・ポスト・モダンの折衷主義と保守主義」, 『10+1』, No. 16, 1999.