建築デザインの数理的手法

Mathematical approach to Architectural design

大崎 純

Makoto Ohsaki

1. 数理的手法によるデザインの可能性

「デザイン(設計)」は,工学の諸分野では建築の「構造設計」にあたるものを意味することが多い。欧米では「designer」は工学者に含まれ，日本での建築意匠設計のデザイナーは「architect」とよばれる。工学のデザインを対象とするならば，デザインの行為は定量化可能な設計条件とデザイナーの過去の経験に基づいてシステマティックに進められるので,「数理的手法」を有効に利用することができる。一方，意匠設計も含めたデザインの行為を数理的手法の視点からみると，以下のような３つのレベルの考え方が可能である。

L1　さまざまな可能性や候補の中から最も望ましいと考えられる最適な選択を行う意思決定行為としてデザインをとらえると，そのプロセスを数理的手法に基づく探索過程としてモデル化できる。

L2　意匠設計のための芸術的な行為も，無から有を生じさせるわけではないので，過去に評価の高かった最適な設計のモジュールを組み合わせる数理的行為としてモデル化できる。

L3　デザインは人間にしかできない芸術的な行為であるという考え方を受け入れるとしても，その過程は単純な作業のサブプロセスあるいは工学的な理論や手法に基づくプロセスとして，数理的にモデル化できる。

デザインの行為にはさまざまな解釈があるが，何らかの意味での最適な意思決定を行う行為であることに異論はないであろう。建築は芸術的作品であるとともに，人工物としての工業製品であるから，設計の過程はシステム工学の手法を用いてモデル化できる [1]。設計のプロセスを極めて単純に表すと図 1 のようになり，与えられた設計条件に対して，さまざまな環境条件や社会的条件のもとで最適な解を，数理，論理，図式，アルゴリズムなどのツールを用いて求める過程として抽象化される [2]。また，建築の設計は，意匠設計，構造設計，設備設計などのサブプロセスに分けられる。

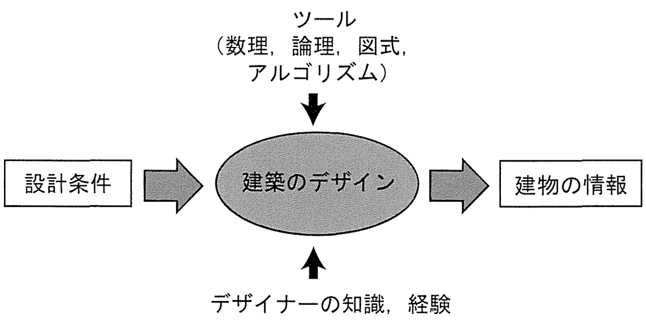

図 1　建築デザインのプロセス

システム工学や機械工学の分野では，「設計 ≈ 最適化」である。したがって，評価を定量化できれば（必ずしも定式化できなくてもよい），数理的な最適化によって，最も望ましいデザインが得られる。また，「最適化」を「解析・シミュレーション」の上位のツールと考えれば，最適化手法を用いた設計行為は以下のように表現できる。

Step 1.　設計条件と評価尺度を定める（修正する）。

Step 2.　最適化により最も望ましい解（デザイン）あるいはその候補集合（多目的最適化でのパレート最適解）を求める。

Step 3.　デザインを評価して望ましくなければ Step 1 へ戻る。

現在の建築設計のプロセスでは，Step 2 の中で設計変更と解析・シミュレーションを設計者の判断に基づいて繰り返しているのに対し，最適化を用いれば，Step 2 は自動化され，設計条件と評価尺度の修正と，デザインの評価が設計者の役割となる。構造設計では定量的評価が容易なので，構造最適化に関してはこれまでに多くの成果が発表されている [3]。

建築のデザインでは，設計条件や評価尺度を定量化することが極めて困難である。しかし，上記 L1 あるいは L2 の考え方を採用すると，極めて多くのデータから最も望ましいルールやモジュール，あるいはそれらの組み合わせを探索する作業によって，デザインの行為を支援できる。以下では，そのような目的を達成するためのデータマイニングの応用について解説する。

2. データマイニングによる最適なデザインの分析

データマイニングは，「大量のデータから知識（パターン，ルール）を見出す」ことを目的とし，そのためにさまざまな機械学習の手法を用いる。具体的には，分類，特徴抽出，頻出パターン分析などを目的として，連想ルール，顕在パターン，クラスター分析，クラス判別，決定木などの手法が用いられる [4,5]。以下では，これらの基本的な手法をまとめたフリーのツールである WEKA Ver. 3.6 [6] を用いて，建築デザインへの簡単な適用例を示す。筆者の専門が建築構造であるため，構造最適化の例を紹介するが，データマイニングの手法は，建築デザインのあらゆるステップで利用可能である。

図２のような５×５の平面格子トラスの節点 A に水平方向の集中荷重が作用したときの節点 A の水平変位が小さくなるような最適解（断面積の組み合わせ）の特徴を分析してみる。ただし，多くの材料（コスト）を使用すれば変位が小さくなるのは自明なので，材料の全体積に対する変位の比を評価尺度（目的関数）とする。以下では単位は重要ではないので省略する。

110 個の部材の断面積が，微小値 0.01 と 5, 10 の 3 種類の値をとるものとすると，全ての断面積の組み合わせは 3110（52 桁の数）であり，全ての解を評価することはできない。そこで，各部材の断面積を一様乱数で定めて，10000 個の解を生成して構造解析を行い，目的関数値を求めて，目的関数が小さくなるために重要な部材断面積の傾向を見出す。

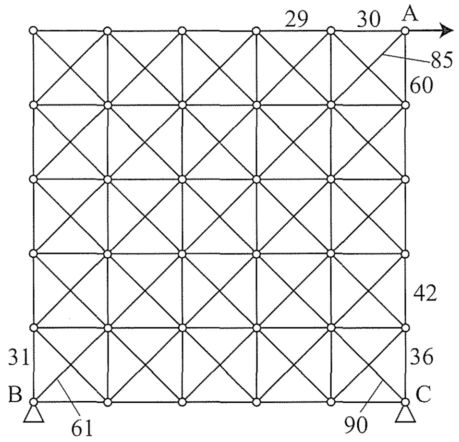

図２　格子状トラス

まず，クラスター分析の単純な方法である K-means (WEKA の SimpleKMeans) を用いて，10000 個の解を目的関数値によって 30 個のクラスに分類する。次に，それぞれの部材に対して，「部材断面積と目的関数値の相関が 0 である」という仮説が却下される割合を，独立性の 2 検定 (WEKA の ChiSquareAttributeEval) で定量化すると，図３のようになる。詳細は省略するが，図３の部材の太さが目的関数への影響度を定性的に表しており，荷重作用点と支点付近の部材の重要性が確認できる。

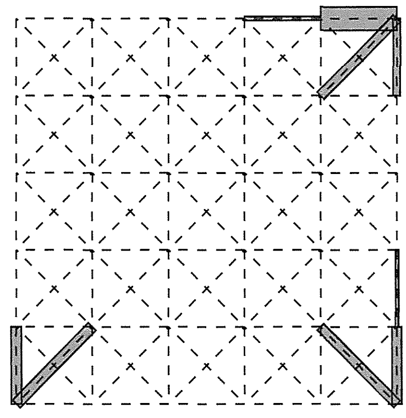
図３　点 A の水平変位に対して影響の大きい部材

次に，30 個のクラスのうち，最も目的関数の小さいクラスに含まれる 1115 個の解を優良解 (SMALL)，その他の解を非優良解 (LARGE) とし，決定木の一つである Alternating Decision Tree (WEKA の ADTree) を用いて優良解に属するためのルールを見出すと，図４のようになる。ここで，例えば「M30」は部材 30 の断面積であり，「0.01」

は「0」と表記している。また,「!=」は等しくないことを意味し，括弧内の数は選ばれた順である。「:」の右側の数値はメリット関数であり，値が小さいほど優良解が得られる確率が高い。例えば, グレーで示したように，部材 36 と 90 の断面積がともに 0.01 であれば，非優良解となる可能性が極めて高く，図 3 と図 4 の結果は定性的に適合している。

```
| (1)M30 = 0: 0.885
| | (8)M85 = 0: 2.494
| | (8)M85 != 0: -0.121
| | (9)M60 = 0: 2.359
| | (9)M60 != 0: -0.203
| (1)M30 != 0: -0.198
| | (7)M29 = 0: 0.434
| | | (10)M84 = 0: 0.961
| | | (10)M84 != 0: -0.19
| | (7)M29 != 0: -0.181
| (2)M36 = 0: 0.778
| | (6)M90 = 0: 2.522
| | (6)M90 != 0: -0.174
| (2)M36 != 0: -0.189
| (3)M31 = 0: 0.551
| | (4)M61 = 0: 2.69
| | (4)M61 != 0: -0.231
| (3)M31 != 0: -0.167
| (5)M42 = 0: 0.478
| (5)M42 != 0: -0.157
```

図 4　ADTree による分析結果

次に，連想ルールを見出すためのアプリオリ・アルゴリズム（WEKA の Apriori）を用いて分析すると，以下のようなルールが得られる。

1. M30=0 3354 ⇒ OBJ=LARGE 3284 conf:(0.98)
2. M36=0 3308 ⇒ OBJ=LARGE 3213 conf:(0.97)
3. M31=0 3358 ⇒ OBJ=LARGE 3210 conf:(0.96)
4. M42=0 3328 ⇒ OBJ=LARGE 3154 conf:(0.95)
5. M29=0 3310 ⇒ OBJ=LARGE 3125 conf:(0.94)
6. M61=0 3345 ⇒ OBJ=LARGE 3147 conf:(0.94)

ここで,「OBJ」は目的関数である。例えば，最初のルールでは，部材 30 の断面積が 0.01 の解は 3354 個あり，そのうち優良でない解は 3284 である。すなわち,「部材 30 の断面積が 0.01 ならば非優良解である」というルールの支持度は 3284/10000=0.3284 であり，確信度 conf は，3284/3343≈0.98 である。また，変数を図 3 に示した重要度の高い 9 個に限定すると，下記のように，2 つあるいは 3 つの条件を持ち確信度が 1 のルールが得られる。

1. M30=0, M85=0 1180 ⇒ OBJ=LARGE 1180 conf:(1)
2. M31=0, M61=0 1163 ⇒ OBJ=LARGE 1163 conf:(1)
3. M30=0, M60=0 1137 ⇒ OBJ=LARGE 1137 conf:(1)
4. M36=0, M90=0 1066 ⇒ OBJ=LARGE 1066 conf:(1)
5. M31=0, M61=0, M90=10 419 ⇒ OBJ=LARGE 419 conf:(1)
6. M29=10, M30=0, M85=0 413 ⇒ OBJ=LARGE 413 conf:(1)

このような性質を用いると，最適なデザインの特性を定量的に評価でき，変数の範囲，関係や設計条件を限定することによって，探索の効率を向上できる。ただし，上記の例からもわかるように，一般に全候補解に対する優良解の割合は非常に小さいので，非優良解の性質に比べて優良解の性質を直接見出すことは困難である。

参考文献

[1] 例えば，定方希夫，システム工学の基礎，東海大学出版会，1991.
[2] 日本建築学会 編，建築のデザイン科学，京都大学学術出版会，2012.
[3] M. Ohsaki, Optimization of Finite Dimensional Structures, CRC Press, 2010.
[4] 元田 浩 他，データマイニングの基礎，情報処理学会 編，オーム社，2006.
[5] 加藤直樹 他，データマイニングとその応用，朝倉書店，2008.
[6] WEKA Ver. 3.6, http://www.cs.waikato.ac.nz/~ml/weka/index.html