

構造デザインにおけるバーチャルエンジニアリングの可能性について

Study of virtual engineering for the structure design

松本 年史

MATSUMOTO Toshifumi

It is possible to think that the design is a kind of the information processing.

It thought that the genius, the knowledge, the feelings were important about the design until today.

However, a social requirement proceeds in the diversification and the specialization, and the solution of the problem is difficult in the method of the design until now.

"Virtual engineering" is the proposal of the design way which coped with the environment change of the design in today.

In "virtual engineering", the designer processes personally various design conditions.

In the field of the production which needs a quick response, the design changes from the specialization and the division to the integration and the concentration.

There is this to study the possibility of the structure design the design element of which was an environment element (the weather condition, the landform condition, the load condition and so on) and a social condition to be new by introducing the concept of "virtual engineering".

デザインは、様々な設計条件を情報パラメーターとした情報処理の一種と考えることが出来る。

従来からのデザイン手法は、才能、知識、感性といった個人的能力が重要視され、またこれらの才能に大きく依存してきた。この傾向は、これからも変わらないものと考えられるが、一方で社会的要求は多様化・専門化しており、デザインに求められる要求も従来のデザイン手法だけでは解決出来ない状況が生まれつつある。また、情報処理を得意とするコンピュータの発達は、デザインにおけるシミュレーションの手法を定着させ、新たな段階に向かいつつある。「バーチャルエンジニアリング」は、デザインの過程でデザイナーが様々な設計条件を同時並行処理することで、的確な性能評価を行いつつ迅速にデザインを行う新しいデザイン方法である。最先端の生産分野では、デザインの段階におけるこれまでの専門化・分業化の方向から統合化・集約化による総合判断が重要視されつつある。この動きは、工学部系の専門教育ではなく「芸術工科系」の総合教育プログラムに適したデザイン手法であり、ここで求められる人材はデザインとエンジニアリングをシームレスに統合できるエンジニア知識をもったデザイナーである。

この研究は、特に環境デザイン分野での環境要素（気象条件、地形条件、荷重条件など）や社会条件などをパラメーターとした構造デザインの在り方と、その構造的性能の評価を行うデザインプロセスを「バーチャルエンジニアリング」の概念を導入して研究・提案することを目的とする。

研究は2年度の継続研究として計画している。初年度は中間報告として、建築の構造デザインの分野での従来のデザイン手法の特徴を整理し、バーチャルエンジニアリングデザイン手法の可能性をまとめてみた。

1) 構造デザインから考えたデザインの定義

デザインという言葉は辞書（広辞苑）では下記のように定義されている。

- ① 下絵。素描。図案。意匠計画
- ② 生活に必要な製品を製作するにあたり、その材質・機能・技術および美的造形性などの諸要素と、生産・消費面からの各種の要求を検討・調整する総合的造形計画。
- ③ 「建築」「衣服をーする」

従来の構造デザインの内容から判断すると、これらの定義は十分なものであるが、今日の広範なデザイン活動の定義としては不十分である。今日のデザインの置かれた状況も考慮し、ここでは、「様々な事象を秩序づけ、メッセージを表現する人為的行為」とデザインを定義することとする。

デザインは、デザイナーのメッセージ、メッセージを伝えるメディア（媒体）、デザインの結果としてのイメージ（表現）で構成される。メッセージとイメージの関係は、昔からデザインの在り方を考える上でつねに問題として取り上げられてきたが、コンピュータがデザインに積極的に使用される今日この関係はより複雑化している。

ボードリアルは「シミュラールとシミュレーション」のなかでメッセージとイメージの関係を次の4つに分類している。

- ① イメージはひとつの奥深い現実の反映である。
—— 良い外観
- ② イメージは奥深い現実を隠し変質させる。
—— 悪い外観
- ③ イメージは奥深い現実の不在を隠す。
—— 外観になろうとする
- ④ イメージは断じて、いかなる現実とも無関係。
—— シミュレーション

この分類に従えば、一般的にはデザインはメッセージを反映させた良い外観を創造することが目的であるということができる。次に、構造デザインにおける良

い外観とそれをデザインする方法を整理する。

2) 構造デザインの方法

構造デザインにおいて、これまで創造的成果を挙げてきたいくつかの実例をもとに、良い外観をデザインする方法を整理すると以下の4つに分類することが出来る。

- ① 観察的方法
- ② 理論的方法
- ③ 実験的方法
- ④ シミュレーションによる方法

これらの方法は、相互に密接な関連を持っており、複数の方法が組み合わさられることで成果が得られる場合も多いが、単独で用いられても新しい構造の発想に結びついた例がいくつも存在する。これらの方法の分析を通してバーチャルエンジニアリングの可能性を考える。

2. 1) 観察的方法

観察的方法は自然界などに存在する結果としての外観を観察し、その外観が生まれた過程、存在する環境、変化する可能性を分析して、デザインしようとする方法である。観察する外観としては、生物、地形、自然現象などのかたちがある。新しいいくつかの構造システムがこの観察的方法によって開発され成功を収めてきた。

- ① フランスの構造家リコレは微生物の珪藻の構造を研究し、その幾何学システムを参考にして立体的なトラスシステムを開発した。
- ② アメリカの工学者R.E.ホートンは自然の河川について観察し、支流の数の関係をモデル化した河川系を解析するためのホートン解析法を開発した。
- ③ 1980年代以降、ヨーロッパで樹木形態をモデルにした新しい軸力構造システムの建物がいくつかつくられてきた。この構造システムは屋根荷重をいかに少ない柱に集約させて構造をデザインするかという問題に対して、木の構造に注目し、その枝別れパターンを研究し構造外観をデザインすることに応用している。樹木形態のデザインには、フィボナッチ数列を使った分岐、

ホートン解析、最小仕事の原理を応用した分岐角の決定など様々な理論が提案されている。

2. 2) 理論的方法

理論的方法では、観察的方法も含めて得られたデータをいかに単純で明快な理論式で表現し、新たなデザインテーマに応用できるかが成功の鍵となる。

構造デザインにおいて、理論的方法は部分の集積あるいは全体の分割のシステム研究からいくつかの成果が得られている。

- ① 集積のシステムで重要となるのは、集積する単位ユニットと集積の方法である。構造システムでは、単位ユニットは必要な構造性能を持ち、ユニット自体の単純性とさまざまな集積システムの要求に対応できる柔軟性を要求される。

石やレンガのブロックは、この構造システムの最も古い例であり、単純なブロックの集積により、壮大なカテドラルも建設可能であることを考えてもこのシステムの可能性が理解できる。

近代になって、鉄やコンクリートなどの新しい工業生産材料により、集積のシステムも新しい展開をみせた。ジョセフ・バックストーンはクリスタルパレスでプレファブリケーションという新しい建設方式の可能性を示した。コンラッドワックスマンは大型爆撃機用のハンガーの設計にあたって、芸術的なジョイントシステムと部材ユニットで構成された立体トラス構造システムを提案した。このシステムは現代の立体トラスシステムの基礎となるものであるが、その理論的研究は数学者であるヒルベルトの空間格子の研究にさかのぼる事が出来る。球による空間充填の研究は、その後球の細密充填の理論的研究を通して多面体セル、多様体の研究へと発展する。また集積システムの理論は自己相同、シンメトリー、フラクタル理論などとも深く関係し、自己組織化システムの研究に発展している。

- ② 分割のシステムは、分割される全体と、全体を部分に分割する分割システムが必要である。全体はデザインされた外観としての性能を持つ必要がある。全体を部分に分割する方法は、分

割のよりどころとなる極の数によって分類することが出来る。構造形態として最も基本的な曲面である球面を例にとると、球面を分割する方法は、極のないシステム、2極のシステム、多極システムが考えられる。構造システムの例として、極のないシステムは3方向グリッドドームやラチスシェルを上げる事が出来る。2極システムには、北極と南極に相当する極を軸に、経線と緯線で分割するシュベドラードーム、ラチスグリッドで分割するラメラドームがある。多極システムの代表は、球に内接する正20面体を構成する正三角形ユニットを大円上の部材で分割構成したジオデシックドームである。バックミンスター・フラーは最小投資で最大効果を発揮する「ダイマクション理論」に基づいて、このシステムを開発した。

2. 3) 実験的方法

構造デザインにおいて、実験的方法は組み立てた理論の応用、展開に際して、その整合性を検証し確認する目的で用いられることが多い。この方法によって得られる形態を利用し、斬新な設計方法により特徴ある構造を作り出すやり方は複雑な境界条件やダイナミックな釣合い系のなかで、安定した形状を求める必要がある場合に特に有効と考えられる。

- ① 圧縮応力で力を伝達する合理的な形状を求めるのは極めて難しい。真のアーチ構造はこの形状を利用した代表であるが、昔から悪魔の発明だといわれてきたことからこのことは理解出来る。迫持ちアーチと異なり、真のアーチは全体が完成したときにはじめてその効果を発揮する構造システムであり、最終形状とその性能をデザインの過程で予想しなければならない。この形状をデザインする有効な方法が逆吊り実験による方法である。この方法は、圧縮応力伝達形態が引張応力伝達形態の逆転形であることを利用して実験的に合理的な形状を求めるやり方である。

アントニオ・ガウディーは、サクラダ・ファミリアやその他の彼の設計した組積造建築の構造形態をデザインするに当たってこの方法を用

い斬新な建物をデザインした。同じ原理を利用して、スイスの構造家はハインリッヒ・イスラーは極めて薄いシェルドームの開発を行っている。

- ② 実験的方法による構造デザインのもう1つの例は、フライ・オッターによるシャボン玉やネットを利用した膜構造のデザインである。彼は任意のプランと境界条件に対して張られる最も合理的な曲面として最小曲面を選択することで、引張構造の形態を実験的に求め構造物のデザインに応用した。この最小曲面の形態は、単純な境界条件に対しては数学的に求めることが出来るが、複雑な任意形状に近い境界に対しては実験的方法に頼らざるを得なかった。この方法でモントリオール万国博覧会のドイツ館やミュンヘンオリンピックのメインスタジアムのユニークな屋根の構造が実現した。

2. 4) シミュレーションによる方法

シミュレーション (simulation) という言葉は、1940年代末にフォン・ノイマン (von Neumann)、ウラム (Ulam)、フェルミ (Fermi) が核遮蔽問題をモンテカルロ法を用いて解いた時、その手法をこう呼んだのが初めだと言われている。

この言葉は、ラテン語のまね、ふりをするとといった意味のsimuloからきていると言われている。J. H. マイゼ、J. G. コックスのシミュレーションの基礎では「システムのモデルの上で実験を行うプロセス」と定義されている。ここでシステムとはなんらかの形の相互関連性または相互依存性によって結合された「もの」の集合体であり、モデルとは現実のシステムの表現、実験とはシステムまたはそのモデルの機能と成果を一定の条件のもとで観察するプロセスであるとしている。またモデル上の実験について①システムそのもので直接実験を行うか、②システムに関連する問題の解を直接解析的に求めることをするかわりに行うものであるとしている。

システムは属性をもった構成要素と構成要素同士の関係によって決まってくる。システムの構成要素は同時に複数の構成要素をかねることがしばしばおこる。システムは領域をもち、その外部環境は境界条件によってモデル化される。システムはまたある

秩序 (対称性) をもつことが多いが、この秩序を利用してシステムをいくつかのサブシステムに分割して解析することも出来る。適応性の高いサブシステムは集積させて新たな展開システムに発展させることも可能である。

コンピュータの普及と高性能化は、構造デザインの分野でのシミュレーション解析技術を向上させ、新しいデザインの可能性を生み出している。構造を決定するさまざまなパラメーターを手計算の時代に複数制御してデザインすることは時間的にも技術的にも困難であり、いわゆる設計者の勘がデザインの成功不成功を左右してきた。現在では、一般的な構造デザインにおいても複数パラメーターを変化させた複数モデルに対してシミュレーション解析を行い、より適切な構造デザインを行うことが可能である。今日シミュレーションは日常的なデザイン手法として定着しつつある。この設計方法の変化はまた、デザイナーに必要な資質も変化させている。新しい時代のデザイナーは、完成された秩序から一歩進んだ柔軟性が求められてくるのかもしれない。

3) バーチャルエンジニアリング

これまで、現在まで行われてきた構造デザインの方法を整理してみたが、最近の目覚ましいコンピュータの発達には新たなデザイン方法を生み出しつつある。ここで第5番目のデザイン方法を「バーチャルデザイン」あるいはエンジニアリング分野に特化して「バーチャルエンジニアリング」と呼ぶことにする。これらの言葉は、分野によってはすでに明快な定義づけが行われているかもしれないが、ここでは独自の解釈でその定義と可能性を考えてみた。

3. 1) バーチャルの定義

バーチャルリアリティーをはじめとして、今日一般的に使われている「バーチャル」という言葉は「仮想」と訳され幻想や幻影を連想させる。バーチャルな世界では、ボドリアールが分類する4つの外観すべてが存在することが出来ると考えられてきた。ところが、フィリップ・ケオーは「バーチャルという思想」のなかで、「バーチャル」の語源を、力、エネルギー、最初の衝撃などを意味するラテン語の

virtusであるとした上で、「バーチャルは幻想や幻影などではなく、現実の実体として存在するものである」として、バーチャル・リアリティー技術の新しい展望を述べている。彼によれば、「バーチャルな世界では、原因が結果の中にバーチャルに存在すると同時に、結果もまた、原因のなかにバーチャルに存在する。檜の木はどんぐりの中にバーチャルに存在する。彫刻は、素描あるいは未加工の大理石の魂のなかにバーチャルに存在し、そのバーチャルな存在こそが、彫刻家の鑿を誘導する。」と述べている。

フィリップ・ケオーのこの定義は、バーチャルという言葉がデザインの新しい方向性を示してくれるものであり、バーチャルなデザインに向き合う者(デザイナー)は、今まで以上に物の本質を見抜く能力が必要であることを説いている。

3. 2) バーチャルデザイン

バーチャル本来の意味を参考にするならば、デザイナーはまず素材のなかに埋もれたバーチャルな存在を見出さなくてはならない。隠れたイメージを掘り起こす作業がデザインだとすれば、自分のメッセージが表現出来る「外観」をデザイナーは予見しなければならない。

3. 3) バーチャルエンジニアリング

バーチャルエンジニアリングという言葉は、ハワードC.クラップが、ビジュアルエンジニアリング環境での21世紀型製品開発の設計方法につけた名称である。彼は今日の製造法のおかれた厳しい社会状況に対処する方法として、商品開発の短縮化と市場投入の迅速化を達成するための方法として、これまでの専門化、分業化による設計開発方法ではなく、全体を把握したインテリジェントなデザイナーが的確な結果判断をその場で下し、その判断をデザイン修正にすぐに反映できるビジュアルなエンジニアリング開発環境の必要性を提案した。この開発環境においては、経費と時間のかかるモデル実験による検証をやめ、熟練が必要な専門的解析環境を改善し、製造のための生産設備設計などを統合化・自動化したバーチャルな設計室、実験室、生産ラインのなかでデザインが進められる。

バーチャルエンジニアリング環境では、これまでの設計方法では想定できなかった空間、環境、材料、形状、生産システムなどを想定したデザインも可能である。

3. 4) 構造デザインにおけるバーチャルエンジニアリングの可能性

コンピュータを利用した構造デザインに必要なパラメーターは、構造物本体を定義するものとその置かれた環境を定義するものに分類できる。

- ① 構造物本体を定義するパラメーターは、空間の位置を決定する節点の座標、節点間をつなぐ部材とその断面形状、部材の材料特性によって決定される。
- ② 構造物の境界条件は、構造物が置かれた無限の環境の構造物に与える影響を有限の境界に置き換えて定義したもので、荷重条件と支点条件に分けられる。

一般的な構造デザインでは、実際の状態を反映させてこれらのパラメーターの設定が行われ、解析結果をもとに構造部材の設計を行い、その安全が検証される。

バーチャルエンジニアリング環境では、上記のパラメーターに対して新たなパラメーターを付加した解析が可能となる。

- ① 時間軸を導入したデザインの可能性
時刻歴応答、非線形解析など現在でも解析に時間軸を導入した解析は行われているが、バーチャルデザインにおいて期待される効果は、建設時の応力変化解析、構造物の経年変化解析、災害後の構造性能、構造物の解体シミュレーション、解体された部材の再利用特性などが考えられる。
- ② 理論空間上での構造デザインの可能性
理論空間上での構造デザインは、位相空間での形状変化、多次元空間での構造モデル設定、フラクタル理論を用いた構造形態生成(Lシステム)、最小曲面理論を応用した形状解析などによりこれまで形状定義すら難しかった新しい構造形態の可能性の検証が期待される。
- ③ 理想部材形状の開発

最適設計ルーチンを組み込んだF.E.M.解析により設定した複数のパラメーターを変化させて最適な解を求めていくことが可能である。現在このパラメーター変化は異なるトポロジー空間に移行できないが、近い将来これも可能となれば極めて有効なデザインツールとなることが期待できる。

④ 新構造システムの開発

機構解析と連動した構造解析を行うことで、形態変化と加速度変化を伴う解析が可能となる。

機構解析はまた展開構造物や可動建築の開発、安定な形状を釣合い系の中で求める形状解析に応用することが可能であると考えられる。

⑤ 新しい環境条件を付加した最適構造形態のデザイン

地形条件、年間の温度変化、日照、風向きなどの構造物の置かれた環境条件を限定した境界条件で置き換えるのではなく、より広範囲に解析に取り組むことで、新たな構造形態の在り方が提案されることが期待される。

これらの新パラメーターを取り入れた構造デザインは、形状解析プログラム、機構解析プログラム、静的・動的・線形・非線形F.E.M.解析プログラム、流体解析プログラムなどを含めた統合されたビジュアルエンジニアリング環境が必要となるであろう。

以上、従来の構造デザインの方法とバーチャルエンジニアリングの考えを取り入れた新しい構造デザインの可能性を整理してみたが、デザインの定義、バーチャルの定義などこれまで自分の中で未整理であった概念を整理できたことは幸いであった。文書をまとめる段階で発見した新しい考えや研究を十分反映できていないところも多く、今後もこのテーマは継続研究し、具体的なかたちで発表できればと考えている。最後に、夏目漱石の夢十夜という小説の中で、バーチャルデザインについて考える上で参考となる話があったので紹介したい。

護国寺の山門で運慶が仁王像を彫っているという話を聞いた男が、早速見物に出かけるが、多くの野次馬に混じってみていると、運慶がノミを振り下したとたん木の中から眉や鼻が現れる。これを見ていた男が、「よくまあ、ああうまく彫れるものだ」と感心してつぶやくと、

隣にいた若者が「あれは運慶が彫っているのではない、運慶は木の中に埋もれていたものをただ彫り出しているだけだ。」というのをきいて、早速家にもどり裏庭の薪をほってみるが、一向に何のかたちもでてこない。男は明治の木には仁王は埋もれてないと考え、運慶が明治まで生きていない理由も納得するといった話である。

参考文献

- ① バーチャルエンジニアリング／Howard C.Crabb
- ② シミュラクルとシミュレーション／J.ボードリアル
- ③ シミュレーションの時代
- ④ バーチャルという思想／フィリップ・ケオー
- ⑤ 一般システム理論／ペンタランフィー
- ⑥ ザ・イメージ／K.E.ポウルディング
- ⑦ 対称／ロジェ・カイオワ
- ⑧ SYNERGETICS I・II／R.B.Fuller、
- ⑨ 宇宙船地球号／R.B.Fuller
- ⑩ YOUR PRIVATE SKY／R.B.Fuller
- ⑪ デザインとは何か／P・J・グリヨ
- ⑫ 造形思想／P.クレール
- ⑬ STEEL SPACE STRUCTURES／Z.S.MAKOWSKI
- ⑭ GEODESICS／E.Popko
- ⑮ IL／F.Otto