

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

"Virtual engineering" (in the consumption society in today) is the design method that the designer can do a quick judgment based on the appropriate performance evaluation.

It is possible to think that virtual engineering is the next way from the following four ways (The way by the observation, the way by the theory, the way by the experiment, the way by the simulation).

The data of virtual engineering is not an analog data and is a digital data.

This thing is the technique which suited computer processing.

To use the way of virtual engineering in the structure design gives us the possibility of the more flexible structure design.

はじめに

デザインの分野では、これまで才能・知識・感性といった個人的能力が重要視され、その才能に依存した創作活動が行われてきた。デザイン分野におけるこの個人的能力は今後も重要性を失わないものと考えられるが、一方で社会の状況は多様化・高度化しており、デザインに求められる要求も従来の個人能力のみでは解決出来ない状況が生まれつつある。また、近年のコンピューターの発達は、アナログ技術によるデザインからデジタル技術によるデザインへの質的变化をもたらし、デザインには新たな展開が求められている。

「バーチャルエンジニアリング」とは、デザインの過程でデザイナーが工学的判断も含めた様々な設計条件を同時並列処理することで、的確な性能評価を行いつつ迅速なデザインを行う新しいデザインの手法を意味する。製品の開発サイクルが短い最先端の生産分野では、デザイン段階において、これまでの様な専門化・分業化の方向から、迅速な商品開発に即応できる統合化・集約化された総合判断可能な体制作りが求められており、この動きは今後ますます加速されることが予想される。今後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工学的知識をも兼ね備えたデザイナーが求められてくものと考えられる。

この研究は、これまでのデザイン手法と「バーチャルエンジニアリング」デザイン手法の相違点を整理し、工学分野に属する構造デザインへの応用と新たな展開の可能性を考察したものである。

1. デザインについての再考察

(1) デザインの定義

今日、「デザイン」という言葉は我々の生活の中の身近な言葉として定着しているが、その定義や内容は人によってまちまちである。

辞書¹⁾によれば、「デザイン」という言葉は下記の様に表記されている。

- ①デザイン下絵。素描。図案。デザイン意匠計画
- 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「建築デザイン」「衣服をデザインする」

今日のような分野でのデザインの展開を考えたとき、その内容は従来からの範囲を超え、より多様で広範囲なものに発展しつつある。「デザイン」という言葉や「デザイナー」という職種がいつの時代に登場したのかについて詳しく研究したわけではないが、少なくとも産業革命以降、大量に工業製品が作られ、人々に供給されるようになったときには、製品開発においてデザインが重要な役割を果たしていたことは確認できる。

自分なりに「デザイン」の意味を考えてみると、「様々な事象を秩序づけ、メッセージをイメージ化する人為的行為」とするのが理解しやすいと考える。

(2) 伝統的デザインの方法

工業製品による大量生産・大量消費の時代以前にも、身近な「もの」の中には機能に合った優れたデザインの「もの」が存在し、現在でも手作りで単品生産される「もの」の中に同様なデザイン性を持ったものがある。これらのデザインを、大量に工業生産される「もの（商品）」のデザインと区別して「伝統的デザイン」と呼ぶことにすれば、「伝統的デザイン」はデザイナー（作り手）と使用者が同一かあるいは緊密な関係を持っていることが多く、作られる「もの」にも素材固有の特徴が生かされていることが多い点が特徴として挙げられるのではないだろうか。

「伝統的デザイン」と後述する「ヴァーチャルデザイン」について参考となる面白い話が、夏目漱石の「夢十夜」²⁾の中にあっただので紹介したい。

「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見ていると、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掘り出しているだけだ。」と応じた。これを聞いて早速家にもどり裏庭の薪を彫ってみるが、いっこうに何のかたちも出てこない。男は明治の木には仁王は埋もれていないと考えた。」といった話である。

この話にあるように、材料ひとつひとつの中に埋もれているイメージを掘り起こす行為が「伝統的デザイン」では求められているのではないだろうか。

「伝統的デザイン」は、ニーズ発見型材料によるニーズ指向型のもの作りということが出来よう。

(3) 近代的デザインの方法

産業革命以降の近代から現代にかけての時代には、デザインを取り巻く社会環境の変化に伴いデザインにも質的变化が求められてきた。「伝統的デザイン」が手工業の一品生産による「使い続けるもの」のデザインが目的であるとすれば、「近代的デザイン」は工場で大量生産される「消費されるもの」のデザインが目的であると言うこともできる。「近代的デザイン」では、作り手と使い手はお互い見えない関係となり、デザイナーには見えない不特定多数の使い手を想定した「必要条件を満たすデザイン」が求められる。デザインに関係する分野は多様化・専門化が進み、個人的能力より組織的開発力が優先されてきた。デザインされた「もの」には、使い続けられ受け継がれるものとゴミとして廃棄されるものの二つの種類のものが存在することになる。

「近代的デザイン」は、ニーズ指向型材料によるニーズ発見型のもの作りということが出来よう。

(4) デザインにおけるシンボルとイメージの関係

「デザイン」は、デザイナーの「メッセージ」とメッセージを伝える「メディア（媒体）」、結果としての「イメージ（表現）」で成り立っていると考えることが出来る。このうちでメッセージとイメージの関係は、デザインの質的問題に関わる重要な問題である。「伝統的デザイン」と「近代的デザイン」の質的違いにもこの関係が関わっている

と思われ、コンピューターの発達によるデザインのデジタル化はこの問題をより複雑なものにしている。

「メッセージ」と「イメージ」の関係をボードリアルは「シミュラールとシミュレーション」³⁾の中で次の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

①イメージは奥深い現実を隠し変質させる。

悪い外観

②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

③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

このイメージ（表層）と現実との関係は次のように言い換えることも出来る。

①良い概観は、真実の表層

②悪い外観は、コピー（模造品）

③外観になろうとするものは、「シミュラークル」

④現実と無関係な外観は、「シミュレーション」

この分類に従えば、健全なデザインとは、メッセージを反映させた良い外観を創造したものであり、デザインの結果創られる「イメージ」（ここでは外観）は複製不可能であると考えられる。一方、オリジナルを持たない大量生産・大量消費されるデザインは複製可能なデザインであり、近代以降いわゆる商品開発においてこの種のデザインが意図的に求められてきたところに、今日の「デザイン」が抱える複雑さがあると言えそうである。

2. 「構造」の定義と「構造デザイン」の目的

(1) 「構造」の定義

「構造」という言葉を辞書¹⁾で引くと、

①幾つかの材料を組み立ててこしらえられたもの。また、そのしくみ。くみたて。

「柔構造のビル」

②全体を構成する諸要素の、互いの対立や矛盾、また依存の関係などの総称。

「汚職の構造」

と表記されている。

建築で使われる「構造」という言葉には、力や荷重を

支える物質で出来た骨組みといったイメージがあるが、「構造」という言葉は他の分野でも広く使用されていて、より広い意味を持つ言葉であることがわかる。

文化人類学で使われる「構造主義」は、「一般に研究対象の構造の研究を主とする研究方法。また、その立場。①言語（ラング）に内在する構造（structure）をつかみ出し、各要素の機能的連関を明らかにする言語学の立場。②社会・文化現象の意味秩序も言語構造と類比的なものとして、これを分析方法に導入する学問的立場の総称。」¹⁾とある。また、化学で使われる構造式は、分子内の各分子の結合状況を解説した分子式を意味する。これ以外にも、構造線・構造改革・構造不況といった「構造」を含む言葉を多く目にすることが出来る。

また、意味が建築の構造に近い言葉として、「架構」（材を結合して作った構造物）、「構成」（かまえつくること、くみたてること）などがある。

これら他分野での使われ方も考慮して、「構造」という言葉をここでは「属性を持った要素と要素同士の関係によって決まる複合体」すなわち一種の「システム」とであると定義することとする。

(2) 構造デザインの目的と内容

構造デザインの目的は、「建物に作用する様々な力や荷重を支持・伝達し、必要な空間・機能を安全に保持する物質の集合体（構造物）」をデザインすることにある。これに前記の「構造」の定義をあてはめると、「属性を持った要素」とは構造材料や材料で作られる部材などの物質であり、「要素同士の関係によって決まる複合体」とは部材で構成された構造物ということになる。

構造物を設計するためにはその初期条件と境界条件を設定する必要があるが、構造デザインにおける初期条件とは、構造物本体の初期状態（荷重等が作用する前の状態）を意味し、構造部材の材料特性や断面形状、空間における部材の配置と結合の仕方が含まれる。これに対して境界条件とは、構造物の置かれた状態あるいは構造物に作用する外的・内的要因を設定するもので、外力や内力などの荷重条件や構造物を支持する支点条件などの設定が含まれる。

構造デザインの内容は、これらの設定した初期条件と境界条件に対して、構造計算や模型実験などを行い、構造物の安全性や耐久性、経済性や施工性、環境負荷など

の評価を行うことである。

3. 構造デザインの発想 (アナログ的设计方法)

構造デザインの目的にかなった具体的な構造物を発想する方法としてこれまで様々な方法が試みられてきたが、新しい独創的な発想を生み出してきた構造家（構造デザイナー）の発想法を調べてみると、次の3つの方法を代表的なものとして挙げる事ができる。

- ① 観察的方法
- ② 理論的方法
- ③ 実験的方法

である。

これらの3つの方法は、現実に自然界に存在する事象（生物や現象など）の表層（かたち）あるいは事象自体をデザインの発想に結びつけた方法であり、後述の「デジタル的方法」（シミュレーションとヴァーチャルエンジニアリング）と区別して「アナログ的方法」と呼ぶこととする。「アナログ的方法」と「デジタル的方法」とは、どちらか単独よりもお互い同士を組み合わせた場合の方がより大きな成果をあげる場合が多く、構造デザインにおいては特に組み合わせることにより正確な検証が可能になる。

(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、デザインに生かそうとする方法である。観察する対象としては、生物・地形・自然現象・人工物などの外観（かたち）を挙げることができる。新しく発想された構造デザインのいくつかはこの観察的方法によって発想されたと言われている。

事例1) フランスの構造家リコレーは軽量構造を研究するなかで、海の微生物である珪藻のもつ構造に着目し、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(図1)。珪藻のもつ幾何学的形態を最初に紹介したのはヘッケルであるが、彼の書「Art Forms in Nature」¹¹⁾の中には様々な海の生物の形態が描かれている(図2)。

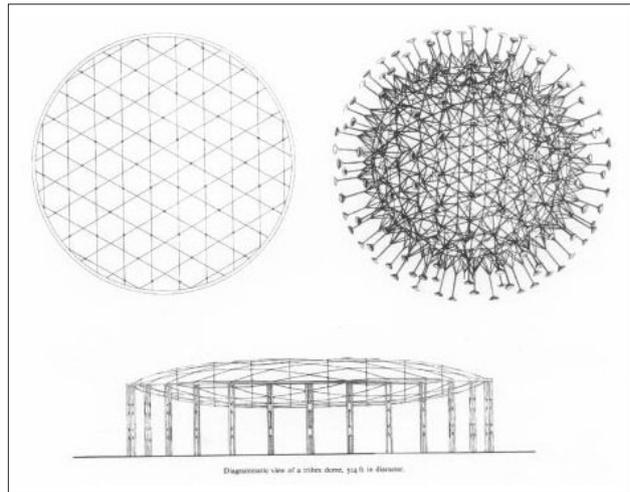


図1 珪藻とリコレーの軽量構造¹¹⁾

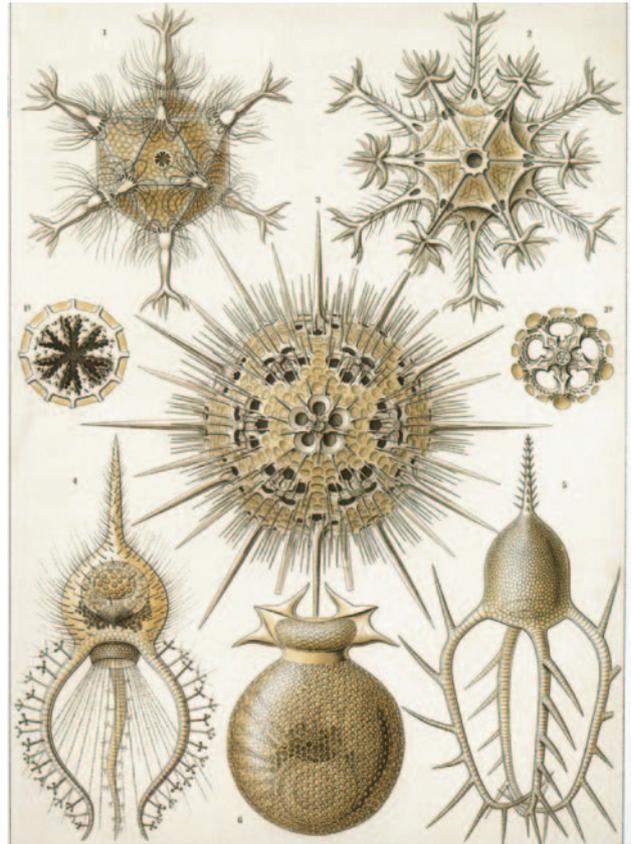


図2 ヘッケルによる海の微生物スケッチ¹²⁾

事例2) アメリカの工学者 R.E. ホートンは河川の分岐パターンについて研究し、複数の河川の分岐に規則性があることを発見した。その規則性を理論化したホートンの法則によって解析した河川モデルは、実際の河川の分岐に近い結果を出したと報告されている。枝分かれのパターンは、河川以外にも稲妻や放電(図3)・血管の枝分れなど、まったく異なる環境下における現象に見られるかたちであり、そこに普遍的な何かの法則が存在することが予想される。

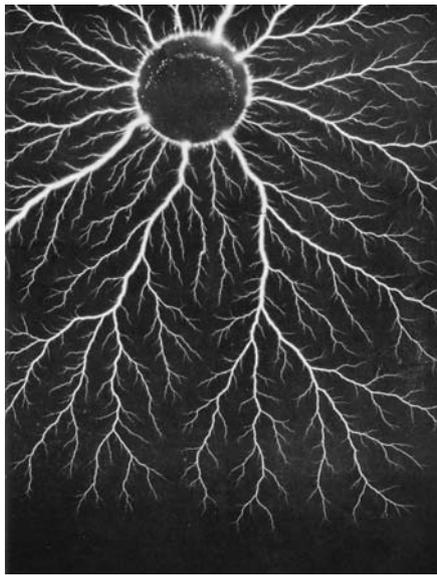


図3 放電¹³⁾

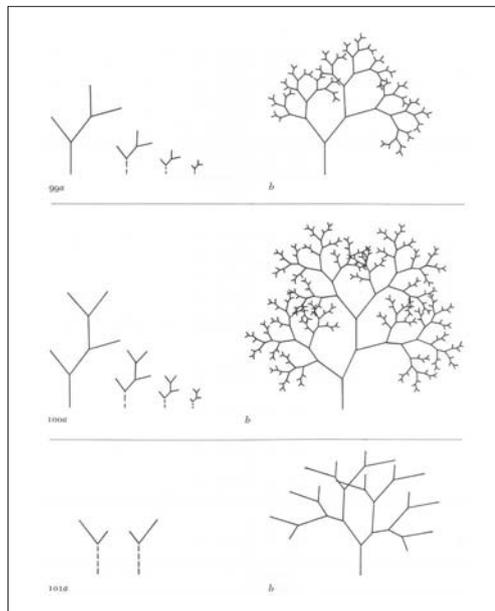


図4 枝別れパターン¹⁴⁾

事例3) 1980年代以降、ヨーロッパで樹木形態を取り入れた新しい軸力構造システムによる建物が建設されてきた。この構造システムでは、出来るだけ細かく屋根面を支持することで屋根面の曲げ部材断面を軽減し、床レベルでは柱の数を出来るだけ少なくして空間に自由度をもたせるという矛盾する要求を解決することが構造デザインのテーマであった。その解決にあたって樹木の構造に注目し、その枝別れパターン(図4)を研究することでこの問題を解決した。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応用されている。また、アントニオ・ガウディーやフライ・オットーは分岐の形状を後で述べる逆吊り実験によって求めることでより力学的な形状をつくることに成功した(図5)。



図5 フライ・オットーの樹木構造模型¹⁵⁾

(2) 理論的方法

理論的方法は、自然界などの事象の中に潜む法則を、微分方程式・変分原理・対称性理論・グラフ理論・位相幾何学・エネルギー定理などの数学理論を用いて理論化し、新たなデザインの発想に役立てようとするものである。理論的方法はまた、巨視的視点と微視的視点との連続性を前提とした還元主義的手法を含んでいる。還元主義の有効性には分割によって要素の性質が大きく変化しないことが必要条件であり、対象をより単純な対象にブレークダウンすることで、複雑な対象はいくつかの単純な対象の集積として構成される。

構造物はいくつかの部材が集合して全体を構成する場合が多く、構造デザインにおいて、部分の集積あるいは

全体の分割によって得られる形態の研究は重要テーマであり、いくつかの成果を挙げてきた。ここではこの集積と分割の手法を中心にこれまでの構造デザインでの具体例を挙げてみたが、この考えの中には「可逆性」と「不可逆性」の問題があることも忘れてはならない。

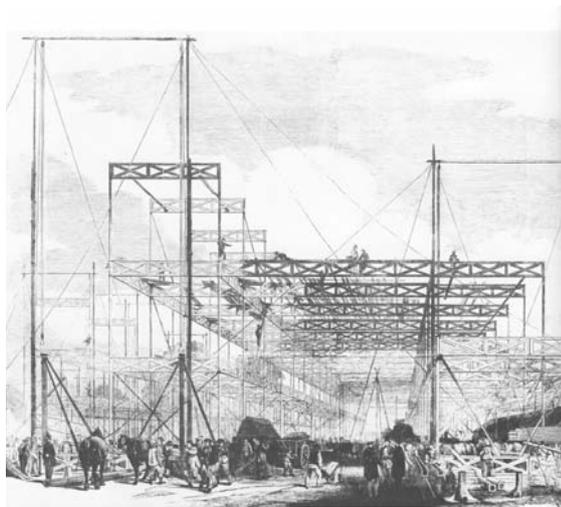


図6 ジョセフ・パックストンのクリスタルパレス¹⁶⁾

事例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を集積する方法である。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が要求される。このような柔軟性を持ったユニットの開発には対称性の概念が有効である。

石やレンガのブロックを用いた構造は、このシステムの最も単純で古い例であり、単純なブロックの集積により壮大なカテドラルを建設することも可能である。だが、アーサー・ケストラーが「機械の中の幽霊」⁴⁾ のなかで指摘するように、カテドラルを分割していくと一個のレンガにたどり着くかもしれないが、そのレンガを集めてもカテドラルになるとは限らないところにこの還元主義的集積システムの問題があると言える。

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の出現により、集積のシステムも新しい展開をみせることになる。ジョセフ・パックストンはクリスタルパレス(図6)で、プレファブリケーションという新しい建設方式を取り入れ短期間に大規模なパビリオンを完成させることに成功した。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を依頼されたとき、芸術

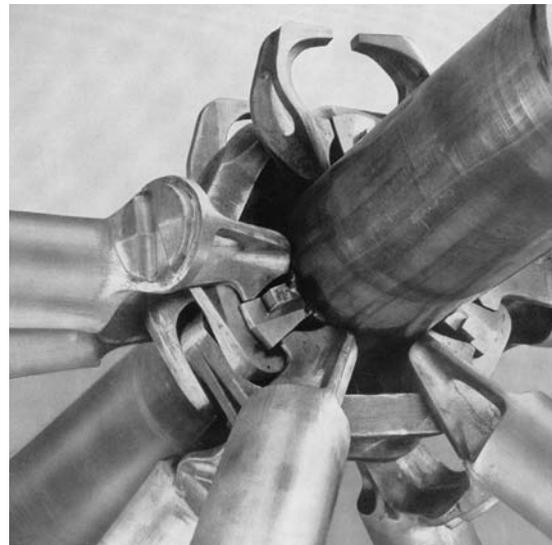


図7 ワックスマントラスのジョイントシステム¹⁷⁾

的ともいえる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(図7)を提案した。このシステムは現代の立体トラス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充填格子の研究につながっている。この研究は球の細密充填(図8)の理論的研究につながり、多面体セル・多様体の研究へと発展し、メロシステムやその他の立体トラスジョイントシステムの開発に生かされている。

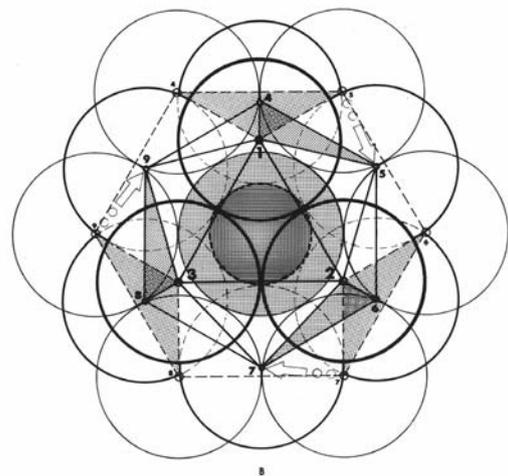


図8 球の細密充填図¹⁸⁾

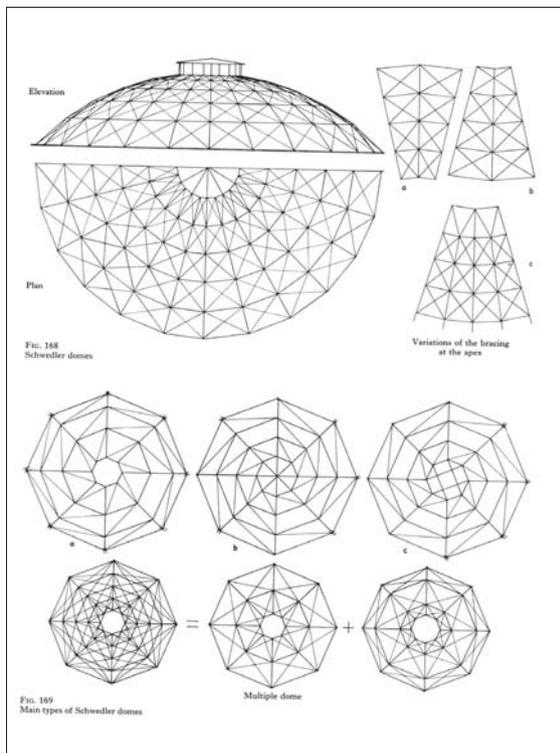


図9 シュベドラードーム¹⁹⁾

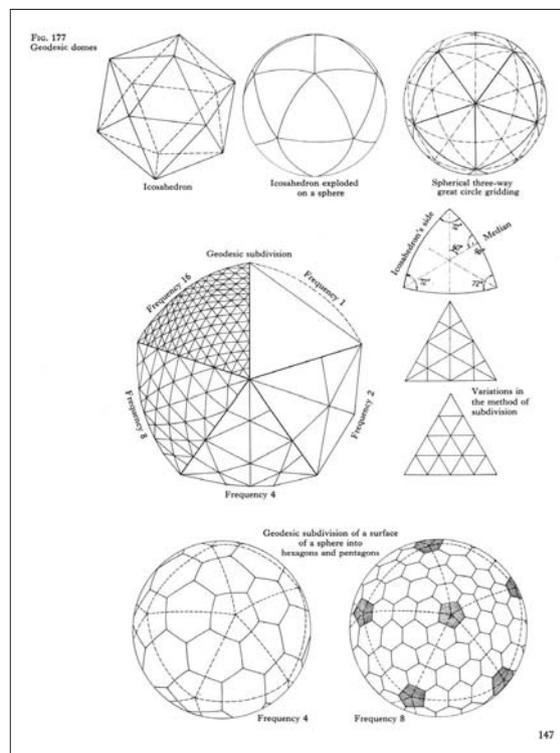


図10 ジオデシックドームの分割パターン²⁰⁾

事例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で決まる。分割される全体は、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、多極システムに分類できる。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ことが出来る。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(図9)、ラチスグリッドで分割するラメラドームなどがある。多極システムでは、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(図10)が有名である。ジオデシックドームの特徴は構成する部材がすべて両節点を結ぶ測地線(球面上の最短線)であることである。また分割の基本形を正20面体としたのには球に内接する正多面体の内で最も面の数の多い多面体を選択することで構成部材の種類を減らす目的があった。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と言われている。⁵⁾

(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外観を利用し、斬新な設計方法により特徴ある構造を作り出した例はいくつも存在する。複雑な境界条件やダイナミックな釣合い系の中で、安定した形状を求める必要がある場合に、実験的方法は特に有効な方法となる。

実験的方法には大きく分けて2つの方法がある。ここではその2つを「正攻法的実験方法」と「逆説的実験方法」と呼ぶこととする。

事例1) 「正攻法的実験方法」による構造デザインの例としては、フライ・オットーによるシャボン玉膜やネット素材を利用した膜構造形態の実験による研究をあげることが出来る。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、シャボン玉膜がつくる最小曲面形態(図11)を実験的に求め、構造物のデザイン

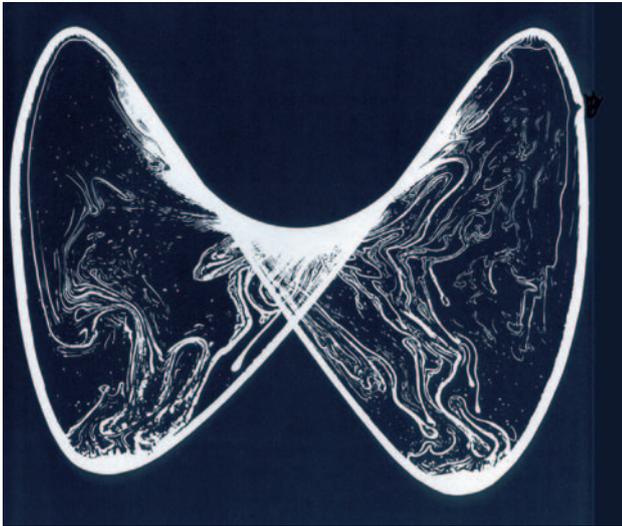


図11 シャボン玉膜がつくる最小曲面²¹⁾

に応用した。この最小曲面の形態は、単純な境界条件の場合でも数学的に求めることは非常に難しく、複雑な任意形状に近い境界に対しては実験的方法を用いるのが最も簡単で確実な方法である。この方法によって、彼は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をデザインした。

事例2) 「逆説的実験方法」の例としては逆吊り実験をあげることが出来る。圧縮応力で力を伝達する合理的な形状を正攻法で求めるのは極めて難しい。真のアーチ構造はこの形状の代表であるが、昔から悪魔の発明だといわれてきたことから難しさは理解できる。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できてはじめて生まれる構造システムである。この真のアーチの形状を求める最も単純で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(図12)を利用して、実験的に合理的形状を求めるやり方である。

アントニオ・ガウディーは、グエル教会(図13)やサグラダ・ファミリアの設計にあたって、逆吊り実験を有効に活用することでそれまで組積構造では達成出来なかった独創的な建物をデザインすることに成功した。

同じ原理を利用して、スイスの構造家ハインリッヒ・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。

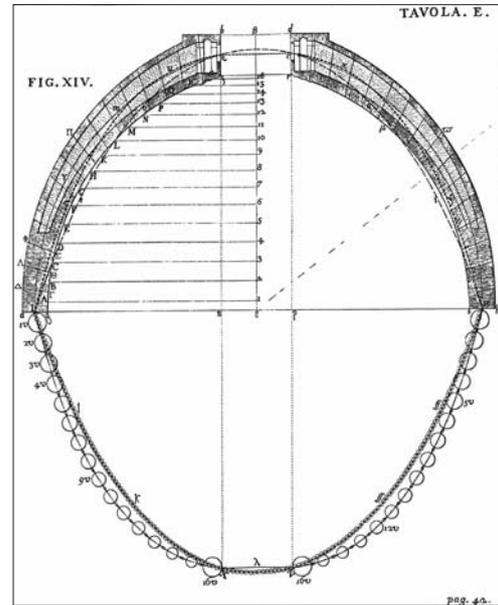


図12 アーチ形態と懸垂曲線(逆吊り形態)²²⁾

Fig. 41. Colonia Güell church, inverted photograph of the exterior of the model as seen from the rear. In this case the fabric is behind the model, better to distinguish the cords (Plate 51a was drawn on a photograph similar to this).

Fig. 42. Colonia Güell church, interior of the funicular model as it hung at the church.

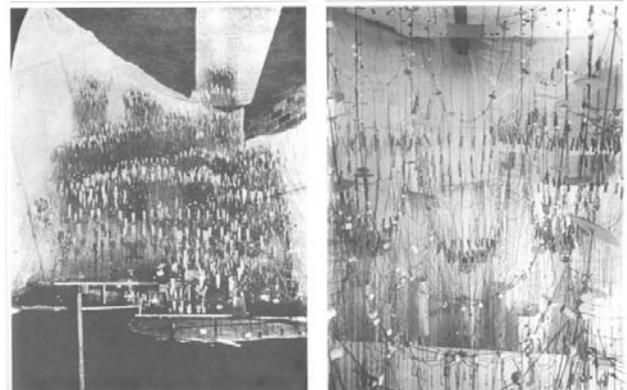


図13 グエル教会の逆吊り模型実験²³⁾

4. 構造デザインの発想II (デジタル的デザイン方法)

コンピューターの発達、事象を記号化・数値化し、解析することでその性能を評価するデジタルデザインの手法を可能にした。

このデジタルデザインの手法では「シミュレーション」の方法が代表的である。「ヴァーチャルエンジニアリング」をシミュレーションの一手法と考えることも出来るが、ここではあえて分けて考えることとし、これら2つの方法のデザイン及び構造デザインにおける可能性を探ってみた。

(1) 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年代末フォン・ノイマン、ウラム、フェルミ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⁶⁾。この言葉は、ラテン語の「まね、ふり」を意味する「simulo」からきていると言われおり、辞書¹⁾では、「シミュレーション【simulation】物理的・生態的・社会的等のシステムの挙動を、これとほぼ同じ法則に支配される他のシステムまたはコンピューターの挙動によって、模擬すること。」と表記されている。また、「試しにやってみる本番に対する試行」、「現実のエッセンスを抽出したもの」、「真似しようとする現実に対して単純化」、「計算機の中だけで行われ、人間の行動とは別のもの」といった説明もあるが、その根拠は「社会(対象)の複雑な振舞い(現象)が比較的単純な行動の組み合わせによって創発される」⁷⁾との考えに基づいているということが出来る。

J.H. マイゼ、J.G. コックスの「シミュレーションの基礎」⁶⁾では、「システムのモデルの上での実験を行うプロセス」とシミュレーションを定義し、モデル上での実験について「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。ここでのモデルとは現実のシステムの表現を意味し、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と説明している。

(2) システムとしての構造

ここで「システム」と構造との関係を考える。

「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」の集合体を意味し、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ものである。「システム」の構成要素は、同時に複数の構成要素を兼ねることがしばしばある。「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)を持つことが多いが、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り、場合によっては階層構造を構成する。

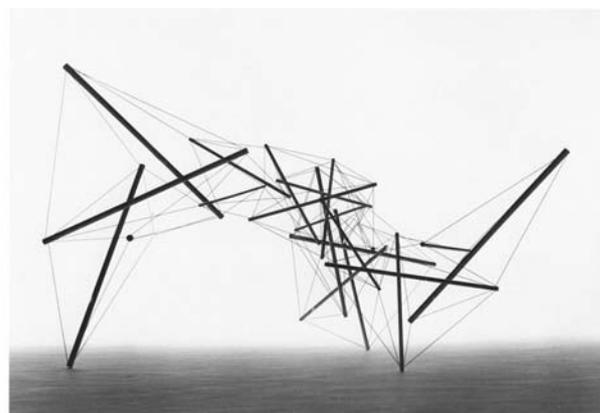
ベルクランフィは「一般システム理論」⁸⁾の中で、要素の複合体の扱い方を3種類に分類している。

- ①要素の数による分類
- ②要素の種類による分類
- ③要素の関係による分類

である。

①と②による複合体は、切り離して考える事の出来る要素の総和として理解されることから「総和的複合体」と呼ばれ、要素のみでなく要素の関係にも依存する③の「構成的複合体」と区別される。「構成的複合体」は、ばらばらにされた部分の性質からは説明出来ない相互作用する要素の複合体、すなわち「システム」を構成する。バックミンスターフラーはこの「システム」を、「全システムの運動の状態であり、システムのばらばらな部分、あるいは、部分の寄せ集めをそれだけで観察した運動の状態からは推測出来ない状態」⁵⁾と表現し、「シナジー」と名づけられたこの状態がベクトル幾何学と結びついたものを「シナージェティックス」と呼んだ。このシナージェティックス理論に基づいて開発されたのがジオデシックドームやテンセグリティ構造(図14)である。これらの構造物はそれまでのものと比べて極めて軽量で高い強度もち、極地の観測ドームなどに利用されている。

この例からも建築の構造は、属性を持った構成要素(構造成材料や部材形状)とその構成要素同士の関係(部材の位置と結合状態)を持った一つの「システム」と考えることが出来、そのデザインの方法として「シミュレーション」は有効な方法の一つと考えられる。



Model for Free Ride Home, 1974
aluminum and stainless steel
30" x 56" x 52"

図14 ケネス・スネルソンのテンセグリティ彫刻²⁴⁾

(3) シミュレーションの構造デザインへの応用と可能性

コンピューター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雑なモデルに対してシミュレーション解析を行い、より詳細な構造計算を行うことが可能となり、シミュレーションは一般的なデザイン手法として定着しつつある。

構造デザインにおいてシミュレーション解析を行うためには、解析モデルの初期条件と境界条件の設定が必要になる。初期条件とはシミュレーションを始める時のすべての物理的状態を言い、具体的には構造物の材料特性、部材形状と位置関係などがあげられる。境界条件とは計算対象の領域の一番外側で与えるべき条件、すなわち構造解析においては荷重条件と支点条件がこれに該当する。こうして考えると、構造設計における構造計算は、ひとつのシミュレーションであることがわかる。コンピューターを利用した構造解析は、経験と勘だけでは検証不可能な複雑で大規模な構造物の安全性を、設定条件を変えて検証する極めて有効な方法であり、その最大の特徴は仮想空間のなかで実物大の擬似モデルによる解析が可能なる点であろう。

シミュレーション技術は、相似則を満たす詳細な縮小モデルの作成が不可欠だったモデル実験の、モデル作成の時間と費用の削減に役立つほか、パラメーターの設定によって現実世界だけでなく非現実世界のシミュレーションも可能となる。現実世界では不可能なりセットによるやり直しが何度でも可能な点もデザインツールとしての有利な特徴であろう。

また、構造デザインにおいてシミュレーションの果たすもう一つの特徴は可視化技術の実現であろう。構造デザインにおいて、本来その存在を感覚として捉えられない力の流れや微小な変位を、カラー画像やフリンジ図あるいはアニメーションによって表示してくれるこの技術は、膨大な数値データの判読と比較して、構造物の挙動を直感的に把握し問題箇所をいち早く発見して適切な修正を迅速に行うことを可能にする。

これらの設計方法の変化は、デザイナーに新たな資質も求めてくることが予想され、デジタル時代のデザイナーには、それらのツールを使いこなす柔軟性が求められているのかもしれない。

(4) シミュレーションの問題点

シミュレーションによるデザインは、これまでのアナログ的なデザイン手法では不可能であった新しい可能性をデザイナーに提供するが、その一方でシミュレーションは多くの問題点を持っていることも認識しなければならない。

デザイン対象が方程式やモデルの形に整理されると、元の対象が持っていた意味論は捨象され、デジタル化したシミュレーションモデルに置き換えられる。このモデルは、現実的に不可能な条件設定や、正確性を求めるあまり非現実な多量の情報設定も可能であり、これら不適当な設定に対してもシミュレーションの結果は出力される。これらの結果はシミュレーションの信頼性を損ね、無駄なコストと時間を消費する危険性を含んでいる。

シミュレーションは、基本的に現在から未来を予測するルールに従った一方向的検証は得意とするが、未来から現在のあるべき状態を予測するといった逆検証あるいは可逆的検証は不得意であると言われている。また、シミュレーションは事象が連続していることが前提であり、不連続性や発散の可能性、分岐が予想されるモデルには適用できない。

シミュレーション解析で良い結果を出すためには、初期の広範囲な探求と終盤での深い探求の適切な配分が重要であると言われているが、適切なモデルやパラメーターの設定にはデザイナーの経験と知識が求められてくる。

5. 構造デザインにおける

ヴァーチャルエンジニアリングの可能性

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きたが、最近の目覚ましいコンピューターの発達は新たなデザイン方法を生み出しつつある。ここで五番目のデザイン方法を「ヴァーチャルデザイン」あるいはエンジニアリング分野に特化して「ヴァ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な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に考えたい。

(1) ヴァーチャルな世界

ヴァ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「ヴァーチャル」という言葉は「仮想」と訳され、幻想や幻影を連想させる。ところが、フィリップ・ケオーは「ヴァーチャルという思想」⁹⁾の中で、「ヴァーチャル」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が語源であるとしたうえで、「ヴァーチャルは幻想や幻影などではなく、現実には現実体として存在するものである」として、ヴァーチャル・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、「ヴァーチャルな世界では、原因が結果の中にヴァーチャルに存在するのと同時に、結果もまた、原因のなかにヴァーチャルに存在する。檜の木はどんぐりの中にヴァ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塊のなかにヴァーチャルに存在し、そのヴァーチャルな存在こそが、彫刻家の鑿を誘導する。」⁹⁾と述べている。後半の説明は夏目漱石が夢十夜の中で述べていることと符合し興味深い。

また、「ヴァーチャル世界では、空間は先験的な形式ではなくそれ自身がひとつのイメージであり、対象が空間により構成されると同時に対象も空間を構成し、絶えず相互に作用し合うモデル化の対象である」とも述べている。

フィリップ・ケオーのこれらの定義は、ヴァーチャルな環境がデザインに新しい可能性を与えてくれると同時にこれまでにない危険性を持つことも示唆している。ヴァ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ヴァーチャルな存在

(イメージ)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できる「外観」(イメージ)をデザイナーは素材のなかに予見しなければならない。ヴァーチャルな世界でデザインに向き合う者(デザイナー)には、これまで以上に物の本質を見抜く能力が求められてくることになる。

(2) ヴァーチャルエンジニアリングについて

ヴァーチャルエンジニアリングという言葉は、ハーワード 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」¹⁰⁾につけた名称である。彼は今日の製造業の置かれた厳しい社会状況に対処するため、商品開発の短縮化と市場投入の迅速化の達成方法として、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即時に反映できる、ビジュアルなエンジニアリングと融合したデザイン環境の必要性を主張している。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極力取りやめ、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・自動化したヴァーチャルな設計室・実験室・生産ラインのなかでデザインが進められる。

ヴァ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。まさに自然界には存在しない新しい機能材料と製品アイデアを組み合わせたニーズ指向型のデザインシステムを指向していると言うことが出来よう。

(3) 構造解析におけるヴァーチャルエンジニアリングの可能性

コンピューター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の配置と結合方法、および部材の材料特性・断面形状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。

ヴァ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加えて新たなパラメーターを付加した解析が可能である。つぎにその新しいパラメーター設定によって期待出来る構造デザインの可能性をあげてみた。

(4) 時間軸を導入したデザインの可能性

時刻暦応答・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、ヴァーチャルエンジニアリング環境において期待される効果として、①建設時の各ステージにおける構造物にかかる応力変化の解析、②構造物の経年変化の解析、③災害時・災害後の構造解析、④構造物の解体シミュレーション、⑤解体された部材の再利用を想定した評価と補強シミュレーションなどが考えられる。また地震時の揺れや部材の変形・崩壊過程などを、時間軸を伸ばして表示することで、現実には把握できなかった様々な現象を確認することも可能である。

(5) 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、①位相空間での形状変化と解析、②多次元空間での構造モデルの設定、③フラクタル理論を用いた構造形態生成システム（Lシステムなど）による形態生成、④最小エネルギー・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。

特に数学処理ソフトや分子モデル解析ソフトなどの特殊分野のソフトとの連携によって、特殊な条件に対応したデザインも可能となることが期待される。

(6) 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は適用できないが、これが可能となればより柔軟な最適化が期待できる。

梁や板の特定応力下での最適形状の解析や軽量化のシミュレーションにも威力を発揮することが期待できる。

(7) 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形態及び構造の解析が可能となる。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。

建築の構造物は、基本的に運動状態の変化を起こさないのが前提であるが、今後は動く建築物も予想され、これまで出来なかった動く構造システムの開発も可能となる。

(8) 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境界条件を、建物に近接した境界条件で設定するのではなく、周辺のより広範囲な地形や環境状態を解析に取り込むことで、新たな理想的構造形態の在り方が解析的に求めら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には、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、場の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。

また、地上以外の場所、海底や海中・高山・空中・宇宙空間・他の惑星など特殊な環境における構造物のデザインスタディーに対しては、ヴァーチャルエンジニアリングの環境が強力なツールとなることが予想される。

(9) ニーズ指向型構造材料、構造システムの開発

構造材料は、自然に存在する材料の特性を理解し利用するニーズ発見型材料の利用から、必要な性能をもつ材料を人工的に製造するニーズ指向型材料の利用に変わりつつある。ヴァーチャルエンジニアリングの環境では、存在しない性能を持つ材料を組み合わせることで理想的な構造システムを設定し、シミュレーションによってその特性を評価することが出来る。そこで得られた結果をもとに、必要な材料特性を設定すれば、新材料の開発目標が具体化し効率的な開発を行える事が期待される。

このように、従来の構造デザインの方法とヴァーチャ

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は、今後ますますその必要性が増すことが予想される。

研究は2年度の継続研究であったが、この研究報告書は先に発表した中間報告の内容に修正・加筆を加えたものである。当初予定していた具体的なバーチャルエンジニアリングのモデルスタディーは、導入を予定していたソフトが予算的理由により導入できなくなり、十分な検証を行えなかったことは残念であるが、平成14年秋に有力なソフトが学校に導入されたことで、現在モデルを作成し解析を行っている。結果がまとまれば、発表して行きたいと考えている。

引用文献

- 1) 広辞苑／新村出編第5版 CD-ROM版 (岩波書店) 1998.11
- 2) 漱石文学作品集／夏目漱石作 (岩波書店)
- 3) シミュラクルとシミュレーション／ジャン・ボードリヤール [著]；竹原あき子訳 (法政大学出版局) 1984.3
- 4) 機械の中の幽霊／アーサー・ケストラー著；日高敏隆、長野敬訳 (ベリかん社) 1980.10
- 5) 宇宙船「地球号」操縦マニュアル／バックミンスター・フラー著；東野芳明訳 (ダイヤモンド社) 1972年刊
- 6) シミュレーションの基礎／J.H.マイズ、J.G.コックス共著；小笠原暁 [ほか] 共訳 (培風館) 1969.11
- 7) 社会シミュレーションの技法：政治・経済・社会をめぐる思考技術のフロンティア／ナイジェル・ギルバート、クラウス・G・トロイチュ著；井庭崇、岩村拓哉、高部陽平訳 (日本評論社) 2003.2
- 8) 一般システム理論：その基礎・発展・応用／フォン・ベルタランフィ著；長野敬、太田邦昌訳 (みすず書房) 1973.7
- 9) ヴァーチャルという思想：力と惑わし／フィリップ・ケオー著；嶋崎正樹訳 (NTT出版) 1997.8
- 10) バーチャルエンジニア：21世紀の製品開発の姿／Howard C.Crabb 著；吉村信敏 [ほか] 訳 (日経BP社) 1998.11

図版引用文献

- 11) (図1) Zodiac. 19. 20. 21 (Rizzoli International Publications) Editrice Abitare Spa,1988-1999
- 12) (図2) Art forms in nature/by Ernst Haeckel (Dover Publications) 1974
- 13) (図3) THE NER LANDSCAPE in art and science/Gyorgy Kepes (Poul Theobald and Co)
- 14) (図4) 自然のパターン：形の生成原理／ピーター・S・スティーヴンズ著；金子務訳 (白揚社) 1987.7

- 15) (図5) IL 17 the work of frei otto and his teams 1955-1976 (IL PUBLICATIONS)
- 16) (図6) The Turning Point of Building:Structure and Design/by Konrad WachsmannReinhold, [1961]
- 17) (図7) The Turning Point of Building:Structure and Design/by Konrad WachsmannReinhold, [1961]
- 18) (図8) Order in space:a design source book/K. Critchlow (Thames&Hudson) 1969
- 19) (図9) Steel space structures/Z.S.Makowski (Joseph) 1965
- 20) (図10) Geodesics/Edward Popko (University of Detroit) 1968
- 21) (図11) IL 18: FORMING BUBBLES/Klaus Mach,Berthold Burkhardt,Frei Otto (IL PUBLICATIONS)
- 22) (図12) L'art de l'ingenier : constructeur,entre preneur, inventeur / sous la direction d'Antoin Picon.Paris:Centre Georges Pompidou,c1997
- 23) (図13) IL 34 : THE MODEL/Harald Szeemann (IL PUBLICATIONS)
- 24) (図14) KENNETH SNELSON/ALBRIGHT-KNOX ART GALLERY

本文中掲載以外の参考文献

- 25) デザインとは何か／P・J・グリヨ著；高田秀三訳 (彰国社) 1969.8
- 26) 造形思考／バウル・クレール [著]；土方定一 [ほか] 訳 (新潮社) 1973.5
- 27) シミュレーションの時代：ボードリヤール日本で語る／ボードリヤール [述]；ボードリヤール・フォーラム編 [訳] (JICC出版局) 1982.7
- 28) 反対称：右と左の弁証法／ロジェ・カイヨワ [著]；塚崎幹夫訳 (思索社) 1976.3
- 29) Your private sky : R.バックミンスター・フラー：アート・デザイン・サイエンス／ヨアヒム・クラウセ、クロード・リヒテンシュタイン編 (ラルス・ミュラー社) 2001.6
- 30) Synergetics:explorations in the geometry of thinking/R.Buckminster Fuller (Macmillan) 1975-1979

執筆者

松本 年史
MATSUMOTO Toshifumi
デザイン工学部 環境デザイン学科
Faculty of Design/Department of Environmental Design
教授
Professor