構造力学の眺望

A View of Structural Mechanics

大森博司
Hiroshi OHMORI

1. 構造力学の役割

構造力学（Structural Mechanics）とは、力学、特に静力学(Statics)の一般原理を応用して、各種の構造物が外力の作用を受けた場合、構造物（Structure）の内部にいかなる力を受けるか、また、いかに変形するかを研究する応用力学(Applied Mechanics)の一部門である。土木構造物、建築構造物、例えば、橋梁、橋脚、橋台、ダム、ゲート、地下鉄道トンネル、高層建築物、工場、格納庫などを、その使用目的に応じて最も合理的にかつ経済的に設計するためには、それらの構造物の性質に応じて、材料工学、水理学、流体力学、土質工学、振動学、測定工学、統計学など各種の知識を必要とすることはもちろんであるが、なかんずく、構造力学は構造物設計のための基礎となるものである。（小西一郎、横尾義貫、成岡昌夫、丹羽善次著、「構造力学 第1巻」、丸善、から）

上記の文章は私が名古屋大学の学生時代に、大学院の入学試験に当たって、一冊の書物を読破して、構造力学をあらためて勉強したいと意気込んで購入した書物、丸善の「構造力学」の緒論の冒頭の文章である。構造力学とは何か、構造力学の意義とその役割について、明確に、注意深く記述されていることにあらためて気づく。この文章に続いて、構造力学を使って構造物の設計は行われるのであって、これがなくては構造物の設計はできないということが、厳密で正確な文章により整然と語られていく。

ところで、特に印象的なのは、「（構造力学とは）構造物が外力の作用を受けた場合、構造物の内部にいかなる力を受けるか、また、いかに変形するかを研究する（学問である）」と言うくだりである。これは、「与えられた構造物」が「与えられた力」を受けた結果として生じる、内部の応力や構造物に生じる変形がいかなるものかを研究する学問が構造力学であることを言っている。

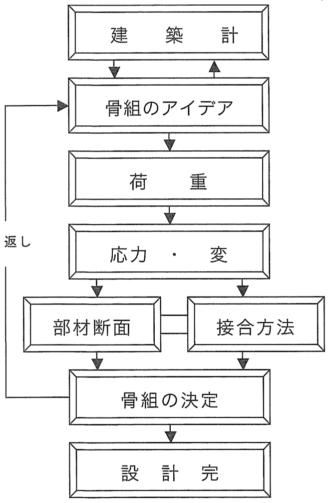


図１　骨組設計のプロセス

図１は一般的な骨組の設計に当たって行われている鉄骨構造の構造設計のプロセスを簡単に示したもので、私が講義で使っているスライドからの抜粋で

ある。建築計画で決められた骨組に対して骨組をどう組むか、ラーメンにするか、ブレースで抵抗させる骨組にするかを決め、そのシステムの応答、つまり、応力と変形を求め、所定の限度を超えていないかどうかを検討し、部材の断面を決めるとともに、隣り合う部材の接続方法を選定し、断面や接合の都合がつかないときには再度、最初の骨組の全体計画の部分まで逆戻って、実現可能な設計解が得られるまで、以上の仮定を繰り返す。これが現在行われている骨組の構造設計の概要である。この過程で、応力と変形を求める箇所で、くだんの構造力学が用いられる。言い換えれば、骨組の概形が定まっていて初めて構造力学の出番が回ってくるのである。

2. 構造解析と構造創生

構造解析という表現がある。この言葉は、動的であれ静的であれ、構造物に外力が作用した際に生じる応答、つまり応力や変形を、構造力学の理論に基づいて求める行為を言う。構造力学は学問であり、その成果を利用して、実際に構造物の応答諸量を求めること、それが構造解析である。

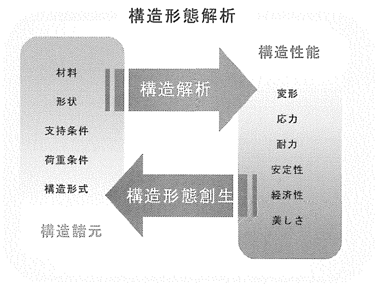


図２　構造解析と構造形態創生

図２をご覧いただきたい。左側に構造諸元、右側に構造性能が配置されている。構造諸元としては、構造物の材料、形状、支持条件、荷重条件などがその構成要素として示されている。構造解析はこの構造諸元を所与の条件として、構造力学の知識を用いて、応答諸量を求める行為である。応答諸量として、構造物の変形，応力が直接の出力として得られ、構造物の耐力や安定性もその関連出力として得ることができる。これらは、一括して構造性能を構成する要素と考えることができ、この考え方を少し拡張して、経済性や構造物としての美しさをもその要素として考えると言うことも可能である。このような観点に立てば、構造解析は構造諸元に基づいて構造性能を求める行為であると定義しなおすことができる。ところで、一般的に用いられる構造設計という行為をここで定義している言葉で表現し直せば、「所望の構造性能を発揮する構造諸元を決める行為」ということができよう。そこでは、所望の構造性能を発揮する構造のもつ諸元を求めることが目的であり、このために、諸元の設定→性能評価→諸元の再設定→性能再評価→諸元の再々設定→・・・という試行錯誤の循環が始まる。ここでものを言うのは、徒弟的なシステムの中で培われることの多い、経験、年季あるいはそれらに基づいた勘と言われるものである。一人前の構造設計ができるようになるのに一定以上の時間が必要であると言われるのはこれによる。

ところで、ほしいものは設計解である要求構造性能を発揮する構造、それを規定する構造諸元である。したがって、構造性能を提示し、これを実現する構造諸元を直接求めることができれば、上記の試行錯誤の過程は理屈の上ではおおかた不要になるはずである。これまでこのことが実現されてこなかったのは、言うまでもなくこの過程を作り上げることが困難であることによる。そうしたことは全く無理なのだろうか。筆者が微力ながら考えてきていることはこの過程を、部分的でも良いので作り上げることであり、構造創生、あるいは構造形態創生と呼んでいるものがそれである。

3. 有限要素法

構造解析に欠かせない技術、それが有限要素法である。私が有限要素法を始めて学んだ少し前、世界では 1956 年の米国航空学会誌に Turner, Clough, Martin, Topp による、航空機翼の有限要素法による解析法を示した構造工

学の歴史に燦然と輝く記念碑的な論文[1]が発表されている。その後、堰を切ったように有限要素法に関する研究論文が発表され、当時の構造工学はさながら有限要素法学の体であったはずである。1965年、68年、70年に、米国オハイオ州デイトンにある空軍航空力学研究所で連続して行われた有限要素法に関する国際会議では、有限要素法の理論と応用に関する萌芽的な研究が数多く発表され、それらがその後の有限要素法の応用研究に大きな弾みをつけた。このあたりの有限要素法の歴史は例えばOdenの書物[2]により詳しく知ることができる。彼によれば、有限要素法の発展は、1960年前半の萌芽期、60年代後半の収束の数学的裏付けによる理論的確立期、そして70年代にかけての流体、音、熱伝導などの非構造分野への拡張発展期に区分することができる。このように、構造解析手法の巨人である有限要素法は、高々10年余りの非常に短い期間に急成長し成熟したと言える。そしてこの有限要素法により、構造解析法は実用的な方法として自立したのである。

4. 変身するコンピュータ

米国が見切りをつけていたベクトルプロセッサにより日本が世界の高速コンピュータの先頭に立ったことが正式に認められたのは2002年4月18日のことであった。これは、海洋科学技術センターが地球規模の温暖化や環境変動、異常気象、地殻変動等の数値シミュレーションによる解明を高精度で実施することを目的として開発してきた、超高速並列計算機システム「地球シミュレータ」で、35.61テラフロップスを達成したとされている。図3に示すグラフはコンピュータの持つ性能と、CPUの老舗、インテルの開発したチップが年とともに高速化、高密度化してきた様子を示したものである。ムー

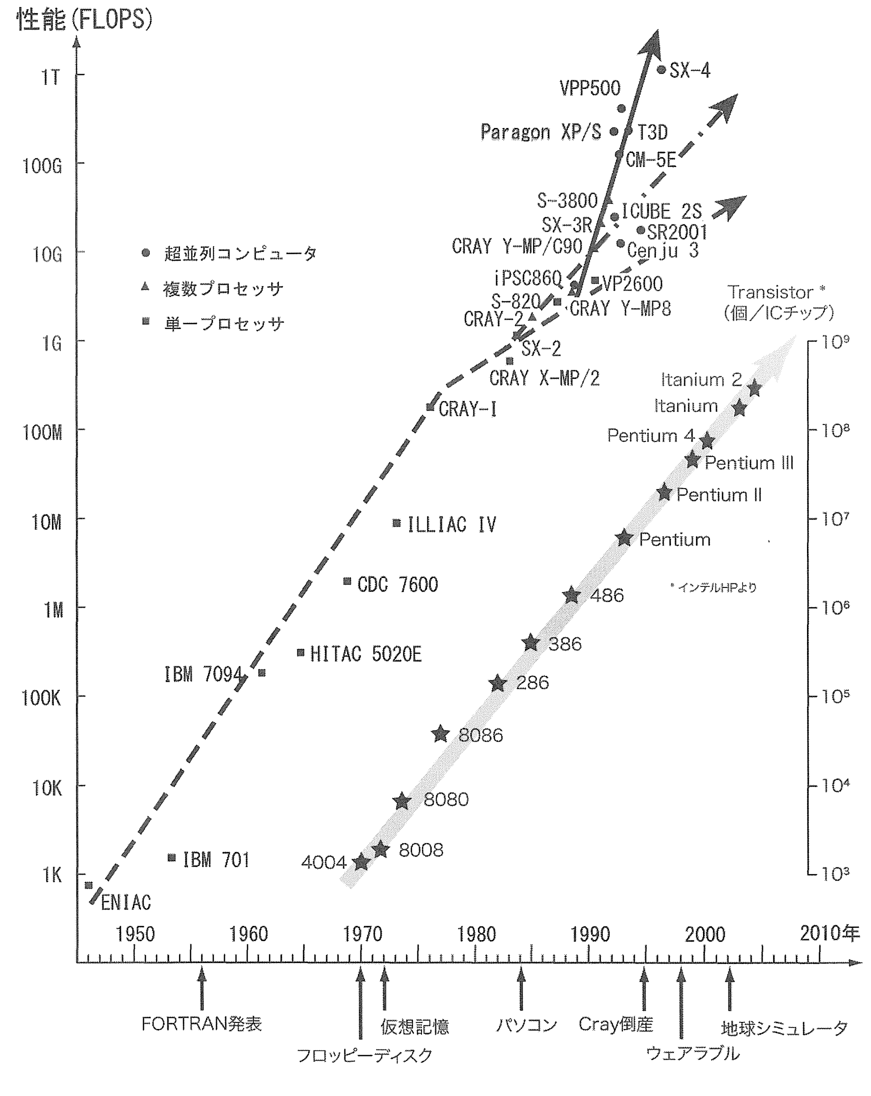


図3　計算機性能の変遷

注 1：ムーアの法則

「半導体に集積されるトランジスタの数は 24 ヶ月おきに 2 倍になる」。Intel 創業メンバーの 1 人 G. E. Moore が提唱した CPU の集積度に関する予測。

アの法則 [注 1] が現在でも成立していることが確認でき、1946 年に開発された真空管式電子計算機 ENIAC 以降、世界で公表された主なコンピュータの性能の伸張の度合いが 5 年経つ毎に 10 倍の割合で高速化されてきていることも分かる。

ところで、多くの科学技術計算プログラムに用いられた FORTRAN が開発、公表されたのは 1956 年、その頃の世界最高速のコンピュータの性能は高々数千フロップスである。当時のメモリがどの程度か未調査だが、おそらくよほど効率を上げても数十元の線形連立方程式ですら一気に解くことはできなかったであろうから、解を得るまでに何時間も要しただろう。因みに、現在のコンピュータで同じ問題を解いた時にかかる時間は、光ですら数十センチしか進めないほどの瞬間のはずである。その後、高集積度の CPU が量産され、価格が低下し、1980 年代半ばにはパソコンが市場を席巻する。90 年代半ばには大型機の開発路線を続けていたクレイ社が倒産、2000 年代に入るとネットワークを介しての並列計算技術が盛んに研究されるようになり、コンピュータの高速化は更に加速しようとしている。

5. 構造最適化と構造優良化

変形や応力などがある範囲に収まるという条件下で、重量を最小化したり、剛性を最大化するような構造物を決定することを構造最適化といい、構造工学におけるこの種の問題を構造最適化問題という。これはさらに寸法決定問題と位相決定問題に分類され、前者は構造物を構成する部材の断面積や断面二次モーメントなどの部材の性能の決定に関するものの他、構造物の曲面形状などの形を決定するものをいう一方、後者は例えばトラスやラーメンのような骨組構造の場合、どの部材とどの部材が接合されるかといった結合状態を決定するもの、さらには二次元、三次元の連続体の開口の数、部位などの、いわゆる構造物全体のトポロジー（位相）を決定するものをいう。

研究史としては、前者の寸法最適化問題として、変形や応力が予め設定された範囲を越えないという制約条件下で、重量を最小にしたり、剛性を最大にしたりするように梁の断面形状やトラスの断面積分布を決める問題が、すでに 1950 年頃に数理計画法の応用として研究されている。これに対して後者の位相最適化は数十年の間、殆ど手がつけられずにとり残されてきており、1990 年頃になってやっと研究されるようになった経緯がある。一言で言えばこれは、後者が前者と比べて数段、困難な問題であったことによる。このあたりの歴史には先に述べた計算機の高速化が深く関与している。

一方、「最適化」という表現は数理計画法の専門用語で、目的関数を制約条件の下で最大化、あるいは最小化することをいい、そのような条件を満足する数理計画問題の解のことを「最適解」という。「最適解」という用語は「最も適した解」、あるいは「最も優れた解」などと解されがちであるがこれは全くの誤解で、上記のような数理計画問題の解を意味するれっきとした専門用語である。

ところで、構造最適化の研究は機械工学、特に航空機や自動車の分野で過去 20 年くらいの間に目覚ましい発展を遂げてきており、ソフトウェアも既に市販もされている。同種の研究は建築構造の分野でも行われて来ていたが、今ひとつ実用化が進まなかった。そもそも建築物は機械製品のように画一大量生産されることが少ないことに加えて、堅さや強さ、あるいは軽さなどの構造性能以外に、施工性、経済性、社会性、審美性と言った科学的定量化に必ずしもなじまない要素をも同時に考

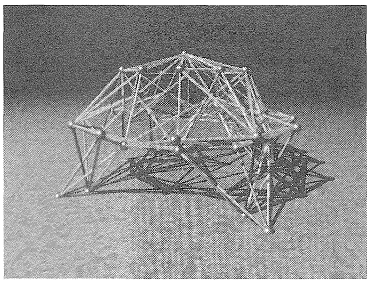
慮する必要があり、コストや重量の最小化といった単一目的的な方法は建築の領域では大きな意味を持てなかったのがその主な要因である。

このように重量や剛性などの構造力学量を最小化、最大化するような構造形状や位相を決める問題が構造最適化問題であるが、建築ではそうした単機能の目的関数を対象にすることは現実的ではない。これに対して、応力や変位などの力学的な制約条件に加えて、建築計画的な要請や法規による種々の条件をも満足し、かつコストや重量を可能な範囲で小さくしようとするプロセスで創生される複数のほどほどに優れた解、これらを「優良解（Better Solutions)」と呼ぶことにすれば、この優良解を手軽に提示できる手法があれば有用であろう。これは、唯一無二の最適解を求める「構造最適化（Structural Optimization)」と区別して、「構造優良化（Structural Betterization)」と呼ぶべきものであり、これを実現する方法が筆者の提案する構造形態創生法（Computational Morphogenesis）と呼ばれるものである。

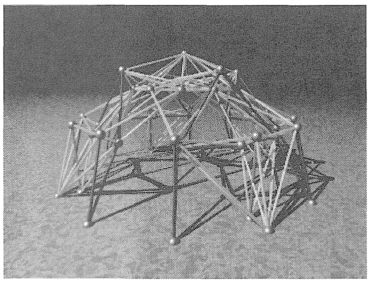
このように構造形態創生法は、力学的、幾何学的あるいは建築計画的条件に応じた複数の優良解を提示するための手法である。これは力学的合目的的デザインを指向するもので、これにより創生される形態に基づく構造デザインの手法は、既に実設計で用いられており、構造設計の方法として新しい流れを創り出しつつある [3]。

注 2：組合せ最適化問題

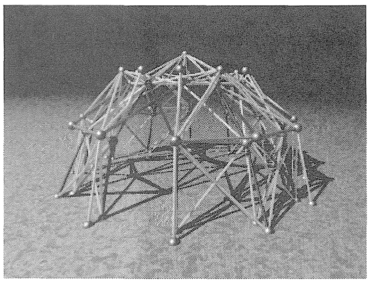
与えられた条件を満たすような組合せや順番を選ぶとき、選べる組合せの中から一番良いものを探しなさい、という問題。ナップザック問題、巡回セールスマン問題、N クイーン問題などは有名。需要と供給、雇用と賃金、スケジューリング、施設配置、割当編成など、現実的な問題がこれに帰着される。



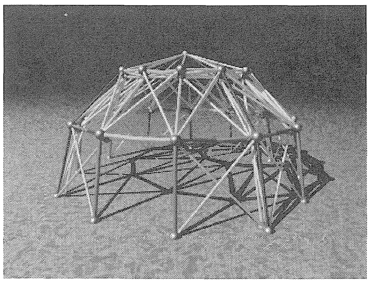
層厚　2.0m



層厚　1.5m



層厚　1.0m



層厚　0.5m

図 4　ダブルレイアー・トラスドーム

6. 構造形態創生法 - その 1：遺伝的アルゴリズムの利用

ダーウィンの進化論に基づく生物の進化過程における適合種の発生のメカニズムを応用し、組み合わせ最適化問題 [注 2] を解くための探索法としたのが遺伝的アルゴリズム（GA, Genetic Algorithm）である。この手法は工業生産計画やネットワークの最適化問題に適用することを意図して、J. H. Holland により導入されたもので、初期の発展段階においては遺伝的計画法（Genetic Plans）と呼ばれていた [4]。その後，Michigan 大学での彼の大学院学生であり、後に同大学に遺伝的アルゴリズム研究所を創設し初代所長となった D. E. Goldberg が、プラント施設におけるガス・パイプラインの最適配置問題に GA を応用し大きな成功を収めた。以来，様々な分野への応用がなされ、現在も精力的な研究が続けられている [5]。

ところで、この手法の大きな特徴の一つに、整数や自然数などのような離散的な変数を難なく扱うことができる点があげられる。これは大変重要な特徴であり、ここで話題としている構造形態創生の観点からいうと、構造システムを構成する部材として、例えば JIS などによる規格製品をその選択対象とした最適化を行うことができるといった利点としてその威力を発揮する。

GA にはこのような離散変数を直接扱うことのできる強力な手法であるという特徴の他に、最適解に準ずる解（準最適解）を<複数個>生産することができるというこれまた大きな特徴があり、これはこの手法が建築に応用された際に、決定的な役割を果たす。すなわち、GA はその本質的な性質として、反復計算（進化）の過程で多数の解群を集団として改良して行くという独特のプロセスを持っており、このことは人間がその解群から付加的な判断に基づいて適宜、設計解を「選択」するのに役に立つ。このような程々に優れた複数個の解を提示することのできる GA のもつ特性は、力学的に優れたもののみが求める解ではなく、施工性、経済性、社会性、審美性など、科学的定量的な扱いには馴染まない要素をも同時に考慮する必要がある建築設計のプロセスに大変都合がよい。

図 4 に二つの異なる直径を持つ同心球

面内（外球面直径20m）に、制約として変形最大値と部材軸力限界を与え、鉛直自重下でできるだけ軽い立体トラス構造を求める問題にGAを用いた例を示す。層厚を変化させると様々なトラスが得られていることがわかる。図中、赤は高い軸圧縮、青は高い引張軸力が生じることを表している。くどいようだが、図示されているのは、条件を設定後、計算機が提案したトラスである。

7. 構造形態創生法－その2：拡張ESO法の利用

構造の「かたち」を直接生み出すために、不必要な部分は取り去り、必要となった部分を付け足す連続的な作業を計算機にさせることにより構造物の力学的な性状に基づいた形態を創り出す。拡張ESO法のアイディアはそうした単純な発想に基づいている。この手法は1997年にY. M. Xieらによって導入されたESO（Evolutionary Structural Optimization）法[6]に、筆者が改良を加えて新しく開発した手法である[7]。図5に二次元の橋梁構造、図6および図7に三次元の橋梁構造の場合について、それぞれvon Misesの相当応力［注3］を用いた拡張ESO法によって得られる構造形態を示している。この方法によれば、構造形態は荷重条件に応じて繰り返しの計算過程で次々と変化する。図8に芥川プロジェクトと呼ばれるオフィスビルの壁体のデザインを行った際の、進化の過程を示す。図に示されている各過程で発生する構造形態は課せられた幾何学的な条件をクリアし、応力の均質な分布を約束する構造形態であることが一定の範囲で保証されたものになる。それらの構造形態のどれを設計に採用するかはこの手法を使う設計者に委ねられており、設計者はそこで「選択」した形態を出発点として、考慮すべきその他の条件、例えば、施工性、経済性、デザ

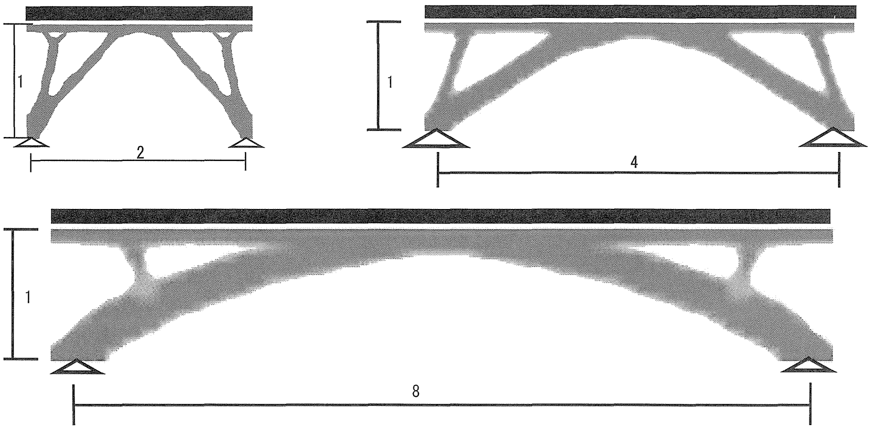


図5　二次元上路橋

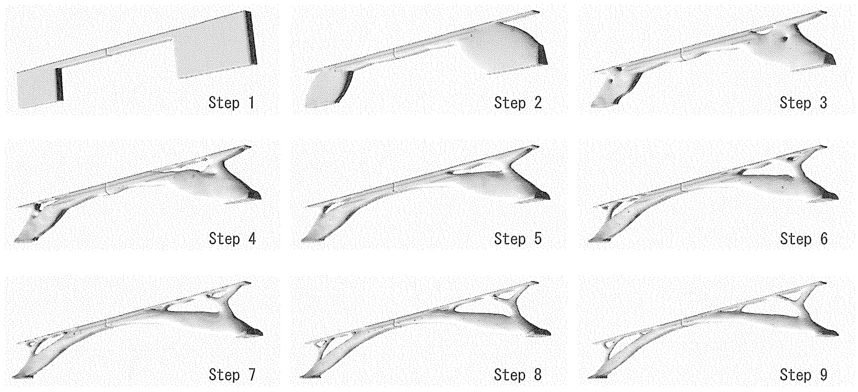


図6　三次元上路橋（進化過程）

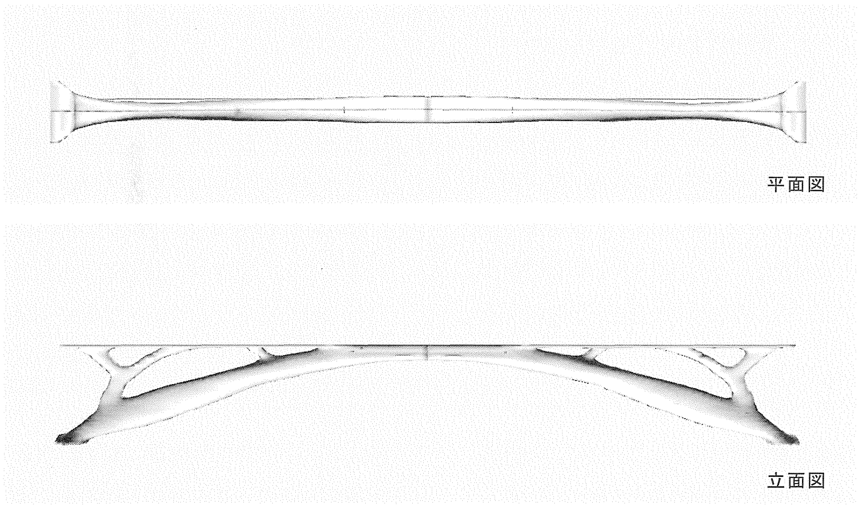


図7　三次元上路橋（詳細）

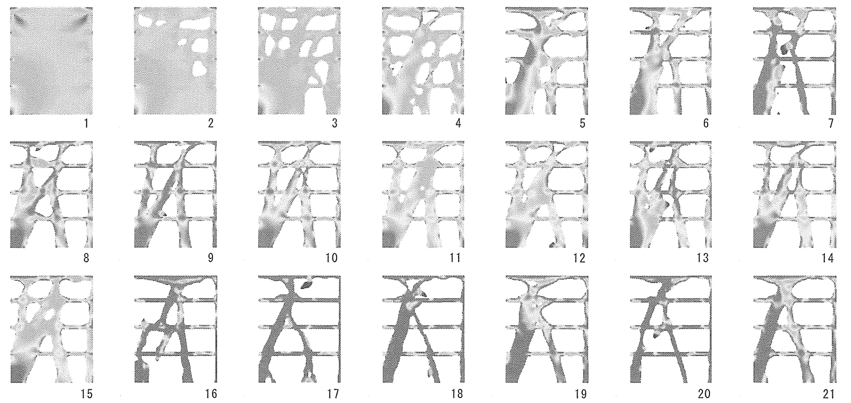


図8　壁面の進化過程

注3：von Misesの相当応力

多軸の応力状態での応力の強さを定義する量である相当応力のうち、等方性材料の場合に定義されるもの。多軸応力下で、これがその材料の一軸引張状態での降伏応力に等しいとき降伏状態に達するという条件がvon Misesの降伏条件と呼ばれるもので、鋼材などの結晶構造では実現象をよく説明する。

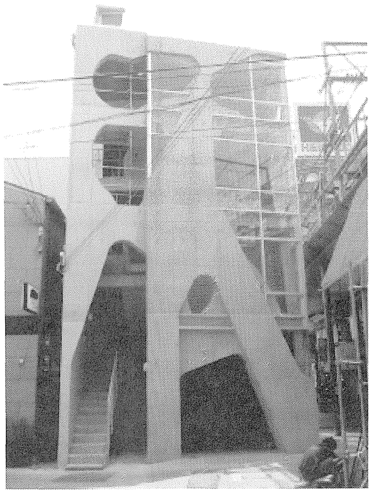


図９　芥川プロジェクト・西壁面

イン性などを勘案して最終的な形態に到達することになる。前節で述べた遺伝的アルゴリズムと同様、こうした意味で計算機は構造形態のプロポーザとしての役割を果たすことになるのである。図９に竣工したビルの西壁面の写真を示す。

8. 構造デザインの新思潮

コンピュータの高速化はチップ上にプリントされる電子回路の超高密度化に伴って加速してきており、４０年前に経験則として提唱されたムーアの法則は、今に終わると言われながらも依然として健在であり続け、新しい露光技術の登場によりさらに少なくとも７年延命されたと言われており、今後もしばらくは生き続けそうな勢いである。
建築計画に沿ってあらかじめ与えられた建築構造モデルが、風や地震などのような、時空間で複雑な分布を持つ外力に対して安全か否かを、構造力学や流体力学に基づくシミュレーションにより予測する技術は既に成熟して久しく、この分野の研究は、より精密に、より高速に、よりビジュアルに使い易くという、既存技術の改良、精細化へとその重心を移しつつある。
一方、数理計画法の数学にその理論的基礎を置く構造最適化の技術は、低価格でありながら超高速大容量の能力を持つコンピュータの力を得て20世紀後半に達成された構造位相最適化法への到達という、構造工学の研究史に残る画期的な新展開を背景に、徐々にではあるが確実に、その応用の裾野を広げつつある。このような、コンピュータ・テクノロジーの革新的な発展を背景とした、近年に見る建築構造設計の質的な変化は、与えられた構造物を解析する行為から、与えられた条件下で構造物を創生する行為へと、その流れの方向を大きく変化させる原動力となっている。新技術の導入に意欲的な建築家や構造家はすでにこの技術を建築形態を発想するデザイン・パートナーとして積極的に利用し始めており、これが近年に見る構造デザインの変化のひとつの特徴的な様相となっている。
近代建築のデザインが構造とスキンの意識的な分離を伴うものであったのに対して、近年のコンピュータ・テクノロジーのもつ未曾有の剛腕により実現された、構造最適化技術の構造デザインへの応用が、構造とスキンの融合を目指した新しい思潮を作り上げているようにも見ることができる。建築美が構造的合理性の近傍にあるとする、坪井善勝の言葉は今また、まさにその合理性に基づいて建築を創り出そうとする新しい試みにより、規範的言説から創造のための一つの手法を示唆したものへと形を変えて再認識されようとしているのである。

9. 世界の動き

国際シェル空間構造学会（IASS: International Association for Shell and Spatial Engineering）という国際学会がある。1959年に構造家Eduardo Torrojaによって創られた国際学会で、創設以来、毎年、世界中の都市で年次大会が行われてきており、そこには、シェルや空間構造に関する仕事を手がけている研究者、技術者、さらには建築家や工業デザイナーまで、幅広い分野の人々が世界中から集まり、最新の研究や作品を発表し合う活気のある集会が開かれている。この学会はまたその活動をより効果的にするために、いくつかの専門部会に分かれてそれぞれに20名前後のメンバーが所属して、個別にも活動している。筆者はその中の、WG13（数値解析）の副査を仰せつかっているが、最近、Sub-WG on Computational Morphogenesis（構造形態創生）を立ち上げた。副査に本学の大崎純先生に

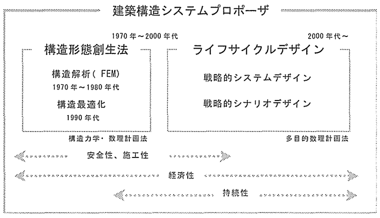


図10　建築構造システムプロポーザ

加わっていただいている。今後は世界の研究者、技術者に向けて、関連する技術や研究成果を発信する拠点の一つにしたいと考えている。2006年10月にはこのグループが中心となって、IWCM2006 (International Workshop on Computational Morphogenesis 2006) を名古屋大学にて行い、この分野で最近活躍している研究者、技術者、建築家らと情報交換を行い、今後のこの分野の将来展望を行いたいと考えている。

10. 今後の展望

国内全産業の生涯二酸化炭素排出量に建設産業の占める割合は約36%で、建築学会ではその約30%の削減が可能だとしており、これを目標として会員が各々の守備範囲でその達成に向けて努力することが求められている。既述の最適化の手法のうち近年注目を集めている、ヒューリスティック手法と呼ばれる一群の手法は、連続的な事象を扱う従来の手法とは完全に一線を画すもので、変数の非連続性と因果関係のブラックボックス化を許す大きな可能性を持つ手法である。私はこの手法は建築構造の生涯設計のための戦略的評価手法として今後極めて有望なものであると考えている。そこでは、建築構造の設計を、材料とシステムの時空間における最適配置問題として捉える新しい考え方が導入されることになる。
既述の構造形態創生と呼ばれる手法は構造を創り出す過程を構造力学の側面から支援するものとして位置づけることができ、その概要はほぼ見えている。一方、建築構造の生涯設計（ライフサイクルデザイン）に関してはまだ端緒についたばかりで、これからの研究開発に待つところが大である。
ところで、我々が求める建築構造物は、安全であり、環境負荷を抑え、かつ長期にわたり持続的に使用できるものでなくてはならない。こうしたことの実現に向けて構造の側から目指すべきものは、上記の二つを統合した構造設計の方法の提案だと思う。それらは、既に述べた高速大容量のコンピュータの効果的な利用によって実現することが可能である。図10の‘建築構造システムプロポーザ’がそれである。
そこでは、ライフサイクルデザインを時空間における最適化問題として捉え、これを既述の優良化手法のうちの遺伝的アルゴリズムで解く手法が採用できると考えている[8]。なお、この研究の当初、本学の宗本順三先生に住宅データを供与していただいている。

11.GW の夢

20世紀が終わろうとしていた1997年、コンピュータの分野で新しい世紀の予兆とも思える興味深い事件があった。IBMのコンピュータ、ディープ・ブルーがチェスの世界チャンピオンを破ったという事件である。実はこの対戦は二戦目で、一戦目で惜敗を喫したディープ・ブルーは、チャンピオンの手筋全てを完全に記憶し、リターンマッチに臨んだのであった。報道によればディープ・ブルーはそれまでの主な対戦記録を記憶し、それらのデータを高速検索しながら優位な手筋を探し出したということであるから、推理力と言うよりは記憶力により勝利したと言える。それでも、この「事件」はコンピュータを語る上で画期的な出来事であったことに変わりはない。それは想像を超えた記憶力が名人の持つ何かを超えた歴史的な出来事だったからである。

「先生の研究は私たちがやることをいずれなくしてしまうんじゃないですか。」
建築デザインを手がける建築学教室の同僚が、笑いながら話しかけてくる。
「そんな馬鹿な。人が介在しないデザインなどあるわけないでしょ。」
私は応え、彼もうなずく。

「（構造力学とは）構造物が外力の作用を受けた場合、構造物の内部にいかなる力を受けるか、また、いかに変形するかを研究する（学問である）」
先達の定義は今も厳正である。
ただ、この体系を用いて作り上げる、設計用の道具立ては何とかすることができそうである。
混沌の中に、模索は続く。ゴールデンウィークなのに...

2006年5月4日
大森博司
（名古屋大学大学院環境学研究科）

参考文献

[1] Turner, M. J., R. W. Clough, H. C. Martin and L. J. Topp, Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, J. Aerospace Sciences Vol. 23, pp. 805-823, 1956.

[2] Oden, J. T., Finite Elements : Introduction, in Handbook of Numerical Analysis Volume II: Finite Element Methods (Part1), Elsevier, pp. 3-15,1991.

[3] 大森博司、風袋宏幸、飯嶋俊比古、武藤厚、長谷川泰稔、構造形態創生法によるオフィスビルの設計、日本建築学会技術報告集、第20号、pp. 77-82、2004

[4] Holland, J. H., Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence, Cambridge, Massachusetts, London, England: the MIT Press, 1992

[5] Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, : Addison-Wesley Publishing Company, 1989

[6] Xie, Y. M., G. P. Steven, Evolutionary Structural Optimization, Springer-Verlag, 1997

[7] 大森博司、崔昌禹、等値線を利用した拡張ESO法による構造形態の創生、日本建築学会構造系論文集、第539号、pp. 87-94、2001

[8] 大森博司、野田賢、遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究、日本建築学会構造系論文集、第601号、pp.181-188、2006.3