

構造分野におけるシミュレーション

和田 章 東京工業大学教授
AKIRA WADA

構造解析の進歩

万物、と言っても言いすぎではない、物事の動きを解釈するためには、それを構成している要素を細かく分け、その基本要素が持っている性質を解明し数学的に表し、もう一度その性質を用いて数学的に全体を組み立て、同じ現象を起こして試みるのが役立つ。基本要素の解釈とそれを組み立てる手順に間違いがなければ、実際の挙動と手の内で数学的に起こして試みる挙動は一致するはずである。構造分野におけるシミュレーションはこの考え方に従って進められる。手順がすべて微分方程式を用いて数学的に陽に進められれば、結果として得られる解も陽な式で求められ、非常に有効である。例えば、両端をピン支持された棒のオイラー座屈荷重 $\pi^2 EI/L^2$ 、先端に力を受ける片持ち梁のたわみ $PL^3/3EI$ 、一質点系の固有周期 $2\pi\sqrt{M/K}$ 、など構造技術者なら常識として憶えている式はたくさんある。これらはシミュレーションと言うには簡単すぎるが、杭頭に水平力を受ける杭の地中の応力状態を表すチャンの式などはシミュレーションと言ってもよいくらいの結果が得られ、なおかつ結果は陽に表されている。板のたわみ形状、板の座屈モードなどになると、結果は陽には表せないが、フーリエ級数などを用いて展開し、結果を得ることができる。しかし、これらの問題を発展させ、任意形状の板の座屈モード、座屈荷重を知ろうと考えると、なかなか数学的な手順だけを繰り返していても、有効な解は得られない。

構造の分野に限っても、アポロ11号の月面着陸、霞が関ビルによる地震国日本での超高層建築の実現、今でも500人以上の乗客を載せて飛べる唯一の旅客機ボーイング747など、大きな変化はコンピューターを用いた構造解析・シ

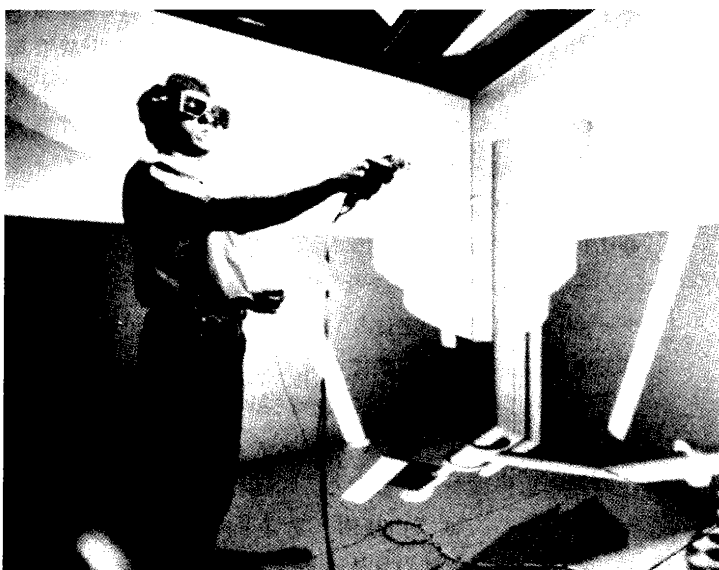


写真1 アルゴンヌ国立研究所の CAVE

ミュレーションが可能になった1960年代の後半に起きたことが分かる。それまでは手のつけられなかった複雑な構造物の応力状態、振動性状など、いろいろなことが手に取るように計算できるようになったからである。

これからのシミュレーション

あるところまで何かを進め、成果が得られたとき、手を休める人と、手を休めずさらに次へ突き進む人がいる。これは、お国柄の違い、組織の勢いの違い、個人の育ちの違い、食べるものの違い（例えば、肉ばかり食べているか、野菜の煮物ばかり食べているとか）、何が支配的か分からないが、ものへの取組みが違うことは確かである。シミュレーションへの取組みにも似たところがある。構造設計に当たって、今以上に精密な答えが得られても、入力も大変だし、ただ出力が多くなるだけで、答えは入力の一つひとつに影響を受けるし、入力する数値にも曖昧なところがあってなどを理由に、緻密な解析はもうやめようという話がある。別な人たちは立体的な空間を表すのに、 $100 \times 100 \times 100$ のメッシュでは不十分で（それでも100万点を扱うことになるのに）、 $1000 \times 1000 \times 1000$ のメッシュでやってみたいとか、それでも足りないなどと言っている。この場合の点数は10億点である。

結果の出力についても、始めのうちは数値がプリンターに打ち出されてくるだけで十分であったものが、プロッターへの出力、CRT（ブラウン管を用いた電子画像表示装置）画面への出力、カラー出力、動画による出力と、要求はとどまることはない。これらの先端的な方法が一般の建築設計・構造設計に役立っているとは思えないが、進む方はどんどん進んでいる。写真1は、米国のアルゴンヌ国立研究所の数値解析グループが持っている三次元表示装置である。プラスチックのヘルメットの頂上に頭の三次元的な位置と顔の向いている方向を知るセンサーが付いていて、ヘルメットに付いている眼鏡には画面の表示が左目用の画面、右目用の画面と変化することに同期しつつ左右代わり代わりを開くシャッターが内蔵されている。画面は前面・左面・床面の三面からなり、各画面の大きさは $3\text{m} \times 3\text{m}$ ほどの正方形である。これは CAVE と呼ばれるバーチャルリアリティの表示装置である。

こんなことに喜んでと、思われるであろうが、有限要素法を用いて原子力発電所内に設けられる大口径の二本の交差するパイプの振動による衝突、その部分のパイプの凹みの解析を行っている。この解析結果をこの装置に映し出す。想像できないと思うが、自分自身が有限要素でモデル化したパイプの中に入っていけるのである。二本のパイプがぶつかっ



1946年岡山県生まれ／東京工業大学卒業／同大学院修了／建築構造／工学博士／1995年学会賞（論文）受賞

ているところを触ることもできる。私が見学したときは、ただ変形が三次元に表示されていただけであるが、パイプの板要素に生じている応力状態をカラーで表示することも可能であろう。板厚方向の応力分布も、目の前で手で触るように見ることができるようである。一步進めば、別の部分を見ることができ、横に回って見ることもできる。

この辺で手を休めたらと考えている方には、もうやめろと言われそうであるが、鉄筋コンクリート構造の骨組や、鉄骨構造の骨組の非線形解析・動的応答解析の結果をこのCAVEで表示することを想像してほしい。振動してひび割れが入る梁の上に登ったり、歩いたり、コンクリートの応力状態を目の前で見たり、また一本一本の鉄筋の降伏状態を見ることもできる。

写真2は、東京工業大学の田村哲郎研究室が行っている流体解析の出力例である。正方形断面の角柱の隅角部形状を円弧にした場合の渦の発生状況を表している。視点を変えて、二枚の写真を載せてあるので、両目を使ってそれぞれの画面を見ると立体的に浮き上がって見えてくる。先に述べたCAVEを使えば、立体的に渦が発生し流れていく様を、あたかも風の流れの中にいるようにして感じることができるはずである。

構造設計とシミュレーション

突き進む側に立てば上に述べたような話になるが、これほど高度なシミュレーションは誰のために必要なのか。一般的な建築の構造設計を進めるときに、プロと言われる人が、こんなシミュレーションを見なければ、設計できないとは思えない。では、能力のない人を助けるために役立つかと考えてみる。確かに、こんな人にとって、目の前で、設計しようとする建物がどのように壊れるかを知ることが有意義である。感性を育てるのには役立つであろう。しかし、これを見たから、設計上の新しいアイデアを思いつくか、断面を決められるようになるかと言えば、無理のように思われる。やはりこれらの進んだ道具はプロのために役立つ、今までにない新しいことに挑戦するとき、その構造物の挙動を知るのに役立つのであろう。大阪大学の笹田剛史教授はコンピューターを用いたグラフィック・動画で多くの素晴らしい作品を出されて有名であるが、研究

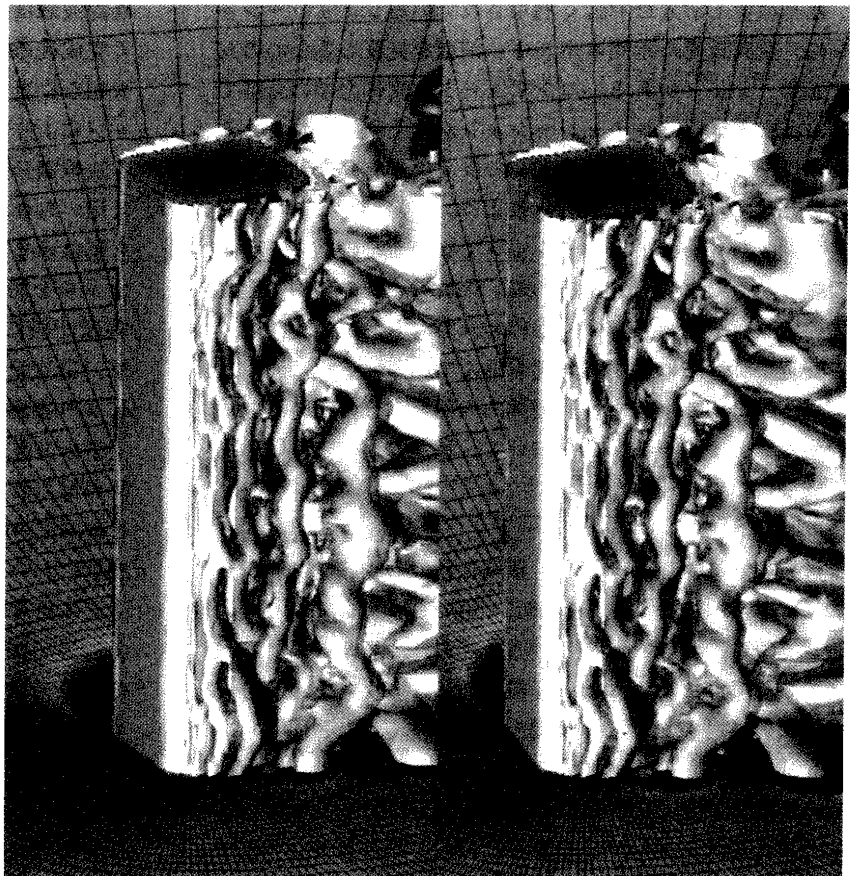


写真2 隅角部を円弧上に隅切りした角柱周りを流れる空気

室を訪ねると画用紙にいろいろなスケッチを描かれている。もともと絵心があるので、素晴らしい作品ができるのであろう。構造設計でも同じだと思う。

シミュレーションができて、それは多くの設計変数がある一組の値に固定したときに得られるただの一点にすぎない。その場合の現象は全体的にとらえたことになるが、設計変数を変えた場合に全体の挙動が変化するという意味での、全体的な傾向をとらえたとは言えない。解析に用いる数学、モデル化、各基本要素に与えた力学的性質などのシミュレーションを行うに当たっては、底に流れる基本原理は設定するから理解できるとしても、システム全体が持っているはずの全体としての基本原理を見いだせるかと言うと、難しくなる。たくさんのケーススタディを行って、これらの点をつなぎ合わせて全体を見ることになる。このとき、始めに述べた単純な形状にしか使えないとして実用性を諦めていた理論解や、そこに表れている式の形が非常に役立つ。これらの基本的素養をもって、最新のコンピューター技術を活用することが、システムの持つ仕組みを理解し、新しいものを創造する原動力になるのだと思う。シミュレーションだけしていてもイメージーションはわいてこない。当たり前である。