vol. 2003-4

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

December 2003

北海道 美瑛町 1978.

【特集】 現代の CAE

― シミュレーションの技法 ―

FEM Consulting Services for Engineering Practice
URL http://www.mech-da.co.jp

【1】試すという動作

チンパンジーは道具を使うことのできる動物である。枝を得れば孔を探り、筆を得れば絵を描くことができる。しかし枝の長短を試みて蜜を得たり、筆を選んで紙との相性を論ずるには至らないのが本来の野性の姿である。すなわち道具を使うことと、それらの比較を試みることの間には、非常に大きな隔たりがある。枝の長短を試す、あるいは筆の腰を試すという動作は、知性の産物に他ならない。

我々のような素人をロッククライミングの岩場に連れて行けば、ザイルを何度も引張り、身の安全を試みるだろう。知性は我々にこのような試行の繰り返しを要求するが、同時に、下手な知識があるほど、気温と強度の関係、鋭利な岩角と応力の関係、残された社会と自分の関係が頭をよぎり、ザイルを試す意欲はむしろ失われるのが通常である。試みることは知性の産物ではあるが、単にそれだけでは経験と度胸の前に敗れることが多いのも現実である。

木から落ちないだけではなく、筆を使い、筆を選ぶことを学び、そして最後には筆を選ばぬようになるまでには、長い道のりがあるはずである。今回はシミュレーションの技法について検討した。

【2】試すことの意味

1983年に出版された広辞苑の第三版[1]には、シミュレーションという用語が既に掲載され、以下の定義が与えられている。

> **シミュレーション　: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<u>または</u>電子計算機の挙動によって模擬すること。**

1983年という年代は、IBMに代表される汎用計算機上でようやく本格的な構造解析が運用されるようになってきた時期である。シミュレーションという概念の成立にはやや早い気もするが、最新の知見[2]と比較しても上記の定義は十分に広い範囲をカバーしており、また広辞苑の最新版（第五版）でも同じ記述が採用されている。

この定義に示されるポイントは3つある。まず第1はシステムを対象としている点である。システムを模擬するという行為は、やみくもに試行の場数をこなすこととは異なる。階級や富という付加価値が派生してはじめて、蜜は単なる食物ではなく、財という社会的システムの一部となり得るのである。この結果、枝の長短を試すという行為も、単なる繰返しの動作からシミュレーションという地位に昇格する。すなわち、全体系の中から簡単すぎず難しすぎもしない中庸な一部の複雑系を対象として選び、価値観と経済観念を伴って試行することによって、シミュレーションという行為は成立している。

第2のポイントは、同じ法則に支配された他のシステムによる代替という考え方である。いきなりザイルに生命を預けることができないから試みに引いてみるのである。そのためには本番と試行の間に同形性、あるいは類似性を期待できることが必要である。最近では、実験もまたシミュレーションの一種であるという認識がようやく一般的なものになってきた。実験であれ解析であれシミュレーションという技術は、代替品を探すという作業を通じて現象の本質を可視化する技術である。単純な系、あるいは極端に複雑な系の設計においてシミュレーションが現物主義に負けてしまうのは、現物に代わる有効な代替品を見出すことができないからである。わからないからシミュレーションしてみるという立場は厳に戒められなければならず、常に結果を予見する能力が求められる。

第3のポイントは上記の定義で下線を付した「<u>または</u>電子計算機の利用」という部分である。1983年当時の認識がどの程度のものであったかは不明であるが、相似則と対等に電子計算機を挙げるという大胆さは注目して良い。疲れずに試行を繰返して全ての可能性をつぶす、更に一歩踏み込んで乱数発生のような手法で確率現象を解明するといった特質は、計算機の利用なくしては実現が難しい。小よく大を制するのが我々の美意識であるため、力ずくの計算はなかなか共感を得にくいが、圧倒的な物量を投入することで解決されてしまう問題があることも否定できない。つかず離れず計算機と付き合う呼吸が必要であろう。

Fig. 1は、製品開発におけるCAEの位置づけの変遷を示す図である[3]。自動車の開発を念頭に置いていると考えられるが、旧来のCAEがいわゆるAdvanced CAEとして開発ラインの外側にあったのに対し、現代ではCADとCAEが織物のように重なりながら開発ラインを構成している。この図ではIn Process CAEという表現でこの構造を表している。

図中、開発時期の最後にはCAEによるValidation（物理的正当性の確認）、また生産に移る最終の設計工程には実車によるVerification（数学的精度の実証）が置かれている。ValidationとVerificationという用語法で検証の役割を区別しているのも興味深いが、いずれにせよシミュレーションという大きな枠組の中でCAEと実験の両者をとらえるのが現在では正しい理解である。現代のシミュレーションは単に模擬の手段ではなく、適切な代替システムを用いることによって複雑なシステムを開発・運用するための手法として、その意義を新たに問い直すことが必要となってきている。

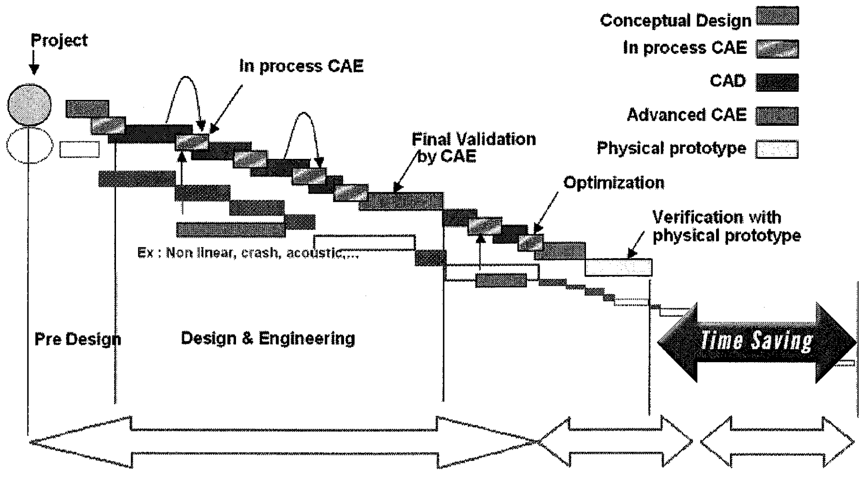

Fig. 1　Virtual Product Developmentの概念 (3)

【３】シミュレーションの方法Ｉ：モデル化とその水準

シミュレーションが本番を代替する行為であるならば、代替品に要求される性能は、本番のエッセンスを失わず、かつ簡便・安価で繰返し使用が可能ということであろう。このような本番のデフォルメを一般にモデル化と称する。モデル化を、以下の３つないし５つの水準に分けて考えてみよう。

■ 水準1：スケールモデル

これはとりあえず形状を縮小・拡大して取扱い可能な寸法にするという水準である。同時に細部の形状の省略や増幅、あるいは３次元から２次元への投影といった手段によって、空間的な情報量が操作される。このような操作はダイレクト・アナログ(2)とでも呼ぶべきもので、図面、建築モデル、ポンチ絵といったものが該当する。

FEMのソリッドメッシュの分割は、この水準に分類される作業である。

■ 水準2：相似モデル

船や飛行機のモデル化では、流体力学的な相似性を保つために、レイノルズ数に代表される無次元数を実機と合わせることが行われる。このような手順によって、単に形状の同形性だけでなく、慣性力と粘性力といった機能情報の同形性の付与が可能になる。

FEMで言えば、ソリッドに代えてシェルやビームのような構造要素を適用するのはこの水準の作業である。

■ 水準3：抽象化

ここまでのモデル化の水準では、形状の同形性が保存されているため、現象の可視化の面からは直接的でわかりやすい。しかし反面、形状を合致させるという操作は、モデル化の自由度に対する束縛でもある。この束縛を抽象化によって解除すると、シミュレーションは個々の問題から離脱し、一般性は飛躍的に高まる。

例えば、質点あるいは剛体という概念を力学に導入すると、物体自身の変形（物体内部の弾性波の伝播）を無視することができる。このような置き換えによって質点の力学あるいは質点系・剛体の力学が形成され、個々の物体の運動を体系的に説明できるようになったことは、抽象化の最も良い例である。

FEMにおける抽象化の例としては、材料の構成則を挙げることができる。FEMでは構造の空間的な広がりはメッシュで表現されているが、材料の微細組織まで表現されているわけではない。材料の力学的な振る舞いは、抽象的にモデル化された応力とひずみの関係（構成則）で表現される。

（■ 水準4：CAEによる具象化）

シミュレーションに限らず、工学の古典的な価値観は、水準１から水準３までに示したように抽象化の度合いを高め、一般性を向上させることにあったと考えてよい。しかし1950年代にFEMが現れたとき、特に産業の分野でこれが重視された理由は、FEMが抽象化とは逆の方向性、すなわち具象化を高度に実現する道具であったからに他ならない。抽象化によって進化してきた旧来の概念は、具象化の道具を得てはじめて広範な実用性を与えられ完成した、と見ることができる。CAEという用語は、このような事情を背景にした用語である。

（■ 水準5：計算機による具象化）

具象化による抽象性の補強は、計算機の能力向上に負うところも大きい。水準１と２に示したメッシュと要素のモデル化、また水準３に示した材料構成則のモデル化の理論は、古典的な基礎工学が完成した1970年代後半までには概ね出揃っていたと考えてよい。当時の汎用FEMのマニュアルを見ても、現在の内容に比べてそれほど遜色はないからである。しかしながら、これらFEMの理論が真の実用性を獲得するには、単に計算速度だけではなく、グラフィックスやCADのような周辺技術を含めて、計算機技術全般の水準が向上する必要があった。

一方、具象化の能力が向上してくるに従って、CAEは新たな問題を抱えるようになってきている。それは、CAEを職能としていかに考えるかという問題である。例えば自動車を例にとると、解析の応答精度を上げるためには、より細かいメッシュ分割が必要である。しかし、メッシュが細分化し現物の形状に忠実になるほど、抽象化の水準は低くなり、モデルと現物の区別があいまいになる。

エンジニアに限らず、職能の地位は業務の抽象化度の水準に比例していると言って過言ではない。これは儒教の昔から続く現実である。最近では、メッシュ分割の技術がようやく学問の研究領域として認知されてきたという指摘(4) もあるが、少なくとも従事する者に葛藤をもたらす現今の矛盾を解消してゆく努力が必要である。

抽象化について、次節で再度見直してみる。

【４】シミュレーションの方法Ⅱ：抽象化とその手順

Fig. 2は質量、ばね、ダッシュポットという要素によって振動系を抽象化した例である。この例では形状の同形性は追いやられ、運動力学的な機能の同形性だけが抽出されている。抽象化と具象化に関連して先程のような悩みが無い訳ではないが、少なくとも現在の我々は、以下の式を用いることによって抽象化の恩恵に浴することができる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(x) \qquad \cdot\cdot(1)$$

一方、Fig. 3に示す電気回路が以下に示す特性を示すことも我々にとっては既知である。(1) 式と (2) 式は全く同じ形式を有し、いずれも振動を表現する。

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + Cq = \upsilon(t) \qquad \cdot\cdot\cdot(2)$$

抽象化はこのような数学的なモデルの導入を伴うことで一般性が高まる。以下に3ステップに分けて検討してみよう。

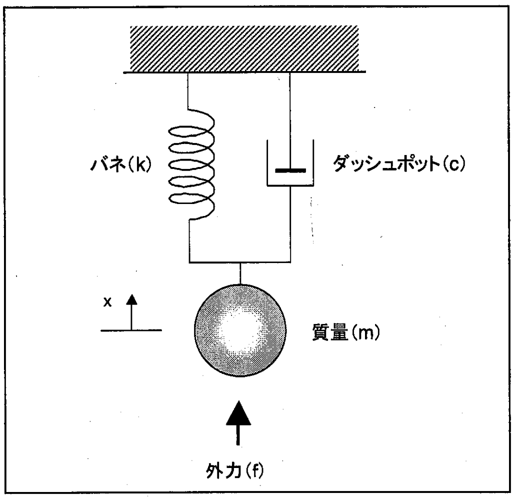

Fig. 2　力学系の振動

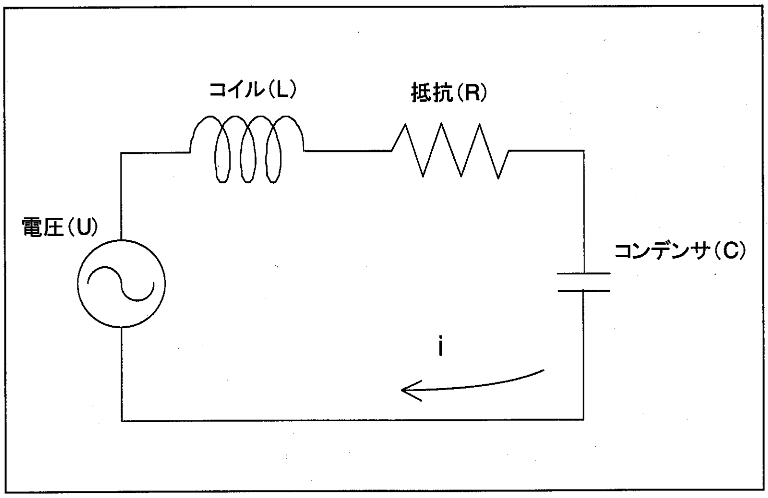

Fig. 3　電気回路の発振

■ 数学モデルの導入：Validation の領域

シミュレーションに限らず、自然科学の方法論は、観察と推論そして実験による検証からなる。しかし残念ながら、これらの方法はいずれも傍証的な手続きにしかすぎない。なぜなら自然現象は不確定であることが本質であるからである。すなわち自然科学の審判の場は自然にしかないが、自然は不確定であるがために、自然科学の正当性は自然科学以外の方法によって保証される必要がある。

このような課題に対して、例えばファインマンは、検証手段が実験ではないゆえに数学は自然科学の範疇にはないと明言し、それをもって自然科学における真理追究の柱として数学を位置づけている（参考文献（5），第3章，3-1）。

このような理解には多くの異論もあろうが、いずれにせよ抽象化の最初のステップは、記号化と数式化による物理的概念の導入から成る。これによってシミュレーションは実現象から離れ、抽象化された閉じた世界の中で泳ぐ可能性を手に入れることになる。もちろん導入した数学モデル（偏微分方程式）が含有している以上の解を求めることはできないので、このような特定の数学モデルの適用の正当性を自然科学（物理学）の知見と照らして検証する必要がある。この物理的な検証の手続きを、Validation と称する[6]。

なお、これらの数学モデルの導入は相似則の発見につながり、工学の一般性を大きく向上させる結果となっている。電気工学の刺激応答理論による振動と粘弾性の説明、移動速度論による熱伝導と拡散の説明といった貢献は、相似則によるものである。またFEMの数学的な背景が明らかになることによって、構造力学以外の分野へFEMの適用範囲が広がった経緯もよく知られている。

■ 解析的解法：Validation と Verification の中間領域

工学的な問題の解析的解法は、長い歴史を有している。以下に示す例は1775年にダニエル・ベルヌーイが有限長の弦の振動を解析し、長さ l、線密度 σ、張力Kなる弦の自由振動変位 ξ を、一端から測った距離 x に対して表した結果である。

$$\left.\begin{aligned}\xi &= \sum_{m=1,2,\cdots}^{\infty} \sin\frac{m\pi x}{l}\left(A_m\cos\omega_m t + B_m\sin\omega_m t\right)\\ \omega_m &= \frac{m\pi}{l}\sqrt{\frac{K}{\sigma}}\end{aligned}\right\}\qquad\cdots(3)$$

弦の振動の方程式は単純な微分方程式であり、上記のように整然とした形で解が与えられると解釈されがちである。しかしながらこのような見方は関数表を手にしている現代の我々の勝手な理解であって、三角関数の本当の姿は手に負えない無限べき級数である。sin や cos という符号は、単に外見の簡単さを装った便宜にしか過ぎない。

従って、これらの形式的な解が得られたとしても、実際の数値を求めるには、無限級数の和を求めるために膨大な計算作業を必要とした。物理モデルが如何に適切に導入されたとしても、数学的な手順そのものが十分でなければ解を引き出すことができないことを、この事実は物語っている。シミュレーションの過程において、数学的な手順の妥当性を検証する手続きを Verification と称する[6]。

数学の力には限度があり、数値的方法を使わなければ駄目だということを悟るまでにはずいぶん長い年月がかかった。関数の数表の作成が国家的事業として行われるようになったのは、第1次世界大戦を経て1930年代に入ってからのことである[7]。

■ 数値的解法：Verification の領域

数値的解法が現代のシミュレーションの中核をなす技術でありながら、強引に解を求める手法に違和感を感じるのは何故だろうか。あらゆる物理法則は近似法則であるにもかかわらず、数式化されると厳密性が必要以上に強調され、近似的な解法を拒絶したくなる心理的作用もあるだろう。

また非線形問題では増分的に解が求まるために、極値や固有値といった現象の全体像を把える情報に欠ける短所がある。入力に対する一過性の解だけでは、条件のゆらぎに対する応答のゆらぎを判断することができず、シミュレーションの信頼性を保証することはできない。また設計という業務は、もともと逆問題としての性格を持っている。すなわち結果から良い前提条件を求めたいという願望があるために、前進的な増分解法ではいかんともしがたい面もある。

しかるに数値的解法が重宝されるのは何故だろうか。それは、とにかく結果が得られるという一点に尽きる。人間は否が応でも見聞きしてしまう動物である。偶像崇拝が禁じられるのと同時に、宗教画が信仰の拠りどころでもあった現実を思い出すのが良いかもしれない。また天体望遠鏡や顕微鏡がそれぞれの学問分野で果たした役割を考えれば、解析が実行され結果が視覚化されることの意義は重い。シミュレーションにおける可視化の意義については、例えば参考文献[2]を参照されたい。

【5】シミュレーションの方法Ⅲ：抽象化技術のポイント

抽象化がシミュレーションの本質であるという観点に立ち、その技術上のポイントについて検討してみよう。

■ 空間的なスケール

Table 1[5] は我々が住む世界の空間的なスケールを示している。およそ10^{-15}mから10^{27}mの範囲に広がっていることがわかる。一方Fig. 4[8] は、これらの寸法のスケールにどのような工学があてはまるかを示す図である。本図の出典は1970年代の発行であるが、構造工学の守備範囲はmmのオーダと認識されていたことがわかる。

現在では機械工作の微細化が進んだとはいえ、通常のFEMが扱う領域は高々μmである。実際、クラック先端の応力特異場も、1μm程度にメッシュを分割すれば材料力学に示される理論解を表現することは可能である。しかし分解能が1μm程度の領域では、荷重として表面力の効果が現れてきたり、既存の材料モデルの妥当性が保証できなくなり、FEMの信頼性には限界がある。

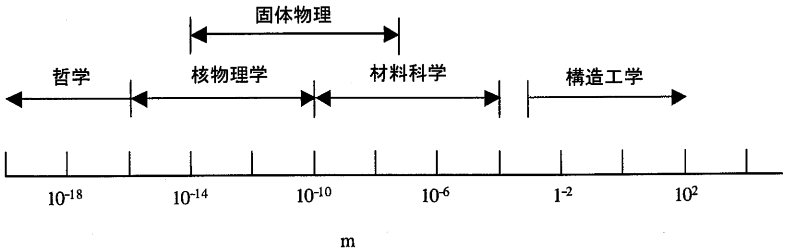

Fig. 4　寸法スケールと科学の領域[8]

Table 1　様々な空間的スケール[5]

光年	m	
		?????
	10^{27}	
10^{9}		宇宙のはて
	10^{24}	
10^{6}		いちばん近い銀河系まで
	10^{21}	
10^{3}		われわれの銀河系の中心まで
	10^{18}	
1		いちばん近い恒星まで
	10^{15}	
		冥王星の軌道半径
	10^{12}	
		太陽まで
	10^{9}	
		月まで
	10^{6}	
		スプートニクの高さ
	10^{3}	
		テレビアンテナ塔の高さ
	1	子供の身長
	10^{-3}	
		食塩のひとつぶ
	10^{-6}	ウィルス
	10^{-9}	
		原子の半径
	10^{-12}	
	10^{-15}	原子核の半径
		?????

一方、対象が大きい場合はどうであろうか。人工的な構造物であれば、その寸法の上限は10^{3}m程度であろう。スケールダウンすればどれ程の寸法でも解析できるように思えるがそうではない。次項に示すように、境界条件がそのような過大なスケールに支配されているとは限らないからである。

■ 空間的なスケールと境界条件

FEMでメッシュ分割するという考え方は、全体形状を見るマクロな視点とメッシュ内部を見るミクロな視点に連続性があることを前提としている。これは顕微鏡の倍率を次第に上げる操作と同様で、たとえ倍率が変わったとしても、視野内を支配する法則性（例えばここでは材料モデル）は変わりがないという仮定である。

しかしモデルとして切り取られた以外の空間の条件は、外部境界条件として解析者が与えなければならないにもかかわらず、内部と同じ法則性で支配されている保証はどこにもない。例えば加熱された物体の外部で沸騰が起こっているとしよう。物体の内部は原子間の熱のやりとりに起因する熱伝導率で記述されているのに対し、周囲ではmmの大きさを有する気泡が激しく発生・消滅しているのである。単に空間的なスケールだけでなく、時間的なスケールも伝熱機構も全く異なる現象によって支配されている。

シミュレーションの妙味は、物理現象から離れて数学的な抽象化が可能である点にあると先に書いた。しかしこれは現象の一部をうまく切り取った内部だけの話である。空間的な境界条件だけでなく、時間的な初期条件、あるいは現象そのものの連成・非連成の問題があるため、物理現象からの完全な離脱を計算に期待するのは困難である。現代のシミュレーションにおいて基礎工学の重要性は更に増すことを認識したい。

■ 時間的なスケール

時間情報のデフォルメは、空間的な寸法のデフォルメに比べてより重要な意味を持っている。加速クリープ試験のような例外はあるが、一般に時間軸の勝手な操作は実験では許されず、シミュレーションに頼らざるを得ないからである。

一方、設計で考慮すべき荷重は、衝撃、繰返し、緩和、死荷重といった具合に、時間スケールに対して様々である。また、それによってもたらされる物理現象も、慣性力、クリープ、疲労、腐食というように千差万別である。時間は、その長短だけではなく、微分形として速度・加速度、また周期性として周波数、といった形式でそれぞれの現象に関与している。

Table 2とTable 3は身のまわりの時間的なスケールとスペクトルの分布を示す(5)。物理学的にはこれらの分布範囲は著しく広大であるが、人間の知覚範囲は可視光について$5\times10^{14}\sim5\times10^{15}$Hz、また動的な変化に対する眼の追従性の上限は10～50Hz程度にしかすぎないので、シミュレーションによる可視化はこの範囲を狙って時間スケールのデフォルメを行うことが必要になる。

なお構造系のFEMでは、時間の取扱いに関連して陽解法と陰解法の使い分けが重要である。陽解法のプログラムは、例えばLS-DYNAに代表されるような動的陽解法と呼ばれる手法が多く市場に提供されている。動的陽解法では、運動方程式の時間積分において連立方程式を解くことなく解が得られ、また不平衡力に対して反復計算を行わないという利点があるので、強度の大変形を伴う衝撃問題を、収束性のトラブルに妨げられることなく短時間に解くことができる。この結果、基本物理量である[長さ・質量・時間] から構成される現象を、あるがままにモデル化し、現象の多様性をあるがままに見せてくれる特徴を持っている。

一方、陰解法ではABAQUS, MARCといったプログラムが代表的である。ニューマーク・ベータ法に代表される時間積分法も用意されているが、開発の主眼は、強い非線形問題を反復法で静的に解くことにある。陰解法を使用した場合、以下に示すように、現実の問題から [時間] を排除できる利点は極めて大きい。

陰解法の利点
- 慣性力のない剛性だけの特性を解析できる。
- 経過時間を気にすることなく荷重を組み合わせられる。
- 振動、ひずみ速度依存性、接触、熱伝導などの現象を、それぞれ別個の [時間] で管理できる。
- すなわち [時間] は単なる解析の進行の指標でしかなくなる。

LS-DYNA, ABAQUSでは、これら陰・陽両解法の利点を組み合わせ、1つの解析の中で両者をスイッチして使い分けるような手法が提案されつつある。今後の成果を待ちたい。

【6】不確定性と確率過程

陽解法と陰解法の対比から明らかなように、現代のシミュレーションでは、可能な限り現実に近いか、あるいは如何にデフォルメして現実の特徴を際立たせるか、の2つの立場がある。これは再三述べてきたように、古典的な抽象化技術と、先端的な具象化技術の双方が熟成し、拮抗してきた結果である。

しかし、いずれの手法によっても不完全にしか表現できない課題が残されている。それは現象の不確定性の表現である。不確定性は、解析モデルの内部に与える法則性、および外部の初期条件と境界条件に与える法則性のいずれにも潜む。また時間・空間いずれの情報量の中にも存在している。

例えば、夏の川を見るのか冬の川を見るのか、あるいは1年を通して見るのか、ないしは100年の計を図るのかで川の水位に対する見方は完全に異なる。我々には、特定の時間と空間の領域に対する期待値としてしか、川の水位に接することが許されないからである。

Table 2　様々な時間的スケール(5)

年	秒		何の平均寿命か
		?????	
	10^{18}	宇宙の年齢	
		地球の年齢	U^{238}
10^{9}			
	10^{15}		
10^{6}		最古の人類	
	10^{12}	ピラミッドの年齢	
			Ra^{226}
10^{3}			
	10^{9}	人間の寿命	H^{3}
1			
	10^{6}		
		1日	
	10^{3}	光が太陽から地球まで伝わる	中性子
	1	心臓のひとうち	
	10^{-3}	音波の周期	
	10^{-6}	ラジオ波の周期	μ中間子
			$\pi^{\pm}$中間子
	10^{-9}	光が1フィート伝わる	
	10^{-12}	分子回転の周期	
	10^{-15}	原子振動の周期	
			π° 中間子
	10^{-18}	光が原子を通る	
	10^{-21}		
		原子核振動の周期	
	10^{-24}	光が原子核を通る	奇妙な粒子
		????	

Table 3　様々なスペクトル(5)

Hz	名称	およその性質
10^{2}	電気的攪乱	場
$5\times10^{5}\sim10^{6}$	ラジオ放送	波動
10^{8}	FM～TV	
10^{10}	レーダー	
$5\times10^{14}\sim10^{15}$	光	
10^{18}	X線	粒子
10^{21}	γ線	
10^{24}	γ線(原子核の)	
10^{27}	γ線("人工的の")	
	γ線(宇宙線のなかの)	

地震のような統計的にしか見ることができない現象、あるいは人工物であっても不特定多数の使用に供される製品では、荷重条件すら明確に定め得ないことが少なくない。このような問題に対しては、時刻歴応答のような一過性の過渡解析は、単に1つの可能性を追うだけであるので、解析手法としても十分ではない。漠然とした回答にしかならないが、周波数領域に変換してスペクトルを幅広げするとか、何らかの不確定性に対する補償が求められる。

注意しなければならないが、仮想現実という用語が先行し、あらゆる条件を投入した大規模・複雑な解析の結果は、意外に平凡であったりする。抽象化された本質は、具象化された全体像の中に容易に埋没してしまうからである。不確定性に対する明確な手立ては現状、思いつかない。

【7】変化の追跡と存在の確認

不確定な現象を追うとき、2つの観点を考えることができる。1つは現象の変化の追跡であり、いま1つは存在そのものの確認である。例えば、時刻歴応答の解析は変化の追跡であり、スペクトル応答の解析は非常に漠然とはしているが存在そのものの評価である。

吉永小百合という女優がいる。幼少の頃から古いメディアを通して知っている存在であれば、彼女の存在を疑う者はいない。その変化が我々にとっての興味である。現実の自分と比較し、彼女が何を演じ何を楽しむのかを知りたくて、彼女の変化を追うのである。自分の生活が主であり、それを評価する指標が彼女である。自分を現実、女優をシミュレーションとおけば、旧来の我々の視点を理解できる。

一方、浜崎あゆみという歌手は不思議である。本物以上に本物である存在を、彼女のポスターを通して我々は見ようとしているように思われる。映像で与えられる変化を如何に追ったとしても彼女の現実を評価することは難しく、おそらく我々の期待もそこには無いのではないだろうか。

本来、Professという言葉は、自然世界に対する自分の立場を宣言することを意味している。特定の時間と空間の領域を宣言し、その抽象化を図るのがプロッフェッショナルの仕事であった。これは解析だけではなく、絵画であれ音楽であれ、およそ物理世界とその表現の接点を意識する行為の全般にあてはまる姿勢であったはずである。しかし単にそれだけではシミュレーションの意義を問うことが難しい時代になってきた。今後の検討を期したい。

謝辞
Fig. 1の引用は、エムエスシーソフトウェア株式会社・山内俊一氏，藤田寛子氏の好意によるものである。日頃の御引立てに厚く御礼を申し上げる。

参考文献

(1) 新村編，広辞苑 第3版，岩波書店，1983.
(2) 廣瀬，小木，田村，シミュレーションの思想，東京大学出版会，2002.
(3) 山内，2004 MSC.Software Exective Meeting資料，エムエスシーソフトウェア株式会社，2004.
(4) 菊池，西垣，関口，非線形問題におけるメッシュ分割と要素特性，第2期非線形CAE勉強会テキスト，特定非営利活動法人・非線形CAE協会，2002. (http:www.jancae.org)
(5) R.P.Feynman 他，坪井訳，ファインマン物理学 I 力学，岩波書店，1967.
(6) 例えば，野口，石原，田中，ベンチマークの数理，第3期非線形CAE勉強会テキスト，特定非営利活動法人・非線形CAE協会，2003. (http:www.jancae.org)
(7) 早坂，音の歴史，電子情報通信学会，1989.
(8) C.R.Barrett 他，井形 他訳，材料科学 1，培風館，1979.

表紙：前田真三，凍る葉模様，北海道美瑛町，1978.

株式会社 メカニカルデザイン
〒182-0024 東京都調布市布田1-40-2 アクシス調布2階
TEL 0424-82-1539　　FAX 0424-82-5106
E-mail:comm@mech-da.co.jp