

vol. 2009-1

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

August 2009



京都・寂光院, 2008年11月

【特集】 現代のCAE

—シミュレーションに従事するということ—

*FEM Consulting Services for Engineering Practice
Find Innovation in Tradition 2008-2019*

【1】 職業としてのシミュレーション

シミュレーションという技術は、大規模な複雑系の中から難しすぎもしない簡単すぎもしない中庸なシステムを取り出し、その一部をより簡単なシステムで代替させることによって物事の本質を見きわめる試みです。今日、このような試みが計算機上で手軽に実感できるようになると、理論、実験、生産といった領域を分ける壁が低くなり、われわれの経済行為はひろくシミュレーションの一種であるという認識が広がってきました。経済行為は数の問題であるので、シミュレーションという新しい考え方の方向性が市場の動向によって左右されることがありえます。現在の環境において、職業としてシミュレーションに従事するという事はどういうことでしょうか？ 今回はそれについて考えてみましょう。

私たちが従事するシミュレーションは、工学という専門技術の上に立脚しています。機械工学を例にとると、機械工学便覧⁽¹⁾の索引に掲載されている専門用語の数は1万語におよびます。法律、医学、哲学などの諸分野の辞書群をみても、およそ1万という数は一般性のある数字であるので、専門分野の中核をなす語彙数は平均的にこの程度と見てよいと考えられます。より特化した分野、例えば座屈⁽²⁾という領域に注目してみると、この数は約1千にしばられます。一方、日常生活に必要とされる最低限の語彙数は5百⁽³⁾また、平均的な知識階層の語彙数は約5万とされています。すなわち専門家と呼ばれる人々は、5万の基礎用語のうえに1万の専門用語を持ち、さらに1千の特殊な用語体系を身につけた人々であるということが出来ます。

1万という用語体系を身につけるためには、何度も繰返されてきた科学の標準的な手順を学ぶことに、若い時代の大半を費やさなければなりません。たとえ専門家として独り立ちした後も、他人によって既により良く解決された問題を自分で確認することに、持てる時間の多くを費やすのが日常であると思われれます。一日に一語を学んだとしても1万語を習得するには30年の歳月を必要とします。その間に家庭を営み社会生活を並行しなければならないことを考えると、科学に限らず専門家として生きるということは誰にも出来ることではないように思われれます。

【2】 計算力学関連の国際会議における研究

Fig.1は、最近よく話題に上がるマルチフィジックスという概念を、空間として表示したものです。この図はFish⁽⁴⁾およびTaylor⁽⁵⁾による知見を参考として描きました。現代のシミュレーションが見る世界観とってよいでしょう。Professという単語は神に向かって自分の立場を宣言する、すなわち世界観を表明するという意味をもっているのです。この図を解釈することによって職業・Professionとしてのシミュレーションのヒントが得られそうです。

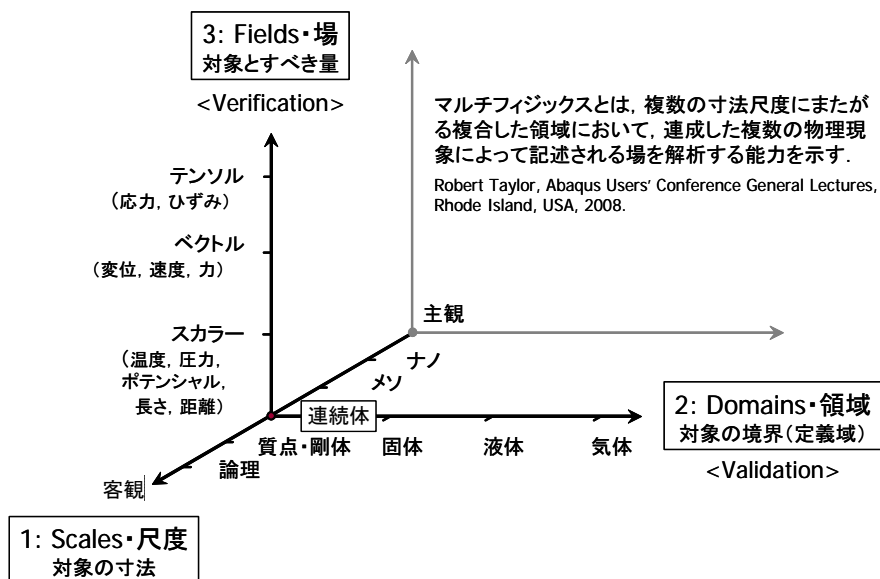


Fig.1 マルチフィジックスの属性空間

世界観の基礎には、個人として自分を認識するという大きな前提があります。したがって Fig.1 の座標の原点には主観をおきます。人間が自分を認識する能力は、最も単純には外界を目で見ることによって達成されます。この視線の軸が Fig.1 の第 1 軸 [Scales, 尺度] です。視覚の分解能はそれぞれの時代に依存していて、たとえば古代においては尺度として論理が最初にあったことでしょう。思考上の真理には際限がないので、真理に杵をはめ、現実から遊離させないために、まず論理があったはずで、論理は言葉あるいはロゴスと読み替えてもかまいません。

同時に実用という観点からは、たとえば望遠鏡が占星術から天文学を切り離したように、視覚的な分解能を上げる技術が新しい世界観を成立させました。これは何も特定の発明者の働きをいうものではありません。一般の民衆が望遠鏡を眺めることによって天文学は広く知られるようになり、科学は呪術の闇から離脱することができたからです。すなわち実用化というのは、論理によって切り開かれた科学をこの世に広め、揺るがない世界観を社会的に確立させてゆく働きをもちます。

今回の経済不況のなかで、「われわれは本当に科学の一派に属しているのか」という基本的な自信を私たちは失いかけています。実用に役立つための努力は、紛れもなく私たちの本質的な善意の結果であったはずで、工学が支えてきたものに、あらためて自信を持つようではありませんか。

今日の私たちは、質点あるいは剛体の力学を経て、連続体力学という地盤の上に立っています。連続体の力学は一般的には μm から数千 km のオーダーの尺度を対象としています。近い将来においては、メソあるいはナノの領域に観測の手がおよぶことでしょう。近代的な観察は、常にその分解能を意識して問題のスケールを考え、そのスケールのなかに対象を切り出すことによって成立しています。

一方、その観察を工学の問題とするためには、尺度だけではなく物理モデルとしての定義域を明らかにする必要があります。Fig.1 の第 2 軸に示す [Domains, 領域] は、この定義域に相当します。この図では連続体の領域の例として固体、液体、気体を挙げてみました。物理モデルが与えられると、その次の展開としてモデルに対応した計測量を考えることができます。図中の第 3 軸に示すように [Fields, 場] を考えると、計測量はスカラー、ベクトル、テンソルの階層構造に分類することが可能です。

ちなみにシミュレーションの検証手段として最近話題になっている Validation & Verification というのは、それぞれ物理的なモデルの妥当性と数値的な計量の妥当性を指す言葉です。やや強引な見方をすれば、Validation というのは Fig.1 における第 2 軸すなわち定義域の物理的な妥当性を、また Verification というのは第 3 軸すなわち場における計量の数値的な妥当性を検証する手続きであるということができます。

【3】非線形 CAE のための材料モデリング

Robert Taylor は、マルチフィジックスの概念を次のように定義しています⁽⁵⁾。

"Multiphysics simulation is the ability to simulate multiple fields in multiple domains across multiple scales."

「マルチフィジックスという用語は、複数の寸法尺度にまたがる複合した領域において、連成した複数の物理現象によって記述される場を解析する能力を示す。」

Fig.2 は、Fig.1 の上に具体的な例を重ねて描いたものです。連続体として貼られた平面の上にシングルドメイン対シングルフィールドの関係の例を考えると、これは通常の変形体を単独に取出した解析に相当します。またシングルドメイン対マルチフィールドの例としては、ひとつの鋼材の上に貼られたひずみゲージが身近な例でしょう。ひずみゲージの上では、電気場と応力場という 2 つのフィールドが共存していることを利用して鋼材のひずみが計測されています。

またマルチドメイン対シングルフィールドの例としては、速度の異なる 2 つの流体が面を接して流れ、その界面上に巻き込みが形成されているような場を考えることができます。さらにマルチドメイン対マルチフィールドの代表的な例としては熱空力の問題があるでしょう。マルチフィジックスという用語は、商業的な使われ方が先行したきらいがありますが、このような切り分けをすることで、取り組みの手がかりが得られるのではないのでしょうか。

このように見ると、マルチフィジクスの考え方はあたかも現代的な思想のように感ぜられますが、注意しなければならないことがあります。それは、物質を固体と流体に区別して考える、あるいは物理量をテンソルとして階層的に考えるといった思想が明瞭になってきたのは100年にも満たないということです。実際、現在のわれわれは、固体と流体を区別しない方がむしろ高い水準で物質の挙動を表すことができるのではないかと、あるいは物理量として真値を求めようというよりはむしろ真値がないことを前提とした方がより複雑にシステムを理解することができるのではないかと、といった新しい境地に達しようとしています。

すなわち、真理を把握するという試みそのものに疑問を投げかけることができるようになってきた、と言っても過言ではありません。こうしたリベラルなもの見方は、近代的な精神が生んだ最も大きな恩恵です。Fig.1に示す世界観は、たしかに現在の私たちにとって有用ですが、時代とともに更新されていくものだということを、常に注意する必要があります。

Fig.3は、例えば領域として海を考えたときの世界観を示しています。コロンブスの時代には、海は単なる広がりを持った底の知れない存在として船員の前に立ちはだかっていたに違いありません。このような領域を計測する物理量としては恐怖心が圧倒的であったろうと考えられます。恐怖心そのものは際限のないもので、何らかの枠組みを与えない限り、次の進歩にはつながらないものです。工学の進歩によって、言い方を変えれば恐怖心を分解して推進力に改めるために、空間や時間の計測技術が導入され、海はわれわれにより豊かな恵みを与えるようになりました。

世界観の狭さは今日でも私たちに重大な影響を与えます。たとえば金銭でしか製品の開発をとらえることができなければ、また怯えでしか製品の事故を見ることができなければ、私たちの描く絵はコロンブスの時代の海とそんなに変わらないのではないのでしょうか。

たとえば材料に力が与えられたとき、近代以前には変形という概念すらあいまいで、外観と重さだけを頼りに、それが壊れるか否かを問うことが精一杯だったでしょう。しかし破壊の形態は、材料の種類によっても、荷重の与え方によっても千差万別の結果を与えます。手当たり次第に破壊を観察することから離れ、それ以前の材料の挙動に注目できるようになるまでには、長い年月を必要としました。

今日でも破壊による機能の喪失は容易に私たちの目を奪い、正確な知識に支えられていない議論、特に誤ったリーダーシップに引きずられると事態は深刻に悪化します。事故は人間を妨げますが、狭隘な視覚はそれ以上に人間を妨げ、復旧の可能性すら損耗させます。

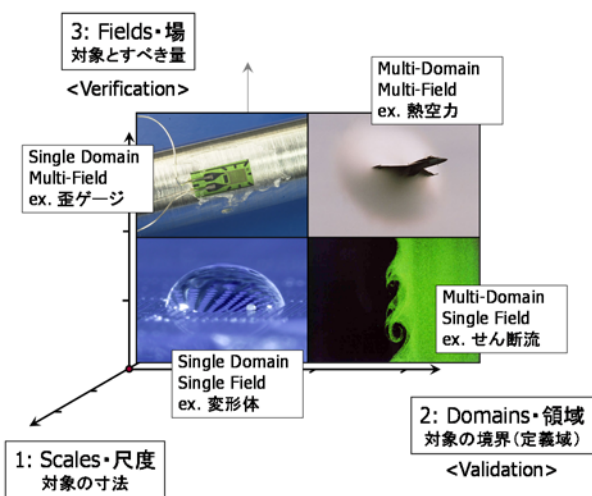


Fig.2 ドメインとフィールドの関係

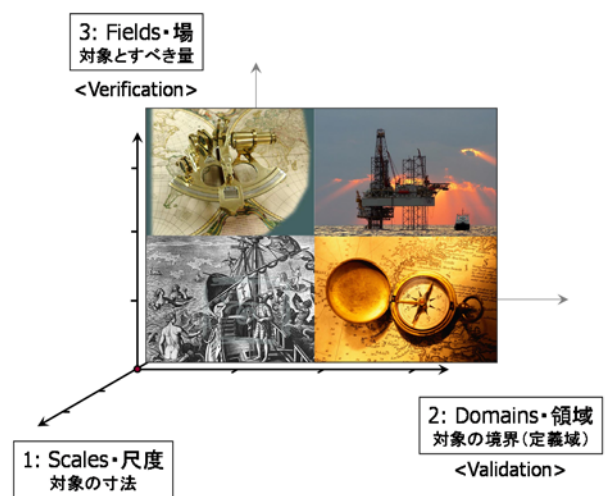


Fig.3 海というドメイン

【4】 産業構造の変化とシミュレーション

Fig.4 は計算機環境と産業構造の変化を表しています。横軸を西暦に取ったとき、70年代から90年代にかけてはIBMに代表される大型計算機の時代でした。80年代の中盤以降にはEWSが現れました。今日ではPCが全盛期にあり、次のハードウェア環境が待たれています。非線形FEMに関して言えば、70年代には弾塑性や超弾性の概念がすでに現れ、計算機の高速度に伴って接触や連成問題が解析できるようになりました。今日では、長年の束縛であったメッシュや構成則から離れることが期待される時代となってきています。

一方、国内における産業構造の主力は、およそ20年を周期として繊維、原子力、自動車と変遷してきました。現在は自動車産業に翳りが見えるにもかかわらず、次の時代への見通しが不透明になっている時代です。医療や食料など、人類としての生存に直結する産業の向上が求められています。

Fig.5 は Fig.4 をもう少し包括的に書き改めたものです。変遷の周期は、産業構造20年、ハードウェア20年、ソフトウェア40年と見ることができます。1970年代は、応用力学が一応の完成を見せ、FEMによって実用的に問題が扱えるようになった時代でした。このうち線形のFEMは1956年のTurnerの論文に始まり、1999年にMSC社がMARCをラインアップに加えたことをもって一応の終熄を迎えたと見ることができます。この間、NASTRANは近代的な設計技術の根幹であり、またMARCは汎用非線形FEMの最右翼であったことは言うまでもありません。

非線形FEMは1971年にMARC社が設立されて以来、多くの汎用コードが市場に現れました。接触や非弾性解析への要求に押されて昨今の淘汰の傾向は著しいものがありますが、現在では全盛の時期にあると言ってよいでしょう。しかし単体のプログラムとしての非線形FEMの時代は、2005年にダッソー社がABAQUS社を買収した時点において一応の区切りを迎えたと考えられます。今後、メッシュフリーあるいはマルチフィジックスの領域にソフトウェアが進化していくことが期待されています。

この20年にわたって自動車産業は日本国中の生産力をポンプのように吸い上げるという、前例のない集約構造を作り上げてきました。経営的には在庫管理、技術的には3D-CADによってこの集約は実現されました。戦後の繊維の台頭が新しい産業革命の時代だったとすれば、原子力は近代的な中央集権の時代、現在の自動車は契約とコンプライアンスの時代であると言えます。

この間、中央集権的な構造によって70年代のオイルショックを克服して一時的なバブルの栄耀が得られ、その崩壊の後には契約とコンプライアンスによって不況を生き延びてきました。しかし、現在のわれわれはやや過剰なコンプライアンスによって自縄自縛におちいり、次の時代への活路を見出せずにいます。健康的な多様性を取り戻すことが何よりも必要ではないでしょうか。

原子力を例にとると、1980年代、中央官庁による規制の時代に最盛期を迎えましたが、今日では規制の実際は民間団体である日本機械学会の所掌に移管されました。2003年の原子力安全委員会だより⁶⁾には、この間の経過を振り返って極めて洗練された見解が述べられ、現在では国際的な原子力の再評価が期待される時代となっています。組織が判断を誤ったとき、その修正は契約とコンプライアンスに依存します。しかしその背後を支えるのは、正確な知識に裏付けられた個人のリベラルな働きであるということを、改めて感じます。

【5】 シミュレーションの技法

チンパンジーは道具を使うことのできる動物です。枝によって孔を探り、筆によって絵を描くことができます。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試みるには至らないために、人間とは明瞭な一線を描いています。すなわち道具を使うことと、それらの比較を試みるの間には、非常に大きな隔りがあります。枝の長短を試す、あるいは筆の腰を試すという動作は、知性の産物に他なりません。

私たちが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、身の安全を試みるでしょう。知性は私たちにこのような試行の繰り返しを要求しますが、同時に下手な知識があるほど不安が頭をよぎり、ザイルを

試す意欲はむしろ失われるのが通常です。試みることはたしかに知性の産物ですが、単にそれだけでは経験と度胸の前に敗れてしまうことが多いのが現実です。1983年に出版された広辞苑の第3版⁷⁾には、シミュレーションという用語がすでに掲載され、以下の定義が与えられています。

「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または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、大型計算機の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代です。シミュレーションという概念の成立にはやや早い気もしますが、最新の広辞苑（第6版，2008年）でも同じ記述が採用されています。

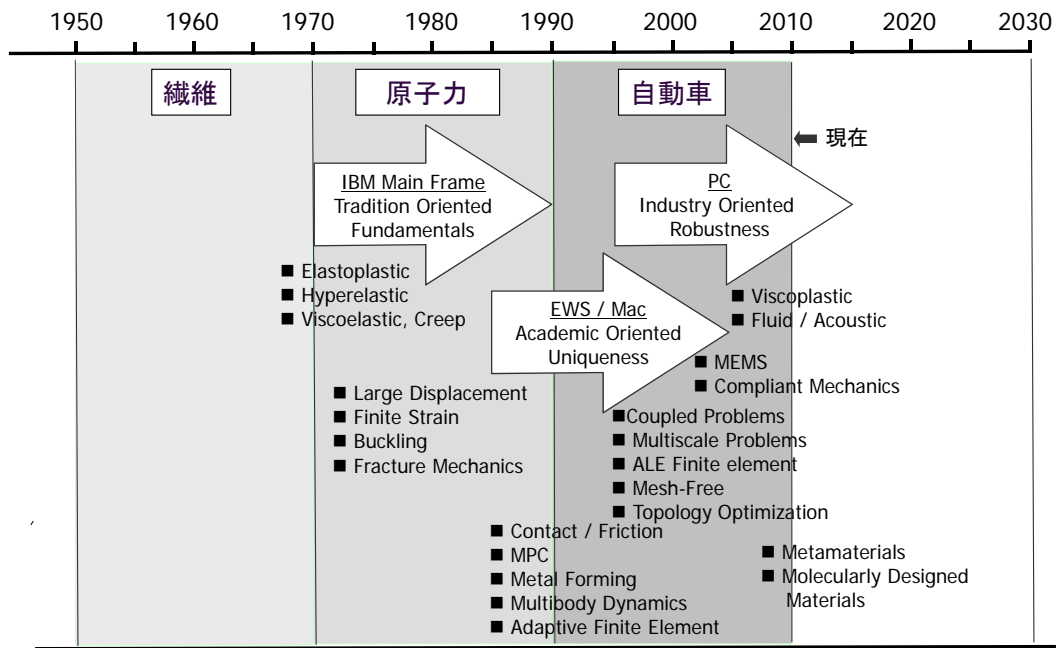


Fig.4 計算機環境と非線形 FEM の発達

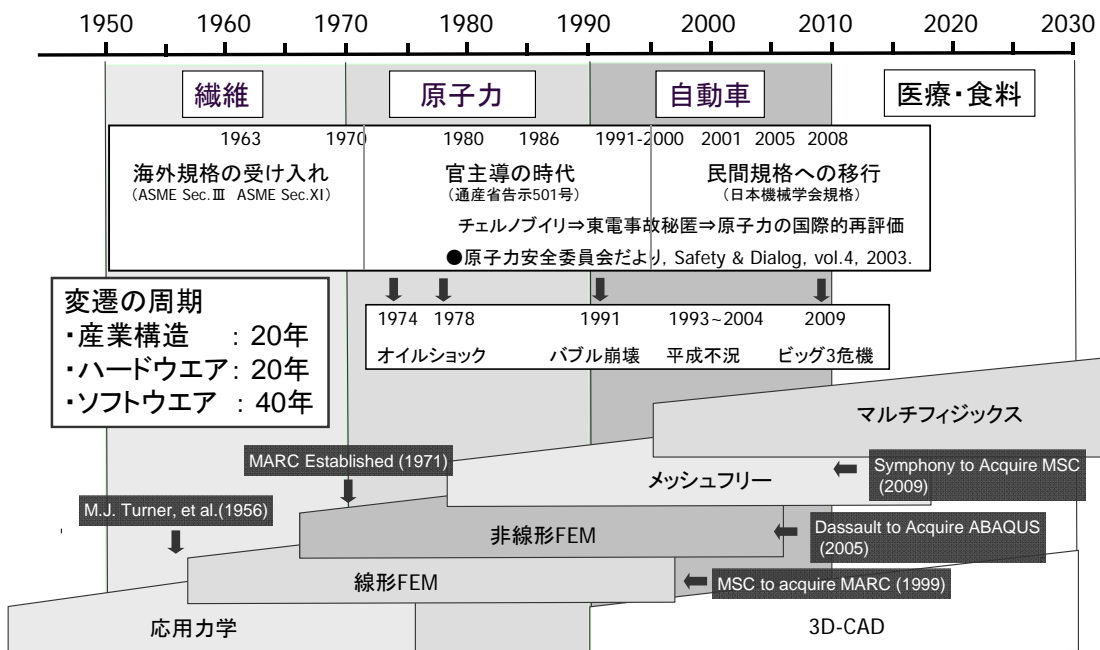


Fig.5 計算機環境と産業構造の変化

この定義には3つのポイントがあります。まず第1はシステムを対象としている点です。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ります。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からです。この結果、枝の長短を試すという行為は、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します。すなわち、全体系の中から一部の複雑系を対象として選び、社会的な価値観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ます。

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す。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す。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ました。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す。単純な系、あるいは極端に複雑な系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す。

いま、あなたが山のガイドだったとして、岩場の高さが1mなら手本を示すまでもなく客は岩を乗り越えて行くでしょう。また100mに近い岩場ならば、いかにあなたが予行を重ねたと言ったところで、新参の客にそれを納得させることは難しいのです。客はあなたの妙技を見たいと言うかもしれませんが、同行させるには大変な時間と費用が必要です。しかし岩場が5mか10mであったら、一生懸命シミュレーションして何とかそれを登ろうという気持ちになるでしょう。簡単すぎもしない難しすぎもしない中庸な複雑系に対して、シミュレーションは最も効果があります。職業としてのシミュレーションは、ここを狙うのがポイントではないでしょうか。「うまいところをすくって、ぱっと逃げる」のが全てではないけれども、それがシミュレーションの現場における経験と度胸です。

社内のシミュレーション部門の長である立場の人には、さまざまな解析の依頼が来るでしょう。その岩場が何mであるかを見極め、特に依頼を断るときが問題です。トライボロジーや減衰など、もともと解析に乗りにくい問題があります。複雑に見えても、理論解を知っていれば解析するまでもなく明快な解決が見出せる問題もあります。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りません。常に結果を予見する能力が求められています。

第3のポイントは電子計算機の利用です。1983年当時の認識としては、おそらく計算機の性能によってもたらされる効果が主に意識されていたと思われます。小よく大を制するのが日本人の美意識であるため、計算機に対する抵抗感は現在でも無くなったとは言いがたいのですが、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は否定できません。また計算の規模は置くとしても、高速化によってトライアルの効率が高まると、解析の品質は格段に向上します。量は質を確実に強化する^⑩とすることができるでしょう。

設計最適化の手法が現れた当時、計算機によって最適化された設計は設計者の自尊心を満たさないという不満がありました。たしかに最適化の一般的な特性は、選択の幅をしぼる方向にあります。しかし同時に、人の手では思いもつかなかった可能性をわれわれに教え、むしろ設計の選択の幅を広げるのだという認識が現在では一般的なものとなっています。計算機の発達が私たちの環境を変え、その結果、思考の通念そのものが変化させられてゆきます。

今日PCが個人に広く浸透してきた結果、表面的な事実としては仕事や生活が便利になりました。しかしその奥底では、個人の能力は個人で管理するという風潮が確実に広がっています。同時にネットワークへの理解が深まり、公共性を重視することが自然に求められるようになってきました。会社でもなく学会でもなく、NPOに多くの人が集まるという世相はその典型的な表れでしょう。個人と公共の調和が求められている時代です。

【6】新しいぶどう酒は新しい皮袋に

シミュレーションは高度な科学技術の庇護の下で育成されてきた経緯があります。今日、コストを迫るあまりシミュレーションの学術的な側面がないがしろにされることがあれば、それは憂慮すべき事態であると言わざるをえません。数年前のニューズレターで弊社は「非線形CAEの運用を、単に学術的な側面からだけで支えることが難しい時代になってきた。」とっておりました。しかし今日、それは誤りであったと痛感しています。下記の文章⁽¹⁰⁾を引用して、稿を閉じたいと思います。

力学の問題を解決する手法には、古くから理論的なもの（理論力学）と、実験に基づくもの（実験力学）がありました。以下一部略。理論力学においては、現象の本質を維持したまま解析を簡単にする数理モデル化が非常に重要になります。一方、実験力学においても、実行可能な実験には自ずと物理的あるいは経済的な制約条件がつきます。こうした制約から、これらの伝統的な力学手法は停滞期を向かえ、20世紀中ごろにはある種の閉塞感が漂っていました。

しかし同じ頃、応用力学の世界には2つの相反する新たな潮流が起こりました。1つは有理力学（Rational mechanics）です。有理力学は、Hilbertの23の問題（1900）の1つである古典力学の公理化の取り組みであり、どちらかというとな保守的な流れです。しかし従来の応用力学では、解を得ることを重視したあまり、非線形力学の一般論は未整備のままに放置されてきました。有理力学はこれらの一般論を徹底的に再検証し、整理、訂正しました。

この結果、固体力学と流体力学を統一した非線形連続体力学（Nonlinear continuum mechanics）の理論が体系化され、応用力学は非常に学びやすく、有用な学問となったのです。こうした見直しを経験しなかった電磁気学がいまだに混乱していることをみるに、有理力学の洗礼を受けた応用力学は好運であったといえます。20世紀中ごろにおこったもう1つの注目すべき流れは電子計算機の発明です。

（いまさら聞けない計算力学の常識⁽¹⁰⁾、土木学会応用力学委員会、2008.）

「新しい」という言葉に対して、古代ギリシャ語は2つの表現を用意しています。新しいぶどう酒はネオス neos=new, 新しい皮袋はカイノス kainos です。ネオスは単純な新しさを、カイノスは隠れていた真理が顕現する新しさを表します。世相に流されず学問の伝統を更新する努力によって、真に新しい体系が拓かれることを、今回の経済不況は教えること反省させられます。

おわりに

昨年2008年8月22日に亡くなられた慶應義塾大学・野口裕久教授の一周忌を迎えることができました。その鎮魂を衷心より祈念致します。

参考文献

- (1) 機械工学便覧，合本，α．基礎編，日本機械学会，2007.
- (2) Timoshenko, S., P., Theory of Elastic Stability, 2nd ed., McGraw-Hill, 1961.
- (3) 金，陳，司馬，歴史の交差点にて，講談社文庫，p.26，1991.
- (4) Michopoulos, J., G., Farhat, C., and Fish, J., Survey on Modeling and Simulation of Multiphysics Systems, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 5:3, pp.198-213, 2005.
- (5) Taylor, R., Multiscale Simulation with Abaqus: Today and Tomorrow, Abaqus Users' Conference General Lectures, Rhode Island, USA, 2008.
- (6) 原子力安全委員会だより，Safety & Dialog, vol.4, 2003., <http://www.nsc.go.jp/anzen/s-d/04.pdf>
- (7) 新村編，広辞苑，第3版，岩波書店，1983.
- (8) 野口裕久（遺稿），最近の非線形解析とその動向-汎用プログラムのカスタマイズ-，計算工学，日本計算工学会，vol.14-1, pp.1970-1973, 2009.
- (9) 現代のCAE，デスクレー構造とその克服，Mech D&A News, vol.2003-3, 株式会社メカニカルデザイン，2003.
- (10) いまさら聞けない計算力学の常識，土木学会応用力学委員会，丸善，p.3, 2008.

表紙：寂光院，京都市大原，推古天皇2年(594年)聖徳太子により建立。建礼門院徳子(1155-1213)閑居御所。

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 042-482-1539 FAX 042-482-5106

E-mail: comm@mech-da.co.jp <http://www.mech-da.co.jp/>