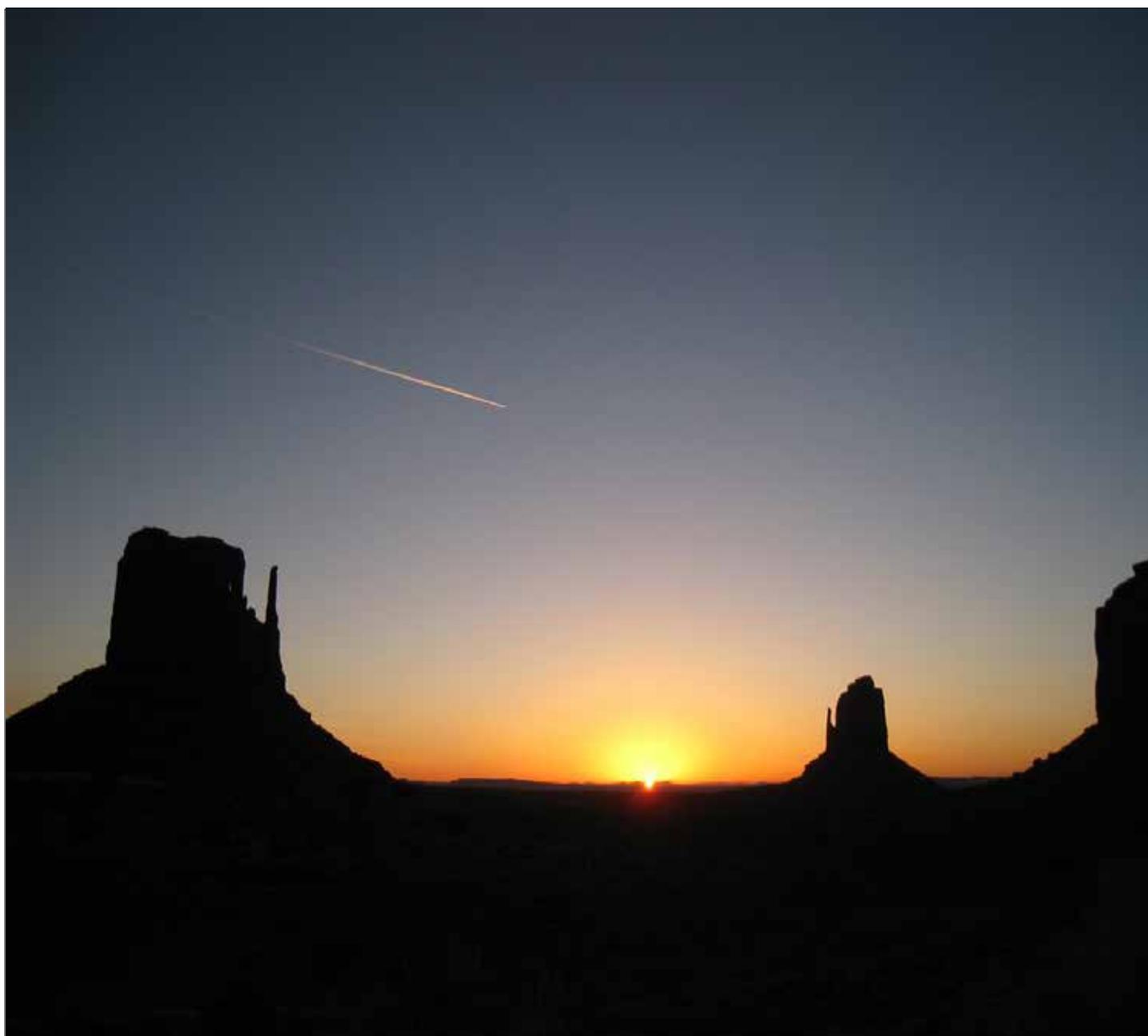


vol. 2010-2

# *Mech D & A News*

Mechanical Design & Analysis Co.

May 2010



米国・モニュメントバレー, 2010年5月

【特集】 エミュレーションという思想

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

## 【1】はじめに

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ある。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る。今回の経済不況のなかで、CAE に従事する多くのエンジニアが職を失った。それはシミュレーションという思想が国内の市場に定着していなかったからである。今回は対極にあるエミュレーションという用語を通して、私見を述べる。

## 【2】シミュレーションから計算へ

Fig.1 は、産業構造の変化と計算環境の発達の推移を表している。横軸を西暦に取って国内の状況を見たとき、50年代から70年代にかけては高度経済成長期と呼ばれた時代である。この時代は古典的な応用力学の完成の時期に一致する。工学の手法がさまざまな工業規格として権威化され、鉄鋼・造船といった基幹産業に適用された。初めての JIS 規格は1949年に制定されている。設計の標準化という概念が国内で成立したのはこの時代である。

70年代には IBM に代表される大型計算機が実用化された。当時現れたばかりの汎用非線形 FEM のなかに、弾塑性や超弾性の概念が既に搭載されていたことは注目に値する。1983年に発刊された広辞苑第三版には、シミュレーションという用語が初めて掲載され、「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」という定義が明確に示された。原子力産業を中心に、(規格ではない)解析による設計・Design by Analysis という概念が提唱された時期でもあった。

80年代の中盤には、UNIX 環境で作動する EWS が市場に投入された。当時の解析例を見ると、接触や連成、リゾーニングなどを含む高度な非線形問題が、高い緊張感を伴って登場したことがわかる。アカデミックを志向した独自性を競う時代であった。UNIX 機がもたらしたのは単なる計算の高速化だけではない。解析結果をリアルタイムに可視化する技術が、グラフィックスを通して提供された。同時期に Mac が現れたことを思うと、可視化は単に視野の問題を解決したにとどまらず、計算機の運用そのものを変化させたと理解できる。

標準化という枠組みを越え、製品をシステムとして見るという方向に設計が変化していったのはこの時期ではないだろうか。CAE という用語が70年代後半に現れたのも、このような設計思想の変化を背景にしている。実際、管理可能な

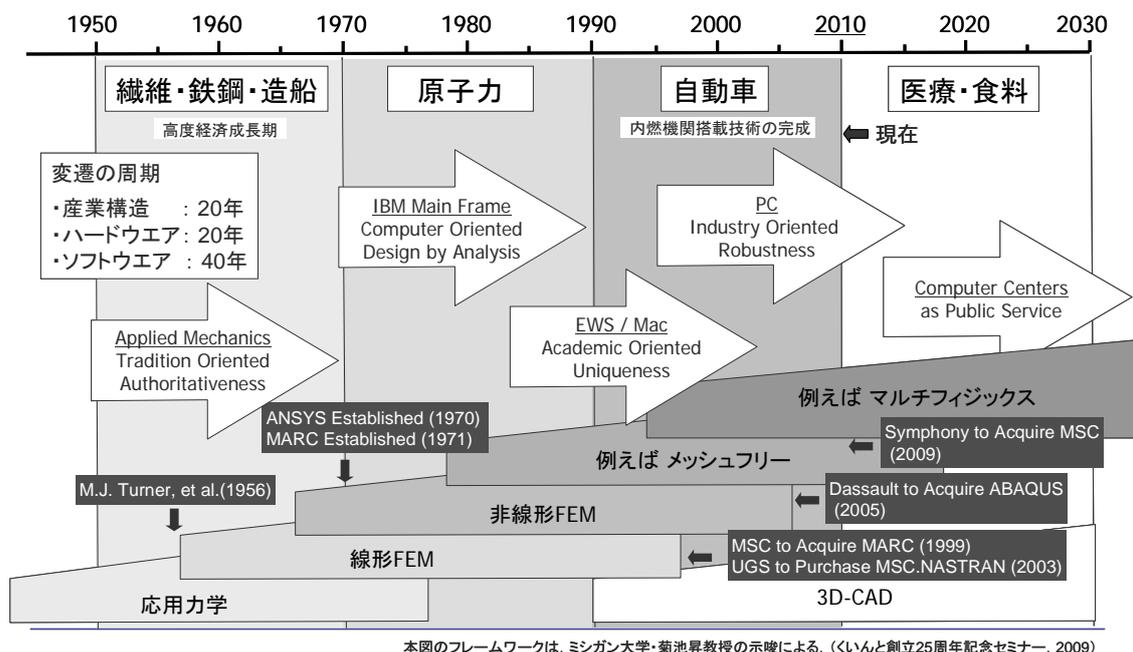


Fig.1 産業構造の変化と計算環境の発達

部品点数は、今日、飛躍的に増加したはずである。われわれは設計の質を問うことを通性に行っているが、計算という量が設計の体質を変え、より強靱なものに生まれ変わらせてきたという現実、記憶しておく必要があるだろう。計算機の高速化にともなって、計算量の多寡を問うことの重要性は徐々に色を失い、高負荷ではあるが新しい解析の手法を採用することができるようになってきている。解析ではなく、むしろ計算を前面に押し出して設計を行うという新しい思潮が現れても不思議ではない。

Fig.1 はまた、あらゆるものには耐用年数があるという現実を示している。世代が交代してゆく周期は、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る。たとえば線形の FEM は 1956 年の Turner の論文に始まり、1999 年に MSC 社が非線形なプロダクトである MARC をラインアップに加えたことをもって時代的な区切りを迎えた。もちろん、NASTRAN はこの間の近代的な設計技術の根幹であり、MARC は汎用非線形 FEM の最右翼であったことは言うまでもない。

非線形 FEM については、70 年代初頭に ANSYS と MARC が市場に投入された。以来、多くの汎用コードが現れ、産業界からの要求に押される結果、昨今のブランドの統廃合には著しいものがあるが、現在は全盛の時期にある。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完結したと考えられる。

### 【3】 設計の加速プロセス

解析の導入によって設計を加速するという願望はおそらく一般的な通念である。この加速プロセスを説明するために、Fig.2 は横軸に時間、縦軸に製品開発の達成度を描いた図である。ここではまず実験と経験の関連について見てみよう。Fig.2(a)に示すように、実験による製品開発はある程度の時間  $t_1$  を必要とするが確実に目標に到達する。時代や分野にかかわらず、一般的な製品開発はこのスタイルに従う。一方、経験は  $t=0$  で値を持っているものの、限られた期間においては一定のみである。Fig.2(b)に示すように、経験を実験に組み合わせることができれば、開発期間は  $t_2$  のように短縮される。このとき、実験点数を的確に管理することによって経験はより強化される。実験計画法に代表される一連の手法はそのための技術であった。注意しなければならないのは、 $t_2=0$  の極限は飽和の状態、すなわちルーチンワークを意味することである。実際、今日の日本では、経験に頼るだけの技術はビジネスとして成立させることが非常に難しくなっている。

このプロセスに解析を持ち込んでみよう。解析はメッシュを作成すれば始まるので立ち上がりは早い。しかし Fig.3(a)に示すように、解析単独のままでは最後まで到達することは稀である。図中(b)に示すように、もし解析と実験をうまく組み合わせることができれば、開発期間を  $t_3$  まで圧縮することが期待される。経験を解析によって置き換えるというありきたりな発想は、このあたりに起源がある。だが実験も解析も、その作業の部分だけを取り出せば独立した作業にしすぎない。異なった作業を同じ勾配で連続させることができず、解析が足手まといになることが大半ではないだろうか。Fig.3(b)の  $t_3$  は、この状況を表している。解析が現物主義に負けるということである。

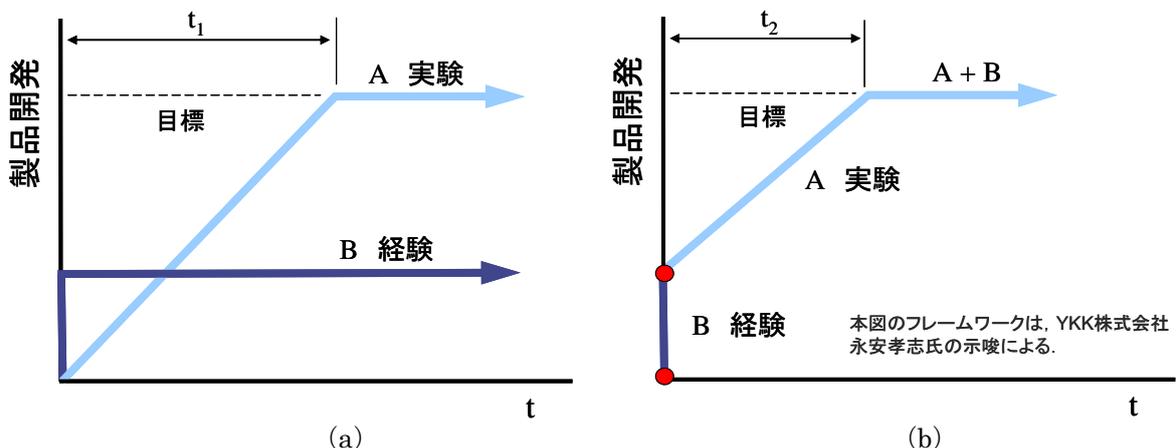


Fig.2 製品開発の加速プロセス (実験と経験)

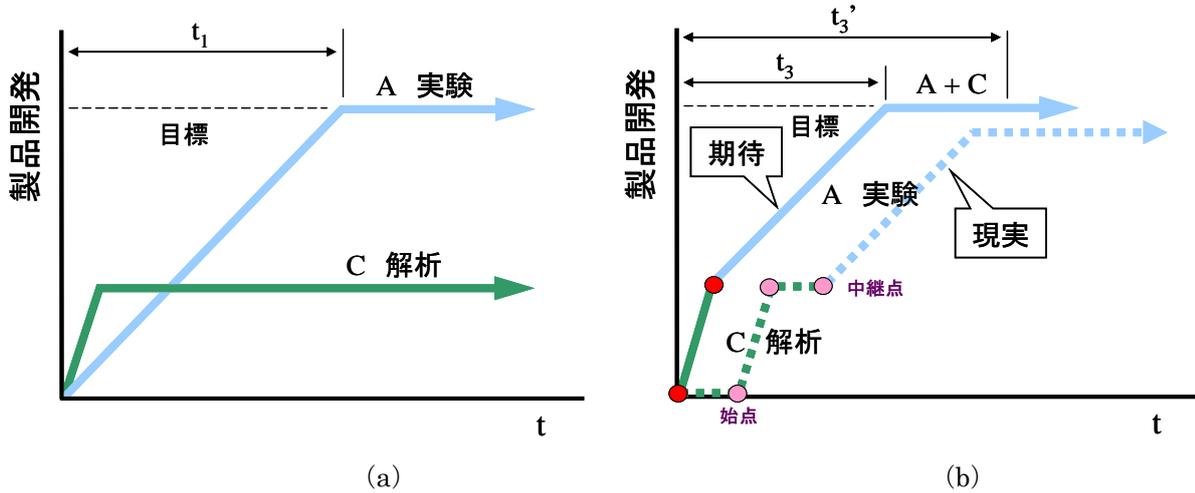


Fig.3 製品開発の加速プロセス（実験と経験）

### 【4】なぜ現物主義に負けるのか？

冒頭に示したように、シミュレーションとは、現物にかわる代替品によって現象の本質を探る技術である。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るのは、現物を上回る適切な代替システムを見出すことができないからである。ロッククライミングを想像してみよう。岩場が 1m ならシミュレーションなどしない。逆に 100m ならば実験に頼らざるを得ない。しかし岩場が 10m ならどうだろうか？ シミュレーションによって限界を見極めようという状況になるはずである。

すなわちシミュレーションは中位の複雑系に対して最も効果がある。これまでは、ここを狙うのがポイントであった。すなわちシミュレーションに適したテーマを取り上げ、わかりやすい形で回答する能力である。特に企業においては、その能力の有無が解析部門の存亡にかかわる。解析に乗りにくい課題を切り捨てる度量も当然この能力には含まれない。俗な言い方をすれば、うまいところをすくってぱっと逃げる！ということである。

ところが今日のように複雑系の動きを計算機上で手軽に実感できるようになると、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た。この結果、現象の良い面だけでなく悪い面も明らかにすることができるようになり、「うまいところをすくう」ことに抵抗を感じる社会になってきた。勘や経験だけではなく、基礎理論・環境・コンプライアンスといった基本的な条項を守ることが求められるのはそのためである。これは単純な倫理観ではない。シミュレーションという新しい技術がもたらしたわれわれの進化の方向性である。なぜなら、うまいところを許す余裕は地球上から急速に失われつつあるからである。

基本に帰るといふ観点から、加速プロセスの理想論を示すと Fig.4 のようになる。理論、経験、解析、実験を巧妙に組み合わせれば、 $t_4$  という最短の開発期間が得られる。このなかで理論は、即効性の低い基礎部分を担っていることは言

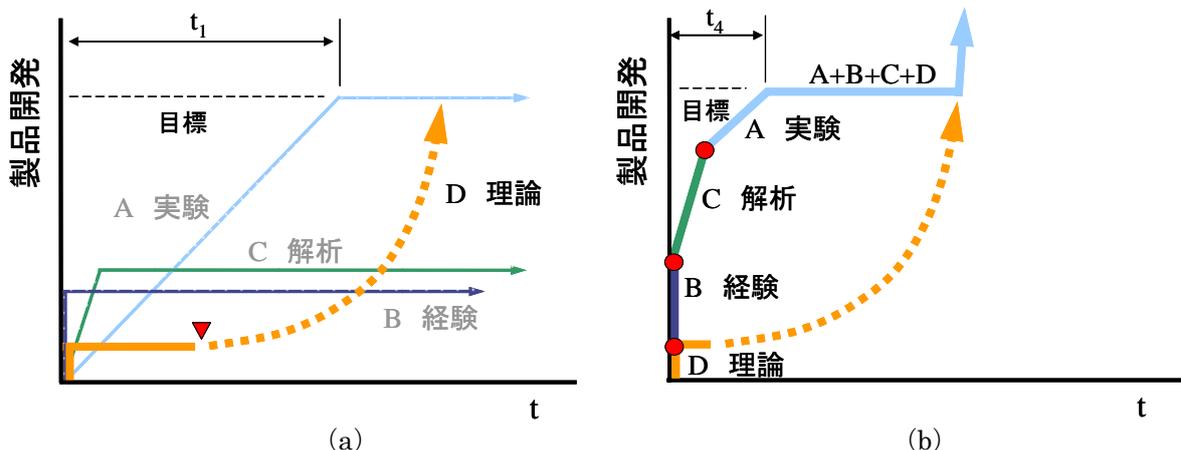


Fig.4 理想論として、製品開発の加速プロセス（理論の寄与）

うまでもない。しかし製品開発を一段落させて振り返ったとき、何らかをきっかけにして大幅な向上をもたらすのは、Fig.4 (b) の破線に示すように、理論の力である。

50年代から60年代にかけて、古典力学の壁にFEMという針の孔がつけられた。その針先から洩れてくる現実直視の思考法は徐々に形となって現れ、今日の計算工学を生んだ。企業では、多くのエンジニアが汎用FEMという浮き袋にすがって学問と技術のはざまを浮上し、工学が科学の一派であるという自信を改めて思い出させてくれた。理論の力をエンジニアが体験したということである。今日、それを体験したエンジニアの数は確実に増加している。基礎理論の重要性が以前に増して問われるのは、この体験の増加という現実が理想論をゆるぎないものにするためではないだろうか。量は質を強化するのである<sup>①</sup>。

## 【5】 手探りのCAEの終焉

汎用FEMの利用という立場からこの理想を図示するとFig.5のようになる<sup>②</sup>。汎用FEMの歴史は既に半世紀を数える。今日のAbaqusを例にとれば、その開発には数百名規模のPh.D取得者が常に従事していると言われ、汎用FEMは現代の工学をほぼ完全に網羅した製品となりつつあるとあって過言ではない。したがって少なくとも構造解析の視点からは、Fig.5は全く正しい秩序感を表している。しかしこの秩序が与えられたからといって、それを的確に運用できるかといえば、それは全く別の問題である。

たとえば機械工学便覧を例にとってみよう。索引に掲載されている専門用語の数は1万語におよぶ。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。しかし、一日に一語を学んだとしても1万語を習得するには30年の歳月を必要とする。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、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。すなわちFig.5に示すような諸分野の積み上げ、すなわちボトムアップの結果として解析を運用するという考え方は完全に限界に来ている。

ボトムアップ方式の限界はFig.6に示すようなデスバレーという概念によって説明することができる。この概念はベンチャービジネスに対する警鐘として、2003年ごろに米国商務省・標準技術院(NIST)によって提唱された考え方である。横軸は研究の段階、縦軸は研究遂行に必要な資金調達の容易さを示す。基礎段階の研究にはある程度の資金調達が期待できるが、市場実用化の一手手前、すなわち実証的なプロトタイピングに対する投資は敬遠されることを示している。

基礎理論に対するFEMの優位性は、形状を忠実に再現したモデルによって解が得られるという点に尽きる。したがって企業におけるFEMは設計の中流に位置し、プロトタイピングのために使用されることが多い。すなわちデスバレーの概念によれば、解析業務は常に資金調達の危機にさらされているということである。たとえば新しいソフトウェアを導入しようとしたとき、初期導入の予算獲得は社内の熱気に押されてどうにかなる。しかし解析の専任者を確保できない、あるいはメンテナンス費用を持続できないという状況が現れ、結局は担当役員の指導力に依存してしまう展開になりがちである。



Fig.5 汎用FEMと工学のピラミッド構造<sup>②</sup>

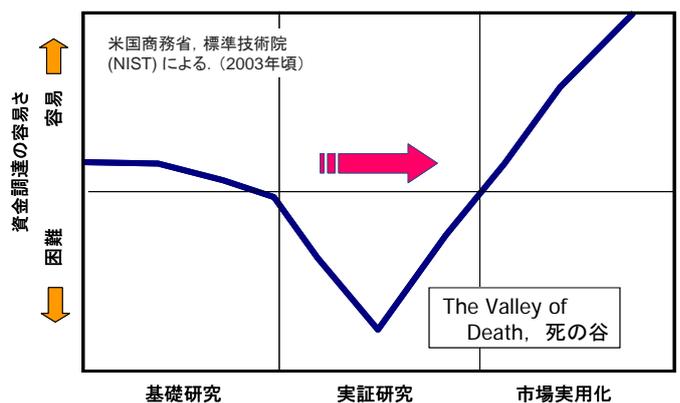


Fig.6 先端技術開発におけるデスバレーの概念

実際、世界的に成功した汎用 FEM は、航空宇宙のような巨大科学からトップダウンによってデスバレーを克服してきた歴史をもっている。国内でも FEM は大型計算機の庇護の下に育成されてきた。しかしそれも過去のものになった。今日の厳格なコスト管理の下、ボトムアップによってデスバレーを越えることは容易なことではない。

黎明期の複葉機を思い出してみよう。Fig.7 に見るように、シェルと骨組みから成り、原動機を搭載していた。機械工学の断片をその中に見ることはできるが、コツが幅をきかせる手探りの時代であった。少なくとも国内では、10 年前の CAE は間違いなくこの複葉機のスタイルをもっていた。FEM のことなら社内の誰々に訊け・・・とか、伝説に満ちた時代であった。航空機の場合、第一次大戦においては化学的な、また第二次大戦においては主に物理的な改変を受け、機体は補機類を満載した構造に変容していった。現在では、綿密なスケジューリングの下であらゆる航空機は運用されている。すなわち機械、化学、物理、数学という進化のステップを踏んだ結果、航空機はマイクロとマクロが高度に共存する製品に進化してきた。

現代の CAE は、多かれ少なかれこのような複雑性をもった製品を対象としている。手探りの CAE、すなわち個人の学習を積み上げたり、あるいはコツを学ばばどうにかなる CAE の時代は終わりつつある。重量のある機体をスマートに、しかも組織的に飛ばすパイロットの育成が急務である。



Fig.7 Wright Flyer, 1903. (Public domain photo)

## 【6】 エミュレーションという思想

をそのまま模倣する試みである。両者の境界は必ずしも明瞭ではないが、今日、エミュレーションとして区別した方が適当である計算例も少なくないはずである。そして間違いなく CAE はエミュレーションの方向に導かれつつある。それはなぜだろうか？

エミュレーションに対する要請の高まりは、形状とアセンブリへの要求が高まってきたということの意味している。Fig.8 が物語るように、アセンブリは機能と読み替えてもよい。すなわち単なる強度だけではなく、形状と機能を複合させたシステムとしての設計が解析に求められているということである。今日 3D-CAD とエミュレーションは一体であるかのように受け止められがちであるが、その理解は本質的ではない。CAD から CAE にデータを引き渡すことはあるが、その逆はありそうに見えて無いのが実情だからである<sup>(1)</sup>。CAD と CAE は、相互循環性をもってはじめて成熟した一体の文化となりえる。

漠然としているが、今後、形状幾何学に対する理解を本質的に深めることが必要であろう。セザンヌは自然を円筒と球と円錐によって把握することを説いたが、その続きとして「自然はわれわれ人間にとって表面よりも深さとして存在する。」と指摘している<sup>(2)</sup>。具体的には、まず材料力学（はり）を、構造力学（トラス、はり、シェル）に読み替えることが現実的ではないだろうか<sup>(3)</sup>。材料力学の延長ではなく始めから計算力学を指向した教育が試みられ、同時に線形代数、最適化などの新しい教育の成果が、企業の現場においてごく自然に現れるようになってきたのは、最近の朗報である。

一方マルチフィジックスの視点からは、先に示したように機械、化学、物理、数学の順が進化の定石と考えられる。構造解析に限ると以下の三点、すなわち、

- 1) 材料構成則の見直し
- 2) 寿命の三大要因（磨耗、疲労、クリープ）の克服<sup>(5)</sup>
- 3) 解析に乗りにくい事象の克服

が当面の課題である。実際、汎用 FEM における材料の解説はマニュアルの 60%を超え、最大の足かせとなっている。実験技術の向上から始まり、均質化法、分子軌道論などの新しい概念の導入が望まれているのはいうまでもない。界面物理、統計的信頼性など、これまで解析に乗りにくかった事象へのアプローチも自ずと見えてくるだろう。

エミュレーションが浸透する結果、商用ソフトウェアの淘汰はさらに進む。しかし生き残った少数のソフトウェアは、産官学を総動員した研究の核の一つになってゆくだろう<sup>(6)</sup>。これは、既に Windows や Google が避けられない選択であるのと同じである。一方では、Linux, Wikipedia に類似したオープンソース型のソフトウェア開発も、避けられない流れである。シミュレーションは急激なグローバル化の波に洗われていることを、認識すべき時期に来ている。



<http://automobile.automotive.com/6158/0703-2008-bmw-m3-v-8-engine/wallpaper.html>

Fig.8 2008 BMW M3 V-8 Engine

## 【7】 緩やかな合流・マージ

Fig.5 のピラミッドを下から見たとき、シミュレーションの観点からはどうしても積み上げきれない山の高さを嘆きたくなる。あるいは基礎のないままに頂点から下を見れば、崖の険しさに足がすくむ。それはシミュレーションという行為が基本的に個人の能力に頼った単独行であるからである。しかし同じ山をエミュレーションとして見ればどうだろうか？ 問題になるのは既に個人の技量ではないのは明らかである。複数のエキスパートを糾合した集団の力量といった観念でしかこの山を見ることはできない。すなわちトップダウン型のマネジメントとして CAE を見るということである。

例として Fig.9(a)を示す。これは NPO 法人である非線形 CAE 協会がこの 10 年間に実施した勉強会、全 17 回のタイトルを列挙したものである。横軸に複雑性、縦軸に世代を取ると、斜め一直線の上にテーマを整理することができる。この並びはあたかもエンジニアのキャリアパスを表すと錯覚しがちだが、そうではない。もしこの並びが単調な進歩に従うのであれば、図の色調は時間を追って、すなわち右上にゆくほど色濃いコンターとならねばならないはずである。しかし明らかにそうになってはいない。

Fig.9(b)は、このタイトル群を各 1 枚の専門分野に分け、それらをトランスペアレンシーとして 1 枚に投影することを試みた図である。それぞれのトランスペアレンシーは複数の専門的な人格を意味している。近代的なトップダウンの構造は、単純な階層構造ではなく、分野を分けた複数の専門的な人格の投影としてはじめて成立する。緩やかな合流・マージとしてのトップダウンである<sup>(1)</sup>。

長年にわたってわれわれを苦しめてきたものに、国産のソフトウェアに対する思い入れがある。これは正にシミュレーション的な積み上げ方式によらざるを得ない。しかし、世界のどこかに拠点を置き、LinuxやWikipediaの発想でグローバルなソフトウェアの作成が始まればどうだろうか？それは、ゆるいトップダウンによる知識の合流であり、もはや国産も外国産もない。国籍を問わず本当の実力が問われ、かつ公開される場所になる。われわれは積み上げ方式を好む反動として権威主義に陥りがちであるが、権威でも競合でもないマージ、すなわちゆるやかな合流の発想が必要になるのではないだろうか。

本来、トップダウン以外の方法でわれわれが知恵を得るすべはない。記憶も意思も同じである。言葉はすべて他人から学ぶのである。エミュレーションという新しい思潮は、その必要性を語りかける壁としてわれわれの前にある。

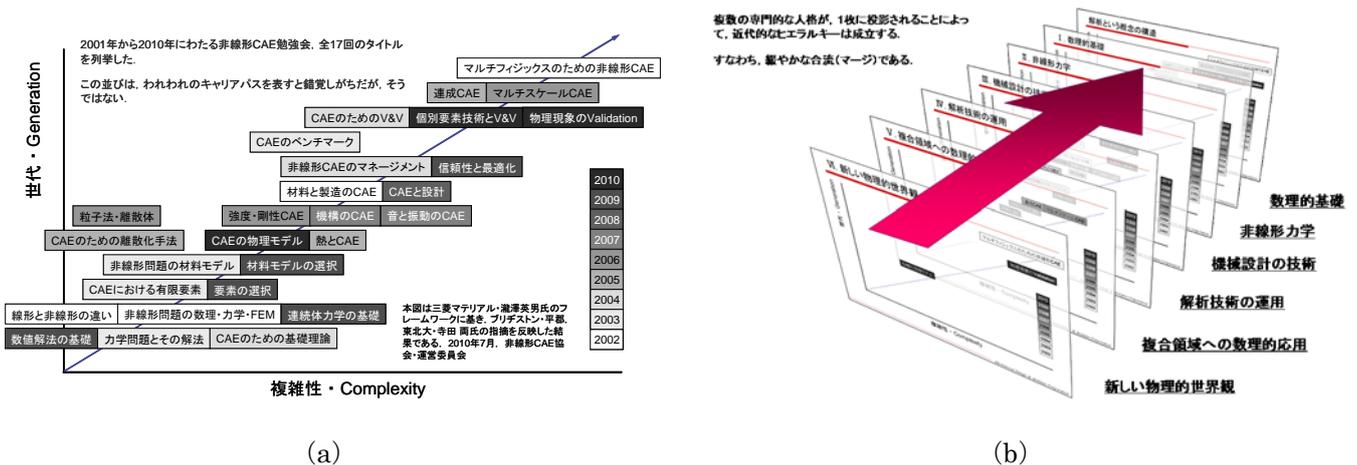


Fig.9 トップダウン ヒエラルキー , 緩やかな合流・マージとして

謝辞

筆者はNPO 法人である非線形 CAE 協会に属し、本稿はその設立以来 10 年の活動のなかで得られた知見の集積によるものである。典拠の明確なものについては、個人名を記させていただいたことを了解いただきたい。特に慶應義塾大学・故野口裕久教授には多くの示唆をいただいた。ここに記し、謹んで冥福を祈る。

参考文献ほか

- (1) 慶應義塾大学・野口裕久, 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, Vol.14, No.1, pp.1970-1973, 2009. ほか, および 2008 年 6 月頃の座談。
- (2) 大井秀哉, 汎用 FEM の利用からみた産学協同の展望, 第 3 回株式会社メカニカルデザインユーザ会, Mechanical Design 2010, 2010 年 7 月。
- (3) 四元康祐, ある転回, 図書, 岩波書店, 2005 年 5 月。
- (4) 横浜国立大学・山田貴博, 第 16 期非線形 CAE 勉強会において座談, 特定非営利活動法人・非線形 CAE 協会, 2009 年 11 月。
- (5) 芝浦工業大学・荻谷義治, クリープ材料の実験と構成則の同定, 株式会社メカニカルデザインセミナー, 2010 年 5 月。
- (6) 東北大学・寺田賢二郎, 非線形 CAE の研究動向と材料モデリング, 第 3 回株式会社メカニカルデザインユーザ会, Mechanical Design 2010, 2010 年 7 月。

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/