

# 基調論文 シミュレーション技術の現状と今後\*

## Status and Future of Computer Simulation

早川 要

Kaname HAYAKAWA

Computer simulation refers to the development, manufacturing of products with the utilization of the computer and CAE technologies. Recently, in accordance with the progress of digital engineering, computer simulation is expected to expand and become a key technology. In this paper, it focuses on the computer simulation used in the engineering field concerned with the development, manufacturing of products.

**Key Words** : Simulation , Computer simulation , CAE technologies , Digital engineering

### 1. はじめに

製造業において、製品の開発・製造に必要な工学現象を予測するコンピュータシミュレーションは、仮想設計(デジタルエンジニアリング)のキー技術として、重要性を増している。

当社では、DENSO VISION 2005の柱の一つである“世界一経営”の実践アイテム「世界に卓越したものの作り」を支えるキー技術として、シミュレーションは、さらなる拡大・発展が期待されている。仮想設計では、製品形状が3次元のデジタルデータとして作成され、部品間の干渉チェック、性能・品質評価、型設計、さらには加工性評価や製造ライン評価にまで、一貫して使われる。これは、デジタルデータを使ってコンピュータ処理に各プロセスを置き換えることで、可能な限り各プロセスを並列化し、製品開発期間を短縮しようとするのが狙いである。当社では、この仮想設計を実現するコンピュータ支援システムとして、DECCS (DENSO Engineering Core Computing System)を開発し、展開を図っている。

ここで、性能・品質評価および加工性評価に使われるのが、工学現象を予測するコンピュータシミュレーションである。本編では、この工学現象を予測するコンピュータシミュレーションについて、当社における活用方法を踏まえて、その技術の現状と今後を議論する。

近年、欧米を中心に仮想設計は急速に拡大してきている。1996年7月に発表されたFPDSプロジェクト (Ford Product Development System)でFORDは、仮想設計により試作回数を2000年までに大幅に減らすことを明言した。さらに、種々の誤差を含む実験結果より、シミュレーションの結果を信用するといったコメント

\* 2000年10月23日原稿受理

を出している。

もちろん、シミュレーションにも計算誤差はつきものであるが、シミュレーションには実験のように自然の揺らぎによる誤差は無い。FORDの方針は、計算誤差はシミュレーション技術の進展により克服できるものであり、シミュレーションを使わなければ仮想設計は実現しない、という信念からきていると思われる。

### 2. 現状のシミュレーション技術

当社におけるシミュレーション実施状況は、CAE白書1999年版(社内限定)にまとめられ、社内技術者にCAEホームページ (<http://mocha.cae.ecc.denso.co.jp/caeweb/>)で公開されている。ここから、開発・設計および加工・製造という適用分野に対して、構造、熱流れ、電場・磁場、音・振動、制御、回路、半導体、材料設計などの工学分野シミュレーションが実施されている状況がわかる (Fig. 1)。

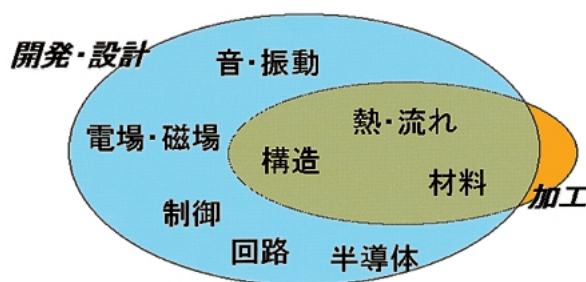


Fig. 1 Engineering field of computer simulation

また、1996年にデンソー技術会40周年記念誌で、工学分野別に当社のシミュレーション技術の10年の歩み<sup>3)</sup>がまとめられた。その後、仮想設計の必要性が

増す中で、多くのシミュレーション技術が開発されてきている。熱流れ解析では、精度向上が図られ、エアコン等で実用域に入ってきた。

また、磁場解析では、3次元化や、外部回路を考慮した解析が可能になり、オルタネータ等の開発に適用されてきた。さらに、制御系の解析システムでは、エンジン制御システム等の設計に必須のツールとなってきた。

### 2.1 製品開発プロセスでのシミュレーション適用

シミュレーションの使われ方は、製品開発プロセスの各段階(研究開発、製品設計、生産準備)で異なる。シミュレーションが、製品開発プロセスの各段階でどう使われるか(どう使われるべきか)を以下に述べてみる。

研究開発では、シミュレーションは成立性検討やメカニズム検討に使われる。成立性検討では、シミュレーションにより主要性能が仕様の範囲で成立するかどうかを求める。また、メカニズム検討では物理モデルを仮定して、シミュレーションする。その結果を実験により実現象と比較検証し、メカニズムの妥当性を確認するのに使われる。

ここで構築された物理モデルは、シミュレーションソフトに組み込まれ、新しい設計ツールとして使われることになる。このことは、そのメカニズムを有する現象をシミュレーション可能にすることと共に、後工程(製品設計)へその技術を伝承することになり、極めて重要なことである。

ただし、製品設計へシミュレーション技術を設計ツールとして受け渡すには、計算精度を実用精度に高めること、設計者が簡単に利用できるようにツールとして仕上げることの2点が肝心である。

製品設計では、シミュレーションは主に設計パラメータの最適化に使われる。従って、設計検討に使えるレベルの計算精度が必要である。また、条件変更したシミュレーションを数多く実施することになり、通常はその作業工数も多くなる。簡単にシミュレーションできないと試作実験した方が、安く、早いということになってしまう。近年では、個々のシミュレーション技術を製品別に作り込み、設計者自身が少ない工数でシミュレーションできることを狙った、いわゆる製品別シミュレータ(後述)が開発されつつある。

生産準備では、シミュレーションはプレスや鍛造、射出成形など、いわゆる加工の条件出しに使われる。最近では加工後の材料物性(弾性率、繊維配向異方性、

磁気特性)や板厚分布を予測する試みがされている。さらに、その結果を使って製品性能を高精度にシミュレーションする試みがされ出してきた。

## 2.2 工学分野別のシミュレーション技術

### (1) 構造

製品強度を予測する構造解析は、フックの法則が成り立つ範囲(線形)で、最も多く実施されているシミュレーションである。この分野での課題は、計算用のメッシュ作成工数である。3次元ソリッドのメッシュを作成する場合には、3次元ソリッドCADの形状データから、ほぼ自動的にメッシュが作成されるようになってきた。しかし、携帯電話ケースなどの薄板構造物では、板の中立面とその板厚をパラメータとした面要素でメッシュを作成する必要がある。

CADの形状データは3次元ソリッドで作成されており、このデータから中立面と各部分の板厚を取り出す技術はまだ不完全である。従来のようにすべて手作業でメッシュ作成するのに比較して、現状では大幅に工数削減できているが、現状でも完全なメッシュに修正する作業に、まだ工数がかかっている。この技術は構造強度だけではなく、振動、樹脂射出成形など板構造物のシミュレーションで必須の技術であり、この技術の完成が期待される。

一方で、鍛造・プレスなど加工シミュレーションでは、材料の塑性変形挙動まで予測するため、被加工材の変形は極めて大きい。特に鍛造解析では、被加工材の変形が大きいことによるメッシュの歪が問題であり、従来は途中で計算ができなくなっていた。現在では、計算の途中でメッシュを作り直すリメッシュ技術が開発され、加工の最終段階まで計算ができるようになった(Fig. 2)。

また、境界条件を考えると、型との接触状態が変化することで、摩擦や接触圧力などの条件も変化する。さらに、摩擦や材料変形・変態に伴う発熱があり、温度変化するため、材料物性も温度依存を考慮する必要がある。これらの条件変化は、必要に応じて物理モデルが作成され、変形解析と連成(2つの現象がお互いに影響しあうこと)して温度分布を計算することで考慮される。例えば鍛造では、変形や摩擦による発熱を考慮した物理モデルを使って温度分布を求め、その影響を考慮して変形を求める試みがされている。

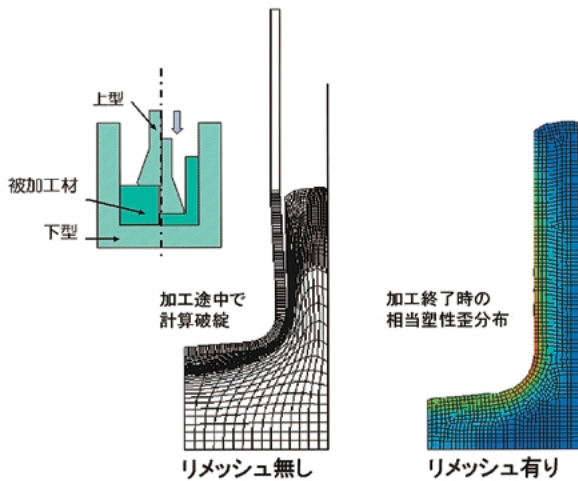


Fig. 2 Example of re-meshing

(2) 流れ

気体や液体の流れは、熱移動を伴うため、熱流れ解析でシミュレーションされる。

カーエアコンでは、空気の流れと温度を予測することが重要で、多くのシミュレーション技術が開発されてきた。最近では、送風機およびダクトを含めHVAC (Heating, Ventilation, and Air-Conditioning) 内の空気の熱流れ解析が数10万メッシュで行われている。各部品の3次元ソリッド形状から、空気流れの通路形状を取り出し、4面体に自動的にメッシュ分割され、計算メッシュが作成される。そのメッシュで定常状態(時間的な変化が無い状態)での熱流れが計算され、速度分布、圧力分布、温度分布が求められる (Fig. 3)。

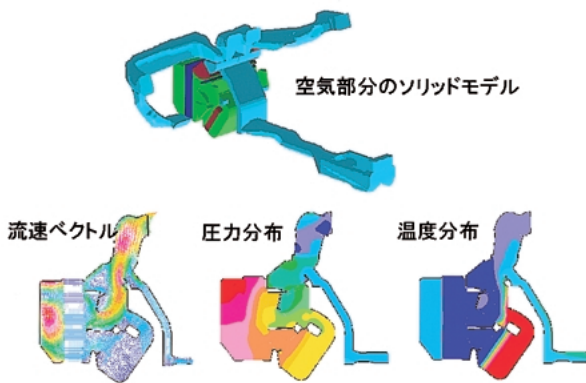


Fig. 3 Flow analysis of HVAC

流れ解析では、その基礎方程式であるナビエスー

クス方程式を直接計算することは困難で、通常はk-乱流モデルとよばれる物理モデルが使われている。そのため、HVAC内のエアミックス領域など剥離、せん断を伴う流れでは、満足な計算結果を得られない場合がある<sup>4)</sup>とされている。その流れ場を使つての熱移動と、熱拡散を乱流プラントル数一定という単純な熱拡散モデルを使って求めるため、温度分布が実用精度で得られなかった。

最近では、この熱拡散モデルのパラメータを、実験式を使って補正する手法が開発され、温度分布の計算精度が改善されてきた<sup>5)</sup>。また、せん断層に着目した、k-乱流モデルの改良や熱拡散モデルの改良も試みられている。

燃料噴射系では、ノズル内部の燃料流れとエンジン筒内噴霧挙動が3次元で流れ解析されている。ノズル内部の燃料流れを計算し、渦の発生や噴孔部での流速分布が評価される。また、エンジン筒内での噴霧挙動は、噴孔からの噴霧生成モデルを境界条件として、液滴の分離・結合のモデルを使って、流れ解析される。噴孔からの噴霧生成モデルは、燃料流れと噴霧の出来方の関係を決める重要なモデルであり、まだまだ改良が期待される。

燃料噴射系システム全体では、1次元で配管系の燃料流れを計算し、低周波脈動による気筒間の噴射バラツキが改善されている。このシミュレーションでは、燃料の圧縮性に加え配管の弾性変形も考慮されるが、弁などの特殊な機構は物理モデルを作成する必要がある。

樹脂射出成形やダイカストなどの熱流れ解析は加工シミュレーションとして生産準備で実施されている。空気と異なり、樹脂やアルミは非ニュートン流体(粘性係数が一定でない)として計算される。またこれらの計算では、流れの先端は自由表面であり、型との熱移動および温度変化による物性値変化が考慮される。

樹脂射出成形では、ガラス繊維などの強化材の配向も計算され、配向分布が求められる。しかし、実際の配向分布は複雑であり、平均的な配向分布を評価するにしても、精度評価など利用技術の積み上げが必要な領域と思われる。

最近では、冷却過程でのそりを構造解析と連携して計算する試みがHVACケース等でなされている。まだ、厚肉部などでの精度に問題はありますが、実験値と比較し結果を補正することで、定量的な評価が行えるようになってきた。



(3) 磁場

磁気回路を応用した製品では、その基本性能を予測するのに、マクスウエルの電磁界方程式に基づく磁場解析が使われる。オルタネータのような3次元の磁気回路で構成される場合は、3次元の磁場解析が必要である。また、磁気を利用したセンサーの配置を決めるような場合には、外部空間の磁場を予測する必要がある。磁場の他分野との本質的な違いは、製品構造部分と空間部分の両方を扱う必要があることである。また、コイルに電流を流す(流れる)ための電気回路と可動部の運動も合わせて計算する必要がある。

現在、モータなどの2次元で扱える構造や、ソレノイドなど軸対称で扱える構造では、これらを考慮したシミュレーションが可能になっており、運動により導体内部に発生する渦電流も同時に計算される。近年、オルタネータのような3次元の磁場解析でも、これらの技術の確立が試みられている。その結果、ロータが回転して発電する状態で、負荷抵抗の電流まで予測できるようになった (Fig. 4)。

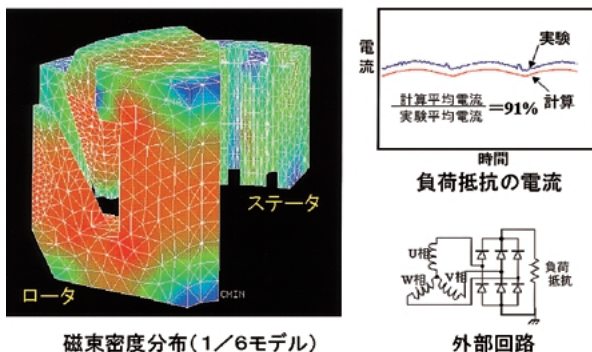


Fig. 4 Magnetic field analysis of the alternator

磁場解析で課題となるのは、磁性材料の物性値である B - H カーブを正確に入力しないと、非線形性が強いいため必要精度が得られないことで、注意が必要である。また、永久磁石が使われる場合には、その磁化特性が重要であるが、実際の磁化特性を正確に計測するのは困難であり、着磁のシミュレーションから予測する方法も考えられている。

(4) その他の工学分野

音・振動の分野は、製品固有の共振周波数や周波数応答の計算が通常なされている。しかし、製品の取り付け構造やゴムなどの非線形材料がある場合には、実験により各部の振動モデルを構築し、シミュレーション

に織込むのが現実的である。

制御系のシミュレーションは、エンジン制御の分野での発展が目覚しく、当社では体系化され RDS (Rapid Development System) と呼ばれている。このシステムの特徴は、エンジンの制御シミュレーションを実エンジン挙動と同期した速度で可能としていることである。そのため、実エンジンを制御シミュレーションモデルで制御して、その場で制御パラメータを変更して、チューニングすることができる。この手法は、エミュレーションと呼ばれている。もちろん、実エンジンの無い段階では、エンジン挙動のシミュレーションモデルを使って、シミュレーションすることも可能であり、望まれる方向でもある。そのためには、エンジンモデルの開発が重要である。

半導体では、プロセスおよびデバイスのシミュレーションが既に設計現場で日常的に行われている。製造工程のパラメータをデータベースに蓄積し、設計から製造まで一貫して、シミュレーションが使われる仕組みができています。

材料設計でのシミュレーションは、電子密度分布や分子運動を計算して、原子レベルで材料の物性およびそのメカニズムを検討するのに使われている。今後とも、新材料の開発に有効利用が期待される分野である。

3. 今後のシミュレーション技術

製造業におけるシミュレーションの目指す方向として、大きく3つの観点がある。

- (1) シミュレーションを設計ツールとして定着させるのに、使いやすさの面で現在のパソコン並に敷居を低くしていく必要がある。
- (2) 同じツールを使っても設計者のスキルの違いによって設計品質に歴然とした差が出ているのが現状であり、このギャップを埋める取り組みが必要である。
- (3) 企業は継続的に事業構造を変革してでも生き残っていかねばならない。その際に必要となる技術開発を支えるシミュレーション技術の開発も継続して行っていく必要がある。

本節では、それぞれの観点での代表的な取り組みを紹介する。

3.1 製品別シミュレータ

当社における製品別シミュレータとは、設計者が簡単に使えて、製品の性能・品質を求められるシミュレーションツールである。

しかし現状では、設計者が簡単に使えるシミュレーションツールを作成するためには、シミュレーション技術・コンピュータシステムや製品固有の技術に精通していなければ作成できない。また、ツール作成に要する費用や期間が多大となつては、ツールの利用頻度を考慮すると、効果的でなくなってしまう。

そこで、シミュレーション技術やコンピュータシステムの利用形態を考えて、共通部分を部品化することで、設計部署でシミュレーションツールを開発できるようにすることが考えられた<sup>6)</sup>。その考えは、

- (1) シミュレーションの専門家 (CAE スペシャリストと呼ばれる。) は共通部分の部品を作る、
- (2) 設計部門でシミュレーションに理解が深いエキスパート (CAE エキスパートと呼ばれる。) は部品を組み合わせて製品に特有のシミュレータを作る、
- (3) 一般設計者は作成されたシミュレータを使って設計に活用する、

という考え方である。その考え方に基づいて、シミュレータ構築ツールとして CAE/WB (ワークベンチ) が開発された。CAE/WB は、DECOS の 1 機能として開発され、設計部門での CAE エキスパートの手で製品別シミュレータが作成されつつある。

また、その 1 例として開発された板ばねの強度シミュレータでは、シミュレータ構築の工数は従来の約 1/5、設計者がそれを使ってシミュレーションした工数は従来の約 1/8 となることが確認された。

製品別シミュレータは「板ばねの強度シミュレータ」ではなく、「板ばねシミュレータ」へと進化するのが本来の姿と思われる。つまり、製品別シミュレータは、その製品の設計評価項目をすべて予測できるシミュレーションツールでありたい。但し、シミュレーション技術が未成熟なままで織込むこと、WB でもシミュレータ開発の工数が効果を上回る内容を織込むことはできない。従って、シミュレーション技術の高度化と、WB の更なる高機能化を進めなければならないと言える。

### 3.2 衝突解析

近年、モジュール化は欧米を中心に急進展している。モジュール製品には、車両の基本構造に寄与する部分が含まれてくる。例えば、フロントエンドモジュールは、車両前部で左右の構造部材 (サイドメンバー) を結合する構造を含んでおり、前面衝突の特性に関係する。特に、低速衝突ではラジエータなどの搭載部品の損傷

状況に、その構造は大きく寄与する。そのため、欧州ではドイツ保険協会が、車両保険料率を決めるのに車速 15km/h の 40% オフセット前面衝突試験を実施している。従って、車両構造を踏まえた衝突解析が必要となってきた。

しかし、衝突解析は当社でこれまで取り組んだ経験のない分野である。一方、車両メーカーでは、乗員の安全確保のため日常的に行われるシミュレーションとなっている<sup>7)</sup>。その計算手法は、数 10ms の早い現象を、車両各部 (ダミーや人体モデルを含め) の慣性力に対して、大きく塑性変形する各部品の挙動を膨大なメッシュ (有限要素法) であらし、時々刻々と運動方程式を解く方法である。また、変形過程では、部材同士の接触や破断が起き、極めて非線形性が強いのが特徴である。

シミュレーション技術に加え、モジュール製品では車両構造の知識も必要で、まずは車両メーカーが培ってきた技術の導入が必須である。フロントエンドモジュールの衝突解析を進めるに当たって、現行車両の前部骨格にフロントエンドモジュールの樹脂キャリアを搭載した状態で、低速衝突相当 (15km/h 前面 40% オフセット) の計算が行われた。その結果からは、車両の基本骨格であるサイドメンバーが、塑性座屈崩壊している様子がわかる (Fig. 5)。また、その変形量も実験と 10% 以内で一致を示すことが確認された。しかし、まだまだ緒についたばかりで、確立しなければならない技術も多い。

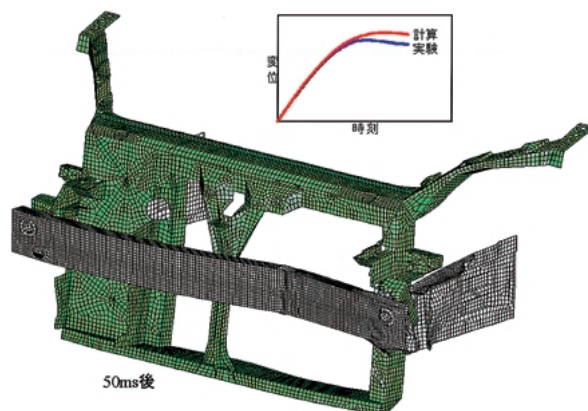


Fig. 5 The low speed crash analysis of the vehicles front frame

今後、フロントエンドモジュールに必要な、樹脂材料、熱交換器などの物理モデルの開発や、最終的には

車両への搭載状態で、衝突シミュレーションできる技術を早急に構築していかなければならない。

### 3.3 最適化シミュレーション

最適化シミュレーションの狙いは、設計要求を前提に、設計意図を最も満たした製品仕様を求めることである。従ってその姿は、設計意図に基づいて設計要求の範囲内で仕様変更したシミュレーションを繰り返し実施し、設計意図を満たす最適解を求める形になる。

ここで、設計要求とは設計パラメータの許容範囲であり、各部の板厚とか材料物性の範囲である。最適化では、このパラメータを「設計変数」と呼び、範囲を示す式を「制約条件」と呼ぶ。また、シミュレーション結果から求まる応力などを、「応答変数」と呼び、これらに対しても「制約条件」が課せられる。また、設計意図が例えば重量を最小にするのであれば、重量を「目的関数」と呼び、最適化の課題は目的関数を最小にすることとなる。従って、最適化とは、設計変数と応答変数が制約条件を満たす内で、目的関数を最小にする設計変数の値を決めることである。

最適化には現状で、二つのアプローチがある。一つは、寸法などのパラメータの最適値を求めるパラメータ最適化と呼ばれる方法である。もう一つは位相最適化(位相とは形状の特徴を示す言葉で、孔が一つある形状は孔の形によらず同じ位相という。)と呼ばれる手法で、形状に関するパラメータを使わずに、形そのもの(孔の数やそれらの形も含めて)を求めてしまう方法である。但し位相最適化は、まだ弾性範囲の強度および振動固有値解析に適用が限定される状況であるが、構想設計段階で素性のよい形状を決定する強力な手法である。

パラメータ最適化の事例として、フロントエンドモジュールの構造部材である樹脂キャリアのベース板厚とリブ配置の最適化を示す(Fig. 6)。車両の走行安定性と振動特性から要求される剛性を評価する三つの荷重条件で、変形量と発生応力を制約して、重量最小となるベース板厚とリブ構造が求められた。その結果、5個所のリブが削減でき、重量を27%軽量化できた。

パラメータ最適化の手法には、様々な手法が提案されているが、以下の3種に大別できるので、それらの特徴を述べる。

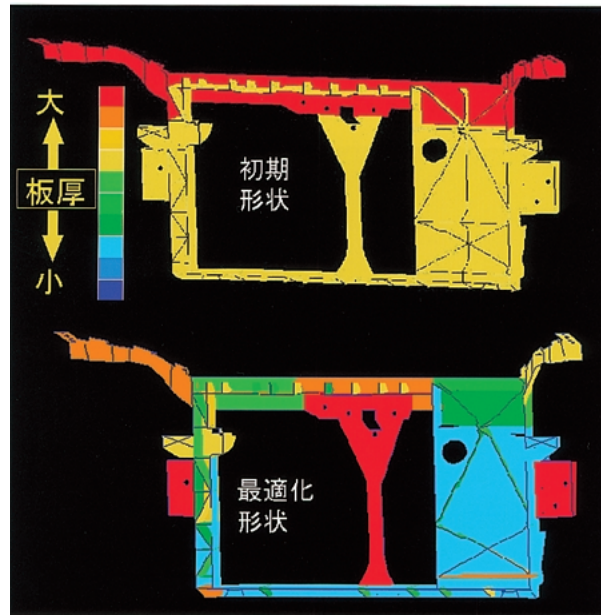


Fig. 6 The optimization analysis of the carrier strength

1) 感度と呼ばれる目的関数に対する設計変数での偏微分計算が数式で計算され、最適解の探査に使われる方法がある。この方法は弾性範囲の強度や振動固有値解析に限定されるが、シミュレーションソフトに最適化機能として組込まれており、設計変数が多く扱え、計算速度も速い。

2) シミュレーションの分野を問わず最適化する方法では、シミュレーションした結果を踏まえ、次の探査方向を決めて、つまり次の設計変数の値を決めて、再度シミュレーションを繰り返す。この方法は、どんなシミュレーションにも適用できるが、探査方向を決める計算手法により、収束性が異なるので注意する必要がある。

3) 実験計画法を使って直交表から設計変数の組み合わせを決めてシミュレーションし、それらの結果から目的関数を多項式近似する方法<sup>9)</sup>がある。最適化は、その近似多項式を使って計算されるため、パソコンでも簡単にできる。また、流れや衝突などの非線型性の強い分野でも適用可能と言われている。事前にシミュレーションする設計変数の値が決まるので、並列計算で解析時間を短縮することが可能である。この特徴は、モンテカルロ法に基づき統計的な処理をする手法でも、同様である。

最適化で重要な点は、いかに設計要求(設計変数および



び応答変数に対する制約条件を具体化し、いかに設計意図(目的関数)を数式化するかにある。加えて、結果はもちろんシミュレーションの計算精度に依存することも注意が必要である。

これらを踏まえ、各種製品の設計に有効に使われることが期待される。また将来的には、これらの最適化シミュレーション技術を製品の特徴に合わせて、製品別シミュレータと連携させることで、製品別最適設計システム(仮称)といった設計支援ツールに進化させていきたい。

#### 4. おわりに

シミュレーション技術を概観してきたが、製品開発で最終確認をするのは、実験であることを忘れてはいけない。また、開発途上のシミュレーション技術には、物理モデルの開発がつきもので、その妥当性を検証したり時には物理モデルを構築する指針を得るために、膨大な実験が必要にもなる。

実験により、妥当性が裏付けられたシミュレーションのみが、製品別シミュレータとして、設計者が安心して使えるツールになると言える。

以上、これまで述べてきた数々の課題を2005年までに解決し、DENSO VISION 2005の柱の一つである“世界一経営”の実践アイテム「世界に卓越したもの作り」【仮想設計】を名実ともに実現させていきたい。

#### <参考文献>

- 1) 今井「自動車部品における仮想設計, 仮想生産」日本機械学会 東海支部 第86回講習会資料, 1998
- 2) Ford Supplier Awareness Meeting 資料, 1996
- 3) 澤田, 早川「シミュレーションの10年の歩み」, デンソー技術会40周年記念誌, 1996
- 4) 日本流体力学会編「流体力学ハンドブック」, p180-181, 1990, 丸善
- 5) 北田, 浅野, 神原, 「カーエアコン基本性能シミュレータの開発」, 自動車技術会2000年秋季大会
- 6) 古木, 神谷, 青山, 「汎用強度シミュレーションシステムの開発」, 自動車技術会2000年秋季大会
- 7) 安木, 山崎, 「車両のオフセット前面衝突のコンピュータシミュレーション」, TOYOTA Technical Review Vol.46 No.2, 1996
- 8) 柏村, 白鳥, 干「実験計画法による非線形問題の最適化手法」, 機械の研究 第50巻 第7号, 1998



#### <著者>



早川 要  
(はやかわ かなめ)

情報企画部  
シミュレーション技術の開発・適用化に従事。