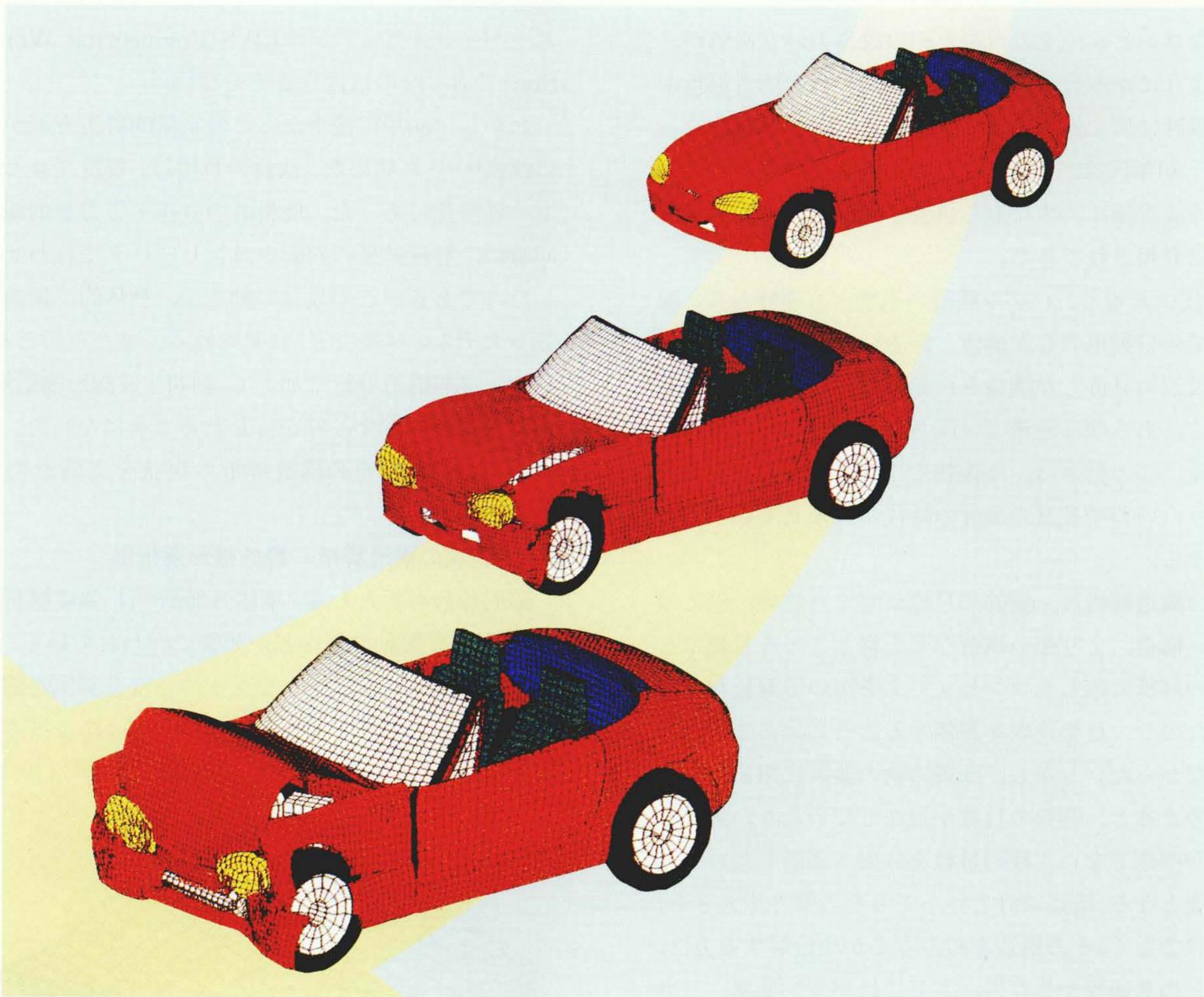


自動車設計における構造解析の適用

Current and Future Application of Structural Analysis to the Design of Automobiles

五十嵐 将* Masaru Igarashi



自動車の衝突シミュレーション計算例 スズキ「カプチーノ」の衝突シミュレーション計算例を示す。計算はスーパーコンピュータHITAC S-820/60による。ここでは、車体前部の衝突エネルギーの吸収性能を予測している。

各種の構造解析プログラムの台頭とコンピュータの進歩によって、構造解析が自動車設計に広く適用されてきた。しかし、従来の構造解析は量的に設計目標が定まる分野、例えばより軽い構造設計、より強い構造設計などにその適用が限られていた。

今後予想される自動車の価値尺度の質的变化や、社会環境の質的变化に対応した自動車の設計を行っ

ていくためには、従来の量的な自動車設計を支援するための構造解析に加えて、質的な自動車設計を行っていくための構造解析を構築し、いわゆる量と質の最適化構造解析の手法を確立していくことが望まれる。スズキ株式会社では模索的ではあるが、そのための取り組みを開始した。

* スズキ株式会社 実験部第4グループ 工学博士

1 はじめに

構造解析が自動車設計に適用されるようになってから、かなりの年月を経る。各種の構造解析プログラムの台頭とその改良、そしてプログラムを実行するためのパワフルなコンピュータの台頭とその改良という両者が、歯車のようにかみ合ってきたことが、今日の構造解析が自動車設計に広く適用されてきている大きな基盤となっている。'80年代は、主として自動車の個々の部品設計や単一の性能評価に、すなわち自動車の量的設計に構造解析が主に利用されてきた。

'90年代に入ると、バブル経済の崩壊とも連呼して、地球規模での自動車の存在価値、あるいは社会生活での自動車の役割の見直しが議論され始めた。これは自動車だけでなく、あらゆる産業で生産される商品についても同様である。この動きは、今後物の設計を大きく変える動きであり、いわゆる質の設計の時代が到来していることを意味する。

従来の構造解析は、量的に目標が定まる性能、例えばより軽い構造、より強い構造などを得ることを目標にして、その解析に適したコンピュータを用いて解析が行われてきたので、目標達成を評価することにはあまり困難を伴わなかった。しかし、今後の物の設計に求められる事柄を考えると、複数の目標が混在していたり、量的な物差しが明確でない主観的目標を評価・判断していくことが必要となる。構造設計といってもその強さや大きさ、重さだけでなく、その構造を組み立てかつ分解する方法、他の物との共通性や共存性、さらには感覚的価値、リサイクルを含めた設計法など、いろいろな性能が設計目標となる。

ここでは、このように物の構造設計・解析の範囲が広がっていく中で、自動車設計のための道具、特に車体や構造部品の設計の道具となる構造解析の現状を例示しながら今後の動向について述べる。

2 自動車の構造解析の現状

現在行われている自動車の構造解析は、解析対象として車体や構造部品の構造解析が主である。そこでは、従来の量的設計に基づいた構造解析が行われ、解析の目的が単一的であり、定量化されている。解析方法としては、解析対象を選定して解析モデル[例えば、FEM(Finite Element Method:有限要素法)モデル]を作成し、解析プログラムを実行して解析結果を得た後で、解析者や設

計者が解析結果を判断する。設計目標に達していなければ、解析モデルの変更を含めた再解析を行う。そのため、解析モデルの善悪および解析プログラムを実行するためのコンピュータ能力が構造解析の善悪を左右する重要な要因となる。このニーズにこたえたのが、ハード面ではスーパーコンピュータやEWS(Engineering Work Station)であったのは言うまでもない。

しかし、'80年代後半からこの定量的解析方法が実用的に改良^{1),2)}され始めた。改良の目標は、解析プロセスの向上・効率化にあった。解析者の負担・労力を削減すると同時に、解析結果の判断をコンピュータに行わせようとしたのである。この改良の動きは、具体的に最適構造計算システムの構築など³⁾に見られる。またそのころから、静的・線形構造解析に加えて、動的・非線形構造解析(自動車の衝突解析など⁴⁾)が行われるようになった。

以下に、自動車の構造解析の現状を実例を用いて述べる。

2.1 現状の構造解析—静的線形解析例

静的線形解析として、車体の部品の(1)強度解析、(2)剛性解析、(3)振動解析などが頻繁に行われている。

エンジンミッションマウントの強度計算例を図1に示す。SCADEM(スズキ・CADシステム)によって作成さ

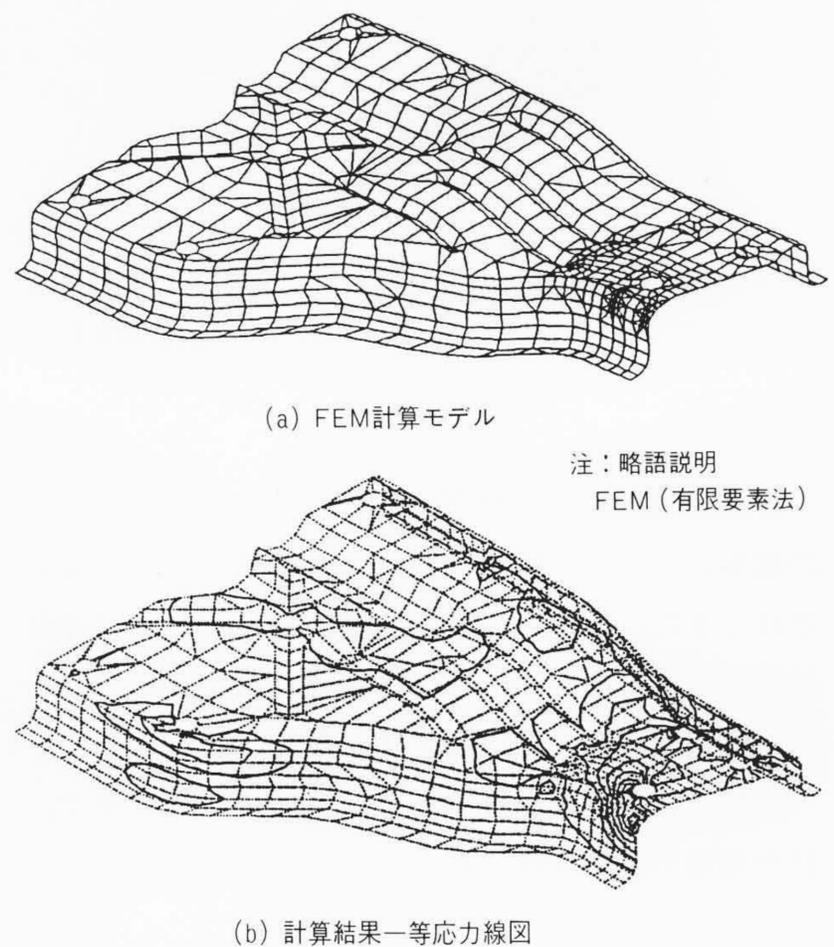


図1 エンジンミッションマウントの強度計算例 自動車部品の強度計算の典型的な例を示す。軽量化と高強度を設計目標として、このような構造部品の構造解析が頻繁に行われている。

れたCADデータを用いて、ワークステーション2050Gを端末としてFEMメッシュジェネレータを介して、解析モデルが生成される。解析プログラムはISAS(Integrated Structure Analysis System)を用いている。計算はスーパーコンピュータHITAC S-820/60(以下、S-820/60と略す。)で行っている。ここでは軽量化および高強度を設計目標として構造解析が行われており、現在では、自動車の構造部品の設計で、このような構造解析は必要不可欠な作業となっている。

車体の剛性計算例を図2に示す。この計算に用いられている解析システムとコンピュータは、前述の計算で使用されているものと同じである。ここでは、車体に静的な曲げ荷重やねじり荷重を与えたときの車体の変形具合を計算して、車体全体の剛性が適切であるか否かを評価する。この剛性が不足すると、場合によっては車体のしっかき感とか、走行中の応答性を損なうことがある。そのため、新車の開発段階で車体の剛性を解析・評価する自動車の車体のような構造体は、その製造工程からも簡単に構成部材を変更して、そのつど車体を試作することは物理的に不可能である。そのため、このような大規模構造解析は実用の面で見ると、非常に有用な構造設計の道具となる。

車体の振動計算例を図3に示す。この計算に用いられる計算モデルは、上述の車体剛性計算に用いられる計算モデルと多くの場合共有される。ここでは、車体の固有振動数や振動モードを計算する。自動車はさまざまな路面を走行する。どんな状態でも、車内に取り付けられた内装部品などが、車体の振動に励起して振動することがないように、また車体パネルの振動によって車室内の騒

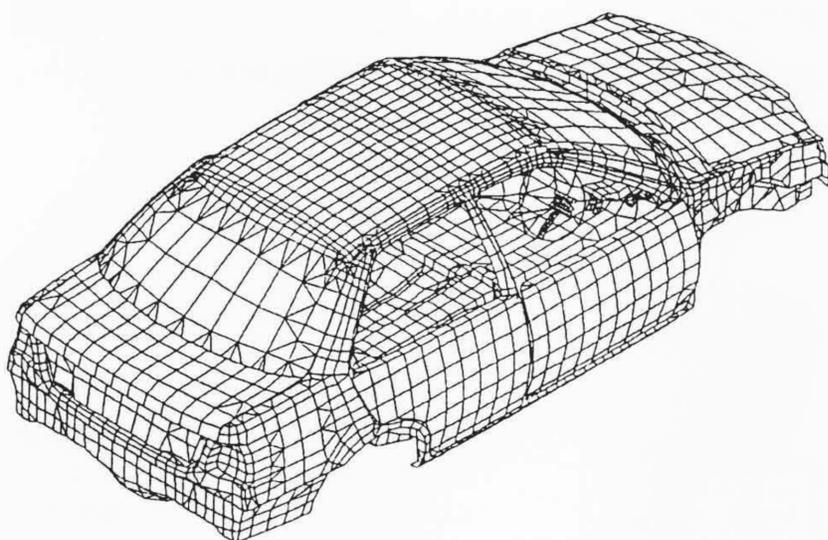


図2 車体の剛性計算例 車体に静的な曲げ荷重やねじり荷重を与えて、車体の変形具合を計算し、車体全体の剛性を評価する。

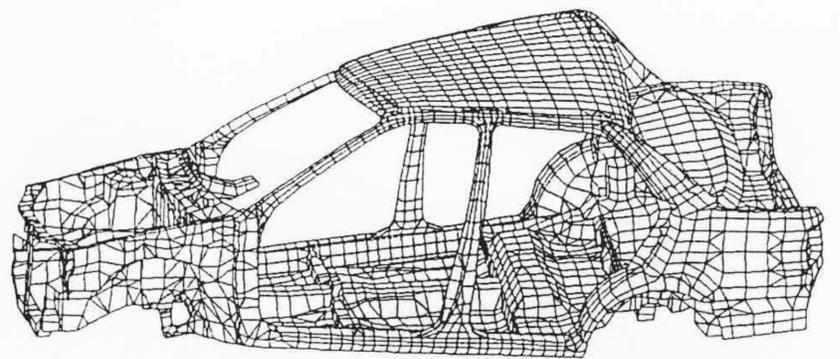


図3 車体の振動計算例(ねじり振動) 車体の振動特性を把握するために、車体の固有振動数や振動モードを計算する。大規模な振動計算は、スーパーコンピュータを使用しても依然として多くの計算時間を必要とする。

音が悪化しないように、あらかじめ車体の振動特性を十分に把握しておく必要がある。そのため、車体開発段階では、必要に応じて構造変更を行い、再度振動計算を行う場合がある。しかし、このような大規模振動計算はスーパーコンピュータを使用しても、多くの計算時間を要する。コンピュータを使用する側としては、今後ともいっそうのコンピュータ性能の向上を期待するものである。

2.2 現状の構造解析—動的非線形解析例

自動車の衝突計算例を図4に示す。計算プログラムはスズキ・DYNA3Dを用い、コンピュータはS-820/60を使用している。この計算例は、速度50 km/hで、自動車の進行方向に対して30度傾いた固定壁に衝突した場合を想定したシミュレーションである。この計算から得られる情報としては、(1)自動車のつぶれ具合、すなわち衝突エネルギーをいかに車体前部が吸収して、乗員を保護するのかを検討するための情報、(2)衝突開始から衝突終了までの自動車の減速度、すなわちこの減速度の履歴によって、乗員を保護するシートベルト、あるいはエアバックのセンサ展開感度調整などを検討するための情報が主である。その他いろいろな衝突形態を想定して、衝突計算を行っている⁴⁾。

自動車の衝突解析は'80年代の後半から行われるようになった。この時期を衝突解析の第一世代⁵⁾と呼ぶことができるであろう。それまでは、自動車の衝突性能評価はもっぱら実験によって行われていた。この実車を用いた衝突実験は、多くの時間と工数を必要としていたため、実験工数を少しでも削減する手段として、この衝突シミュレーションは各国の自動車産業で広く研究され、利用されるようになった。

この衝突シミュレーションはコンピュータの進歩と解析プログラムの改良によって、その利用が加速されてきた。ここでは、コンピュータの解析プログラム(DYNA3D)

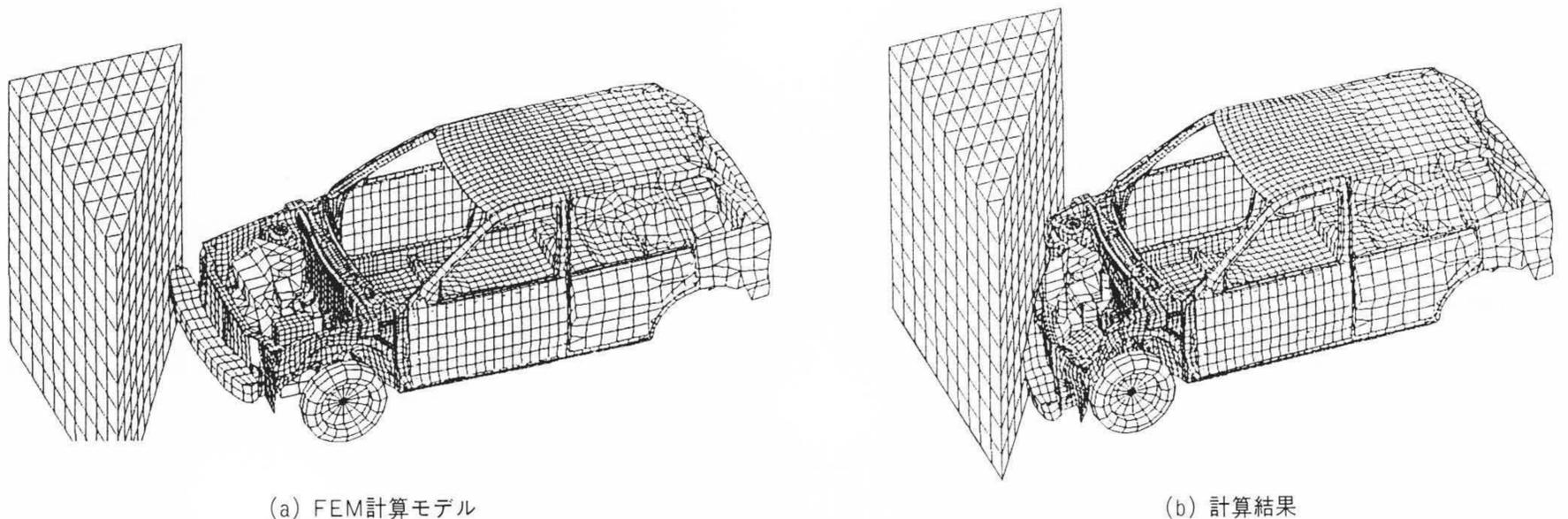


図4 自動車の衝突計算例 斜め前方にある固定壁に、速度50 km/hで衝突した場合のシミュレーション計算例を示す。計算プログラムはDYNA3Dによる。計算モデルの要素数によって異なるが、HITAC S-820/60で3～6時間のCPUを必要とする。

の改良について述べる。DYNA3Dは、アメリカLSTC社のHallquistによって開発された有限要素によるプログラムであり、動的な非線形の大規模構造問題を解くのに適している。特に、構造物の衝突解析には最適である。このDYNA3Dに対して、スズキ株式会社の技術者とHallquistによって、これまで継続してプログラムの改良を行ってきた。以下に、代表的な改良内容の概略について述べる。

- (1) 要素と節点の番号を並べ替える機能を追加した。自動車の衝突計算モデル作成には多大な時間がかかる。複数の解析者が共同で計算モデルを効率よく作成していく作業で、この機能は非常に有用であり、必要不可欠である。
- (2) 計算結果(荷重, 変位, 速度, 加速度, 応力, ひずみなど)を必要に応じて選択できる機能を追加した。これによって、不必要に膨大なデータ量をS-830/60のディスクに保管する必要がなくなった。
- (3) シェル要素が改良され、より信頼性のある大変形計算が行えるようになった。
- (4) 計算を途中で中断した後、再実行できる。再実行で

も材料物性値を変更できる。
 (5) 材料の入力方法を改良し、より実際の材料に近い入力が行えるようになった。

特に上記(5)については、図5に示すように、樹脂発泡材料の衝撃吸収計算⁶⁾が行えるようになった。具体的には、自動車のバンパーの衝撃吸収性能が予測・評価できるようになった。これまでは樹脂発泡材料を実際に試作し、実験によって評価していたが、今度は設計段階で発泡材料を用いた部品の衝撃吸収性能がある程度予測できるようになった。このような改良は、今後さらに動的な大変形構造解析に広がりをもたらしてくれる。

2.3 現状の構造解析—最適構造解析例

前述したように、'80年代後半から最適構造設計法構築の取り組みが盛んに行われるようになった。現在、最適構造設計法構築のアプローチとして、大きく二つの流れが存在する。一つの流れはこれまでのFEMを基にした構造解析に対して、解析結果の善悪の判断基準をあらかじめプログラミングしておき、悪の場合は入力モデルの構造変更を自動的に行わせて、再度構造解析を行うといっ

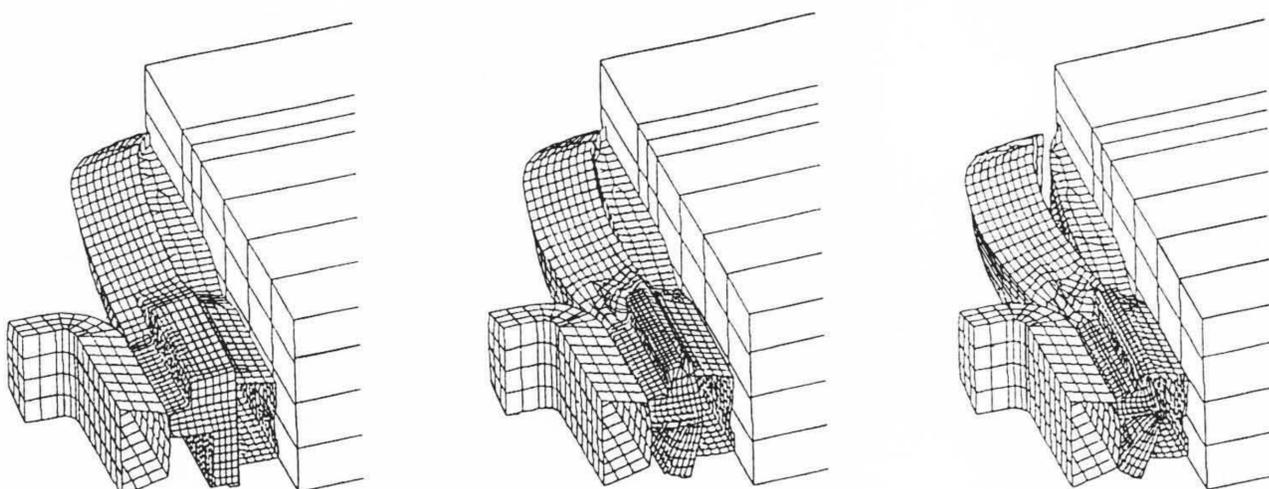


図5 バンパー(樹脂発泡材料)の衝撃吸収計算 衝突計算プログラムDYNA3Dの改良によって、樹脂発泡材料のように非常に非線形の強い材料の動的な大変形計算ができるようになった。

た構造解析の繰り返しループを形成した最適構造設計法である。具体的な例として、参考文献³⁾で紹介している三次元構造最適設計システムは、まさにその典型的な方法である。

このアプローチでは、既存の構造解析プログラムの手直し、FEMメッシュジェネレーションの自動化、設計変数と設計目的関数の定式化、そして設計変数の感度解析、さらに数理計画法による最適化アルゴリズム(オプティマイザ)などを用意して、それらを組み込んで一つの最適構造解析システムの閉ループとする必要がある。そのため、このシステム構築には多大な労力が必要である。

このシステムを用いて解析した例を図6に示す。ここでは、車体に取り付けられる既存の構造ブラケットに対して、質量を最小化しながら、強度を高めるための最適形状を求めている。初期の形状に対して、得られた最適形状は三次元的にかなり変化している。このような三次元構造の形状を変化させて、構造の最適化を行う技法は、今後さまざまな構造分野での適用が期待される。そのためスズキ株式会社は、三次元シェル構造最適システム(SOPT: Suzuki Optimization Tool)を、'93年度から一般ユーザーに提供していく予定である。

もう一つの流れは、既存の解析ソルバーや市販ソルバーをそのまま用いて、市販の最適化アルゴリズムパッケージ(例えば、DOT/DOC)と組み合わせることによって簡易に構築できる最適構造設計法である。具体的な例を図7⁷⁾に示す。同図で、最適化アルゴリズムにDOT/DOCを用いた理由は、このオプティマイザの信頼性と実績である。同時に、市販の解析ソルバーと簡単に接合でき、解析者が行いたい最適構造解析が手短に行えること

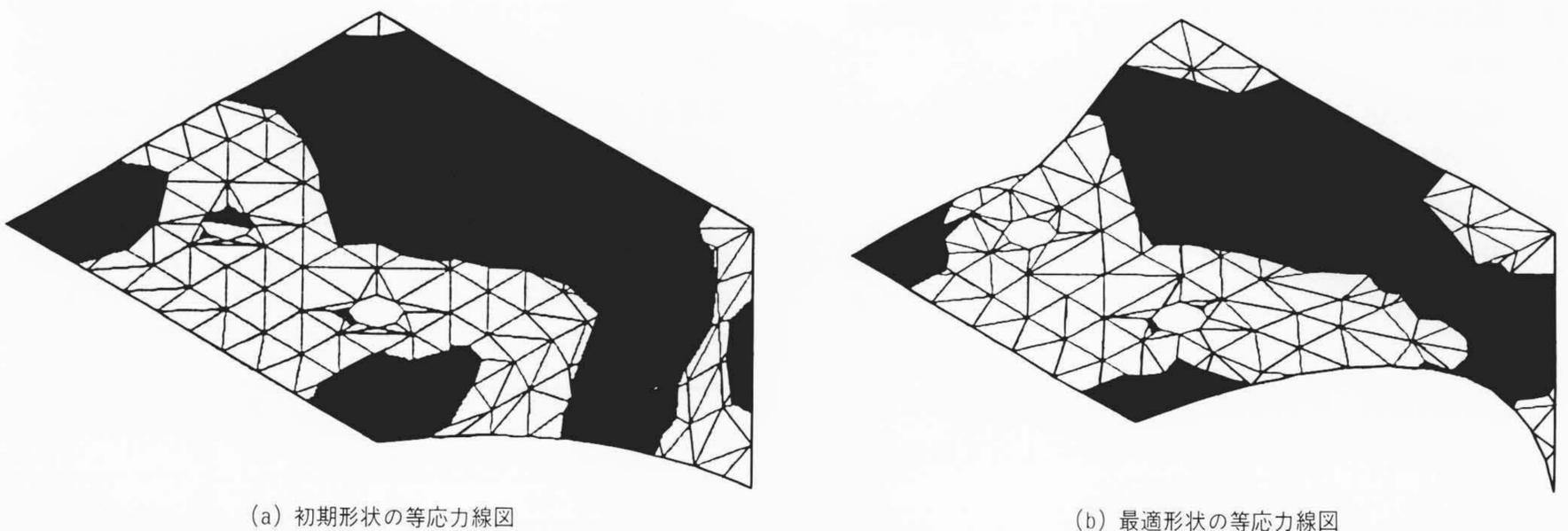
である。

最近の最適構造解析での進歩は、先の図6で示すように三次元構造体や形状の変化を伴う構造の最適計算ができるようになったことである。形状の変化を可能とするためには、計算システムの中に、FEM自動メッシュ作成機能および構造変化に伴って再メッシュを行う機能を用意する必要がある。FEM構造計算の精度は、入力メッシュに大きく依存するため、これらの機能の善悪がシステム全体の善悪を決定することは言うまでもない。同時に、DOT/DOCに見られるように、非常に信頼性のある最適化アルゴリズムの台頭も、最適構造解析の進歩に貢献している。

3 今後の自動車の構造解析

これまでの自動車の構造解析は、前述したように量的設計に基づいた構造解析であり、既存の構造を踏まえた上で、既存の構造の改良・改善に構造解析が利用されてきた。'80年代後半から台頭してきた自動車の衝突解析も、流れとしては量的設計の構造解析ととらえられる。また、前述の最適構造解析もこの範疇(ちゅう)に入る。これらの量的設計に基づいた構造解析が盛んに自動車に適用されてきたのは、各種構造解析プログラムの充実と、プログラムを実行するためのコンピュータが進歩し、かつより身近にコンピュータが使える環境になったことが指摘される。

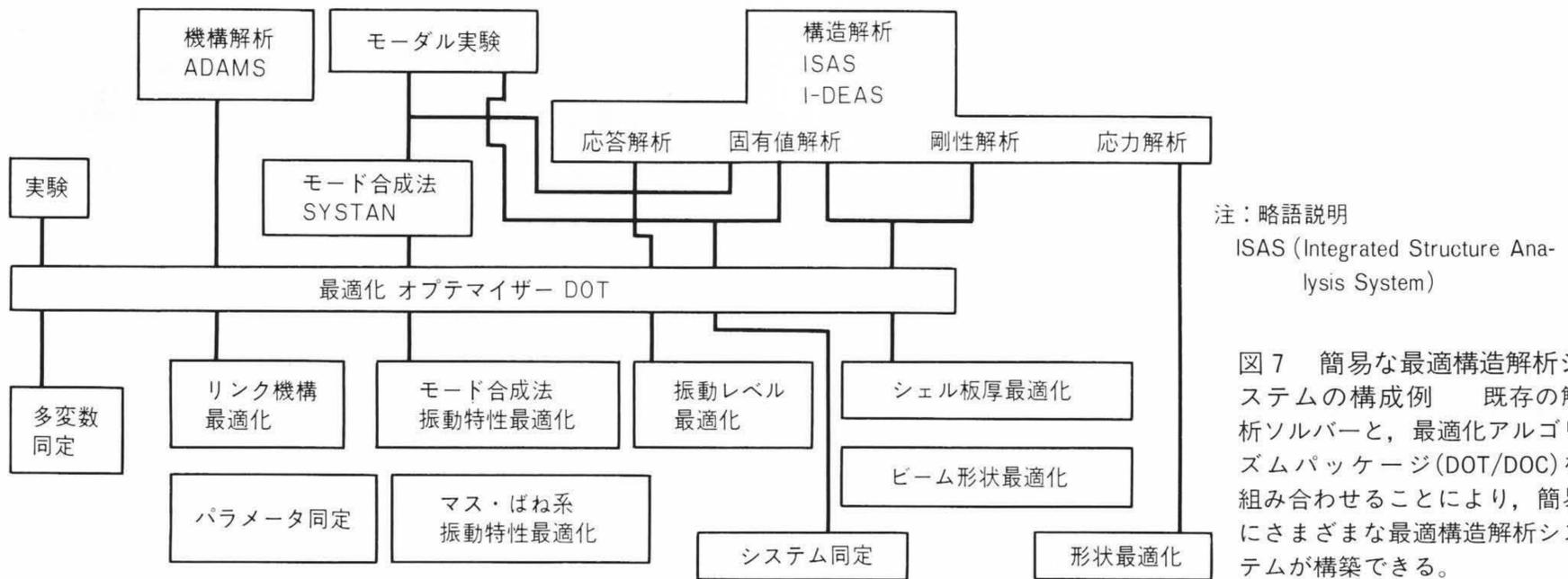
さて、現在の構造解析手法は今後とも自動車の設計に広く適用されていくであろうし、コンピュータのますますの進歩がある限りこの動きは活発になっていくと予測される。いわゆる計算力学の進歩の中で、構造解析は応



(a) 初期形状の等応力線図

(b) 最適形状の等応力線図

図6 最適構造解析例 車体に取り付けられる構造ブラケットの最適構造解析の例を示す。ここでの最適構造は、質量を最小化して強度を高めることにある。従来の量的設計範囲での最適構造解析である。



用されていく。

しかし、'90年代に入ってわが国の社会の中で、物や商品に対する消費者の考え方に大きな変化が生じてきた。実は'80年代にはその変化の芽がすでに生まれ、その結果'80年代後半には「感性の時代」が到来した。この時代では、消費者が商品に期待するもの、商品価値を測定する尺度に大きな変化が生じた。それまで量的な設計尺度であった「安い、軽い、強い」といった機能価値や経済価値に加えて、質的に異なった商品の価値尺度が生じてきた。'90年代に入りバブル経済の崩壊と重なって、商品価値の測定尺度がさらに変化してきている。同時に、家庭の中に多種豊富な商品が充満していて、商品を食べ飽きている現状もこの変化をもたらした主要な要因であろう。自動車を例にあげると、消費者(今後は生活者と呼ばれる。)の持つ自動車の価値観が大きく変化してきている。どのような価値が判断されるのか例をあげてみると⁸⁾、次のとおりである。

- (1) 属性的価値：走行しやすさ、耐久性など属性的機能的な価値。
- (2) 経済的価値：同じ機能なら安いほうがよい。
- (3) 感覚的価値：デザイン、美的良さ、色あいの良さ、肌合いの良さなど、五感で感じる価値。
- (4) 社会的価値：自動車がどのようなブランドで、どのように売られているのか、社会的な要素で生まれてくる価値。
- (5) 文化的価値：自動車に国や民族の文化的ノウハウ、ソフトがどのように反映されているかによって価値が変化する。
- (6) 神話的価値：人々の潜在意識に刻み込まれている暗示的な物語りに、商品がどのように関連しているのかに

よって価値が生まれてくる。

これらの価値の中で、量的な設計から判断できるものは経済的価値だけで、その他のものは従来の設計法では判断できない。残念ながら、これらの価値を商品に組み入れる明確な設計法がまだ存在していないのである。

この流れの中で、自動車を含めた物の設計を今後行っていくためには、従来の量の設計に加えて、質の設計(創造の設計とも解釈される。)が必要となってくる。'80年代後半から登場してきた最適構造設計は、あくまでも量的な範囲での最適であり、今後は質を含めた最適設計の取り組みが必要となるであろう。ここで言う量と質が持つ意味をより明確にするために、量と質の設計の基本的な定義・性格を表1に比較して示す。

表1に示す定義のもとに、今後望まれる量と質の設計を組み合わせた最適化設計の概念(図8参照)のもとに、今後の自動車の構造解析の方向について次に述べる。

3.1 今後の自動車の構造解析のアプローチ

生活者が持つ自動車への価値尺度が大きく変化し、多様化していく中で、自動車の骨組みを形成する車体や構造部品の構造設計、構造解析の取り組み方も、図8に示すような最適化設計の概念に基づいた新たな視点に立つ

表1 量と質の設計の基本的な定義・性格 自動車を含めた物の設計には、従来の量の設計に加えて、質の設計が必要となる。

量の設計	質の設計
模倣的	創造的
客観的	主観的
解析的	位相的
連続的(線形的)	不連続的(非線形的)
排他的	包括的

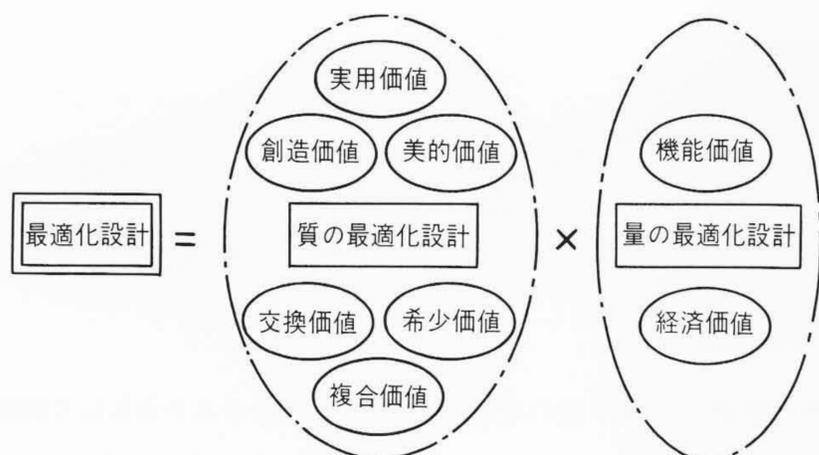


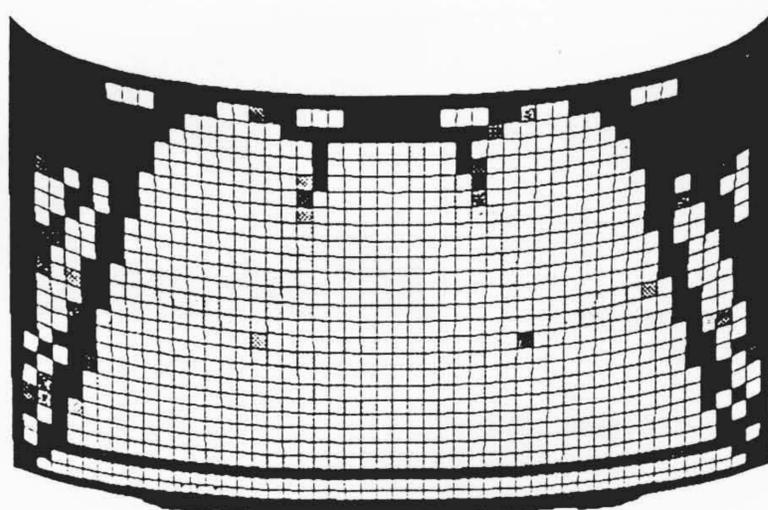
図8 最適設計の概念(質の最適設計がむしろ重みを持つ。) 量の設計と質の設計を組み合わせることによって、本来の最適化設計が可能となる。ここでは、質の最適設計がむしろ重みを持つ。

必要がある。確固とした具体的な方法は残念ながらまだ確立されていないが、その模索的なアプローチは見られるようになった。

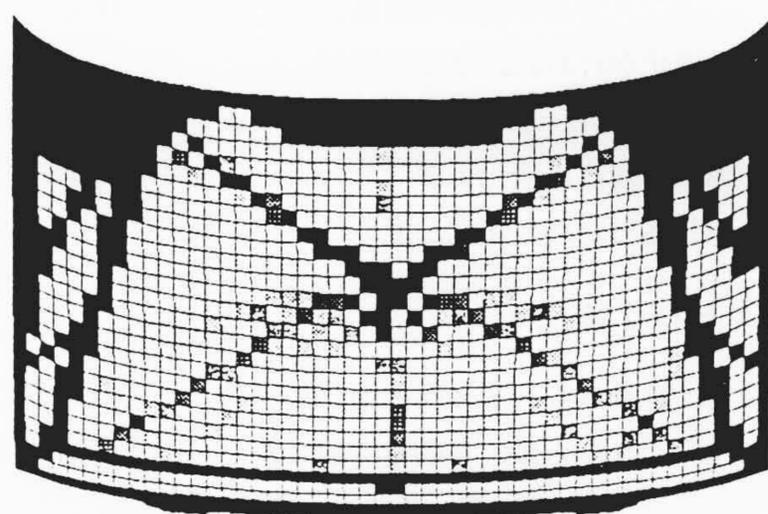
トポロジー(均質化法)⁹⁾を用いた三次元構造の最適化形状計算例を図9に示す。この例では、自動車のフロントフードの裏側に用いる補強板の最適な(軽量、高強度、固有振動数が高い。)形状を求めている。この形状最適化のアプローチは、既存の構造や形状を参照したり、あるいは初期値として引用していないので、むしろ質的な最適設計手法と言えるであろう。トポロジーのアルゴリズムは量の設計の考えによるが、この手法の適用は、形状の設計で創造的な結果をもたらす可能性が非常に強い。同図に示すように、三次元空間の中で、領域と領域内に作用する条件を指定すると、アルゴリズムに従って形状が作り出される。同図(a)は、補強板に曲げ荷重が加わったときの最適な形状例で、同図中白抜きされている空間は、その部分には構造体を必要としないことを意味している。同図(b)は、補強板中心部に分布荷重が加わった場合の最適な形状例である。この例で示すように、現状ではまだ荷重などの量的な設計要素しか取り扱えないが、今後の研究によっては、質的な設計要素も同時に取り扱える可能性があると思われる。

このトポロジーによる質的な最適化構造解析と、従来の量的な最適化構造解析を組み合わせ統合したシステムを用意することによって、先の図8に示す最適化設計の概念に少しでも近づけようとする試みも考えられる。このシステムは、大きく次の三つのサブシステムに分けられる。

- (1) トポロジーによる空間・形状の最適化サブシステム
- (2) 得られた最適形状をもとに、従来の最適化構造解析用入力を準備するサブシステム(質的な最適化構造解析



(a) 曲げ荷重における最適化形状



(b) 分布荷重における最適化形状

図9 トポロジー(均質化法)による最適化形状計算例

自動車のフロントフードの裏側に用いる補強板の最適な形状を求めている。この計算では、既存の構造を初期値として引用していないので、質的設計としてとらえることができる。

と量的な最適化構造解析のインタフェース)

(3) 従来の最適化構造解析を実行するサブシステム

具体的な例を図10に示す。いま平板が空間に置かれていて、左側上下2点で固定され、右端下に荷重が加わるような場合、どのような構造体にするか最小の材料で、その荷重に耐えられるような構造であるのかを求める。まずステップ(b)では、均質化法によってその構造体概要が計算される。次にステップ(c)では、得られた構造体を画像処理して従来の最適化構造解析用のモデル(FEMメッシュモデル)を作成する。そして、ステップ(d)で従来の最適化構造解析を実行することにより、最適な最終形状が得られることになる。

このようなシステムの利点としては、従来の形状に束縛されることなく、新たな、かつ自由な構造物を空間に設計するための支援道具として利用できることである。さらには、設計者が専門知識を必要とする従来の構造解析法を熟知していなくても、設計者の考えが具体的な構造物として簡単に可視化できることであろう。したがっ

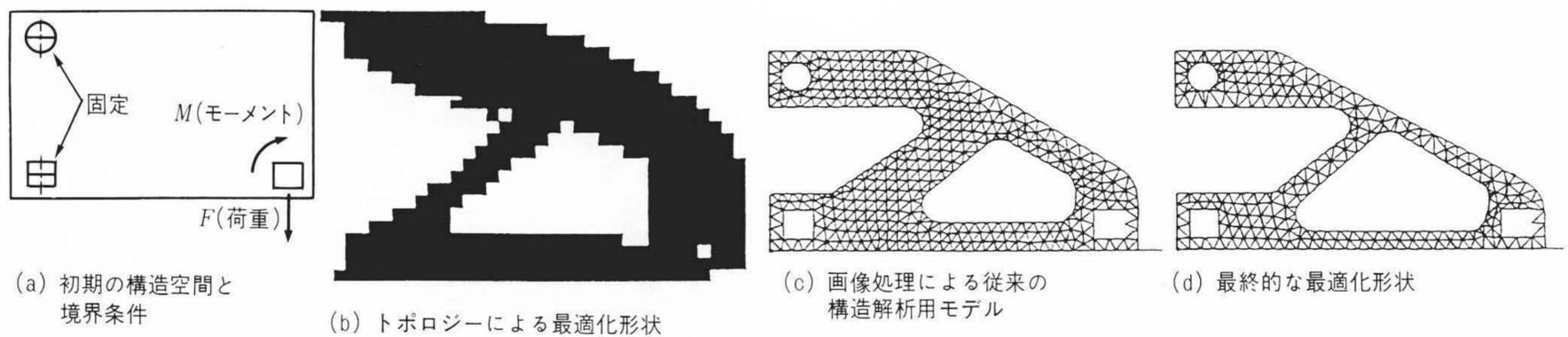


図10 今後の最適化構造解析システムの一例(質と量の最適化構造解析の統合) 質と量の最適化構造解析の統合システムとして構築するために、今後さらに研究が必要である。

て、このシステムを用いた構造設計では、まず構造の質的な最適化が行われ、そして細部にわたって、量的な構造最適化が行われることになる。このような自動車の車体や部品の構造最適化手法に対して、今後さらに質の設計を取り込むための研究が多いに期待される。

4 おわりに

以上、自動車設計での構造解析の現状と今後について述べた。これからは、自動車に限らずあらゆる商品に対して生活者がこれまでと異なった価値を求めてくる中で、物の基盤となる構造の最適化設計(質と量)は、これまで以上に重要な課題となるであろう。その課題に取り組むためには、ソフトとハードのいっそうの進歩と協力が必要不可欠である。

最後に、今後期待される物の設計について、その原点を再度認識するために、故山名正夫先生(東京大学工学部・飛行機設計論)のおことばを引用させていただいた。

「創造的設計とは、真実に向かって一步一步を進めつ

つ、美的感覚による発想を形に表し、実験あるいは解析計算などによって正しい修正を加えながら、確実に作品にまとめあげていく仕事であると言えよう。解析計算による研究は、しばしば著しい効果を発揮する一面、問題の抽象化あるいは仮定の設定に、現象を左右されるような重要な要素を忘れ、あるいは軽視する危険性を伴い易い。従って、数量的に計算された結果を常に感覚によって判断する必要がある、また同時に、これによって感覚が磨かれる。」

「工学的創造力を修練するには多くの方法があるだろう。しかし、最良の教科書であり、教師であるのは自然ではなかろうか。自然には、今までの長い歴史が秘められている。永遠は、幽玄である。永遠を生きてきた自然は、幽玄にして強力、确实無比なる真実在である。鳥の飛翔、魚の遊泳、野の草の風になびく風情、樹の幹と枝および葉の茂みの調和、いずれも自然の恵みによる生育の過程の表象である。一木一草、一鳥一魚、みな我々の輝ける永遠の教師である。」

参考文献

- 1) 西尾, 外: 車体構造最適化手法の探索, 自動車技術会, 学術講演会前刷集881(1988, 5月)
- 2) 齊藤, 外: エンジン懸架の最適化手法, 自動車技術会, 学術講演会前刷集891(1989, 5月)
- 3) 水野, 外: 三次元構造最適設計システムの開発, 自動車技術会, 学術講演会前刷集912(1991, 10月)
- 4) 五十嵐: 様々な形態における衝突解析 (Various Aspect on Crashworthiness Calculations), 13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Paris, France, 1991, 11
- 5) 五十嵐, 外: 車体の衝突解析へのDYNA3Dの応用, 自動車技術, Vol.40, No.11, 1986
- 6) 玉置, 外: 樹脂発泡材料の衝撃吸収解析, 日本機械学会, 第68期材料力学講演会(1990, 9月)
- 7) 齊藤: DOT/DOCの応用, 第三回システム最適化支援プログラムDOT/DOCセミナー(1992, 7月)
- 8) 日本経済新聞(1992, 2月)
- 9) Bendsoe, et al.: Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Comput. Mech. Appl. Mech. Engrg., 71 1988