

《小特集》

自動車設計と解析シミュレーション

萩原 一郎*

ABSTRACT Simulation analysis is the main part of CAE for car vehicle design/development and has been mainly utilized to decrease the number of cycles of detail design, prototype building, and testing. However, recently it is also used for the upper process of design and development such as planning for vehicle performance and now this situation has stronger effect on vehicle development. So, excellent accuracy of analysis is required, but as the simulation technique and hardware such as super-computer and workstation become satisfactory, it becomes realized drastically. And to utilize these simulation technique efficiently in design process, excellent analysis systems are required. So, in this paper, the conditions and the examples of analysis systems will be described such as analysis of vehicle and engine structure, crash analysis, vibration-sound analysis, aerodynamics quality analysis which use those analysis systems. The problems in near future are the construction of analysis expert systems, the extension of simulation analysis to manufacture and material development and decrease of time for making model for simulation analysis.

1. ま え が き

自動車の大衆化が進むとともに、ユーザーの要求も多様化し、社会環境とのより良い適合を図るなど、自動車の満たすべき性能も多岐にわたって拡大し、高度化してきている。これらの要求を満たすためには、様々な性能を高レベルでしかもバランス良く短期間で商品化する技術が必須となる。そのために、設計開発の初期段階で設計モデルを作り、製品の性能をコンピュータで予測して設計の最適化を図ることをねらったCAE(Computer Aided Engineering)が提唱されてきている。この設計モデルは、部品レベルやコンポーネント系そして車両レベルそれぞれで、熱、強度、剛性、振動、騒音など数多くの性能を扱う、500以上のモデルで構成される¹⁾。解析モデルは設計モデルを数値的に扱うもので、解析シミュレーションはCAEの中核をなすものである。この解析シミュレーションの実力レベルで車両の開発期間や商品力などが大きく左右されると言っても過言ではない。そのため、各社とも程度の差こそあれスーパーコンピュータや大型コンピュータあるいはワークステーションを使って、精力的に解析手法の開発やシステム化そして解析の定着化

などが行われている。

本稿では、設計開発プロセスと解析シミュレーションの役割り、それを実行するためのCAEシステムの条件や事例そしてそれらを使った性能解析例を示す。最後に、今後の課題などを述べる。

2. 設計開発プロセスと解析シミュレーション

2.1 自動車に要求される性能と設計モデル

自動車に要求される性能は移動や輸送機能等の基本的なものに加えて、より速く、より安全に、より快適にと、時代とともに多岐にわたって拡大し、また各性能に対する要求レベルも高度化、多様化しつつある。そして、自動車の設計の課題は、その自動車の使われ方に合わせて、これらの要求性能を明確にし、それらのバランスを効率良く達成することである。例えば、動力性能と操縦安定性、制動性能は釣合っていないと行かない。設計モデルとしては、図1に示すように、シャシーなどの部品単位・コンポーネント系・車両系の各々の設計検討項目に対し、強度・剛性・振動などの諸特性を求める構造検討モデルと、燃費・排気特性・動力特性・操縦安定性・乗心地などの性能検討モデルに大別でき、約500以上のモデルが考えられる。これらの設計モデルは、現状、必ずしもすべて定量的に表現できるとは限らないが、数式的または数値的に扱える解析モデルが最も強力な武器となる。そのため

Car Vehicle Design and Simulation Analysis. By Ichiro Hagiwara (Nissan Motor Corporation, Vehicle Research Laboratory, Central Research Laboratories (Yokosuka)).

*日産自動車(株)中央研究所車両研究所

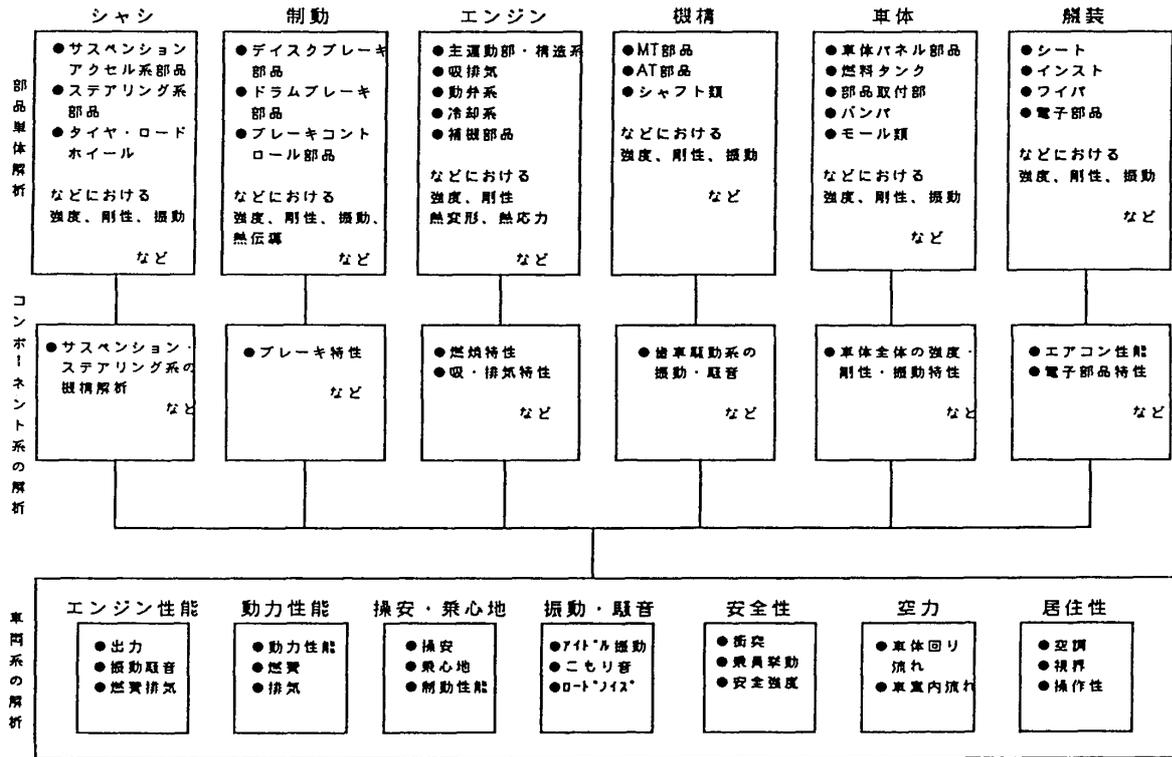


図1 自動車の設計・解析シミュレーション項目¹⁾

に、解析シミュレーション手法の開発、システム化、定着化に多大な努力が払われている。

2.2 解析シミュレーションの役割りと現状

解析シミュレーションは図2に示すように、設計・試作・実験の間の繰り返し回数を減少させることによる試作・実験費用の削減と、初期検討の充実による設計品質の向上を目的としている²⁾。

後者の構想設計段階の解析モデルとしては、できるだけ簡素で現象の本質を捉えて表現した、見通しの良いモデルにするよう留意される。また、前者の詳細設計段階のモデルは、設計上検討すべき内容に見合った意味のあるレベルまで詳しく、モデル化する必要があるが、実験データを採用して、モデルを適当な大きさにするなど解析能力とのバランスを考えた、効率の良いものにまとめるよう留意されている。そしてこれらの解析対象に対し、FEM(Finite Element Method)・FDM(Finite Difference Method)・BEM(Boundary Element Method)モデル、バネマス系モデル、実験データを併用したモデルなどが開発されている。その様子を図3に示す。FEMは、MSC/NASTMANやABAQUSなど汎用のプログラムが数多く市販され、この利用が一般化している。BEMは無限空間でも利用できることから車外騒音の解析などにまた、内部の煩雑

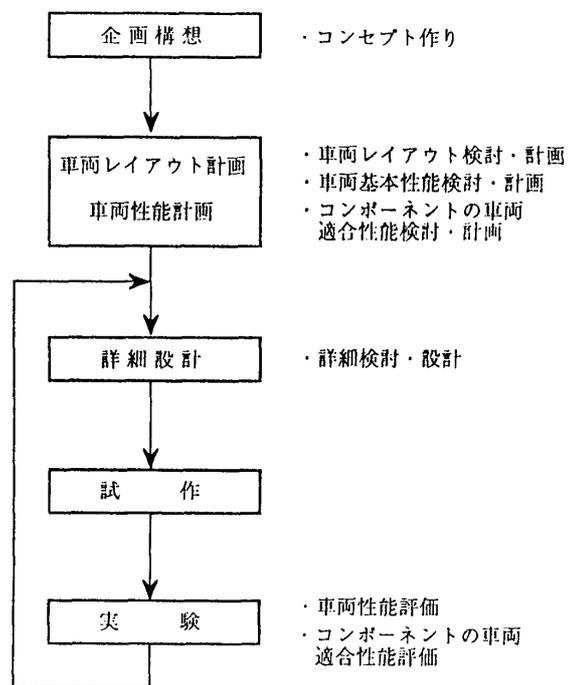


図2 自動車の設計開発プロセス²⁾

な分割が不要になることからエンジンやシャシー部品などのソリッド構造の強度・剛性解析などに利用される。バネ・マス法は構造を質点・バネ・ダンパなどと

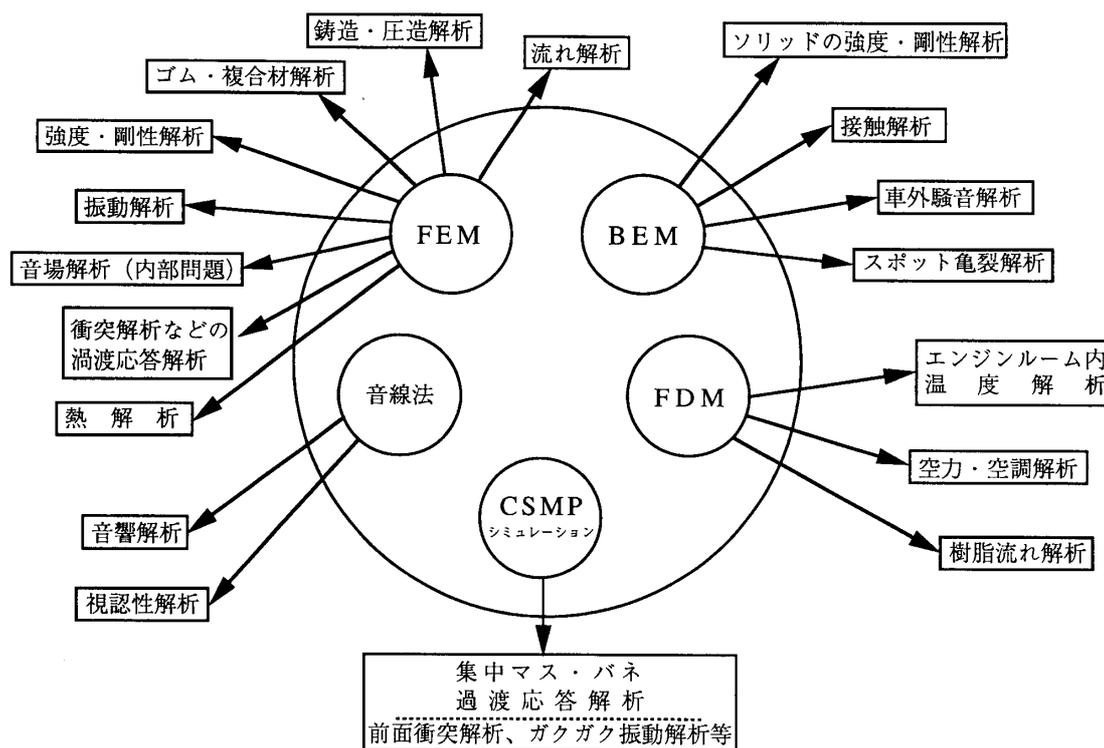


図3 主な解析項目と解析技術

これらをつなぐ剛体梁で表現するものである。従来、バネ・マス法では個々の現象・構造ごとに運動方程式を作成しプログラミングするのが一般的であったが最近では、ADAMSやDADSなどの汎用機構解析プログラミングが市販され、主に操縦・安定性、制動性、乗心地などの運動性能の解析に適用されて、注目を浴びている。この種のソフトでは個々の部品の寸法、諸元、特性値および機構的な拘束条件を定義することによりコンピュータ上に実験車両を作り上げ、実際に実験を行うときと同様に計算条件を変えて様々な事項の確認が可能となっている。空力解析やエンジン内の流れ・燃焼の解析は主としてFDMが利用され、現在研究段階から実用化に移りつつある状況である。いずれも計算時間が膨大であるが、スーパーコンピュータの利用により、この分野の急速な進歩が期待される。更に、純粋に数値解析的な方法で検討するのが困難な分野は実験データを併用して解析することが古くから行われてきている。燃費・排気・動力性能などの解析シミュレーションはその良い一例である。ここで目的に応じて、解析手法とそのモデルを選定することが重要となる。また同じ対象の解析でもコンピュータの能力の向上や解析手法そのものの発展によって選定を変えるなど、図3の役割も固定化されたものではないこ

とに留意が必要である。例えば、衝突解析ではバネマスモデル→FEM梁モデル→FEMシェルモデルというように変化し、そのFEMの解析内容も線形解析から非線形解析へと変遷している。流れ解析も従来はFDMが中心であったのが、最近ではFEMによる解析も見られるようになってきている。また、最近ではシミュレーションの繰り返し計算の短縮化や最適化計算のために感度解析が注目されている。また振動問題における区分モード合成法（ビルディングブロックアプローチ法；BBA）など新しい手法も設計検討にとりいれられている。

3. 解析システムとその事例

コンピュータは設計開発業務の効率化と設計品質の向上という課題を達成する過程の中で1960年代から本格的に利用されてきている。主な適用分野は1)構造解析2)性能シミュレーション3)技術情報管理（技術情報の一元化管理による業務処理の効率化）4)実験データ処理5)CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)などである。これらのシステムは多少の関連性を持たせながらも個別に開発されてきたが図4に示すような、一元化されたデータベースのもとに有機的に統合された総合エンジニア

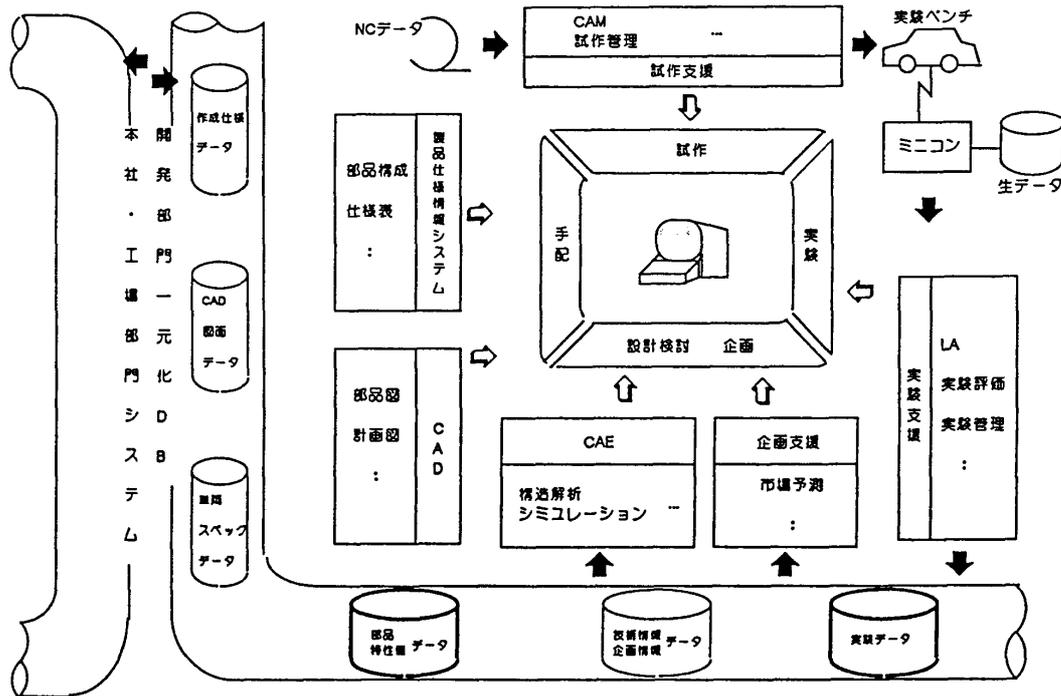


図4 総合エンジニアリングシステムの概念³⁾

リングシステムへと発展させつつある。これは設計開発からNC加工，ロボット制御，工程管理などの生産システムはもちろん，営業部門まで巻き込んで情報のネットワークを構成し，一元化されたデータベースのもとに受注から出荷までの情報を高速で処理するCIM(Computer Integrated Manufacturing)の構成要素の1つとなり得るものである。解析システムは図4のようなシステムから効率よく入力データをアクセスするプリプロセッサ部，解析シミュレーションを行うメイン部，及び解析結果を同図のシステムに送る，ポストプロセッサ部からなる。ここでは解析シミュレーションのための代表的なハードウェア構成とソフトウェア構成を示す。

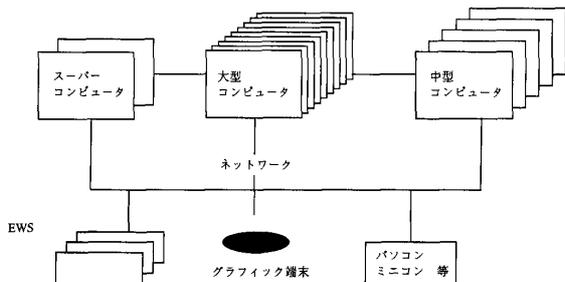


図5 ハードウェア構成の一例

3.1 ハードウェア構成

解析システムを構成するコンピュータの役割分担例を図5に示す。スーパーコンピュータは，構造解析や大規模シミュレーション用のバッチ計算専用機として使用される。多くのユーザーのためにどの端末からでもジョブの投入ができるよう構成される。構造解析用のモデル作成，メッシュ分割や解析結果の作図，アニメーションなどを行なうプリ/ポスト処理は，CAD用コンピュータのグラフィックス・システムやEWS(Engineering Work Station)で行なわれる。端末はCADシステムと共用される。これはCADデータや高画質端末を利用するためである。大型コンピュータは，CRAYのフロントエンド・コンピュータとして利用される。そのほか，主にTSS(Time Sharing System)処理を必要とする各種性能シミュレーションに利用される。BBAによる振動解析などで用いられる実験データは，ラボラトリ・オートメーション用コンピュータ(EWSや中型コンピュータ)で収集・処理される。その後，解析用コンピュータに転送し，利用される。

3.2 ソフトウェア構成

まず，プリ・ポストに必要な要件は次の3点といえる。1)CADシステムがもつ車体外板，ユニット部品などの図面情報データベースにアクセスができ，

CAD/CAM と解析シミュレーションのつなぎの役割を果たせる。2)最近、解析ニーズが増加している、エンジン、シャシー部品を中心とする複雑なソリッド部品の形状定義や、高度な要素分割の機能がある。3)カラーやアニメーション等の解析結果の表示機能が備わっている。

ここで、市販の汎用解析プリ/ポスト・プログラム‘CAEDS’の振動騒音解析における当社での利用の一例を示す。CAEDSは、ソリッド・モデリング用のCAEDS/MO、解析モデル作成用のCAEDS/GS、BBA解析用のCAEDS/SAから成る。CAEDSを中心とした解析の流れと各プログラムの関係を図6に示す。形状定義に関しては、CAEDS/MOによるソリッド・モデリングが有効である。そのほか形状定義については、車体外板等を中心に内製のCADシステムで定義したデータも、IGESファイルを経由してCAEDS/GSに転送できる。なお計算結果の一部は、CAD図面へ記載できるように、計算結果をCAD用データに変換することも可能である。CAEDS自体は大型コンピュータやEWSなどで実行される。しかし、スーパーコンピュータで実行するNASTRAN、ABAQUSなどのジョブ・ストリームを作成するJOB—GENERATORの利用などにより、使用者はコンピュータを意識することなく解析を実行できる。このため従来汎用機しか使用したことのない使用者にとっても、スーパーコンピュータの利用がスムーズに行なえる。解析プログラムのうち、内製の構造解析プロ

グラムとのインターフェイスは、UNIVERSAL FILEと呼ばれるCAEDSの標準フォーマットを利用して行なう。これらにより、CAEDSを中心とした解析プリ/ポスト機能を一層高めている。スーパーコンピュータにより解析が短時間で実行できても、プリ/ポストを含めた解析処理全体が早くならないと設計開発での利用にメリットは少ない。スーパーコンピュータの利用によってモデル作成に関する時間をいかに短縮するか、大量の計算結果をいかに早く効果的に表示するかが重要になっている。ソフト導入・開発において重要なポイントとなるのは、プリ/ポスト・プログラムと解析プログラムを含めたシステム全体の効率化である。次に図4の統合化システムを利用するものから2つのシステム事例の紹介を行う。

3.3 統合化システムを利用した解析システム事例

3.3.1 オートマチック・トランスミッション変速時の振動解析システム³⁾

このシステムは運転状態を想定してアクセル開度が与えられることにより、実車と同様に1速から2速というようにミッションが変速され、そのとき振動の時系列波形がシミュレートされるものである。図7に示すようなAT（自動変速機）の油圧回路の伝達特性モデルが用いられている。実験で求められたエンジントルク特性、トルクコンバータ特性と回路各部分のパラメータ、すなわち、変速用クラッチのピストン径、スプリング荷重、オリフィス径などの値が入力されて、トランスミッションの出力軸に発生するトルクが算出される。実験で求められた特性値は、図4の開発部門一元化データベースに格納して、利用されるようになっている。このデータベースは単なる1実験結果の格納ではなく、設計CAD図面、性能曲面などの実験シミュレーション結果が一元化されて格納されている。したがって常に最新の情報が多くの部署で同時性をもって利用可能である。それだけではなく、このATシミュレーションのようにエンジン仕様、AT仕様、運転条件、各種パラメータなどの多くの部署の多くの実験や図面情報を必要とする解析にも迅速な対応が可能になっている。

すなわち実験部署でも設計部署でも、端末装置からCAD図面と同時にエンジン・トルク特性やピストン径などの情報が引き出せ、これらの値を用いてAT運転時の振動がその端末で求められる。しかも一元化させることによりガクガク振動、アイドル振動などへの適用も同じデータベースを用いて簡単に行なうことができるようになっている。なお、このシステムのソル

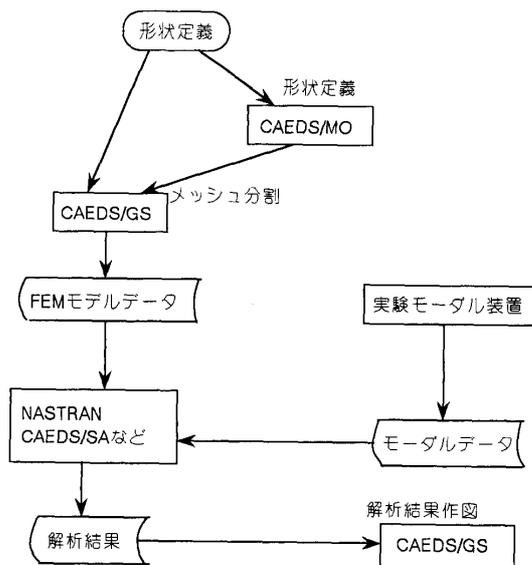


図6 CAEDSを中心とした場合の振動・騒音解析データの流れ

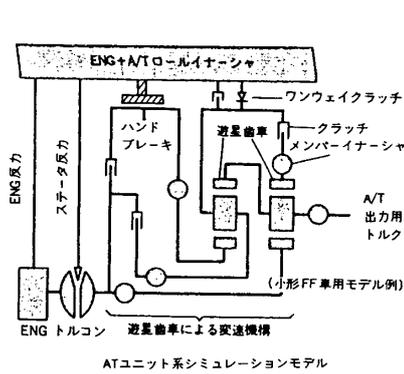
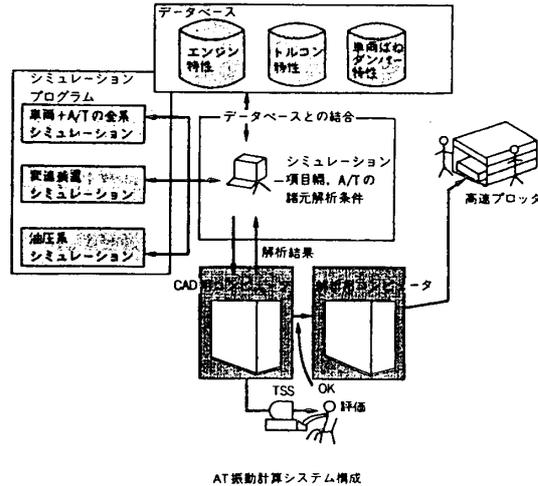


図7 AT車の振動解析システム³⁾



AT振動計算システム構成

パーとして、市販の常微分方程式計算用ソフトが用いられているが、利用者はそれをまったく意識することなく対話形式による質問に答えることによって、データベースの中から引用するデータ名や解析条件を指定して計算することができる。さらに結果の表示についても、時系列表示を行なうだけでなくフーリエ変換などのルーチンと組み合わせて、利用者側の多岐にわたるニーズに対応できるようにしている。

3.3.2 ホース類の変形解析システム⁴⁾

自動車にはブレーキホース類を始め数多くのホース類が使用されている。これらのホース類の車両への取付け時のレイアウト解析は困難であるため、実車実験により取付け位置等が決定されるケースが多い。その中でもブレーキホースはシャシー上のブレーキラインとホイールとの間に取付けられ、回りの部品との少しの干渉でも危険な事態となるため特に重要である。ブレーキホースは他のホースと同様、予歪みの影響によりその取付け形状は様々に変化する。そしてホイールのバウンド、ハンドル操作によっても取付け形状は様々に変化するため、回り部品との干渉を防止するのに多くの配慮がはらわれている。そこで、ホースの取付け位置の決定や回り部品との検討が解析で求められれば設計上、大変有効なものとなる。ここでは、汎用弾塑性解析コード；ABAQUSに機能追加を行って手法の開発を行いそれをシステム化した内容について述べる。

(1) 取り付け点の移動とそれに伴うブレーキホース変形の解析

まず、取付け点を作業者の取付け手順に沿って移動させた場合のホースの変形を求める。次にサスペンションなどの足回り部品の動きとともにブレーキホース

の取付け位置が移動するため、その経路を与える。ここではユーザサブルーチンを用いて、これらの変形経路を解析モデルに与えている。これにより、サスペンションが静止のときをはじめ、サスペンションのフルバウンド、リバウンド、ステアなどの際の、取付け点が求められ、ブレーキホースの変形形状が得られる。

(2) 足回り部品との干渉検討

更に、足回り部品との干渉の検討を目的に図8に示すCAD—解析システムを開発している。設計者が使用するブレーキホースの仕様とホースの取付け位置をシステムに入力すれば、解析データの作成、取付け点の移動経路の算出が自動的に行われ、ホースの形状が得られる。またブレーキホースと回り部品との干渉の検討がCAD画面上で、解析結果とサスペンションのCADデータとの重ね合わせの表示で行われる。サスペンションのフルバウンド、内輪ステア状態の解析結果のCAD画面上の様子を図9に示す。CAD画面で、ブレーキホース上の各点をピックすることにより各点と回り部品との干渉検討ができる。

4. 各種解析シミュレーション

図1に示した数多くの解析項目の中から、最近の主な車両性能解析シミュレーションを4.1節で、部品・コンポーネント系の解析シミュレーションについて

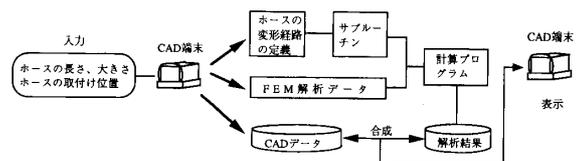


図8 解析—CADレイアウト計画システム⁴⁾

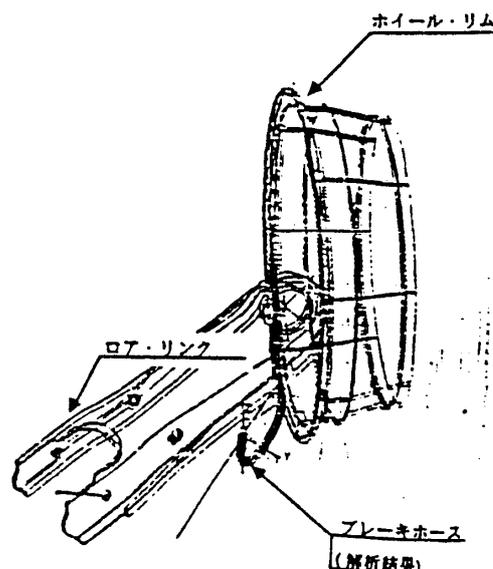


図9 CADによるブレーキホースの干渉検討⁴⁾

4.2節で述べる。

4.1 車両性能シミュレーション

車両全体での解析項目となる代表的なものに、動力性能、操縦性・安定性、乗心地、騒音振動、衝突性能、空力性能がある。ここではスーパーコンピュータの導入と解析手法の充実により最近、顕著な成果があらわれつつある空力性能シミュレーション、騒音振動解析、衝突シミュレーションについて述べる。その他、最近の特筆すべきものにADAMSやDADSなどによる、操安性や乗心地の解析がある。これらにより、車体とシャシーとの関係など従来以上に、広い範囲からの検討が進んでいる。またこの種の解析では車両の挙動に対する人間の評価と車両設計パラメータとの関係を求めることも重要なファクターであり鋭意研究が進められているが本稿では省略する。

4.1.1 空力性能シミュレーション

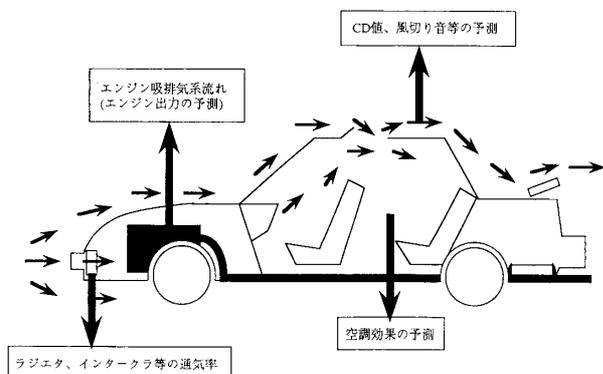


図10 空力に関する解析項目例

自動車における空力的課題としては、図10に示すように大きく次の5点に集約できる。

- ①CD、CLに代表される空力特性
- ②風音等に影響する車体表面上の流れ
- ③冷却性能に影響するエンジンルーム内の流れ
- ④換気や空調性能に関連する車室内流れ
- ⑤キップに付着する泥はね

このうち⑤はトラック固有の問題とすることができ、そしてこの中で車体の外形形状と本質的な係わりを持っているのは①、②及び⑤であり、造形初期段階での検討課題になる。車体まわりの空力特性であるCDは高速時の燃費・操安性・動力性能等に大きな影響を与える。一般に空力特性を求めるには膨大な計算時間を要するため高精度かつ実用的な解析が困難であった。図11に示すように⁵⁾、差分法によるダイレクトシミュレーション法を使用しているため、車体後流での縦渦の様子も良くシミュレートしている。例えばこの縦渦が大きいとルーフ上を流れてきた流れが加速され、バックライト上の負圧が上昇するために、車体に働く揚力と抗力が非常に大きな値となる。フロントフェンダー下流やフロントピラー下流に発生する渦は横力や偏揺モーメントの特性と密接に関連し、横風が吹いている時の自動車の走行安定性や直進安定性に大きく影響する。したがって同手法によれば、高速時の走行安定性や直進安定性の検討も可能となる。風音の解析を行うには更に細かな渦の解析が必要となるがこれは現在のところ困難である。このように最近では、計算時間はかかるが精度の良い3次精度上流型差分近似の解析例が見られるようになった。さらにFEMではランダムな要素分割のために風上格子点を見いだすのは困難であったがこれが解決され、FEMでも3次精度の上流型近似が可能となっている⁶⁾。FEMでは格子生成のための計算や自然境界条件の設定が容易であることまたアダプティブなメッシュの採用が容易とな

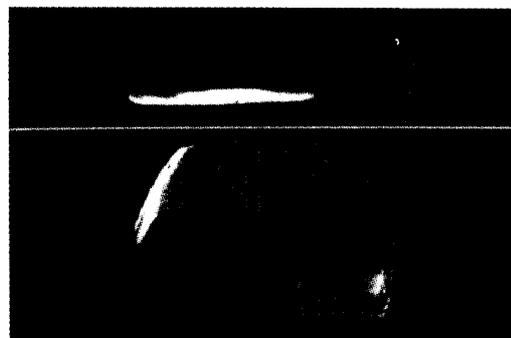


図11 後流での速度分布⁵⁾

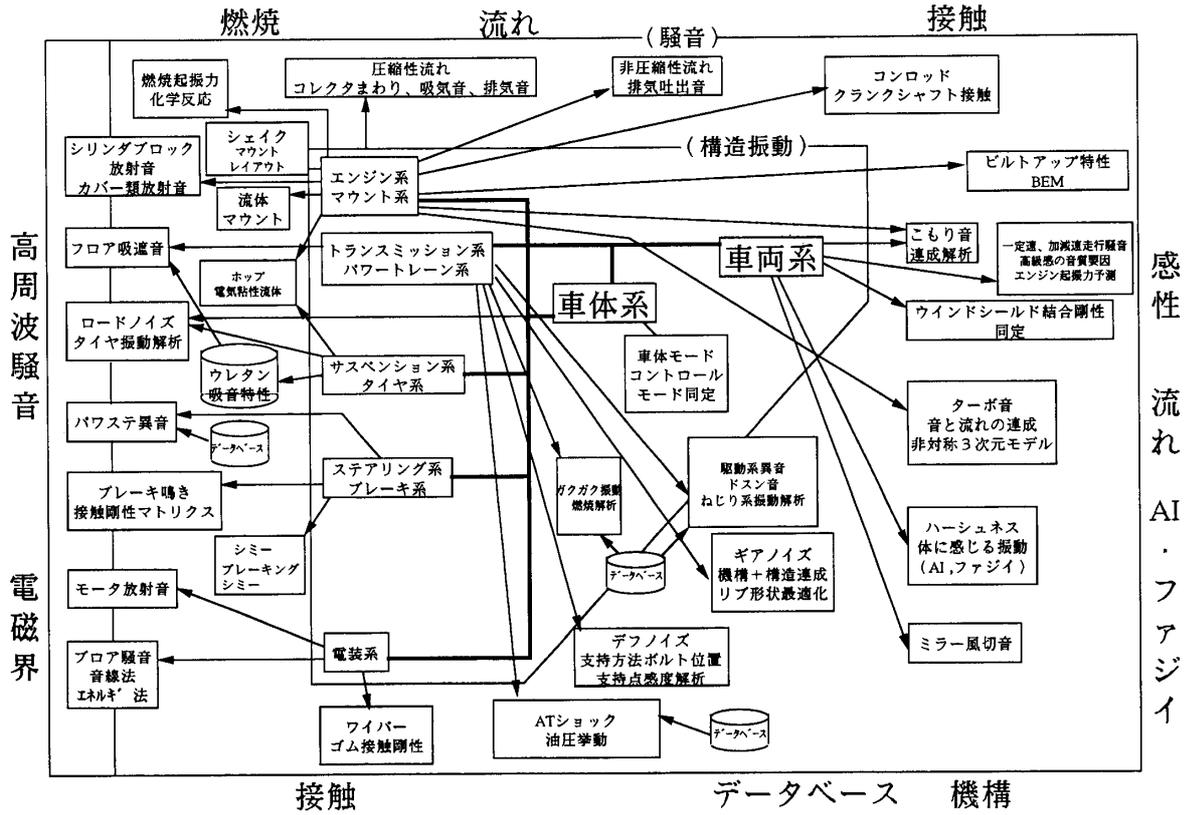


図12 騒音振動解析の課題全体図⁷⁾

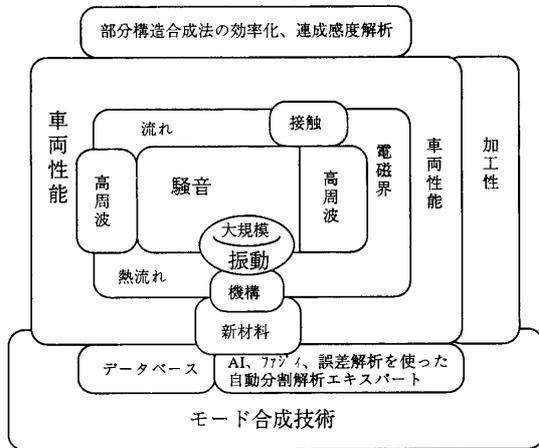


図13 騒音振動問題に対する解析技術の課題

る特長がある。したがって今後 FEM のこの分野での活用も行われてゆくと考えられる。

4.1.2 騒音振動解析

自動車の騒音振動に関わる現象と解析上の課題をまとめて図12に示す⁷⁾。このうち、純解析技術の課題についてまとめ直したのを図13に示す。この中で、感度解析、部分構成合法、制御理論など、より高級な技術は全てモード合成技術から誘導できるという意味に

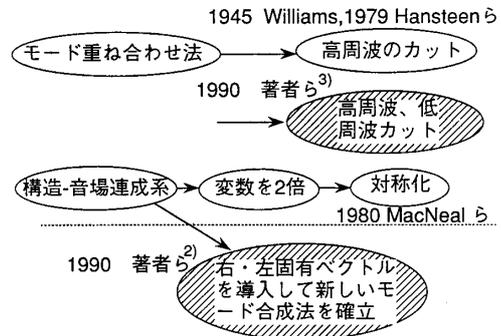


図14 著者らの新しいモード合成法⁸⁾

においてもモード合成技術は基盤となる解析技術である。特に、解析上非常に困難な課題である、こもり音やロードノイズなどの車室内騒音解析はモード合成技術がその基盤となる解析技術である。最近、著者らはこれに関して図14に示すように⁸⁾、基本的な2つの寄与をした。これにより、自動車の騒音振動解析の分野の格段の向上が期待される。モード合成法の歴史を見ると、高次のモードを省略しても補正を行わないモード変位法が昔から使用されていた。これに対し、1945年に高次モードを省略し、その補正を行う、モード加速度法が提案されモード合成の効率および精度が大幅

に改善されるようになった。そして現在の感度解析、騒音振動解析、部分構造合成解析は全てこのモード加速度法が基本となっている。しかしこれが車室内の高周波騒音の解析が困難な最も大きな原因となっている。低次の固有モードを省略すると、モード加速度法はモード変位法よりかえって精度が劣るからである。高周波といっても構造ではかなりの高次となっているが音場としては低次である。したがって、構造の低次モードが省略できれば、扱う構造振動のモードは格段に少なくてよいため、高周波の車室内騒音の解析もそれだけ容易になるわけである。そこで著者らは従来の高次モードに加えて低次モードも省略できる新しいモード合成技術を構造—音場連成系やダンピングを含む系でも利用できる形で提唱しその有用性を示している⁹⁾。更に、音も構造振動に影響を与えるという構造—音場連成では非対称なマトリクスを扱うこととなり、従来の構造系のモード合成法は成立しない。そこで、1980年 MacNealらは、自由度数を2倍にして、マトリクスの対称化を得た¹⁰⁾。これにより、モード合成技術の適用が可能となりこの手法がMSC/NASTRANに組込まれている。そして今日まで、各方面でこの手法が利用されているがこの方法では1)方程式の物理的な意味が変わるので実験との対応が難しい。2)計算量が増えるために、係数行列が特異になると対処しにくい。3)感度を求めるのが難しいという問題点がある。そこで著者らは非対称の固有値問題に対し、右固有ベクトルの他、左固有ベクトルも導入して、設計変数を増やすことなく連成系のモード合成法の導出を得ている。そして、これを基に、連成系の感度係数の導出に初めて成功した¹¹⁾。この2つの新しいモード合成技術を用いると、感度解析、部分構造合成法などの効率も格段に向上する。そして感度解析は従来構造系でしか得られなかったのが、構造—音場連成系にも拡張された。今後の高周波の車室内騒音解析及びその最適化解析が大いに期待される。

4.1.3 衝突解析シミュレーション

DYNA/3DやPAM/CRASHのような優れたコードによって車両のような大規模構造の衝突解析も可能となってきた。しかし対壁前面衝突性能に最も大きな影響を与える、フロントサイドメンバが圧潰途中で折れずに先端から順に圧潰するように設けられる、ビードの影響など、より詳細な検討は困難である。それには著者らが開発した塑性座屈モードを初期入力とする手法が唯一有効である¹²⁾。サイドメンバなど薄肉断面部材では断面寸法と板厚との関係により、3つの圧潰

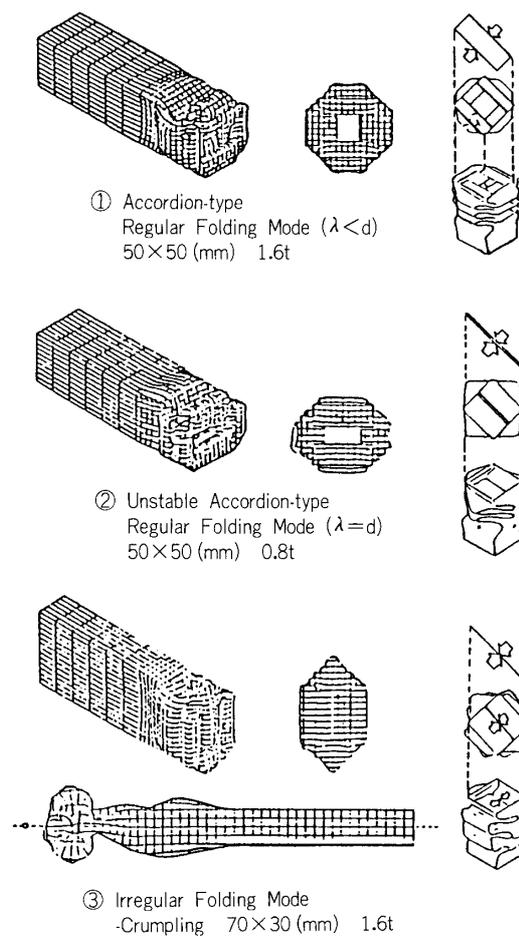


図15 幾何学的形状と圧潰モード¹²⁾

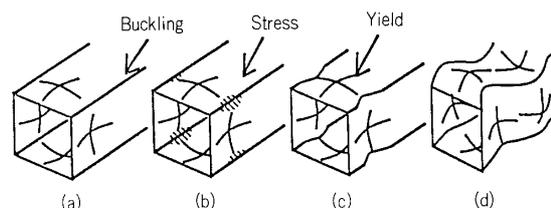


図16 部材の圧潰モード

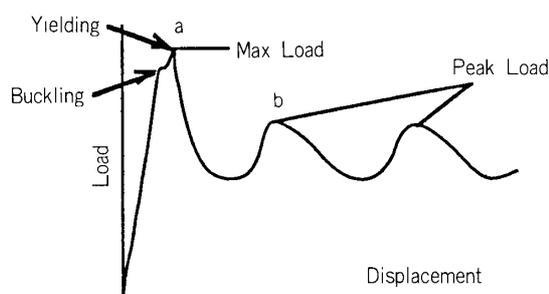


図17 部材の圧潰時の荷重履歴⁹⁾

モードがあることは長年実験でのみ確認されていたが、この手法により、解析で初めて図15の3つの圧潰モードの再現が可能となった¹²⁾。この開発した手法を部材圧潰のメカニズム解析に適用してみる。図16は薄肉箱型断面真直部材の圧潰モード、図17は圧潰時の荷重履歴を示す。まず、部材の断面を構成する壁面のうち、最も座屈強度の低い壁面で最初の局所座屈が起こる(図16a)。この座屈によって壁面に撓みが生じ、部材の角部に応力が集中する(図16b)。やがて角部は降伏し、壁面の撓みにより稜線部が屈服する(図16c)。この点が最大発生荷重点である(図17a)。部材は座屈波長(半波長)分の壁面を折り畳みながら圧潰していく。この壁面が折り畳まれると、次の壁面の変形が始まる(図16d)。しかし、2回目以降の荷重の極大値は、前回の变形により壁面に撓みが生じているために、1回目の最大荷重に比べて低い値となる(図17b)。

任意断面形状部材では、圧潰初期にはアコーディオン状の壁面座屈波形が生じるが、軸方向の強度に若干の片寄りがあるため、一般に図17aに示すように折れ曲がる傾向が強い。部材の座屈波形に合わせて適切にビードを配置すると、部材をアコーディオン状圧潰に誘導することができる(図18b)。

図19の荷重履歴の曲線で囲まれる部分の面積が、部材の圧潰により吸収されたエネルギー量に相当する。

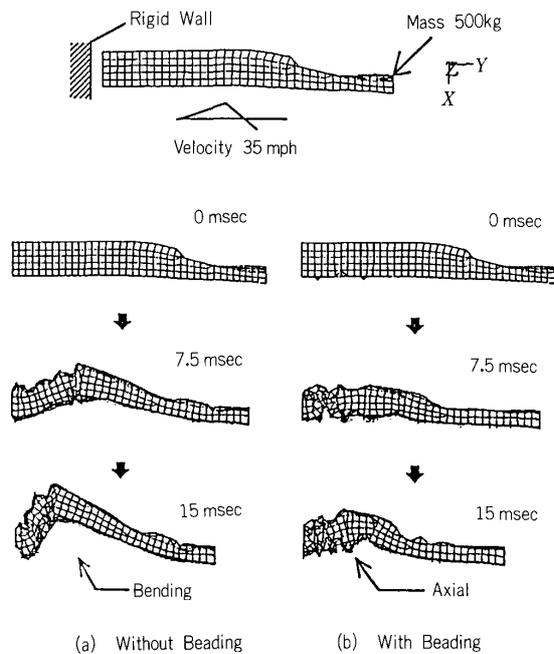


図18 解析モデルと衝撃圧潰解析結果⁸⁾: 圧潰モードに関して

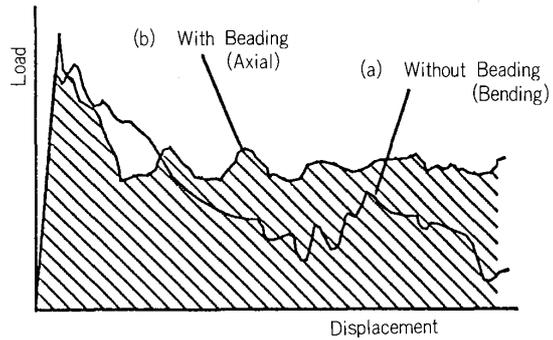


図19 衝撃圧潰解析結果: 荷重履歴に関して⁸⁾

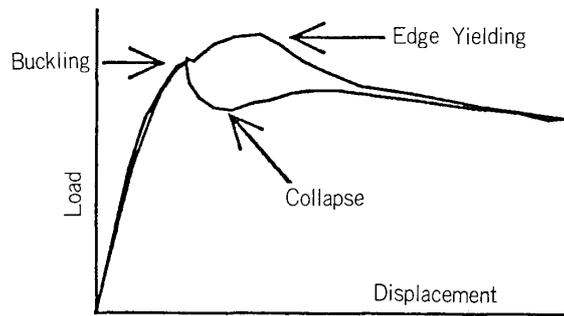


図20 荷重履歴の分岐点付近詳細⁸⁾

折れ曲がりモードにおけるエネルギー吸収量は、部材の折れ曲がりの発生以後は極端に低下する(図19a)一方、アコーディオン状圧潰モードにおけるエネルギー吸収量は、安定して高い値であることがわかる(図19b)。また、荷重履歴の最大圧潰荷重点近傍を詳細に観察すると、ビードを設置したことにより部材が壁面座屈の分岐経路に確実に誘導されていることがわかる(図20)。即ち、ビードなし部材では壁面座屈以後も、稜線部屈服に至るまでにさらに荷重の上昇があるため、屈服時には部材の全体的な変形(折れ曲がり)が連成する傾向にある。ビード設置部材では壁面座屈以後、角ビードの効果により稜線部が直ちに屈服するので、壁面座屈による分岐経路がそのまま圧潰の荷重履歴となる⁸⁾。車両全体での解析も衝突特性を左右するサイドメンバが車両に組み付けられた状態で、ここで述べた変形モードとなるように検討される。

4.2 部品・コンポーネントの解析例

4.2.1 車体構造と車体部品に関する主な解析

図21に車体構造と車体部品に関する主な解析項目を記す。そもそも自動車のFEM解析は車体の構造解析から始まっており、同図に示すように、多くのFEM解析の項目がある。車体は薄肉シェル構造でパネル部

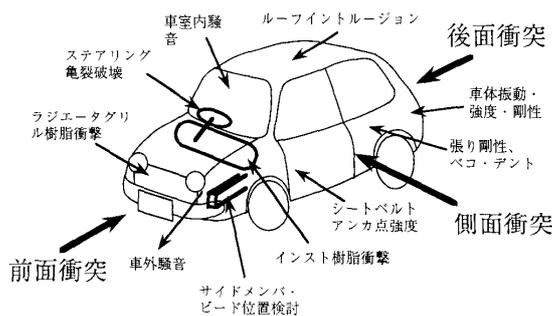


図21 車体構造と車体部品に関する主な解析項目

は外板と内板とからなる。外板は品質感が重要となるため水洗いするときなどの、飛び移り屈屈問題である張り剛性や石などが当たるときのペコやデントなど幾何学的そして、材料学的非線形解析も時に必要とされる。内板やメンバ類は強度、剛性、振動対策のためビードやエンボスなども入り非常に複雑な形状と構造であり、これらの解析はFEM以外では困難である。車体は安全性や騒音振動などと直接関係するため、ただ材料を置換するだけでは構造として成立しない。図22は材料置換などの際、新構造を最適化解析をしてきめる際の拘束条件を示す²⁾。

4.2.2 エンジン・動力伝達機構部品を対象にした解析

図23にはエンジン・動力伝達機構部品を対象にした主な解析項目を記す。近年の車外騒音規制の強化、ユーザーの上級指向による車内騒音の改善、快適性の追求という点から、エンジン振動騒音の低減が強く求められる。一方、軽量化および高圧縮比化、急速燃焼等による燃費向上という騒音低減とは相反する要求により低騒音エンジンの最適化手法の確立が必要となっている。そしてエンジンの性能は空気の流れや挙動により支配されると言っても過言ではなく、流れ解析も図23記載の吸排気系流れの他、多岐に亘る解析がな

| 荷重条件 | |
|-----------------------|-------------------------------------|
| ☆ | 時速5マイルの前面バンパ衝突 (慣性緩和解析) |
| ☆ | 時速5マイルの後面バンパ衝突 (慣性緩和解析) |
| ☆ | サスペンションに3gの垂直方向の左右対称の加速度付加 (慣性緩和解析) |
| ☆ | ブレーキに前後方向8gの加速度付加 (慣性緩和解析) |
| ☆ | 制動系へ衝撃力付加 (慣性緩和解析) |
| ☆ | ルーフイントルージョン (静解析) |
| ☆ | サスペンション片側に8gの垂直方向加速度付加 (慣性緩和解析) |
| ☆ | 時速30マイルの前面バリヤ衝撃 (慣性緩和解析) |
| ☆ | 後面ムービングバリヤ衝撃 (慣性緩和解析) |
| 車体の基本振動の共振周波数に関する制御条件 | |
| | 曲げ1次: 19 Hz以上 (固有値解析) |
| | 振り1次: 17 Hz以上 (固有値解析) |

図22 車体成立性検討のための基本的な荷重・拘束条件²⁾

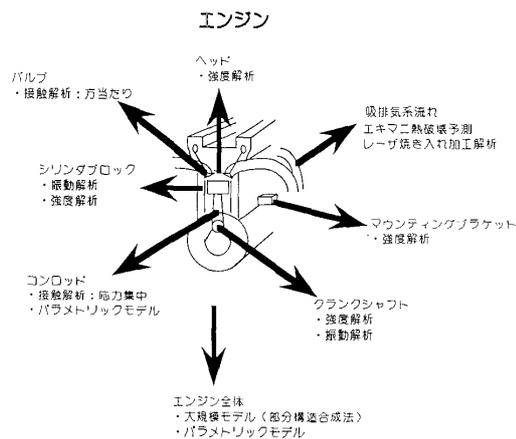


図23 エンジン・動力伝達機構部品を対象にした解析

されている。これは構成要素も簡単な1次元でモデル化できる部位から複雑な3次元モデルを必要とする部位まで多岐にわたっていることにもよる。解析領域を大別するとより高い最高出力や最大トルクを得るための吸排気系と燃焼室、吸入ポートとに分けることができる。前者は系を構成する各部位の慣性効果や脈動効果を有効に利用し、より多くの空気を燃焼室に送り込むよう設計される。また後者は供給される燃料と空気のより良い混合や燃料効率を得る最適な乱流状態を作り出すよう設計される。このエンジン内の流れ解析のもう1つの特徴は時には音速を越えるような領域があることから圧縮性流体として扱う必要があることと、毎分6000から8000回転で運動するピストンや吸排気バルブの非定常運動に支配される非定常流れを扱う必要のあることである。吸排気系の空気やガスの流動は1次元で表現できることから比較的早くから解析できているが燃焼室や吸気ポート内のガス流動は上記のように困難で今後の発展が期待される場所である。

更にエンジンの構造解析の分野も、シリンダブロックの振動放射音解析、ピストンやエキゾーストマニフォールドなどの熱伝導・熱応力解析など難易度の高い解析も行われている。エンジンはソリッド部品が多く解析モデルを作成するのが特に困難であるため強度剛性解析などにBEMも利用される。更に、エンジンを対象にしたソリッドの形状表現の研究も行われている。また放射音解析は開空間を扱うため、専らBEMが使用されている。

4.2.3 シャシー部品の主な解析

図24にはシャシー部品の主な解析項目を示す。シャシーに対する要求は高速走行時のスタビリティ、操舵に対する正確な応答性、制動時の安定性、不整路走行

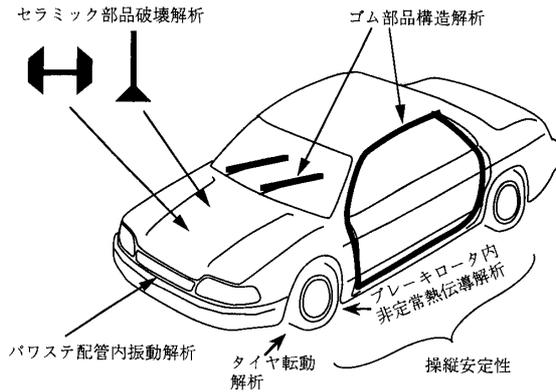


図24 シャシー部品などの主な解析項目

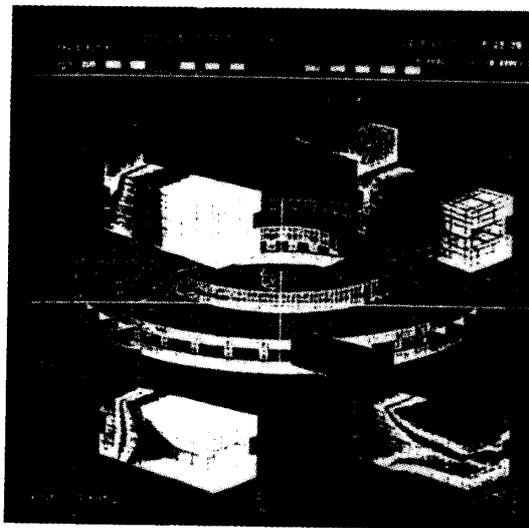


図25 ディスクブレーキロータの熱伝達解析

時の安定性およびトレス性等、数多くあるが、解析シミュレーション技術の向上により設計段階において車両性能の予測が可能となってきた。ディスクブレーキロータの非定常熱伝導解析、タイヤ転動解析そしてゴム部品の構造解析なども大いに進んだ。図25は非定常熱伝導解析結果の一例として、制動時のディスク・ロータの過渡的な温度分布を示す²⁾。制動時にブレーキ・パッドとロータの摩擦によって生じる熱が次第にロータ内部に広がっていく様子が見える。解析によって得られた温度は実験結果に対して相対誤差5%程度の精度である。この解析により、制動時の減速度およびディスク・ロータの表面熱伝導効率を考慮して、最適なベンチホール（冷却窓）形状や肉厚を決定することができる。これは実験で計測することが難しいという理由で解析の効果が大きい。

5. 今後の課題

これまで触れなかった項目について記す。

1) 解析エキスパートの構築

解析モデルの作成能力はモデルを考えて予測しそれを実際に検証することで身につけてゆく。したがって、このエンジニアリングセンスには個人差がある。これを標準化するエキスパートや、増加するソフトや手法を的確に選択し、的確に使用するためのエキスパートの構築が課題である。

2) 解析範囲の拡大

従来、困難であった、例えば、シェル要素を用いた衝突解析、ダイレクトシミュレーションによる空力・空調解析、構造-音場連成解析、そしてFEMと感度解析を用いた車両レベルの最適化解析など大規模な解析も大いに進んだ。その結果、解析技術は今や車両開発の期間短縮、費用削減、工数削減そして品質向上に欠かせないものとなっている。しかし現在、解析シミュレーションの適用範囲は、機能設計に関するものが主たるものである。今後は図26に示すようなサイマルテイニャス解析とも称するものがますます重要なものになる¹³⁾。同図で車両重量を軽減するために、例えば、新材料が用いられるとする。まず、強度、振動などの機能設計の面から最適化断面を算出しても、実際に製造できない場合がある。製造の可否があらかじめ予測できれば費用の大幅な削減につながる。これを材料サイドから見れば、そのような形状に製造できるように材料そのものを創製していくような検討も重要でありそのシステム構築は課題といえる。

3) 解析モデル作成時間の短縮

スーパーコンピュータを使用して大規模なモデルで解析ができるようになった現在、解析モデルはますます大きくなる傾向がある。それだけ解析モデル作成に

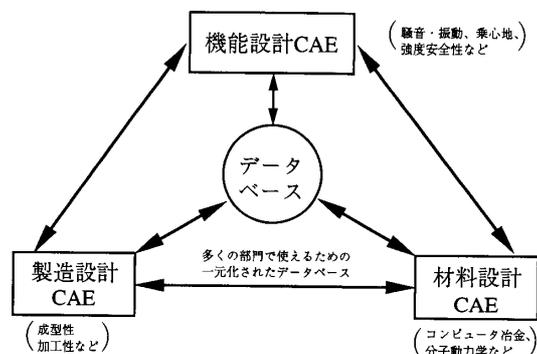


図26 サイマルテイニャス解析の概念

要す時間の比率が大きくなっている。例えば、CAD・解析一貫システム、つまりFEMオートメーションの実現などが課題である。これに付随する技術に、誤差解析による最適自動分割やニューロ、ファジィ、AIなどを用いたメッシュ分割、四分木法や八分木法による自動分割などがある。

4) 最適なハードウェアシステムの構築

自動車の設計開発では多数の部署が連携をとりながら並行して開発を進めて行く必要があることから、データやソフトウェアの共有化を考慮して集中処理方式によるシステム構成が中心となっていた。しかし、グラフィック処理や対話処理分野を中心にワークステーションを使った分散処理の効率の良さも認識されていることから、今後は効率とトータルコストの面から最適なシステム構成の検討も課題として挙げることができる。

6. まとめ

- 1) 解析シミュレーションはCAEの中核であり、設計開発プロセスの中で、設計→試作→実験の繰り返し回数の削減の他、企画構想段階で用いられることを述べた。
- 2) 設計開発の中での解析システムの要件と、開発部門の一元化データベースを利用する2つの解析システムの事例を記した。
- 3) 車両の解析シミュレーション事例として、衝突、空力、騒音振動について記した。そして、コンポーネント解析事例として、エンジン動力伝達機構部品、シャシー部品、車体構造と車体部品のそれぞれを対象にした解析の概要を述べた。
- 4) また今後の課題として、解析エキスパートの構築、製造設計や材料設計への解析範囲の拡大、解析モデル作成時間の短縮そして最適なハードウェアシステムの構築を挙げた。

参考文献

- 1) 萩原：自動車開発におけるスーパーコンピュータとCAEの実例，日本機械学会900-48講習会教材，37/53 (1990)
- 2) 三浦，福田共編：自動車設計と解析シミュレーション，培風館 (1990)
- 3) 萩原，荒井：CAEシステムとインタフェース設計技術，応用機械工学，346，62/68 (1988)
- 4) 津田，萩原他4名：車両のブレーキホースのレイアウト設計時の形状解析手法の開発，自動車技術会講演前刷集891，151/154 (1989)
- 5) 笹倉他10名：車両性能解析の現状と将来，日産技報23別冊CAE特集号，20/42 (1987)
- 6) 田端：高レイノルズ数流れ問題の有限要素解析，日本数学会1989年度秋季講演会，応用数学特別講演，応用数学分科会講演アブストラクト，157/173
- 7) 萩原：自動車騒音振動解析，日本機械学会誌，92-847，520/525 (1989)
- 8) 萩原：車両衝突特性及び騒音振動特性向上のための最先端構造解析技術，第40回応用力学連合講演会招待講演，第40回応用力学連合講演会予稿集，17/27 (1990)
- 9) 馬，萩原：高次と低次のモードの省略可能な新しいモード合成技術の開発第1報；ダンピング系の周波数応答感度解析手法の開発，機論，57-436C，1148/1155 (1991)
- 10) R. H. MacNeal, R. Citerley and M. Chargin : A Symmetric Modal Formulation of Fluid-Structure Interaction, ASME Paper 80-C2/PVP-117 (1980)
- 11) 萩原，馬，荒井，永淵：構造一音場連成系の固有モード感度解析手法の開発，機論，56-527C，1704/1711 (1990)
- 12) 萩原，津田，佐藤：有限要素法による薄肉箱型断面真直部材の衝撃圧潰解析，機論，55-514A，1407/1415 (1989)
- 13) 萩原：自動車における材料・構造設計，システムと制御，30-3，30/37 (1986)