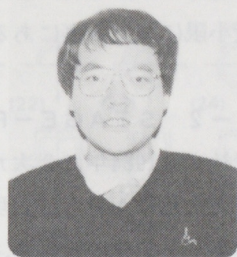


モーターサイクル設計における CAEの実用化



モーターサイクル本部第1設計部 吉村 昇一

1. はじめに

モーターサイクルを設計するにあたり、開発初期段階でCAE（コンピュータ・エイディッド・エンジニアリング）を適用する事は商品の信頼性を確保するとともに、開発期間を短縮するためにも重要である。CAEのなかでも、有限要素法（FEM）は非常に重要な役割を果たしている。そしてモーターサイクルの様な小型の乗り物の開発にFEMを適用するには、短期間に低コストで解析を完了する事が必要である。

しかし、従来FEMを利用するには複雑な操作が必要であったため、設計者が満足に使える状態ではなかった。この問題を解決するために、設計者自らがモーターサイクルのFEMモデルを作製したり、解析結果を容易に評価できるようなシステムを開発することにした。このシステムをSTAGE-FEMと呼んでいる。

ここでは、まずSTAGE-FEM開発の背景と目的を明らかにし、その特徴機能や操作方法について述べる。次に、STAGE-FEMを用いて解析した例として、フレーム、スウィングアームの強度剛性、ホイールの強度、クランクシャフトの強度、コネクティングロッドの強度について紹介する。また、このシステムの及ぼした効果について、解析件数、解析時間、解析コスト、精度の点から述べてみる。更に、システム開発後に生

じた幾つかの問題点や、振動解析の実用化等将来の課題についても説明する。

2. STAGE-FEM

2-1 システム開発の背景と目的

我社でFEMを使いはじめたのは10年以上前の事であるが、解析結果を設計に適用するには次のような問題があった。

- (1) FEMデータを作製するのに時間がかかり過ぎる。
- (2) 設計者にとっては、操作が複雑過ぎる。
- (3) FEM専任者には設計の知識や経験が乏しく、有効なアドバイスができない。

そこで、これらの問題を解決し、設計者自らがFEMを使えるようなシステムを開発する事にした。なお、解析用ソフトとしてはNASTRANを用いる事にした。そして、設計者が容易にシステムを利用できるよう、システム開発にあたっては次の4つの条件を満足する事を必須とした。

- (1) 操作方法は、設計に用いているCADと同じである。
- (2) CAD端末があれば、どこでも使える。
- (3) 同じ端末で、解析に必要な全ての操作が行える。
- (4) NASTRANの知識がなくてもエラーをしないようなチェック機能を有する。

システム開発の目的は、容易にFEM解析を設計に適用でき、それによって後工程での問題発生を最小限に押える事にある。

2-2 STAGE-FEMの概要

我々では1984年に3次元CADシステムを導入し、2次元CADでは表現できないようなエンジンのポート形状の設計や、カウリングとフレームの干渉チェック等にこれを用いてきた。この3次元CADシステムをSTAGEと呼んでいる。

STAGEには導入以来新しい機能が追加されたり、改良が加えられたりしてきた。そして、前に述べた目的を達成するため、NASTRAN用のFEMデータ作製機能や解析結果の出力機能をSTAGEに追加した。これをSTAGE-FEMと呼んでいる。

2-3 STAGE-FEMの特徴

ここでは、STAGE-FEMの特徴について操作と機能の面から述べてみたい。

2-3-1 操作

写真1に我々が現在使用している端末の構成を示す。CRTの前には左からファンクション・キーボード、キーボード、タブレットそしてスタイラスペンが配置されている。

操作は、左手でファンクション・キーを押し、画面に表示される手順にしたがって右手でメニューを選ぶことの連続であるが、この操作は設計者が日頃使っているSTAGEと同じである。

図1に示すように、STAGE-FEMは12の専用ファンクション・キーを持っている。これにより、コマンドを入力するために多くのキーを押す必要がなくなり操作方法を覚えるのが楽になった。



写真1 端末構成

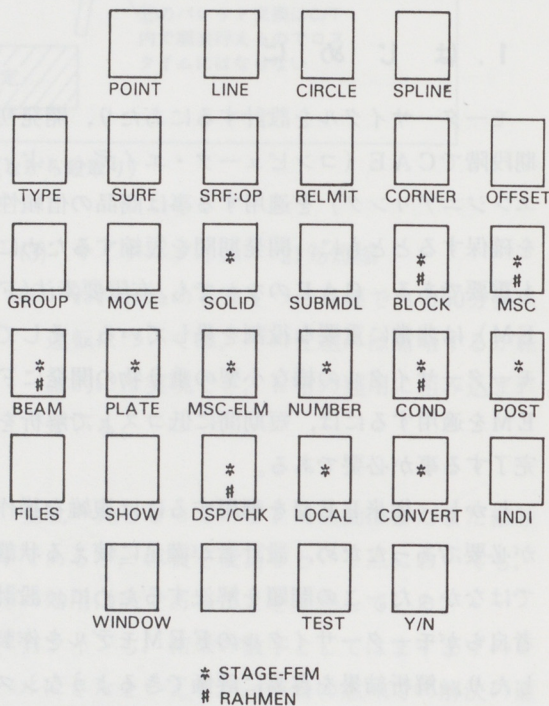


図1 専用ファンクションキー

2-3-2 機能

STAGE-FEMの基本機能はNASTRAN用の入力データを作製する事と、解析結果を表示する事である。我々は、FEMデータ作製と解析結果の評価が簡単にできるようにいくつかの工夫をした。次にその中から例を示す。

- (1) すでに2次元CAD、又はSTAGEで作製された図形データを利用できる。

- (2) 形状データは日常の設計時と同じ方法で作製できる。
- (3) 平面上に作製したシェル要素を任意の曲面上に投影できる。これにより2次元CADデータを有効に活用できる。
- (4) ビーム、シェル、ソリッド、剛体、バネ、集中質量の各要素を作製できる。
- (5) ビーム要素の断面形状はリストの中から選べる。(図2)
- (6) 重心位置、重量、慣性モーメントを算出できる。
- (7) 集中荷重、モーメント、遠心力、面圧、重力負荷等の荷重条件を設定できる。
- (8) 二重拘束の様な基本的なNASTRANエラーを自動的にチェックする。
- (9) 要素番号、節点番号は自動的に付加。
- (10) 二重要素、要素の欠落、要素間の不連続など初歩的なデータ作製ミスを防ぎないようにチェックできる。(図3)
- (11) データの消去、付加、修正が容易。
- (12) フレームを構成する各部材の安全率を評価しやすいように、各部材の最大最小応力をリスト出力する。

2-3-3 簡易解析 (RAHMEN)

モーターサイクルの開発初期段階でフレームやスウィングアームの強度剛性をビームモデルで解析する事は大変有効であり、またしばしば行なわれる。そのため、STAGE-FEMにビームモデル専用の解析機能を付け加えた。この機能をRAHMENと呼んでいる。

RAHMENを使うには、たった5つの専用ファンクションを覚えればよい。また、RAHMENはNASTRANを使用せず直接解を求めるので、ほんの数秒で結果を得る事ができる。そのため設計者は短時間にたくさんの仕様を検討する事が可能である。図4はRAHMENによる解析例である。

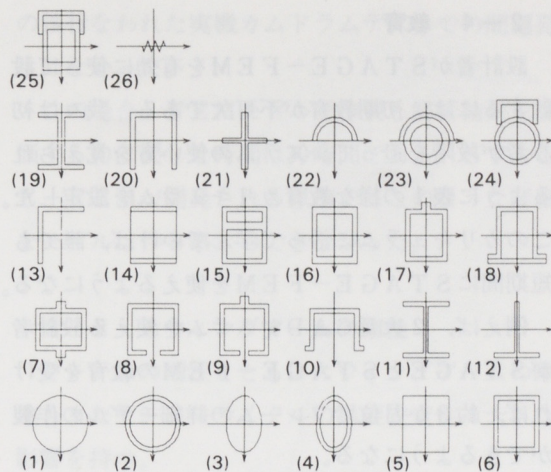


図2 ビーム要素の断面形状

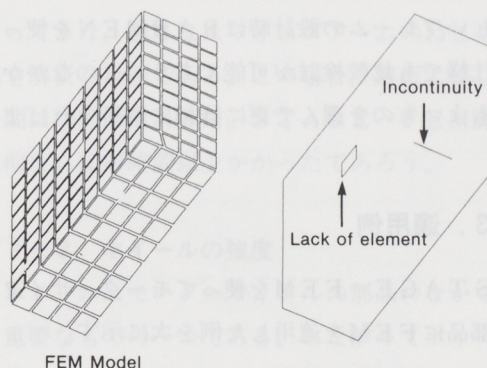


図3 データのチェック

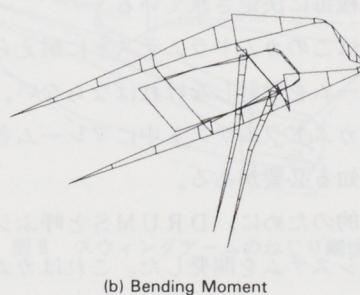
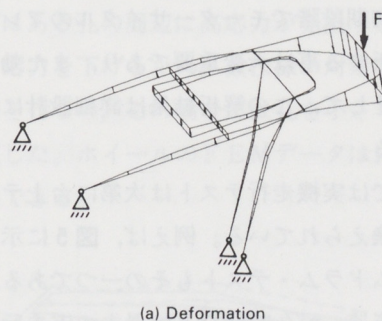


図4 RAHMENによるリア・キャリアーの解析

2-4 教育

設計者がSTAGE-FEMを有効に使って設計するには、初期教育が不可欠である。我々は初心者が段階を追ってシステムの使い方を覚えられるように表1の様な教育カリキュラムを設定した。このカリキュラムに沿って学んでいけば、誰でも短期間にSTAGE-FEMを使えるようになる。

例えば、2次元CADシステムを使える設計者がSTAGEとSTAGE-FEMの教育を受ければ、約3か月位でフレームの詳細モデルの作製ができるようになる。

特にRAHMENについては4時間の教育しか必要でなく、また短期間で熟練できる。設計者は新しいフレームの設計時にRAHMENを使って何仕様でも比較検討が可能であり、このなかから最もよいものを選んで更に詳細に解析すればよい。

3. 適用例

STAGE-FEMを使ってモーターサイクルの部品にFEMを適用した例を次に示す。

3-1 フレーム強度

開発初期段階でモーターサイクルのフレーム強度を解析する事は大変重要であり、また効果的である。そして、この解析結果は詳細設計に反映されている。

最近では実機走行テストは次第に台上テストへと置き換えられている。例えば、図5に示すような、カムドラム・テストもその一つである。カム高さ、車速、耐久時間などは過去の実走行データを基に機種毎に決定されている。

設計者はこのカムドラムテストに耐えられるようにフレームを設計しなければならない。このためには、カムドラムテスト中にフレーム各部に働く荷重を知る必要がある。

この目的のために、DRUMSと呼ぶシミュレーションシステムを開発した。これはカムドラム

表1 教育カリキュラム

No.	教育項目	内 容	条 件	時 間
1	CAD	初心者教育	無 し	8 hours
2	STAGE	初心者教育	No.1 終了	8 hours
3	RAHMEN	設計者向け ビームモデル解析法	No.2 終了	4 hours
4	NASTRAN(1)	設計者教育	No.3 終了	4 hours
5	NASTRAN(2)	専任者教育	無 し	16hours
6	STAGE-FEM(1)	設計者教育	No.4 終了	4 hours
7	STAGE-FEM(2)	専任者教育	No.5 終了	8 hours

※一般設計者はNo.1,2,3,4,6,の順に受講すれば良い。

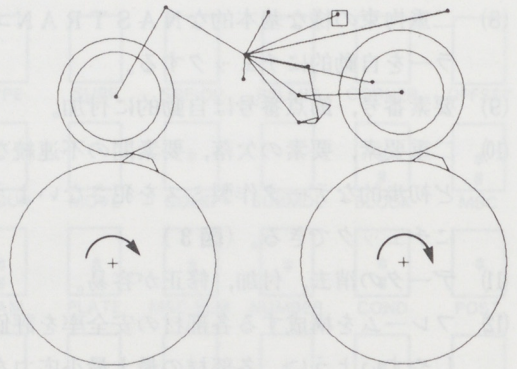
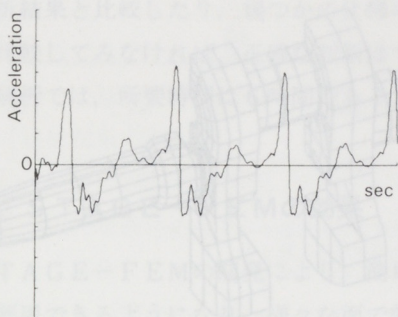


図5 カムドラム・テスト

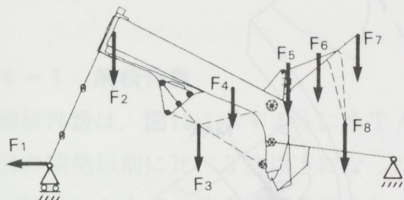
テスト中の車両の運動を解析するシステムである。DRUMSに必要なデータは、車両各部の位置、重量分布、慣性モーメント、サスペンションやタイヤの特性データなどである。

これを使えば、カムドラムテスト中の車両各部の加速度が求められ、これと重量分布から図6のように荷重を求める事ができる。これをSTAGE-FEMで作製したデータに荷重条件として与えてやると、カムドラムテスト時の応力分布が求められる。そして設計者は解析結果からフレームの弱点を知り、対策仕様を検討すればよい。

図7はモーターサイクルの初期開発段階でカムドラムテスト強度を評価したものである。解析結果に基づき、フレームの高応力部は補強され、そ



(A) Acceleration of Engine in Vertical Direction



(B) Distributed Load during a Cam Drum Test

図6 エンジンの加速度と荷重分布

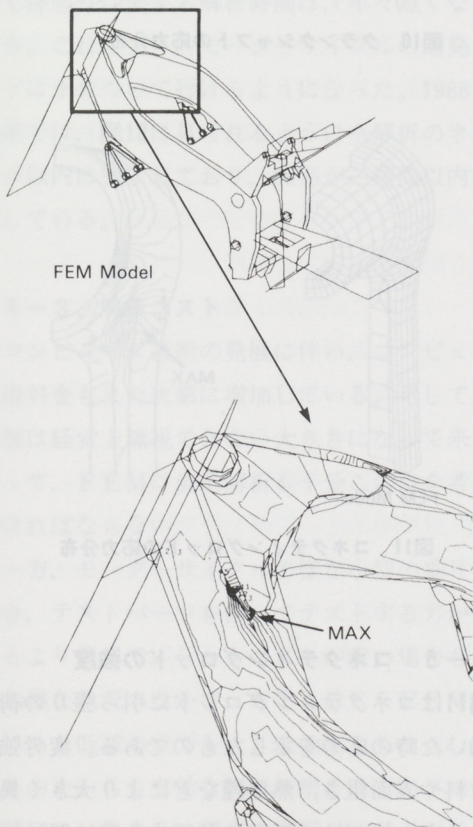


図7 カムドラムテスト時のフレーム応力

の後行なわれた実機カムドラムテストでの問題発生はなかった。

この場合、FEMモデルを作製し解析結果を評価するのに要した時間は30時間である。STAGE-FEMが開発される以前ではこのような詳細なモデルは作る事すらできなかった。

3-2 スウィングアームの剛性

フレームの剛性とともスウィングアームの剛性もまたモーターサイクルの操縦安定性に大きな影響を持つ。

最近、フレームの剛性が高くなるにつれスウィングアームにもまた高い剛性が要求されるようになってきた。図8はスウィングアームのねじり剛性を解析した例である。この場合、解析に要した時間は20時間であった。STAGE-FEM開発以前ならば60時間以上かかったであろう。

3-3 ホイールの強度

ホイールはモーターサイクルの部品のなかで最も重要なものの一つである。したがってホイールの設計は十分慎重に行う必要がある。図9はホイールの解析例である。この解析の結果、ホイールのハブにある孔の周辺に高応力が発生する事が判った。応力を下げるため、数仕様の対策案について評価を行ない、この場合には孔を小さくする事に決定した。ホイールのFEMデータは10時間位で作製できる。

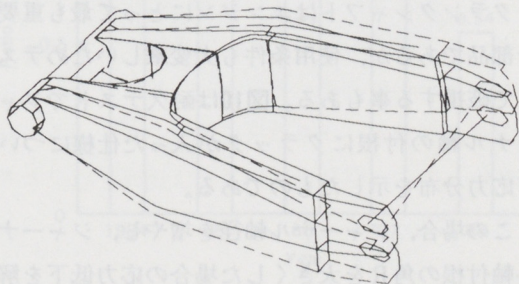


図8 スウィングアームのねじり剛性

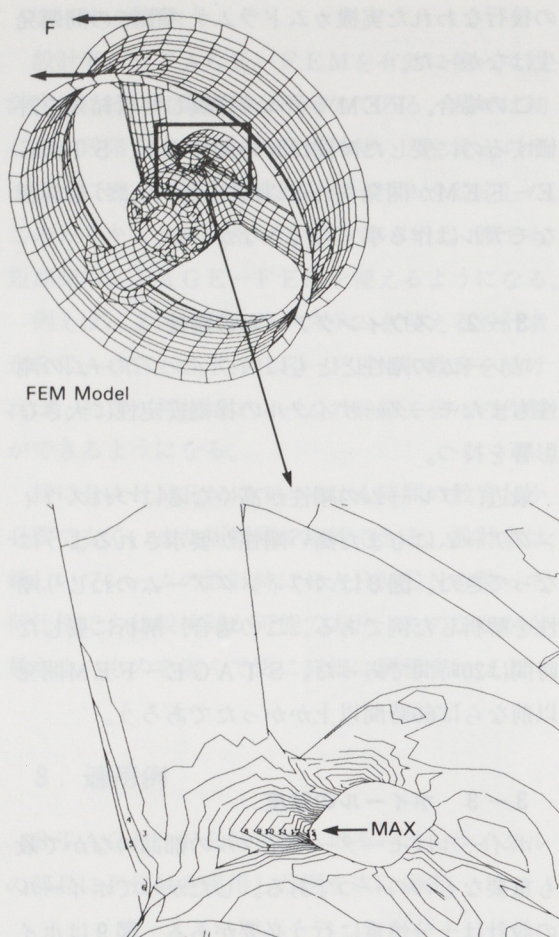


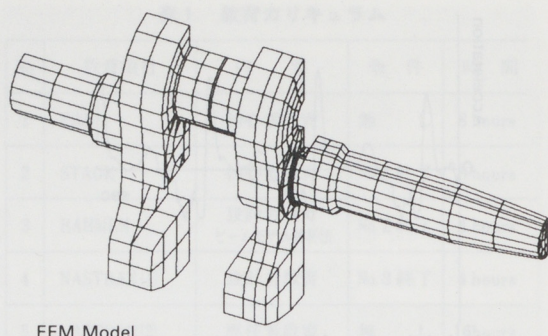
図9 ホイールの強度解析例

3-4 クランクシャフトの強度

エンジン部品の解析にはソリッド要素によるモデル化が必要となる事が多い。次にソリッドモデルによる解析例を紹介する。

クランクシャフトはエンジンにとって最も重要な部品であるが、使用条件も大変厳しいためテストで破損する事もある。図10は耐久テストでジャーナル軸の付根にクラックが入った仕様について応力分布を示したものである。

この場合、ジャーナル軸径を増やし、ジャーナル軸付根の角Rを大きくした場合の応力低下を解析で求め、対策仕様を決定した。この例でFEMデータ作製及び解析に要した時間は15時間である。



FEM Model

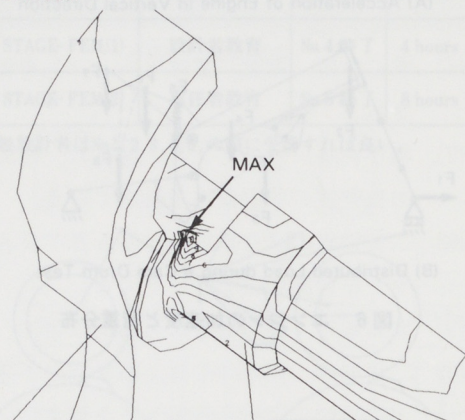
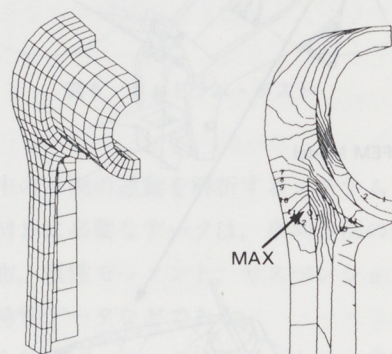


図10 クランクシャフトの応力分布



FEM Model

図11 コネクティングロッドの応力分布

3-5 コネクティングロッドの強度

図11はコネクティングロッドに引っ張りの荷重が働いた時の応力を示したものである。疲労強度は材料や表面粗さ、熱処理などにより大きく異なる為、応力値だけで正確に評価する事は難しい。したがって、同じ方法で解析した実績のある機種

の解析結果と比較したり、幾つかの仕様の解析結果を比較してみなければ、正確な判断はできない。この解析では、所要時間は6時間である。

4. STAGE-FEMの効果

STAGE-FEMの開発により、簡単にFEMが利用できるようになり、様々な面で効果が現れてきた。

4-1 解析件数

解析件数は、図12に示すようにSTAGE-FEMの開発以前に比べ3倍以上になった。特に、当初計画した全ての基本機能が完成した1988年には、その前年に比べ1.6倍と急増した。

4-2 解析スピード

1件当りに要する解析時間は、年々短くなっている。これにより、モーターサイクルの開発スピードに十分ついて行けるようになった。1988年の結果では、図13に見られるように全解析の半数が3日以内に完了しており、84%が一週間以内に完了している。

4-3 解析コスト

コンピュータ技術の発展に伴い、コンピュータ使用料金もまた次第に増加している。そして、この額は経営上無視できない大きさになって来た。従って、FEMに依る解析も十分この点を考慮しなければならない。

一方、モーターサイクルの様な小型の乗り物の場合、テストパーツを作ってテストする方が解析するより簡単で、しかもコストが安い場合もある。このような状況のなかで、STAGE-FEMは解析コスト低減の点でも大きな効果をもたらし、コストの上からも有効な解析が増えた。

図14は一件当りに要する解析コスト（人件費、電算費等全てを含む）が年々低下している事を示

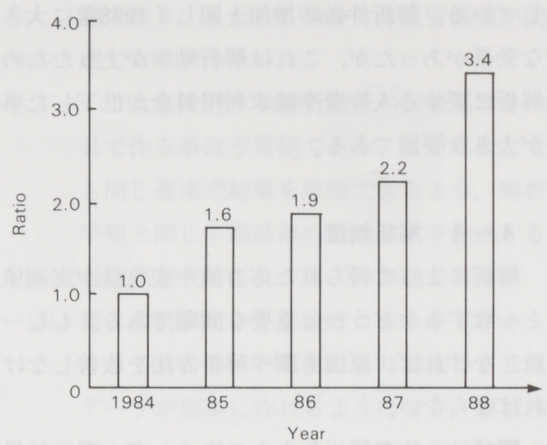


図12 解析件数の推移

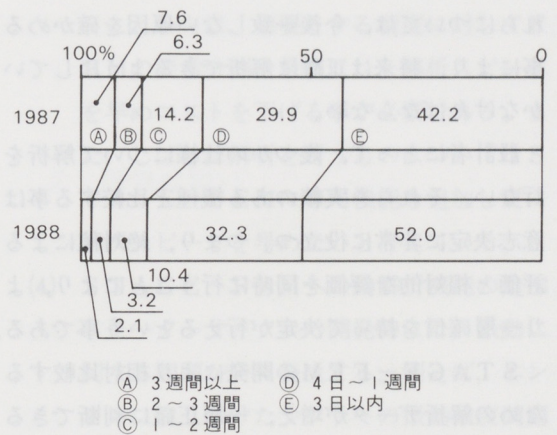


図13 解析1件当りに要する日数

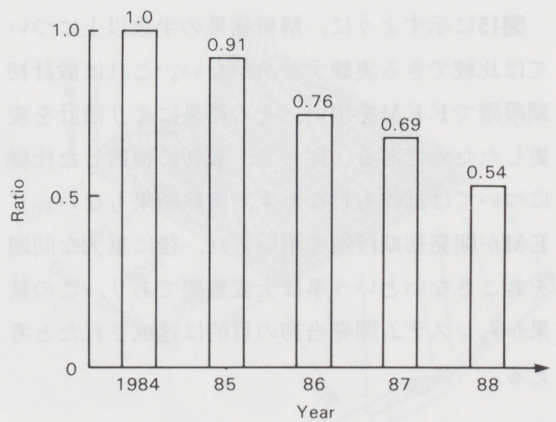


図14 解析1件当りに要するコストの推移

している。解析件数の増加と同じく1988年に大きな効果があったが、これは解析効率が上がったため、解析に要する人件費や端末利用料金が低下した事が大きな要因である。

4-4 解析精度

解析によって得られた応力値や変位量が実測値と一致するかどうかは重要な問題である。もし一致しなければ、原因を調べ解析方法を改善しなければならない。

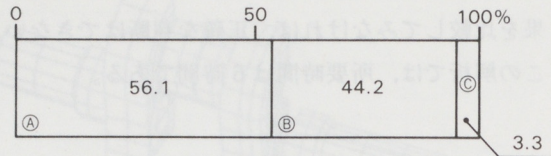
図15は一昨年解析したものについて、実験結果と解析結果を比較したものである。この結果から全体の3%については両者が一致しなかった。これらについては、今後一致しない原因を確かめる事により、将来は正確に解析できるようにしていかなければならない。

設計者にとって、幾つかの仕様について解析を行ない、それらを実績のある機種と比較する事は意志決定に非常に役立つ。つまり、絶対値による評価と相対的な評価を同時に行うことにより、より一層確信を持って決定が行えるという事である。

STAGE-FEMの開発により相対比較するための解析データが増え、一層正確に判断できるようになった。

4-5 目的達成

図15に示すように、解析結果の半数以上については比較できる実験データがない。これは設計初期段階でFEMを用い、その結果により設計を変更したためである。従って、最初に検討した仕様については試作も行わず、実験結果もない。FEMが開発初期段階で用いられ、後に重大な問題を起こさないという事は大変重要であり、この結果からシステム開発当初の目的は達成されたと考える。



- (A) 比較できる実験データがない。
- (B) 実験結果と一致する。
- (C) 実験結果と一致しない。

図15 解析結果と実験結果の比較

5. 問題点

STAGE-FEMの普及に伴い大きな効果が得られたが、同時に新たな問題点も発生してきた。

(1) コンピュータ能力と解析件数の増加

コンピュータ利用の増加に伴い、コンピュータ能力の方も年々増強されてきた。しかし、負荷の増加の割合が大きく、常に処理能力の限界に近い状態で使用している。このような状況の中で、解析件数の増加はJOB実行待ちによる時間のロスやデータ記憶容量の不足などの問題を起こしている。

(2) 効果を無視した解析

いかに効率良く解析をしても、解析には大きな費用がかかる。解析コストに比べ、十分効果が期待できる場合は良いが、効果を無視すれば大きな損失となる。何日もかかって詳細なFEMデータを作製しやっと得た結果が、簡単な材料力学モデルで直ぐに求められる答えと大差がなかったなどの失敗も経験した。

(3) ブラックボックス化の危険

STAGE-FEMはだれにでも簡単に使えるが、時にはトラブルのもとにもなる。例えば、荷重条件や拘束条件が実際とは異なっているにもかかわらず、これらの点を無視して、解析で得られた応力や変位のみ

を重視するような例がある。またデータ作製過程でのミスに気が付かずに解析を進め、誤った結論に至ってしまう例もある。

(4) 解析結果の個人差

解析に用いた要素や、メッシュの粗さ、荷重拘束条件の差等により、同じ問題について解析しても解析結果はそれぞれ異なる。これらの差が小さければよいが、大きければ判断を誤ってしまう。また他人が行った解析結果との比較や、過去の解析結果との比較もできない。

6. 今後の課題

これらの問題を解決するためには、解析手順や解析結果の評価の仕方を統一する事が重要である。また、必要とする解析精度に応じてFEMモデルを最適にする事も必要である。更に、振動解析機能や他の専用機能をSTAGE-FEMに加える事も将来の課題である。

(1) 部品毎の解析手順の統一

我々はSTAGE-FEMの使い方を教育普及するだけでは不十分であると考えようになった。これまで述べたような問題が発生してきたからである。

従って、これからはシステムの使い方と同時に効果的な解析方法も伝えていく必要がある。

解析頻度の高い部品については、解析手順(FEMデータの作り方、荷重拘束条件の設定等)を定め、初心者でも正確にしかも早く解析できる様にすることが第一の課題である。これを行う事により、比較可能な解析データを多く蓄積できるであろう。

(2) 解析結果の評価方法の統一

解析により応力や変位を求める事は簡単にできるが、これらをどのように評価するかが難しい。ある場合には材料の降伏が問

題であり、またある場合には疲労破壊が問題である。

これらに対する解析結果の評価基準を一日で作る事は不可能である。誰が解析しても同じ基準で結果を評価できるよう、解析手順と同じく部品毎の評価基準を作成する必要がある、これが第二の課題である。

(3) 更に解析スピードを上げコストを下げる

STAGE-FEMにより詳細なFEMデータが簡単に作れるようになり、解析精度が向上した。しかし、一方で詳細データは解析時間やコストの増大につながっている。

これからは、必要とする精度に対してFEMの要素分割を最適にし、解析スピードを早めコストを下げる事が必要である。また、しばしば解析を行うものについてはSTAGE-FEMに専用機能を追加し更に解析スピードを早めたいと考えている。

(4) STAGE-FEMへの動解析機能の追加

モーターサイクルの開発時には、振動に関する問題が時々発生する。例えば、エンジンに取りつけたマフラーの振動強度問題がある。図16はエンジンによって加振され

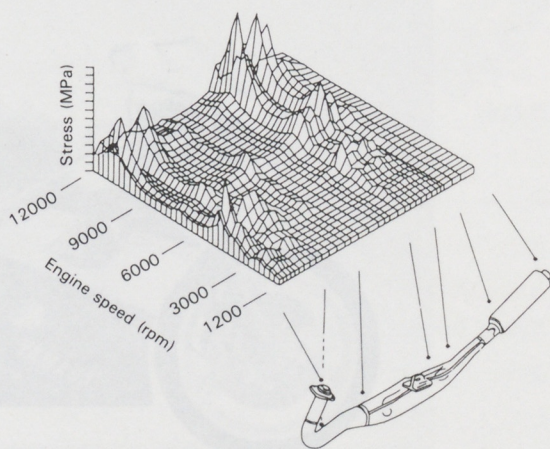


図16 マフラーの振動応力

今後の課題は、STAGE-FEMに動解析用のデータ入出力機能を付加する事にある。これが完成すれば、現在ごく限られたFEM専任者だけにしか行えない動解析がもっと広く使われるようになるであろう。そうなれば、静解析の場合と同じく多大な効果が期待できる。

本報告に述べた成果は、多くの方々の努力により得られたものです。特に、設計12課CADグループ、解析研究課、技術電算室の方々の力無しでは達成できなかったものと思います。この紙面を借りて、深く感謝の意を表します。

(1) 小杉：自技会レビュー Vol. 10, 1989