

〈技術レポート〉

自動車部品設計における CAE シミュレーション技術と ニチアスにおける応用事例

自動車部品事業部 技術開発部 新機能材技術開発チーム 川崎美宏
丹羽隆弘

昨今の自動車部品設計は製品化までの期間がますます短くなり、試作や評価試験の時間を削減しなければ納期に間に合わない状況にあり、CAEによる仮想試作、仮想試験を駆使した設計が不可欠となりつつある。

1. 自動車部品における設計の流れ

自動車部品設計の流れを図1に示す。

従来の設計は試作品で製品を評価し、その結果を反映させるために再設計、再試作を繰り返す流れをとっていた。再設計、再試作には多大な時間と労力が必要であり、製品の玉成に要する時間が長く、設計コストと試作コストが製品コストに上乗せされ、結果としてコスト高な製品となっていた。

CAEを用いた設計は構造解析等で試作前に製品の評価（仮想試験）と再設計を繰り返し行うことにより、最適設計が出来る。仮想試験で不具合や問題点を十分吟味し、除去できるので、試作品による評価試験（実試験）では不具合や問題の発生が少なく、再設計、再試作を極力抑えることが出来る。結果として従来より納期が短く、コストを抑えた製品となる。

2. CAEとは³⁾

CAE (Computer Aided Engineering : コンピュータ支援工学) とは元々はコンピュータ支援による製品の開発、設計から製造に至るまでを広く示したものである (広義)。しかしながら、現在ではFEMを中心とする各種解析を行うことをCAEと呼ぶことが一般的である (狭義)。

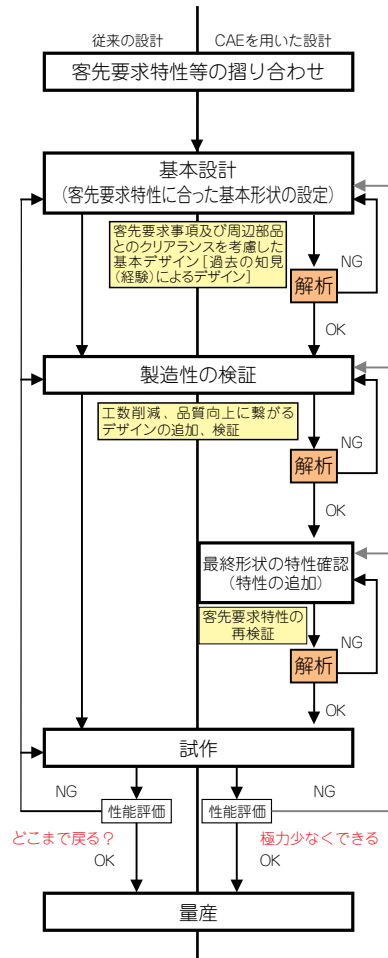


図1 自動車部品設計の流れ

CAE（広義）においては、設計段階ではCAD（Computer Aided Design：コンピュータ支援設計）が、評価段階では構造解析等の各種解析が、試作、製造の段階ではCAM（Computer Aided Manufacturing：コンピュータ支援生産）等が用いられる。また3D-CADデータが一貫して使用され、それは製品形状のみならず、その周辺部品についても同様に用いられる。

CAEは元来、設計の品質や生産性を向上させる目的で考え出されたものである。CAEが叫ばれるようになった当初はもっぱらトラブルシューティング用途が中心だったが、今日では「製品開発の初期段階から、コンピュータを用いた仮想試作・仮想試験を十分に行い、出来るだけ少ない試作回数で、素性の良い、高品質な製品開発を行う」という本来の活用がされており、製品品質の向上や製品コストの削減に大いに役立つこととなっている。

3. FEMとは

CAEの中核技術の一つに構造解析があるが、解析手法としてはFEM（Finite Element Method：有限要素法）が最も普及している。FEMとは無限の自由度を持つ連続体を有限な自由度を持つ有限要素の集合体によって近似し、この集合体を数学的に厳密に解くことにより現実の工学問題を解く一つの解法である。^{1) 3)}

FEMは1956年米国ボーイング社の技術者たちが航空機の翼の新しい強度計算法を提案したことに始まると言われている。その後航空機、宇宙ロケット、船舶等の構造解析に適用され、その汎用性から現在ではあらゆる分野で活用されている解析手法である¹⁾。

FEMは「どんなに複雑な形状でも、細かく分割していくことによって、簡単な形状の集合体として表現できる」ことを基本概念として成り立っている。この簡単な形状1つ1つを要素と呼ぶが、要素は簡単な形状であるため材料力学、熱力学等の公式を適用できるので、全要素に関する状態量を未知数として得られた連立方程式を解けば集合体全体を解析できる。その計算量は膨大な量となるが、計算のほとんどはシステム化されたマトリ

ックス演算であり、コンピュータに適した計算手法である¹⁾。

4. FEM解析で出来ること

FEM解析の応用例を表1に示す。ここに示した例はほんの一部にすぎず、応用範囲は広範囲にわたる。これはFEMという考え方が非常に汎用性に富んでいるということもあるが、これまで解析上の不具合や問題点をその都度新しい解析技術の開発で解決、克服してきたためである。FEMそのものはすでに完成された技術として一般には受け入れられているが、これからも新しい技術が開発され続け、より広範囲で精度の高い（より現実的に即した）ものになっていくものと思われる^{1) 2)}。

解析の種類を表2に示す。解析で得られる結果としては、応力、変位（ひずみ）、振動特性、音特性、熱特性等が挙げられる。

表1 FEM解析の応用例

分野	解析例
航空宇宙	機体の応力解析 人工衛星の振動解析、熱応力解析 ロケット・タンクの熱応力解析
原子力	原子炉上部まわりの非定常熱伝導解析 原子炉容器の流体連成振動解析 原子力プラント配管系の応力解析
建築土木	ダム盛土の安定性解析 骨組構造物の振動解析及び応力解析 原子炉建家の連成振動解析
各種プラント	LNGタンクの熱応力解析 石油タンクの不等沈下解析 ガスタービン翼の応力解析
輸送機器	大型タンカーの強度解析 新型車両の変形応力解析 トランスミッション系の応力解析

表2 解析の種類

解析の種類	解析機能	主な出力物性
静解析	線形静解析 非線形静解析 材料非線形 幾何学的非線形 境界非線形	部材力 要素応力 節点変位 拘束反力
動解析	固有値解析 周波数応答解析 過渡応答解析 (線形・非線形)	固有値 変位・速度・加速度の 周波数応答値 時刻歴応答
熱伝導解析	定常熱伝導解析 非線形定常熱伝導解析 非定常熱伝導解析	温度分布 熱流束

5. FEM解析応用事例

当社自動車部品事業部技術開発部では製品開発にFEM解析を活用し始めている。事例をいくつか紹介する。

5.1 ガスケット設計

ガスケットは自動車部品にとどまらず、工業製品として広く用いられており、当社の主力工業製品のひとつである。

この解析ではガスケットを所定厚さにつぶしたときに、ガスケット及び相手材が破損することなく、十分なシール性能が確保出来るようにガスケットの形状を設計した。相手材はある程度の厚さばらつきがあるので、つぶしたときのガスケット厚さはある厚さ範囲を持つことになる。この厚さ範囲内全てで破損せずシール性能が確保出来なければならない。

シール性能は解析結果として直接出力することが出来ない。そこで、予めシール性が確保できるときの面圧を実験で取得しておき、この面圧以上になるときにシール性が確保出来ていると判定した。また、ガスケット及び相手材の破損の判断は最大応力で判断した。なお、この事例では面圧および応力を反力（単位長さあたりの荷重）に、ガスケット厚さをガスケット圧縮率に変換して性能を評価した。

ガスケットは同一断面が無限に伸びている形状なので、2次元問題として平面ひずみ要素を用いてモデル化した。また、左右対称形状であるため、1/2モデルとした。荷重は強制変位、解析の種類は幾何学的非線形静解析である。

設計初期のガスケット断面形状及び解析結果をそれぞれ図2、3に、得られた最適形状及びその解析結果を図4、5に示す。また、シール性判定の結果を図6に示す。図6に示した設計範囲内に反力-圧縮率曲線が収まれば良好な性能が得られたと判断できる。所定厚さ範囲内で許容最大値を超えるような反力が発生する場合はガスケットや相手材が破損し、許容最小値に満たない反力しか発生しない場合は十分なシール性が得られない。

図6より、設計初期の形状では反力が許容値を超え、相手材が破損することが予想される。得ら

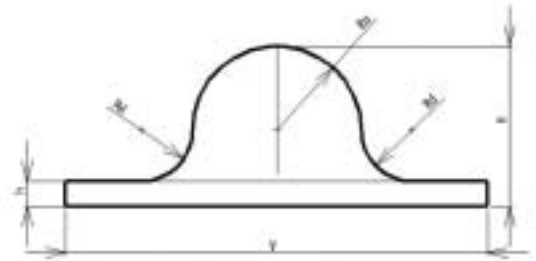


図2 ガスケット断面図 初期形状

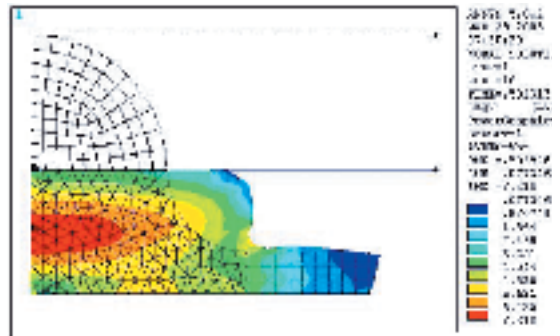


図3 初期形状FEM解析結果

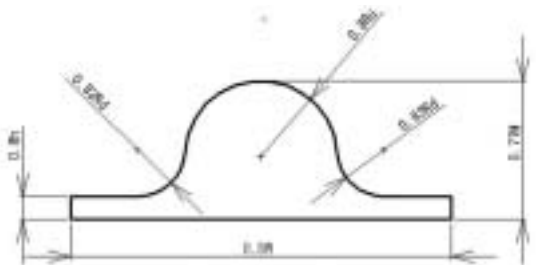


図4 ガスケット断面図 最適形状

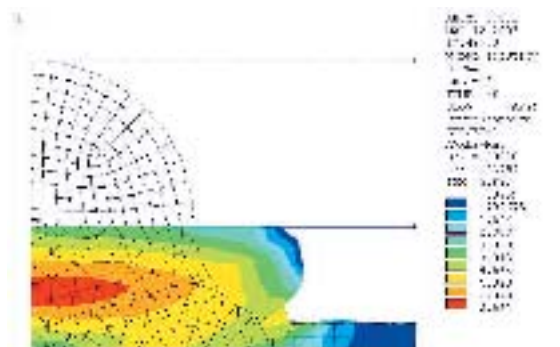


図5 最適形状FEM解析結果

れた最適形状では反力値が範囲内にあり、破損することなく十分なシール性を発揮することが予想される。

最適形状のガスケットを試作し、シール性能評価試験を実施した。結果を図6に示す。解析値に比べ実測値は若干小さい値を示したが、概ね良好な一致が見られた。試験では必要十分なシール性が発揮され、またガスケット及び相手材の破損は認められなかった。

5.2 プレーキシムの爪強度解析

ブレーキシムはディスクブレーキのブレーキ鳴きを抑える目的で、ブレーキパッドとマスターシリンダーの間に設置される平板状の部品である。ブレーキパッドの裏側に設置され、接着剤で接着することもあるが、通常はいくつかの爪でクリップオンされる。

この解析では客先振動耐久試験で爪部分にクラックが発生したブレーキシムのトラブルシューティングとして、設計変更を行い、対策形状を提案した。クラック発生箇所は爪の付け根であり、ここに応力がどの程度発生するかでクラックが発生するかどうかの判断が出来る。

解析したブレーキシムの概要を図7に示す。解析モデルは問題箇所となっている爪の部分のみとした。ブレーキシムは薄肉の板形状製品であるので、平面応力要素を用いてモデル化した。荷重は強制変位、解析の種類は線形静解析である。

解析したシムの形状を表3に、解析結果を図8に示す。応力は初期形状での応力値を1とした場合の相対値として示した。対策形状の相対応力値は0.34と大幅に低減できた。このシムを試作し、客先にて実機評価を実施したところクラックの発生は全く認められず、良好な形状であることが確認できた。

この解析において、応力値がどの程度以上であるとクラックが発生するかは不明である。クラック発生と解析応力値との相関関係を導き出すことが今後の課題である。

5.3 インサルカバーの振動解析

インサルカバーは自動車のエキゾーストマニホールド等から放出される熱により、周辺部品が熱害などの損傷を受けないよう、エキゾーストマニ

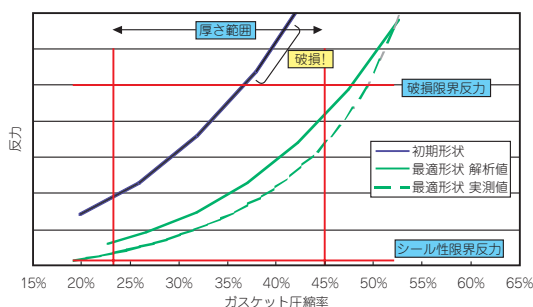


図6 反カーガスケット圧縮率曲線

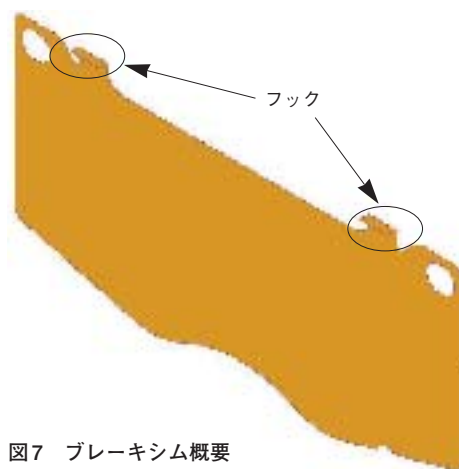


図7 プレーキシム概要

表3 シムの形状

形状	初期形状	対策形状
図		
説明	初期形状は爪の付け根に鋭角があり、応力集中が生じ、クラックが発生する。	対策形状は爪の付け根を丸くすることで、応力集中を低減し、クラックの発生を抑制する。

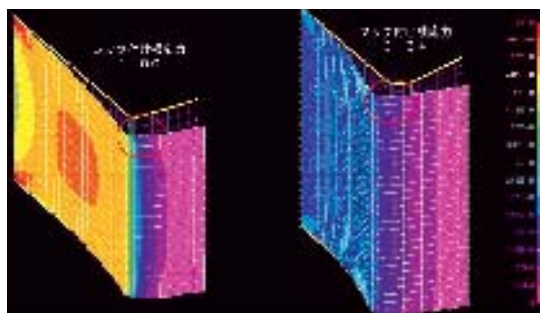


図8 シムの爪FEM解析結果

ホールド等に取り付けられる鋼板を成型した金属部品である。本来遮熱板としての機能が要求されるが、エンジンの近くに設置されるためエンジンからの振動を受けやすく、その振動の影響によるカバーからの放射音やカバー自体の破損を防止する設計が要求される。

この解析では、開発中に発生したインサルカバー破損について、破損防止を目的とした設計変更に対して解析を行い、解析結果から最も効果のある設計変更を決定した。また、解析の種類としては固有値解析を用いた。固有値解析は対象物の固有振動周波数とその周波数の振動を与えられたときに対象物がどのような動きをするかを見極めるために実施される。応力値や変位量の絶対値を知ることは出来ないが、周波数や対象物の動きから問題となる振動や応力集中箇所が予測でき、且つ比較的容易に実施できるためよく用いられる。解析結果はひずみエネルギー密度で評価した。

当社で設計したインサルカバーをエンジンベンチ試験機にて耐久試験をしたところ、クラックが数カ所発生した。破損対策として設計変更することとなったが、試作期間や開発費用の削減を図るため、解析結果をベースとした対策設計を提案することとなった。

クラックが発生したインサルカバーの固有値解析の一例を図9に示す。クラック発生箇所にひずみが集中していることが確認できる。

図10～13に検討した形状の変更案を示した。これにボルトのサイズ変更や板厚の変更等の検討も加え、それぞれを組み合わせると約30ケースの検討形状を解析した。



図9 インサルカバー初期形状解析結果

検討の結果、最も効果があった設計仕様の解析結果を図14に示した。設計変更前の解析結果(図9)と比較してひずみの集中が少なく、その値



図10 ベロカット検討形状

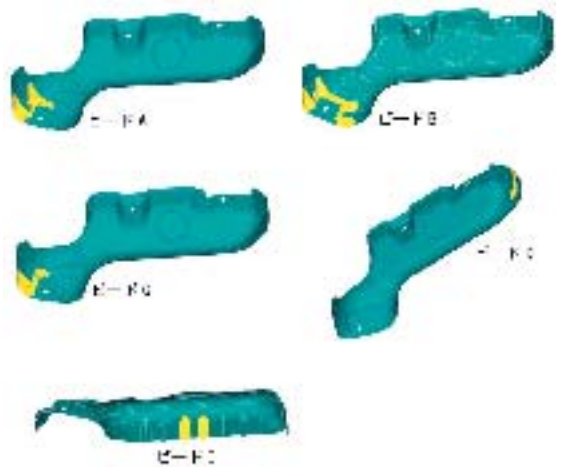


図11 ビード追加検討形状



図12 ビード削除+フランジ追加検討形状



図13 フランジ追加検討形状



図14 インサルカバー設計変更後解析結果

も小さいことがわかる。この設計変更を客先に提案し、対策仕様として量産化まで結びついている。

この事例では設計変更に伴う費用削減効果と納期短縮効果が大きかった。解析を用いない従来の方法では、

- ・試作型製作費用：約500万円
(ビード5形状に対してZaS型製作と仮定)
- ・評価試験費用：約200万円(人件費含む)

○総費用：約700万円

○期間：約2ヶ月

と見積もられる。一方、この事例では

○CAD及び解析業務人件費：約20万円

○期間：約2日

であった。

この解析では動解析としては最も簡便な解析機能である固有値解析のみを用いて設計変更仕様を決定した。固有値解析では定性的な判断しか出来ず、相対評価でしか設計の優劣を判定できない。定量的で絶対評価が可能な周波数応答解析や、遮熱効果を評価するための熱解析等を有効的に活用できるようにすることが今後の課題である。

6. FEM解析の注意点

コンピュータの著しい発展により、FEM解析は従来の解析専門家だけのものではなく、使おうと思えば誰でも使える道具と成りつつある。加えて、FEM解析はデータさえ入力すればすぐに結果が出る便利な道具でもある。しかし、得られた結果が正しいかどうかの保証はなく、すべてユーザーが判断しなければならない。解析結果を鵜呑

みにして間違った評価で設計を進めれば、CAE設計の特徴を生かすどころか、逆に品質を悪化させる要因に成りかねない。このような事態に陥らないために、いくつかの注意点を列挙する。

まず第一に、材料力学等の基本的な物理学の知識が必要である。解析結果が物理的に成立し得ない状況を示していないかを判断することが、解析結果判断の第一歩である。

次に、FEM解析特有の知識とノウハウを身に付けることである。FEM解析は形状の近似を始め、数多くの近似と仮定から成り立っている。極端な近似は大きな結果誤差を生み、仮定に誤りがあれば全く違った結果を生む。解析結果に疑問がある場合、近似が適度であるか、仮定が適切であるかを判断できなければならない。また、解析対象に対してどのようにモデル化すれば適切な解析が出来るかの知識とノウハウが必要である。

より実際に即した解析結果を得るためには解析パラメータを吟味する必要がある。解析ソフトには予め物性値等のパラメータが用意されており、また文献を参照してパラメータを設定することも出来るが、場合によっては現実に即した結果が得られないときがある。また、文献に出ていないような物を解析するにはパラメータを自ら用意する必要がある。このような場合は実物で物性取得試験や簡易評価試験を実施し、その結果を再現できるようにパラメータを調整する必要がある。

FEM解析では近似と仮定を設けるため、実際の現象とぴったり合った解析結果が得られることは少ない。実際の現象を再現するために多くの労力を割くよりは、ある程度実際の現象を模擬した結果が得られたら、いくつかのモデルを用意し、解析結果を相対評価してよりよいものを選び出す方が、効果的なFEM解析の活用方法といえる。

7. FEM解析を用いることで得られる効果

FEM解析を用いることで得られる効果を列挙する。

(ア) 開発のスピードアップ

- ① 試作回数や評価試験回数の削減

例：従来の設計変更期間：2ヶ月

CAEの設計変更期間：2日

(イ) 製品のコストダウン

- ① 試作費用や評価試験費用の削減
- ② 開発のスピードアップによる人件費削減

例：従来の費用：700万円

CAEの費用：20万円

(ウ) 品質向上

- ① 最適設計
- ② 従来のカンや経験では導き出せなかった最適条件の検出

(エ) 品質保証

- ① 仮想評価試験による品質上下限の設定
- ② 実物では困難な評価試験実施による、不具合の未然防止。

8. おわりに

CAEは今後ますます活用範囲が広まり、これなくしては製品開発ができなく成りつつある。CAEによる設計、開発を円滑に進めるためには解析担当者、設計担当者のスキルアップが何より大切である。そのためにも、みなさんからのより多くのご意見、ご要望、解析依頼を願っております。

最後に、本報告の執筆にご協力いただきました(有)構造計算テクノロジー安藤様に深謝します。

参考文献

- 1) 東町高雄, “有限要素法のノウハウ”, 森北出版 (1993)
- 2) O.C.Zienkiewicz, “基礎工学におけるマトリックス有限要素法”, 培風館 (1971)
- 3) “機械設計者のための3次元CAD, CAE導入・活用ガイド”, 日刊工業新聞 (1998)

筆者紹介



川崎 美宏

自動車部品事業部
技術開発部
新機能材技術開発チーム



丹羽 隆弘

自動車部品事業部
技術開発部
新機能材技術開発チーム
チームリーダー