

CAE活用による車載用機構部品の試作レス開発

Prototype-less CAE Design of Mechanical Component for Automobile

藤田 真治 Shinji FUJITA
 小山 雄史 Takeshi KOYAMA

1

はじめに

昨今、自動車の開発期間の短縮化が進み、部品メーカーにも開発期間の短縮が求められている。それに 대응する手段のひとつとして、試作レス開発が挙げられる。

試作レス開発では、量産前の試作品を作らずに、CAE (Computer Aided Engineering) によるシミュレーションの結果をもって量産化の判定を行う為、CAEに対してより一層高い信頼性が求められる。実機の挙動を再現できるCAEモデルの構築はいうまでもなく、工学的に妥当な判定基準の検討やCAE結果の品質保証が重要となる。

我々は、2011年よりCAE精度向上と設計者によるCAE活用を推進し、2014年以降の車載用ミリ波レーダの搭載ブラケット設計において試作レス開発を実現した。搭載ブラケットは車種専用設計であり、試作レス開発により1車種あたりの開発期間を従来の約1/4に短縮するなど、大きな効果を上げている。

本稿では、ミリ波レーダ用ブラケットの試作レス開発に寄与したCAE事例と、試作レス開発において重要なCAEの品質保証の当社の取組みについて紹介する。

2 ミリ波レーダ用ブラケットの耐振動設計

2.1 ミリ波レーダ用ブラケットの構造

図1 (a) に当社の現行ミリ波レーダの外観を示す。大きく分けて①アルミダイカスト製の筐体をもつミリ波レーダ本体、②車種毎に専用設計となる鋼板製の搭載ブラケット、③ビーム軸調整ボルトの3つから構成される。

ミリ波レーダの保持構造について、図1 (b) に示すレーダの組立手順を用いて説明する。まず①レーダ筐体にビーム軸調整ボルトを装着し、レーダ筐体下部の両側面の突起に樹脂製の軸受けを装着する。②軸受けの外周は長円形状になっており、ブラケットに設けられた楕円の切欠き穴に対して長手方向に挿入する。③そのままレーダを後方に回転させることにより軸受けが回転しブラケットの楕円の切欠き穴と嵌合する。④最後に背面からねじでブラケットと軸調整ボルトを締結する。

ビーム軸調整の作業については、図1 (c) に示すように、軸調整ボルトに接合されているギア (冠歯車) を、レーダ上部からプラスドライバーで回転させ、ねじの送り機構に

より、樹脂軸受を中心にレーダ本体が前後に揺動し、レーダの搭載姿勢を調整することができる。

このようにレーダ本体とブラケットは樹脂軸受と軸調整ボルトを介して連結されている。

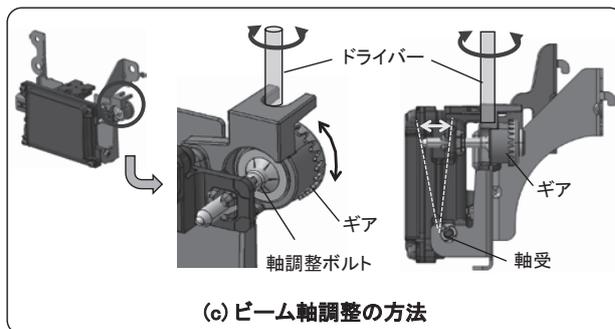
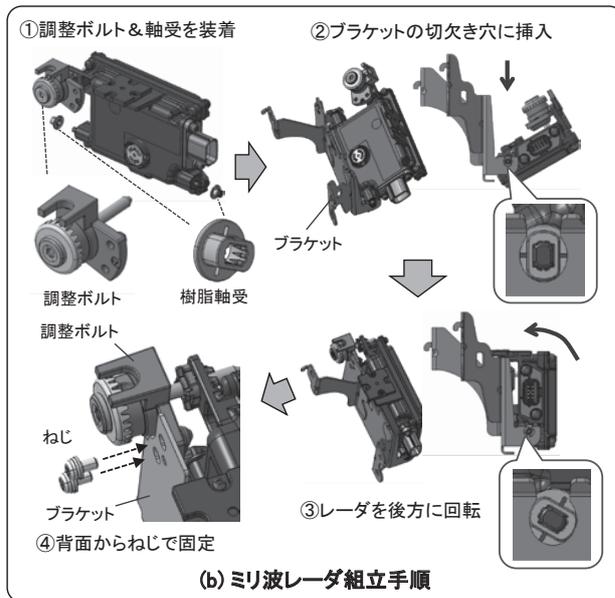
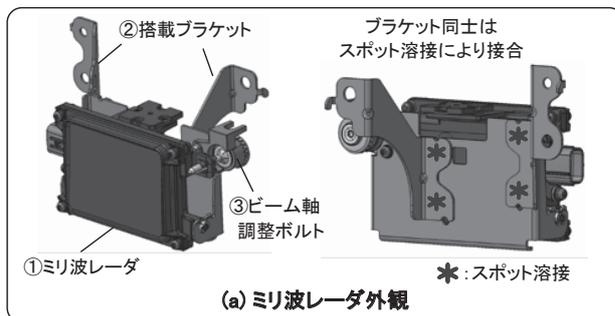


図1 ミリ波レーダ用ブラケットの構造
 Fig.1 Structural of Bracket for Millimeter-wave Radar

2.2 試作レス開発における課題

ブラケットにはさまざまな強度要件があるが、その中でも設計判定が困難な要件である振動耐久性について述べる。振動耐久性は振動試験により評価するが、発生させる振動形態により、周期的なサイン振動と非周期的なランダム振動に分けられる。図2に各振動波形の例を示す。

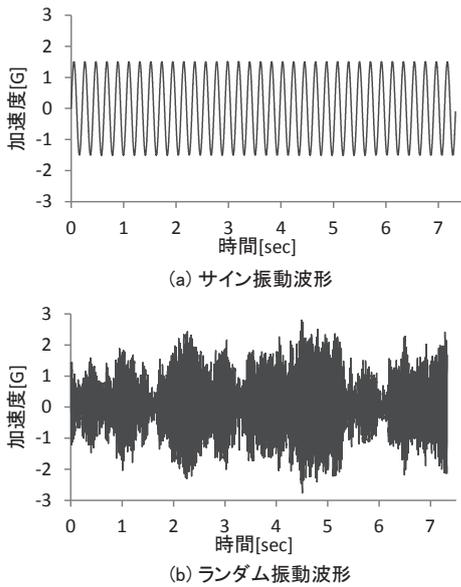


図2 サイン振動とランダム振動
Fig.2 Sine Vibration and Random Vibration

図2 (a) に示すサイン振動の代表的な試験方法として、機器の主要な共振周波数で周波数を固定して行う振動試験がある。この方法は機器が最も振幅する共振周波数で繰り返し振動負荷を与えるため、比較的短時間で振動耐久性を評価することができる。

一方、図2 (b) に示すランダム振動は、近年の振動試験規格として主流ようになってきている。理由として、さまざまな周波数成分を含んだ不規則振動により試験を行うため、実車走行時の振動を再現した振動試験が可能となることが挙げられる。さらに広い周波数帯域の振動成分を同時に与えることができる為、機器が持つ複数の固有振動を同時に励起させることが可能で、振動による機器の故障モードを漏れなく効率的に評価することができる。このような特徴により、従来サイン振動では検出できなかった破損や劣化が顕在化する場合もある。

ミリ波レーダブラケットにおいても、ランダム振動試験で顕著に現れる損傷モードがあり、樹脂軸受の振動摩耗が挙げられる。図3に樹脂軸受の振動摩耗の例を示す。

摩耗が微小であれば機能的な問題は生じないが、摩耗が激しい場合には、軸受とブラケットの切り欠き穴との間にがたつきが生じてしまい、レーダ姿勢の保持ができなくなったり、別の故障モードを誘発させてしまったりする可能性

がある。従来、複雑な挙動を示す摩耗に対する妥当な設計判定基準は確立しておらず、ミリ波レーダブラケットの試作レス開発の実現には、このランダム振動下での軸受の摩耗損傷を、設計段階で合否判定できる手法が必要だった。

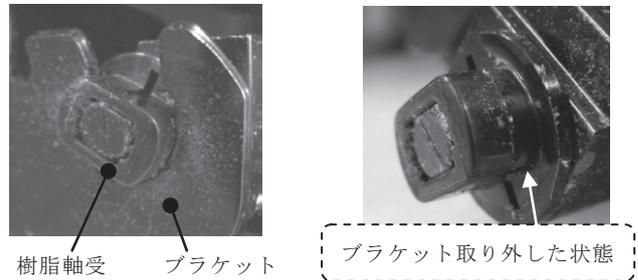


図3 樹脂軸受の摩耗
Fig.3 Abrasive Wear of Resin Bearing

2.3 ランダム応答解析を用いた強度設計手法¹⁾

ランダム振動は、サイン振動のように定常的ではなく、加速度の瞬時値を予測することが困難なため、統計的手法を導入した考え方が効率的である。

図4にランダム振動の概要を示す。

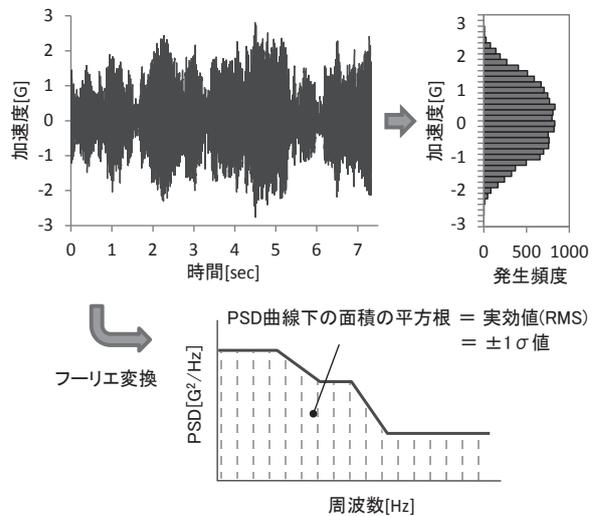


図4 ランダム振動の概要
Fig.4 Outline of Random Vibration

ランダム振動試験で発生する加速度の大きさの分布は、一般的に0平均の正規分布に従い、最大加速度は標準偏差 σ の3倍 (3σ) の加速度となる。実際の振動では 4σ や 5σ といった高い加速度も発生するが、 $\pm 3\sigma$ 間の加速度の発生確率は99.74%を占めていることから、ほぼ100%とみなして、振動試験機の電氣的制御により実効値の 3σ まででカットされるためである。一方、周波数成分の分布は、時系列波をフーリエ変換することで得られるPSD (パワースペクトル密度) 曲線で定義される。PSD曲線はランダム振動に含まれる各周波数の振動強度を示しており、PSD曲線

下の面積の平方根はランダム振動の発生加速度の二乗平均平方根 (RMS: Root Mean Square)、すなわち実効値を表している。発生加速度の大きさの分布は、前述した通り0平均の正規分布に従うので、実効値は振幅の標準偏差 $\pm 1\sigma$ と一致する。これらの統計的性質により複雑なランダム振動による入力を効率的に特徴づけることが可能となる。

一方、ランダム振動に曝される構造体の応答も同様に統計的に評価することができる。通常、振動による疲労損傷度を見積もる為には、発生応力と繰り返しサイクル数、およびS-N線から算出するが、ランダム振動下では、正確な発生応力と繰り返しサイクル数は求められない為、一般的に統計的手法とマイナー則を利用して算出する。図5にランダム振動下における疲労損傷度の算出方法の概要を示しており、以下に手順を説明する。

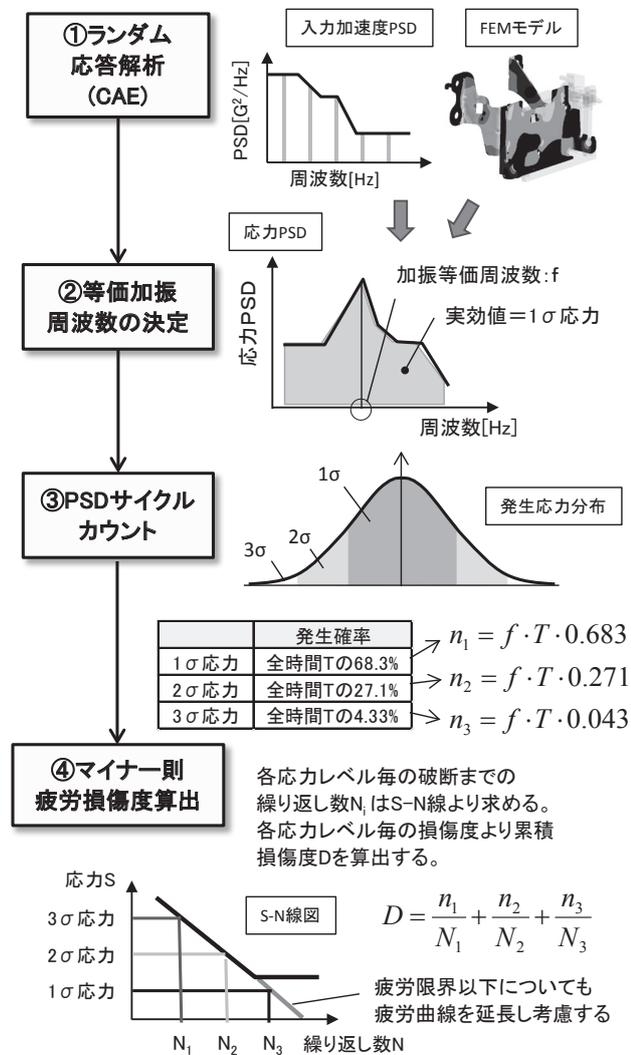


図5 ランダム振動の強度設計手順

Fig.5 Calculation Procedure for Random Vibration Strength

①実機構造を再現したFEMモデルに、入力するランダム振動のPSD曲線を定義し、ランダム応答解析 (CAE)

を実施することにより、構造体の各部位に発生する応力PSDを計算する。

②次に疲労サイクル数を計算する際に必要となる等価加振周波数 f を決定する。簡易的な方法として応力PSDの最大値における周波数を等価加振周波数 f とする。

③発生する応力の瞬時値は予測できないが、入力加速度と同様に、発生分布は0平均の正規分布に従う。

生じる応力は $\pm 3\sigma$ までの発生確率で制限されると仮定して考えて、発生応力レベルを $1\sigma, 2\sigma, 3\sigma$ の3つの確率帯域に分ける。各応力レベルは、PSD曲線下の面積の平方根から 1σ 応力が求まるので、 1σ 応力の2倍が 2σ 応力で、3倍が 3σ 応力のようにして求める。各応力レベルの発生確率と試験時間を乗じて繰り返しサイクル数 n_i を計算する。

④材料のS-N線から③で求めた各応力レベルにおける寿命 N_i を求め、マイナー則を用いて疲労損傷度Dを計算する。

2.4 軸受の摩耗損傷度の定量化

振動試験後の軸受の摩耗状態を確認したところ、軸受外周部の摩耗が顕著なことが分かった。また、実機試験結果より振動で生じる軸受を中心とした筐体の、揺動の大きさと摩耗の激しさとの間には、正の相関関係があったことから、摩耗のメカニズムは図6に示すように振動により筐体が軸受を中心に θ だけ微小揺動することで、軸受とブラケット切り欠き穴の間で繰り返し摺動が生じて摩耗が進行すると推定した。

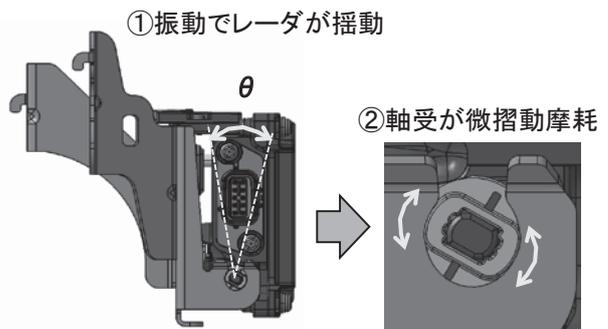


図6 摩耗メカニズム

Fig.6 Mechanism of Abrasive Wear

一方、樹脂と金属のように硬度差が大きい二物間の摩耗の場合、アブレイシブ摩耗理論²⁾により、総摩耗量は摩擦距離に比例することが知られている。

ここで、振動による筐体揺動角 θ がアブレイシブ摩耗理論の摩耗距離に相当すると仮定し、がたつきが生じるまでの揺動回数 N との相関関係の回帰式すなわち寿命曲線となる θ - N 線図が作成できれば、図5と同様の手法にてランダム振動下での摩耗寿命を定量的に予測し判定できると考えた。

θ - N 線図を作成するために、すでに開発が完了したミリ

波レーダブラケットの試作品を用いて、さまざまな振動条件下で振動試験を実施した。振動により生じるレーダ揺動角 θ の大きさとその発生確率は、あらかじめCAEにより計算しておき、実機試験でがたつきが生じた時の試験経過時間を記録、それらの複数の試験結果を整理して θ -N線図を作成した。

作成した θ -N線図および図5の方法を用いた判定手法の妥当性を確認する為、実機振動試験結果との比較を行った。ブラケット形状は①～⑥の6種類、入力PSDはA～Gの6条件、試験開始から経過した時間の違いを合わせると11条件の実機振動試験結果を得た。それらの試験において軸受のがたつきの発生有無と、試験経過時間の時点においてCAEから算出した摩耗損傷度Dの相関をプロットした結果を図7に示す。

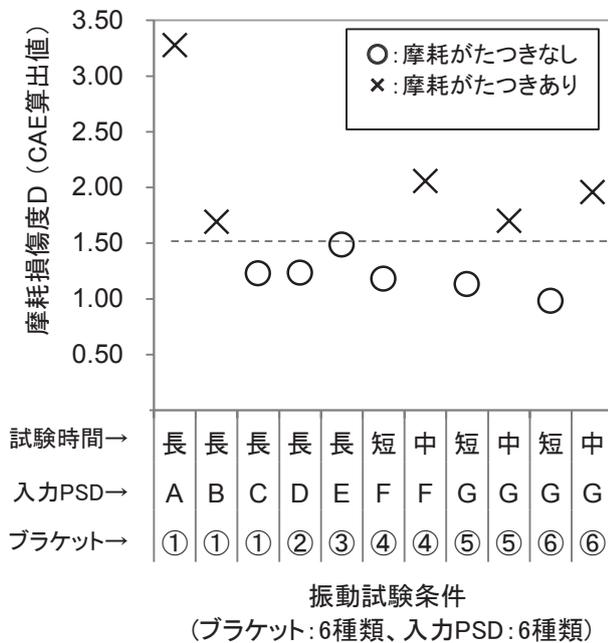


図7 摩耗損傷度推定値と実機試験結果との比較

Fig.7 Comparison of Estimated Abrasive Wear Damage with Result of Real Machine Test

それぞれの試験条件は、ブラケット形状や入力PSDが異なるにも関わらず、摩耗損傷度Dが、ある一定の値を超えたときに、がたつきが発生していることから、ランダム振動下での軸受の摩耗損傷に対する設計手法として妥当と判断した。この手法を用いることで、ブラケットの形状設計段階から、CAEにより軸受の摩耗損傷を定量的に判定できる為、軸受の摩耗による不具合を予防することが可能となった。2014年以降のミリ波ブラケット設計では、軸受摩耗損傷度をブラケットの強度判定基準に追加して、試作レス開発を行っている。

試作レス開発には、工学的に妥当で定量的なCAE判定基準の設定が不可欠であるが、CAEだけの検討では不十分であり、機器の故障モードと故障のメカニズムを把握したうえで、実機試験結果に基づいたCAEモデルの作成や判定基準の検討が重要と考える。

3 設計者によるCAE品質保証の取り組み

3.1 設計者によるCAE利用拡大の効果と課題

現在、当社ではミリ波レーダブラケットを含め、その他の車載機器のほとんどの機構部品設計のCAE検証は設計者自らが実施している。その理由は、CAEソフトのGUI⁽¹⁾や使い勝手の向上により、専任者でなくともCAE実施が容易となったことに加えて、設計者自身がCAEを実施することで、よりタイムリーな設計検証ができることなどが挙げられる。

しかし、設計者によるCAE実施は品質保証の観点で課題がある。CAEソフトの使い勝手向上により、解析結果を得ることは容易になったものの、CAEは境界条件、要素分割、計算手法の設定などにより結果は大きく変わる為、全くの見当違いの結果を得ている危険性ははらんでいる。これらの設定は、個々の事象に応じて、適宜対処する必要があり、全ての事象を網羅して標準化することは困難である。ゆえにCAEに関する知識と経験を十分に持った者が対応することが望ましい。

従来はCAEに精通した専任者が対応していた為、一定の品質は確保されていたが、設計者によるCAE実施では、全ての設計者がCAEに精通しているわけではない為、CAEを行う設計者の知識やスキルレベルにより、CAE品質が左右されることが懸念される。また実際の設計現場では、CAE結果に基づく「設計の妥当性」はレビューにより審議されているが、「CAE結果の妥当性」はあまり重視されていないことが多い。試作レス開発では、CAEの些細な間違いが重大な品質問題に直結する恐れがあるため、CAE結果の品質保証は重要な課題であった。

3.2 CAE品質保証プロセス

設計者によるCAEの品質保証を実現するために、日本計算工学会が規定する工学シミュレーションの標準手順HQC002³⁾を参考に、CAEを行う上で重要な概念である検証と妥当性確認 (Verification & Validation、V&V) を取り入れたCAEプロセスを制定した。

このプロセスで重視した点は、CAEを実施する設計者、知識や経験の豊富なCAEオーソリティと設計オーソリティの3者による技術的な検討を、CAE実施前と実施後に十分に行うことである。CAEプロセスの概要を次頁の図8に示す。

※(1) マウスなどのポインティングデバイスを用いて直感的な操作を可能にする操作方法のこと。

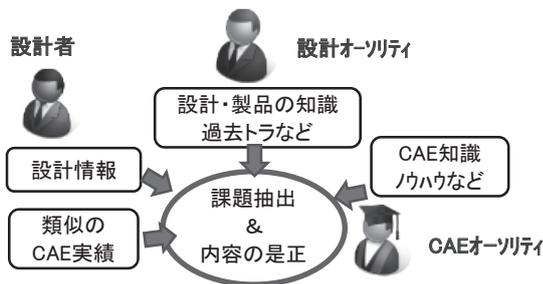
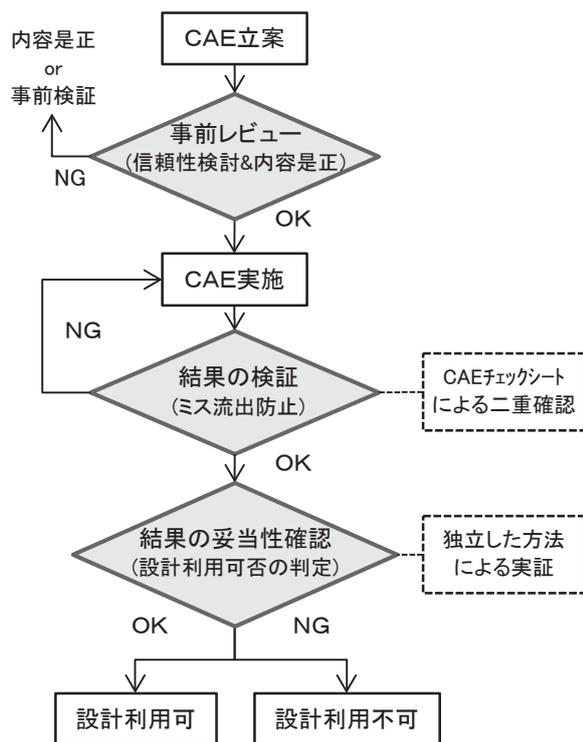


図8 CAE品質保証プロセス

Fig.8 Process of CAE Quality Assurance

まずCAEを実施する前に「事前レビュー」により、これから実施するCAEで意図する設計検討ができるのかどうかを協議する。過去に類似CAEがある場合は、実機試験との相関性や誤差率を確認し、CAEモデルの改良や適切な安全率を検討する。新規のCAEの場合は、実機の挙動を再現できるCAEモデルになっているかどうかを確認する。再現性が不明確な場合は、CAEモデルが過小評価になっていないかを入念に確認する。例えば、入力負荷を過小に見積もっていないか、機器の剛性を過大に見積もっていないかなど観点で検討を行う。

CAE実施後は、「結果の検証」により、正しく解析が行われたかどうかを検証する。具体的には、解析手法ごとに推奨設定や必須確認事項などを網羅したCAEチェックシートの内容に従い、入力ミスや判断ミス、確認漏れなどがいないか、CAEを実施する設計者と、オーソリティの両者で二重に確認する。

意図した通りに間違いなくCAEが行われたことが確認できた後は、「結果の妥当性確認」を行う。この工程における留意点は、当該のCAEとは独立した方法で妥当性を確認しなければならないことである。例えば、よく用いられる方法として、工学式や理論解などの手計算結果とCAE結果を比較する方法、類似のCAE結果と比較する方法、実機との応答とCAE結果を比較する方法などがある。通常、CAEは手計算では対応できないような複雑な問題を取り扱うため、妥当性確認は容易ではない。しかし、解析結果に重大なミスがないか確認する重要な作業である為、必ず実施しなければならない。妥当性確認では、有効数字1~2桁程度の概算値と合うかどうか確認⁽²⁾を行うことが望ましい。⁴⁾

またこのプロセスでは、各オーソリティによる審査が品質保証の要となる。オーソリティの力量（保有する専門知識やスキル、経験など）が不足していると、レビューで技術的な誤りやミスを検出することが困難になるため、オーソリティには相応の力量が求められる。相応の力量があるかどうかを判定する為には、客観的かつ定量的な判定基準があることが望ましい。そこで、CAEオーソリティは、計算力学技術者⁽³⁾ 2級以上の資格を保有する者を選定し、設計オーソリティは社内のスキル評価に基づき各専門分野毎に上位数名を選定し、各工程における審査に参加するようにした。

このプロセスの運用により、CAEに対する組織的な検証と是正が可能になり、従来に比べてCAE結果の品質保証レベルの向上が図れた他、CAE結果の検証と妥当性確認の重要性を再認識するなど設計者のCAEに対する意識向上にも効果を上げている。

4

おわりに

CAEによる試作レス開発は、製品の競争力を高める有効な手段であるが、CAE起因による重大品質問題に直結するリスクもはらんでいる。CAEの特徴を理解し、適切に運用することができれば、試作レス開発は可能と考える。また、CAEを効果的に設計に活用する為には、設計に最も身近な設計者が主体的に使用する方が良いと考える。今後、設計者のさらなるCAEスキル・知識の向上の為、教育体制の拡充を行っていく予定である。

※(2) オーダーエスティメーションと呼ぶ。

※(3) 日本機械学会主催のCAE技術力を評価する認定資格。3つの専門分野と4段階の認定レベルがある。

参考文献

- 1) 解析研究所編：はじめてのPSD,
解析研究所,pp74-100,[2012]
- 2) 橋本 巨：基礎から学ぶトライボロジー,
森北出版,pp56-59,[2006]
- 3) 日本計算工学会：工学シミュレーションの標準手順,
日本計算工学会, [2011]
- 4) 泉 聡志, 酒井 信介：
理論と実務がつながる実践有限要素法シミュレーション,
森北出版,pp70,[2010]

筆者紹介



藤田 真治
(ふじた しんじ)
第三エンジニアリング部



小山 雄史
(こやま たけし)
第三エンジニアリング部