CAD, CAEを使った 新しいエンジン開発戦略

A New Strategy of Engine Development by (using) CAD and CAE

小林 明英
Akihide KOBAYASHI

- ◎1958年8月生まれ
1984年上智大学大学院理工学研究科修了, 同年
トヨタ自動車(株)入社, 現在に至る
- ◎研究・専門テーマはエンジン開発におけるCAD
の適用
- ◎トヨタ自動車(株) 第1パワートレイン開発部
主担当員
(〒471-8572 豊田市トヨタ町1番地/
E-mail: akihide@kobayashi.tec.toyota.co.jp)

沢田 龍作
Ryusaku SAWADA

- ◎1955年5月生まれ
1982年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専
攻修了, 同年4月トヨタ自動車(株)入社
- ◎研究・専門テーマはエンジンCAE
- ◎トヨタ自動車(株) スタッフエンジニア
(〒471-8572 豊田市トヨタ町1番地/
E-mail: ryu@sawada.tec.toyota.co.jp)

足立 昌司
Shouji ADACHI

- ◎1960年3月生まれ
1982年立命館大学理工学部機械工学科卒業, 同
年トヨタ自動車(株)入社, 現在に至る
- ◎研究・専門テーマはエンジン開発プロセスの改
革
- ◎トヨタ自動車(株) パワートレイン企画室 主
担当員
(〒471-8572 豊田市トヨタ町1番地/
E-mail: shouji@adachi.tec.toyota.co.jp)

1 はじめに

自動車用エンジンは、1970年代の排気ガス対策、1980年代の低燃費化、高性能化、1990年代にはクリーン化、環境改善と社会環境の変化に対応し成長してきた。そして、21世紀においては地球環境保全と安全への待ったなしの対応が迫られている一方、ユーザに魅力ある商品を提供し続ける必要性も高い。21世紀において、自動車産業の成長性を継続的に確保するためには、技術開発力の強化と先進技術研究の推進が必要であるとともに、もの作りにおいては、ユーザのニーズに合った商品をタイムリーに提供し、会社の収益基盤を強化する必要がある。また、国内でのもの作りから、グローバルなもの作りへの移行と、その体制の確立が必要である。これらを実現するためには、従来のもの作りのプロセスや手法の延長線上では限界があり、新しいもの作りに向け種々の変革が必要になっている。

本稿では、21世紀のもの作りにおける戦略と課題を、エンジン開発におけるプロセスとそれを支えるCAD、CAE技術などを中心に述べる。

2 開発プロセス

市場の要求に合った商品ができるだけタイムリーに提供するためには、可能な限り開発を短期間で行うことが求められる。図1に従来のエンジンの開発における設計開始から量産化までの、設計変更の数と完成度について示す。従来のもの作りは、現地現物を徹底的に行うサイクルを繰り返すことで完成度を上げて製品化を行ってきた。しかし、この方法では実機による試作と評価を何回か繰り返す必要があり、求められる短期間での開発を実現するには限界がある。図2に21世紀にめざすエンジン開発プロセスの概念図を示す。プロセス実現の鍵は『やり直しのない開発』である。やり直しの原因は多岐にわたるため、試作数の削減は、容易ではなく、さまざまな取組みが必要である。その中で現在取り組んでいる一つに、図2にもある仮想試作がある。仮想上でエンジンの試作、評価を行いエンジンの完成度を飛躍的に向上させようというのがねらいである。次にこの仮想試作における、デジタルエンジニアリングについての取組みのいくつかを述べる。

3 仮想試作における取組み

3-1 データベース

仮想上で初期の諸元を決めたり、検討形状の妥当性を評価していく上でデータベースの整備とその利用は非常に重要と考える。仮想試作においてCAEは重要な手法であるが、今後CAEの適用範囲拡大、解析精度が向上するとしても、CAEですべてを予測することは不可能であり、多くはデータベースの情報を活用することにより、より確かな諸元を予測していくことが必要である。データベースは以下の四つに分けて考えることができる。

- ① CAEの実施以前に諸元を決めていく上で必要な情報。
- ② CAE解析に必要な情報。
- ③ CAEが適用できない項目の、諸元決定に必要な情報。
- ④ トラブルシューティングやノウハウに関する情報。

現在は、部品ごとの設計プロセスを整理することで、必要な情報と活用方法について明確にしていこうとしている。

図1 設計変更の数と目標に対する完成度のイメージ

3-2 三次元ソリッド設計

仮想試作においては、実物による確認ができないため、三次元ソリッド設計は必須である。従来でも三次元のソリッド設計は行ってきたが、主にエンジンの計画段階への適用である。その理由としてももの作りの多くは、まだ図面で行われているためと、評価や確認は実機で行えるからである。したがって、詳細なモデルを作るのは、型への利用が可能な部品に限られている。しかし、最近車両のデジタル開発が進み、エンジンに対してもデジタルデータの提供を要求されるようになり、現在では、搭載性や干渉を検討できるレベルの三次元データを二次元の図面データに付けて出図することを行っている（3D出図）。仮想試作においては、搭載性、干渉以外に駄肉除去、組付け性、サービス性、見栄え、量産ラインでの設備検討、コスト見積り、重量見積り、型設計、型製作、CAEなどに利用するため、要求されるデータのレベルは型製作へ利用するしないに関わらず製品データに近いものが必要になってくる。実現への課題は、設計者が使いやすく、意図した形状を容易に作成できる三次元CADが必要になる。特にこう配付加とR形状作成については飛躍的なレベル向上が必要である。

3-3 パラメトリック設計

最近の主要な市販CADは、パラメトリック技術を備えている。パラメトリック技術とは、CAD上に作成した形状を、操作過程で入力した数値や操作履歴を編集することにより、形状を効率的に変更することができる技術をいう。仮想試作においては、CAD上で、多くの要件を検討し、形状に反映していく必要がある。このパラメトリック技術の利用が効率化や設計品質に大きく影響するため、非常に重要と考える。また、この技術を使って、雛形を充実させ、雛形を変更することにより求める形状を効率的に作成することができる。図3にシリンダヘッドの例を示す。パラメータシートに定義された、シリンダヘッドの諸元値を変更することにより異なるシリンダヘッドが作成できる。課題は、この技術を使った設計の生産性が、CADの習熟度に頼るところが大きいことである。形状変更が柔軟に行えるモデルを作成することは、プログラミング作業に等しく、習熟度に加え、センスが要求される。また形状変更した際の形状の不整合に対応できるためにもCADの習熟度や経験が必要

図2 開発プロセス

図3 雛形設計例

図4 動弁系レイアウトの自動最適化の例

図5 大物、複雑部品の並行設計（シリンダヘッドの例）

である。形状変更した際の、形状の不整合の対応はCADの進歩に伴い解決されると予想され、習熟度や、センスが要求されることについては、雛形データの充実、教育、作成手順書の整備、設計中のアドバイスなどシステム以外での支援が必要と考えられる。

3-4 自動最適化

上記3-3のパラメトリック技術を使うことで形状を効率的に変更することが可能になるが、実際の設計では寸法を変えて形状を変更、評価することを繰り返し行いながら最適な形状を見つけていく作業となる。変更する寸法が複数ある場合は、その作業は膨大なものとなり、現実には完全に実施することは困難である。自動最適化とは、変更する寸法とその形状に対して設計が求める評価値をあらかじめ指定し、寸法を自動で変更しながら設計者が求める評価値になるまで繰り返し計算を行うことである。図4にバルブレイアウトの配置の最適化を行っている例を示す。現在は形状の評価はCADに提供されているマシプロパティの計算、すき間計算などであるが、今後は外部プログラムやCAEソフトの結果をフィードバックして最適になるまで繰り返し形状

を変更することを考えている。最終的には、評価値の範囲を広げて、ノウハウ、暗黙知を数値化し、最適値を求めたいと考えている。課題は3-3と同様、パラメトリック技術である。自動最適化では形状変更での形状不整合により、システムがエラーで止まると、繰返し計算は行えないため、変更への高い柔軟性が求められる。また、評価値については、数値化しにくいノウハウを、どう数値化していくかが、今後の大きな課題と考えられる。

3-5 並行設計

仮想設計において、効率的に設計を行う重要な取組みの一つに並行設計、開発の同期化がある。並行設計は大きく三つに分けられる。

- ① 部品の中の、部位間の並行設計。
- ② エンジン全体での部品間の並行設計。
- ③ 設計と生産技術など関係部署との並行設計。

最近のCADにおいては、異なるデータ間の関連付けや一元管理を行うことができるため、パラメトリックの技術と合わせて、並行設計が可能になってきた。図5にシリンダヘッドの並行設計の例を示す。複雑な部品は複数の部位単

位(ポート、燃焼室など)に分け、互いに関連を持ちながら並行して進める。また部位単位に分けることで個々のデータ量が小さくなることや、作成した履歴がわかりやすく、設計変更の時間も大幅に短縮することができる。エンジン全体での部品間の並行設計や他部署との設計も上記同様、並行に進めることをねらっている。これまで、述べてきた雛形設計、最適化設計、並行設計をエンジン開発において、パラメトリックの技術とCADの操作技術や経験が非常であり、人、システムともに広く適用するためには、時間が必要であると考えられる。

3- CAE

図6に示すように、製品開発の初期段階からCAE解析を活用し、最初の試作品の完成度を高めることにより開発期間の短縮と開発コストの低減を図ることができる。従来、CAEは非常に多くの時間とコストを必要とし、開発プロセスの中に組み込むことは難しい状況であった。しかし、今日、CADとCAEとの融合を図ることにより、製品開発プロセスへの組み込みが可能になった。図7にエンジンCAEの一覧を示す。エンジンは流体、熱、運動、振動現象を含み、それらが連成している。またシリンダヘッドなど形状的にも複雑かつ非線形、接触問題を含んでいるため、現象を完全にシミュレートすることは非常に難しい。そこで開発プロセスの段階に応じてCAEの適用範囲を理解した上で適切な活用をすることが必要である。これがCAEの真の設計ツール化であり、活用の方法論であると考えられる。エンジンのCAEを以下の二つの切り口で分類してみた。一つは図6の中でも示したが、CAEを開発プロセスのどの段階で活用するかで三つの種類に分けることができる。表1に定義をまとめた。製品の完成度を初期に高めるためには、仮想試作CAEが特に重要であると考えられる。もう一つは、開

発のパターンとCAEの利用者という切り口である。それを表2で示した。この中で、仮想試作CAEが適用されるのは、通常、パターンAである。仮想試作の中でCAEを真の設計ツールとして使いこなすための必要要件は、一つは短期間で解析可能なことである。CAEを開発プロセスに組み込むためには、シリンダヘッド、シリンダブロックの強度解析など最も期間が長いもので、2ヵ月以内で最低2ケースの解析を繰り返す必要がある。そのためにも、解析専任者と設計者との連携が特に重要である。一方、クランク、コンロッドなどの強度CAEや吸気系の一次元の流れ解析などは、設計者自身が行うことが多く、複雑で大規模な解析とは異なり、解析期間以外に、操作のしやすさ、安定した解析精度が得られる手法が必要になる。このように仮想試作でのCAEは解析専任者が行うものと、設計者が行うものがある。しかし、将来、使い勝手の向上や計算時間の短縮により、解析者と設計者との区別がなくなると思われる。

図6 活用パターンによるCAEの種類

図7 CAE一覧

表1 活用方法によるCAEの種類

CAE種類	要素開発	仮想試作	評価
活用目的	製品の要素技術開発に用いる	試作品を作る前、製品の信頼性、性能などを予測するため用いる	製品の評価中、不具合対策などに用いる
試作品	なし	なし	あり
必要精度	形状は中程度 負荷条件は中程度	形状は高精度 負荷条件は中程度	形状は高精度 負荷条件は高精度
必要期間	技術内容依存	< 7 週間	通常緊急

表2 エンジン開発パターンと利用者によるCAE分類

パターン	変更規模	数	CAE利用者	CAE内容
A	本体新設 大改良	少	設計者	クランク、コンロッド、ピストン、動弁系強度、吸気系一次元流れ、動弁系挙動、搭載系部品強度
			解析専任者	ヘッド、ブロック強度、吸排気系三次元流れ、パワーブラント系振動、騒音
C	吸排気系 小改良	多	設計者	吸排気系流れ、排気マニホールドの強度

理想的には製品開発の設計者が非常に簡便な解析ツールを電卓のように使いこなせるようになることと考える。それを実現するための、課題の一つは、やはりCAD形状から、完全自動で解析用のモデルを作成し、数時間のうちに解析結果が得られるようなシステムの開発である。また境界条件のモデル化、あるいは計算結果の判断については製品開発設計者がCAEを正しく理解するように教育、育成することも肝要である。これについても解析事例やノウハウのデータベース化などで、より効率的に進められるようになると考えられる。

3-7 図面レス

国内においてのもの作りは、多くはまだ図面から行われている。しかし、新しいプロセスや、グローバルな調達を実現するためには、今の図面では限界があると考え、理由の一つは、図面は形状を完全に表現しているわけではなく、物を作る人の、図面の解釈によって違いが生じることである。また最近、木型を作成できる人が少なくなったと聞く。したがって常に設計者が意図した形状を正しく作るには、作り手に依存しないもの作りが必要になってくる。二つめには、現在のもの作りにおける作込みに必要な型あるいは製作条件に関する情報すべてが図面に反映されているとは限らないことである。例えば、同じ部品を海外で製作する場合、図面からでは国内の製品とに差が生じ、同じ形状や同じ品質にはならない。従来は、試作を重ねていく過程で、その差を埋めることが可能であった。しかし、やり直しがなく、試作を削減した新しいプロセスでは、設計の求める形状を、誰もが正しく認識して一発で決めることが必要である。したがって、そのためには製品と製品の型データ（補正は除く）と製品データが限りなく同一である

ことであり、その製品データを従来の図面の形状情報に代わって提供することであると考えられる。加工用の情報も同様に、3D加工モデルと加工属性情報データによって提供を行う。最終的には図面に代わる新しい情報形態に移行すると思われる。課題としては、生産技術部門や製造の現場などにおいて、製品にのみ織り込まれている暗黙知を、いかにCADの情報として入れていくか、また3D形状の公差の表現方法、CAD情報を使った製品の検査方法などがある。特に検査については、品質確保において非常に重要であり、デジタル情報を使った今以上に高精度の新しい検査方法の確立が必要である。

4 まとめ

以上、仮想試作における取組みをCAD、CAE中心に述べてきた。エンジンへの要求の変化、エンジン技術の変化、もの作りの変化、利用するCADなどの道具の変化に伴い、設計者に求められるものは変化してきた。特にその大きなものが三次元CAD、CAEの利用技術習得である。また新しいプロセスにより、一度に求められるアウトプットの量と質も変化している。よって従来の設計者の役割、設計体制では上記変化に設計者は対応できないと考えられる。今後は、設計者の中にも、コンセプト段階でのエンジニアリングに重きを置く設計者と、製品開発でのもの作りの計画部分に重きを置く設計者と2極化し、さらに、従来の設計者が行っていた、製品への作込みの実施を、CAD、CAEが自由に使える、新しい職種の人達が実施していく方向であろうと考えられる。しかし、そこには常にエンジニアとは何かという議論がある。

(原稿受付 2001年5月2日)