

論文・解説

31

設計者向けCFDシステム (PT-ECS) の開発 Development of "PT-ECS": CFD Analysis System for Design Engineers

横 畑 英 明*¹ 本 郷 均*² 植 木 義 治*³ 堀 川 浩 司*⁴
Hideaki Yokohata Hitoshi Hongou Yoshiharu Ueki Kouji Horikawa
三 村 光 生*⁵ 中 谷 修 二*⁶ 石 原 卓 哉*⁷ 前 田 茂 樹*⁸
Mitsuo Mimura Shuji Nakatani Takuya Ishihara Shigeki Maeda

要 約

エンジンの開発期間短縮, 品質向上という流れが加速する中で, エンジン性能を予測する際に欠かせない Computational Fluid Dynamics (流れ解析, 以下CFD) はますます活用ニーズが高まっている。しかし, 使いこなすためには高度なノウハウが必要なことから一般的に「CFDは解析専任者が使うもの」との認識がある⁽¹⁾。この現状を改善するため, 市販CFDソフトSTAR-CDをベースに, パワートレイン向けの解析ノウハウを詰め込んだ Pre/PostシステムであるPower Train-Easy CFD System (以下PT-ECS) を開発した。本システムを用いることにより, パソコンから誰でも簡単にCFDを使って高度な解析が可能になる。本稿ではシステムの内容と, 活用した効果について報告する。

Summary

With the acceleration of the reduction in lead-time for engine development process and the improvement in quality, the needs for practical use of CFD are in the increase as a tool indispensable to the prediction of engine performance. However, there is general recognition that CFD is the tool for specialists, because it requires high expertise for highly effective use. For the break-through of the actual situation, we have developed "PT-ECS"; that is, a peripheral system for STAR-CD which is loaded with know-how for Powertrain analysis. With this system, everyone can easily conduct a high quality analysis on their PC. This paper describes the contents of the system and the effects of an application.

1. はじめに

近年, CFD解析技術は急速な進歩を遂げており, エンジンの設計において欠かせないツールになりつつある。更に予測領域が日々拡大しつづけていることもあり, 今後はますます重要になると考えられる。一方, CFDでの解析は一般設計者にとって簡単であるとはいえず, 1次元のエンジンシミュレーションのように設計者自らが解析を行う機会は少ない。つまり, 「CFDは解析専任者が行うもの」という意識から抜け出していないのが現状である。

マツダではコスト, レイアウト等の多くの制約の中で設計しているエンジン開発においては, 「制約条件を把握している設計者自らがCFDを行ってインプロセスで最適な形状を見つけ出す」という開発方法が望ましいと考えている。そのために市販のCFDツールSTAR-CDをベースに「設計者向けCFDシステムPT-ECS」を開発した。本稿では, PT-ECSの機能と活用の現状を紹介する。

* 1 ~ 4 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.
* 6 第2ITソリューション推進部
IT Solution Leadership Dept. No.2
* 8 株式会社ヴァイナス
VINAS Co.,Ltd

* 5 第1エンジン開発部
Engine Development Dept.No.1
* 7 株式会社シーディー・アダプコ・ジャパン
CD-Adapco JAPAN Co.,LTD

Engineering Groups

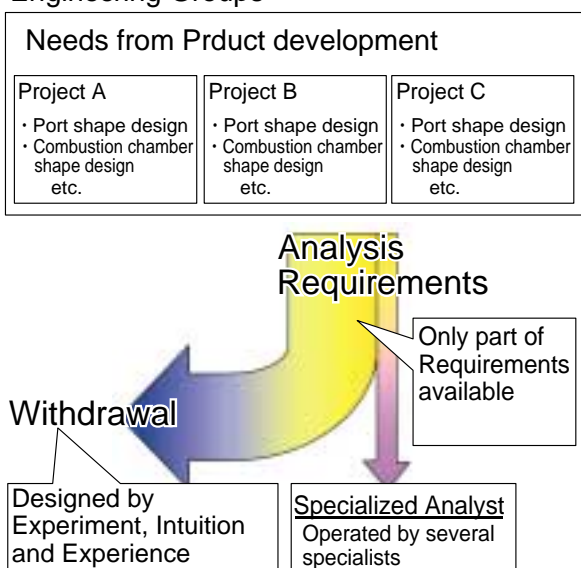


Fig.1 Image of Conventional Way

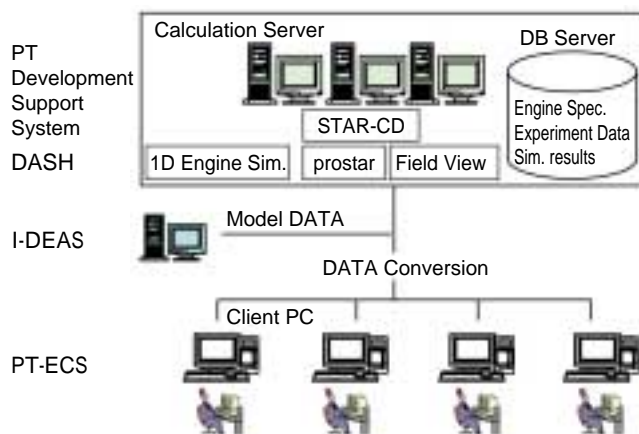


Fig.2 System Structure

2. 開発の経緯

マツダではいくつかのCFDツールを使用しているが、エンジン開発領域で最も日常的に使っているのは代表的なCFDツールの一つであるSTAR-CDである。しかし、機能的には満足できるものの操作・設定が簡単とはいえ、一般設計者が手軽にCFD解析を行うことは難しいため、解析専任者が一手に解析を行っていた。解析専任者は人数が少ないため、エンジン開発の現場から上がる解析ニーズに充分応えられていない状況にあった (Fig.1)。

また、CFD解析を行うには解析精度を上げるためのノウハウが多いため、専任者が解析を行うといってもスキルの差によって結果に差が出ることも多い。

そこで、「CFDを使うための敷居を低くし、設計者自らがCFDを実施し解析件数を大幅に増やす」とこと、「CFD

解析方法を標準化して誰でも高品質な結果を得る」ことを目的にシステム開発を開始した。

2000年に定常流に特化したプロトタイプを完成させ、その後順次機能追加を行って、現在では当社製1次元エンジンシミュレーション⁽²⁾の結果とリンクした非定常解析や、市販のPost ProcessorであるFIELDVIEWとのリンクなどの機能も追加し、エンジン開発の中で設計者が日常的に使うツールとして定着している。

3. PT-ECSの開発方針

マツダの一般設計者にとって、最も馴染み深いコンピュータといえばMicrosoft Windows PC (以下PC) である。EWS (Engineering Work Station) でのUNIX環境はユーザーが増えているとはいえ、万人が使いこなせるとはいい難い。そこで、PT-ECSはクライアントマシンをPCとし、ユーザーはMicrosoft Officeを使う感覚で操作できることを狙った。一方、ソルバ (数値演算実行部) は高速演算が必要なこととCFDツール管理の容易さを狙い、UNIXサーバで演算させることにした。

3次元図面に関しては、マツダの標準3次元CADであるI-DEASで作成したモデルをPCに転送して、PC内でPT-ECSを使って加工することにした。

一方システム開発に関しても、進化の早いCFDツールの改良に迅速に対応できるよう、できるだけ簡単に誰もがメンテナンスできるよう工夫している。

マツダのパワートレイン開発では、DASH⁽³⁾と呼ぶシステムを構築し、1次元エンジンシミュレーションをはじめとする予測技術、実験結果やカタログデータなどの各種データベースを1つのシステムから利用できるようにしている。PT-ECSもDASHシステムの一機能として設計している。

4. システム構成

Fig.2にシステム構成を示す。複数台の演算サーバと数百台のクライアントマシンを結び、どのクライアントからもCFDの実行ができるようにしている。もちろんI-DEAS搭載のワークステーションともつながっているため、3次元データはどのPCにでも持ってくるのが可能である。

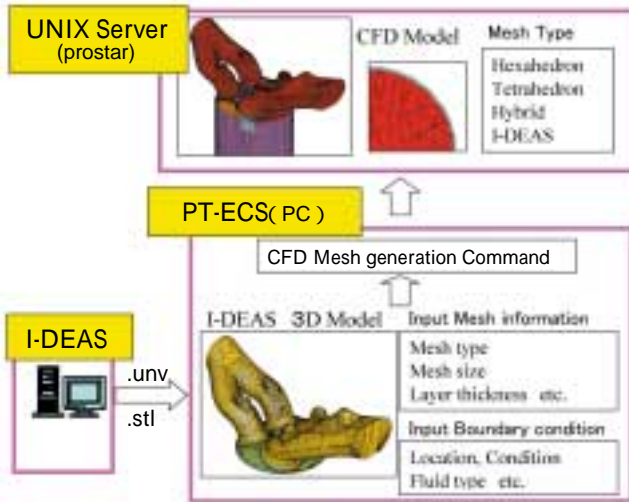


Fig.3 Mesh Generation Procedure

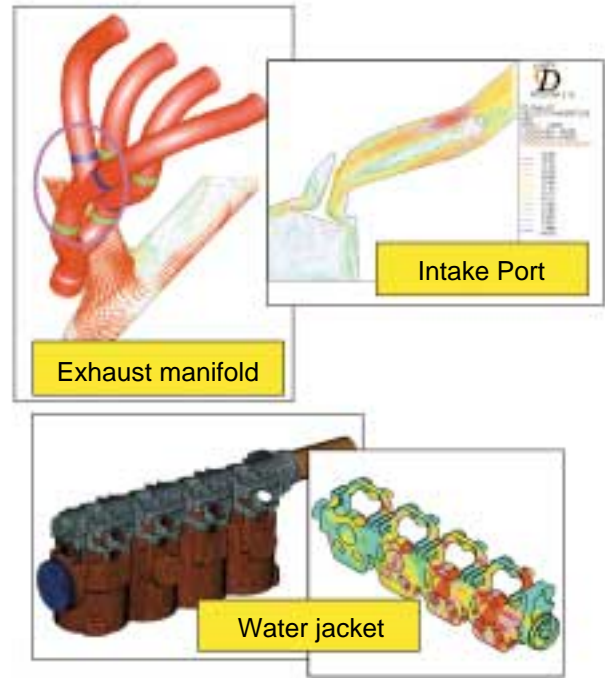


Fig.5 Output Example of Steady State Analysis

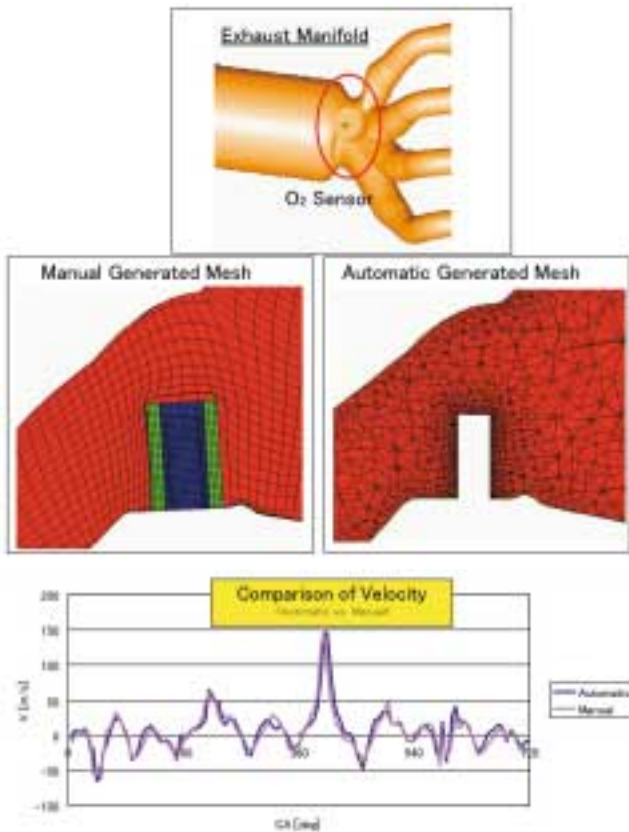


Fig.4 Comparison of Accuracy (Manual vs. Auto Meshing)

5 . PT-ECSの持つ機能

5.1 モデル作成機能

I-DEASで作成した形状データを読み込み、境界面・メッシュ情報を指定してSTAR-CDの標準Pre/Post Processorであるprostarにコマンドを送る。このコマンドを基にprostar側で壁面にレイヤーメッシュを貼り、内部メッシュを切っていく (Fig.3)。メッシュは、手動 (ヘキサ)

全自動 (テトラ) およびこれらのハイブリッドを指定できる。CFDメッシュを切る際にエラーが出る場合に備えて、I-DEASで切った表面メッシュをそのまま使うこともでき、部分的に細かくメッシュを切ることによってメッシュエラー発生を大幅に低減している。またこの方法によりテトラでメッシュを切った場合の精度の悪化防止と計算時間短縮の両立も図っている。例えば、排気系のO₂センサへのガス当たりを例に、従来のようにヘキサで切った場合とI-DEASメッシュをベースにテトラで切った場合の、メッシュおよび流速の比較をFig.4に示す。両者とも解析結果の流速に大きな差はなく、テトラのメッシュを用いても実用精度には問題ないことがわかる。また、内部メッシュを粗くすることで計算時間の短縮も図っている。

5.2 定常解析機能

エンジン性能を大きく左右する吸気系の評価は、リグを用いた定常流でのスワール・タンブル・通気抵抗試験で評価することが多い。また、ウォータージャケット内の水流れのように、定常と見なして評価できる流れも多く存在する。PT-ECSでは、最もベーシックな定常流の解析には標準システムで対応している。出力例をFig.5に示す。

定常においても非定常においても計算時間が解析実行のネックとなることが多いため、マルチCPUでの実行に対応し、1CPU実行時の数倍から十数倍の速度で計算させている。

5.3 非定常解析機能

流れが大きく変動する排気系においては、キャタリストへのガス当たりや、O₂センサへのガス当たりが問題になることが多い。また、吸気系で問題となるEGR分配についても定常計算で精度良い結果を出すことは難しい。これ

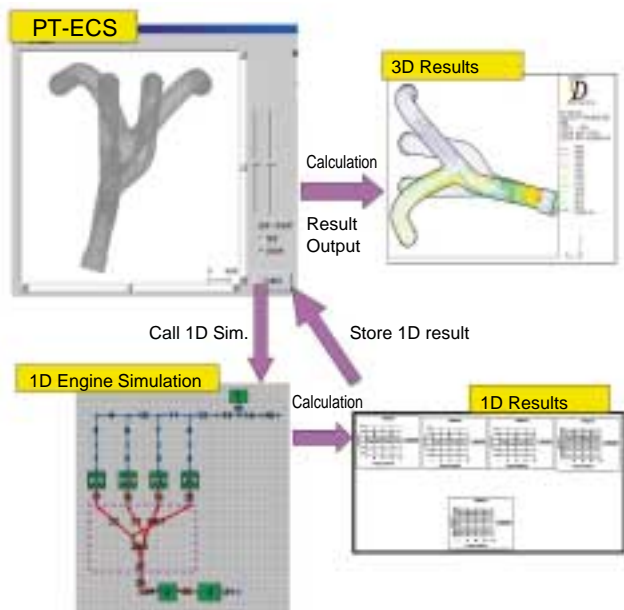


Fig.6 Calculation Flow of 1D + 3D Analysis

らは非定常のサイクル計算で解くことが合理的であるため、PT-ECSでは非定常計算にも対応している。非定常の解析では、事前に1次元エンジンシミュレーションで計算した結果をCFDの境界条件としてスタティックに与える方法と、1次元と3次元を境界部でダイナミックに解いていく方法があり、後者の方が精度的に優れている反面、計算時間がかかりすぎるという欠点がある。現時点のPT-ECSでは、実用的な解析時間を優先して前者のスタティックなリンクに対応している。

PT-ECSの持つ非定常解析の機能は、本システムから1次元シミュレーションを実行させ、その結果を基に自動的にSTAR-CD用の非定常実行ファイルを作成しCFD計算を実行させる (Fig.6)。従来のように、STAR-CDのサブプログラムを組み、1次元結果を加工して設定する、という面倒な作業を無くし、誰でも簡単に非定常計算を行えるようにしている。

また、従来は対象モデル毎に各人のノウハウによってスキームや計算時間刻みなどを最適化する必要があったが、それらをシステムに組み込んだ。具体的には、多くのモデルで条件を変更して計算することで、精度悪化防止と計算の発散防止の両立を図るパラメータを見つけた。それを計算タイプ別 (例えば吸気系・排気系・EGR有無等) にデフォルト値として組み込むことでシステム化している。その結果、人による精度の誤差を最小限にすることができた。

5.4 テンプレートおよびパラメトリック設計機能

通常CFD解析において一部の形状を変更する場合、CADに戻って形状を作り直す必要がある。例えば、「EGRパイプを数センチ移動させた場合の影響を計算したい」といった簡単な検討であっても、一度3次元CADに戻って形状を作り直して再度CFDモデルを作り直す、という面倒な作業が必要となる (Fig.7)。つまり、CFDはあくまで

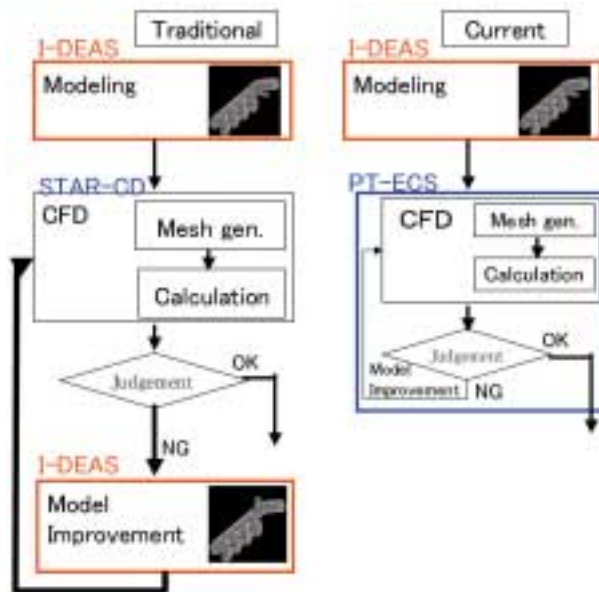


Fig.7 Workflow of Model Revision Using Template Function

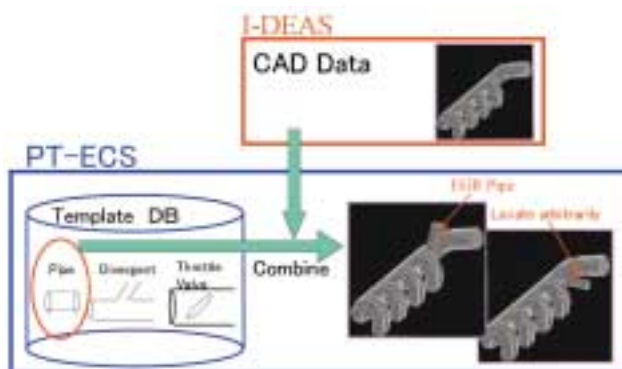


Fig.8 Image of Template Function

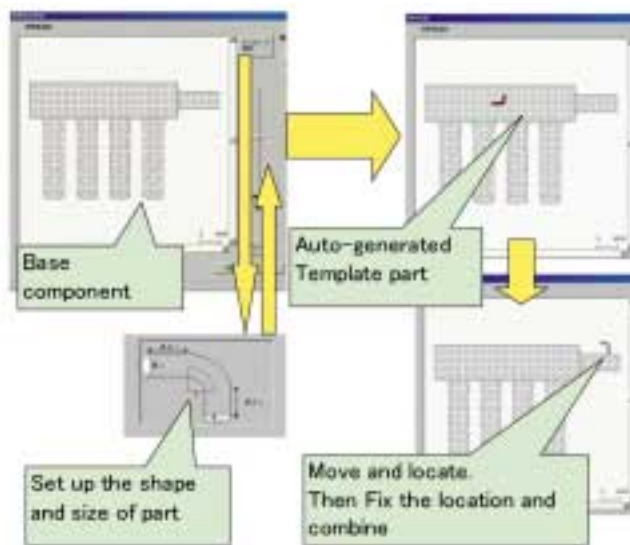


Fig.9 Flow of Template Model Generation

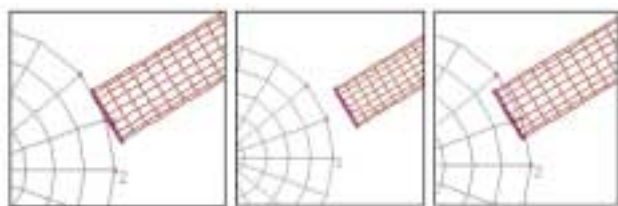


Fig.10 Projection Sub-function

3次元CADが使える担当者向けのツールであり、3次元CADが使えない設計者や実験担当者が容易に形状を変更して使えるツールとはなり得ない。

そこで主要な部品をテンプレート部品としてデータベース化しておき、オリジナルのCADデータに簡単に結合させる機能を持たせた (Fig.8)。この機能を使うと、単純な管のように径・長さが異なる部品であれば、いくつかのパターンをCFDモデルでデータベースに持っておき、オリジナルモデルと結合させるだけで様々な検討が可能となる。

しかし、実際にはもっと複雑な検討が必要な場合も多く、膨大な組み合わせに対応するためにデータベースが巨大になる。そこで、単純にデータベースとして持たせる機能に加えて、任意の形状を自動的に作成するパラメトリック設計機能も持たせている。

以下、この機能についてキャタリストを例にあげて説明する。キャタリストの場合、半透過抵抗モデルとしての設定が必要で、セル密度等に応じた通気抵抗を係数で与える必要がある。更に、形状は円、もしくは楕円で、径・長さも様々であるため、単純に形状を持たせるのではなく、prostarでキャタリストを作成できるように、コマンドとしてデータベースに登録している。具体的には、径、長さ、通気抵抗などに関する係数を可変にしたモデルをコマンドとして持たせている。このようなテンプレート部品もしくはパラメトリック設計部品は、単純な管・分岐管・曲がり管などはもちろん、スロットルのような比較的モデル作りが面倒な部品についても登録している。これらを任意に結合することで様々な検討を実現できる (Fig.9)。

テンプレート機能を実現させる際にもう1点問題となるのが、CFDモデルとCFDモデルを結合させる時の接合面の処理である。Fig.10のように一部、もしくは全部が離れている場合、もしくは食い込んだ場合、そのままでは結合できない。これについてはprostarの持つプロジェクション機能を工夫して活用することで解決した。この機能により、多少ラフに部品を動かしても問題なく結合したCFDモデルが完成するため、非常に効率的にモデル作りを行うことができる。

5.5 結果出力機能

PT-ECSでは、任意の断面を切ってその断面のベクトル図などを出力できる。また、スワール・タンブル試験など、決まった手順での結果処理については計算結果を自動的に

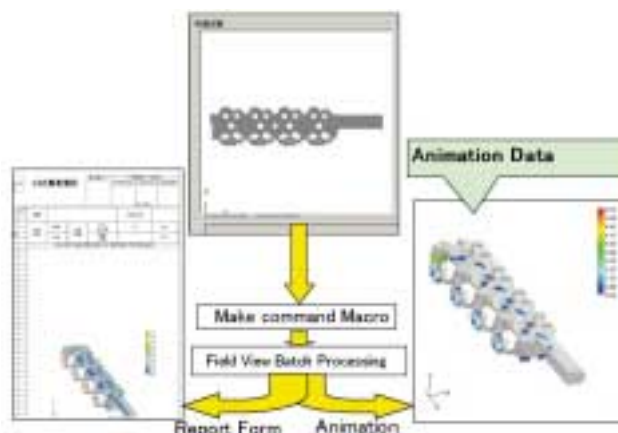


Fig.11 Flow of Animation Data Generation

処理するルーチンを組み込んでいるため、簡単に数値で結果が出力できる。

形状が単純な場合は上記の断面設定で問題ないが、複雑形状になった場合は、例えば流速が最も遅い領域はどこにあるか、などを探るのは容易ではない。また、非定常計算を行った場合のアニメーション作成も慣れと時間のかかる操作である。

これらの問題を解決するために、市販のPost ProcessorであるFIELDVIEWとリンクさせ結果を処理する機能も付け加えた。STAR-CDで計算が終わるとPT-ECS内からFIELDVIEW用の設定を行い、サーバにコマンドを送って自動処理させ、結果をPT-ECSに取り込む。アニメーションは既存の報告書形式に埋め込んだ形でも出力できるため、効率的な結果処理が可能となる (Fig.11)。この機能を使うことで、従来は数日必要だった非定常のアニメーション作成も10分足らずの工数で可能になった。

6 . PT-ECSを活用しての効果

PT-ECSを使うことで非常に簡単に高品質な解析ができるようになった。そのため設計者が図面を出すまでの間に自分自身で十分な設計検証ができるようになり、エンジン開発の効率化・高品質化が図れることが期待できる。その他、具体的な効果を個別に列挙する。

① 教育時間の低減およびユーザ数の増加

従来は、全くの初心者でも定常、非定常解析ができるまで

Table 1 Utilization of PT-ECS

	Traditional	PT-ECS
Education (In case of Trangent/ 1 D+3D)	1 ~ 2 mon.	10min.
Modeling (In case of Trangent/ 1 D+3D)	1 ~ 3 days	10min.
Post Processing (In case of Trangent/ 1 D+3D)	1 ~ 3 days	10min.

教育するのに1カ月以上は必要であった。本システムでは一通り説明するだけですぐに使えるようになるため、1時間もかからずにきちんと解析できるようになる。

このように敷居が低くなったこともあり、ユーザ数は従来の10倍以上となってさらに増えつづけている。まさに設計者が日常的にCFD解析を行える状態になったといえる。

② モデル作成時間の低減

非常計算を例にあげると、解析専任者であってもモデル作成・解析条件設定に1日程度は必要であったが、PT-ECSでは5分程度で計算の実施が可能になった。もちろん、今まで数日かかっていた不慣れな設計者であっても10分ほどで可能になっており、手軽にモデルが作成できるようになった。

③ 結果処理時間の低減と現象把握の容易化

現象把握に欠かせないアニメーション作成が従来の数日から10分程度に短縮でき、日常的に活用できるようになった。そのため従来は見極めが難しかった現象の理解が大幅に進むようになった。

④ モデル作成ミスの低減

汎用CFDツールは設定する項目が多いため、解析専任者でも時折条件設定を間違い、結果が出てから誤りに気づくことがある。設定ミスはなかなか表には出にくい、聞き取りの結果、1~2割程度は何らかの設定ミスで失敗したという結果であった。PT-ECSの場合は、解析する対象によってデフォルト値を充実させているためうっかりミスが発生しにくく、ミスはほぼ0になっている。長い計算時間が必要なCFDにおいては1回のミスで数日無駄にすることもあり、設定ミスの低減効果は大きい。慣れない設計者が解析を行う場合には特に大きな効果であると考えられる。

⑤ 容易にパラメトリックスタディが可能

エンジン内の流れの様子は回転数・負荷によって大きく変化する。各形状の検討を行う際にはこうした運転条件の影響も考慮する必要があるが、CFDで検討する場合は設定のわずらわしさから代表点だけで検討することが多かった。PT-ECSを用いることによって、様々な条件での検討が簡単に可能になる。その他にも、タグチメソッドなどの考え方をういた形状のロバスト設計により生産バラツキに強い形状を見つけ出すことが簡単に行えるなど、工数をあまりかけることなく品質の向上が期待できる。

7. 課題と今後の予定

PT-ECSは技術的に確立し使用頻度が高い解析を対象にシステム化した。しかしエンジン燃焼室内のピストンの動き等を再現した移動境界モデルや噴霧・燃焼については未対応であり、解析専任者が対応している。こうした領域についても順次PT-ECSに取り込んでいくことにより、設計者が解析できる範囲を拡大していく予定である。

8. まとめ

設計者自らが簡単にCFD解析を行えるよう、STAR-CDをソルバとするPre/Postシステムを構築した。習得に1カ月以上必要であった難易度の高い解析であっても1時間以下の教育で手軽に使えるようになり、設計者が手軽に日常的に解析可能な環境が実現できた。

また、解析専任者であっても犯す設定ミスが大幅に減り、誰もが高品質の解析を行うことができるようになった。これにより、エンジン性能開発などにおいて開発期間短縮・品質向上が期待される。

参考文献

- (1) 小林明英, 沢田龍作, 足立昌司: CAD, CAEを使った新しいエンジン開発戦略, 日本機学会誌, Vol.104, P.14 (2001)
- (2) 大西晃二, 延本秀寿, 大住敏彦, 人見光夫: コンピュータシミュレーションによる吸排気性能予測技術の開発, マツダ技報, No. 6, P.84 (1988)
- (3) 山下俊朗, 織田辰郎, 柴中顕: パワートレイン性能解析システムの開発, 自動車技術, Vol.46, No11, P.61 (1992)

著者



横畑英明



本郷 均



植木義治



堀川浩司



三村光生



中谷修二



石原卓哉



前田茂樹