

エンジン冷却水流れ数値シミュレーションの自動化

Automated CFD Simulation of Engine Coolant Flow

大滝 尚 Takashi Otaki

●基盤技術研究室解析研究グループ

1 はじめに

水冷エンジンの冷却水通路形状は、シリンダヘッドとシリンダブロックの基本的なレイアウトに大きく影響する。その一方で、近年のエンジンは高出力と小型化を同時に求められるようになり、冷却系統を開発の早い段階から最適化する必要性が顕在化してきた。

流体数値シミュレーション（以下、CFDという）は、この最適化のための有効なツールのひとつとして従来から注目されてきた。しかしCFDは、最近のコンピュータ性能の飛躍的な向上により解析計算そのものは短縮されたものの、解析モデルの作成は依然として人手に頼らざるを得ず、全体の解析時間の短縮が困難なままでいた。そのため開発のタイムテーブルに合わせず、実用的な解析は行われなかった。

そこで、これまで時間がかかっていた解析モデルの作成と計算準備の作業を自動化し、設計者が自分でエンジン冷却水流れの数値解析を行うことができる手続きを開発した。これにより、従来は専任のエンジニアが数週間かかっていた解析を、設計者自身が約24時間で行えるようになり、質の高い冷却性能の検討が可能になった。

本報では、自動化されたエンジン冷却水流れ数値解析の手順と、解析格子生成プログラム「HIGHER」について解説し、解析事例を紹介する。

2 冷却水流れの数値シミュレーション

数値シミュレーションとは、計算機上に展開された数値モデルを使った数値実験であり、CFDは離散化近似法を用いた流体の数値シミュレーションの総称である。当社ではAVL List社（オーストリア）の「FIRE」を解析プログラムとして使っている。解析エンジニアは、プリプロセッサと呼ばれるソフトウェアを使い、CAD形状データなどから、流体が流れる空間を要素分割した離散化格子モデル

を作成する。この格子モデルを、冷却水出入口での圧力や流速などの境界条件とともに解析プログラムに与えて解析計算を行い、計算結果はポストプロセッサと呼ばれるソフトウェアにより可視化され、設計資料となる。

冷却損失の抑制、ノックング回避、熱歪み低減のための温度分布改善などのエンジンの熱的問題は、低燃費、高出力化、軽量化を実現するため、近年のエンジン開発にとってますます重要になってきた。ところが水冷エンジンの冷却水通路形状は、これまで燃焼室やポート、点火プラグ配置等を設計した後の余り空間として与えられており、冷却システムの要素として積極的な設計がなされていなかった。プロトタイプが出来てから問題が発見されたとしても、エンジンの基本構造の一部である冷却水通路を大幅に変更することは事実上不可能であるため、開発の初期段階での冷却性能の予測の必要性は高い。

CFDによる設計案の評価はその効果を期待されながらも、これまで実用的な解析はほとんど実施されていなかった。流体の解析計算は、その強い非線形性のため計算機にかかる負荷が大きく、これまでスーパーコンピュータが用いられていた。しかし近年では、コンピュータのCPU演算性能が向上し、ワークステーションやパソコンでも初期のスーパーコンピュータの計算速度をはるかに凌ぐようになり、メモリやディスクの低価格化も手伝って、解析モデルは大型化し複雑な計算までできるようになった。ところがそのために格子作成にかかる時間も増大し、結果的には全体の解析期間はあまり短縮されなかった。これが実用解析が進まなかった主原因である。

このような背景から、解析格子を自動作成するソフトウェア「HIGHER」を開発し、「FIRE」プリプロセッサのマクロ機能と組み合わせてエンジン冷却水流れのCFD解析を自動化し、解析期間の短縮を試みた。この手続きは、開発初期段階において冷却水の概略な流れを評価することを目的としたものであり、開発なかばでの問題対策などには、

その目的に合った解析方法を検討する必要がある。

3 自動格子生成プログラム「HIGHER」

「HIGHER」は、冷却水流れ解析に特化したソフトウェアで、CADで定義されたシリンダブロックとシリンダヘッドの面データ、およびガスケット穴形状を表すワイヤーフレームデータから解析格子を自動生成する。このソフトウェアの開発により、従来は専任エンジニアが数週間かかっていた格子作成の作業が、約半日以内でできるようになった。

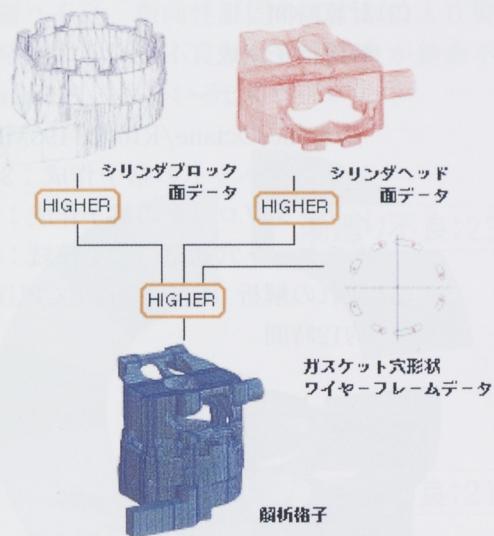


図1 「HIGHER」の処理の流れ

「HIGHER」の処理の流れを図1に示す。「HIGHER」は、まずシリンダブロックとシリンダヘッドの面データを別々に読み込み、指定された格子サイズで格子データを生成し、それぞれ別々の中間ファイルに書き出す。次に、ガスケット穴形状を表すワイヤーフレームデータと、先に作られた二つの中間ファイルを読み込み、シリンダブロックとシリンダヘッドの格子の間にガスケットの格子を挿入して連結し、IDEAS-Universal形式でファイルに書き出す。「FIRE」のプリプロセッサは、Universal形式のインターフェースを標準的にもつておらず、「HIGHER」が生成した格子データを直接読み込むことができる。

4 「HIGHER」の基本アルゴリズム

CFDの計算時間は、解析格子の数に影響される。格子サイズは、解析結果の精度に影響する数値誤差に直接関係しており、学術的な観点から見れば、解析格子の数は期待する解の精度から決められるべきである。しかし、商品開発のタイムテーブルは設計エンジニアにとっては絶対であり、CFDによる検討ができるか否かは、その計算時間にかかっている。特に開発の初期段階では、いかに早く多くのアイデアを評価でき、設計方針を決定するための資料となるかが重視される。したがってエンジニアリングの立場から見れば、設計エンジニアに与えられた時間も、解析格子数を決める上で重要な要因となる。

「HIGHER」の格子生成法は直交格子法である(図2)。「HIGHER」の格子の特徴は、格子表面の節点がCADで定義された面上に完全には一致していない点である。まず与えられた格子サイズで解析領域を含む直交格子を作り、中心が解析領域に入っていない格子要素を取り除く。格子表面にある節点は、いったん面上に投影される。しかし面の形状に対して与えられた格子サイズが粗いと、形が歪んだエラー要素ができてしまう。そこでエラー要素に対し、正常な要素になるまで要素の構成節点を少しずつ元の位置に引き戻す。元の要素は解析格子としては理想的な直方体であるから、最終的には解析可能な格子が必ず得られる。このアイデアは、格子による形状再現性は多少悪くなるものの、現実的な時間で解析計算を行える要素数に抑えた格子を得ることができる。与えられる格子サイズが細かいほど、格子表面はCADの面に近付いて行く。

CADの面データはパラメトリックにデータを保持しているため、構成点以外では補間された値になる。このため二つの面が境界をはさんで繋がっている部分では、面の間にわずかな隙間が生じるが、CADプログラムではそれが一定の値以下になるよう保証されている。すでにいくつかの自動格子生成プログラムが市販されているが、この隙間がエラーを起こして異常終了する原因になることが多い、事前に隙間がなくなるようにクリーンアップすることを要求するソフトウェアもある。このようなデータの不透過性は解析期間を短縮する上

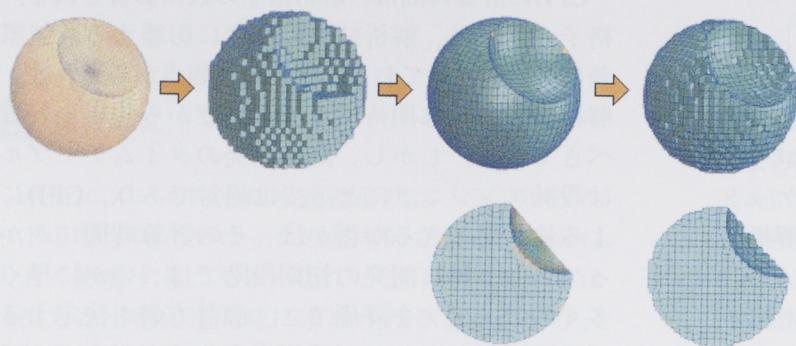


図2 「HIGHER」の格子生成

で大きな障害であり、本来は自動格子生成プログラムが適切に処理できるようになっているべきである。「HIGHER」は独自のアルゴリズムにより、この問題を回避している。

5 マクロによるプリプロセシングの自動化

当社では、これまでCFD解析は専任エンジニアにより行われてきた。これは流体現象が非線形問題であるため、ひとたび数値計算上の問題を起こすと設計エンジニアでは対応ができないからである。ところが、このような専任制はエンジニアの数が限られており、解析を実施する必要が生じた時にすぐ対応できること多かった。

しかし問題をエンジン冷却水流れに限れば、計算を安定に行うパラメータの選び方を決めることができ、設計エンジニアが自ら解析を行うことが可能である。「FIRE」のプリプロセッサには、マクロと呼ばれる自動処理機能があり、処理手順をプログラム化することができる。このマクロにより、「HIGHER」で作成された解析格子の読み込み、境界条件などの解析計算に必要なファイルの準備がほとんど自動化され、設計エンジニアはプリプロセッサの使用法を習得することなく解析計算が実行できるようになった。

6 計算例

図3に計算例を示す。図は流速をベクトル表示したものである。解析計算は、時間進行を伴う非定常解析である。いくつかの点で流速や圧力をモニターし、定常状態になったことを確認する。熱伝達に影響する各部の流速をチェックしたり、冷却水出入口間の圧力損失や各ガスケット穴を通る流量割合を評価することができる。

(1) 解析要素数

全体で約20万要素

(2) 計算時間

解析格子生成

(ワークステーション、Silicon Graphics Octane/R10000-195MHz)

シリンドヘッドの格子作成：30分

シリンドブロックの格子作成：2分

ガスケット穴通路による接続：2分

(3) 流れの解析 (Cray J90 / 8 CPU)

約12時間



図3 計算例（流速のベクトル表示）

7 おわりに

- (1) CADの面データから解析格子を自動生成するプログラム「HIGHER」を開発した。
- (2) 「FIRE」プリプロセッサのマクロ機能を活用し、プリプロセッシングを自動化した。設計エンジニアは、自ら冷却水流れの数値シミュレーションを行えるようになった。