

境界要素法によるエンジン部品応力解析

杉田 順一* 伊藤 保*

STRESS ANALYSIS OF ENGINE COMPONENTS USING THE BOUNDARY ELEMENT METHOD

Junichi Sugita and Tamotsu Itoh

Stress analysis through the Finite Element Method (FEM) is widely utilized to design and evaluate engine parts. However, it requires much time to produce models with complicated three-dimensional profiles. There are also many cases in which it is difficult to use the FEM system during the development stage. We developed a new stress analysis system combining the Boundary Element Method (BEM) with a pre/post-processor. BEM is faster at producing models and is more flexible in allowing for design modifications.

We applied the system to the stress analysis of pistons and crankshafts.

Compared with the result from an actual measurement of components, the stress analysis using the system proved a good result with its accuracy.

Key Words : Boundary Element Method, Engine, Stress Analysis, Piston, Crankshaft, Super computer, CAD system, Computational Mechanics, BEASY.

1. まえがき

エンジンの高回転・高出力化に伴い、機能部品への高い耐久信頼性と軽量化の要求がますます高まっている。同時に、多様化するユーザー・ニーズに柔軟に対応するため、多種多様のエンジンを、より短時間で開発しなければならないようになってきている。これらの要求を満たすためには、コンピューターを活用した構造解析による、性能、品質と開発効率の向上が必須となっている。

しかしながら、エンジン開発段階で、構造解析を使いこなし、大きな効果をあげている事例は、あまり多いとは言えないのが実情の様である。これは、現在構造解析に最も多く用いられているFEMが、ピストン、クランクシャフト等の複雑な三次元形状を持つエンジン部品の解析において、モデルの作成、形状変更に多大な工数を要し、あるいは特殊な技能が必要となる等の問題を抱えているためである。このため、多くのFEMシステムでは、モデル作成工数削減のために、形

状パラメータ入力による専用メッシュ・ジェネレータが用いられ成果をあげている^{(1) (2)}。しかしながらこの方法は、対象とするモデルが限定されるため汎用性に乏しく、設計形状を十分にモデル化できない場合が少なくない。加えて、FEMモデルのデータは膨大であり、モデルの形状変更は相当困難で煩雑な作業となるという問題点もある。また、CADのソリッド・モデラーを利用した4面体要素メッシュの自動分割⁽³⁾も用いられているが、任意の複雑な形状に対し、メッシュの自動分割性能が十分ではない。

我々はこれらの問題点を解決し、設計者が道具として使いこなせる構造解析システムの開発を以下の項目を目標として行った。

- ・任意形状の部品が解析可能であること。
- ・解析用モデル作成工数が大幅に削減できること。
- ・モデル作成から結果の評価まで、一貫して使いやすく信頼性のあること。

そこで、本論文ではこれらの目標に対して、BEMをエンジン部品の応力解析に適用したので報告する。

* (株) 本田技術研究所 和光研究所 ©351-01 和光市中央1-4-1
Tel. 0484-61-2511

また、CADシステムとリンクしたプリ/ポスト・プロセッサを開発し、ユーザー・インターフェースに優れたシステムを開発した。これにより、設計形状検討からモデル作成、解析結果まで一貫して使用できる開発設計向けのシステムとすることができた。

2. 解析システム

BEM解析システムはFig. 1に示す様に、CADシステム、プリ/ポスト・プロセッサ、BEMソフトウェアにより構成されている。各々の特徴と機能を以下に述べる。

2.1 BEMの優位性

近年エンジン部品等の構造解析にBEMが適用されるケースが増えており^{(4) (5)}、構造解析手法の主流のひとつとなりつつある。これは、BEMがFEMと比較しTable 1に示す様に、モデルデータ作成上、いくつかの優れた特徴を持つ為である。

第一に、BEMモデルは、モデル内部のエレメントデータを必要とせず、表面データのみで解析可能である。このため、モデルの作成・形状変更等に要する工数が削減できる。一例として必要十分な計算精度を得るために必要なモデルの作成工数の比較をFig. 2に示す。

Table 1 Comparison between BEM and FEM

	BEM	FEM
Element	Boundary elements	Domain elements
Input data	Few, simple	Many, complicated
Matrix	Asymmetrical full matrix	Symmetrical band matrix
Calculation	Long time	Short time
Analysis area	Elasticity Infinite region	Elasto-plasticity Dynamic analysis
Application	Few	Many
Theory	Difficult	Easy

す。ピストン、クランクシャフト等の様な複雑な曲面で構成された部品では、BEMを使用することにより短時間でモデルが作成でき、この効果が顕著であることが分かる。

第二に、FEM解析ではモデル作成作業の煩雑さが障害となって解析を断念していた部分も、BEMでは詳細なモデルが容易に作成でき、解析が可能である。Fig. 3にBEMシステムを用いて作成したクランクシャフトのモデルを示す。応力集中部であるフィレットRやオイル穴部のメッシュが十分に細分化でき、より正確に形状を表していることが分かる。これらの長所に加え、BEMは、オートメッシュジェネレータの開発がFEMに比べ技術的に容易である。また、より応答性が向上するといった長所がある。

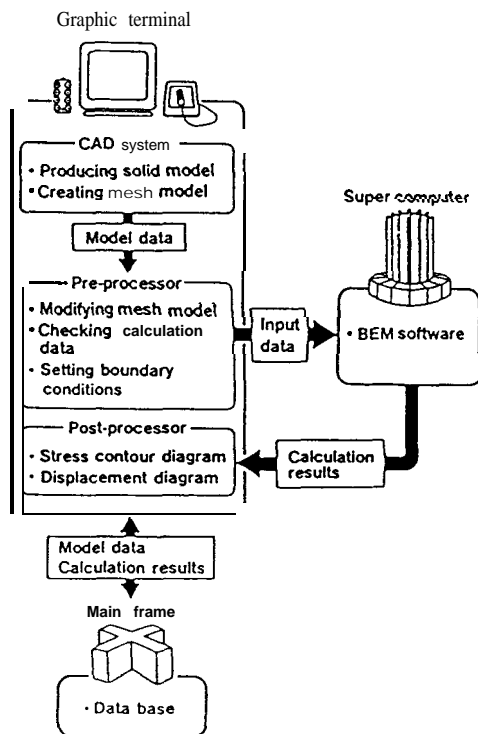


Fig1 System structure

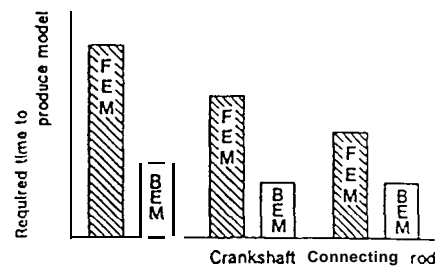


Fig2 Comparison of required time to produce models

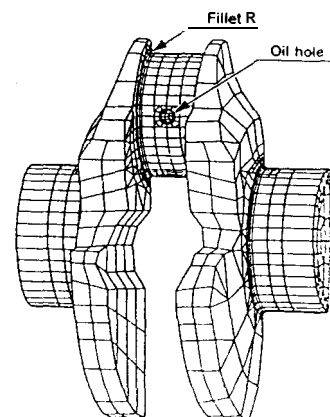


Fig3 BEM crankshaft model

2. 2 CADシステム

一般に構造解析における作業工程の多くは、解析対象部品のモデル作成作業に費やされており、CADシステムの性能は解析工数を大きく左右する。さらに、エンジン設計者に設計の道具として広く使用されることを考慮すると、新しく開発したシステムは、新たにトレーニングする必要のない、使い慣れた既存CADシステムの延長であることが望まれる。

そこでモデルの三次元形状表現や、メッシュ分割作業の基本となるシステムには、設計者が三次元設計に通常使用している汎用CADシステムCATIA⁽⁶⁾を用いることとした。これにより三次元形状表現には、CATIAソリッドモデラ機能を利用することができる。また、メッシュ分割作業は、自社開発しCATIAに組み込んだオートメッシュ・ジェネレータによって行うことができる様にした。これらにより全ての作業は、CATIAの対話操作機能のままに、作業状況を視覚的に確認しながら進めることができる。さらに、CAD/CAEデータの共有化も可能となり、より効率良く解析を進める事ができる様になった。

Fig. 4にモデル作成過程の一例を示す。設計者はまず、デザインした形状をグラフィック・ターミナルに表示し、三次元的に検討しながらソリッドモデルを作成する。この時同時に、CATIAの解析機能を利用して重量や重心位置等の検討がなされる。次に、このモデルの表面に輪郭をますワイヤフレームを作成し、これをもとにオートメッシュ・ジェネレータで要素を自動生成してメッシュモデルを作成する。

2. 3 プリ/ポスト・プロセッサ

プリ/ポスト・プロセッサはTable 2に示す様に、CADシステムにより作成されたメッシュモデルのチェック・修正機能、境界条件の設定機能、計算結果の

Table 2 Functions of pre/post-processor

1. Pre-processor functions

Checking and modifying the model

- Aspect ratio
- Grading
- Normal vector
- Scaling

Setting the calculation conditions

- Loads
- Boundary conditions
- Material characteristics
- Division of the regions

2. Post-processor functions

- Display of surface stress
- Stress vector diagram
- Display of temperature distribution
- Display of displacement

表示機能等を充分に取り込んだ専用システムとして開発した。さらに、本プリ/ポスト・プロセッサには、特徴的機能としてBEMソフトウェアを用いる上で必要な機能や開発設計時に作業上必要となる機能を取り入れた。

まず、BEMソフトウェアを用いる上での機能としては、設計者がモデルの内部領域を定義するために外向きに設定した各要素の法線ベクトルの方向を、自動的にチェック・修正する機能を設定した。これは、BEMの計算用データがモデル表面の要素のみによって構成されていることから必要な機能である。また、解析精度に大きな影響を及ぼす分割要素のアスペクト比、及び隣接要素間の大きさの比（グレーディング）についても設定した限界値に対して自動的にチェック・修正を行う機能を持たせた。

また、開発設計においては、簡潔な操作を要求され

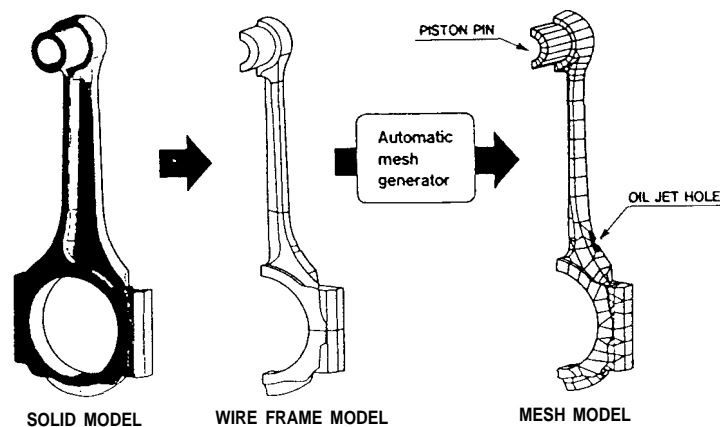


Fig.4 Production process for BEM model

るため、プリ/ポスト・プロセッサの操作を極力CADシステムと統一されたものとする必要があった。そこで、モデルデータを構成する節点・要素・境界条件等を全て関連づけること、メニューの日本語表示、データベース等により、操作はCADシステムと全く同様とした。さらに、歪ゲージにより得られた実測応力値との比較のため、モデル表面での主応力値を表示できる機能を持たせた。

2. 4 解析ソフトウェア

システムの構成において最も重要な部分を占める解析ソフトにはC. M. BEASY社の開発した境界要素法ソフトウェアBEASY⁽⁷⁾を使用した。このソフトはTable 3に示す様に多くの解析機能を持ち、静的な応力解析を行う上では極めて有効であることが知られている。しかしながら、これを本システムで実用化するためにはいくつかの問題点があった。BEMソフトウェアは、三次元モデルの解析に非常に多くの計算時間とメモリ量を必要とする。このため、高速演算処理と大容量メモリを確保できるコンピューターを用いる必要があった。そこで、スーパーコンピューターを使用することとしたが、それでも導入時は小規模のモデルしか取り扱うことができず、計算時間も長いなど、実用できるレベルではなかった。

そこで、これらの問題を解決するため、C. M. BEASY社との共同開発により以下に示す様な改善を行った⁽⁸⁾。

- ・新積分アスゴリズムの導入、スカラー及びベクター処理の最適化等によるCPU時間の短縮。
- ・メモリ使用法の最適化、モデルの部分領域分割等により実行メモリの削減。
- ・未使用メモリのバッファ・メモリとしての有効利用、CRAYライブラリの活用等によるI/Oの削減。
- ・アスペクト比、グレーディング比の向上。

これらの改善により、BEMソフトウェアを実際のエンジン部品の解析に実用可能なレベルとすることができた。

Table 4にクランク・モデルについて、BEASYバージョン・アップ前後のパフォーマンスを示す。最

Table 3 Applicable areas of BEASY

1. Analysis type

- Elastic stress analysis
- Static heat conduction analysis
- Thermal stress analysis
- Nonlinear contact analysis
- Fracture mechanics analysis

2 Calculation conditions

Stress analysis

- Pressure load of arbitrary distribution
- Acceleration and rotational force
- Prescribed displacement
- Sliding interface, spring interface
- Gap element

Heat conduction analysis

- Boundary heat conduction
- Temperature condition

適化により、CPUタイム、メモリ必要量で平均約40%の大幅な効率向上が図れた。

3. クランクシャフトの応力解析

本システムを直列エンジン及びV型エンジンのクランクシャフトの応力解析に適用した。クランクシャフトはピン、ジャーナル、ウェブ等の形状によりフィレットR部の応力集中が変化する。実際にクランクシャフトを製作し、実測値と計算値を比較した。

3. 1 曲げ応力解析

Fig. 5に直列エンジン、Fig. 6にV型エンジンの解析モデルを示す。直列エンジンのクランクシャフトは対称性を利用して1/4モデルとした。またV型エンジンのクランクシャフトはフルモデルとし、応力に影響の少ないバランスウェイト部を解析モデルから外し、また3つの部分領域にモデルを分割して計算を行った。境界条件はピン部に爆発相当の荷重を負荷し、ジャーナル部を拘束した。

Table 4 Performance of BEASY for crank throw on a CRAY Y-MP

	Non optimized Version	Optimized Version	Reduction (Percent)
Number of elements	1202	1202	
Degrees of freedom	5373	5373	
Memory required (Mword)	1.79	1.17	35
Total CPU time	16min 12sec	10min 15sec	37

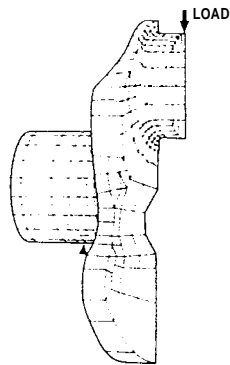


Fig 5 BEM model of a I-4 crankshaft

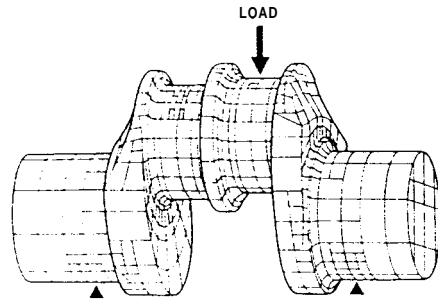


Fig 6 BEM model of a V-6 crankshaft

境界条件を入力する部分のメッシュ分割は、テストに用いた治具と同じ接触状態としてテストと計算の整合性を容易とした。

Fig. 7 にピン、ジャーナル・フィレット部について実測値と計算値の応力比較を示す。図から分かるように直列及びV型のいずれのクランクシャフトについても、高い精度であることが確認できた。

3. 2 オイル穴の応力解析

クランクシャフトのオイル穴廻りは、クラックの発生しやすい応力集中部であり、応力解析が必要な部分である。BEMを用いればモデル作成が比較的容易であり、十分に実用レベルで計算できる。

Fig. 8 にオイル穴付きのクランクシャフトモデルと境界条件を示す。図に示すように、オイル穴はクランクシャフト内を複雑に貫通しており、これをFEMでメッシュ作成することは困難となっていた。

計算条件は一方の端部を完全に拘束し、他端に振りトルクを与えるものとした。Fig. 9 に応力について、オイル穴内部での実測値と計算値の比較を示す。オイ

ル穴内部の応力は 0.2mmの歪ゲージを用いて計測し、表面歪のピークをはぼ測定でき、計算値とより一致が得られた。

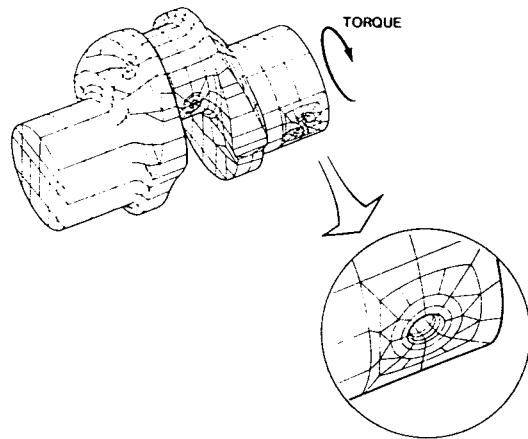


Fig 8 BEM model of a crankshaft with hole

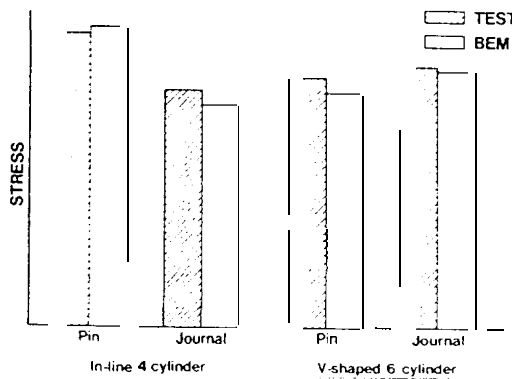


Fig 7 Stress on surface of fillets

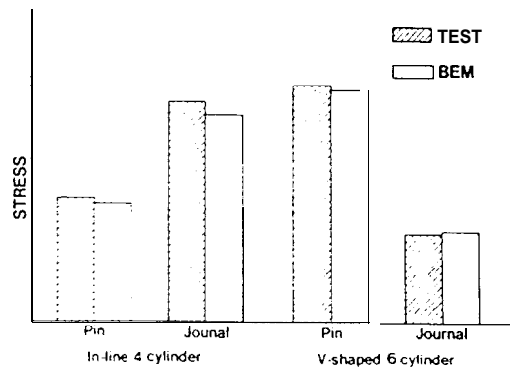


Fig 9 Stress on surface of a crankshaft oil-hole

4. ピストンの応力解析

従来FEMでは複雑な3次元形状をもつピストンの応力解析は、モデル作成に多くの工数を要し、詳細な形状を検討することが困難だった⁽²⁾。

4. 1 応力解析モデル。

Fig. 10にピストン・ピンを含むピストンのメッシュ・モデルを示す⁽⁹⁾。メッシュモデルは対称性を利用し、1/4モデルとして作成し、計算時間を減らし、メッシュ作成を容易にした。メッシュ・モデルを正確に作成する為に、CADのソリッド・モデラーによりピストン天井、リップ、スカート部等の形状を正確に表し、その表面を2次要素を用いてメッシュ分割した。メッシュ・モデルを5つの部分領域に分割して、計算時間、メモリー等の削減を行った。また応力集中部は、Rがけ、面取り等詳細形状まで表現し、実測値と比較する部分は歪ゲージと同等のメッシュとした。

計算はピストンの天井部に爆発力相当の荷重が作用した場合について行った。

クラックが発生するピストン・ボス周辺の応力集中を解析する場合、ピストン・ピンとピストン・ボス間を伝わる荷重と接触状態を正確に境界条件として与える必要がある。そこで、実測によりこれらの関係を求めた。

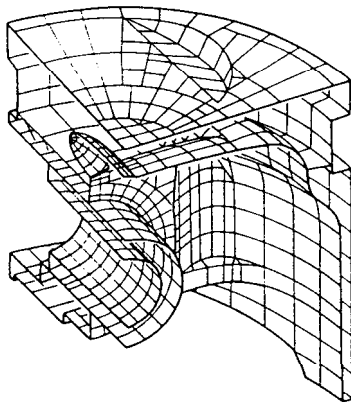


Fig.10 Analysis model
(1/4 model including piston pin)

4. 2 解析結果

本システムの形状表現の柔軟さ、モデル形状変更の容易さを生かし、Fig. 11に示す3種類のボス形状を取り上げ、実際にこの形状のピストンを製作し、単体テスト及びシミュレーションを行った。

Fig. 12にピストン・ボス廻りの実測値と計算値の相対比較を示す。ピストンAが最も応力が大きく、ピス

トンCが最も応力が小さい。このことは、ピストンCのピストン・ボス形状が最も効果的であることを示している。

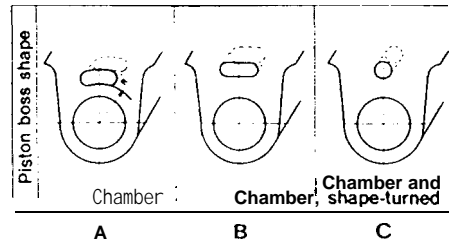


Fig.11 Different shapes of piston boss

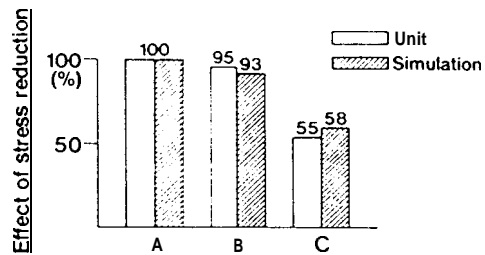


Fig.12 Comparison of stress reduction effects
(relative precision)

5. まとめ

- (1) 境界要素法 (BEM) を用いた応力解析システムを開発した。このシステムにより任意の三次元形状のエンジン部品を短時間でモデル化でき、より詳細な解析が可能となった。
- (2) 3次元CADシステムと連動したプリ/ポスト・プロセッサの開発により、システム全体の操作性を大幅に向上させることができた。これにより、構造解析を開発設計での有効なツールとすることができた。
- (3) 本システムをクランクシャフトの応力解析に適用し、計算値と実測値の検証を行ったところ、フィレット部やオイル穴廻りの応力集中に対し、実用十分な解析精度を持っていることが確認できた。
- (4) FEMでは形状が複雑で困難だったピストンの応力解析に適用し、計算値と実測値で良い一致が得られた。また実際の設計で必要となる詳細な形状変更に対して、実用上十分な精度で解析できた。

文 献

- (1) 上柿賢治, 他 : 機能部品専用 F E M データジェネレータの開発, トヨタ技術, Vol. 37, No. 1, 昭和62年6月.
- (2) 細川哲寛, 他 : ピストン C A E の開発, 自技会学術講演会前刷集, 872072.
- (3) 宇津明範, 他 : 鋳鍛造部品の F E M 格子データ静動生成法, 自技会学術講演会前刷集, 902266.
- (4) 堀田直文, 他 : 境界要素法によるエンジン・シャシー部品静弾性解析の実用化, B E M ・テクノロジー・コンファレンス論文集1991年6月.
- (5) 中村己善男, 他 : 境界要素法による鋳鍛造部品の静弾性解析 (第2報) トヨタ技術, Vol. 41, No. 2, DEC. 1991.
- (6) DASSAULT SYSTEMS. : CATI A 3D design Interactive Functions Reference Manual, Version 3, Mar. 1988.
- (7) Computational Mechanics BEASY LTD. : BEASY USER GUIDE.
- (8) Elzein, A. : Optimization of Boundary Elements on Supercomputers, Applications of Supercomputers in Engineering, Computational Mechanics Publications, 1991.
- (9) H. Okamoto, 他 : New Computational and Experimental Stress Analysis Method for the Design Decision on Optimum Piston Configuration of Production Engine, SAE Paper 920065.