

境界要素法によるエンジン部品設計システム

Engine Component Design System using Boundary Element Method

杉 田 順 一* 伊 藤 保* 阿 部 智 也*
Junichi Sugita Tamotsu Ito Tomoya Abe

要 旨

エンジン部品の構造解析には、有限要素法 (FEM) を用いた手法が現在広く利用され、開発段階での適用も増えている。しかしながら、この手法には複雑な三次元形状部品の解析で、非常に多くのモデル作成工数を要するという問題点がある。このため、設計現場に於いて十分にその力を発揮できない場合が多い。

そこで、モデル作成に要する工数が少なく、モデルの形状変更も容易な境界要素法 (BEM) と独自のプリ／ポスト・プロセッサを組合せ、新しいエンジン部品設計システムを開発した。

新システムでは、従来 BEM の問題点とされてきた計算に要する膨大なメモリ量と計算時間を、プログラム改善により削減した。さらにプリ／ポスト・プロセッサは、CAD システムと連動させた対話型操作を取入れ、操作性の向上をはかった。

システムをコネクティングロッドの解析に適用し、実測値との比較検証を行い、システムが十分な解析精度を持つことが確認できた。更に、軽量化コネクティングロッドの開発に応用し、システムの有効性を実証した。

ABSTRACT

Analyses through the Finite Element Method (FEM) are widely utilized for the design and evaluation of engine parts. However, it requires a long time to produce models with complicated three-dimensional profiles. Due to this disadvantage, it is difficult to use the FEM system in the development stages.

We developed a new design system combining the Boundary Element Method (BEM) with a pre/post-processor. BEM takes a shorter period of time to produce models and is more flexible in making design modifications of the developed model. We modified the BEM analysis software to reduce its memory and time needed for calculations for practical use. We also adopted an interactive pre/post-processor, which works in conjunction with the Computer Aided Design (CAD) system, and upgraded the user interface.

The system was applied to analyzing connecting rods during the design stage, and, compared with actual component measurements, proved accurate in its analysis. It was further employed successfully in the development of a new lightweight connecting rod.

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、コンピュータを活用した構造解析による、性能、品質と開

* 和光研究所

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状の様である。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、コネクティングロッド等の複雑な三次元形状を持つエンジン部品の解析に於いて、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為に、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。

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事。
- ・ 解析用モデル作成工数が大幅に削減できる事。
- ・ モデル作成から結果の評価まで、一貫して使い易く信頼性のあること

我々はこれらの目標に対して、近年エンジン部品の解析に於ける優位性が報告され始めたBEM⁽³⁾⁽⁴⁾を用いることを試みた。さらに、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。これらにより、設計形状検討からモデル作成、解析結果の評価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解析システムは図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⁽⁵⁾⁽⁶⁾、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と比較し表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。

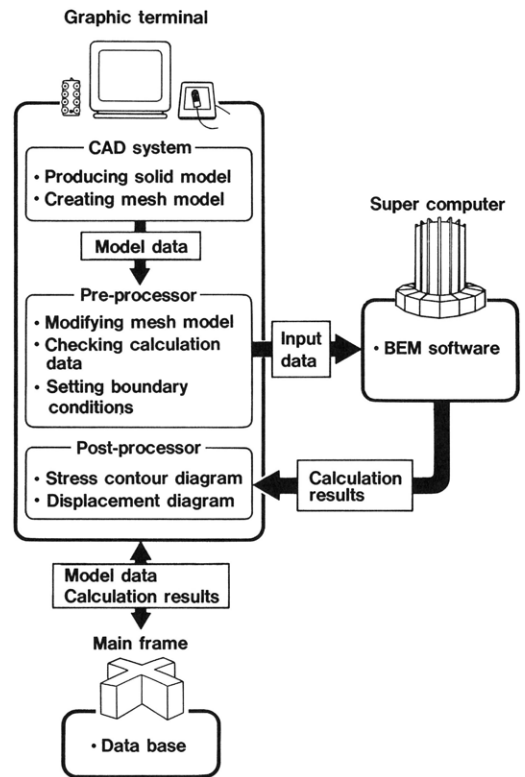


図1 システム構成

表1 BEMとFEMの比較

	BEM	FEM
要素	表面要素のみ	内部要素必要
入力データ	少ない、単純	多い、複雑
マトリックス	非対称 フルマトリクス	対 称 バンドマトリクス
計算時間	長 い	短 い
適した分野	弾性解析 無限領域	弾塑性解析 動解析
市販ソフト	少ない	多 い
理論	複 雑	単 純

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図2に示す。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事がわかる。

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。図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

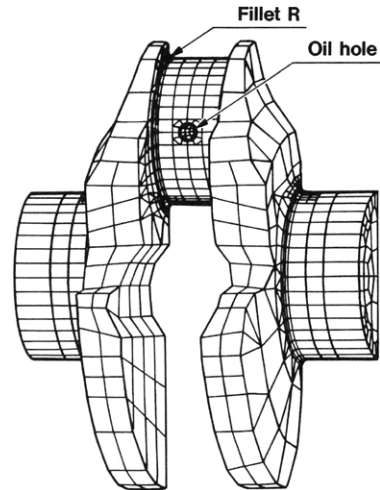


図3 BEM クランクシャフトモデル

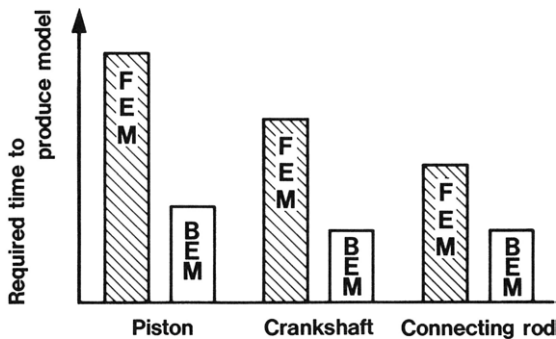


図2 モデル作成工数の比較

が十分に細分化でき、より正確に形状を表せていることがわかる。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。

2.2. CAD システム

一般に構造解析に於ける作業工数の多くは、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

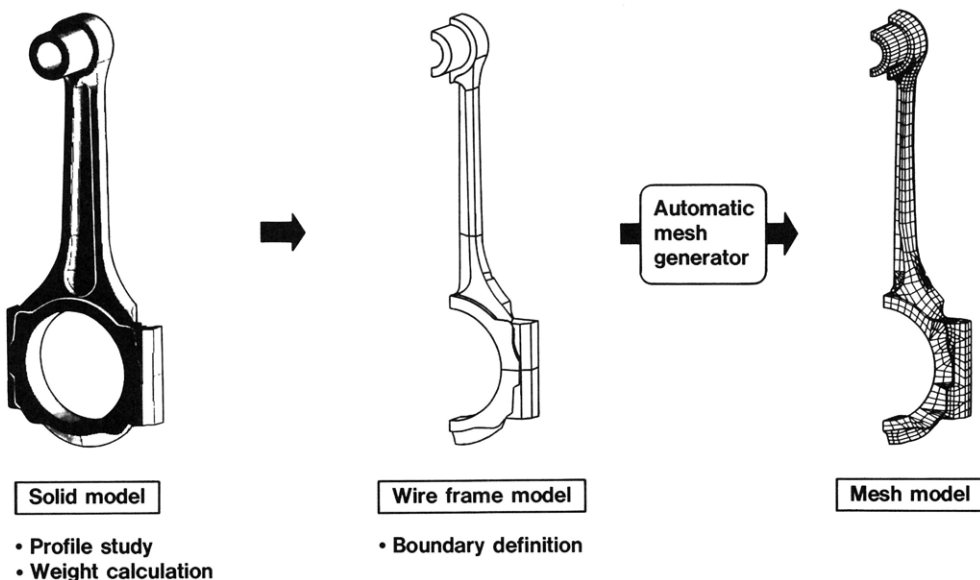


図4 BEM モデルの作成過程

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⁽⁷⁾を用いることとした。これにより三次元形状表現には、CATIA の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、より効率良く解析が進める事ができるようになった。

図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表すワイヤーフレームを作成し、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・プロセッサは表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

表2 プリ／ポスト・プロセッサの機能

1. プリ・プロセッサ機能

モデルのチェック・修正

- ・アスペクト比
- ・グレーディング
- ・法線ベクトル
- ・スケーリング

計算条件の設定

- ・荷 重
- ・境界条件
- ・材料物性値
- ・領域分割

2. ポスト・プロセッサ機能

- ・表面応力表示
- ・応力ベクトル図表示
- ・温度分布表示
- ・変位量表示

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、開発設計に於いては、簡潔な操作を要求されるため、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

システムの構成に於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⁽⁸⁾を使用した。このソフトは表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

表3 BEASY の解析機能

1. 解析の種類

- 弾性解析
- 熱解析
- 熱応力解析

2. 計算条件

応力解析

- 等分布荷重
- 加速度及び回転力
- 変位量
- バネ要素、滑り要素

熱解析

- 境界熱流動
- 温度分布

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を用いる必要があった。そこで、スーパーコンピュータ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。

- プログラムの I/O の改善とコンピュータのバッファ・メモリの利用による実行時間の短縮
- メモリ使用法の最適化とモデルの部分領域分割によるメモリ数削減

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。

3. システム適用例

本システムをコネクティングロッド (以下コンロッドと略す) の解析に適用し、実用性の検討を試みた。通常コンロッドの開発は、まず複数案の机上検討の後、コンロッド単体で引張り・圧縮テストを行って強度・剛性を評価する。その後、単体でのテストを満足したものに対して実機耐久テストを行う、というプロセスをとっている。そこで、

- ① 単体テストを模擬した静的解析
- ② 慣性力を考慮し実機テストを模擬した疑似動的解析

を行い、実用性を評価した。

また、システムの応用例として、

- ③ 軽量コンロッドの検討

を行った。

3.1. 静的解析

図5 に、コンロッドのソリッドモデルとメッシュモデルをそれぞれ示す。ソリッドモデルは、実物の形状を正確に表しており、重量誤差も僅かであった。メッシュモデルはソリッドモデルをベースに対称性を利用し 1/4 モデルとして作成し、オイルジェット穴等の詳細な部分も正確に表した。またモデルは、ロッド部、キャップ部、コンロッドボルトを一体とし、ピストンピンは小端部への圧入を考慮するため、別領域として定義した。

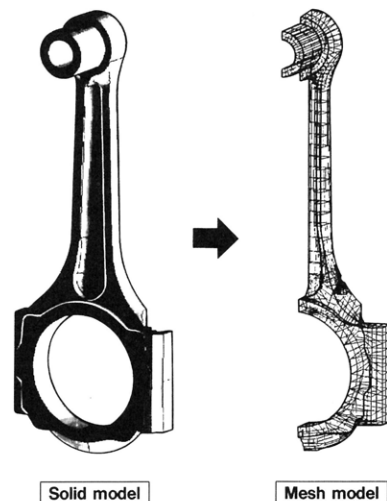


図5 コネクティングロッド解析モデル

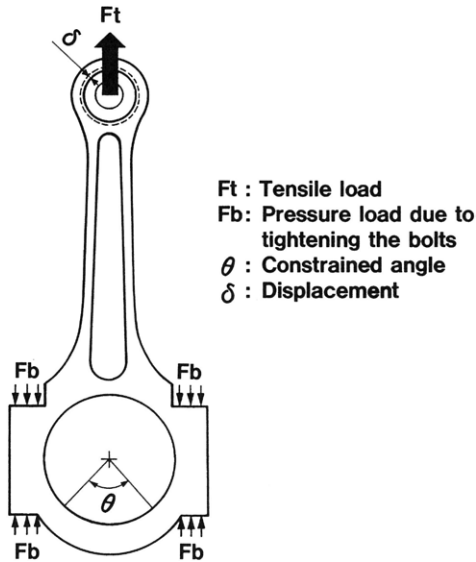


図6 静解析での境界条件

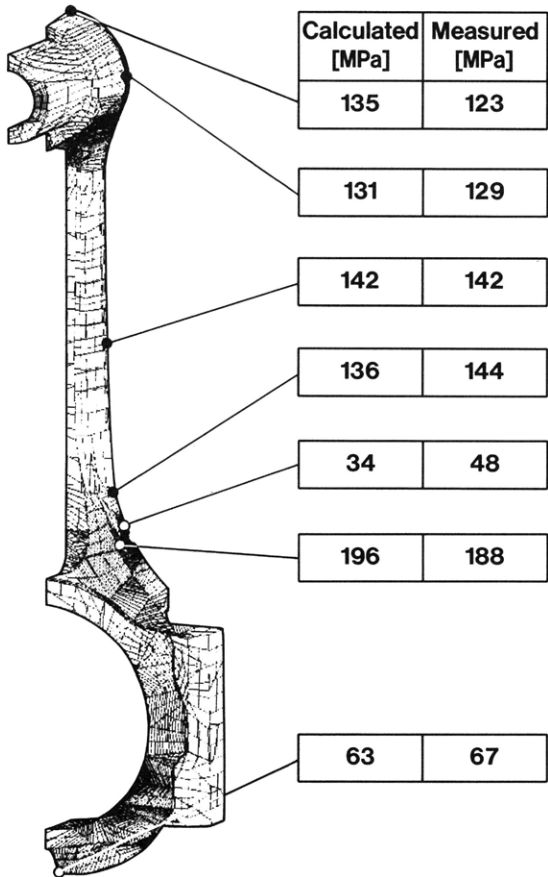
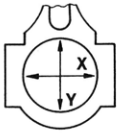


図7 静解析での最大主応力分布図及び計算応力値と実測値の比較

表4 大端軸受部変形量



	Displacement [μm]	
	X	Y
Calculated value	40	52
Measured value	41	56

図6 に、静的な引張り荷重を加えた場合のコンロッド解析の境界条件を示す。

- ・ キャップ部分のクランクピンと接触する範囲 (θ) を拘束してピストン引張り力 (F_t) を負荷する。
- ・ ボルトによる締め付け軸力 (F_b) を、ボルト、ナット座面に均一荷重として負荷する。
- ・ 小端部の圧力応力を表現するため、ピストンピン圧入時相当の強制変位 (δ) を与える。

図7 に計算により得られた最大主応力の分布図と、各部の計算応力値と実測値の比較を示す。主応力の分布図からは、小端部付け根やオイルジェット穴廻りに応力が集中していることがわかる。また、計算値と実測値はロッド部、大端部に加え、オイルジェット穴廻りの応力集中も良い一致を示していることがわかる。表4 に、この時の大端軸受部の変形量を示す。大端軸受部の変形量は、クランクピンの潤滑に大きな影響を持つことから開発に於ける重要な要素となるが、この値についても良い一致を示している。

これらのことから、静的状態でのコンロッドの強度・剛性が本システムにより予測できることがわかった。

3.2. 疑似動的解析

コンロッド自身の運動により生ずる分布慣性力を考慮することにより、より実際の運転状態に近い、疑似動的な BEM 解析を行った。

図8 に計算の境界条件を示す。

- ・ 引張り力として、各回転数におけるピストン、ピストンリングによる慣性荷重を、圧縮力と

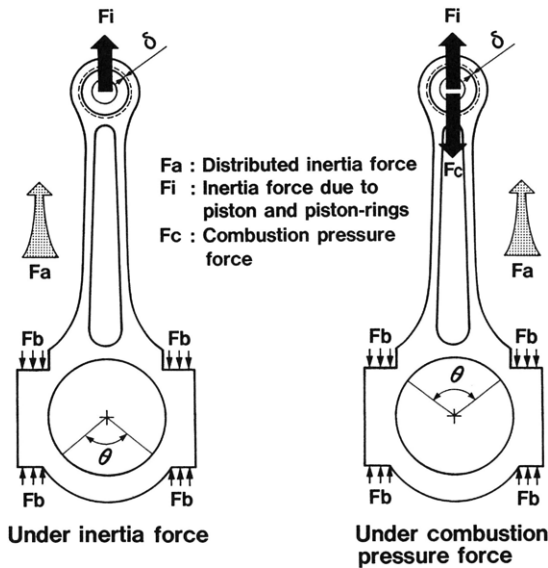


図8 擬似動分解での境界条件

して、爆発荷重を、それぞれピストンに負荷する。

- ・コンロッド自体に分布慣性力を与える。
- ・荷重条件に応じてロッド側（大端部上側）あるいはキャップ側（大端部下側）を拘束する。

これらの境界条件を用いて計算を行い、最大応力振幅 (σ_a)、及び平均応力 (σ_m) を求める。また、計算結果との比較検証のため、実際のコンロッドの応力測定を、抵抗線歪みゲージを使用して行っ

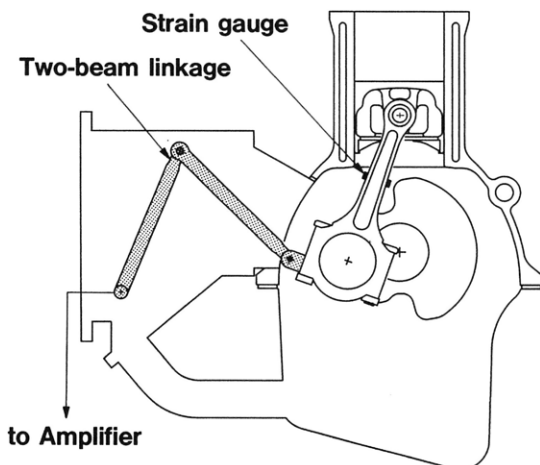


図9 リンク装置

表5 供試エンジン主要諸元

シリンダ配置	直列 4 気筒
内 径	81 mm
行 程	95 mm
総排気量	1958 cm ³
最高回転数	6500 rpm
コネクティングロッド重量	520 gram
コネクティングロッド 中 心 間 距 離	141.7 mm

た。運転中のコンロッドからの信号の取出しには、図9に示すようなリンク装置を用いた。供試エンジンの主要諸元を表5に示す。

図10に、設計限度線図上で計算応力値と実測値を比較した結果を示す。なお、設計限度線は材料の疲労限度と実機耐久テストの結果にもとづいて設定した安全率から求めている。図から、応力が大きくほぼ設計限度いっぱいの値となっている大端肩部を除き、他の部分は設計限度に対し余裕があることがわかる。また、実測値と計算値は良い一致を示している。

このことから、擬似動的解析は、実機におけるコンロッドの耐久性評価に対し有効であることがわかった。

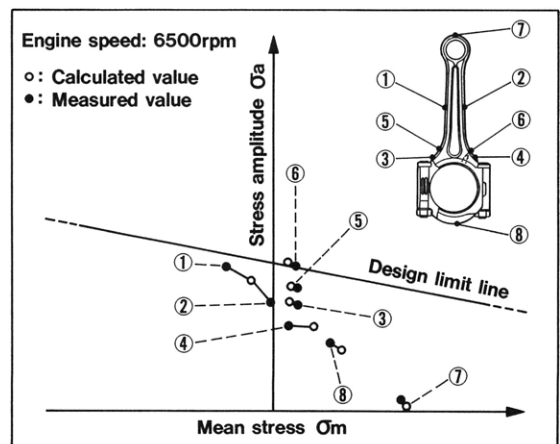


図10 擬似動解析での計算応力値と実測値の比較

3.3. 軽量コンロッド

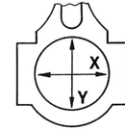
本システムの応用例として、コンロッドの軽量化への応用を試みた。軽量化検討の過程では、本システムの特徴である形状表現の柔軟さ、モデル形状変更の容易さを生かし、多数の形状の検討を行った。

図11に大端部形状検討の特徴的な例を示す。ケース1は、軽量化効果は大きいですが、荷重を受けた場合のベアリング保持面の変形状態が悪く、潤滑悪化が推定される。このため、ケース1に比べ軽量化効果は小さいが変形状態の良好なケース2を選択すべきであることがわかる。図12にケース2



図12 軽量コネクティングロッド

表6 大端軸受部変形量計算値



	Displacement [μm]	
	X	Y
Lightweight connecting rod	43	53
Original connecting rod	40	52

をもとに実際に設計、製作した軽量コンロッドを示す。薄肉I型断面にロッド部、2本リブ断面の大端部等により可能な限り各部の軽量化を行い、最終的に約20%の軽量化を達成することができた。

表6に引っ張り荷重作用時の大端円環部変形量の計算結果を示す。軽量化を行っても変形量はオリジナルのコンロッドとほぼ同等となっており、形状による剛性補換がなされているといえる。

図13に、実機での耐久性の評価として、計算応力値を設計限度線図上で検討した結果を示す。形状の見直しにより、各ポイントでの発生応力を設計限度以下とすることができた。

このコンロッドを実機に組み込み、耐久テストを行ったが問題は発生せず、計算による検討の妥当性を裏づける結果となった。

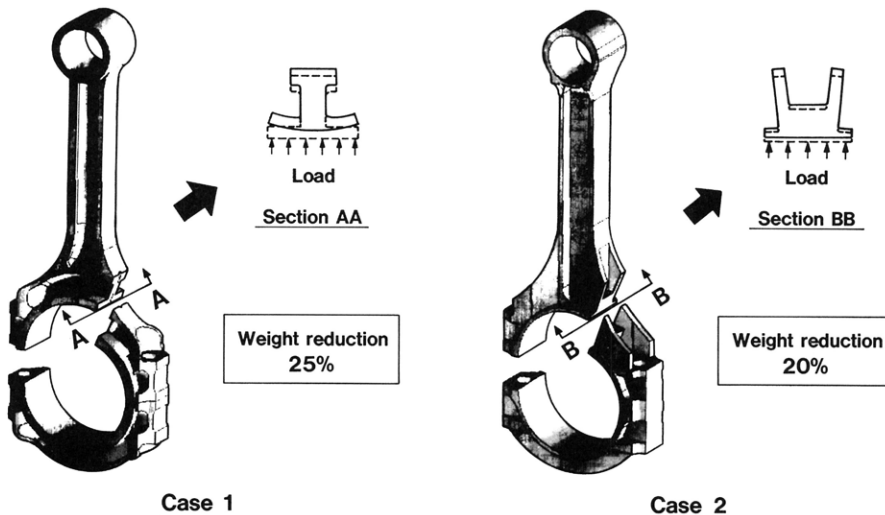


図11 軽量コネクティングロッド形状検討例

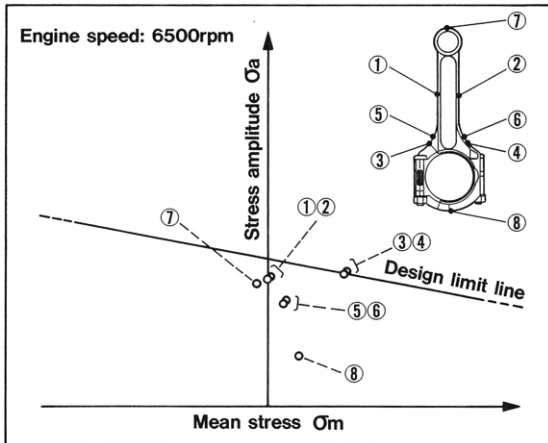


図 13 軽量コネクティングロッド計算応力値

以上の解析の結果から、本システムは軽量化のための形状検討等に対しても有効であり、より柔軟な設計検討を可能とするものであることが確認できた。

4. ま と め

- (1) 境界要素法 (BEM) を用いた、構造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が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) 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) 本システムをコンロッドの解析に適用し、計算値と実測値の検証を行ったところ、システムが実用充分な解析精度を持っていることが確認できた。
- (4) コンロッドの軽量化に応用し、20%の軽量化を達成できた。これによりシステムの有効性を証明できた。

謝 辞

本研究にあたり多大の御協力と技術的アドバイスをいただいた C. M. BEASY 社 Dr. C. A. Brebbia 氏、並びに IATSS 中村昭壽氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 上柿賢治、板橋利幸、“機能部品専用 FEM 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) T. Hosokawa, “Development of Computer Aided Engineering for Piston Design”, SAE Paper 890775
- (3) C. A. Brebbia, “Advanced Analysis of Vehicles' Components using the BE Method”, SAE Paper 860807
- (4) Robert J. Sanders, “The Application of Boundary Element Analysis to Engine Component Design”, SAE Paper 870578
- (5) M. Z. Mannan, “Stress Analysis of an Aircraft Fitting using BEASY”, Boundary Elements X Vol. 3, 1988
- (6) Milan Svoboda and Walter Bauer, “Berechnung von Spannungen in den Hohlkehlen von Pkw-Kurbelwellen mit der Boundary-Element-Methode (BEM)”, MTZ 47 (1986). 3
- (7) DASSAULT SYSTEMES, “CATIA 3D design Interactive Functions Reference Manual Version 3, March 1988”
- (8) Computational Mechanics BEASY LTD., “BEASY USER GUIDE”

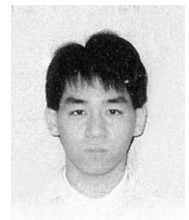
■ 著 者 ■



杉 田 順 一



伊 藤 保



阿 部 智 也