

特集：Virtual Testing

4

## 耐久性開発におけるCAEシミュレーション技術の紹介 Introduction of Durability CAE Simulation Technology

田村 秀二<sup>\*2</sup>

Shuji Tamura

### 要約

ますます多様化するお客様のニーズに合った商品を、タイムリー、かつ、リーズナブルな価格で提供するためには、商品開発の短期化と開発コストの低減が極めて重要である。中でも、耐久性の開発は、試作車を用いての性能確認では時間を要するため、開発の効率化・短期化に対しては、コンピュータ上でのシミュレーション（以下、CAEシミュレーション）の活用が特に有効となる。マツダでも、ボデー・シャシーなど構造体の耐久寿命を、CAEシミュレーションで予測する手法の開発に取り組み、実用化の見通しを得るまでに至っている。

本稿では、市場を想定した試験路の走行によって実施している耐久試験を、コンピュータに置き換えてシミュレーションするための3つの手法、①試験路をコンピュータ上のデータとして表現する手法、②路面からの刺激により、各構造体に伝達する力を算出する手法、③力の伝達に伴い、構造体に発生する応力（歪）を求める手法についての解説と、耐久寿命を予測する方法について紹介する。

### Summary

With customer needs becoming diversified more and more, further reductions in cost and period required for products development are of very importance in order to supply products satisfying such needs to customers timely at reasonable cost. Computer-aided engineering (CAE) simulation is an essential enabler for the development of durability as one of basic vehicle requirements, therefore we had studied the possibility of estimating the fatigue life of a vehicle structure such as body and chassis by means of CAE simulation, which has proceeded toward practical use.

This report describes three approaches-1) converting a road profile on the proving ground into computer input data for geometrical modeling, 2) calculating the forces transmitted to each structure by road stimulation; and 3) calculating the stress produced on the vehicle structure by force transmission-to doing the CAE simulations of durability tests, which were conventionally physical tests on the proving ground with actual market roads assumed, and introduces a method of estimating the fatigue life of the vehicle structure.

### 1. はじめに

商品開発において、開発期間の短縮、及び開発コスト低減は、極めて重要な課題である。それに対し、CAEシミュレーションは不可欠なイネーブラであり、耐久性開発についても、その実用化に向けて手法の開発を進めてきた。本稿では、耐久性に関するCAEシミュレーション手法と、そ

の実用性を検証した結果について紹介する。

### 2. 取組みの狙い

取組みの大きな狙いは、耐久性に関するCAEシミュレーションを実用化することにより、試作車を使って耐久性を確認する方法から脱却し、図面を基に机上で予測する方法に変革していくことである。

\*2 CAE部  
CAE Dept.

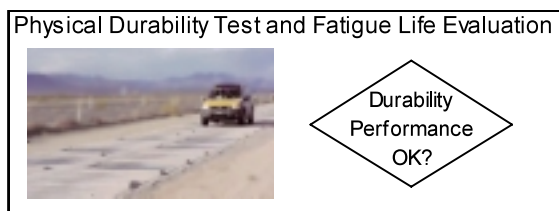
その取組みは、1998年頃からスタートしている<sup>(1)</sup>ものの、CAEシミュレーションの簡便さや、精度など実用性の面で課題もあった。そのため、本取組みでは、既存のCAEシミュレーション手法をベースに、より「簡便で実用性の高い」手法に育成することを狙いとした。

### 3. 手法と検証結果

#### 3.1 CAEシミュレーション手法の全体像

市場を想定した試験路の走行によって実施している耐久試験を、机上に置き換えてシミュレーションするためには、Fig.1に示す3つの手法が必要であると考えた。それは、

- ① 耐久性開発の拠り所である試験路を、コンピュータ上のデータとして表現する手法



How to Simulate on the Computer ?

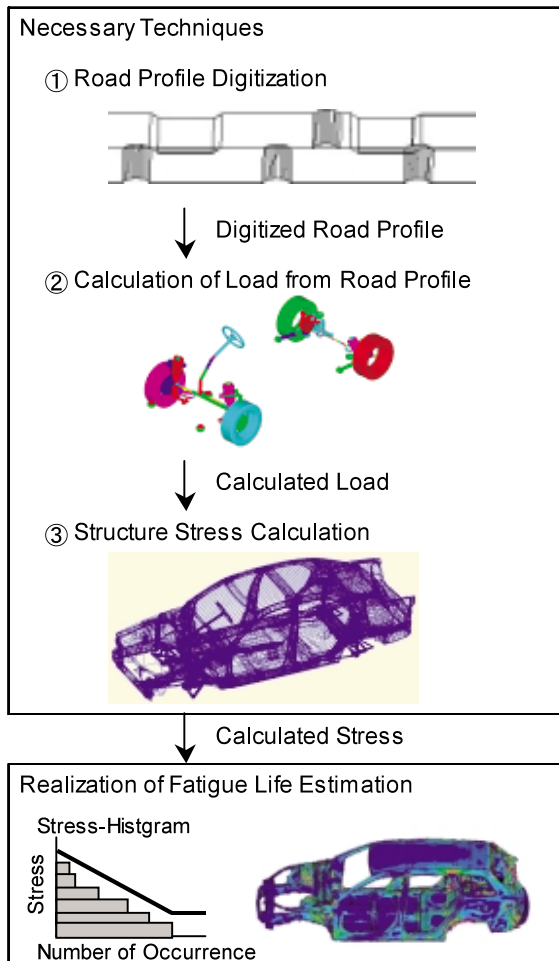


Fig.1 How to Simulate Physical Evaluation on the Computer

- ② 路面刺激により、構造体に伝達する力を算出する手法
- ③ 力の伝達に伴い、構造体に生じる応力を求める手法である。

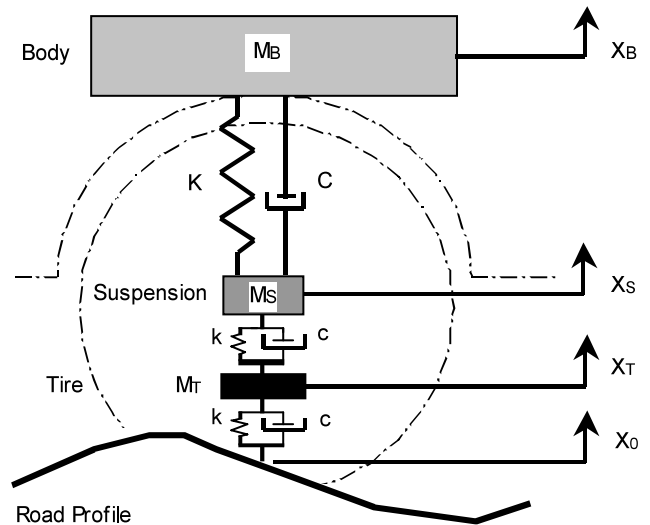
以上により、構造体に生じる応力(歪)を求めることができれば、マイナー則など一般的な寿命推定手法<sup>(2)</sup>を適用することにより、机上での耐久性予測が可能となる。

#### 3.2 路面をコンピュータ上のデータとして表現する手法

##### (1) 手法

実際の路面をコンピュータ上のデータに置き換える方法としては、路面形状を実際に計測することが考えられる。しかし、市場を想定した試験路は、形状が複雑で、かつ種類が多いため、計測は容易ではない。そこで、サスペンション挙動やタイヤ特性値など、測定可能なデータを基に、路面形状を逆算で求める手法<sup>(3)</sup>を採用した。

これは、路面と車両をFig.2に示すようなモデルで表し、運動方程式を解くことによって、路面形状を逆算する手法である。この手法で求めた路面形状は、特にタイヤの部分



$M_B$  : Body Mass,  $X_B$  : Body Displacement  
 $M_S$  : Suspension Mass,  $X_S$  : Suspension Displacement  
 $M_T$  : Tire Mass,  $X_T$  : Tire Displacement  
 $F_{SP}$  : Force on Suspension,  $X_O$  : Calculated Road Profile  
 $K$  : Suspension Spring Rate,  $C$  : Suspension Damping Rate  
 $k$  : Tire Stiffness,  $c$  : Tire Damping Rate

##### Motion Equation

$$M_T \ddot{x}_T = k(x_S - x_T) + c(\dot{x}_S - \dot{x}_T) - k(x_T - x_O) - c(\dot{x}_T - \dot{x}_O)$$

$$M_S \ddot{x}_S = K(x_B - x_S) + C(\dot{x}_B - \dot{x}_S) - k(x_S - x_T) - c(\dot{x}_S - \dot{x}_T)$$

$$M_B \ddot{x}_B = -K(x_B - x_S) - C(\dot{x}_B - \dot{x}_S)$$

##### Solution

$$X_O = \frac{M_T s^2 + 2cs + 2k}{(cs + k)^2} \cdot F_{SP} + \frac{M_S s^2 (M_T s^2 + 2cs + 2k)}{(cs + k)^2} + \frac{M_T s^2 + cs + k}{(cs + k)^2} \cdot X_S$$

Fig.2 Modeling for Road Profile Back-calculation

を、パネ - マス - 減衰特性だけのシンプルなモデルで表現していることから、タイヤモデルに対応した「擬似的な路面形状」であるということが出来る。そこで、本稿では、実際の路面と区別するため、「路面プロファイル」と呼ぶことにする。

なお、Fig.3に、形状が分かっている実際の路面と、路面プロファイルとの比較例を、参考として示す。図のように、両者は似ているものの、完全には一致していない。

(2) 検証結果

路面プロファイルを採用するに先立ち、「路面は車種によらず普遍である」という前提のもと、妥当性を検証した。その検証は、複数の車種で同じ路面を走行し、それぞれ求めた路面プロファイルの一致性を確認する方法で実施した。Fig.4は、その結果を示したものであるが、車種が異なる場合でも、路面プロファイルはほぼ一致していることから、この手法は実用レベルにあるものと判断した。

3.3 構造体に伝達する力を算出する手法

(1) 手法

伝達力算出手法の概要は、Fig.5に示すように、

- a. まず、構成部品の質量や慣性諸元、部品間の結合部の特性情報などを基に、車両の機構モデルを作成しておく。
- b. 続いて、そのモデルに、3.2で求めた路面プロファイルを与え、部品ごとの運動方程式を連成させて解くことにより、各構造体に伝わる力を算出していく。

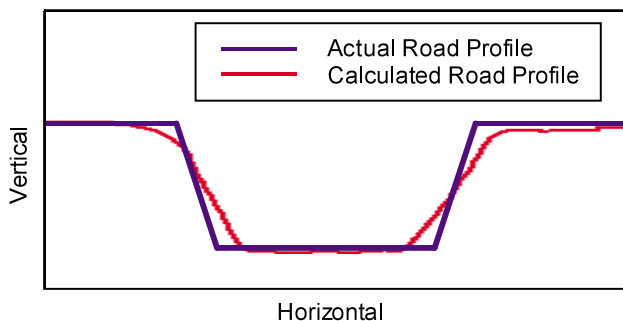


Fig.3 Comparison Result with Actual Road Profile

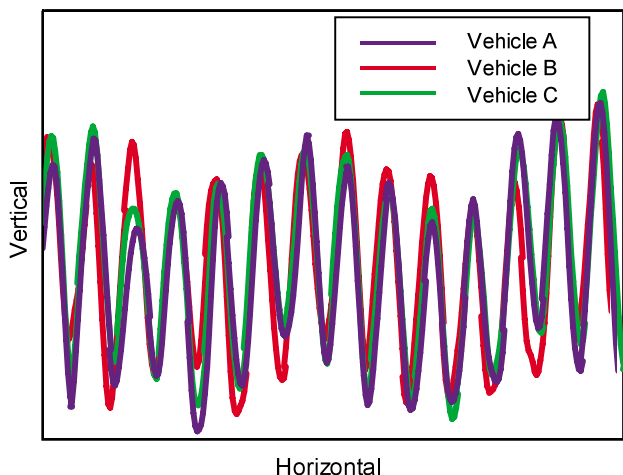


Fig.4 Validation of Calculated Road Profiles Conformity

という方法である。

なお、ここで活用したツールは、既にマツダで広く使われている機構解析ソフト「ADAMS」であるが、以下に、当手法の主なポイントをあげておく。

① タイヤをシンプルなモデルで表現したこと

タイヤをモデル化する方法としては、形状や特性を詳細まで忠実に表現することも考えられる。しかし、今回は、モデル作成の容易さや、コンピュータへの負荷軽減を重視し、Fig.2と同じシンプルな表現にした。このモデルを使えば、車両モデルとの合成が容易であるうえ、計算に要する時間が少なくて済む。

② 一部の構成部品を弾性モデルで表現したこと

一般的な機構解析では、サスペンション・リンク類など、構成部品を剛体(変形しない)モデルで表現する。しかし、当手法では、顕著な変形が予想される部品については、変形を考慮できる弾性モデルで表現したうえで、機構解析モデルと合成することにより、精度の向上を図った。

(2) 検証結果

この手法による精度を、以下の2つの面から検証した。

① タイヤに伝わる力のシミュレーション精度

まず、タイヤをシンプルなモデルとしたことにより、精度上の問題がないかを検証しておく必要があると考えた。しかし、走行中タイヤに伝わる力を、直接計測することは難しいため、タイヤ近傍のホイールの加速度について、予測結果と実測値を比較する方法で検証することにした。Fig.6は、その一例を示したものであるが、両

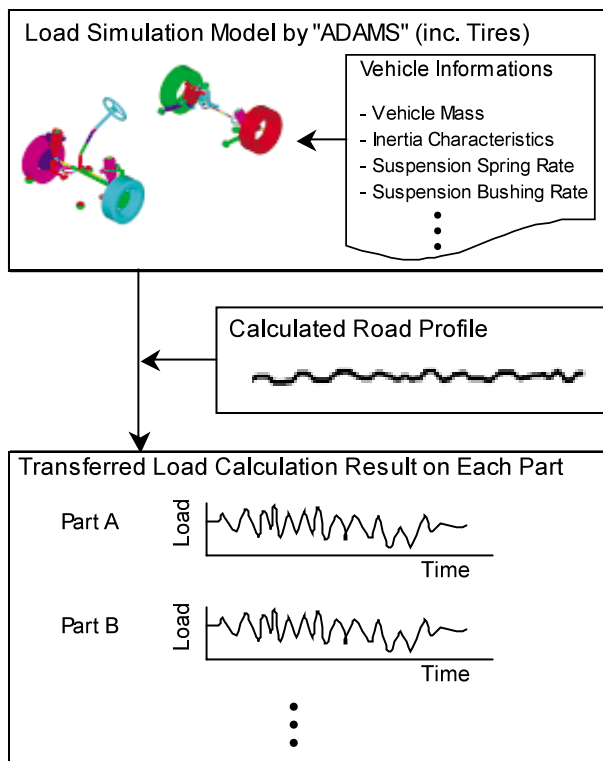


Fig.5 Transferred Load Calculation Method

者はほぼ一致していることから、実用上の問題はないと判断した。

② 各構造体に伝わる力のシミュレーション精度

次に、各構造体に伝わる力を予測した結果が、実際と一致しているかを検証した。Fig.7は、サスペンション部品についての例であるが、構造体に伝達される力を、精度良くシミュレートできていることが確認できた。

3.4 構造体に生じる応力を算出する手法

(1) 手法

構造体の耐久寿命は、発生する応力(歪)の大きさと頻度によって決まる。また、応力の大きさと頻度を求めるには、力に応じて刻々と変化する応力(以下、時系列応力)を把握する必要がある。

これについては、既にマツダで実績のある、汎用ソフト「FATIGUE」を使うことにより対応した。その概要は、Fig.8のように、単位入力を与えた場合の応力値を事前に求めておき、3.3で算出した時系列の伝達力を乗じる方法である。

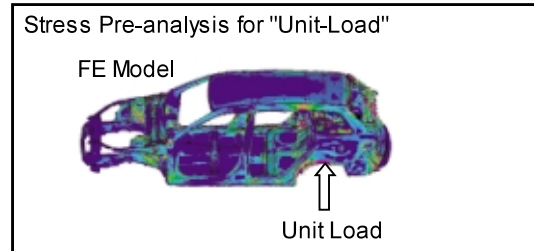
(2) 検証結果

この手法を使って求めた時系列応力と、応力の実測結果を比較することにより、シミュレーションの精度を検証した。Fig.9は、ボデーについての例であるが、両者は良く

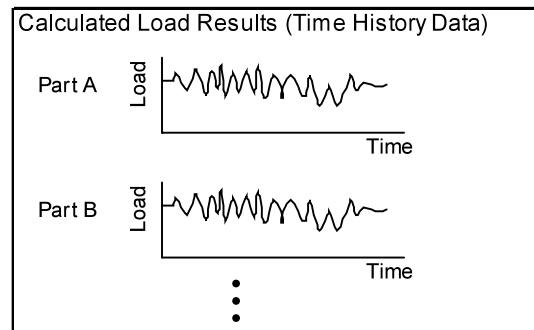
一致しており、構造体に生じる時系列応力を、精度良くシミュレートできていることが確認できた。

3.5 耐久寿命推定精度を検証した結果

以上の手法によって得た時系列応力データに、マイナー則を適用して耐久寿命を求め、実際の寿命と比較した。Fig.10は、その結果を示したものであるが、両者の間に相関はあるものの、一致度は高くなく、正確に耐久寿命を予



X



||

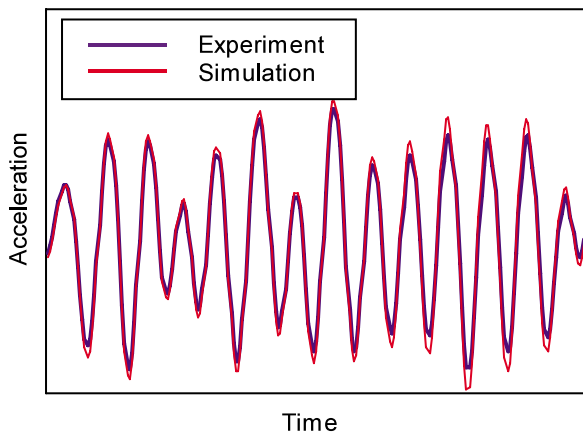
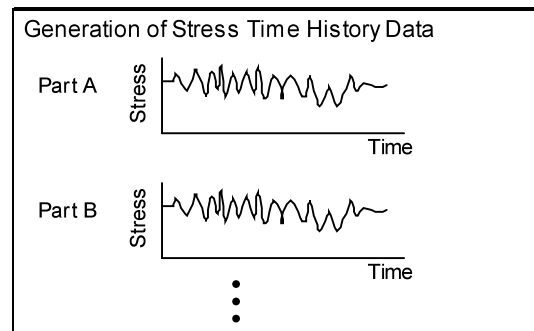


Fig.6 Validation Result of Acceleration

Fig.8 Time History Stress Generation Method

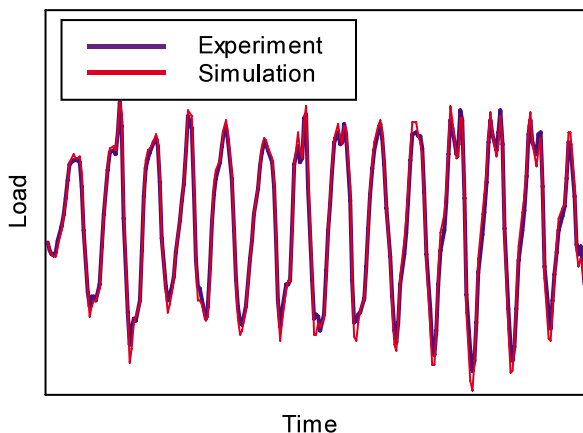


Fig.7 Validation Result of Simulated Load

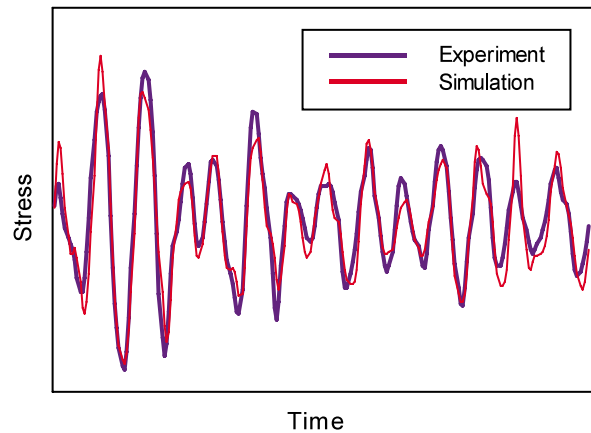


Fig.9 Validation Result of Simulated Stress

測するためには、まだ改善の余地があることが分かった。

対応としては、路面プロファイルや伝達力、時系列応力など、個々の精度を高めることが考えられるが、相当な労力が必要であり、現実的ではない。

そこで、次節で述べるように、開発済みの車種の試験結果を活用するという簡便な方法により、寿命推定の信頼度を高めることを確かめた。

3.6 寿命推定結果の信頼度を向上するための方法

(1) 方法

Fig.11のように、予測対象車のベースとなる既開発車の耐久寿命に、両車種のシミュレーション上の寿命比を乗じ、寿命予測結果を補正する方法を試みた。

(2) 補正結果

Fig.12は、Fig.10の結果に加え、上述の方法で補正した結果も併せてプロットしたものである。まだ完全ではない

が、補正前に比べ、信頼度を实用レベルにまで高めることができた。

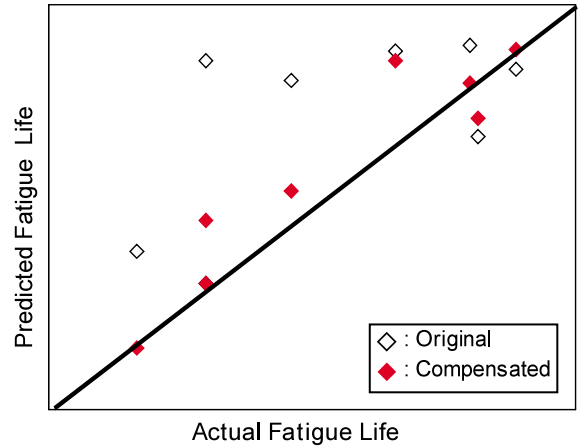


Fig.12 Compensated Result

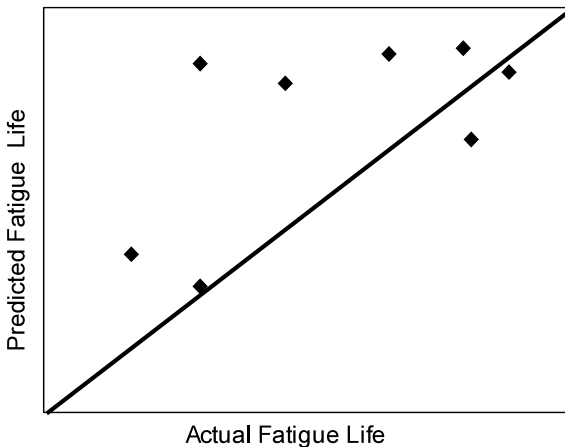


Fig.10 Validation Result of Predicted Fatigue Life

4. まとめ

以上の取組みにより、CAEシミュレーションを用いて耐久性を予測することに対し、精度面で実用化の見通しが得られた。また、簡易モデルの活用や、既に活用されている手法をベースとすることにより、簡便に性能を確認できる手法にすることができた。以上の結果、当手法は商品開発上、欠くことのできない存在になりつつある。

更に、今後も精度向上と簡便さの両立を図りながら、活動に取組んでいく所存である。

最後に、取組みに協力して頂いた関係部門に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 田村 他：車両の耐久強度解析手法の開発，マツダ技報，No.20，p.146-153（2002）
- (2) 鯉淵興二：実働荷重下の疲労被害法則の検討，材料，17-173，p.169（1968）
- (3) Yuting Rui, F.Saleem, J.H.Zhou：Road Load Simulation Using Effective Road Profile, SAE 971512，p.19-28（1997）

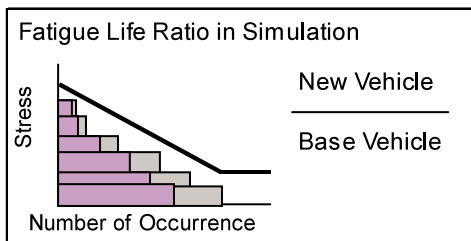
著者



田村秀二



X



||

Compensated Life Estimation Value

Fig.11 Compensation Concept of Fatigue Life Estimation