

(論文)

# 油圧ショベルの動的強度解析技術

## Dynamic Strength Analysis for Hydraulic Excavators



川端将司\*  
Masashi Kawabata



今西悦二郎\*(工博)  
Dr. Etsujiro Imanishi

This report presents a nonlinear dynamic analysis of hydraulic excavators using a component mode synthesis method with retransformed physical coordinates. After the vehicle structure is modeled with the finite element method, the FE model is transformed to a super-element using a component mode synthesis method. This method, when applied to the rough road traveling test and the cabin bench test, enables the accurate evaluation of dynamic stress on the structure being studied. This simulation technique, when performed in an advanced design stage, allows for the speedy development of new products.

まえがき = 油圧ショベルなどの建設機械や産業機械では、市場ニーズを反映した新製品を短期間で開発するため、試作段階での事前評価が重要となってきた。設計段階での評価を可能にするためには、発生するダイナミクスの諸問題を事前に予測するシミュレーション技術が必要となる。

建設機械の新機種開発においては、試作段階でラフロード走行テストや各コンポーネントのベンチ加振テストを行い、車体のフレームや各部の耐久性評価を実施することにより、市場における品質不具合の発生を防いでいる。これらの試験の事前評価には、ダイナミクスを考慮した強度評価が不可欠である。

㈱神戸製鋼所では、有限要素法 (Finite Element Method, 以下 FEM) をベースとした汎用的な振動解析ツールとして、非線形動的解析コード SINDYS<sup>1)</sup> を開発し、事前評価に適用を図ってきた。本稿では、動的強度解析の適用事例として、油圧ショベルのラフロード走行解析、キャブの動的強度解析の事例について紹介する。

### 1. 動的強度解析手法

非線形動的解析コード SINDYS は、構造系・油圧系・制御系を同時に考慮した機械システムの動的シミュレーションが可能なツールである。一般的に、建設機械などの複雑構造物の強度解析は、大規模 FE モデルを作成して行われるが、これをダイナミクスの解析にそのまま用いて直接時間積分する方法は、計算時間がかかりすぎて実用的でなく、線形部分は低次元化して計算したほうが効率的である。SINDYS では、汎用の FEM コード NASTRAN との間に COMET という変換プログラムを開発しており、FE モデルのモーダルデータ、静縮小マトリックスを要素の一部として取込むことができる。

大規模 FE モデルを低次元化する手法として、物理座

標に再変換するモード合成法<sup>2)</sup> について説明する。

有限要素法によって離散化された運動方程式は次式で与えられる。

$$Mu + C\dot{u} + Ku = f \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $M$  : 質量マトリックス

$C$  : 減衰マトリックス

$K$  : 剛性マトリックス

$f$  : 外力ベクトル

$u$  : 変位ベクトル

式(1)において、減衰を無視した固有値問題を解いて固有振動数と固有モードを求める。そして1次から  $p$  次までの固有モードベクトルを並べたモーダルマトリックスを  $\Phi$  とする。変位ベクトル  $u$  は固有モードの一次結合として、モード座標を  $q$  とすると次式のように表すことができる。

$$u = \Phi q \dots\dots\dots(2)$$

式(2)を式(1)に代入し、左から  $\Phi^T$  を乗じ、減衰が比例減衰と仮定すると固有モードの直交性から次式が成立つ。

$$\begin{bmatrix} m \\ \vdots \\ c \\ \vdots \\ k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddots \\ \vdots \\ \ddots \end{bmatrix} \cdot + \begin{bmatrix} \ddots \\ \vdots \\ \ddots \end{bmatrix} = {}^T f \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

$$\begin{bmatrix} m \\ \vdots \\ c \\ \vdots \\ k \end{bmatrix} = {}^T M, \begin{bmatrix} \ddots \\ \vdots \\ \ddots \end{bmatrix} = {}^T C, \begin{bmatrix} \ddots \\ \vdots \\ \ddots \end{bmatrix} = {}^T K \dots\dots(4)$$

である。通常モード重ね合わせ法は、式(3)に外力および初期条件を与えて応答を求め、その後重ね合わせるというものであった。物理座標に再変換するモード合成法では、非線形要素との結合部、および応答を求めたい物理座標を含む座標に式(3)を再変換する。

まず、結合部および応答を求めたい  $r$  個 ( $r < p$ ) の物理座標を  $u_r$  とすると、それらはモード座標  $q$  を用いて次式のように表すことができる。

\*技術開発本部 機械研究所

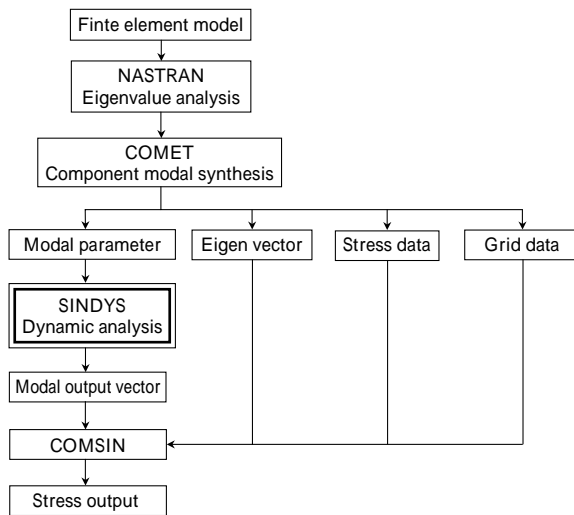


図1 動的強度解析における解析システムフロー  
Fig. 1 System flow of dynamic strength analysis

$$u_b = \begin{matrix} r \\ \vdots \\ p \end{matrix} \dots\dots\dots(5)$$

また、 $r + 1$  次から  $p$  次までのモード座標はそのまま残し、それを  $r$  とすると次式が成立つ。

$$\begin{Bmatrix} u_b \\ r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} & r \\ 0 & I \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $I$  は単位マトリックスである。右辺のマトリックスが正則であれば、(6) 式から次式が求まる。

$$= R \begin{Bmatrix} u_b \\ r \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(7)$$

ただし、

$$R = \begin{bmatrix} & r \\ 0 & I \end{bmatrix}^{-1} \dots\dots\dots(8)$$

である。式(7)を式(3)に代入し、左から  $R^T$  を乗じると次式が得られる。

$$R^T \begin{bmatrix} \ddots & m \\ & \ddots \end{bmatrix} R \begin{Bmatrix} u_b \\ r \end{Bmatrix} + R^T \begin{bmatrix} \ddots & c \\ & \ddots \end{bmatrix} R \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{r} \end{Bmatrix} + R^T \begin{bmatrix} \ddots & k \\ & \ddots \end{bmatrix} R \begin{Bmatrix} u_b \\ r \end{Bmatrix} = R^T T f \dots\dots(9)$$

上式がモード座標で表現された方程式を、物理座標を残すために再変換した方程式であり、自由度数は採用モード数と等しく、残しておきたい物理座標  $u_b$  と残りの高次モード座標  $r$  によって表されたものとなる。上式から  $u_b$  と  $r$  の応答を求め、式(7)からモード座標  $u$  を求めることができる。また、要素力  $f_e$  は1次から  $p$  次までの要素力ベクトルを並べた要素力マトリックス  $f$  を用いて、次式で与えられる。

$$f_e = \begin{matrix} f \\ \vdots \\ p \end{matrix} \dots\dots\dots(10)$$

当社では、図1に示すように、汎用FEMコード NASTRAN と SINDYS との連携のために、COMET というモード合成プログラムと、SINDYS の動的解析結果から FE モデルの応力を再生成する COMSIN というプログラムを開発し、ひとつの動的強度解析システムとして構築している。

## 2. 解析事例

### 2.1 ラフロード走行解析

前述の動的強度解析の手法を、ラフロード走行時における油圧ショベル上部構造体の主要部材の強度解析に適



写真1 ラフロード走行試験  
Photo 1 Rough road traveling test

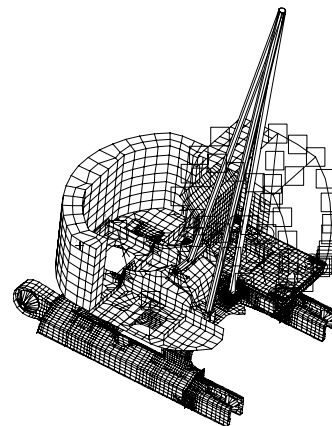


図2 油圧ショベル有限要素モデル  
Fig. 2 Finite element model of hydraulic excavator

用した事例について述べる。ラフロード走行は写真1に示すように、油圧ショベルをブロックを配置した路面の上を走行させ、車体のフレームや各部の耐久性を評価する試験である。図2に示すように主要構造物であるキャビン、上部旋回体、下部構造物の FE モデルを作成し、NASTRAN を用いて固有値解析を実施する。このモデルでは、自由度数 10,000 以上であるが、低次から数十個のモーダルデータを用いる。アタッチメント、タンクなどの重量物の質量は、重心位置に集中質量で付加するという簡易的なモデル化を行っている。路面と下部構造体との接触は、クローラ部の剛性が十分高いと考えて左右のアイドルとスプロケット部に代表させる。このとき、残しておきたい物理座標としては、下部構造体のうち、左右のアイドルとスプロケット（前後の回転部分）の上下方向自由度と、応答を見たい点の自由度である。これらのデータを基に式(7)の左辺を求めるとモード数分の自由度に縮小された運動方程式が得られ、これを SINDYS の一般化要素として取扱う。

SINDYS の解析モデルの概略図を図3に示す。ラフロードブロックを乗り越えるときの挙動は、別途機構解析ソフトにより求め、得られたアイドル、スプロケット部の応答を加振入力として SINDYS に与えて挙動解析を行う。路面との接触は、図3のように断片線形ばね要素を用いてモデル化する。SINDYS による挙動解析の結果、物理座標の応答およびモード座標の応答が得られ、それを式(10)に基づいて再変換することで、応力の時間波形を求めることができる。

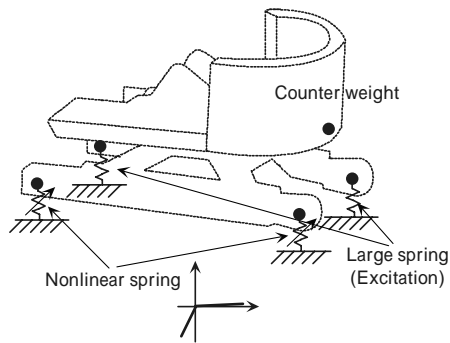


図3 SINDYSにおけるシミュレーションモデル  
Fig. 3 Simulation model in SINDYS

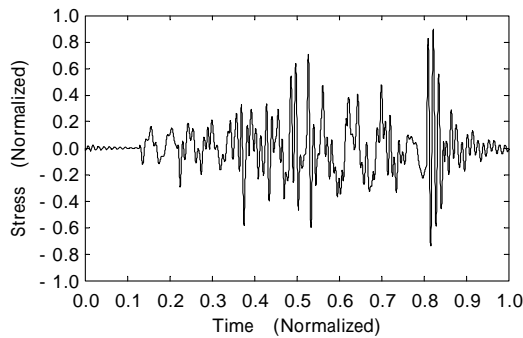


図4 ラフロード解析の応力応答  
Fig. 4 Stress response of rough road simulation



写真2 キャブ加振テスト  
Photo 2 Oscillation test of cabin

結果の一例として、図4にメインフレームの一要素の応力波形を示す。ただし、縦軸、横軸は正規化した値を用いている。この手法によって得られる応力値と、実際のラフロード試験の耐久評価基準を照らし合わせて合否判定をすることで、設計段階で事前の強度評価が可能となる。

## 2.2 キャブの動的強度評価

油圧ショベルキャブの耐久性評価は、写真2に示すように加振機による耐久試験により行っている。一般的な加振試験の方法には、一定の周波数で加振する正弦波加振、ショック波加振、実測波形加振などがあるが、パワースペクトル密度 (Power Spectrum Density: 以下 PSD) の大きさを規定したランダム波形を加振条件とした例について説明する。ランダム波形の周波数と PSD の大きさは、実際の機械で計測した加速度およびひずみの結果をもとに、機種に応じて個々に設定している。

油圧ショベルのキャブは、図5に示すような構造の高粘性流体封入マウントで支持されているが、その特性は線形のばねと減衰を並列にモデル化したような単純な形

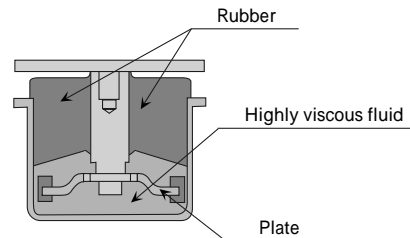


図5 高粘性流体封入マウントの構造  
Fig. 5 Configuration of highly viscous fluid mount

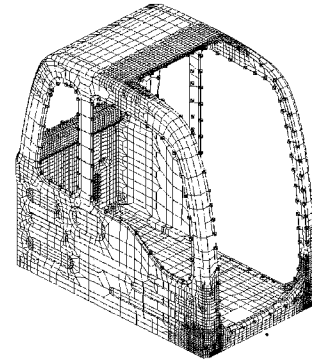


図6 キャブ有限要素モデル  
Fig. 6 Finite element model of cabin

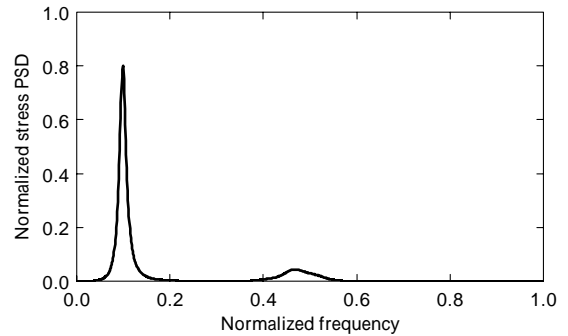


図7 SINDYSにおける応力のPSD出力結果の一例  
Fig. 7 Example of SINDYS stress PSD output

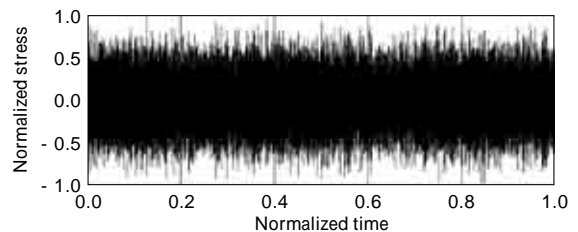


図8 逆FFTによる応力時間波形  
Fig. 8 Stress time history using inverse FFT

では表現できない周波数依存性および振幅依存性が存在する<sup>3)</sup>。それらの非線形特性を考慮するため、図6に示した大自由度の有限要素モデルに対し、前述のモード合成法による低次元化を行い、SINDYSの要素としてモデル化する。SINDYSにおける解析手法は、ランダム応答解析を用いる。ランダム応答解析は、ランダム加振入力のPSDが目標値となるようにした周波数応答解析の一手法である。

結果として応力は、図7に一例を示すように、周波数に対するPSDの大きさで得られる。しかし、疲労耐久性を評価するためには、応力の時間波形が必要である。そこで、得られた周波数軸上のPSD波形に対し、位相をランダムに与えて逆FFT解析を行えば、図8のような時間

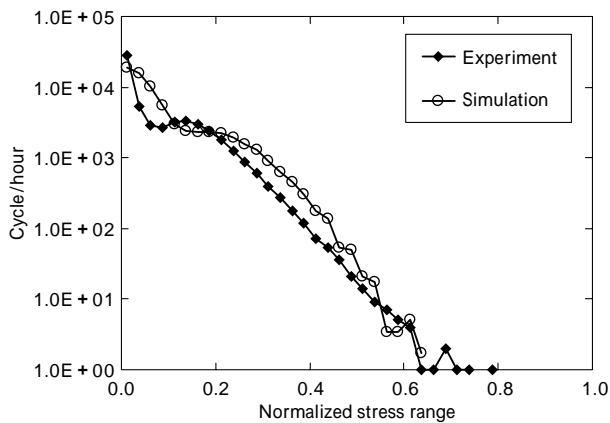


図9 応力範囲に対する頻度分布  
Fig. 9 Frequency distribution for stress range

波形を生成することができる。応力の時間波形に対しては、レインフロー法によりダメージを計算し、評価部位のS-N線図をもとに修正マイナ則に基づいて寿命を評価する。

図9に、シミュレーション結果に基づいてレインフロー法によりカウントした応力範囲に対する単位時間当た

りの頻度分布と、実験の応力計測により求められた頻度分布を比較して示す。両者は比較的よく一致しており、実用上問題のない精度で寿命を予測することが可能である。実際の事前評価では、シミュレーション結果に安全率を見込んで評価し、試作機の完成度向上に貢献している。

むすび = ダイナミクスを考慮した強度解析の手法を示し、設計段階における事前評価の例として、油圧ショベルのラフロード走行解析、キャブの動的強度解析について紹介した。試作の前段階で発生するダイナミクスの問題を予測し、強度評価を行うことにより、試作機の完成度を向上させ、開発のスピードアップを図ることが可能となる。

#### 参考文献

- 1) 藤川 猛ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.37, No.1(1987) p.93.
- 2) 今西悦二郎ほか：日本機械学会論文集(C編), 52巻, 476号(1986) p.1232.
- 3) 浜崎義弘ほか：日本機械学会論文集(C編), 52巻, 484号(1986) p.3207.