

車両排気系における強度予測技術の開発

Development of the Strength Prediction Technique for Automotive Exhaust System

高 賀 茂 巧* 樋 口 正 彦* 中 川 博 史*
Takumi TAKAKAMO Masahiko HIGUCHI Hiroshi NAKAGAWA
鵜 飼 陽太郎* 石 塚 歩*
Youtarou UKAI Ayumu ISHIZUKA

要 旨

エンジントルク反力によるロール入力に対する車両排気系の強度予測技術を構築した。
従来 FEM を用いて静的に解析していた手法から過渡的大変位を伴う入力を強制変位として動的に解析する手法およびマウンティングラバー、フレキシブルジョイントなどの非線形性を考慮した手法に変更した結果、排気系の強度予測をより高い精度で行うことが可能となり、開発支援ツールとして活用することができた。

ABSTRACT

A technique has been devised for predicting the strength of an automotive exhaust system against the rolling force input from the torque reaction force of the engine.
The static analysis conducted using the finite element method (FEM) in the past has changed to techniques for dynamic analysis that treat the force input accompanying large transitional displacement as a forced displacement, and techniques that take into account the non-linear nature of mounting rubber pads, flexible joints, and so on. As a result, it has become possible to predict the strength of exhaust systems with greater accuracy, and these techniques have been capable of application as development support tools.

1. はじめに

新型車の開発期間が短縮化される一方で、品質の向上や軽量化、コストダウンなどの要求も大きい。これらの開発を効率良く行う上でCAEの活用は有効な手段であり、自動車部品の振動や強度の解析手法として、有限要素法(FEM)が一般的に用いられている。
排気系は、路面からの振動入力、エンジン振動による入力、エンジン駆動時のエンジンロール入力を受けるが、FF車において、排気系に発生する応力が最大となるのは、エンジン駆動時のエンジンロール入力を与えられたときである。この時の入力変位は大きいことから、排気系の応答は非線形特性を示す。また、入力形態は過渡的な特性を有している。これらは排気系の強度予測をする上で重要なポイントとなる。
そこで、今回、NASTRAN の過渡応答解法を適用し、部品の特性を作用反作用に相当する2つの相反する力で表現した。さらに、非線形特性を変位-荷重のマップとして与えることによって車両排気系の過渡的応力を予測する手法を

開発し、強度開発ツールとして活用することが出来たので報告する。

2. 非線形排気系のモデル化について

本稿の非線形系の強度計算手法においては、線形振動モデルをベースに強度解析に必要な項目を選定し変更を加え実施した。ベースモデルとの違いを Table 1 に示す。

Table 1 Difference of vibration prediction FE model and nonlinear stress prediction FE model

		Vibration FE model	Stress FE model
Estimation value		Eigen value MAC value	Displacement response Stress
FE model basic element		Shell	Shell+sollid
Displacement area of input		Small	Large
Restrict	Mounting rubber	Elastic numerical value of spring	Displacement-Load nonlinear MAP
	Flexible joint	Elastic numerical value + of spring Shape model	Displacement-Load + nonlinear MAP Shape model

*栃木研究所

解法は、時刻歴でのエンジンロール入力を解くことから過渡応答解法とし、入力条件は実走相当のエンジンロール入力を強制変位として Lagrange 乗数法を用いた。

モデルでは、Fig.1に示す様なフレキシブルジョイントやマウンティングラバーなど変位拘束構造を有する部品が、大変位入力に対し非線形特性を示すことから、それらのバネ特性を線形数値バネ(振動モデル)から作用反作用の関係にある相対する2つの力で表現し、さらに、非線形特性を変位-荷重関係のマップとして与えた擬似的な非線形バネとした(以下、非線形マップ)。

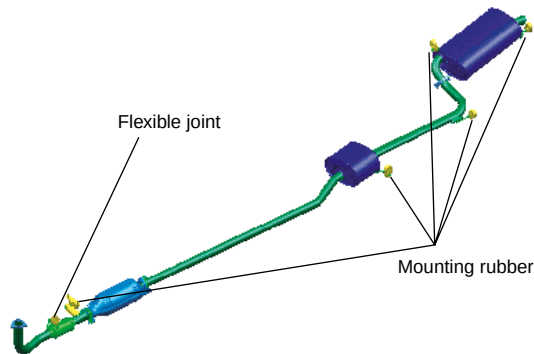


Fig.1 Nonlinear component of exhaust system

この手法の特徴の一つは、非線形バネを有する部品を擬似力法を用いてモデル化していることである。この結果、線形解析の範囲で排気系構成部材の非線形性を解析リソースの大幅な増大を招くことなく表現可能となった。

3. 排気系における非線形現象

3.1. 排気系における非線形部品

排気系において非線形特性を示すものとして挙げられるのが、Fig.2に示す様なマウンティングラバーおよびフレキシブルジョイントである。

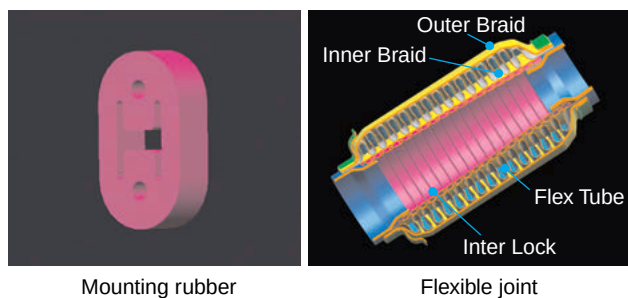


Fig.2 Parts of nonlinear element

Fig.3にマウンティングラバー、Fig.4にフレキシブルジョイントの非線形マップを示す。特にフレキシブルジョイントが強い非線形性を示す。

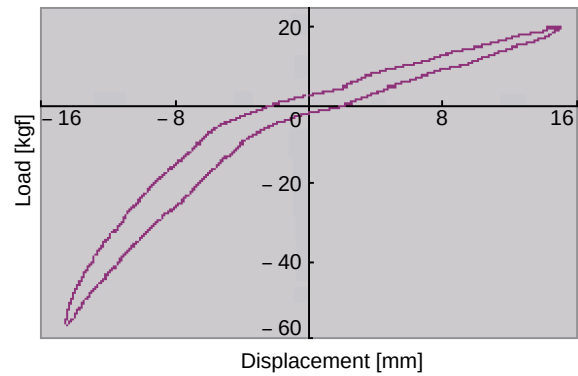


Fig.3 Hysteretic curve (Mounting rubber)

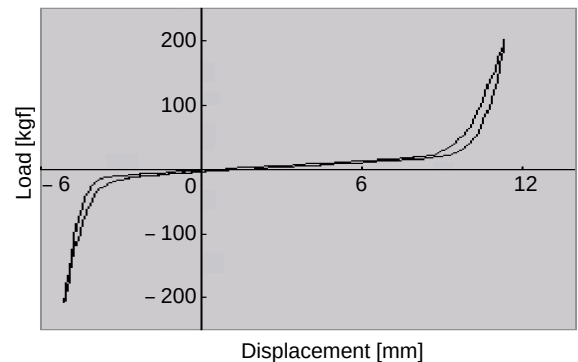


Fig.4 Hysteretic curve(Flexible joint)

3.2. 非線形現象の解析

これらの部品の非線形特性が排気系の挙動におよぼす影響を把握するため Fig.5 に示す台上加振装置において実車相当のロール入力を与え加振実験を行った。

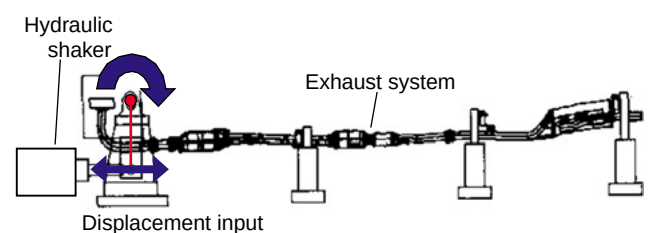


Fig.5 Rig test

Fig.6 はマウンティングラバーの変位ストッパーを取り去ったときの排気の後端懸架部の上下方向の変位挙動の変化を示す。Fig.7はフレキシブルジョイントからアウトブリード、インターロックの非線形特性を有する部品を取り除きチューブのみにしたときのジョイント後端部の前後変位の変化を示す。

この様に変位領域では部品の持つ非線形特性が排気系全体の変位挙動に及ぼす影響は大きい。したがって、マウンティングラバー、フレキシブルジョイント等の非線形特性を有する部品のモデル化は排気強度を予測する上で重要な要素である。

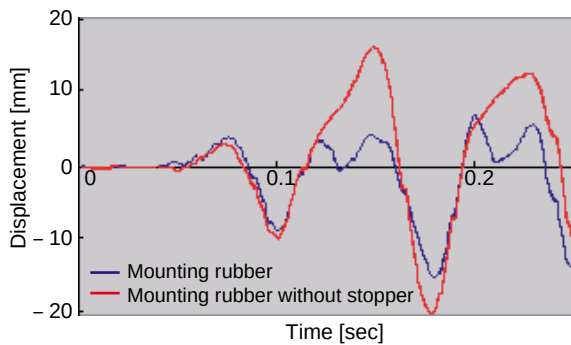


Fig.6 Influence of mounting rubber stopper

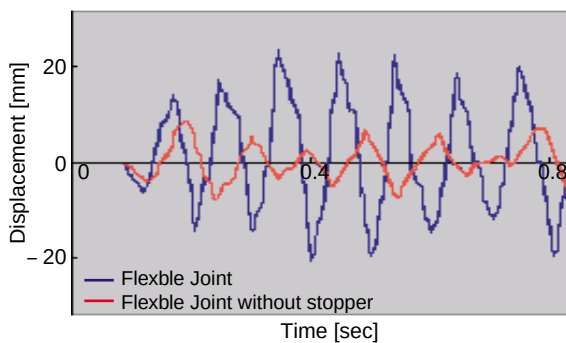


Fig.7 Influence of flexible joint stopper

4. モデル化手法

4.1. 線形モデルの概要と精度

今回用いた基本排気系本体(振動モデル)の FE モデルを Fig.8 に示す。

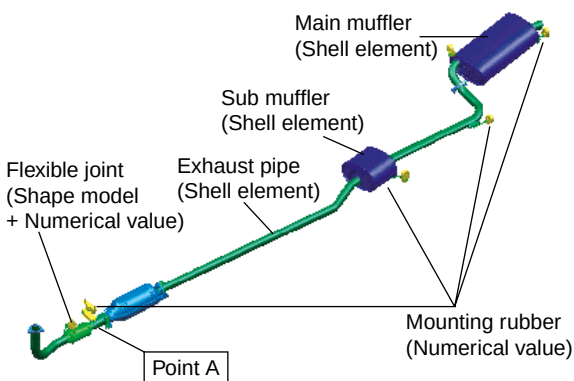


Fig.8 Exhaust vibration prediction model in linear area

排気系のパイプ部、消音器部などのように形状モデル化が可能な部品については全てシェル要素でモデル化をし、溶接きわ近傍のみソリッド要素とした。

Fig.9 に加振機入力による応答レベル(～100Hz)の実験結果との比較を示す。振動モデルは、実験と良く一致した結果が得られている。

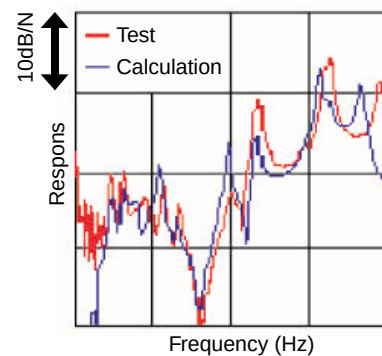


Fig.9 Result of frequency response test (Point A)

4.2. マウンティングラバーのモデル化

4.2.1. モデルの概要

マウンティングラバーのモデル化手法としては、まず強度領域の特性を把握するために、大変位振幅領域のパネ特性試験を実施した。得られた変位-荷重線図(Fig.3)から、線形および非線形のそれぞれの領域別に直線近似を行いパネ特性マップを作成した(Fig.10)。また、減衰についても Fig.3 の線図から同定を行い、減衰特性として与えた。

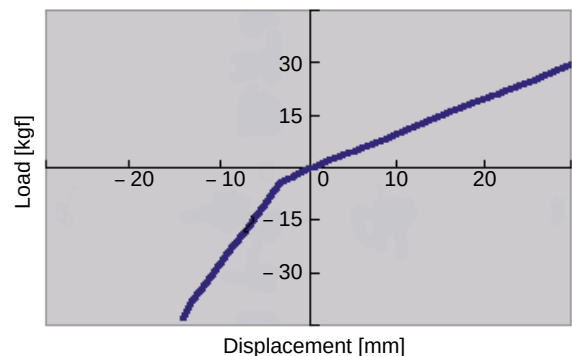


Fig.10 Nonlinear map of mounting rubber

4.2.2. モデル検証結果

上記モデルによる単体特性の計算結果を Fig.11 に示す。計算結果は単体試験結果と良く合っている。

動的検証は、後端に1点の懸架点を設定しマウンティングラバーで支持した直管排気モデル(Fig.12)を作成し、台上試験と計算の比較を行った。Fig.13 は、マウント部の上下変位を時系列で比較した結果である。計算結果は、台上試験結果と良く対応している。

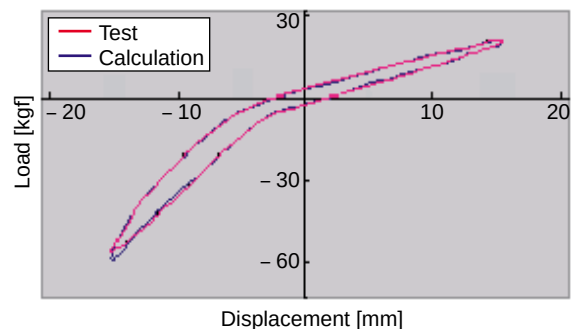


Fig.11 Hysteretic curve (Mounting rubber)



Fig.12 Simple exhaust FE model

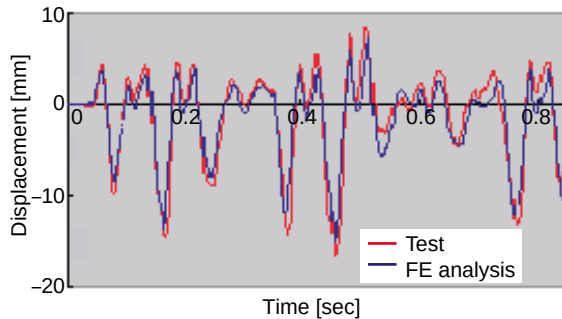


Fig.13 Response in the Z-direction at mounting point

4.3. フレキシブルジョイントのモデル化

4.3.1. モデルの概要

フレキシブルジョイントに関しては、Fig.14 に示すようにフレキシブルチューブは形状モデル、その他要素はマウンティングラバーと同様な非線形マップを用いた。

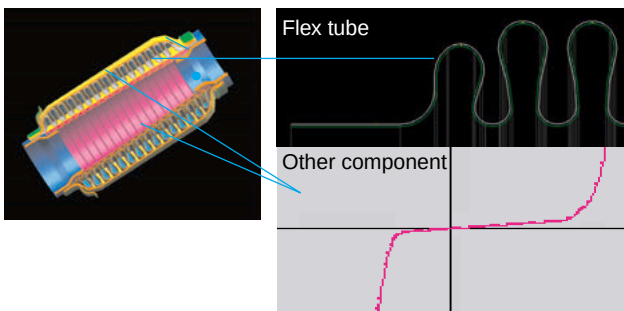


Fig.14 Flexible joint model

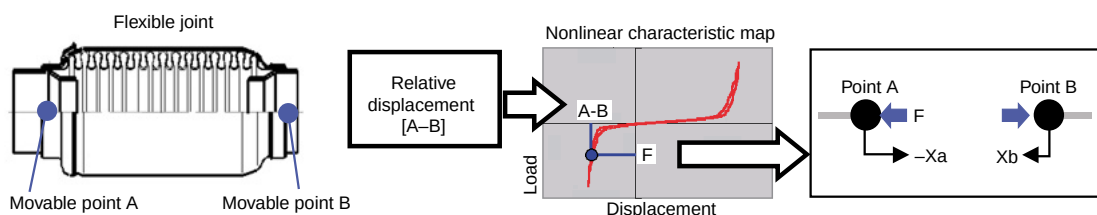


Fig.16 Relative displacement in flexible joint

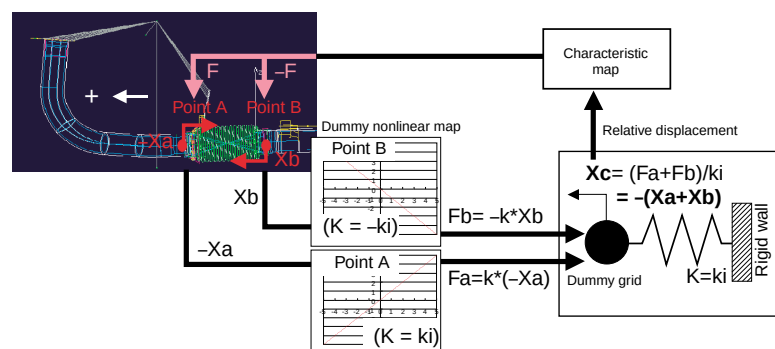


Fig.17 Method of dummy grid

4.3.2. フレキシブルジョイントの相対変位算出手法

非線形マップを用いてフレキシブルジョイントやマウンティングラバーに生じる反力を同定するためには、非線形マップに対応した各部品の相対変位量を求める必要がある。

マウンティングラバーの場合は、Fig.15 に示すようにボディ側を固定点としているため、排気側の可動点変位がマウンティングラバーの相対変位となる。

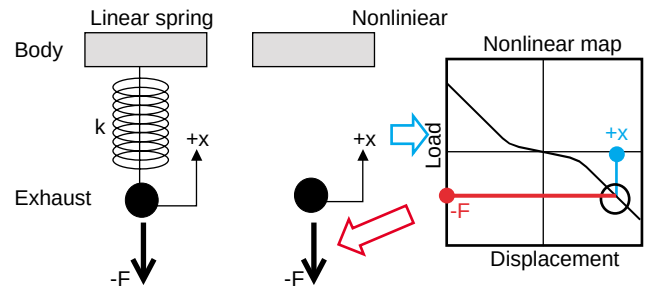


Fig.15 Method of load reference for mounting rubber

一方、フレキシブルジョイントの場合は、Fig.16 のように両端が可動点であるため、この2点間の動きの差から相対変位を求める必要がある。しかしながら、NASTRAN においては、直接的に相対変位を抽出したり、それぞれの変位量から差を算術的に求める事が困難である。そこで、フレキシブルジョイント両端の相対変位を算出するために排気系解析モデルと同一解析空間上に架空の構造節点を設け、線形バネによりグラウンドに連結した架空の構造を介して相対変位を抽出する方法(以下、ダミーグリッド手法)を考案した。

ダミーグリッド手法の概略をFig.17 に示す。まず排気系解析モデルから独立した1自由度のダミーグリッドを作成し、それを線形バネでグラウンドに連結する。さらに、この

系に対してフレキシブルジョイント前、後可動点の変位に応じた力を同時に負荷する。この結果、ダミーグリッドの変位はフレキシブルジョイント前、後可動点の相対的な変位に比例することとなり、このダミーグリッドの変位にしたがって力を発生させることはフレキシブルジョイント前、後可動点の相対的な変位にしたがって力を発生させることと等価となる。

4.3.4. フレキシブルジョイントモデルの検証結果

動的検証のためにフレキシブルジョイントを含む簡易モデル(Fig.18)を作成し、台上試験と計算の比較を行った。Fig.19はフレキシブルジョイント前、後端部の相対変位(前後、上下方向)を時系列で比較した結果である。計算結果は、台上試験結果と良く対応しており、今回のモデル化手法により複雑なフレキシブルジョイントの挙動を予測することが可能となった。

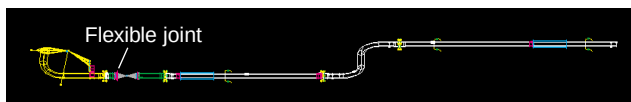


Fig.18 Simple exhaust FE model with flexible joint

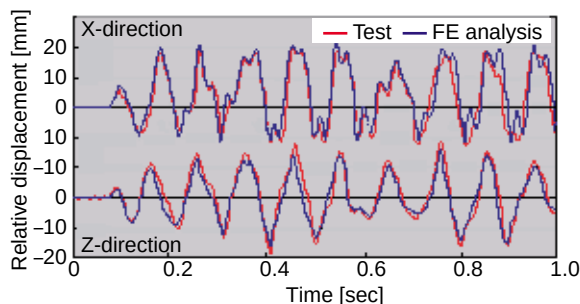


Fig.19 Relative displacement of flexible joint

5. 実験との比較結果

以上の各要素のモデル化手法を排気系の全体モデルに適用し、Fig.20 に示す台上試験装置を用い実車相当のロール入力を与えたときの台上試験と計算の比較を行った。

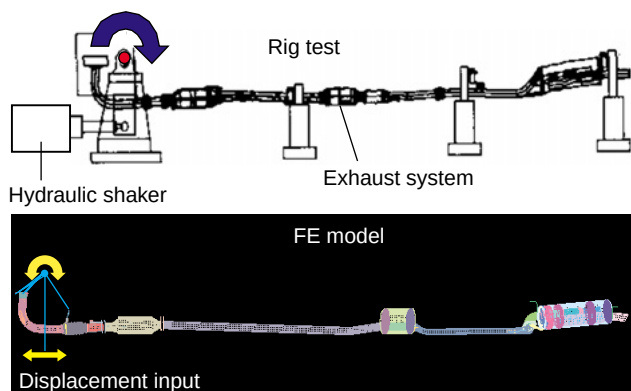


Fig.20 Rig test and FE model

計算による予測応力値と台上試験の実測応力値のポイント別の比較結果を Fig.21 に示す。応力の分布傾向は一致しており、相関係数も 0.96 と高い相関を得られた。

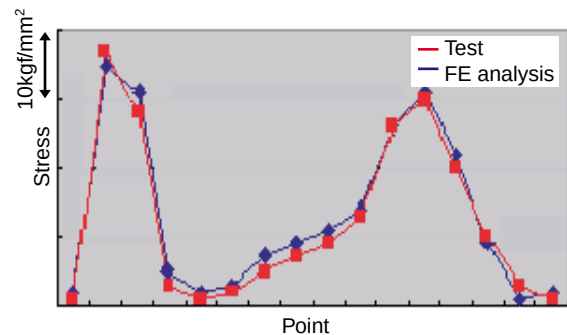


Fig.21 Stress distribution of exhaust system

Fig.22 および 23 に計算結果の一例を示す。実験では困難であったフレキシブルチューブや排気系全体の変位挙動と対応した応力挙動の把握が可能となった。

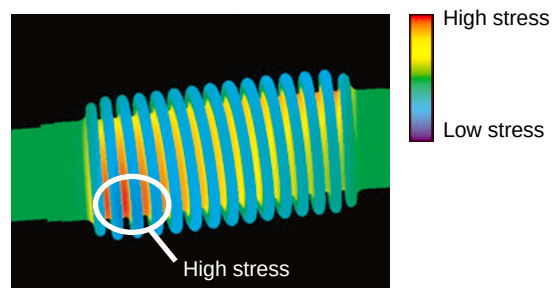


Fig.22 Behavior of flexible tube

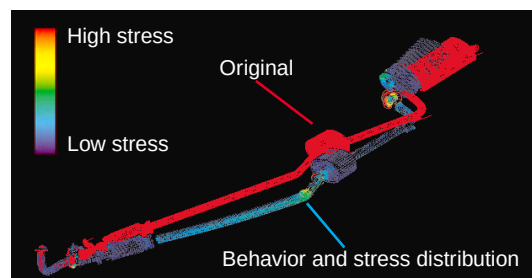


Fig.23 Behavior of exhaust pipe

6. 適用事例

CAEは、図面段階における発生応力予測やレイアウトの小変更、パラメータスタディ等に有効な手法である。

ここでは、フレキシブルジョイントの位置をFig.24に示すように Type A および Type B のように配置した場合、ベローズの発生応力にどのような差が生じるかを予測した。

計算結果を Fig.25, 26 および 27 に示す。Fig.25 および 26 はフレキシブルジョイントの最大応力発生時の挙動を示し、Fig.27 はそのときの応力値をプロットしたものである。フレキシブルジョイントを前方に配置した Type B が有利であり、Type Aはせん断モードにより高応力が発生していることがわかった。また、Fig.28に示すように台上試験においても同傾向が得られており、計算の妥当性が検証できた。

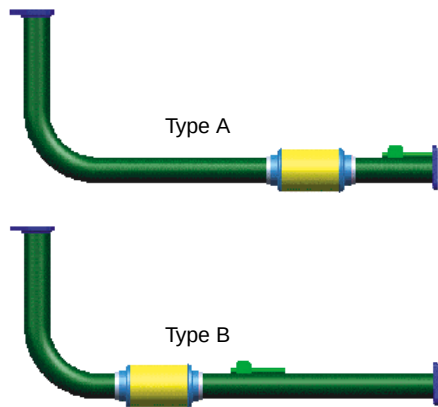


Fig.24 Comparative exhaust model

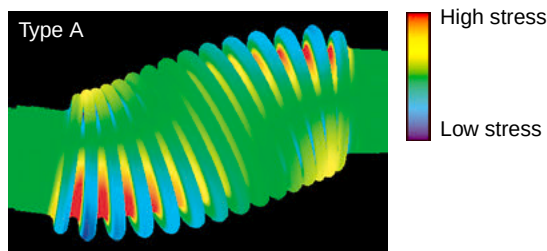


Fig.25 Stress distribution and behavior of flexible tube (typeA)

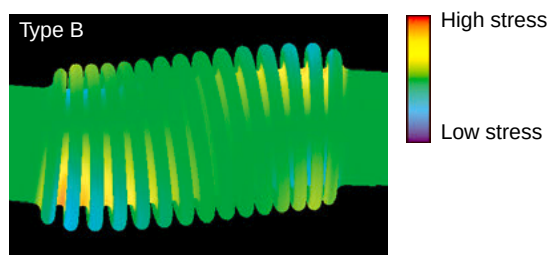


Fig.26 Stress distribution and behavior of flexible tube (typeB)

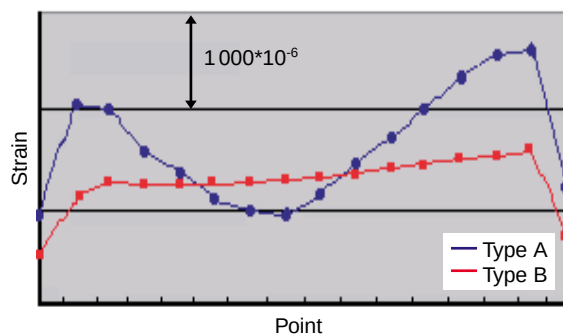


Fig.27 FE Analysis result

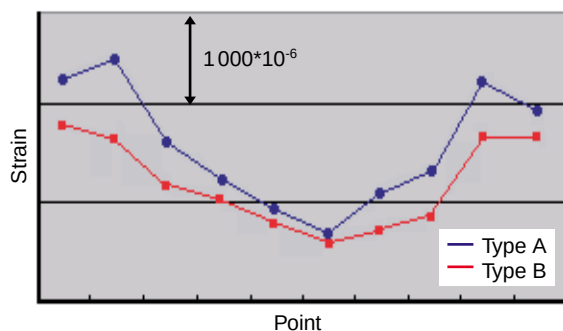


Fig.28 Rig test result

このように、図面段階からフレキシブルジョイントを含む排気系の動的な発生応力の予測や挙動解析ができ、効率の良い開発が可能となった。

7. まとめ

- (1) 非線形マップの採用と「ダミーグリッド手法」の考案により、フレキシブルジョイントやマウンティンググラバー等の非線形部品のモデル化が実現でき、排気系の非線形性を考慮した応力予測が可能となった。
- (2) フレキシブルチューブ、一般パイプ部、消音器等、形状によるモデル化が可能な部品については全てシェル要素またはソリッド要素で表現する事により応力集中箇所の詳細解析が可能となった。
- (3) 非線形領域の解析をFEモデルで可能としたことにより、振動解析モデルとの共用化が図れた。

参考文献

- (1) 田中 基八郎, 三枝 省三 共著: 振動モデルとシミュレーション, 東京, 産業科学システムズ, 1995, p.130-137
- (2) 佐藤 謙芳: モード解析の基礎と応用, 東京, 丸善株式会社, 1990, p.68-74, p.156-161
- (3) 戸川 隼人: 有限要素法による振動解析, 東京, サイエンス社, 1997, p.34-44
- (4) 三好 敏郎, 白鳥 正樹, 尾田 十八: 大学基礎 材料力学, 東京, 実教出版株式会社, 1984, p.77-p.84
- (5) 日本機械学会編: 機会工学便覧, 東京, 日本機械学会, 1977, p.1-9, p.31-40, p.88-90, p.126-145
- (6) セレンセンコガエフ, シュネイデロビッチ: 機械要素強度計算便覧, 東京, 森北出版株式会社, 1978, p.109-169
- (7) 藤田 廣一: 非線形問題, 東京, コロナ社, 1984, p.39-46

■ 著 者 ■



高賀 茂 巧



樋口 正 彦



中川 博 史



鵜飼 陽 太 郎



石 塚 歩