

球面ジョイントの非線形性を考慮した 排気系共振応力予測技術の構築

Development of Prediction Technology for Resonance Stress of Exhaust System by Considering
Nonlinear Properties of Spherical Joints

米 永 和 昭*
Tomoaki YONENAGA
堀 井 義 和*
Yoshikazu HORII

井 手 晴 夫**
Haruo IDE
中 川 博 史*
Hiroshi NAKAGAWA

樋 口 正 彦*
Masahiko HIGUCHI

要 旨

排気系全装状態での高サイクル振動応力を予測するため、実機応力測定と同等の結果を得られる高精度で汎用性のある予測技術を構築した。排気系高サイクル振動の現象を入力系と応答系の二つに分け、入力系は排気系に伝わるエンジン起振力の自由度と位相を複数次数考慮し、精度良く再現した。応答系は球面ジョイントの単体試験を実施し、スティックスリップ特性を取得し実験モデル化した。以上を反映することで、さまざまな排気形状に対し高精度な予測が可能となった。

ABSTRACT

A highly accurate and versatile prediction technology that provides results equivalent to stress measurement in the vehicle condition was developed. The purpose of this technology was to predict high-cycle resonance stress of the exhaust system in the fully assembled state. The phenomenon of high-cycle vibration of the exhaust system was divided into the two systems of an input system and a response system. The input system was accurately reproduced by considering the multiple degrees of freedom and multiple orders of phase of the engine excitation force transmitted to the exhaust system. The response system was experimentally modeled by conducting standalone tests of the spherical joint and obtaining the stick-slip characteristics. Application of the above enabled accurate prediction for various exhaust system shapes.

1. はじめに

近年、自動車に向上が求められている性能として燃費、エミッション、出力がある。排気系は、その性能向上のために、軽量かつ優れた昇温特性を求められるが、同時に高い信頼性を併せ持つ必要がある。

排気系の信頼性課題として、エンジン起振力に励起された共振現象による高サイクル疲労破壊があり、これを考慮した設計が必要である。

また、部品共用化の観点より、多くの車種で同一のホットエンド（主にキャタリストを含む部品）を共用しているが、コールドエンド（主にチャンバ、サイレンサを含む部

品）排気系バリエーションは増加傾向にあり、開発テスト工数増加に対する対応が求められている。同時に開発期間に対する短縮要望もあり、図面段階における短期間で精度良い高サイクル振動応力予測ができる Computer Aided Engineering (CAE) 技術構築が求められている。

従来より有限要素法 (Finite Element Method: FEM) による排気系を全装した状態での解析を、有限要素法 CAE ソフトウェアである NASTRAN による周波数応答解析を実施し、実機応力測定結果と相対比較をおこない対策検討に使用していた。

例として Fig. 1 に従来の解析手法による応力結果と、実機応力測定結果の比較を示す。モードごとの応力ピークの

* 四輪 R&D センター

** HONDA R&D AMERICAS, INC.

差が顕著な部分はあるが、対策検討用としての使用は可能なレベルである。

しかし、図面段階での仕様成立性判断をおこなうには、応力の絶対値評価が必要であり、この精度向上が課題となる。

FEMで精度の良い排気系アセンブリ解析を進めるには、部品間結合の適正なモデル化と精度の良いエンジン起振力のモデル化、さらに応答を精度良く再現するメッシュモデル作成の三つの課題がある。

とくに従来より部品間結合における条件設定の課題として、エンジンの揺動を吸収する役割をもつ球面ジョイント

(Fig. 2)のモデル化があった。ここには、排気ガスシールをおこなうための球面ガスケットが使用されており、特性として微小入力ではスティック状態を維持する。しかしある一定以上の入力に加わるとスリップ状態となり、フリクションを伴いながらしゅう動する。

例としてFig. 3に球面ジョイント付き排気系のシェーカ加振テストイメージを、Fig. 4に加振入力レベル違いによる周波数応答関数(Frequency Response Function: FRF)の変化を示す。入力点は入力伝達効率を考慮し、今回使用したエキゾーストパイプの重心近傍とし、応答点は排気系全体の7か所の平均値として応答影響を平準化し比較した。

この結果より入力レベルが大きくなるにつれて応答レベルが低下していることが確認できる。これは球面ジョイントがスリップ状態になり、排気系が分断されることによる剛性の低下を表している。応答レベルの変化は、応力レベルと密接な関係があるため、応力精度を向上させるには、この部分が入力変化に追従して、スティックとスリップの挙動が変化するモデル構築をおこなう必要がある。これを構築するには、球面ジョイントモデルに摩擦を考慮する必要があるが、従来の解析手法は周波数軸の解析手法であり、時間により挙動が変化するこの現象を考慮することができなかった。

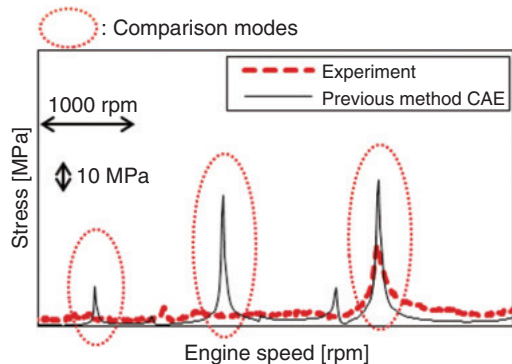


Fig. 1 Comparison of experiment and CAE by previous method

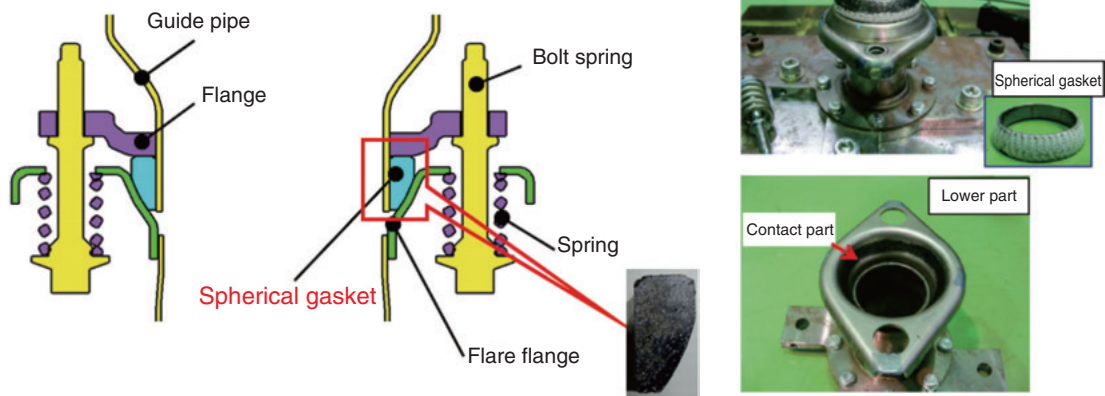


Fig. 2 Section and parts of spherical joint

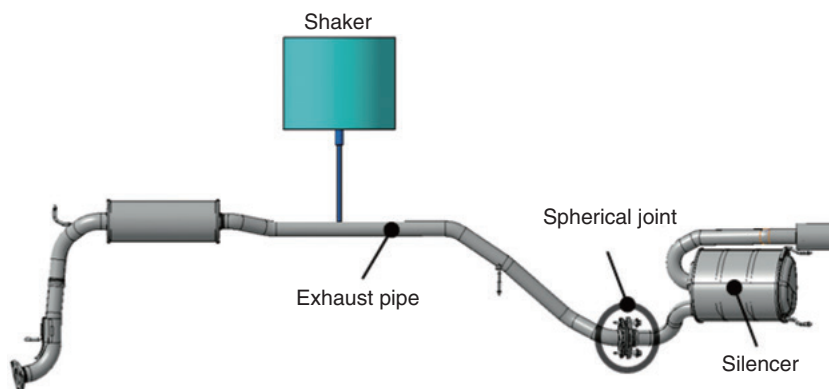


Fig. 3 Shaker test of exhaust system with spherical joint

今までも高サイクル振動挙動において、球面ジョイント挙動の影響について議論され、モデル化も試されているが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、時間による挙動変化を考慮した解析手法がない上に、対象周波数が比較的低周波数領域に限定されており、今回求めたい高周波数領域までをカバーするに至っていない。

本稿では、排気系高サイクル振動応力予測技術として、球面ジョイントの非線形性を考慮したモデル化、エンジン起振力のモデル化、精度の良いメッシュモデル化を実施し、時間軸で解析をおこなう過渡応答解析に反映することにより、CAE 精度を向上させ、実機応力測定相当の応力予測技術構築をおこなった手法について述べる。

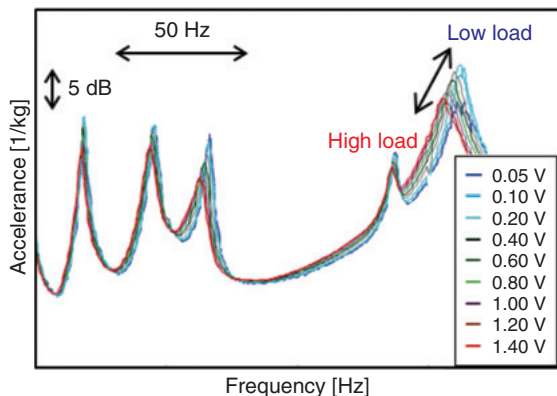


Fig. 4 FRF characteristics under different input conditions

2. 解析手法構築

解析対象部品は、排気系全装部品を構築する、直下コンバータ、エキゾーストパイプ、サイレンサとした。ここでは、Fig. 5 に示す検証用の簡易排気系を用い、手法構築を図った。

部品間の結合には球面ジョイントが使用されているため、しゅう動面にフリクションを考慮した実験モデルを定義した。

フリクションを考慮するには、排気系の時間変化による全体挙動を解く必要があり、その解析方法として過渡応答

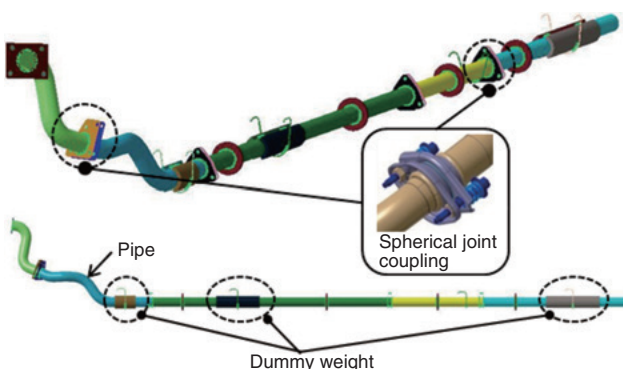


Fig. 5 Simple exhaust system layout for verification

解析があげられる。

しかし、メッシュモデルは多くの節点自由度を持つため、すべての節点自由度を用いた過渡応答解析は、計算負荷が大きくなる。これを解決するために、メッシュモデルをモーダル縮約して自由度を低減し、解析効率で有利となるモード合成法によりモーダル縮約モデルをアセンブリした。そして、このアセンブリモデルを使用した動解析結果より全体挙動を算出し、変位出力を詳細なメッシュモデルに与え、応力を求めた。

2.1. モデル構築

2.1.1. 球面ジョイント実験モデル化

球面ジョイントのモデル化には微小入力時のスティック特性と、大入力時のスリップ特性の二つの特性を考慮する必要がある。これらの特性取得方法として、球面ジョイントに単管を溶接したテスト治具を作成し、シェーカ加振テストによる回転剛性およびフリクショントルクの計測をおこなった。球面ジョイントのフリクション特性取得試験治具を Fig. 6 に示す。そして、テスト治具同様の解析モデルによる計算を実施し、テスト結果のスティック時のパネ値とスリップ時のフリクショントルクを同定することにより、スティックスリップ特性の実験モデル化を試みた。

フリクション特性取得方法として、倒れ方向の回転2自由度と、軸回り方向の回転1自由度でシェーカ加振テストを実施し、ヒステリシスループの取得をおこなった。シェーカ加振周波数は、治具の共振によるフリクショントルクへの影響を回避する必要がある。そのためにハンマリングテストによる FRF の共振周波数を確認し、この結果 (Fig. 7) より治具共振の無いことが確認できる 100 Hz での加振テストを実施した。

フリクション計測結果を Fig. 8 に示す。微小入力時はスティック特性を示しているが、ある一定の入力以上になるとスリップ特性を示し、ヒステリシスループを描く。この微小入力時の傾きはスティック時のガスケット剛性を

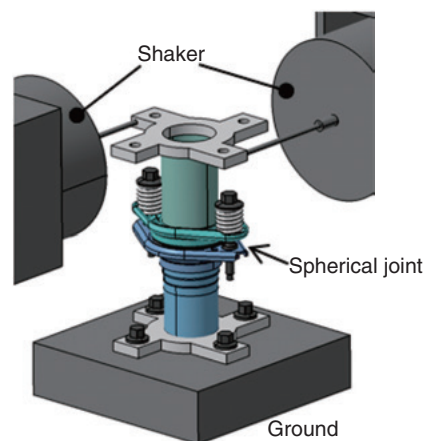


Fig. 6 Test equipment for measurement of friction characteristics

表し、ヒステリシスループの振幅は、スリップ時のフリクショントルクを表している。これらの結果よりスティックバネ定数とスリップ時のフリクション値を算出した。同時に入力違いによるフリクショントルクへの影響を確認すると、スリップ後の入力増加に対する変化は、変位は増加しているが一定の値を示すことがわかった。

次に、球面ジョイントの解析モデル概要を Fig. 9 に示す。このモデルは、入力がフリクショントルクより小さい場合は、Fig. 9 の右に示すスティックモデルはしゅう動せず、Fig. 9 の左に示すガasket 剛性を表すスティックモデルのみを使用する。入力がフリクショントルクより大きい場合は、スティックモデルに、スリップ時のフリクショントルクが追加され、しゅう動する。ここでは、回転3自由度

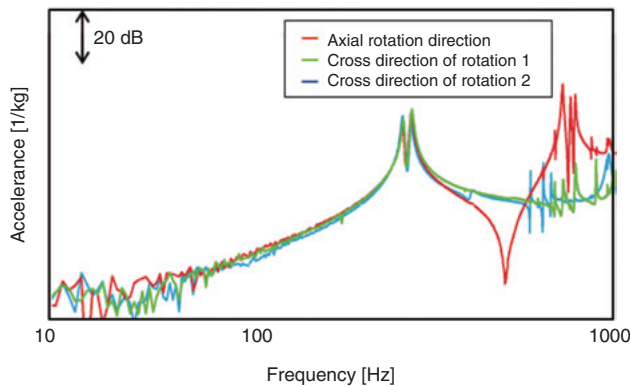


Fig. 7 FRF characteristics of spherical joint

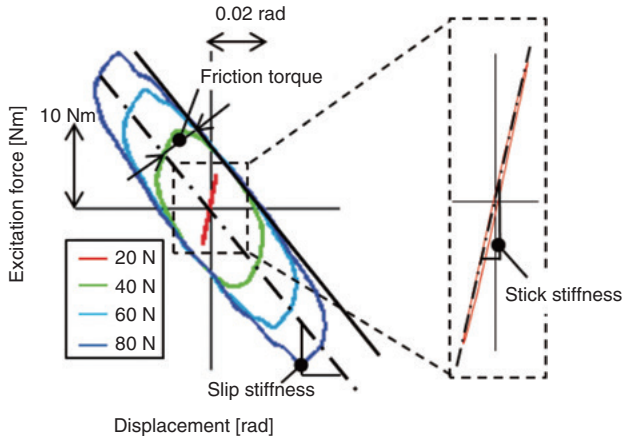


Fig. 8 Method of extracting spherical joint characteristics

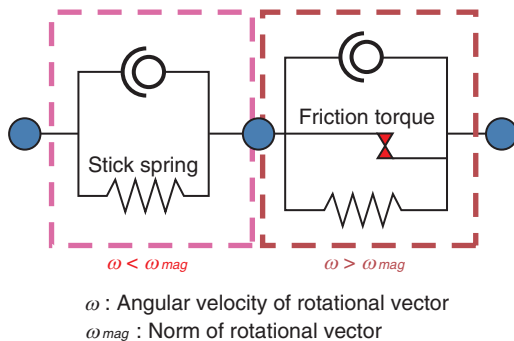


Fig. 9 ADAMS model outline of spherical joint

のフリクションを合力とする必要があるため、フリクションボールのモデルを Fig. 10 のように定義した。このモデルの回転3自由度のモーメントを表す式を以下に示す。

$$T_x = T_{x0} \cdot \frac{\omega_x}{\omega_{mag}}$$

$$T_y = T_{y0} \cdot \frac{\omega_y}{\omega_{mag}}$$

$$T_z = T_{z0} \cdot \frac{\omega_z}{\omega_{mag}}$$

T_{x0}, T_{y0}, T_{z0} : x, y, z 軸回りのフリクション

T_x, T_y, T_z : x, y, z 軸回りのモーメント

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$: x, y, z 軸回りの角速度

ω_{mag} : 角速度のノルム

以上を用いて機構解析ソフトウェア ADAMS で計算した結果と、計測結果の比較結果例を Fig. 11 に示す。入力による挙動の変化とスリップトルクの比較より、このモデルの入力に対する挙動変化と、スリップ時のフリクショントルクの幅が実機を再現できていることがわかる。

2.1.2. エンジン起振力モデル化

排気系高サイクル振動の起振源には主にエンジンの主要次数振動が大きく寄与している。起振源であるエンジンから排気系に伝わる振動特性として、主に燃焼指圧加振とレシプロ系慣性力加振、そしてパワープラント共振による

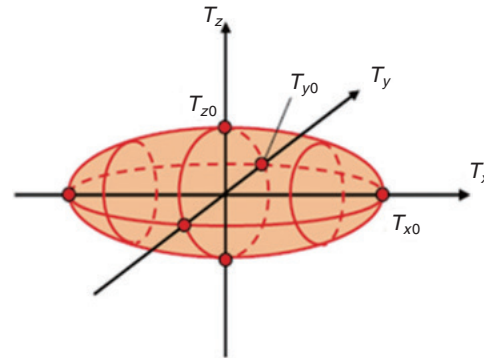


Fig. 10 Friction ball model

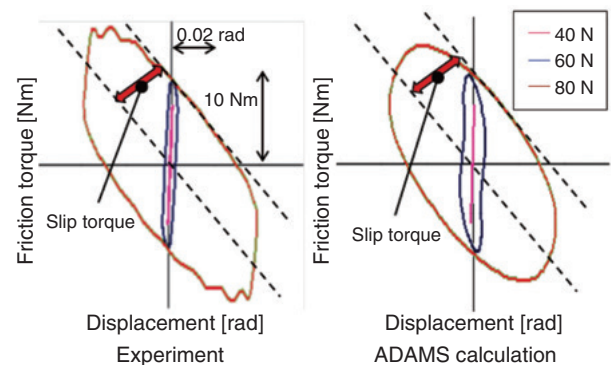


Fig. 11 Comparison of experiment and ADAMS calculation

加振があげられる。起振力を推定する手法として、レシプロ系挙動を計算し、FEM によるパワーブラント挙動を求める手法がある。しかし、この手法はモデル作成や計算に時間がかかり、今回おこなう解析には適さない。そのため、今回はこの入力境界条件の算出を、実機エンジンの起振力測定によって実施した。

エンジン起振力を精度良く計測するため、3 軸加速度センサにより、エンジン側排気系フランジ加速度を計測した。だが、エンジン変位は 3 並進 3 回転自由度を持っており、通常の 3 軸加速度センサで回転挙動を計測することはできない。そのため、Fig. 12 に示すようにフランジ締結点 3 点に加速度センサを配置し同時計測をおこない、計測した 3 点 3 並進自由度より、最小二乗法による 1 点 3 並進 3 回転自由度の位相つき剛体運動を推定した。

通常のセンサではエンジンベンチ内のノイズ影響により、安定した計測ができない。この影響を最小限とするため、チャージアンプ付きの加速度センサを使用し、センサ側で信号を増幅しノイズ影響を小さくした。

運転条件としては、アイドリングからレッドゾーンまでの指圧支配の全負荷と、慣性力支配のモータリング条件を計測した。計測した各運転条件より、排気系共振に寄与する主要次数の起振力を算出した。

2.1.3. 排気系メッシュモデル作成

解析対象部品を精度良く再現するために、メッシュモデルはシェルメッシュの 4 面体 1 次要素によるモデル化をおこない、形状が充分に再現できるメッシュサイズとした。要素サイズは、小さくするほど精度は向上するが、計算時間短縮と解析マシンの計算負荷低減の観点よりサイズを適正化した。そして、このメッシュモデルの物性値として、図面値から読み取った板厚と材料特性を定義した。また、モデル化の利便性向上として、溶接結合要素には Rigid Bar Element2 (RBE2)、集中マス定義には Rigid Bar Element3 (RBE3) を使用して要素数削減と簡便なモデル化を図った。

このモデルの精度検証例として、モード信頼性評価基

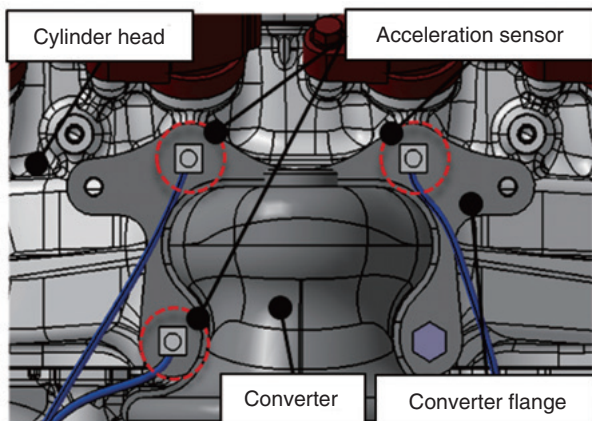


Fig. 12 Acceleration sensor installation locations

準 (Mode Assurance Criterion: MAC) を用いて、実機ハンマリング結果とのコリレーションをおこなった。コリレーション周波数は排気系アセンブリで 450 Hz までを対象とする。その比較結果を Fig. 13 に示す。この結果より、高い相関性が得られていることがわかる。

2.2. 動解析手法構築

動解析手法として、ADAMS を用いた過渡応答解析について述べる。

メッシュモデルをモーダル縮約し、ADAMS 上で球面ジョイントのモデルを用いてアセンブリすることによって、しゅう動部のフリクションを考慮した動解析を実施した。Fig. 14 に ADAMS を用いた解析手順を示す。使用する各解析部品のモーダル縮約周波数は、上限周波数を上げることによりアセンブリ共振特性を高周波数まで再現することが可能となる。今回、計算時間短縮とアセンブリ共振特性の再現性の観点より、解析モデルのモーダル縮約周波数を適正化し、上限を 1000 Hz とした。縮約モデルの精度検証例として、メッシュモデルの全節点自由度を考慮した NASTRAN と、モーダル縮約モデルを使用した ADAMS で、それぞれアセンブリ固有値解析をおこない、固有値誤

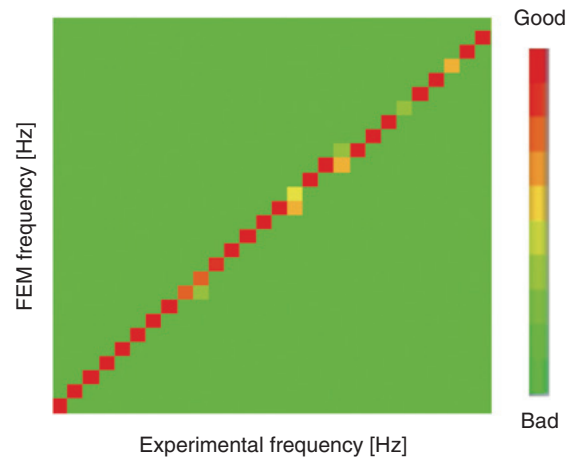


Fig. 13 MAC correlation results

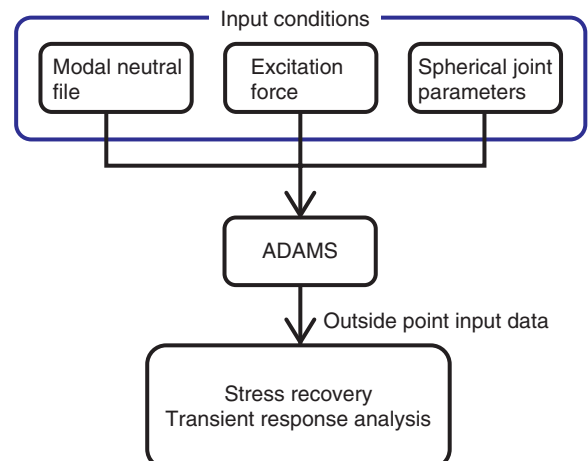


Fig. 14 Analysis procedure using ADAMS

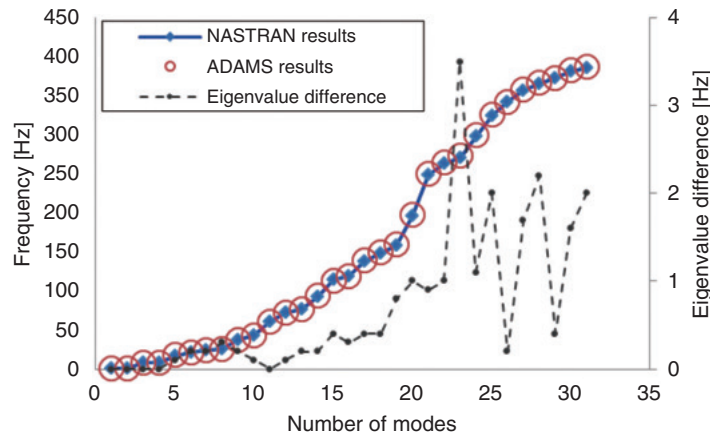


Fig. 15 Comparison of NASTRAN and ADAMS eigenvalue results

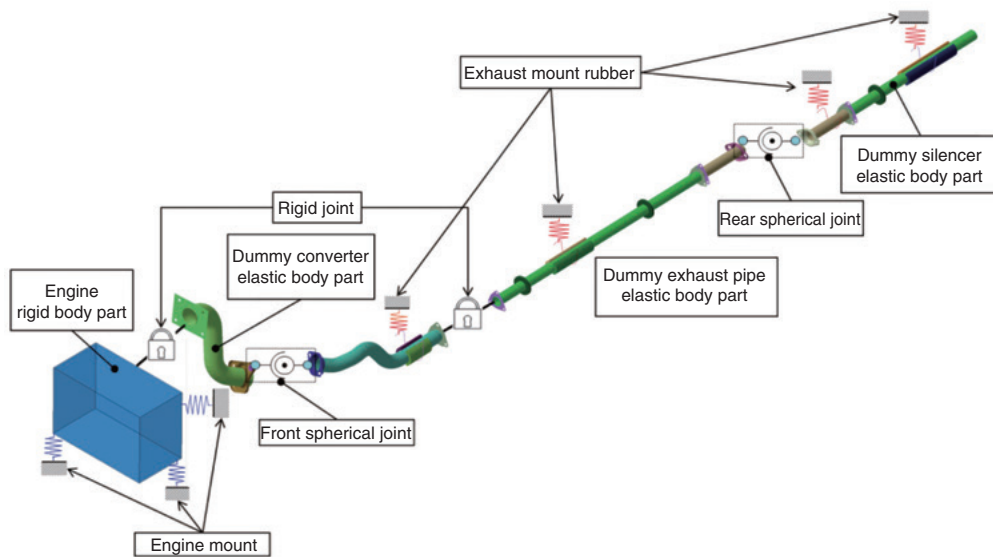


Fig. 16 ADAMS assembly model

差を確認した。比較結果を Fig. 15 に示す。この結果より固有値誤差は最大 3.5 Hz であり、縮約モデルの精度が充分であることがわかる。

この縮約モデルを、ADAMS 上で球面ガasketモデルを結合条件としてアセンブリした。ADAMS によりアセンブリした状態を Fig. 16 に示す。

入力加振データには、各計測次数成分の変位加振と位相を考慮した波形を ADAMS 上で合算したものを、時間軸の入力波形として与えた。

以上の条件で実施した過渡応答解析による、各縮約モデルの変位出力を基に、NASTRAN 過渡応答解析による応力リカバリをおこない、評価ポイントの応力を算出した。

3. 解析結果検証

3.1. 構築手法妥当性検証

解析結果検証として、従来解析と本解析手法、ならびに実機計測による応力結果比較グラフを Fig. 17 に示す。各モードの応力ピークを比較すると、従来手法で大きく応力

が発生していたモードが、本解析手法では実機同等の値になっていることがわかる。これは球面ジョイントのスティックスリップ現象により、力の伝達が分断されていることを表しており、今回構築した球面ジョイントモデルが、妥当性のあるモデルであることを示している。

3.2. 手法汎用性検証

本解析手法の汎用性の確認のために、量産車の排気系を用いた実機応力測定と、本解析手法による解析との結果比較をおこなった。対象となる排気系全景を Fig. 18 に示す。

図面段階での高サイクル振動応力予測とするために、球面ジョイント特性は今回構築したモデルとパラメータを使用した。メッシュモデルは 3D-CAD データを基にモデル化し、材料物性については剛性や密度の補正を実施せずそのまま定義した。実機応力測定と本計算手法による応力結果比較グラフを Fig. 19 に示す。

この結果より、共振周波数誤差は 3%、応力誤差は 20% であったが、図面ベースでの予測結果としては実用上十分な精度であり、本解析手法の妥当性と汎用性を示している。

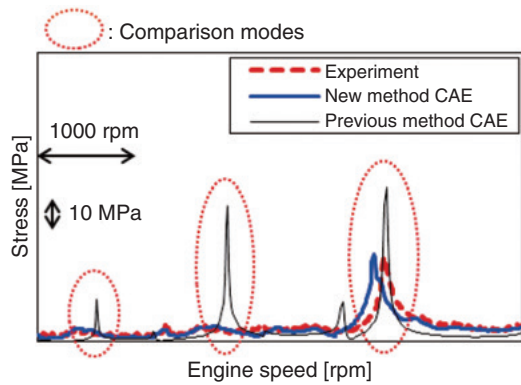


Fig. 17 Simple exhaust system model stress-analysis result

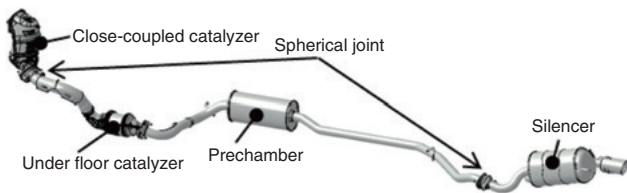


Fig. 18 Exhaust system for verification

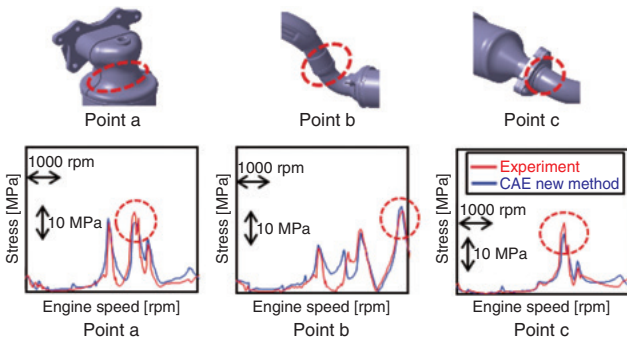


Fig. 19 Comparison of experiment and CAE by new method

4. まとめ

エンジン実用域での高精度な排気系共振応力予測技術を以下の手法によって構築した。

- (1) 球面ジョイントモデルは、実機のスティックスリップ特性を取得し、これを ADAMS モデルに反映することにより実験モデル化した。
- (2) 入力起振力を精度良く計測し、エンジン挙動と位相を複数次数考慮した入力モデルを作成し、解析入力条件として与えた。
- (3) メッシュモデルは、解析精度を充分確保できるメッシュサイズによるモデル化と、実機との MAC コリレーションを実施することにより相関性を高めた。

これによりさまざまな排気系違いの応力予測をモデルベースで実施することが可能となり、今後の試作機削減による開発スピードアップ、低コスト化、軽量化に大きく貢献できると考える。今後の発展性として、球面ジョイントが異なる車種の排気系応力予測も、今回の手法で予測可能と考える。

参考文献

- (1) 中川博史, 秋山英和, 結城一敏, 吉本秀之, 桜井雅人: 排気系における振動予測技術の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.127-134
- (2) 塩野目恒二, 丸山新一, 小林正成, 佐久間裕一: 球面継手を有する排気系の非線形振動解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.25-04, p.1-4(2004)
- (3) 杉村寛, 武井雅行, 宇野由久, 山岡裕生: エンジン・駆動系に起因する低周波振動の機構解析による予測技術の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.126-07, p.13-16(2007)

■ 著 者 ■



米 永 和 昭



井 手 晴 夫



樋 口 正 彦



堀 井 義 和



中 川 博 史