

特集 : Virtual Testing

9

パワートレインにおける機構解析ソフトADAMSの適用 Application of ADAMS to Powertrain Development

栗 栖 徹*¹ 藤 川 智 士*² 宮 内 勇 馬*³
Toru Kurisu Satoshi Fujikawa Yuma Miyouchi
小 泉 昌 弘*⁴ 廣 部 敏 之*⁵ 福 島 小 巻*⁶
Masahiro Koizumi Toshiyuki Hirobe Komaki Fukushima

要 約

パワートレインは当社のブランド戦略を支える重要な技術要素として、その性能・品質は世界に通用すべく、要求が非常に高度化してきている。短納期で迅速にこれらの要求に応えるため、エンジン、ドライブトレインの機構の挙動によって発生する様々な現象を精度よく解析する必要性が高まっている。そこで、汎用機構解析ソフトADAMSを当社で開発・生産しているレシプロエンジン、ロータリエンジンならびに手動/自動変速機へ適用し、NVHや信頼性、燃費などの面で多くの成果をあげてきた。それらの事例について紹介する。

Summary

Powertrain is one of the most important technological elements for supporting Mazda's brand strategy, of which performance and quality require substantially high competitiveness of worldwide level. To speedily meet the requirement in a short period, requests for accurate analyses of powertrain behavior with multi body dynamics are on the increase. Our application of ADAMS to various types of engines and transmissions under development and production at our plants has had much effect on fuel economy, NVH, and reliability. This paper introduces some applicable examples.

1. はじめに

エンジン、ドライブトレインは、往復運動や回転運動など機構の運動によって燃焼エネルギーを回転運動に変換し駆動力として車輪に伝えている。そのため、動弁系のジャンプ・バウンスをはじめ、変速ショックなど機構に起因する様々な問題を発生しやすい。従来は、そのような問題に対し簡単な設計計算式で済ませたり、比較的自由度の少ない解析モデルを使用した内製ソフトを使用して解析してきた。それにより、問題の早期解決をはじめ、より性能・品質のよい商品を開発することに貢献してきた。そして、CAEの発展・普及とともに、試作・実験を最小限に抑え、CAEを使い設計初期段階で仕様を決め開発期間を短縮することが、競争力上必要になってきた。そのためには、飛躍的に高精度な解析解が必要であり、エンジン・ドライブトレインへ汎用機構解析ソフトADAMSを適用し、より実際

の機構に近い高精度のモデルを使用した解析に移行してきた。本稿では、その適用事例について紹介する。

2. レシプロエンジンへのADAMS適用

2.1 補機駆動ベルトへの適用

補機駆動ベルトは、レシプロエンジンの開発においてスリップやばたつきなどによる異音を発生しやすい。そのため、機構解析によりレイアウトの適切性や寿命、異音に対するポテンシャルを開発の早い段階で把握し、防止しなければならない。また、異音が見つかった場合にも迅速なメカニズム究明と適切な対策の実施が必要で、実験結果で決定した対策だけでは問題が迅速に解決しないため、機構解析を活用して発生メカニズムの明確化やいくつかある対策案の中から効果のある対策を試作前に絞込むことが有効である。

*1~6 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.

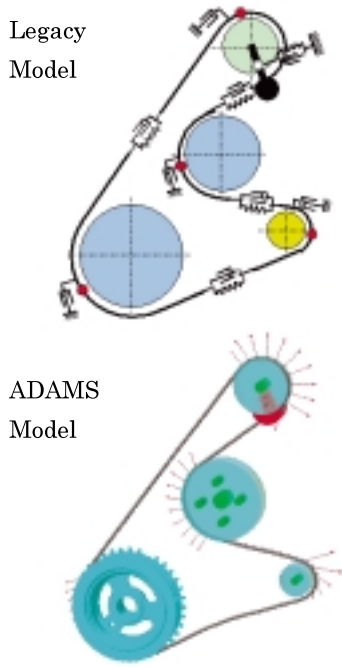


Fig.1 Accessory Drive Belt Motion Model

Fig.1は、補機駆動ベルトの挙動解析モデルの例である。従来使用してきた内製ソフトは、ベルトスパン部分を伸び方向のばね・減衰要素で扱ったモデルを使用していた⁽¹⁾。このモデルでもスリップは精度よく予測できるが、弦振動が考慮されておらず、ばたつきによる音や干渉は予測できなかった。ADAMSではベルトスパン部分もリンクとしてモデル化し、弦振動も予測可能である。それにより、弦振動ノイズや部品間の干渉についても検討が可能になった。

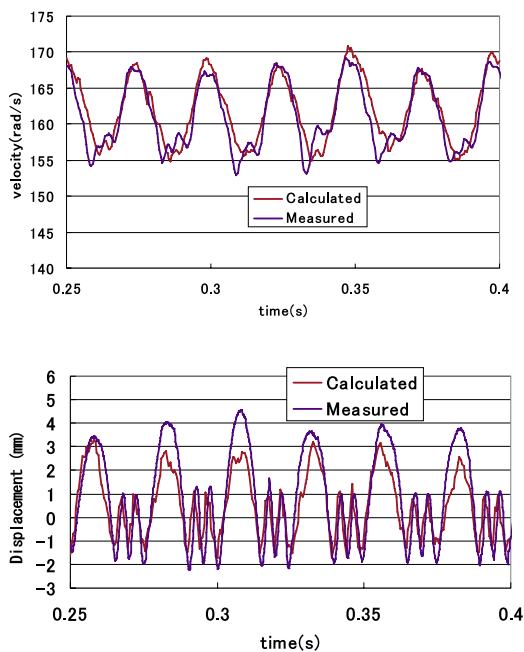


Fig.2 Validation of Pulley & Belt Motion

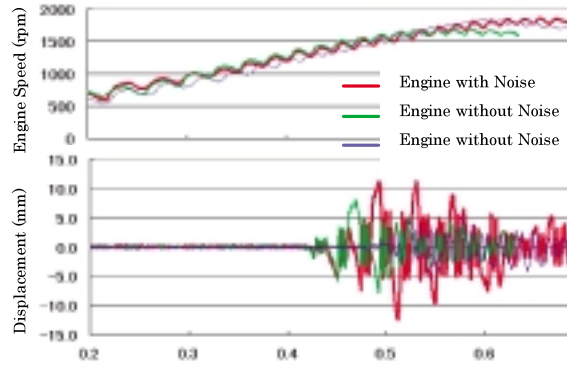


Fig.3 Calculated Belt Motion at Car Launch

Fig.2に検証結果の一例を示す。プーリー回転速度、ベルト弦振動速度とも波形の特徴・周期がよく一致し、ばたつき振幅には最大2mm程度の差異があるが、実験のばたつきを考慮すると十分な精度で予測できている。Fig.3は、発進操作時に発生した異音の原因について解析を行った例である。排気量の違いにより数mm補機レイアウトが異なる同一シリーズエンジン間で音に差があったが、解析結果ではばたつきに差が現れ、異音との相関もよく現象を再現できることが分かり、対策案の効果検討に活用できた。

2.2 動弁系への適用

動弁系は、カムによる強制運動系で、古くからばね・質点系モデルによる挙動解析が行われ、当社でも内製シミュレーションプログラムをジャンプ・バウンスの評価に使ってきた⁽²⁾。ただし、計算機能力やモデル化の限界などからバルブ1本だけの小規模モデルを使い、カム軸のねじりや他気筒の影響などを考慮していなかった。しかし、軽量化・長寿命化などの対応によって、気筒連成による共振など従来のモデルでは対応できない問題の予測が必要になってきた。

そのため、ADAMSを適用しカムシャフト・スプロケットやチェーンなどを含めた動弁駆動系全体のモデルを作成し、騒音や信頼性の評価を実施している。この例を以下に示す。

カムシャフトには、カムプロファイルに起因するフォロワ慣性力およびバルブスプリング反力によりねじり方向のモーメントが発生する。場合によっては過大なねじりモーメントによって騒音や、信頼性の問題が発生することがある。そのため設計初期段階でカムシャフトのねじりモーメントを精度良く予測することが重要である。そこで、ADAMSにより、カムシャフトの弾性を考慮可能な動弁系機構モデルを開発した (Fig.4) それにより、カムシャフトのねじり共振による過大なモーメントの発生等、動弁系諸元がカムシャフトねじりに与える影響を明らかにすることができた。

また、燃費と出力を両立する狙いで、負荷や回転数に応

じて開弁量を任意に制御するため、リフト量、弁開期間・閉閉タイミングを連続的に変更可能な連続可変動弁系 CVVA (Continuously Variable Valve Actuation) と呼ばれるタイプの動弁系がBMW社のValvetronic[®]の量産を機に注目を集め、近年各社から数多く提案されている。新機構の連続可変動弁系は多くのリンクや摺動面を持ち、それらによってバルブのリフト量が決まり、摺動部の摩擦挙動も支配される。その機構の成立性検討のためには、機構運動解析は必須ともいえ、他社提案のCVVAのベンチマーク活動や当社オリジナル機構の評価のために解析を行っている (Fig.5)



Fig.4 Valvetrain Dynamics Model



Fig.5 CVVA Model

3. ロータリエンジンへの適用

ロータリエンジンは、燃焼室の摺動シール部が多く、シール性向上が出力・燃費の向上の鍵を握っている。1961年、当社でロータリエンジン開発に着手した当初からシール技

術の開発には注力してきたが、従来の実験主体の開発では、シール挙動の把握が難しく、地道な開発活動により徐々に改善してきたが、改善に長い期間を必要とした。RX-8搭載のRENESESの開発においては、出力・燃費の革新的向上を効率的に実現するためADAMSを適用して、サイドシール、アベックスシールの挙動を解析し、シール性改善の検討を行った。

3.1 アベックスシールのシール性解析

レシプロエンジンのピストンリング同様、燃費・性能から、シールとハウジングの間にガス漏れのもとになる微小隙間が発生しないように設計することが重要である。本例ではこの隙間の発生を評価するために、アベックスシールとトロコイド面との間にかかる荷重が0になる状況が発生しないかを確認する。この評価のために、ロータ、アベックスシール、スプリング、ガス圧、スプリング力、慣性力をモデル化した (Fig.6)。このモデルにより計算した押し付け荷重と挙動を、Fig.7に示す。新開発したRENESESでは、常にアベックスシールとトロコイド間に荷重が作用しており、シールの浮き上がりによる隙間が発生していないことが分かる。このようなシール性改善により、出力を3PS改善することができた。

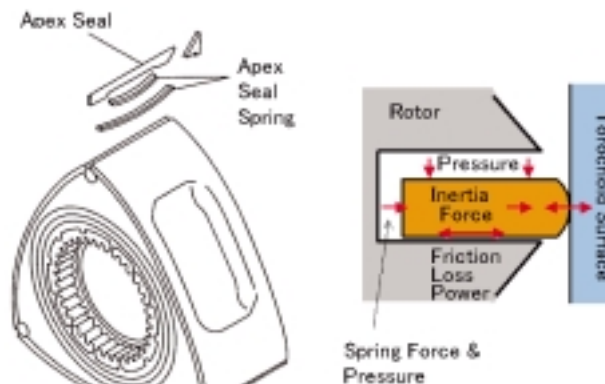


Fig.6 Modeling of Apex Seal Motion

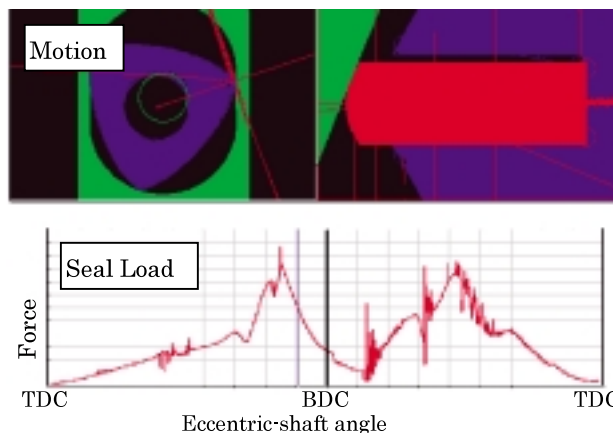


Fig.7 Load between Apex Seal and Trochoidal Surface

3.2 サイドシールのシール性解析

サイドシールは燃焼室/サイドハウジング間のガスシール機能を有し、サイドハウジング面への追従および、シール溝面への密着が必要となる。しかしながら、ロータの機構上、サイドシール/ハウジング間に働く摩擦力は同一方向でなく、サイドシールのリーディング側、トレーリング側で逆方向に働く場合がある。それにより、摩擦力と圧力、慣性力のつりあいによっては、サイドシールがシール溝面から離れ、シール機能が低下し、燃焼室からサイド面へのガス漏れが発生する可能性がある (Fig.8)。そこで、シール溝内において、ガス漏れを発生させる異常挙動がないかを検討した。解析モデルは、サイドシールを20分割した多質点モデルとして、各質点をばね要素で結合し、弾性を表現している。また、サイドシールにかかる圧力、慣性力、スプリング力をそれぞれモデル化している。解析の結果、摩擦力の影響は小さく、圧力の影響が支配的で、サイドシールは溝内で安定しており、シール性を悪化させる異常挙動はないことが分かった (Fig.9)。

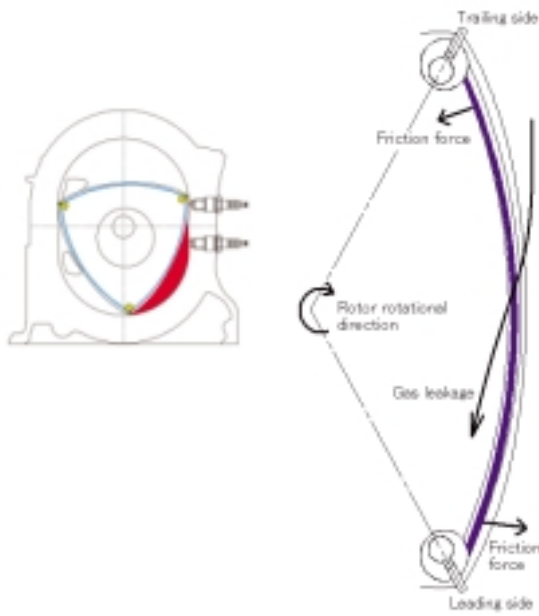


Fig.8 Modeling of Side Seal Friction Force

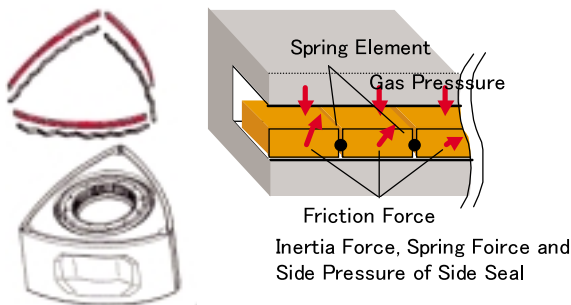


Fig.9 Modeling of Side Seal Dynamics

4. ドライブトレインへのADAMS適用

4.1 駆動系の振動に関して

次に、駆動系を主体とするシステムティックなNVH問題にADAMSを適用している事例を紹介する。

駆動系はATのトルクコンバータやロックアップダンパ、あるいはドライブシャフトの等速ジョイント等、非線形振動構造が多く、複雑な共振現象を示す。

更に200Hz以下の低周波領域では、マウント、サスペンションおよびタイヤ特性と連成し合い、振動現象は、より複雑なものとなっている。

これらの振動現象に対して、関連するユニット、部品を全てADAMSでモデル化したフルビークルモデルを開発し、必要に応じて実際の走行状態を作り出すことで、その性能を予測している。

4.2 AT車アイドリング振動への適用

近年、燃費改善のために、アイドリング回転の低回転化が必要となっているが、低回転化はエンジン角速度変動の増加によるアイドリング振動の悪化を伴う。アイドリング振動は、エンジンの燃焼圧が加振源となり、トルクコンバータによる引き摺りトルクや、ドライブシャフトの等速ジョイント構造による摩擦抵抗、更にタイヤ、マウントおよびサスペンションのバネ特性が複雑に絡み合う振動現象である。このため、アイドリング振動の机上予測モデルを開発し、その性能の予測と新たな振動低減技術の研究を行っている。

Fig.10にアイドリング振動の予測を目的に開発したAT車のフルビークルモデルを示す。

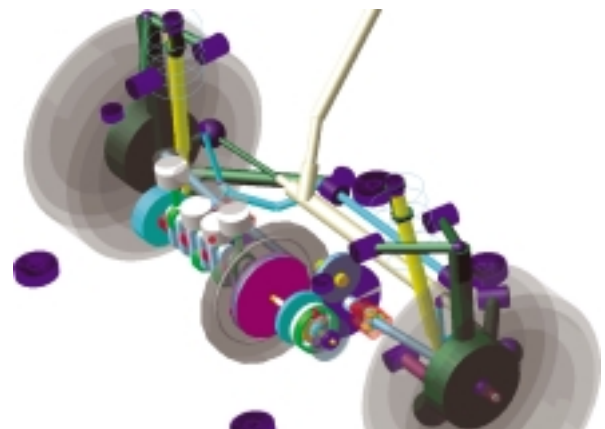


Fig.10 AT Full Vehicle Model

本モデルではこれらの機構、振動特性を全てADAMSでモデル化し、実測のエンジン燃焼圧を入力として、車両、駆動系各部の振動を予測している。

Fig.11にアイドリング振動時の主要な車体入力箇所であるホイールハブ部の左右振動の予測結果と実測結果を示す。

過去、簡易モデルやFEM系モデルでは予測できなかった低回転化に伴う振動悪化が予測できており、このモデルをベースに、等速ジョイント構造の違いによる振動への影響を研究している。

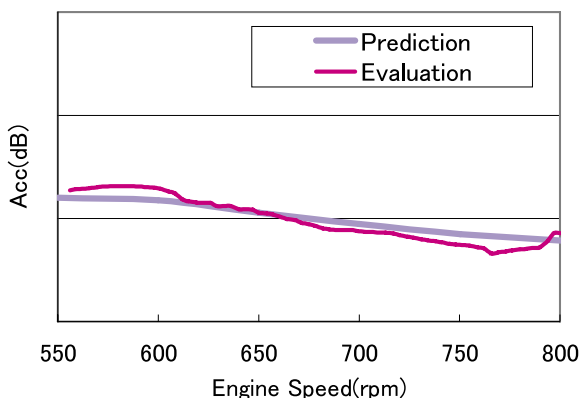


Fig.11 Validation of Wheel Hub Vibration

Fig.12は、そのジョイント構造を変更した場合の振動予測結果である。この事例では、車両との関係を考慮した最適なジョイント構造を早期に仕様確定することができた。

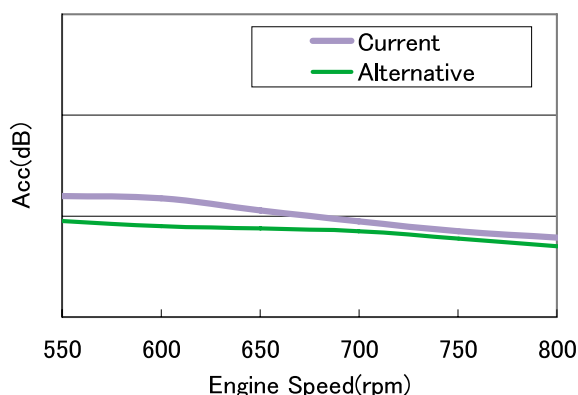


Fig.12 Wheel Hub Vibration of Alternative Joint

4.3 AT車ロックアップこもり音への適用

同様に燃費改善上重要であるAT車のロックアップ回転数の低回転化も、広範囲の振動特性の影響を受ける。

ロックアップ範囲を低回転化する場合、アイドル振動同様、エンジン角速度変動の増大とともに、駆動系のねじり共振レベルの上昇により、こもり音の悪化を伴う。

ADAMSのフルピークルモデルで、この性能予測と対策検討に取り組んだ。

こもり音においては、ロックアップダンパのねじり振動特性が大きく寄与する。このためダンパの持つ履歴減衰構造によるスティック・スリップの非線形性を含め、ダンパ構造を厳密にモデル化した。

Fig.13は、ロックアップ時におけるドライブシャフト上のエンジン回転2次トルク変動の予測結果と実測結果を比

較したものである。このグラフのようにトルク変動予測値は、実測とよく一致したので、本モデルを用いて、こもり音を悪化させずロックアップ範囲を低回転化できる構造を求めた。

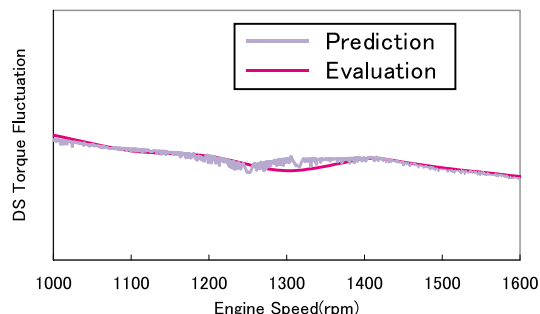


Fig.13 Validation of Drive Shaft Torque Fluctuation

一般には、ダンパバネのねじり剛性を低減すればねじり共振周波数が低下し、こもり音も低減するが、バネ剛性を低減する構造はユニットの全長アップを伴うため、バネ剛性に頼らない構造を解析によって検討した。

Fig.14は、その改善構造を採用した場合のドライブシャフトのトルク変動予測結果である。ダンパのバネ剛性を低減しなくても、履歴減衰構造と剛性のバランスを最適化することで、振動悪化なく、ロックアップ範囲を低回転化できることが分かった。本構造を試作し、実験した結果、車内音で2～5dBのこもり音低減を確認した。このようにADAMSを活用することによりロックアップ範囲の低回転化が実現できた。

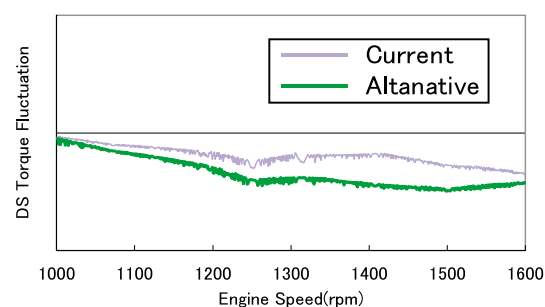


Fig.14 Drive Shaft Torque Fluctuation of Alternative Damper

4.4 MT車クラッチ締結ショックへの適用

最後にMT車への適用例について紹介する。

MT車では、クラッチの締結時に発生する車体のショック問題にフルピークルモデルの解析を適用した。

FF車の場合、変速時に急激なクラッチ締結を行うと、パワートレインのロール振動が発生し、それが車体の不快な前後振動となる。

本モデルではクラッチとフライホイールの締結構造を詳細に作りこんで、この現象を予測した。なお、本性能ではエンジン角速度変動の影響はないため、エンジンからの入力には運転条件に応じたトルクの負荷のみとした。また、前述のモデルが停車状態や、角速度変動成分のみの非走行モデルであったのに対し、本ショック性能は車速の変化とタイヤのスリップの影響を考慮する必要があるため、路面とタイヤ間の摩擦を定義した走行可能なモデルとした。Fig.15にそのモデルを示す。

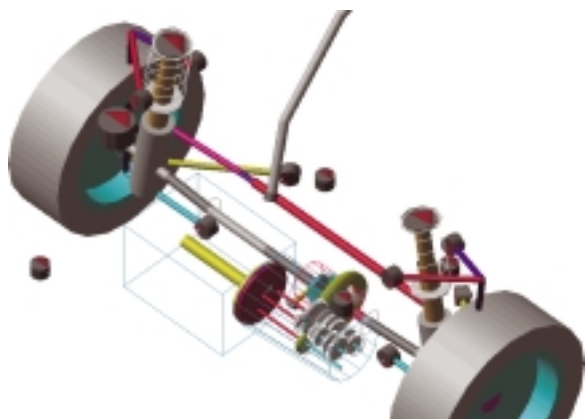


Fig.15 MT Full Vehicle Model

急激なクラッチ締結を行う場合、車体への主要なショック入力箇所となるマウントの前後変位にて予実差を検証した結果をFig.16に示す。ピーク特性はほぼ一致し、挙動を予測可能なことが分かったので、このモデルを使用して、クラッチねじりバネの低剛性化による車体の前後振動低減構造を検討し、体感振動を約15%低減できる構造を提案した。

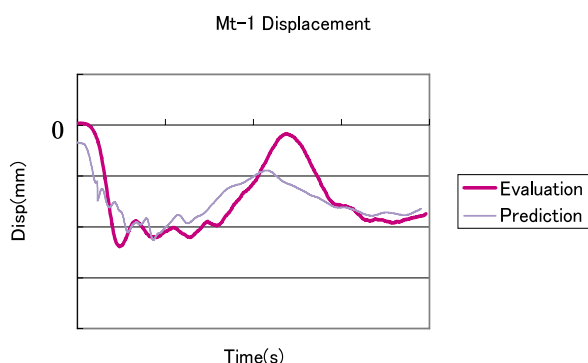


Fig.16 Mount Displacement

開発車で試作評価した結果、ショックをほとんど不快と感ぜないレベルの改善が確認できたため、採用した。

4.5 ドライブトレイン系まとめ

エンジンから駆動系、そして車両を含めたフルビークルのADAMSモデルを開発し、ユニット単体では予測不可能であったこれらの複合性能の机上予測を可能とした。

5. おわりに

パワートレインにおけるADAMS機構解析の適用事例について紹介した。ここに紹介した以外にも様々な解析を行っており、ADAMS機構解析は当社のパワートレイン開発にはなくてはならないものとなっている。今後も更に積極的に解析を適用し、マツダブランドを具現化したお客様に喜んでいただけるパワートレインを提供していく所存である。なお、ドライブシャフトの詳細モデルに関しては、(株)NTNにて開発いただいたモデルを使用しており、この場を借りて御礼申し上げる。

参考文献

- (1) 栗栖：エンジン補機Vベルトスリップ挙動のシミュレーション，自動車技術会秋季大会，No.195 (1997)
- (2) 栗栖他：動弁系における解析技術について，自動車技術，Vol.46，No.11，P86 (1992)
- (3) R.Flierl，M.Klüing：The Third Generation of Valvetrains-New Fully Variable Valvetrains for Throttle-Free Load Control，SAE Paper，2000-01-1227 (2000)

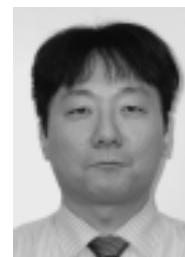
著者



栗栖 徹



藤川智士



宮内勇馬



小泉昌弘



廣部敏之



福島小巻