

アクティブエンジンマウントの開発

Development of Active Control Engine Mount

松岡 英樹*
Hideki MATSUOKA

三笠 哲雄*
Tetsuo MIKASA

根本 浩臣*
Hirotomi NEMOTO

要 旨

3リッター V6 可変シリンダエンジン搭載に伴う完成車の振動騒音対策技術としてアクティブコントロールエンジンマウントを開発した。本研究では、トルク変動により発生するエンジン振動に限定すれば、クランク回転変動からエンジン振動を推定できることに着目し、荷重や加速度などの専用センサを使用しないフィードフォワード制御アルゴリズムを構築した。アクチュエータは高応答で低発熱のリニアソレノイドタイプを専用開発し、液封マウント内部の加振板と独自の連結構造をとることにより信頼性を確立した。車両搭載による試験の結果、3気筒運転においても全筒運転と同等の振動騒音性能を得ることができた。

ABSTRACT

An active control engine mount system has been developed to control noise and vibration in a completed vehicle employing a 3-liter V6 cylinder-on-demand engine. The research described in this paper focused on the fact that engine vibrations caused by fluctuations in torque can be estimated from fluctuations in crank revolution, and developed a new fixed feed forward control algorithm which does not employ sensors such as a load cell or an accelerometer. A higher responsive low-heat linear solenoid actuator has been developed for use in the system, and its unique coupling structure with an excitation plate inside the hydraulic engine mount makes it extremely reliable. The results show that noise and vibration performance at three-cylinder drive is equivalent to that obtained at full-cylinder drive.

1. はじめに

アクティブコントロールエンジンマウント(Active Control Engine Mount: 以下 ACM)技術は、エンジン回転に同期したパルス参照信号としてエンジンマウントをアクティブに動作させるものであり、1980年代から研究が行なわれている⁽¹⁾。制御方式として、荷重センサを用いエンジン振動の入力荷重を観測しキャンセルする方法や、車体側の振動騒音(以下 NV)の評価点をマイクロホンや加速度計により直接観測しキャンセルする方法などの適応フィードフォワード制御が検討されてきた。90年代後半に入り、二つの ACM が実用化された。一つは負圧アクチュエータをマップ制御により駆動する方式⁽²⁾。もう一つは電磁アクチュエータを適応制御により駆動する方式⁽³⁾である。前者は機能をアイドル領域に限定し、極めてシンプルなシステムで実現している。後者は 130Hz までの広い帯域での制御を実現しているが、専用の荷重センサや磁石付き電磁アクチュエータを

使用していることから、システムコストが高く重量が大きい。本研究では、可変シリンダシステム(Cylinder on demand system)を搭載したエンジンを対象とし、コスト低減の観点から専用センサが不要な制御方式と、気筒休止する回転数領域で十分な振動遮断性能と信頼性を確保できる ACM の検討を行なった。

可変シリンダシステムは、一定速や減速など軽負荷の運転時に片側バンク 3 気筒のバルブを閉じたまま停止させることにより、ポンピングロスや燃費を低減し大幅な燃費向上を実現する技術である。しかしながら 3 気筒運転では、爆発気筒の減少にともなう基本次数の半減と 1 気筒あたりの仕事量増大による燃焼圧力の上昇により振動振幅が増大する。したがって従来のエンジンマウントでは振動遮断量が不足し、完成車における NV 性能の悪化が最大の懸念のひとつとなっていた。今回の ACM 開発の目的は、3 気筒運転を意識させない NV 性能を、コスト上昇を最小限に抑え実現することである。

*栃木研究所

2. 概要

2.1. V6 可変シリンダエンジンの振動

一般的にエンジンの振動は、構成部品の運動にともなう慣性力に起因するものと燃焼に起因するものに分類される。60 度 V6 可変シリンダエンジンの 3 気筒運転時の振動成分はエンジン回転の 1.5 次成分が主であるが、ピストン・クランク系の運動にともなう慣性力は運転気筒数に関係無くバランスしているため、燃焼に起因するものが主成分となる。したがって、燃焼圧力やそれにより発生するクランクの回転変動を捉えればエンジン振動が推定でき、ACM の制御に利用できる。

2.2. システム概要

システム構成を Fig. 1 に示す。V6 パワープラントは、サブフレーム上の前後 2 箇所の ACM とトランスミッション下部、および左右のサイドフレーム上にマウントされる。前後の ACM 配置ポイントは、燃焼によるエンジンの回転振動が上下方向に発生し、完成車の NV 事象への寄与率が高いため、ACM が最も効率的に作用する。ACM コントロールユニット (Electronic Control Unit: 以下 ECU) は室内に配置し、エンジン ECU と結線され、ACM 駆動用ハーネスはエンジンルーム内の 2 つの ACM と結線されている。

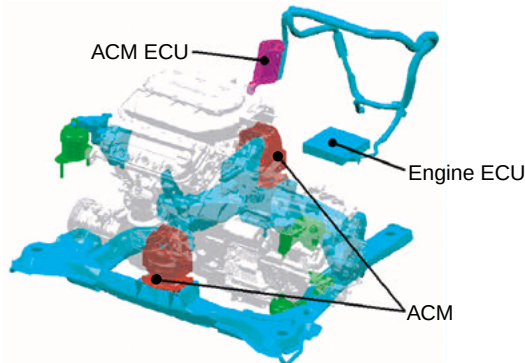


Fig. 1 ACM system configuration

Fig. 2 にブロックダイアグラムを示す。ACM ECU はエンジン ECU から既存のエンジン制御用クランクパルス信号とシリンダパルス信号を受取る。クランクパルスからはエンジンの燃焼時に発生するクランクの回転偏差を検出し、シリンダパルスは制御における位相基準として用いている。

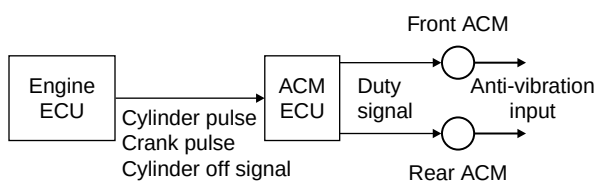


Fig. 2 Block diagram of ACM system

これによりエンジン振動の大きさおよび位相を推定し、ACM 駆動用のデューティ信号を決定、ACM 内部の加振板をアクチュエータで駆動するシステムとしている。

3. 制御方式

3.1. エンジン起振力とクランク回転トルク

Fig. 3 に一般的なピストン・クランクモデルを示す。爆発に伴う力 F は、コンロッドの傾き β によりシリンダ壁面を押す力 F_s 、コンロッドを押す力 F_c に分かれる。

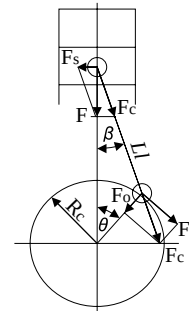


Fig. 3 Piston-crank model

燃焼によりピストンがシリンダ壁面を押す力 F_s と、クランクを回転させるトルク T_q は以下のように表すことができる。

$$F_s = F \tan \beta \quad (1)$$

$$F_c = \frac{F}{\cos \beta}$$

$$\begin{aligned} T_q &= F_c R_c \sin(\theta + \beta) \\ &= F R_c \sin(\theta + \beta) / \cos \beta \\ &= F R_c \left(\sin \theta + \frac{1}{2\lambda_c} \sin 2\theta \right) \quad (2) \\ \lambda_c &= L_l / R_c \end{aligned}$$

ここで、クランクの位相 θ の影響について計算すると、3 気筒運転状態の点火時期 ($\theta = 0 \sim 20^\circ$) では F_s と T_q はほぼ比例関係とみなすことができる。これにより、クランク回転変動をクランクパルスより検出し P-P 値を演算処理することでエンジン振動の大きさを推定することができる。位相についても最大 P-P 値発生タイミングとシリンダパルス (TDC 基準パルス) を比較することで算出が可能となる。

3.2. 制御アルゴリズム

制御アルゴリズムの詳細を Fig. 4 に示す。本方式は 3.1 で述べたエンジン振動の推定結果に基づきアクチュエータを駆動する電流波形を決定している。振動計算部はクランク回転の P-P 値の算出と、ピークのタイミングと TDC のタイミングを比較し位相の算出を行なう。次にデューティ

制御部は、フロント ACM とリア ACM それぞれを周期毎にエンジン振動波形を相殺できるマウント動作となるように、駆動周期内にデューティ信号の集合体を用いて組み合わせ、TDC毎の基準パルスから求めた位相により出力制御を行なっている。

本方式は、エンジン運転状態において固定されたマップを持ち替え制御する方式に対し、エンジンの回転数や負荷などの運転状態が変化や劣化した場合も常に追従できる点において優位性がある。

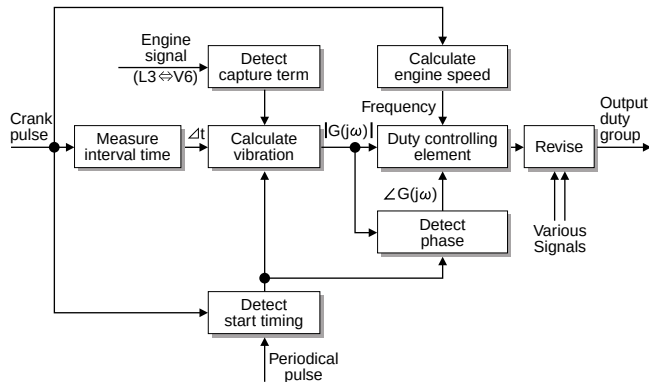


Fig. 4 Detailed block diagram of ACM

4. アクチュエータ

ACMのアクチュエータに求められる性能として、高応答／高推力、小型軽量、コイル発熱最小、信頼性確保、低コストが挙げられる。これらの要求性能に対し各種の電磁アクチュエータの比較を実施した。その結果、各性能のバランスに優れたリニアソレノイド方式を選択し、専用開発を行った。

4.1. 磁気回路特性

推力を発生する空隙の形状は、推力ーリフト特性が安定するテーパ構造(Fig. 6)を採用した。磁気回路は、鉄損とコイル銅損が最小となる

$$d\phi/dU = Pg \quad (3)$$

が成立する構造とし、要求特性を満足させた。具体的には Fig. 5 に示すように鉄心部磁化曲線と一定電磁エネルギー U_1 (=印加電流 * コイル巻数) から $\theta = \tan^{-1}Pg$ (Pg は空隙部パーミアンス)の傾きで伸びている直線との交点P(有効磁束 ϕ)において $\alpha 1$ と $\alpha 2$ を近似するように設定した。

4.2. 磁束密度分布

Fig. 6 にコイル、コア、アーマチュアから構成される磁気回路の磁束密度分布の計算結果を示す。回路内の磁束密度は許容値を超える領域(磁束飽和域)は使用せず、許容値

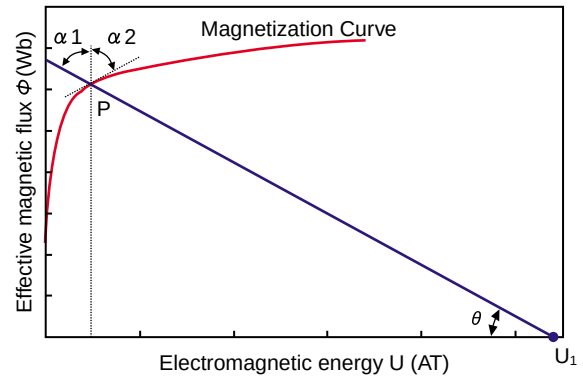


Fig. 5 Magnetic circuit characteristic of linear solenoid

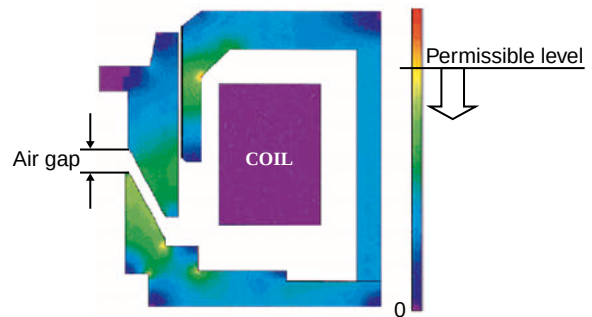


Fig. 6 Magnetic flux density of magnetic circuit

に近い領域を使用していることから上記式(3)が成立している状態がわかる。

4.3. 発熱性能

エンジンマウントは一般的に排気系放射熱など高温にさらされるケースが多く、ACMの駆動に電磁アクチュエータを採用する場合、信頼性確保の観点から発熱特性については特に留意する必要があった。今回採用したリニアソレノイドアクチュエータはエネルギー変換効率に優れる。さらに内部で発熱要因になる無駄な電流を排除した電流波形を印加できる駆動回路を採用した。その結果、信頼性に影響を与えない極めて低い発熱性を達成した。Fig. 7に示すように連続通電動作においてもコイルの温度上昇幅は30℃以下、ま

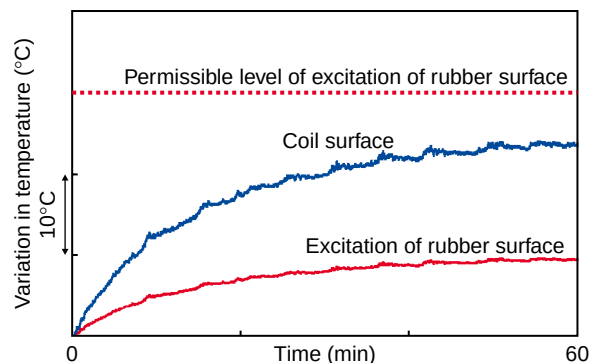


Fig. 7 Temperature characteristics

たアクチュエータに最も近い加振板ゴム表面(Fig. 9参照)の温度上昇幅は10℃程度であり、許容温度に対し十分小さい値を示していることがわかる。

4.4. ACM コントロールユニット

高応答高推力のアクチュエータを駆動させるために高電流を周波数可変で振幅させる機能と、その時の発熱に耐え得る駆動回路の構成を兼ね備えた ACM ECU を開発した。さらにアクチュエータ制御構成部の監視機能を含めた故障診断機能を持たせている。(Fig. 8)

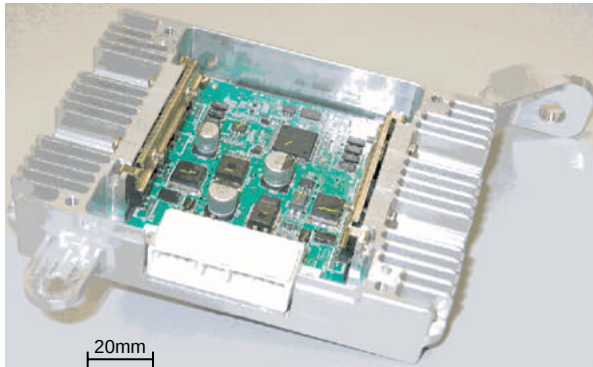


Fig. 8 ECM ECU

5. ACM 本体構造

5.1. 構造の概要

Fig. 9 に ACM 本体のカットモデルを示す。上部に従来の液体封入マウントと同様の構造を持ち、下部にリニアソレノイドタイプのアクチュエータを配置した。上部の液封マウント部は、大気解放ダイヤフラムをマウントラバー本体部の上方に配置したことが特徴である。これによりマウント部の低全高化を図り、前述のアクチュエータ小型化と合わせ従来液封マウント並の全高を達成した。さらに荷重を受けるラバー本体部はマウント液に覆われるため、ラ

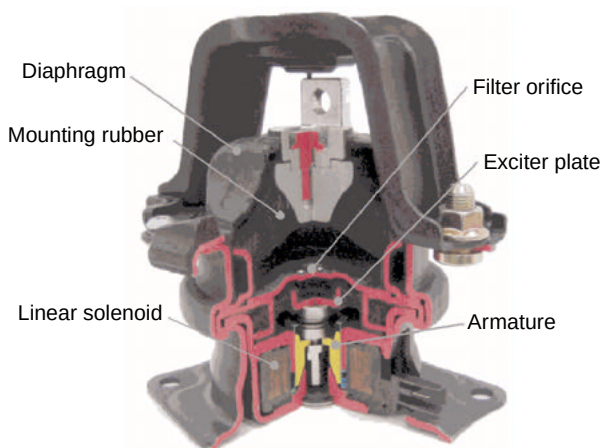


Fig. 9 Cutaway view of ACM

バーのオゾン劣化および熱老化による硬化を軽減でき、アクティブ性能の経年劣化性能の安定化に寄与している。アクチュエータはマウント側の加振板と連結し、アクチュエータ駆動力を液圧に変換する構造としている。また、一般にエンジンマウントは被水しやすい箇所への装着となるため、コイルに2次モールドを行いダイレクトカプラ構造を採用し、電気回路の信頼性を確保した。

5.2. アクチュエータと加振板の連結

本構造では、リニアソレノイドと液封マウントが連結されるため、両者の機能が損なわれないように連結構造に2つの特徴を有している。すなわち、

- (1)アーマチュア(可動子)セット位置を調整可能とする機構の採用
- (2)アーマチュアと加振板シャフトの同軸ずれと倒れを許容しながら結合可能とする機構の採用

これらにより、リニアソレノイドと液封マウントともに従来構造の精度管理で連結が実現し、推力の安定化と軸受け部の信頼性を両立することができた。

6. ACM 特性

6.1. 液封マウント特性の決定

ACM における液封マウント部分に要求される性能としては、

- (1)同等の静ばねを持つ液封マウントと同等の減衰力を確保すること
- (2)マウント発生振幅/アクチュエータ力の比を高く取れる設定とすること

(3)駆動周波数領域の動的ばね定数を低く抑えること
(4)アクチュエータ駆動による耐久性を満足すること
である。(1)から(4)のバランスを取るためには特に加振板の仕様選定が重要である。今回は液封マウントの力学計算モデルによる加振板の外径及びゴム硬度についてのパラメータスタディと数種類のサンプルによる実験により加振板の仕様を選定し、液封マウント部の特性を決定した。

6.2. 高調波の抑制

ACM の開発において駆動基本次数に対する高調波の発生が問題となった。高調波の発生原因はデューティ駆動による電流カット時の加振板の自由振動によるものであることがわかった。このことから加振板、制御電流それぞれに対し対策を実施した。一つは Fig. 9 に示すような加振板上部へのフィルタオリフィスの採用である。フィルタオリフィスの機能としては、加振板の自由振動抑制のほか、動的ばね定数のコントロールにより発生力特性をアシストすることも可能である。動ばね特性を Fig. 10 に示す。制御帯域内は特性を安定化するため、フィルタオリフィスのボトム周

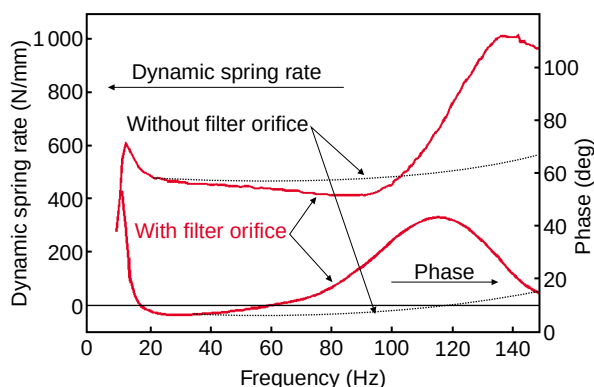


Fig. 10 Passive characteristics of ACM

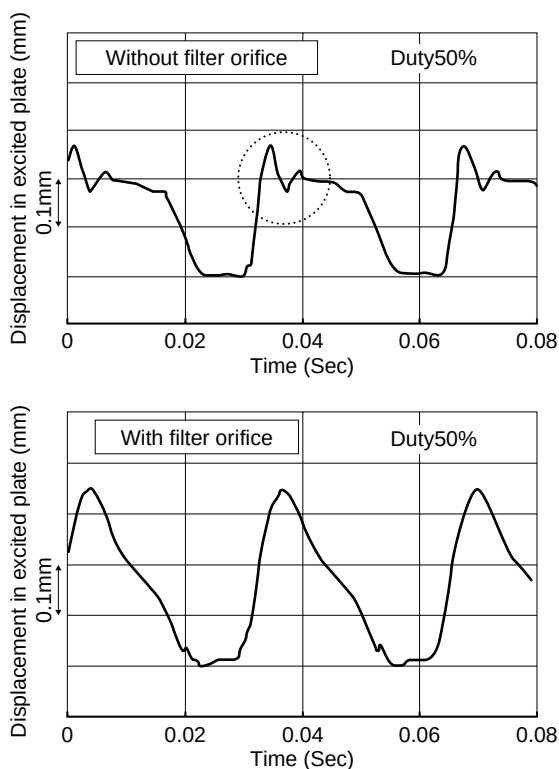


Fig. 11 Effect of filter orifice

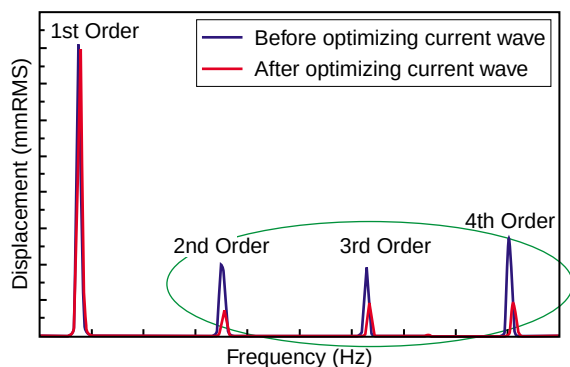


Fig. 12 Effect on harmonics of optimizing current wave

波数は 90Hz としている。その結果、アクチュエータ駆動時において Fig. 11 に示すような高調波発生力の低減が確認できた。

高調波抑制のもう一つの対策として、駆動電流の改良を実施した。デューティ駆動による発生電流を緩やかにカットすることで、Fig. 12に示すように駆動二次成分以上の広い周波数帯域で高調波振幅の改善が確認できた。

7. 達成性能

7.1. 単体発生変位

Fig. 13に単体発生変位を示す。今回構築したシステムにより、気筒休止状態におけるエンジン変位量に対して全域で上回る変位性能を達成したことがわかる。

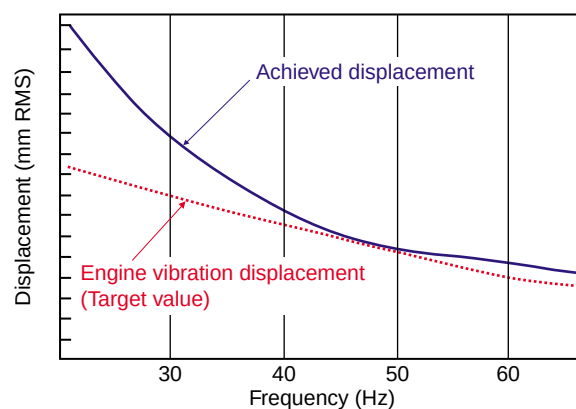


Fig. 13 Characteristics of ACM

7.2. 完成車 NV 性能

本 ACM システムを V6 可変シリンダエンジンを搭載した車両に適用し、3気筒状態でのNVレベルを確認した。その結果、Fig. 14に示すように ACM の伝達荷重は非制御時に対し全運転域で約 10dB 低減し、Fig. 15, 16 に示す室内こもり音、ステアリング振動ともに大幅に低減することができた。さらにアクティブノイズコントロールと併用することでこもり音を低減し、3気筒運転時でも全筒運転時と遜色無い快適な NV 空間を実現した。

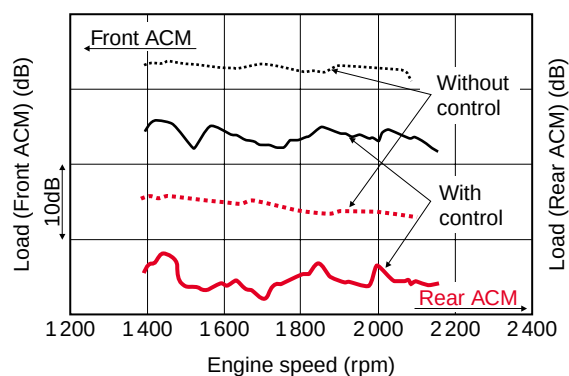


Fig. 14 Reduction of transfer load at three-cylinder drive

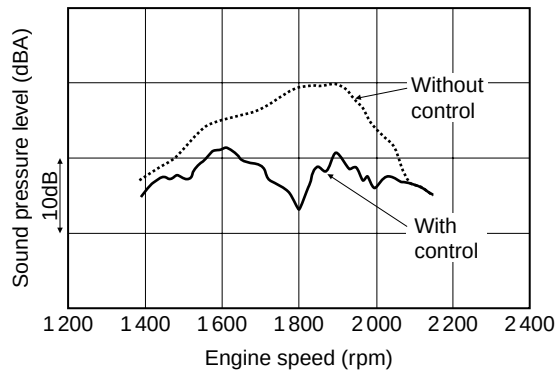


Fig. 15 Reduction of sound pressure in completed vehicle at three-cylinder drive

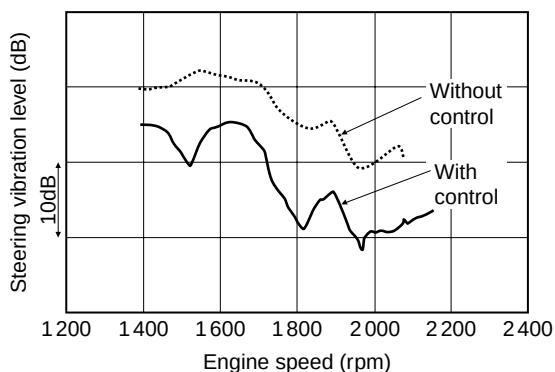


Fig. 16 Reduction of steering vibration in completed vehicle at three-cylinder drive

8. まとめ

本アクティブエンジンマウントの開発結果を以下にまとめる。

- (1) 既存信号であるクランク回転パルス信号による振動推定型フィードフォワード制御と発熱が小さく効率に優れたリニアソレノイド型の専用アクチュエータを搭載した ACM システムを開発した。
- (2) アクティブ作動状態においてエンジン振動を上回る振幅性能を満足し、十分な振動遮断量を確保したことにより、V6 可変シリンダエンジンの NV 商品性を大幅に向上した。
- (3) 専用小型アクチュエータと液封マウント部の低全高化により、従来液封マウント並のパッケージングを実現した。
- (4) 信頼性については、アクチュエータの低発熱化およびアーマチュアと加振板の連結において軸ずれと倒れを許容する構造を実現したことで、十分余裕を持った耐久寿命を確保することができた。

9. 謝辞

本開発にあたり多大なご協力をいただいた東海ゴム工業(株)、および(株)ケーヒンの関係者の皆様に対し、深く感謝の意を表します。

10. 参考文献

- (1) C.R.Fuller ほか：Active Control of Vibration, ACADEMIC PRESS, (1996)
- (2) 尾崎宏ほか：アクティブコントロールエンジンマウントの開発, 自動車技術会, 学術講演会前刷集983, p.141-144, (1998-5)
- (3) 青木和重ほか：アクティブコントロールエンジンマウント(ACM)を用いたディーゼルエンジン搭載車の静粛性向上, 自動車技術会, 学術講演会前刷集983, p.133-136, (1998-5)

■ 著 者 ■



松岡 英樹



三笠 哲雄



根本 浩臣