

高調波振動を低減するアクティブ・コントロール・エンジン・マウント・システムの開発

Development of Active Control Engine Mount System which Reduces Higher Harmonic Vibration

石 黒 哲 矢*
Tetsuya ISHIGURO

米 竜 大*
Tatsuhiko YONE

根 本 浩 臣*
Hiroto NEMOTO

要 旨

V6可変シリンダエンジンの燃費性能を向上させる方法に3気筒運転領域の拡大がある。3気筒運転によって1気筒あたりの燃焼圧力が上昇し、燃焼の基本次数だけでなく高調波成分のエンジン振動も大きくなる。この高調波振動に対しても振動騒音(NV)商品性を満足する新型アクティブ・コントロール・エンジン・マウント・システムを開発した。高調波振動には、エンジンが発生する振動以外にアクティブ・コントロール・エンジン・マウント(Active Control Engine Mount:ACM)を駆動することにより発生する振動がある。新型 ACM システムは、正弦波駆動制御および多次数制御により、この二つの高調波振動を低減する。さらに、エネルギー回生回路を採用することで発熱量を低減し、電子制御ユニットの小型化と信頼性を両立させている。車両搭載による試験の結果、拡大された3気筒運転領域においても NV 性能を向上できた。

ABSTRACT

The range of three-cylinder drive can be increased in order to boost the fuel efficiency performance of V6 cylinder-on-demand engines. The use of three-cylinder drive increases the combustion pressure per cylinder, and also increases engine vibration not only at the fundamental order of combustion, but also at higher harmonic frequencies. A new active control engine mount (ACM) system was developed to respond to this higher harmonic vibration in order to satisfy commercial demands for noise and vibration (NV) performance. The operation of an ACM generates higher harmonic vibration other than the vibration produced by the engine. The new ACM system applies sine-wave drive control and multi-order frequency control in order to reduce these two forms of higher harmonic vibration. In addition, the use of a regenerative circuit has reduced heat production, helping to enable a reduction in size of the electronic control unit to be reconciled with reliability. Tests of the system in an actual vehicle showed that NV performance was increased even when an expanded range of three-cylinder drive was employed.

1. はじめに

負圧アクチュエータをマップ制御により駆動する方式⁽¹⁾や電磁アクチュエータを適応制御により駆動する方式⁽²⁾の ACM が実用化される中、Honda における ACM は、可変シリンダシステムを搭載した V6 エンジンを対象に、専用センサを使用せず高応答のリニアソレノイドをフィードフォワード制御により駆動する方式⁽³⁾で3気筒運転を意識させない NV 性能を確立し、2004 年モデルインスパイアから商品適用された。

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、ポンピングロス低減し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、燃焼気筒の減少により基本次数であるエンジン回転3次が1.5次へ半減することと1気筒あたりの燃焼圧力が上昇することによりエンジン振動が増大する⁽³⁾。

従来の ACM システムは、3気筒運転時の1.5次成分のエンジン振動を主に低減しており、高調波成分である3次に対しては、ACM で制御する必要がなかった。

今回の新型 ACM システムの開発は、可変シリンダシステムの燃費性能を向上させるため、3気筒運転領域を拡大したことによる1.5次と3次のエンジン振動振幅の増大に新開発の制御方法により対応し、従来同様、3気筒運転を意識させない NV 性能を確立することを目的としている。

*四輪R&Dセンター

2. 開発目標

3気筒運転領域が拡大された可変シリンダシステムを従来の可変シリンダシステムに対し、新可変シリンダシステムと呼び、新可変シリンダシステムの振動振幅に対応する相殺変位量を実現した ACM を新型 ACM と呼ぶことにする。

新型 ACM は、従来 ACM よりもコイル抵抗を小さくして電流応答性を向上させることで電磁エネルギーが増加し ACM 出力が大きくなるようにパワーアップされている。

Fig. 1 に、従来および新可変シリンダシステムを搭載した機種における3気筒運転時にエンジンプラケットからボデーへ伝達される荷重を示す。新可変シリンダシステムを搭載した機種は、従来よりもトルクが必要な領域で3気筒運転できるため、1.5次、3次共に伝達荷重が大きくなっており、3次の伝達荷重は、運転域によっては NV 商品性を満足できない大きさになっている。したがって、1.5次だけでなく3次の振動にも対応できる制御により ACM を駆動

し、伝達荷重を低減する必要がある。

また、Fig. 2 は、従来 ACM と新型 ACM にエンジン重量相当の荷重をかけ、同一条件の電流印加装置で単体駆動させた場合に ACM が発生する力を表している。従来 ACM も高調波成分は出力されていたが、新型 ACM では、エンジン振動の基本次数に対応する1次成分が大きくなったのと同様な比率で高調波成分も大きく出力されている。この状態の新型 ACM でエンジン振動を相殺しようとする、基本次数は低減できるが、高調波成分は、ACM が発生する振動により、駆動していない状態よりも振動が増大する。これは、ACM の発生力が正弦波となるように ACM を駆動できていないことが原因である。

以上より、新型 ACM システムの開発にあたっては、エンジン振動振幅増大に対応する ACM のパワーアップに加え、新たに NV 性能を低下させる顕著な要因となったエンジンおよび ACM から伝達される高調波振動を、商品として許容できる大きさに低減することを目標とした。

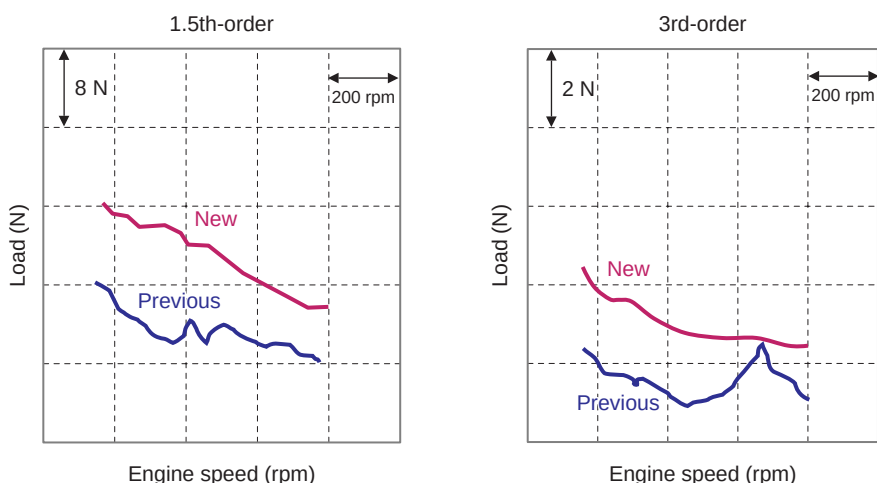


Fig. 1 Load transmitted to body from engine bracket during 3-cylinder stop mode

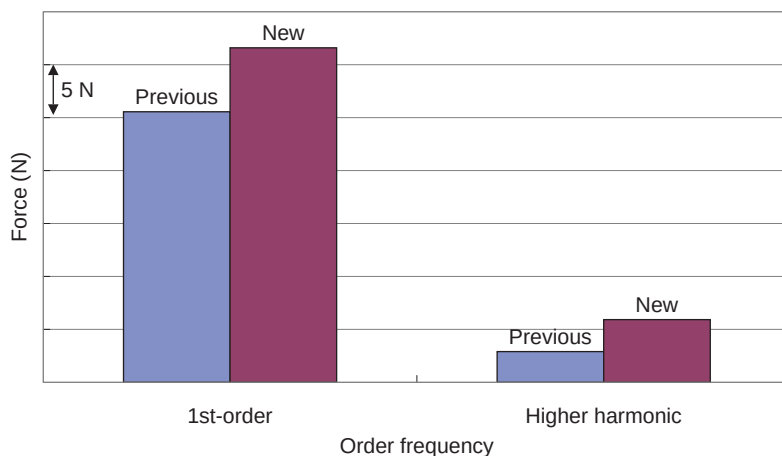


Fig. 2 Order frequency of output force from developed and previous ACM

3. ACM システムの構成

3.1. システム概要

実車に搭載された事例を Fig. 3 に示す。可変シリンダシステムを搭載した V6 エンジンのフロント側とリヤ側にそれぞれ ACM を配置し、その ACM を制御する電子制御ユニット(ECU)をキャビンに配置する。

システム構成を Fig. 4 に示す。ACM ECU はエンジン振動を把握するために必要な信号をエンジン・コントロール・ユニット(PGM-FI)から受信できるように接続されている。

ACM 構造を Fig. 5 に示す。ACM は液封部とリニアソレノイド部で構成される。リニアソレノイド内の可動子により液封部内の加振板を振幅させることで液圧が変動し、それによって本体ゴムを振幅作動させる。この機能により、ACMの動的ばね定数を可変とすることができ、エンジンブラケットからボデー(サブフレーム)へ伝達される荷重を低減することができる。

3.2. ACM 出力からの高調波成分の発生

ACM に正弦波電流を印加した場合、ACM 出力から高調波が発生する。ACM 出力は加振板動作で決定され、加振板変位 X は式(1)より導出することができる。式(1)を導出した加振板とリニアソレノイドの簡易モデルを Fig. 6 に示す。

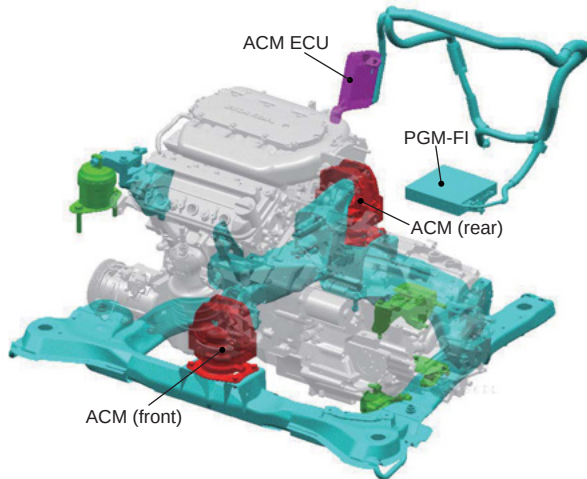


Fig. 3 ACM system configuration

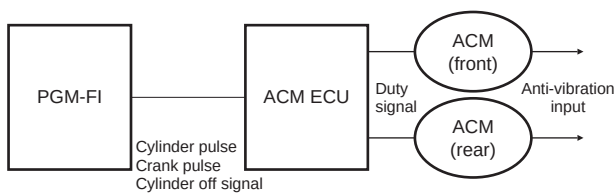


Fig. 4 Block diagram of ACM system

$$F_{act}(i, X) = M\ddot{X} + \{Ce + Cj(i)\}\dot{X} + \{Ke + Kj(i)\}X + \mu(i, \dot{X})F_n(i, X) + F_{BH}(i) \quad (1)$$

F_{act} : Magnetic force

F_n : Horizontal component of magnetic force

F_{BH} : B-H hysteresis

M : Total moving mass

Ce : Attenuation coefficient of exciter plate

Cj : Attenuation coefficient which changes with current

Ke : Spring constant of exciter plate

Kj : Spring constant which changes with current

μ : Coefficient of operation friction on bearing

i : Drive current

X : Displacement of exciter plate

式(1)で非線形な特性を有しているのは、(1)減衰特性 Ce , Cj , (2)軸受摺動抵抗 μF_n , (3)B-Hヒステリシス F_{BH} であり、これらが高調波発生の要因となっている。

本システムでは、これらハードウェアの非線形性を許容し、新しい制御方法により高調波成分の発生を低減する。

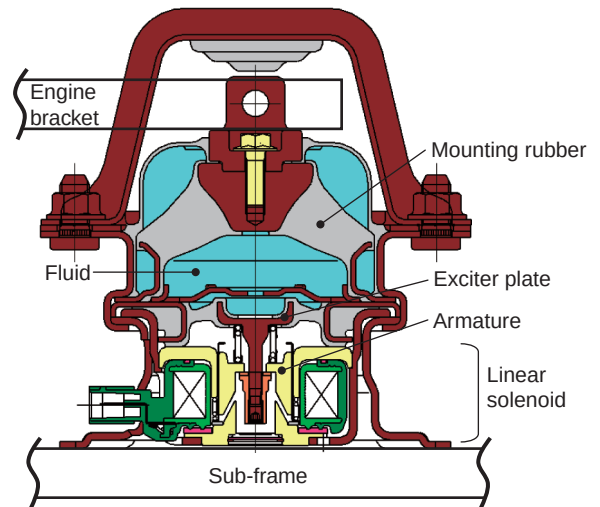


Fig. 5 Cutaway view of ACM

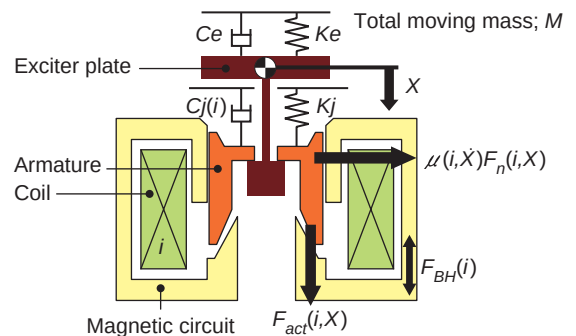


Fig. 6 Exciter plate displacement model

4. 高調波低減制御

4.1. 正弦波駆動制御

Fig. 7, Fig. 8 は、正弦波電流を印加して ACM を駆動した場合の高調波出力の次数成分の大きさと 1 次に対する位相差を表している。高調波出力の主成分は 2 次と 3 次から構成されており、その位相差は周波数に対し、線形もしくは非線形で再現性がある。したがって、印加する電流に 2 次と 3 次成分を低減する電流を合成すれば、ACM を正弦波駆動でき、高調波出力は低減できる。

$I_1, I_2, I_3, \theta_2, \theta_3$ を順に、1 次電流の大きさ、2 次電流の大きさ、3 次電流の大きさ、2 次電流の位相、3 次電流の位相とし、 f を 1 次電流の周波数、 t を ACM 駆動周期とすると、式(2)の $ICMD$ が ACM を正弦波駆動するために印加する電流式となる。

$$ICMD = I_1 \sin \omega t + I_2 \sin(2\omega t + \theta_2) + I_3 \sin(3\omega t + \theta_3) \quad (2)$$

ここで、

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

である。

I_1 はエンジン回転数とエンジン振動推定値のマップとして ECU へ実装され、 $I_2, I_3, \theta_2, \theta_3$ は、1 次電流の大き

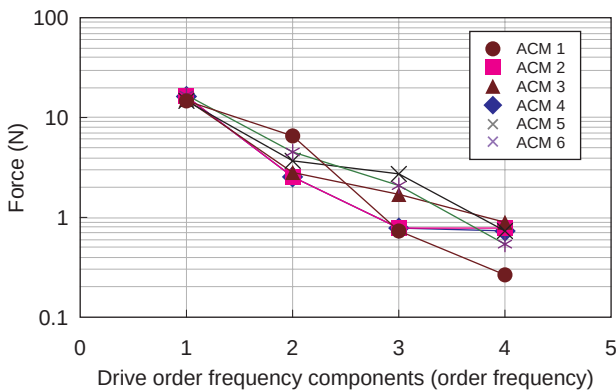


Fig. 7 Components of higher harmonic wave

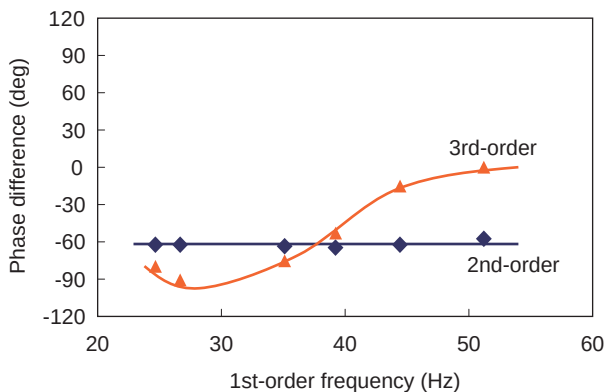


Fig. 8 Phase difference of higher harmonic wave with 1st-order

さや 1 次電流の周波数に応じて値が変化するため、1 次電流の大きさと 1 次電流の周波数のマップ(ICMD マップ)として実装される。

さらに、式(2)通りに ACM を駆動する高精度な電流制御も構築する必要がある。式(4)から式(7)に電流制御式を示す。 I_{ACT} は ACM 駆動周期ごとに取得する実電流値であり、 I_{ACT} を $ICMD$ へ一致させるようにリニアソレノイドへの通電量 $DUTY$ を算出する。本電流制御の基本構成は、電流フィードバック制御であるが、ACM 駆動周期ごとに $ICMD$ が変化していくため、フィードバック項 $DSOLP$ (比例項)、 $DSOLI$ (積分項) だけでは、追従性を満足することができない。そこで、式(2)が既知であることを利用して、フィードフォワード項 $DSOLFF$ を追加している。

駆動回路であるが、電流フィードフォワードおよびフィードバック制御する ACM 駆動回路には、インダクタンスにより電流下降性が低下する条件下においても 1 次電流の周波数内で確実に電流を 0 A まで下げられる応答性が要求される。これは、ACM の構造上、直流成分が残ると可動子が吸引された状態になり、加振板の振幅中心がオフセットして、印加電流に対する相殺変位量が小さくなるためである。

そこで、電流を上昇させる場合と下降させる場合で、駆動回路を切り替えて対応している。

ACM 駆動回路を Fig. 9 に示す。駆動回路は、FET(T1, T2)のハーフブリッジ回路、電流下降時の応答性を切り替える FET(T3)、フィードバック電流を検出する回路(検出抵抗 R_s)で構成される。ACM 駆動時の電流波形を Fig. 10 に示す。電流上昇時は、T1 と T2 を PWM 制御することで Loop1 と Loop2 のように電流経路が切り替わる。電流下降時は、T3 を PWM 制御することで Loop2 と Loop3 のように電流経路が切り替わる。電流応答性は ACM へ印加する電圧の大きさで決定されるため、Loop3 の電流経路では、ACM への印加電圧を電源電圧以上に引き上げ電源へエネルギー回生する回路(Clamping circuit)を追加して電流応答性を向上している。

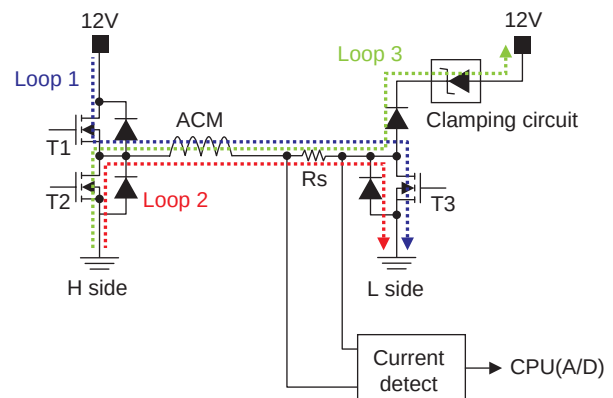


Fig. 9 ACM drive circuit

駆動回路の切り替えは DUTY の符号により指示され、正の場合は Loop1 と Loop2 を、負の場合は Loop2 と Loop3 を選択する。さらに、駆動回路を切り替えると偏差 ($ICMD - IACT$) に対する応答性が変わるため、Loop1, Loop2, Loop3 で比例ゲイン K_p 、積分ゲイン K_i を切り替えている。

$$DUTY = DSOLFF + DSOLP + DSOLI_{(n)} \quad (4)$$

$$DSOLFF = (K_p + K_i) \times \{ICMD_{(n+1)} - IACT_{(n)}\} \quad (5)$$

$$DSOLP = K_p \times \{ICMD_{(n)} - IACT_{(n)}\} \quad (6)$$

$$DSOLI_{(n)} = K_i \times \{ICMD_{(n)} - IACT_{(n)}\} + DSOLI_{(n-1)} \quad (7)$$

4.2. 単体結果

単体環境下における ACM 駆動時の高調波低減効果を Fig. 11 に、このときの ACM 発生力波形を Fig. 12 に示す。正弦波電流で駆動した場合と比較し、本電流制御では、高調波成分 (2 次, 3 次) を低減できている。

4.3. 実車 NV 高調波低減と多次数制御

正弦波駆動制御により、ACM を正弦波駆動することが可能となった。

エンジン振動は、基本次数と高調波成分の合成と考えることができるため、基本次数に対する ACM 正弦波駆動電流式と主な高調波成分に対する ACM 正弦波駆動電流式の合成式で ACM を駆動すれば、多次数のエンジン振動を低減することが可能となる。

前記した式 (2) を基本次数に対する ACM 正弦波駆動電流式 $ICMD_m$ と置き換えると、主な高調波成分に対する ACM 正弦波駆動電流式 $ICMD_h$ は、各次数の電流の周波数が

$ICMD_m$ の 2 倍になるため、式 (3) の f を $2f$ とした式 (9)、式 (10) で表され、式 (8) の $ICMD$ が、多次数のエンジン振動を低減する場合にフィードフォワードおよびフィードバック制御へ入力される電流式となる。 $I''_1, I''_2, I''_3, \theta''_2, \theta''_3$ は順に、高調波成分に対する 1 次電流の大きさ、2 次電流の大きさ、3 次電流の大きさ、2 次電流の位相、3 次電流の位相となり、 θ は $ICMD_m$ に対する $ICMD_h$ の位相である。 I''_1 と θ はエンジン回転数とエンジン振動推定値のマップとして ECU へ実装され、 $I''_2, I''_3, \theta''_2, \theta''_3$ は、 I''_1 と $2f$ を入力とした $ICMD$ マップより算出される。

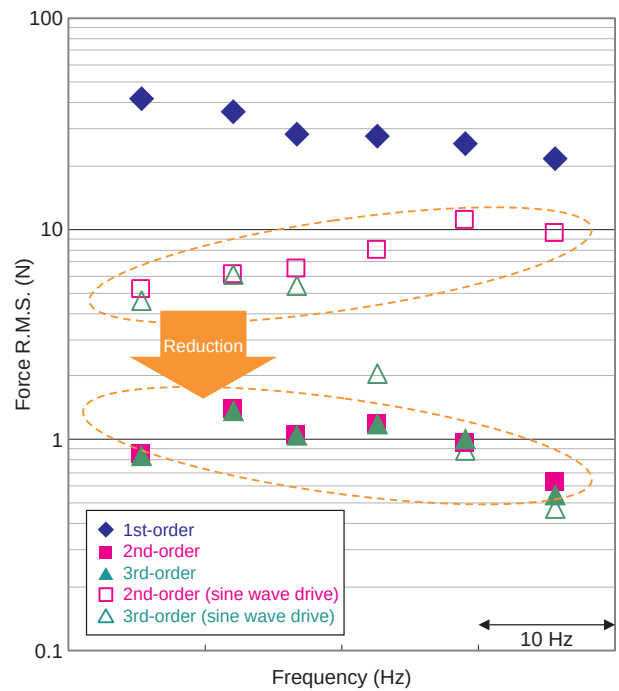


Fig. 11 Reduction of higher harmonic wave

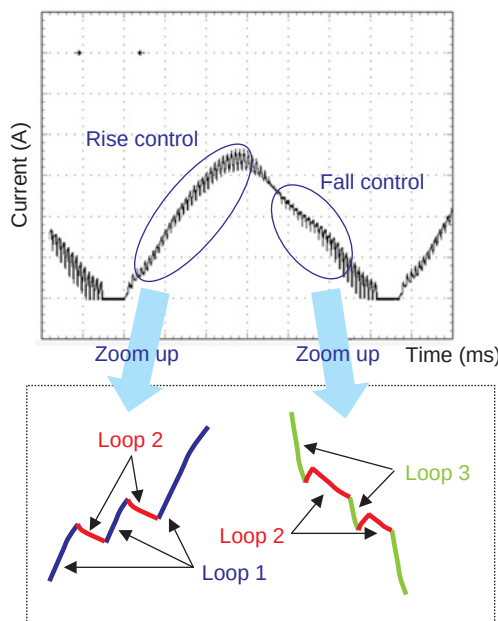


Fig. 10 Driving current waveform

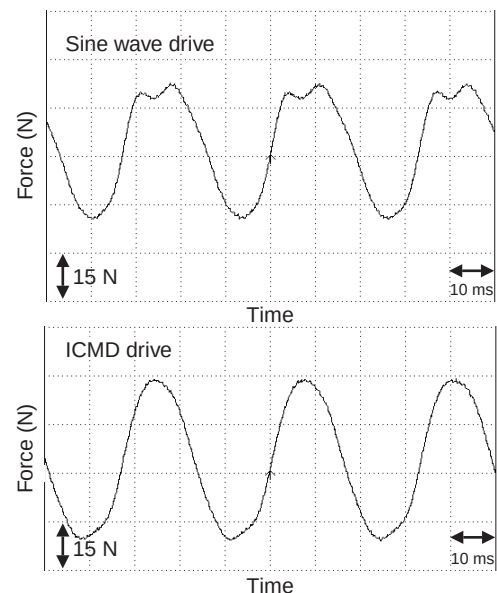


Fig. 12 Force waveform

また、ECU では電流式を ACM 駆動周期ごとに演算するため、式(8)の $ICMD$ の最下点がオフセットされる可能性があり、最下点が 0 A になるようにオフセットを補正している。

Fig. 13 に制御ブロック図を示す。

$$ICMD = ICMD_m + ICMD_h \quad (8)$$

$$ICMD_h = I_1'' \sin(\omega''t + \theta) + I_2'' \sin(2\omega''t + 2\theta + \theta_2'') + I_3'' \sin(3\omega''t + 3\theta + \theta_3'') \quad (9)$$

ここで、

$$\omega'' = 2\pi(2f) \quad (10)$$

である。

5. 実車 NV 効果

3気筒運転時に ACM を駆動した場合における伝達荷重の低減効果を Fig. 14 に示す。新型 ACM システムによって、エンジン振動 3 次成分の伝達荷重を ACM 非駆動時の 2 分の 1 以下に低減し、3 気筒運転時の高調波低減効果を確認できた。

Table 1 Specifications of developed ECU

Items	Developed ECU
PCB and frame	
Power (max)	72 W (12 V × 6 A)
Circuit loss	6 W
Size	86 × 98 × 35 mm
Weight	295 g

6. ECU 損失低減と小型化

ACM をパワーアップしたことにより、ECU の最大出力は、従来仕様の 60 W から 72 W に増加したが、エネルギー回生回路等による駆動回路の最適化を図ることにより、回路損失は、従来の約 15 W から約 6 W へ低減した。これにより、放熱フレーム重量 44%低減と ECU サイズ 35%低減を実現し、パワーアップ対応と小型化を両立できた(Table 1)。

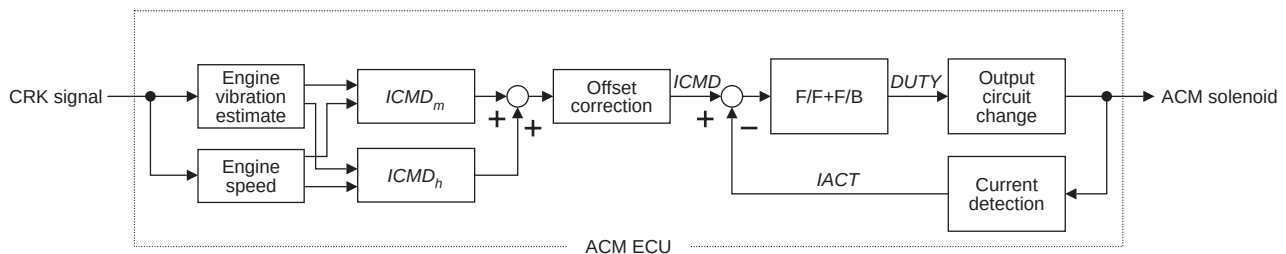


Fig. 13 Control block diagram

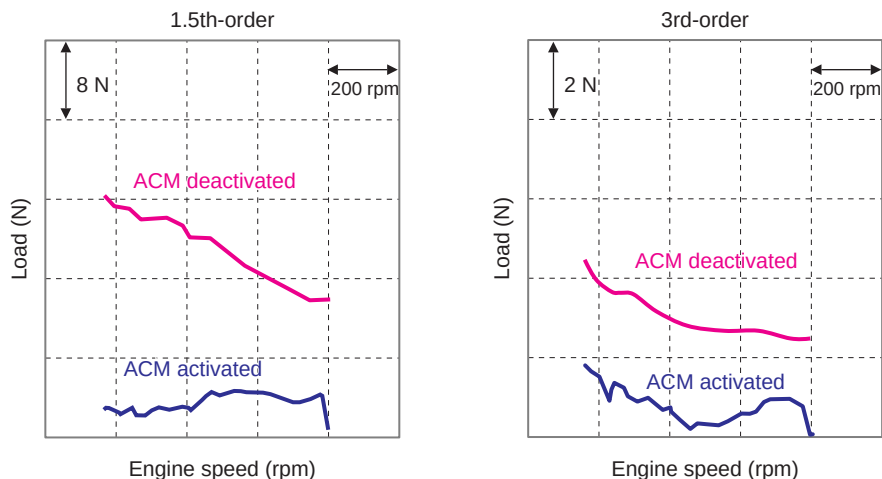


Fig. 14 Effect of new ACM system

7. まとめ

新可変シリンダシステムのエンジン振動振幅増大に対応する電流フィードフォワードおよびフィードバック制御を導入した ACM システムを開発することにより以下を達成した。

- (1) 新可変シリンダシステムにおいても 3 気筒運転を意識させない NV 性能を確立した。
- (2) ACM の正弦波駆動を可能とした制御方法を構築し、ACM が発生させる高調波振動を低減した。
- (3) 振動周期の基本次数と高調波成分の正弦波駆動電流式を合成可能とした多次数制御方法を構築し、エンジンブラケットからボデーへ伝達される高調波振動を低減した。
- (4) 駆動回路の最適化により損失を低減し、ACM のパワーアップと ECU の小型化を両立した。

参考文献

- (1) 尾崎宏, 塚本孝徳, 市川明徳, 山添久光, 柴田晃, 前野隆, 田島斉: 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, No.983, p.141-144(1998)
- (2) 青木和重, 平出高久, 兵藤嘉彦, 相原俊彦, 四方力: 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, No.983, p.133-136(1998)
- (3) 松岡英樹, 三笠哲雄, 根本浩臣: アクティブエンジンマウントの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.2, p.209-214

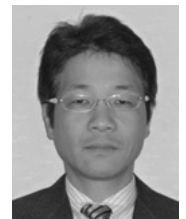
■ 著 者 ■



石黒 哲 矢



米 竜 大



根 本 浩 臣