

エンジン再始動時共振振動伝達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 for Reduction of Resonance Vibration at
Engine Restart

米 竜 大*

Tatsuhiro YONE

古 井 慎太郎*

Shintaro FURUI

岡 本 英 之*

Hideyuki OKAMOTO

根 本 浩 臣*

Hiroto NEMOTO

山 口 貴 司*

Takashi YAMAGUCHI

要 旨

V6 可変シリンダエンジン搭載に伴う完成車振動騒音の低減技術としてアクティブコントロールエンジンマウントが量産されている。アイドルストップ後およびハイブリッドシステムのEVドライブ後のエンジン再始動時に発生する完成車振動を低減する次世代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。エンジン再始動時に発生するパワープラント共振振動の発生タイミングがエンジンのクランク回転角度と相関性が高いことに着目し、共振振動の発生タイミングと大きさを予測して振動相殺する新制御手法を確立した。加えて、エンジン振動としては大振幅となる共振振動に対応するシステムを構築することで、アイドルストップ後およびハイブリッドシステムのEVドライブ後のエンジン再始動時の振動騒音商品性が向上した。

ABSTRACT

Active Control Engine Mounts are in mass production as a technology for the reduction of noise and vibration in complete vehicles associated with the use of V6 variable-cylinder engines. The research discussed in this paper developed a next-generation active control engine mount system that reduces vibration in complete vehicles occurring when the engine is restarted following idle stop or EV operation in a hybrid system. The fact that the timing of the powerplant resonance vibration that occurs at engine restart correlates strongly with the angle of rotation of the crankshaft was focused on, and a new control method was developed that predicts the timing and magnitude of resonance vibration and cancels it. In addition, the development of a system able to respond to high-amplitude engine resonance vibration has increased noise and vibration performance at engine restart following idle stop or EV operation in a hybrid system.

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: ACM) 技術は、エンジン回転に同期したパルスを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、エンジンから車体に伝達される振動を低減する機能を有することが知られている^{(1),(2)}。この ACM 技術は主に V6 可変シリンダエンジンに搭載されている。可変シリンダシステムは一定速や減速などの軽負荷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を低減し燃費を向上させる技術である。3 気筒運転では 6 気筒運転に対して爆発気筒の減少にともなう基本次数の半減 (3 次から 1.5 次) と 1 気筒当たりの仕

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特徴があった。ACM 技術は気筒休止 (3 気筒運転) 状態において全筒 (6 気筒運転) 状態同等となる振動騒音 (NV) 性能を実現することで、燃費と NV 性能の両立に貢献している。

現在、V6 可変シリンダエンジンに対してさらなる燃費向上技術としてアイドルストップシステムやハイブリッドシステムの導入が検討されている。アイドルストップシステムでは車両停止中にエンジンを停止することで燃料消費を抑制し、ハイブリッドシステムではモータ走行が可能な状況でエンジンを停止し燃料消費を抑制する。これらのシステムでは、運転中にエンジン停止と再始動を繰り返し発生させる。このエンジン再始動時に発生する振動はイグニッションスイッチやスタートボタンを運転者の意志で操

* 四輪 R&D センター

作した場合に発生する始動時振動に比べ、同じ大きさの振動であっても意思に関係なく突然発生するため認識されやすくなる。さらに走行中にエンジン停止と再始動の頻度が高いことも認知度が高まり商品性に影響する要因となる。量産 ACM システムをベースに機能進化させることでエンジン再始動時の NV 商品性を向上させる世界初の ACM システムを開発した。

2. 開発のねらい

エンジン再始動時振動の車両伝達を抑制し、車両の NV 商品性目標を達成する次世代 ACM システムの開発のねらいを以下に定めた。

- (1) エンジン再始動時振動の発生タイミングを把握し、振動を相殺する振幅で ACM を制御駆動する ACM 新制御手法を構築する。
- (2) エンジン振動としては大振幅となるエンジン再始動時の共振振動に対応する ACM システムを構築する。

3. ACM システム構成

ACM システムが実車に搭載された事例を Fig. 1 に示す。V6 可変シリンダエンジンのフロント側とリヤ側にそれぞれ ACM を配置し、ACM を制御する電子制御ユニット (ACM-ECU) をキャビンに配置する。エンジン振動の推定に必要とされる情報はエンジンルーム内に配置したエンジンコントロールユニット (FI-ECU) から受信する。ACM システムの通信構成を Fig. 2 に示す。ACM-ECU はエンジンクランク角度信号や上死点信号、およびエンジン状態情報 (気筒休止状態やエンジン始動開始判断の情報) を FI-ECU から取得し、エンジン振動の車体伝達を低減するよう二つの ACM を駆動する。

ACM による振動低減の基本原理を Fig. 3 に示す。エンジン振動はトルク変動に起因するクランク回転 (ロール) 方向への振動がフロントおよびリヤのエンジンマウントへ入力される。従来のエンジンマウントは、エンジンからの

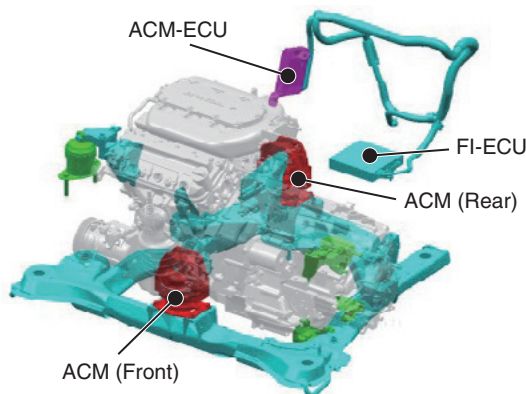


Fig. 1 ACM system layout

入力荷重がマウントゴムを介してボデー側に伝達してしまう。それに対して ACM ではマウント内部のアクチュエータを変位させることにより、エンジン振動を相殺してボデーへの振動伝達を低減することが可能となる。

次にエンジン振動を相殺する ACM の内部構成を Fig. 4 に示す。ACM は液封マウント部とリニアソレノイド部で構成される。電流印加によりリニアソレノイド部の可動子を上下に振動させ、可動子と接続された加振板を振幅させる。この動作により液封マウント内部の液圧が変動することで本体ゴムが変位し、エンジンマウントブラケットに接続されたマウント上点部を振幅作動させエンジン振動を相殺することが可能となる。

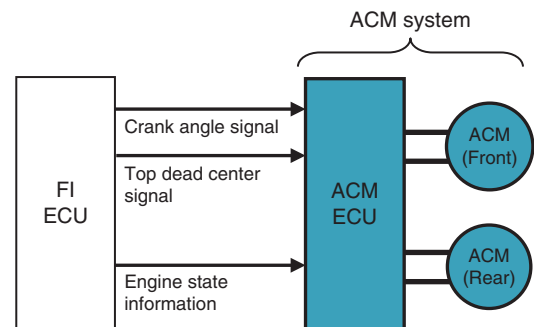


Fig. 2 ACM system communications configuration

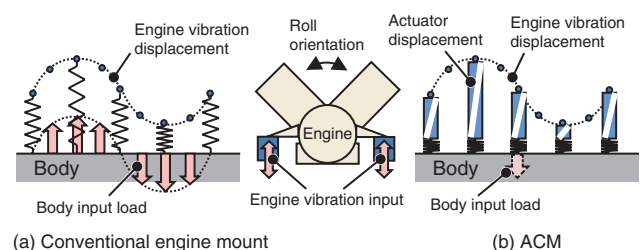


Fig. 3 Principle of vibration reduction

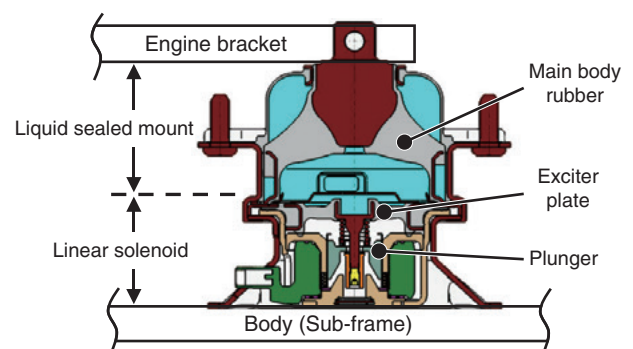


Fig. 4 Configuration of ACM

4. エンジン再始動時共振振動の車体伝達低減

4.1. エンジン再始動時共振振動の発生メカニズム

一例として、ハイブリッドシステムの EV ドライブ後のエンジン再始動時に発生する共振振動を Fig. 5 に示し、エ

ンジン再始動時共振振動の発生メカニズムを説明する。

エンジンを始動する際、ハイブリッドシステムのモータによるトルクでエンジンクランク軸が回転し、シリンダ内のピストンが上下に動作する。この際、シリンダ内の筒内圧を主要因としたクランク回転変動が発生する。この回転変動に起因した振動は、エンジン回転数が増加しエンジンマウントのバネ特性とパワープラント質量で決定される共振域となる回転数に達したときに共振振動として増幅される。このエンジン始動時に発生する共振振動はパワープラントを支持するエンジンマウントを介して車体に伝達する。アイドルストップシステムにおけるエンジン再始動時共振振動との違いは、始動トルクの発生源がハイブリッドシステムのモータからスタータモータに換わること、スタータモータのトルクではパワープラントの共振域に到達せずエンジンの初爆によって共振域を通過することであるが、共振振動の発生する基本原理は同様である。

4.2. エンジン再始動時 ACM 制御の構築

エンジン再始動時共振振動は過渡的な事象であり、センサによる振動検知情報を利用したフィードバック制御方式では対応することが困難である。加えて、エンジン回転数が、パワープラント共振域を通過する際の回転数上昇の速さによってもエンジン共振振動の発生タイミングと大きさが変化する。よって、共振振動が発生する前に振動の発生タイミングと大きさを把握し、適切なタイミングと振幅でACMを制御駆動するフィードフォワード制御の構築が必要となった。

先に述べたように、エンジン再始動の際に発生するクランク回転変動を起因とした振動は、パワープラント共振域に達したときに増幅され共振振動となる。このクランク回転変動はピストン位置、すなわちクランク回転角に連動した振動であるが、エンジン再始動時共振振動もクランク回転角と相関をもって発生することが確認されている。Fig. 6 にクランク回転角に対するエンジン回転数とエンジン始動時共振振動を示す。エンジン回転数がパワープラント共振域を通過する際に、上死点となる回転角を起点に最初の共振振動振幅が発生している。この起点となる回転角(クランク角度)を利用して共振振動の発生タイミングを推定することが可能となる。

また、共振振動の大きさの推定を可能にするために、共

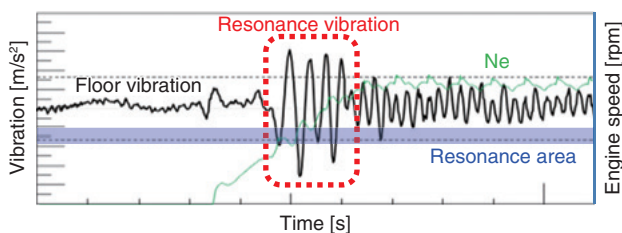


Fig. 5 Engine restart vibration (V6 engine hybrid vehicle)

振振動の大きさを安定させる必要がある。そこでエンジンやモータ制御でエンジン再始動時の回転上昇の速さを一定に制御することで、共振振動の大きさが変動することを防止している。

以上より、エンジンクランク角度を利用し、エンジン再始動時の回転上昇の速さを制御することでACM-ECUで共振振動の発生タイミング(振動が発生するクランク角度)と振動大きさを推定する制御構成とした。

次に、過渡的に発生する大振幅なエンジン共振振動に対応するACM駆動制御について説明する。従来のACM制御では可変シリンダエンジンの全筒、もしくは休筒状態で連続的に発生するエンジン振動に対応するため、アクチュエータが連続駆動する力を利用してACM振幅を可変し振動を相殺していた。一方で、エンジン再始動時共振振動の発生タイミングで駆動停止状態から初回の電流制御により大振幅となるACM駆動を実現する必要があった。

Fig. 7 に初回電流制御に必要なACM振幅を発生する制御手法を示す。ACMアクチュエータ内部の可動子は、コイルへの電流印加による吸引動作と加振板ゴムのバネ力による開放動作を繰り返すことでACM振幅を発生させること

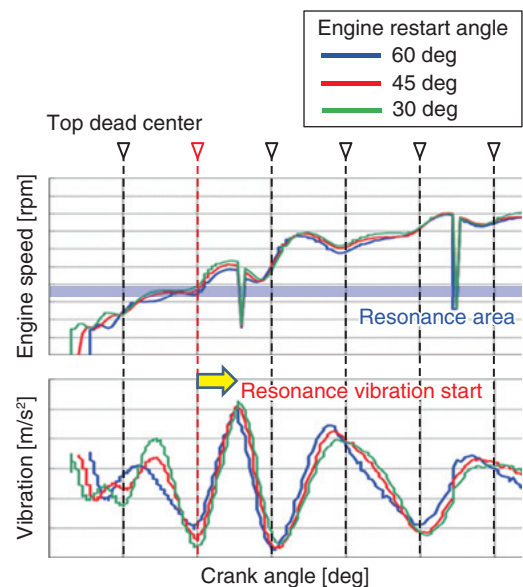


Fig. 6 Vibration at engine restart

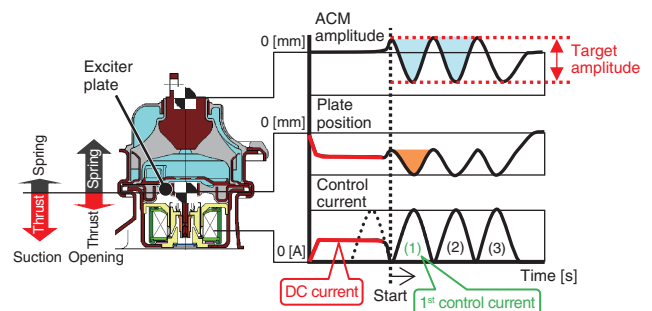


Fig. 7 ACM control method of using initial DC current

が可能となる。この際、発生振幅が大きいほど吸引と開放のバランス点となる加振板位置が吸引側へ移動することになる。そこでエンジン共振振動を相殺するために、事前にコイルに DC 電流を印加し、加振板位置をあらかじめ吸引側へ移動させた後、初回の ACM 電流制御を実施する方法を採用した。Fig. 8 に制御効果を示す。事前の DC 電流の印加によりエンジン再始動時共振振動を相殺する ACM 振幅駆動を可能とした。

本制御手法によりエンジン始動時共振振動の開始タイミングと大きさを正確に把握し、共振振動相殺に必要な ACM 振幅の駆動を可能とするフィードフォワード ACM 制御を構築した。

4.3. 大振幅 ACM システムの構築

エンジン再始動時共振振動への対応は ACM システムにおいて最大振幅が要求され、従来 ACM システムに対し 1.5 倍以上の ACM 発生力が必要である。また、大振幅に伴いアクチュエータの電流応答性の改善も合わせて必要となり、本開発では大振幅と高応答を両立する ACM システムの構築が必要となった。

大振幅を発生させるには ACM アクチュエータ推力の発生源となる起磁力の増加が必要とされる。起磁力はアクチュエータ内部のコイル巻数と印加電流の積となることからコイル巻数を増加させればよい。しかし、従来構造のままコイル巻数を増加させるとアクチュエータの外形が大きくなり ACM サイズが増加してしまい、実車搭載性が維持できなくなる。そこで、ACM サイズを増加させることなく大振幅を実現するため、コイルの保持機構であるボビンを廃止したボビンレス構造を採用した (Fig. 9)。これによりコイル内径側へコイル巻線空間を確保することが可能となりアクチュエータの外形を大きくすることなく、量産 ACM サイズを維持しつつも大振幅な ACM 駆動を実現した。

次にコイル巻数増加によって必要となった電流応答性の

改善について説明する。電流の応答 $I(t)$ は式 (1) に、さらにこの式に関わるインダクタンス L は式 (2) で記述される。

$$I(t) = \frac{V}{R} \left[1 - \exp \left(-\frac{R}{L} t \right) \right] \quad (1)$$

V : コイルへの印加電圧

R : コイルの抵抗値

L : インダクタンス

$$L = \frac{\mu N^2 \pi r^2}{l} \quad (2)$$

μ : 透磁率

N : コイルの巻数

r : コイルの半径

l : コイルの長さ

式 (1) および式 (2) より、大振幅のためにコイル巻数 N を増加させることでコイル抵抗 R およびインダクタンス L が増加し、結果として電流応答性が低下してしまう。そこで、式 (1) におけるコイルへの印加電圧 V を増加し電流応答性を改善するために、従来の ACM-ECU に対し昇圧回路を搭載した昇圧仕様の ACM-ECU を採用した。

以上より、ボビンレスアクチュエータと昇圧仕様の ACM-ECU (Fig. 10) によって大振幅と高応答を両立し、エンジン始動時共振振動に対応する ACM システムを構築した。

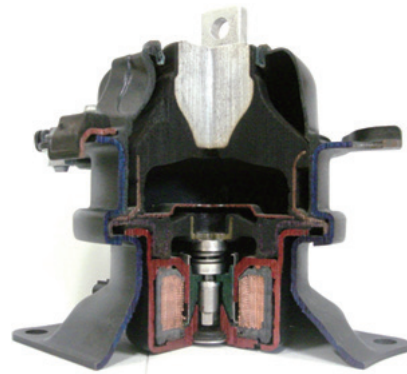


Fig. 9 Bobbinless ACM actuator



Fig. 10 Booster ACM ECU

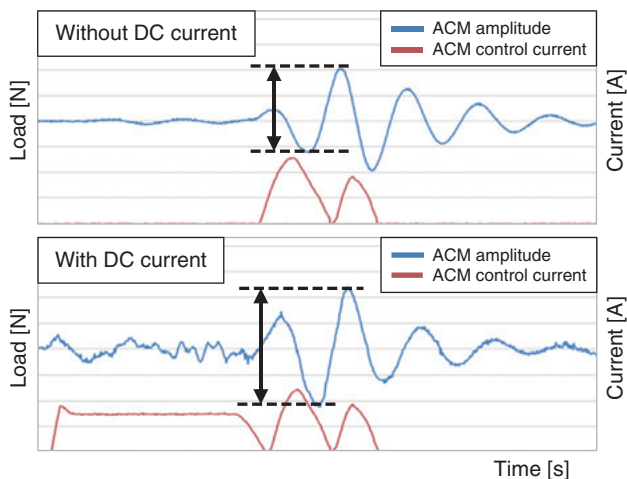


Fig. 8 Effect of developed ACM control method

5. 完成車商品性の効果

エンジン再始動時 ACM 制御と大振幅 ACM システムによるエンジン再始動時共振振動の車体伝達低減効果を検証した。Fig. 11 に完成車における振動計測ポイントを示す。計測ポイントとして、リヤ ACM 下点の荷重 (Fig. 11 の A 点) および、運転席下のフロア振動 (Fig. 11 の B 点) を選定し、完成車における NV 商品性の効果を確認した。

Fig. 12 に ACM 作動、および非作動時におけるエンジン再始動時のリヤ ACM 下点荷重を示す。ACM 制御を適用することにより、エンジン再始動時に発生する共振振動の車体伝達を 60% 以上抑制することが可能となった。また、Fig. 13 にエンジン始動時の車室内フロア振動を示す。ここでは、完成車の NV 商品性の目標は矢印の範囲で示され

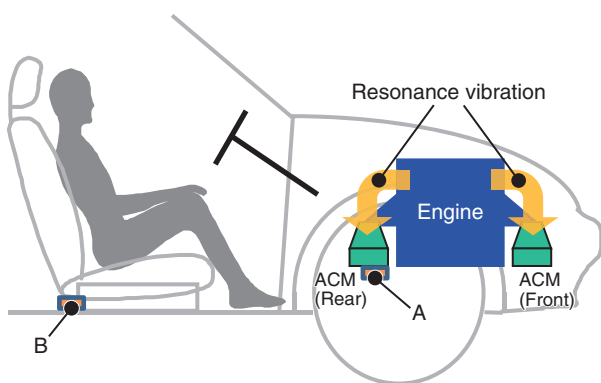


Fig. 11 Measurement points

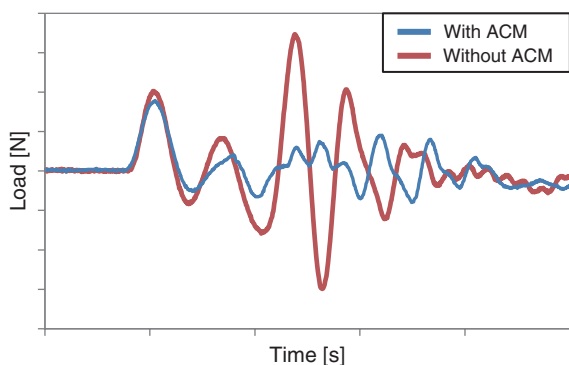


Fig. 12 Input load for rear ACM

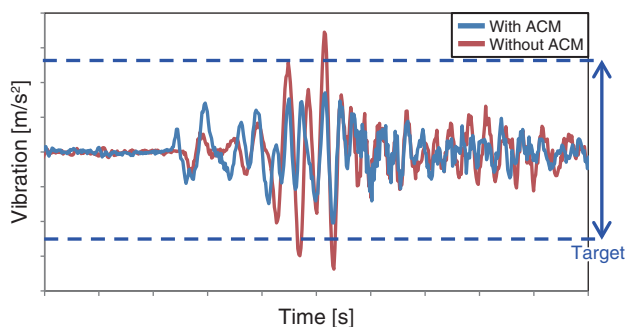


Fig. 13 Floor vibration

ている。ACM 制御の適用によってフロア振動が低減され、NV 商品性の目標を達成した。

以上より、完成車においてエンジン再始動時 ACM 制御の NV 商品性効果が確認された。

6. まとめ

運転者の意思と関係なく発生するエンジン再始動時共振振動の課題に対し、次世代 ACM を開発することにより完成車の NV 商品性の目標を達成し、以下を構築した。

- (1) エンジン再始動時共振振動の開始タイミングを把握し、事前の DC 電流の印加により初回の電流制御からエンジン共振振動の相殺に必要な大振幅 ACM 駆動を可能とし、車体への振動伝達を低減する ACM 新制御手法を構築した。
- (2) ボビンレスアクチュエータ、昇圧仕様 ACM-ECU によってエンジン再始動時共振振動に対応する大振幅かつ高応答を実現する ACM システムを構築した。

参考文献

- (1) 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
- (2) 石黒哲矢, 米竜大, 根本浩臣: 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, Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.1, p.172-178

■ 著 者 ■



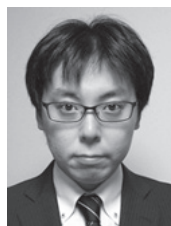
米 竜 大



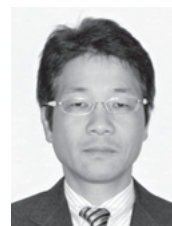
岡 本 英 之



山 口 貴 司



古 井 慎 太 郎



根 本 浩 臣