

SPORT HYBRID i-MMD におけるハイブリッドドライブモードの2次振動低減のための制御パラメータ最適化

Control Parameter Optimization for Reduction of 2nd Order Vibration
in Hybrid Drive Mode of SPORT HYBRID i-MMD

霍 田 龍 典*
Tatsunori TSURUTA

要 旨

新型ハイブリッドシステムの SPORT HYBRID i-MMD を採用した 2014 年モデル Accord ハイブリッドの開発において、ステアリングに伝達する 2 次振動が課題となった。これはガソリンエンジン車よりもエンジン正味トルクが大きいこと、起振源となるクランク軸 2 次回転変動が大きくなることに起因する。エンジン正味トルク抑制のみでクランク軸 2 次回転変動を低減させる場合、正味燃料消費率の増加が懸案となる。そこで、点火時期、バルブ開閉タイミングなどの燃焼制御パラメータを変更し、クランク軸 2 次回転変動、エンジン正味トルク、正味燃料消費率の最適化を図った。これによりステアリング振動目標を達成しつつ、エンジン正味トルク抑制量を 5 Nm 軽減することができ、正味燃料消費率の増加量を 1 % 回復できる最適点を見出すことができた。

ABSTRACT

During development of the 2014 model-year Accord Hybrid, for which the SPORT HYBRID i-MMD new model hybrid system was adopted, 2nd-order vibration transmitted to the steering became an issue. This occurred because the vehicle has higher engine net torque than a gasoline engine vehicle, so that there is larger crankshaft revolution 2nd-order fluctuation, which is the source of the vibration. There is concern that using only reduction of engine net torque as the means to lessen crankshaft revolution 2nd-order fluctuation could cause an increase in the brake-specific fuel consumption. Therefore the combustion control parameters, such as ignition timing and valve operation timing, were changed as a way of optimizing crankshaft revolution 2nd-order fluctuation, engine net torque, and brake-specific fuel consumption. These measures achieved the steering vibration target while also determining the optimal point where the amount of engine net torque reduction could be lessened by 5 Nm and 1% of the increase in brake-specific fuel consumption could be recovered.

1. ま え が き

自動車メーカー各社からハイブリッド車 (Hybrid Electric Vehicle: HEV) が発売されている中、燃費性能以外の魅力向上も重要となっている。その中で、振動騒音 (NV) 性能においては、HEV は走行中のエンジン稼働時と非稼働時の室内音レベル差が大きく、認識しやすいことが課題として挙げられる⁽¹⁾。

Honda は、2012 年に 2.0 L ガソリンエンジンと 2 個のモータを組み合わせた新しい HEV システム、SPORT HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive (SPORT HYBRID i-MMD) を発表した^{(2), (3)}。従来の 1 モータ式である Integrated Motor Assist (IMA)⁽⁴⁾ がパラレルハイブリッド機構であるのに対し、SPORT HYBRID i-MMD はシリー

ズハイブリッド機構を備えている。これにより JC08 モードでは 30.0 km/L の低燃費を達成した。

シリーズハイブリッド運転をおこなうハイブリッドドライブモードでは、エンジン動力はジェネレータによる発電のためだけに使われ、実際の走行はモータのみでおこなう。この時、エンジン動力は駆動系に直結しないため、エンジン運転条件は要求される車両加速度や車速に依存しない。よって、正味燃料消費率 (BSFC) が最小となる運転条件で制御することが可能である。

エンジンと駆動系が直結しているガソリンエンジン車は、緩加速走行時の場合、必要とされるエンジン正味トルクが BSFC 最小運転時に対し 30 Nm 低いいため、BSFC 最小領域での運転はできない。しかし、SPORT HYBRID i-MMD のハイブリッドドライブモードでは、常に BSFC

* 四輪 R&D センター

が最小となる高いエンジン正味トルクで運転することが可能であるため、クランク軸2次回転変動が増加することによりエンジン2次振動が増加した。これが車体へ伝達することによってステアリングホイール2次振動(ステアリング2次振動)が課題となった。

エンジン正味トルク抑制のみでクランク軸2次回転変動を低減させる場合、BSFCの増加が懸案となる。そこで点火時期、バルブ開閉タイミングなどの燃焼制御パラメータを変更し、クランク軸2次回転変動、エンジン正味トルク、BSFCを最適化した制御にてエンジン正味トルクの抑制をおこなった。本稿では、その一連の内容について報告する。

2. SPORT HYBRID i-MMD の特徴

Fig. 1はSPORT HYBRID i-MMDの構成図である⁽⁵⁾。動力源はエンジンであり、その動力を用いてジェネレータにより発電する。発電した電気はバッテリーに蓄えられ、モータの駆動力に使われる。図中の実線は動力が機械伝達する経路、破線は電気が伝達する経路を示す。

SPORT HYBRID i-MMDでは走行時の車速やバッテリー残量により、運転モードが切り替わる。各モードでの動力伝達経路をFig. 2に示す。図中の太実線は各モードにおいて実際に動力と電気が伝達する経路を示す。

Fig. 2(a)のEVモードでは、エンジンは停止しており、バッテリーに蓄えた電気によりモータがタイヤを駆動させる。

Fig. 2(b)のエンジンドライブモードでは、オーバードライブクラッチが結合し、エンジン動力が直接タイヤへと機械伝達する。モータよりエンジンの効率がよい車速70 km/h以上の巡航時に用いられる。

Fig. 2(c)のハイブリッドドライブモードでは、エンジン動力は直接タイヤへ機械伝達されず、ジェネレータによる発電のためだけに使われる。タイヤへの動力伝達は全てモータによりおこなわれ、エンジンよりモータの効率がよい車速70 km/h以下の走行時に用いられる。このハイブリッドドライブモードは、パラレルハイブリッド機構である従来のIMAには無い、SPORT HYBRID i-MMD最大の特徴である。

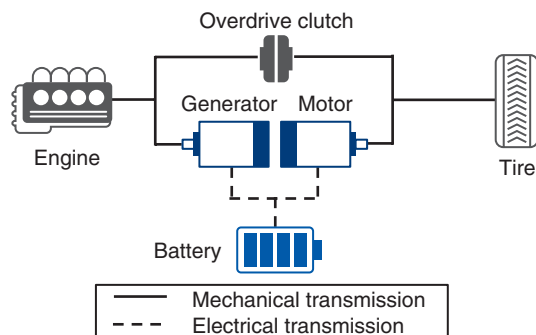


Fig. 1 SPORT HYBRID i-MMD system configuration

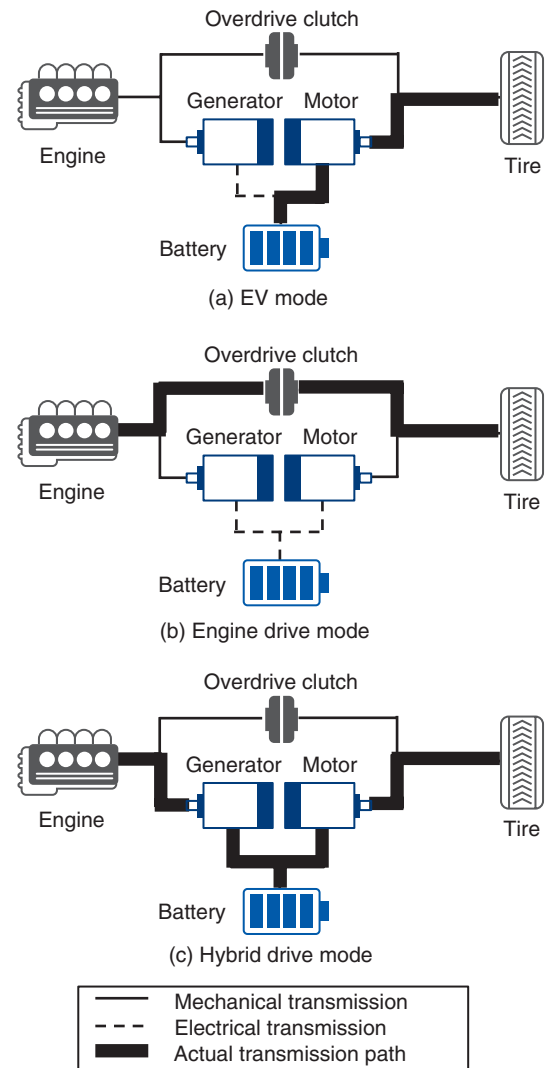


Fig. 2 Three drive modes in SPORT HYBRID i-MMD

3. ステアリング振動課題と振動目標超過原因

3.1. 開発初期のステアリング振動レベル

Fig. 3に2014年モデル Accord ハイブリッド(新型 Accord ハイブリッド)の開発初期における緩加速走行時のステアリング2次振動レベルを示す。開発初期は約1800 rpmから2000 rpmで目標ラインを4 dB超過しており、低減することが必要となった。

3.2. ステアリング2次振動目標超過原因

ステアリング2次振動が目標を超過したメカニズムについて、振動起振力の面から解析をおこなった。

ガソリンエンジン車のステアリング2次振動は、クランク軸2次回転変動が駆動系部品から足回り部品を介してステアリングに伝達する経路と、クランク軸2次回転変動に起因して発生するエンジン2次振動が、エンジンマウントを介してステアリングに伝達する経路の二つが存在する。

新型 Accord ハイブリッドのハイブリッドドライブモード時には、エンジン動力はジェネレータによる発電

のみに使われ、駆動系に伝達する経路が存在しない。よってステアリング2次振動はエンジンマウントを介する伝達経路によって発生する。

Fig. 4はSPORT HYBRID i-MMD用2.0 Lエンジンにおいて、エンジン正味トルクごとにBSFCが最小となるよう制御設定した時のBSFCコンター図である。図中のBSFC値が小さい領域ほど燃費が良いことを示す。

ガソリンエンジン車の緩加速走行時を斜線の枠で示す。ユーザのアクセルの踏み方によって、同一エンジン回転数でもエンジン正味トルクが大きく変化する。また、エンジンと駆動系が直結しているため、BSFCが最小となる領域で運転しようとした場合、高いエンジン正味トルクが発生して急加速走行となってしまう。よって、緩加速走行においてはBSFCが最小となる高トルク領域を使用することが難しい。

一方、新型Accordハイブリッドのハイブリッドドライブモード時は、エンジン動力は駆動系に直結しないため、ユーザのアクセルの踏み方、要求される車両加速度、車速に依存せず、エンジンは常にBSFCが最小となる図中の実線をトレースするように制御される。これにより、緩加速走行時にはガソリンエンジン車よりも発生するエンジン正味トルクは大きくなる。

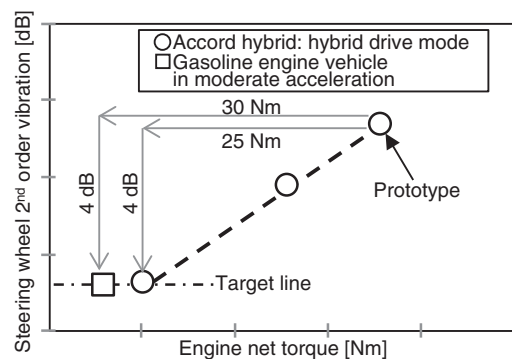
Fig. 5に2000 rpmにおける、エンジン正味トルクとステアリング2次振動、エンジン2次振動、クランク軸2次回転変動の関係を示す。図中の○印は新型Accordハイブ

リッドのハイブリッドドライブモードでの緩加速走行時においてエンジン正味トルクを変化させた時の位置づけ、□印はガソリンエンジン車の緩加速走行時の位置づけを示す。エンジン正味トルクが増加すればエンジン2次振動、クランク軸2次回転変動が増加し、ステアリング2次振動も増加する傾向にあるため、それぞれ相関がある。

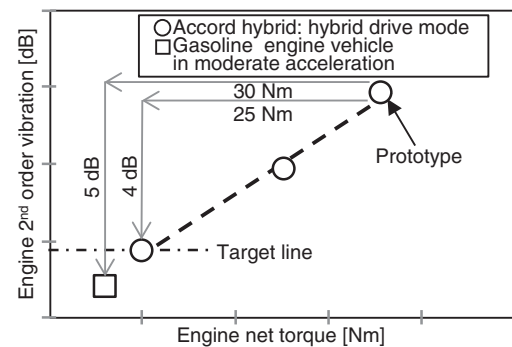
また、新型Accordハイブリッドの開発初期はガソリンエンジン車に対しエンジン正味トルクが約30 Nm増加し、エンジン2次振動が5 dB、クランク軸2次回転変動が6 rpm増加している。

これより、ハイブリッドドライブモードでステアリング2次振動目標を超過した主原因は、エンジン正味トルクが増加したためと考えられる。

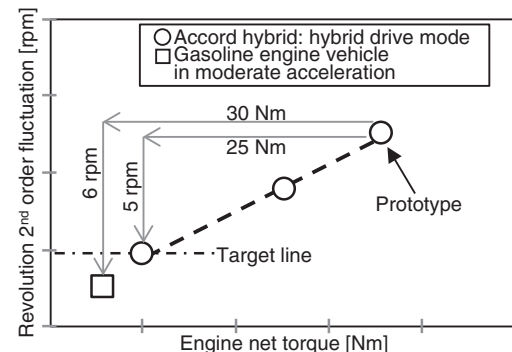
また、ステアリング2次振動目標を達成するためには、



(a) Engine net torque and steering wheel 2nd order vibration at 2000 rpm



(b) Engine net torque and engine 2nd order vibration at 2000 rpm



(c) Engine net torque and revolution 2nd order fluctuation at 2000 rpm

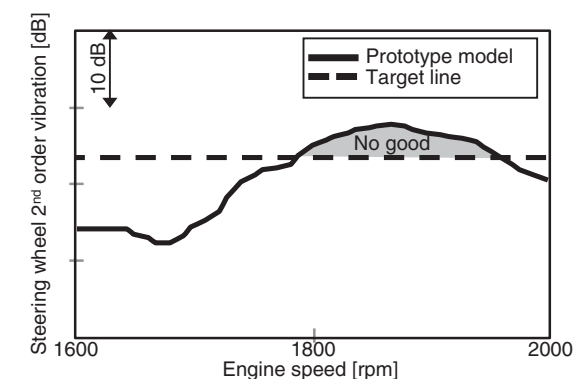


Fig. 3 Prototype model steering wheel 2nd order vibration and target line

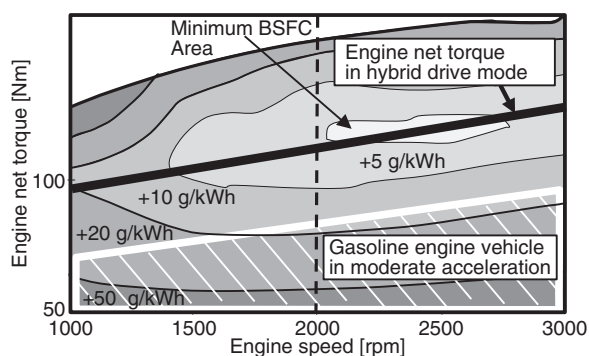


Fig. 4 BSFC and engine net torque under moderate acceleration in Accord Hybrid

Fig. 5 Engine net torque and each 2nd order parameter at 2000 rpm

エンジン 2 次振動を 4 dB, クランク軸 2 次回転変動を 5 rpm 低減しなければいけないことがわかる。

4. クランク軸 2 次回転変動低減と BSFC 低減の二律背反関係

エンジン正味トルクを抑制させることでクランク軸 2 次回転変動を低減した場合, BSFC がどの程度変化するかを確認した。

Fig. 6 は, エンジン正味トルクと BSFC の関係を示すグラフである。Fig. 5 と逆傾向となり, エンジン正味トルクが低減すると BSFC は増加し, クランク軸 2 次回転変動と BSFC は二律背反関係にあることがわかる。これはエンジン正味トルクを低減させると, Fig. 4 の実線で示した BSFC 最小ラインから遠ざかるためである。クランク軸 2 次回転変動の目標値までエンジン正味トルクを低減した場

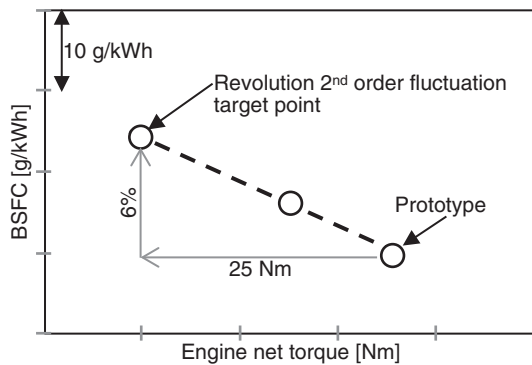


Fig. 6 Engine net torque and BSFC in hybrid drive mode at 2000 rpm

合, BSFC は開発初期に対し 6 % 増加するため, BSFC を改善する方法を検討することとした。

5. 燃焼制御パラメータ最適化による BSFC 増加量軽減

NV と燃費において理想的な姿は, クランク軸 2 次回転変動目標を達成しつつ, エンジン正味トルク抑制量を減らして BSFC 増加量を軽減させる制御である。ジェネレータによる発電量も考慮すると, エンジン正味トルクは高い方が望ましい。

それを達成するため, 各エンジン正味トルクにおいて Fig. 4 の BSFC 値になるようにセッティングされている基準の燃焼制御から, 点火時期, バルブ開閉タイミング等の燃焼制御パラメータを変更してエンジン正味トルクを抑制することにより, クランク軸 2 次回転変動, エンジン正味トルク, BSFC の最適化を図る検討をおこなった。

5.1. 燃焼制御パラメータ変更によるクランク軸 2 次回転変動と BSFC の変化

スロットル開度 (TH), 点火時期 (IG), EGR 量, インテークバルブ可変システムのパルブ開閉タイミング (VTC) に代表される燃焼制御パラメータのパラメトリックスタディテストにより, 2 次回転変動目標を達成しつつ BSFC が最小となる制御点を模索した。エンジン回転は 2000 rpm で一定とした。

テストした全データを比較した 3D コンター図を Fig. 7

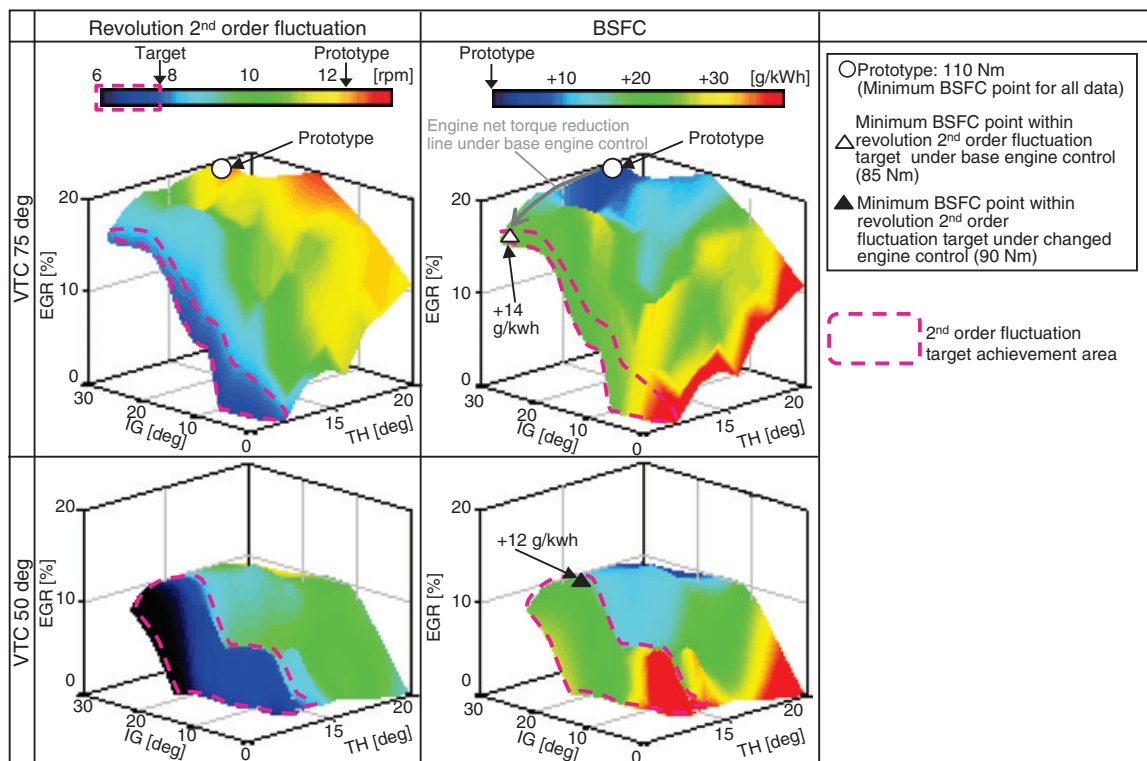


Fig. 7 Relationship of revolution 2nd order fluctuation and BSFC under various TH, IG, EGR, and VTC at 2000 rpm

に示す。図中上段の VTC75 deg および下段の VTC50 deg において、TH, IG, EGR 量を変化させた結果である。VTC 角度が大きいほど進角側を示す。左列がクランク軸2次回転変動を示すコンター図であり、色が赤いほど値が大きいことを示す。クランク軸2次回転変動の目標を達成する範囲を破線で囲んだ領域で示す。右列が BSFC を示すコンター図であり、色が赤いほど BSFC が大きいことを示す。

燃焼制御パラメータを変化させることにより、クランク軸2次回転変動と BSFC の値が大きく変化することがわかる。

5.2. クランク軸2次回転変動目標達成範囲における BSFC 最小点の抽出

Fig. 8 は、Fig. 7 のパラメトリックスタディテストの結果を、横軸にエンジン正味トルク、縦軸に BSFC で整理した図である。灰色で塗りつぶしたコンター図は、クランク軸2次回転変動の大きさを示しており、色が濃いほど値が大きい。8 rpm がクランク軸2次回転変動の目標値である。

図中の実線は、ベースセッティングの燃焼制御にて、エンジン正味トルクを開発初期の○印から低減させていった時の変化線であり、図の破線はクランク軸2次回転変動が 6, 7, 8, 9, 10 rpm となる制御条件で BSFC が最小となる✕印を繋げた線である。

この2線を比較すると、同じクランク軸2次回転変動でも、実線より破線の方がエンジン正味トルクが大きく、BSFC が小さいことがわかる。

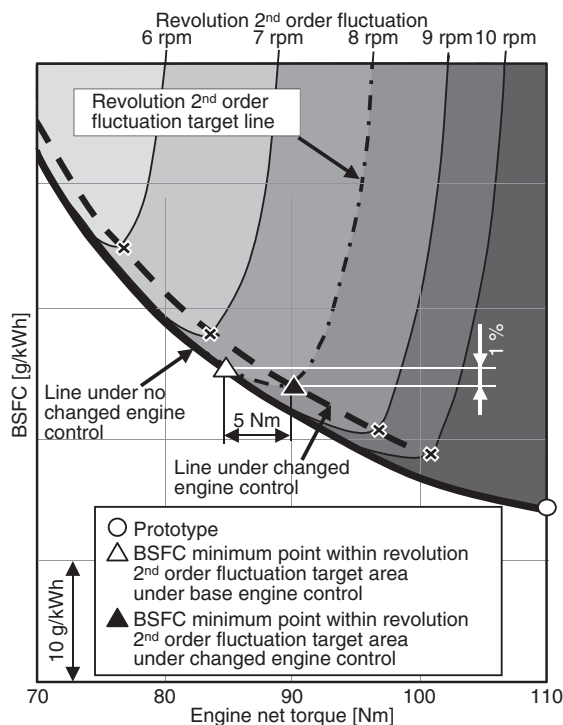


Fig. 8 Comparison of engine net torque, BSFC, and revolution 2nd order fluctuation under different engine combustion controls at 2000 rpm

Table 1 Comparison of engine control parameters for Control A and Control B

	TH [deg]	IG [deg]	EGR [%]	VTC [deg]	Revolution 2nd order fluctuation [rpm]	Engine net torque [Nm]	BSFC
Control A	15	15	20	75	11	100	Same
Control B	17	28	10	50	9.2		

また、実線上のクランク軸2次回転変動目標達成点を△印で示し、破線上での目標達成点を▲印で示す。この2点は Fig. 7 の3D 図にプロットされた△印、▲印と同じ制御点である。▲印は△印に対し、クランク2次回転変動が同等であるが、エンジン正味トルクが5 Nm 高く、これにより開発初期に対する BSFC 増加量も 1% 回復する、燃焼制御の最適点である。

以上のようにクランク軸2次回転変動目標を達成しつつ、エンジン正味トルク抑制量を減らして BSFC 増加量を軽減させる最適点を見出すことができた。

5.3. 燃焼制御パラメータ最適化時における燃焼指圧波形の特徴

Fig. 8 にて、燃焼制御パラメータ条件によって最適化を図ることが可能であることがわかったが、その時の筒内圧波形の特徴、および燃焼パラメータにより、最適化を図るために必要なパラメータ変化について考察した。

Table 1 はエンジン正味トルク、BSFC が同じで、クランク軸2次回転変動が異なる制御 A、制御 B の燃焼パラメータ比較表である。Fig. 9 は制御 A、制御 B についてクランク角ごとに、1 気筒分の燃焼圧波形を上側、エンジン正味トルクの全気筒合計値を下側に示した図である。制御 A に対し、制御 B はクランク軸2次回転変動が小さいため、両者の比較では制御 B の方が有利であるといえる。

燃焼圧波形に着目すると、制御 B はクランク角 340 deg

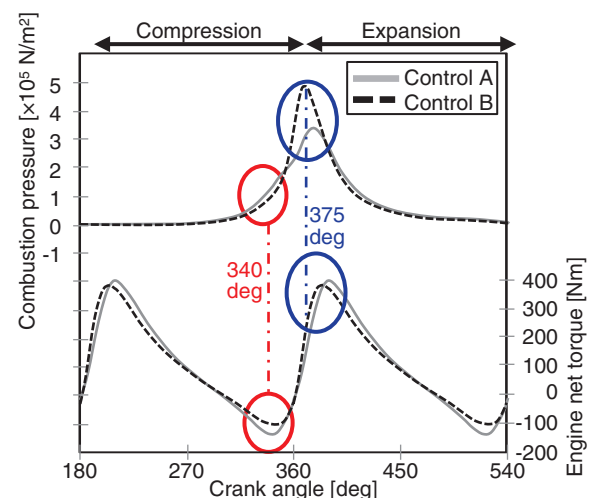


Fig. 9 Crank angle data of combustion pressure and engine net torque for Control A and Control B at 2000 rpm

近辺となる圧縮上死点手前の圧縮圧力が制御 A よりも小さい。逆に、クランク角 375 deg 近辺となる圧縮上死点後に発生している筒内圧ピークは制御 A のピークよりも高く、発生タイミングも制御 A より進角側である。これは制御 B の流入空気量が制御 A より少なく、IG が進角方向であることを示している。流入空気量の影響により、圧縮上死点手前のトルクの絶対値は制御 B の方が小さくなっている。

一方、圧縮上死点後のトルクは制御 A, B 共に同等である。これは IG 進角により制御 B の筒内圧ピークは高いが、ピーク発生位置がクランク上死点付近に位置するため、筒内圧をクランク回転力へ変換する分力成分が小さくなるためである。

この制御 A, B の、エンジン正味トルク変動成分の各次数を比較したグラフを Fig. 10 に示す。本稿で課題としている 2 次成分は制御 B の方が小さい。

これより、圧縮上死点前の圧縮圧力がトルク 2 次変動へ及ぼす影響が大きく、圧縮上死点直後の筒内圧については、ピーク発生位置がクランク角 375 deg 程度の進角側であれば、トルク 2 次変動への影響は少ないと考えられる。

以上の結果より、クランク軸 2 次回転変動低減の観点においては、TH を小さくしシリンダ内流入空気量を減らしつつ、それによるエンジン正味トルク不足分は IG をノッキング直前まで進角させて対応するような燃焼制御が望ましい。

一方、エンジン正味トルクと BSFC の観点では流入空気量増加とポンピングロス低減をねらうため TH を大きくし、IG を進角させる燃焼制御が望ましいが、流入空気量が増えるため、クランク軸 2 次回転変動は増加する。よって、IG 進角は両者に効果的だが、TH は二律背反関係になる。

両者を両立させるには、VTC の遅角化、つまりアトキンソンサイクルにより、シリンダ内に流入した空気を圧縮工程にてインテーク内に戻す手法が有効であり、それと TH 増大、IG 進角を組み合わせることにより、最適化を図ることができる。

新型 Accord ハイブリッドにおいてステアリング 2 次振動低減を検討開始した当初は、クランク 2 次回転変動は圧

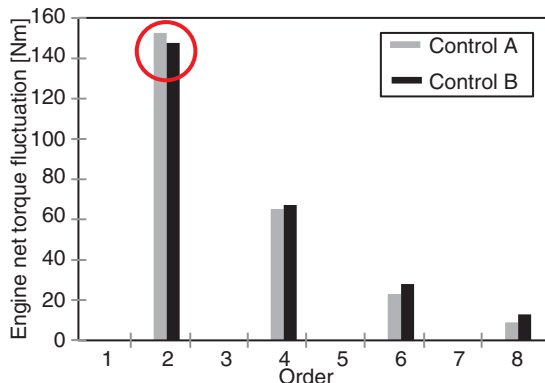


Fig. 10 Orders of engine net torque fluctuation for Control A and B at 2000 rpm

縮上死点後の燃焼圧の影響が支配的であると考え、燃焼圧低減によるエンジン正味トルク抑制に主眼を置いていた。その際、圧縮上死点前の圧縮圧については未考慮であった。しかし、パラメトリックスタディテストの結果、圧縮上死点後の燃焼圧だけでなく圧縮上死点前の圧縮圧の影響も無視できないことが判明した。そこで、圧縮圧の低減も考慮に入れることで、より効率的な燃焼制御が実現できることがわかった。

6. ステアリング振動低減実機検証結果

2000 rpm 以外のエンジン回転数についても、燃焼制御パラメータ最適化検討を同様におこない、2 次振動と燃費の成立見通しが得られたことから、量産モデルに適用した。

Fig. 11 にステアリング 2 次振動の低減効果を示す。量産車ステアリング 2 次振動は開発初期に対し最大 4 dB 低減し、目標を達成することができた。

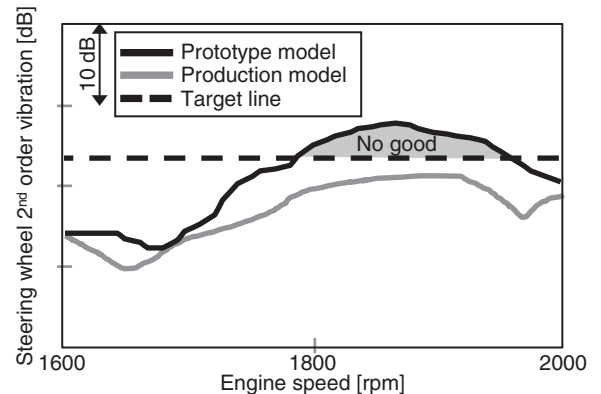


Fig. 11 Steering wheel 2nd order vibration

7. まとめ

以下に述べる、ステアリング 2 次振動の原因解析と低減手法の確立により、実車においてステアリング 2 次振動目標を達成することができた。

- (1) 新型 Accord ハイブリッドのハイブリッドドライブモードでは、各エンジン回転で BSFC が最小となる運転制御をおこなう。これによりエンジン正味トルクが従来ガソリンエンジン車の緩加速走行時に対して約 30 Nm 増加する影響で、エンジン 2 次振動が最大 5 dB、クランク軸回転変動が 6 rpm 増加する。これが開発初期において、ステアリング 2 次振動が目標を超過した主原因である。
- (2) ステアリング 2 次振動低減のため、クランク軸 2 次回転変動、エンジン正味トルク、BSFC を最適化する燃焼制御パラメータスタディをおこなった。その結果、アトキンソンサイクル化をねらった燃焼制御にてエンジン正味トルク抑制をおこなうことにより、クラン

ク軸 2 次回転変動の低減目標を達成しつつ、変更前の
燃焼制御に対し BSFC 増加量を 1 % 回復できる、最
適点を見出すことができた。

参考文献

- (1) 松本真一, 石倉誠:最新のハイブリッド乗用車, 自動車技術, Vol.61, No.9, p.49-54(2007)
- (2) 米川明之, 渡辺修, 関谷明堂, 石川直宏:Accord ハイブリッド用 2.0L エンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.2, p.26-31
- (3) 井手博仁, 須永義弘, 樋口成智:2014 年モデル Accord 用 SPORT HYBRID i-MMD 制御システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.2, p.32-40
- (4) 落合志信, 内堀憲治, 原一広, 鶴見隆史, 鈴木実:ハイブリッドカー「インサイト」用モータアシストシステムの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.1, p.7-14
- (5) <http://www.honda.co.jp/ACCORD/webcatalog/performance/details01/>

■ 著 者 ■



霍 田 龍 典