

特集：サステイナブル “Zoom-Zoom”

2

マツダ i-stop (アイ・ストップ)
Mazda i-stop

猿渡 健一郎 ^{*1}	田賀 淳一 ^{*2}	吉田 真 ^{*3}
Kenichiro Saruwatari	Junichi Taga	Makoto Yoshida
八雲 正 ^{*4}	吉井 輝夫 ^{*5}	上原 茂幸 ^{*6}
Tadashi Yagumo	Teruo Yoshii	Shigeyuki Uehara

要 約

マツダは「サステイナブル “Zoom-Zoom”」にて、走る喜びを体現しながら環境と安全にも配慮した技術を今後導入することを宣言している。当技術は、この宣言の核となる新技術である。

世界的に環境問題への取り組みが議論される中、車両停止時の燃料をカットすることは「Zoom-Zoomな走り」を損なうことなく無駄を排除し、特に渋滞が厳しい都市部での環境問題対応に適切な手段ととらえている。しかしながら、これまでのスタータモータのみを活用した再始動システムでは、停止から再始動時までの時間がかかり実交通流に乗りにくいこと、始動時の振動・音が大きく快適性と安心感を得られないことがこれまで懸念されていた。

マツダの「i-stop (アイ・ストップ)」は直噴エンジンのメリットを生かし、エンジン休止時からエンジン内部に燃料を直接噴射し爆発させる「燃焼始動式」を採用した。これによりスタータモータのみを使用した時より短時間でスムーズにエンジンが再始動でき、ドライバや同乗者にストレスを感じさせずに環境問題への対応が可能となった。

Summary

Mazda announced that the new environmentally-friendly technology which provides both enjoyable and safe driving to our customers would soon be introduced into Axela under the slogan of “Sustainable Zoom-Zoom”. The new technology described in this paper was the key to fulfilling the commitment made by Mazda.

While environmental issues have vigorously been discussed worldwide nowadays, shutting off the fuel of the vehicle in a stop state without spoiling “Zoom-Zoom” is an effective way to avoid the wasteful use of fuel. This is regarded as an appropriate means to solve environmental issues in urban areas where traffic congestion is greatest. The conventional idol-stop systems which rely only on a starter motor have the following disadvantages. 1) It is not easy for the vehicle to merge into the traffic flow because it takes too long to get it restarted from a stop state. 2) Sever vibrations and loud noise upon restarting the engine hinder our customers from feeling comfortable and safe.

By taking advantage of the features of the direct injection system, we have designed Mazda “i-stop” for restarting the engine through combustion by injecting the fuel directly into the cylinders while the engine is stopped and igniting it to generate the force necessary to push down the piston. With this technology, we have successfully developed the new environmentally-friendly system that not only saves fuel but also restarts the engine more quickly and quietly than the conventional idle-stop systems, enabling drivers and passengers to feel more comfortable and stay stress-free.

1. はじめに

エンジンがアイドルしている間は、燃料を燃やし続

けている。この燃料消費をなくし、低燃費に寄与しようというのが、アイドルストップ技術である。しかし、これまでのアイドルストップ車は再発進にかかるタイムラグ、振

*1 パワートレイン開発推進部
Powertrain Development Promotion Dept.

*3 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

*2 エンジン実研部
Engine Testing & Research Dept.

*4~6 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

動や音が乗員者の快適性・安心感を損なってしまうことが問題としてあったため、マツダは従来のスタータモータ（以下スタータ）だけを用いる方法ではなく、シリンダ内に直接燃料を噴射し爆発させ、ピストンを押し下げてエンジンを再始動させるシステムを新たに開発した。そのために、エンジン休止時に燃焼室内へ燃料を直接噴射する必要があり、直噴エンジンをベースとしている。エンジン休止時までの間で、燃焼再始動のために最適な位置にピストン位置を確実に制御し、かつ燃焼室内の掃気を充分に行うことで、迅速に始動させることを可能にした。

これらの技術によって、オートマチック・トランスミッション（以下AT）車の社内計測値で、従来のアイドリングストップシステムのおよそ半分となる0.35秒での再始動を実現すると同時に、国内10・15モードで最大約10%の燃費改善効果を可能とした（アクセラクラスでの値）。

2. アイドルストップシステム概要

2.1 エンジン休止・再始動・停止条件

i-stopにおけるエンジンの休止・再始動の制御は、ドライバーが特別な操作をすることなく、エンジンを自動休止・再始動させるシステムを採用している。

(1) エンジン休止

AT車においては、Dレンジで車速が0km/hでブレーキを踏み所定のブレーキ圧が発生した段階でエンジンを休止させる。マニュアル・トランスミッション（以下MT）車においては、シフトポジションがニュートラルでクラッチがリリースされ車速が3km/h以下になった状態でエンジンを休止させる。ただし、AT車、MT車ともにエンジン/トランスミッションが完全暖気であること、室内の温度が快適温度になっていること、バッテリーの状況が良好であることがエンジン休止の条件となっており、常にこれらの状況をモニタしている。

(2) ユーザ意志によるエンジン再始動

ユーザが発進意志をもって操作をしたと判断される動作をした際は、自動的にエンジンを再始動させる。AT車の場合はブレーキをリリースする、ステアリングを操舵する、およびエンジン休止後ニュートラルにシフトしその後DレンジやRレンジ等へシフトした際、MT車はクラッチを踏み込んだ際が対象。

(3) ユーザ意志以外でのエンジン再始動

エンジン休止状態で、室内温度、バッテリー状態等が設定値以外の状況となると、快適性・安全性を確保するためにエンジンを自動的に再始動させる。この場合は、自動的にエンジンが始動するために、車が再始動しても安全な状態であることが再始動の条件としている（MT車でシフト位置がニュートラルポジション等）。

(4) 危険操作時のエンジン停止

エンジン休止状態でボンネットを開ける、シートベルト

を外してドアを開ける等の危険あるいはドライバーが運転を終了したと判断できる場合は、警告音を出すとともにエンジンを完全停止させる。この状態からエンジンを始動させるには、通常の始動と同じキー操作によって始動可能である。

2.2 システム構成

Fig.1にAT車のシステム全体図を示す。システム全体としては大きく四つに分かれ、①エンジンを再始動させるシステム、②バッテリーの状況をコントロールするシステム、③AT車におけるエンジン始動時の車両挙動制御システム、④空調・シートベルトスイッチ等の信号入力およびメータ内表示系である。

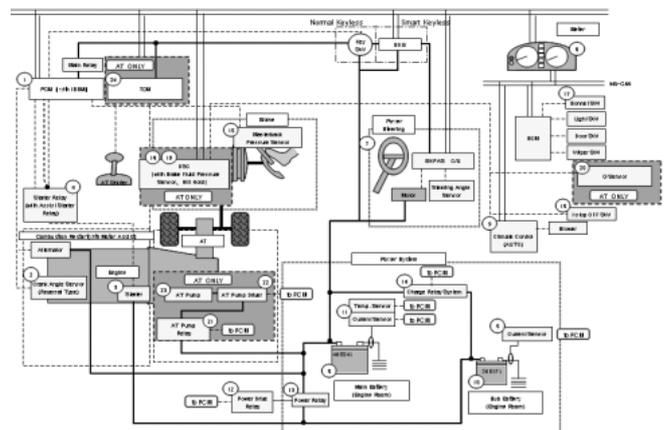


Fig.1 System Image (AT Vehicle)

3. エンジン再始動システム

3.1 燃焼始動技術

i-stopでは、従来のアイドルストップ機構であった発進時の応答遅れによる使いづらさを解消するため、燃焼始動スタータアシスト方式による迅速な始動で、ストレスのないアイドルストップ機構を目指した。燃焼始動スタータアシスト方式の再始動プロセスをFig.2に示す。

再始動プロセスは、①再始動指示（AT車：ブレーキoff、MT車：クラッチ踏み込み）と同時に膨張行程に停止している気筒に燃料を噴射するとともにスタータ駆動を開始、②燃料が空気と混合する時間を待って点火、③圧縮上死点を越えた後、次の燃焼気筒の混合気点火、④以降の燃焼気筒を連続して燃焼させて回転数を立ち上げる、の四つからなる。この燃焼始動スタータアシストで迅速な始動を行うためには、再始動開始後2回の燃焼力が十分に得られるように新気量を確保することが必要であり、i-stopではこの実現手段として、筒内掃気制御およびピストン停止位置制御を新たに開発した。

これらの制御はエンジンが休止する間に行われる。その詳細を以下に説明する（Fig.3）。

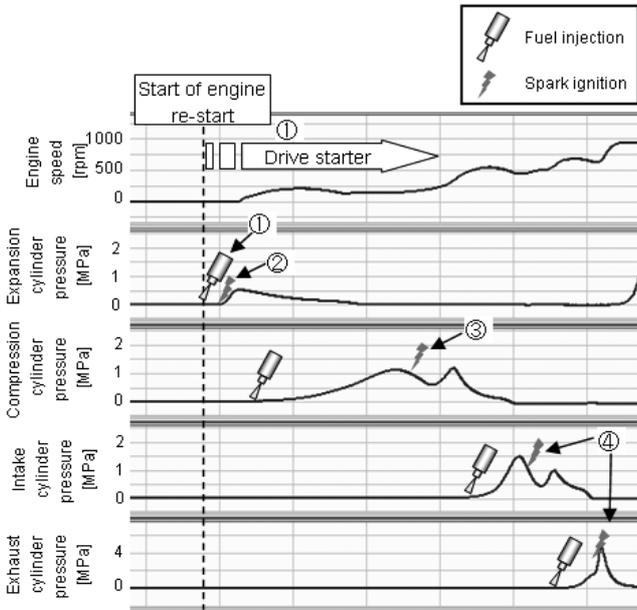


Fig.2 Engine Restart Process

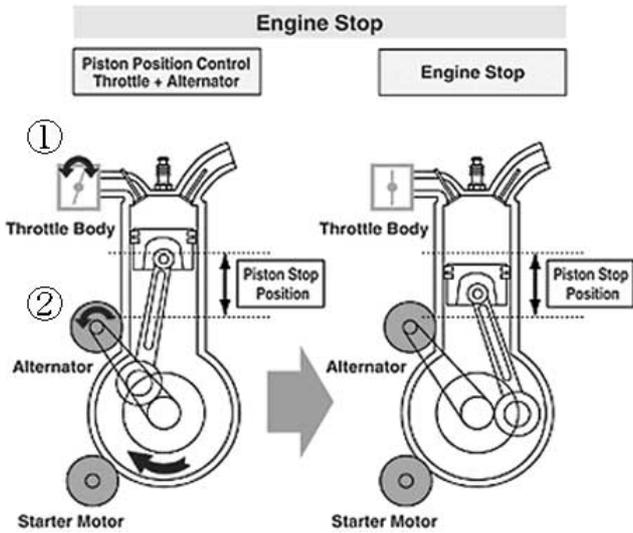


Fig.3 Operating Principle

(1) 筒内掃気制御

燃焼力を十分に得るためにはまず筒内の既燃ガスを減らし、新気濃度を高める必要がある。i-stopではこの実現のため、燃料カット後に通常閉じているスロットルを開ける制御を行っている (Fig.3-①)。しかしスロットルを開けた状態でエンジンを停止させると、圧縮反力による回転数変動でエンジンが振動し不快なフロア振動につながる。また、このフロア振動による不快感は、エンジンが停止する直前の揺り返しに特に影響される。そこで、燃料カット直後にはスロットルを開けて筒内の掃気を行うとともに、回転数が低下するとスロットルを閉じることでエンジン停止直前の揺り返しを抑え、始動性と快適性の両立を図った。

(2) エンジン停止位置制御

エンジン休止中の筒内は大気圧になっているため、再始動開始後2回の燃焼を行う膨張行程および圧縮行程気筒の空気量は、その容積つまり停止位置に依存する。従って、エンジンの停止する角度を適正に制御することが、安定して迅速な再始動を実現するためには必要になる。

Fig.4にエンジン停止位置に対する再始動時間の関係を示す。上死点および下死点付近では再始動時間が長くなるが、ATDC (圧縮上死点後) 40deg. ~ ATDC100deg.の範囲では再始動時間が安定して短くなっており、ここに停止させれば良いということがわかる。

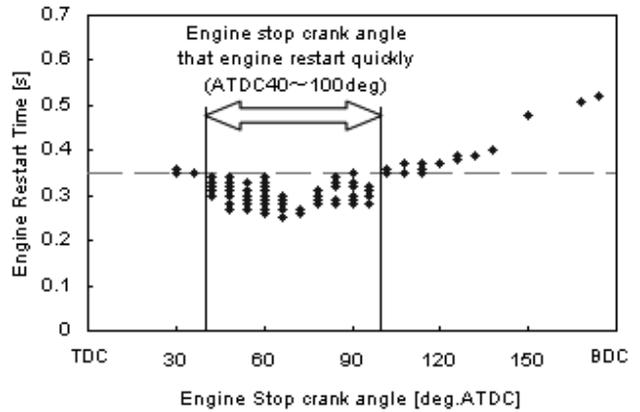


Fig.4 Engine Restart Time

エンジン停止位置制御を開発するにあたり、停止位置と燃料カット後の上死点通過回転数の関係を調査した (Fig.5)。この結果、上死点通過回転数と停止位置の間に相関があること、つまり、燃料カット後の回転数を適正範囲内にすれば停止位置を再始動時間が短い範囲に制御できることが分かった。そこで、燃料カット後にオルタネータによる発電負荷を調整し、回転数を適正範囲内に収める制御を開発した (Fig.3-②)。この制御導入による停止位置分布をFig.6に示す。迅速始動が可能な停止位置範囲に安定して制御できている。

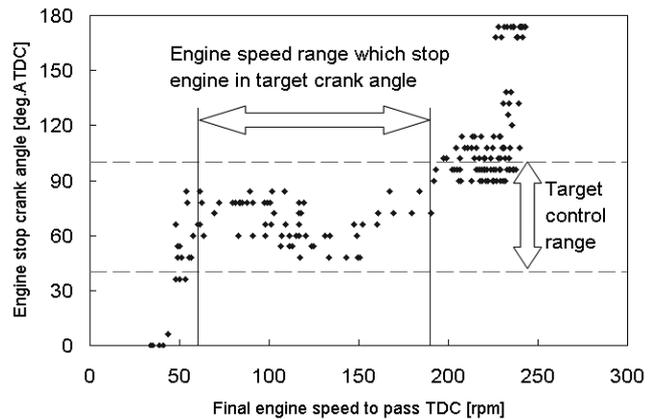


Fig.5 Engine Stop Crank Angle

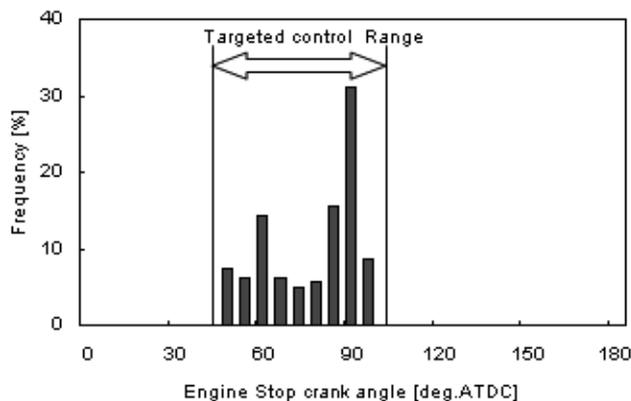


Fig.6 Distribution of Engine Stop Crank Angle

(3) 変更スベック

この再始動システムを実現するために変更した仕様は、クランクアングルセンサのタイプを逆転検出できる仕様にし、エンジンのコンピュータの仕様変更、およびMT車でエンジン回転数増加による摩耗対策として、メインメタルをアルミ合金の中でも耐摩耗性に優れた材質に変更したのみで、直噴エンジンがベースであれば非常に少ない変更で対応が可能である。

3.2 振動抑制

i-stopでは、ドライバの意思・動作に関わらず自動的にエンジンを休止・始動させるため、それに伴うショックや振動レベルが大きいと乗員に不快感を与え快適性を損ねてしまう。ハイブリッド車ではタイヤからの外乱がある走行中のエンジンの休止・始動により不快感を低減させているが、i-stop車では車両停止中にエンジンの休止・始動を行うため、タイヤの反力を受けて振動レベルは大きくなる。そこで、できる限り快適性を損ねないために、エンジン制御やエンジンマウントのハード・ソフトの両面から振動を抑制する対応が必要となった。

ソフト側での対応は前述3.1の項のとおりだが、ここではエンジンマウントからの対策内容について触れる。エンジン休止・始動時には急な回転変動により、クランク軸周りに大きなトルク変動が発生する。この時、タイヤからの反力によりパワートレイン（以下PT）はロール方向に過渡的な加振力を受ける。これによりPTはロールの慣性軸回りに刺激を受け、揺れ戻しにより車体振動が発生する。

i-stop導入車では、PTの剛体共振の連性を避けるためにサスクロスを新設し、エンジンマウントのうちロール方向の動きを規制しているロールリストラクターの位置を、エンジンの重心に近づけた。これによりエンジンのロール方向のみの動きを吸収し、PTユニット側の共振も抑えつつ車体側への振動伝達を抑制させた。更にロースリストラクターのラバー特性を変更・最適化することにより、乗員に不快感を与えないレベルまでショック・振動を抑制することができた。

4. 安全、快適性

4.1 ローンチアシスト

AT車のi-stopは、Dレンジでブレーキペダルをリリースすると同時にエンジン始動を開始する。このため、上り坂ではエンジンが始動してクリーブトルクが発生するまでの間に車両が後退してしまい、また平坦路や下り坂ではエンジンの再始動に伴うトルクによって車両の飛び出しが発生してしまうという問題が発生する。

これらの問題を解決するため、新型アクセラではローンチアシストシステムを採用し、i-stopによるエンジン休止中にドライバが踏んでいたブレーキ力をそのまま保持することで、安全な車両挙動を確保した。

ブレーキ力の保持制御は、横滑り防止システムであるDynamic Stability Control system（以下DSC）とエンジン制御ユニットであるPowertrain Control Module（以下PCM）の協調制御によって実現した。Fig.7にブレーキの制御イメージを示し、以下に説明する。

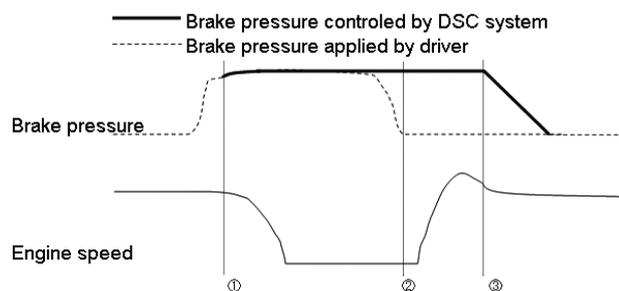


Fig.7 Brake Control Image

①で、車両停止後に路面の勾配に応じて安全が確保できるだけのブレーキ力が発生していれば、PCMはDSCにブレーキ保持を要求する。DSCがブレーキ保持を開始した後、PCMはエンジン休止制御を開始する。②で、ドライバがブレーキペダルをリリースするとPCMは再始動制御を開始する。この時DSCによってブレーキ圧は保持され、坂路でも車両は静止している。③で、エンジンの再始動が完了し、それに伴う吹け上がりが収束した後、DSCは保持していたブレーキをリリースする。この時、路面の勾配に応じて急な下り坂ほどゆっくりとリリースすることによって、通常のAT車に近い自然な発進フィーリングを実現した。

また、ブレーキ圧をリリースするタイミングは、始動後のエンジン回転数と合わせて、アクセルペダルの踏み込み量でコントロールしている。

アクセル踏み込みが小さい領域ではコントロール性を要求されるので、ブレーキ圧のリリースをゆっくり行う。アクセルの踏み込みが大きい領域では迅速な加速応答性が要求されるので、迅速にリリースする。これにより、発進時のコントロール性と応答性を両立させている。

4.2 ATの油圧制御

(1) ATシステムの概要

5速AT (FS5A-EL型) をベースに電動オイルポンプを追加し、その油圧でアイドルストップ中の発進クラッチ締結状態を保持させることで、エンジン再始動直後のスムーズな発進性能を実現させた。

(2) 作動概要

エンジン作動時はメカニカルオイルポンプより油圧を供給し、逆止弁により電動オイルポンプへの逆流を防止する。

アイドルストップ時は、メカニカルオイルポンプが停止し、電動オイルポンプを作動させる。逆止弁は開放し、AT本体へ油圧を供給する。

エンジン再始動直後は、メカニカルオイルポンプと電動オイルポンプがともに作動する。メカニカルオイルポンプが十分な油圧を供給できるようになったタイミングで逆止弁が閉じ、電動オイルポンプの作動を停止する。

(3) 搭載レイアウト

電動オイルポンプ搭載位置をAT内の油面位置に近い所に配置することにより、長期放置時の回路内エア混入を防止し、供給流量の安定化を行った (Fig.8)

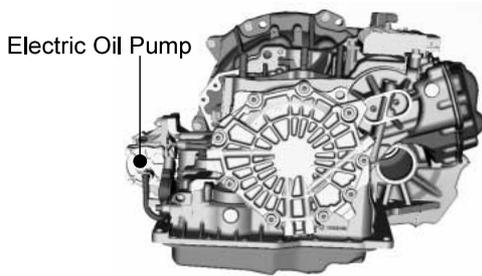


Fig.8 Layout of Electric Oil Pump

(4) 電動オイルポンプ制御概要

電動オイルポンプは、アイドルストップ直前から再発進するまで、AT内部のクラッチへ適切な油圧を供給するように制御し、スムーズな再発進性能を実現している。

4.3 バッテリマネジメント

i-stopでは、アイドルストップ中の車両電力供給用のメインバッテリーと、始動電力を補助するサブバッテリーを設け、車両電力によってアイドルストップからの再始動が影響を受けないような電源構成としている。

Fig.9にエンジン始動からアイドルストップ中、走行中のバッテリー電源回路状態を示す。メインバッテリーとサブバッテリーの間にあるパワーリレーによってアイドルストップ中の車両電力供給回路と再始動回路は分断され、再始動に必要な電力を確保する。

(1) メインバッテリーの管理

アイドルストップ中は、メインバッテリーから車両電力を供給するため、通常よりバッテリーの消耗が大きく、劣化は

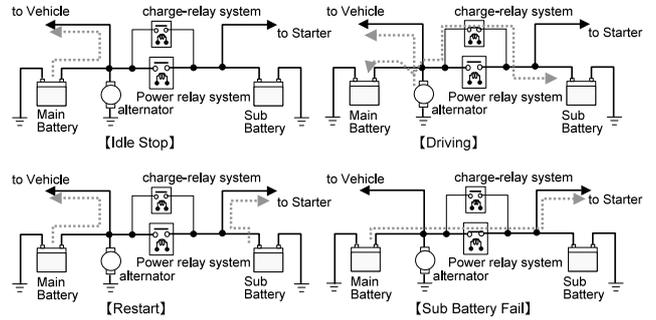


Fig.9 Circuit Configuration

早くなる。i-stopではバッテリーターミナルに設定した電流センサおよび温度センサによって、充電状態と放電深度をモニタし、これに応じてアイドルストップの制限やエンジン始動を行い、バッテリーの過放電や早期劣化を防いでいる。

更に、車両消費電力の大きいAT車ではアイドルストップなどの放電使用に対応したバッテリーを使用している。

(2) サブバッテリー制御

再始動電力を供給するサブバッテリーがフェイルすると始動不能となってしまいます。そのため、基本的にサブバッテリーは満充電状態で管理される。

車両の電力消費回路とは分けられ、必要に応じてオルタネータ充電回路に接続し満充電状態を保っている。もし、サブバッテリーがフェイルしたとしても、速やかにパワーリレー作動させメインバッテリーを接続し、始動電力を確保するよう制御する。

4.4 空調との総合制御

室内温度、外気温度などの情報により、オートエアコンアンプがアイドルストップ許可または不許可を常に判定して、PCMに送信している。この結果、エアコン使用中でもアイドルストップ許可を実現している。

アイドルストップ中は送風のみで作動となるが、エンジン休止中はエバポレータ表面とヒータコア下流に設けた温度センサが検出する値を用いて、ウォータポンプおよびエアコンコンプレッサが停止している間も快適な吹き出し温度を維持するよう、オートエアコンアンプにより補正制御を行っている。

またデフロスタ、リアデフォッグ使用時は、視界確保とバッテリー保護のためにアイドルストップ不許可の信号をPCMに発信している。

4.5 マツダ・アドバンストキーレスエントリー&プッシュボタンスタートシステムとの協調制御

アイドルストップ後の再始動の安定性と確実性を確保するために、マツダ・アドバンストキーレスエントリー&プッシュボタンスタートシステム (以下キーレス&プッシュシステム) とPCMの相互で協調制御を行っている。

(1) システム構成とエンジン再始動時の制御

キーレス&プッシュシステムは、ドライバのプッシュスタートボタン操作によりキーレスユニットが安全性を確認

したうえで電氣的にエンジン始動制御を行うシステムであり、かつキーレスユニットとPCMの二つのユニットによりスタータを制御することで、高い安全性を確保している。この考え方をアイドルストップシステムへ適応させる場合にも踏襲するが、アイドルストップシステムにおける再始動時には、通常と異なる操作でエンジン始動を行うため、PCMが再始動時の安全性を確保したうえでキーレスユニットへの再始動要求を行い、同様に二つのユニットによりスタータを制御することで高い安全性を確保している。

(2) アイドルストップ実行時の制御

ドライバが車内にいない状態でのアイドルストップ実行を回避するため、アイドルストップ実行前にアドバンストキーが車内に存在するか否かの確認(キー認証)をキーレスユニットが実施する。また、再始動の確実性を確保するため、アイドルストップ実行前にキーレス&プッシュシステムの診断を行う。

キー認証が成功し、かつ診断結果が正常であれば、アイドルストップを許可する信号をキーレスユニットからPCMに送信し、アイドルストップの実行を許可する。

キー認証が失敗するか、あるいは診断結果が異常であれば、アイドルストップを禁止する。

(3) アドバンストキー車外持ち出し時の制御

アイドルストップ状態での車両放置を防止するため、アイドルストップ中にアドバンストキーの車外持ち出しを検知した場合、PCMに対して再始動を促す信号をキーレスユニットから送信する。

5. 燃費

i-stopは車両停車時の燃料をカットすることで、燃費・CO₂を改善する技術であるため、その効果は交通環境によって異なる。また、車室内の快適性やバッテリーの状態、更には気象状況や車両の電気負荷状況によっても燃費効果は変動する。Fig.10に日本の主要都市を走行した際のデータを記載しているが、都内の渋滞では最大10%程度の燃費改善効果が期待できる。

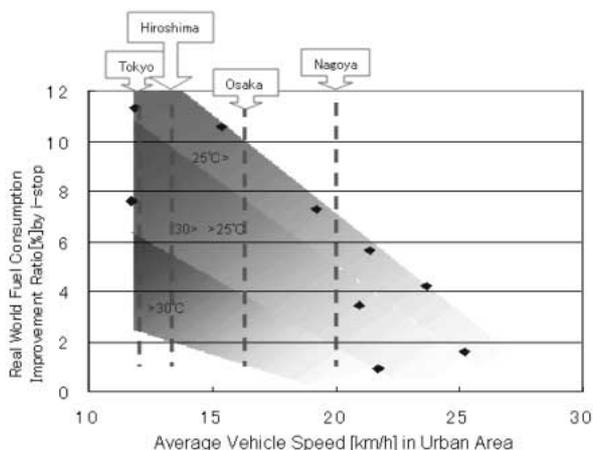


Fig.10 Effect of Fuel Economy

6. おわりに

i-stopは燃焼始動技術とピストン位置制御技術を用いて、燃費・環境性能だけでなく、ドライバが違和感なく発進でき同乗者の快適性を損なわないよう開発を進めた。

アイドルストップ技術は低燃費・低排出ガスといった環境性能に貢献できるが、広く普及させるにはドライバや同乗者に違和感なく使用していただく必要がある。

そこでより快適性を求め、停止・発進時の振動抑制やエンジン休止時の空調など車内装備の制御に力を入れた。更に安全性と利便性の両立を考えて、キーレス&プッシュシステムの制御およびバッテリーマネジメントシステムを新たに開発し、安心して快適に使用していただけるようにした。

今後ともお客様目線での開発を継続し、システムの熟成を行っていききたい。

著者



猿渡健一郎



田賀淳一



吉田真



八雲正



吉井輝夫



上原茂幸