

特集：MAZDA MX-30

04

MX-30 EV MODEL のモーターペダル開発

Motor Pedal Technology for New Mazda MX-30 EV Model

森下 慎也^{*1} 梅津 大輔^{*2} 光永 誠介^{*3}
Shinya Morishita Daisuke Umetsu Seisuke Mitsunaga
津田 顕^{*4} 岡田 光平^{*5} 服部 之総^{*6}
Akira Tsuda Kohei Okada Yukifusa Hattori

要 約

マツダは「人間が本来持っている能力を最大限に発揮させること」を追求した人間中心の考えに基づき、ドライバーとクルマが一体となる人馬一体の車づくりを目指している。マツダ初の量産電気自動車となるMX-30 EVモデルも、人間中心の考えに基づき、モーターの特性を最大限に活用して人馬一体を追求した。マツダでは、EVにおいてドライバーがより意のままに車速や加減速をコントロールするための、ペダル、パワーユニット、オーディオユニットを含めた統合制御システムを「モーターペダル」と呼ぶ。アクセルペダルによるモータートルクのコントロール性を全域で緻密に制御し、サウンドによるモータートルクの向きと大きさの知覚をサポートすることで、ドライバーがまるで筋肉のように自在に車速コントロールできることをねらった。更にさまざまな走行シーンに対応するEV専用のステアリングホイールパドルと合わせて紹介する。

Abstract

Mazda is committed to delivering “Jinba Ittai” feel, which represents a harmonious relationship between the driver’s will and vehicle motion, in its vehicles based on a human-centered approach supported by maximized human capabilities. We pursued the Jinba Ittai feel in Mazda’s first mass production EV Model by enhancing electric-motor characteristics based on the human-centered approach. The motor pedal is unique integrated control system including pedal, power unit and Audio unit that makes it possible for the driver to control driving torque precisely with assistance of driver’s perception in torque directions and the amount through sounds. A steering wheel paddle has also been developed as a new function to enhance speed controllability.

Key words : EV and HV systems, Motor drive system, Motor characteristics, Sound quality evaluation, Motor pedal, Steering wheel paddle, e-SKYACTIV

1. はじめに

これまでマツダは、ICE (Internal Combustion Engine) 車において、より運転しやすいドライビングポジションや、踵を安定して操作できるオルガン式アクセルペダルなどの操作系と、ドライバーの要求である目標加速度を上位においたエンジントルク制御システム⁽¹⁾によって、よりリニアで意のままの車速コントロール性を追求してきた。またエンジンサウンド開発においては、ドライバーの知覚特性を研究することで、音によって駆動トルクの認知性を向上させる取り組み⁽²⁾を行い、車両全体と

して一体感のある走りの実現を目指してきた。

MX-30 EVモデルでは、これまでICEで得た知見を基に、モーターによるトルク制御の自由度の高さと、モーターの負荷状態を正確に伝えるオーディオユニットによるサウンドを活用することで、ICE以上に一体感の高い走りの開発に取り組んだ。またEVならではの新機能として、勾配などの走行シーン変化に応じて、モータートルクの回生減速と惰行(コースティング)を自在にコントロール可能なステアリングホイールパドルを開発した。

*1~2 操安性能開発部
Chassis Dynamics Dept.

*4~5 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Dept.

*3,6 NVH性能開発部
NVH Performance Dept.

2. モーターペダル

2.1 ねらい

モーターペダルのコンセプトを Fig. 1 に示す。ドライバーがまるで自身の筋肉のように直感的に車両の加減速をコントロールできるように、モータートルクの向きと大きさをドライバーが知覚しやすいこと、そしてそのモータートルクが車両に伝わり加減速挙動となるまでの遅れが最小限となることに注目して、システムを開発した。

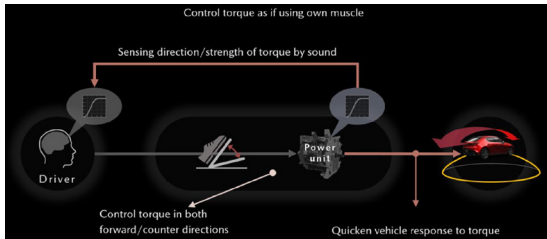


Fig. 1 Motor Pedal Concept

2.2 人間の操作から車両応答までの時間最小化

モーターペダルコンセプトを実現するためには、ドライバーのペダル操作に対する車両の加減速挙動の応答時間の最小化が重要となる。

(1) パワーユニットによる応答遅れ改善

内燃エンジンと電気モーターの駆動トルク応答性の違いを Fig. 2 に示す。MX-30 EV モデルと同等の最大トルクをもつ直列 4 気筒 2.5L エンジンに比べて、アクセルペダル操作に対する駆動トルクの応答時間が約 50% 低減している。

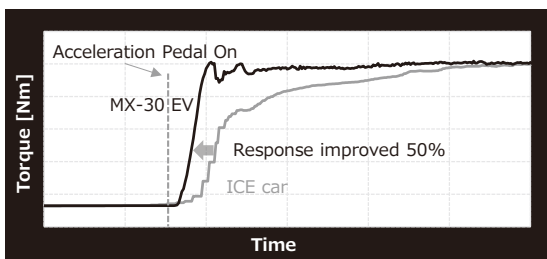


Fig. 2 Comparison of Torque Response

(2) 車体の高剛性化による応答遅れ低減

上記 (1) はユニットとしてのトルク応答性の違いであり、これを車両として実現するためには、トルクを受け止める車体側の剛性を高める必要がある。そこで、ドライブシャフト剛性やモーターマウント剛性を高めて最適化した (Fig. 3)。

その結果、Fig. 4 に示すように、アクセルペダル操作に対する車両の加速度応答時間についても、ICE 比で約 60% 低減した。

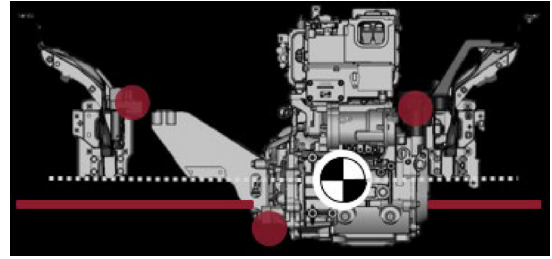


Fig. 3 Motor-Mount and Drive Shaft

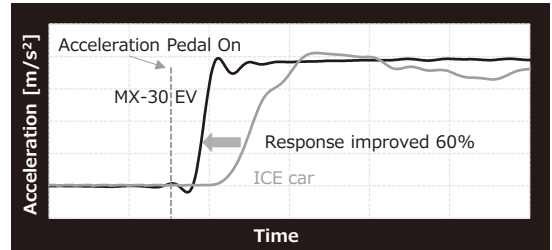


Fig. 4 Comparison of Acceleration Response

2.3 モータートルク制御

加減速におけるモータートルクをシームレスにコントロールするため、アクセルオフ操作によるモーター回生減速度や、トルクがゼロを跨いでプラスとマイナスを行き来する領域も含めて、アクセル操作による目標加速度制御を緻密に設定した。

Fig. 5 に PCM (Powertrain Control Module) におけるモーターペダルの制御ブロック図を示す。①のアクセルペダル操作量に対する目標加速度・減速度の制御を以下 (1) (2) (3) で、②のアクセルペダル操作速度に関する制御を (4) で、③のバックラッシュ制御を (5) で説明する。

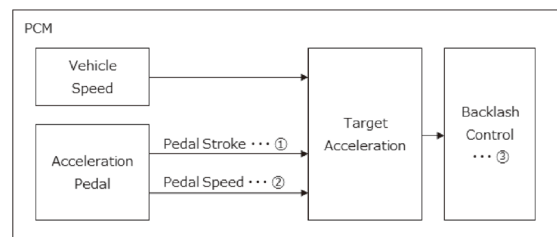


Fig. 5 Motor Pedal Control Flow in PCM

(1) モーター回生による減速度制御

EV の駆動力制御においてポイントとなるのはモーター回生による減速度の設定である。MX-30 EV モデルではブレーキ・バイ・ワイヤユニットによる協調回生ブレーキシステムを採用しているため、ブレーキペダル操作によっても摩擦ブレーキを使わずにエネルギー回生による減速が可能である。そのため、アクセルペダル、ブレーキペダルのどちらにもモーター回生による減速度を割り当てるかは自由であり、ドライバーの運転姿勢やコントロール性を重視した設定が可能となる。そこで、アクセルオフ操作に割り当てるべき減速度の最大値を検討した。

アクセルペダルを戻すときは、ドライバーは Fig. 6 に示すように右足のすねの筋肉（前脛骨筋）を収縮させてつま先を引き上げる。これは車両の減速による慣性力の向きに逆行する運動であり、操作の負担感が大きい。実車で検討した結果、 1.5m/s^2 までの小さな減速度であれば、足にかかる慣性力も小さく、つま先の引き上げによる減速コントロールが楽にできることが分かった。そこで MX-30 では、アクセルオフ操作による最大減速度を 1.5m/s^2 に設定し、それより大きい減速度は Fig. 7 のようにブレーキペダル操作に割り当てることとした。

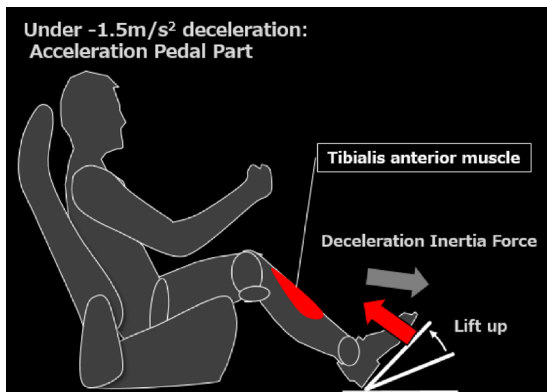


Fig. 6 Re-gen Deceleration Control by Acceleration Pedal

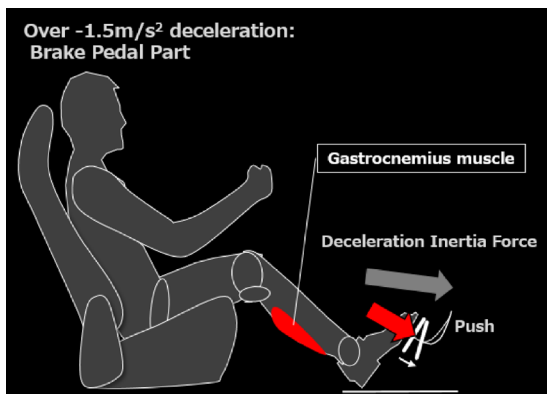


Fig. 7 Re-gen Deceleration Control by Brake Pedal

Fig. 8 に、アクセルペダルとブレーキペダルが受け持つモータートルクの領域の概念図を示す。 1.5m/s^2 に相当するマイナス（回生）トルクの領域までをアクセルペダルに割り当て、それより大きな減速度はブレーキペダル操作によって回生する構成とした。これにより、幅広い走行シーンによってドライバーの負担感なしにエネルギー回生を行うことが可能となった。

(2) 極低速におけるクリープ現象の設定

EV では、停車前後のペダルによる挙動コントロールの自由度が高く、アクセルオフ操作のみで停車を実現する車両も存在する。一方マツダでは、上り坂での停止からの発進や、駐車場における極低速の車速コントロール性

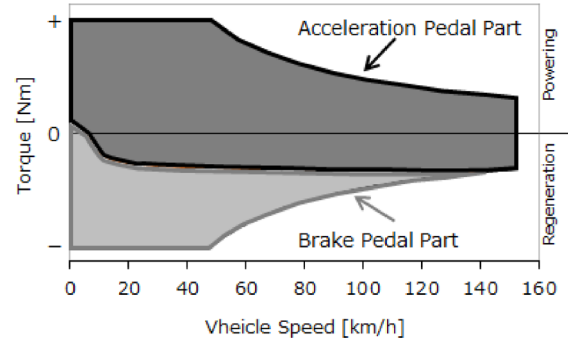


Fig. 8 Partition of Motor Torque Control

を重視するため、停車からのブレーキオフ操作時にトルクコンバーター式 AT 車両のようなクリープ現象を設定し、車両の停止はブレーキペダル操作で行うこととした。

クリープ現象は、Fig. 9 に示すように、車両の動き出しが穏やかで、ドライバーが予測可能な特性とした。これによって、駐車場でブレーキに足を載せたまま前進・後進の切り替えをしたり、ドライバーが平坦と感じるような緩い上り坂での意図しない車両のずり下がりを防止したりと、より安全な運転が可能となる。

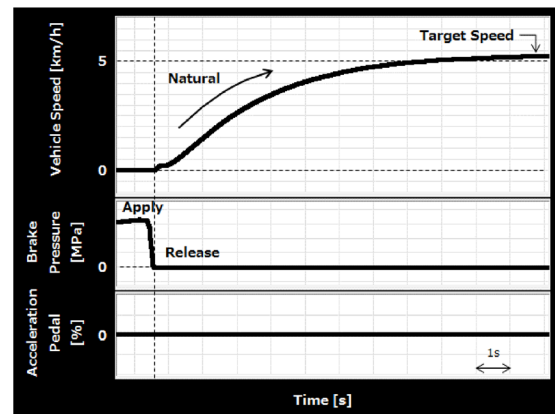


Fig. 9 Creep Characteristic

(3) アクセルペダル操作量と加速度特性

加速側は、ICE で構築してきた目標加速度制御⁽¹⁾に基づき、ドライバーのペダル操作から加速意図を汲み取ってトルクを発生させる。EV においても、アクセルペダルの操作量（ストローク）に加えて、ペダル操作速度によって加速度の特性を変化させる制御とした。

アクセルペダルの操作量ごとにピーク加速度をプロットした図を Fig. 10 に示す。アクセルペダルストロークの全域を有効に使って加速度をコントロールできるような特性とした。

(4) アクセルペダル操作速度とジャーク特性

アクセルペダルの操作速度ごとに発生する車両のジャーク（加速度の時間変化率、加加速度もしくは躍度）をプロットした図を Fig. 11 に示す。この特性から、ドライバーがアクセルペダルをゆっくり踏み込めば穏やかな

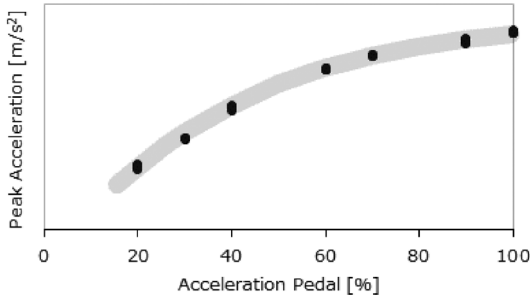


Fig. 10 Pedal Stroke vs. Longitudinal Acceleration

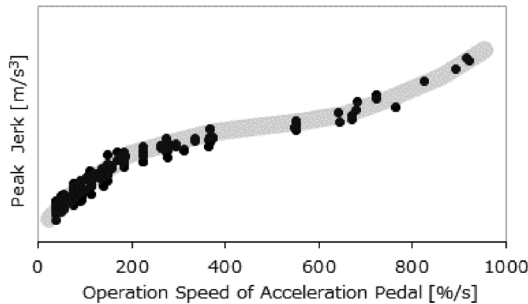


Fig. 11 Pedal Speed vs. Longitudinal Jerk

加速を、素早く踏み込めば鋭い加速をするという、ねらいどおりの緻密な加速コントロール性を実現していることが分かる。

(5) トルクのゼロ点跨ぎコントロール

EVにおいては、駆動トルクだけでなく回生トルクももつことから、トルクがゼロ点を跨いでプラス側とマイナス側を行き来する。この際、トルクの向きが変わるときに、ギヤのかみ合いによる機械的なバックラッシュ（ガタ）が発生する。具体的には、減速から加速に移行するシーン、逆に加速から減速に移行するシーンにおいて、モーターアクスルユニット内で発生する現象である。MX-30 EV モデルでは、このバックラッシュを最小限にしつつ、機械的な限界でどうしても発生してしまうガタを抑制する制御を採用し、トルクのゼロ点跨ぎ時の滑らかさを実現した。

Fig. 12 に、制御の有無による車両挙動の違いを示す。制御なしの場合、モータートルクは電流指示のとおり直線的にゼロ点を跨ぐが、バックラッシュの影響で車両の加速度にはショックが発生する。この現象に対して、ゼロ点付近におけるモータートルクの変化率を適切に制御することでショックを抑制した。これにより、一定車速を維持したいシーンや、加減速を繰り返すようなシーンにおいても、滑らかで心地よい挙動を実現した。

2.4 サウンドによるトルクの知覚サポート

ドライバーに走行状態をより正確に伝えるため、EV サウンドを開発した。これは、負荷に応じた音を発生しない電気モーターにおいて、駆動トルクに同期したサウン

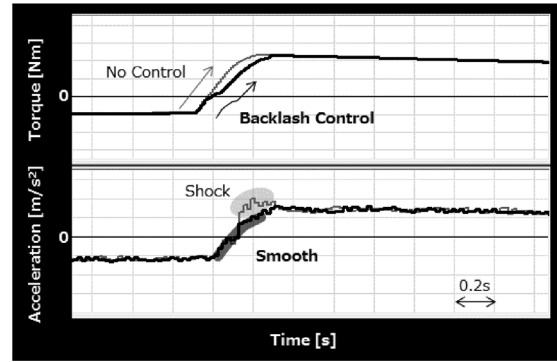


Fig. 12 Motor Torque Control around 0 Nm

ドをオーディオユニットによって人工的に生成し、乗員のトルク知覚をサポートすることで意のままの走りのコントロール性を実現するものである。

(1) 人と音の関わりを軸としたサウンド

サウンド創りの根拠としたのは自然界の法則である。ヒトは、力の差を、音だけでイメージすることができ、無意識に次の行動に活かしている。力が大きいほど、発せられる音は①低い周波数の割合が多く、②周波数の数が多い、③音量が大きくなる、という自然界の法則に由来する (Fig. 13)。

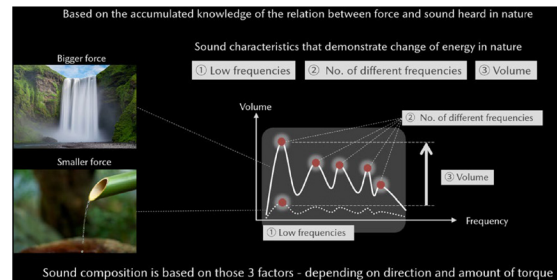


Fig. 13 Sound Characteristic Change of Energy Nature

(2) EV ユニークのサウンド構成

EV サウンドを構成する音は、EV がもともと固有の特性由来のものとし、モーター回転数に比例する周波数の音（以降、次数音と呼ぶ）を用いた。モータートルクの増加に応じて、聞こえる次数の数と音量が増えるように設定した。また、次数構成は、ヒトにとって心地よいと感じるサウンドとするための工夫をした。留意したのは、周波数の上下限を設けたこと、協和度の高い次数構成にしたことである (Fig. 14)。

速度変化がよく分かるように、周波数の傾きが大きい次数音を使いたい一方、EV モーターは使用回転域が 0 から 12,000 回転と広いため、高い次数音はすぐに耳障りな高周波音となってしまふ。そのため、上限周波数を決めるとともに、「次数音をスムーズに切り替えることでヒトには回転数が上昇しているように聞こえる」という無限音階理論を用いて、不快な高周波音を発生させることなく回転変化が分かるようにした。また、低周波の音が

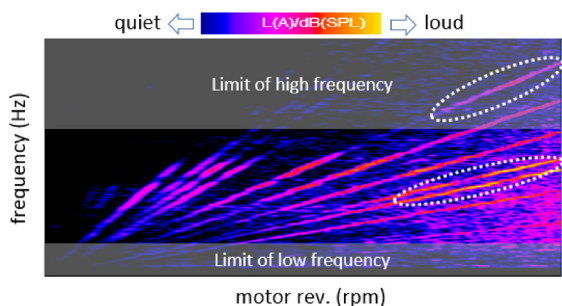


Fig. 14 Configuration of the EV Sound

増えすぎると走りを重ねる感じがしてしまうため、周波数の下限も設定した。

次数の組み合わせについては、協和度 (Fig. 15) の高い組み合わせの中から、速度変化の分かり易さと聞き心地の良さを両立する最適なものを選定した。また、アクセルを踏み込んでも強い加速度が得られない高速車域では、高めの周波数と不協和音 (Fig. 14 の白点線領域) を設定することで加速感を演出した。

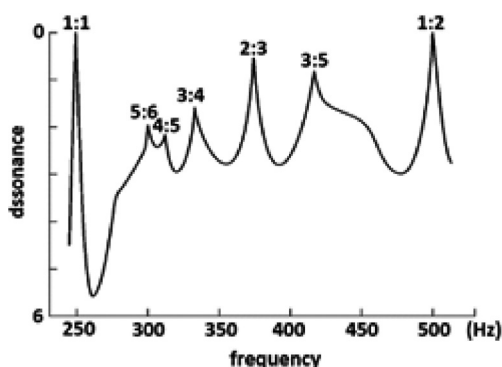


Fig. 15 An Example of Consonance

(3) EV サウンドの効果

EV サウンドの効果を検証するため、減速・旋回・加速シーンと上り・下り勾配をもつワインディングコースにて、サウンドなし (Base) とあり (Motor Pedal) による車速のばらつきを比較計測した。ドライバーは6名で、コース上に表示されている車速を目標とした。Fig. 16 に、計測区間内の6名の車速のばらつきを平均した結果を示す。

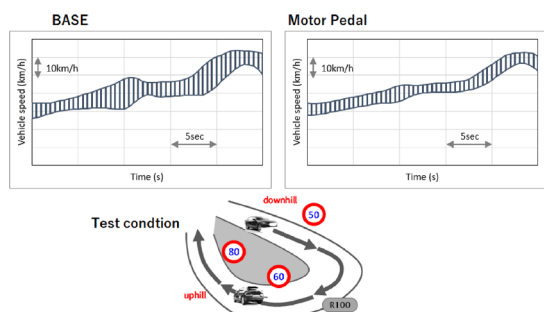


Fig. 16 EV Sound Effect Result/Test Condition

この結果から、EV サウンドの効果によって、車速のばらつきが全体で約 40%低減できることがわかった。ねらいどおり、モータートルクに同期したサウンドを乗員に伝えることで、より正確に走りコントロールできることを確認した。

3. ステアリングホイールパドル

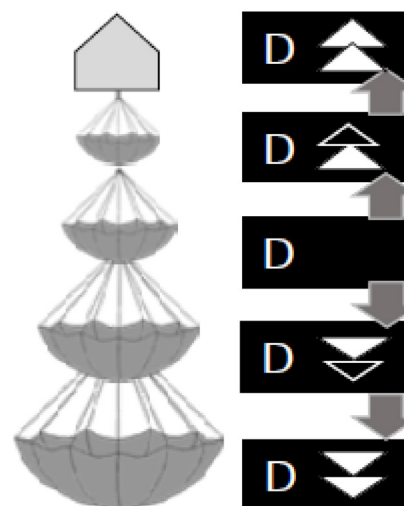
3.1 ねらい

EV では、ICE のエンジンブレーキと異なり、回生トルクによってより強いアクセルオフ減速度を設定できる。これにより、街中においては強いアクセルオフ減速度によって素早い減速が可能となる一方、例えば上り坂では強いアクセルオフ減速度は車速の低下を招いてしまうし、車速を一定に保ちたい高速道路においてはアクセルペダルを緩めることができない状況となる。

そこで MX-30 EV モデルでは、勾配などの走行シーン変化に応じて、アクセルオフによるモータートルクの回生減速と惰行 (コースティング) をドライバーが自在に選択可能なステアリングホイールパドルを開発した。

ステアリングホイールパドルのコンセプトを Fig. 17 に示す。パドル操作によってアクセルペダルストロークに対する加速度・減速度の割り当てを変化させることで、まるで車両後部に取り付けたパラシュートが開いたかのように車両の走行抵抗を自在にコントロールできる感覚を目指した。

Low resistance, motor pedal feels light



High resistance, motor pedal feels heavy

Fig. 17 Concept of Steering Wheel Paddle

3.2 特徴

ステアリングホイールパドルは計5段とし、デフォルトのDレンジを中央にレイアウトし、左側に2段、右側にも2段と対称形に設定した (Fig. 18)。

左側のパドルを操作すると、アクセルオフ減速度が強

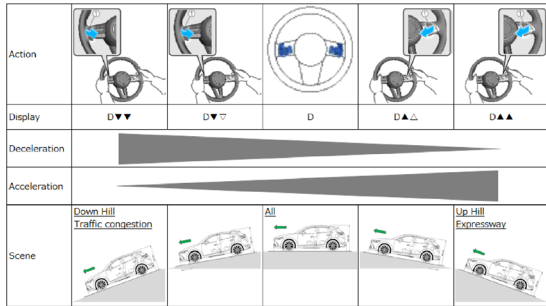


Fig. 18 Paddle Behavior and Usage Scene

まるとともに、アクセルオン加速度の応答が穏やかになる。これによって車両の走行抵抗が増したような状態となり、下り坂ではブレーキペダルを踏む頻度を減らしながら、一定の車速を保つことが容易となる。左側 2 段目の D ▼▼ では、公道の勾配設定基準である道路構造令における最大の下り勾配までをアクセルオフでカバーすることをねらった。

右側のパドルを操作すると、アクセルオフによる減速度が弱まり、2 段目の D ▲▲ では回生トルクがほぼゼロの惰行の状態となる。アクセルオンの加速は鋭くなるため、走行抵抗が低減したような状態となる。これにより、上り坂や高速道路での車速維持が容易となり、登坂加速や追抜き加速もより楽にできる。

各パドル段位における、アクセルペダル操作量に対する加速度・減速度の設定イメージを Fig. 19 に示す。アクセル全開時（100%）の最大駆動トルクは同一であるのに対し、アクセルオフ時の最大回生トルクには差をつけることで、ペダル操作に対する加速度応答の傾きが変化するため、ドライバーはパドル操作によって走行抵抗が変化したかのように感じられる。

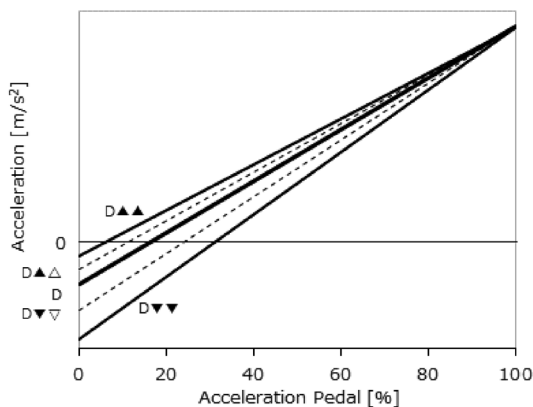


Fig. 19 Pedal Stroke vs. Acceleration in Each Paddle Step

また、各パドル段位の間に明確なトルク段差を設けることで、ドライバーがパドル操作時の段位変化を認知しやすくした。このトルク段差に連動して EV サウンドも変化するため、より直感的な操作が可能である。ワイン

ディングにおいては、このパドル操作を積極的に活用することで、よりダイナミックに加減速と荷重移動のコントロールを楽しむことができる。

4. おわりに

MX-30 EV モデルのモーターペダル開発では、ステアリングホイールパドルの新機能とともに、人間中心の考えのもと、ICE から更に進化した人馬一体感を目指した。

その結果、走りのリニアリティが高く、ドライバーの操作とクルマの挙動がシンクロする感覚の高い一体感が実現できたと考える。マツダは今後も、人馬一体の走りの進化を追求していく。

参考文献

- (1) 江角ほか：SKYACTIV-G 制御技術の紹介，[マツダ技報, No. 29, pp.36-40 \(2011\)](#)
- (2) 服部ほか：音からの情報で意のままの運転に貢献するエンジンサウンド開発，[マツダ技報, No.37, pp.45-49 \(2020\)](#)

■ 著 者 ■



森下 慎也



梅津 大輔



光永 誠介



津田 顕



岡田 光平



服部 之総