

特集：新型MAZDA3

17

新型MAZDA3のブレーキフィールの開発 Development of All-New Mazda3 Brake Feeling

池見 清*1 加村 孝信*2 開原 真一*3
Kiyoshi Ikemi Takanobu Kamura Shinichi Kaihara
丹羽 正浩*4
Masahiro Niwa

要 約

マツダは新世代商品群の第一弾として、新型MAZDA3を発表した。新世代商品群ではカーライフを通じて人生の輝きを人々に提供すべく、人間の身体特性を考慮してビークルダイナミクスを再検討し、人馬一体の実現と環境性能の両立を図った。ブレーキ性能においても、クルマをコントロールするために必要な減速度やペダル踏力の物理量について、人間の感覚量と一致させる性能目標を定めた。次に、その性能目標を達成するための部品特性を再検討した。新型MAZDA3のブレーキは、シーンに応じて必要な減速度までスムーズに立ち上げ、かつ緩めることが直観的にでき、渋滞の中や駐車場でも扱いやすく、同乗者にも優しいブレーキフィールリングを達成した。また、M Hybrid搭載モデルに採用した回生協調ブレーキシステムにおいても同等のブレーキフィールを達成し、かつ回生ブレーキ量の増減に応じて自動的に摩擦ブレーキ量を協調させることで、違和感の少ないブレーキフィールリングを実現した。

Summary

Mazda released New Mazda3 as a first one of the new generation products. Mazda intends to brighten people's lives through car ownership. In order to do this, Mazda has planned Jimba-Ittai and coexistence with the environmental performance by reconsidering a vehicle dynamics based on human function. In the brake system, the performance target had been established so that physical value are conformed to human feeling like a deceleration or a pedal force. And then, parts properties were reexamined to achieve the performance target. The brake system of New Mazda3 had been realized that it makes easy to apply and/or release to desired deceleration smoothly in every situations, easy to control in traffic jam or at a parking lot, and gentle to passengers. The Regenerative-Friction Brake Coordination System has been adopted to M Hybrid model in order to achieve the same performance and natural feeling as normal model.

Key words : Vehicle dynamics, Human engineering, Regenerative-friction brake coordination, brake system, Driver model, Brake feel, Jimba-ittai

1. はじめに

自動車業界は今、環境性能（CO₂、燃費低減）の更なる向上に加えて自動運転化技術の実現やライドシェアなど、大きな変革期を迎えている。そのような中、マツダはカーライフを通じて人生の輝きを人々に提供するため、ビークルダイナミクスについて、人間の身体能力を考慮して再検討し、人馬一体を実現しようとしている。ここではビークルダイナミクスの3大要素である、走る、曲がる、止まるの「止まる」について、人馬一体と環境性能を高次元でバ

ランスさせた新型MAZDA3のブレーキを紹介する。

2. 新世代商品群で目指すブレーキ性能

2.1 基本の考え方

人間は身体に加わる躍度（加速度の変化）に対して、本能的に頭の位置を保つようにバランスを取ろうとする。クルマが減速している時も同じで、意図しない急な減速や減速度の変動により頭のバランスが取れないと、不安感や不快感、クルマ酔いなどにつながる（Fig. 1）。昨今のクルマでは軽い踏力でも高い減速度が発生するものがあり、ド

*1~4 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

ライバーに良く効くという印象を与える半面、微小な調節には神経を使う状態になっている。特に、駐車場や渋滞した交通流での车速調整や停止時に、思いがけず強いブレーキがかかってしまったり、思ったところに停止できなかつたりするため、ドライバーがこのような緻密な操作をしようとすれば心理的にも身体的にもストレスを感じる。新世代商品群では、この点を改善するために、人間がペダル操作力や減速度をどのように感じているかを研究し、ドライバーの操作に対して意図したとおりの減速度変化を発生し、また身体が自然にバランスをとれるような減速度を発生させるブレーキとすることを基本とした。

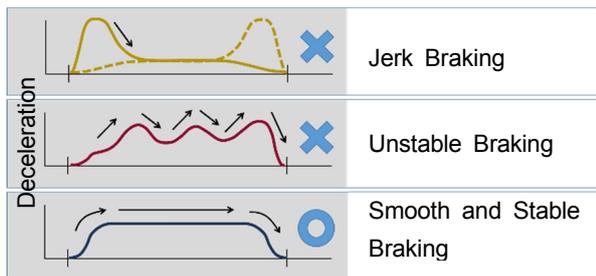


Fig. 1 Image of Braking Pattern

2.2 人間中心で導いた踏力-減速度特性

ドライバーはクルマを減速させるとき、知覚情報から目標物（停止線や前走車、障害物など）との距離の変化をコントロールしようと、ブレーキペダルを操作する。この時、ドライバーの制動初期のペダルの操作量は、経験からの予測で決まり、過不足があれば操作量を調整する。この過不足をできる限り小さくするために、以下のステップでブレーキの特性を定めた。

(1) 人間にとってリニアな入力と出力の関係

まず、実際の減速度Gtと人が感じる減速度Gpの関係を、マグニチュード推定法^(※1)で調べた。助手席に乗せた被験者に基準となる減速度を体験させた後、基準とは異なる複数の減速度を体感させ、それぞれの減速度を基準の何%に感じたかを答えさせた。これを人間が感じる減速度Gpとし、同時に計測した実際の減速度をGtとして、GpとGtの関係を得た。例としてFig. 2に一人の被験者の結果を示す。

次に、実際のペダル踏力Ftと人間が感じるペダル踏力Fpの関係を調べるため、運転席に座った状態でのペダル操作感覚を再現できるペダルシミュレーターを制作し、被験者実験を行った。ある基準となる踏力でペダルを踏ませ、その後基準に対して0.5から2倍の範囲で指定した踏力でペダルを踏むように指示し、同時に実際の踏力を計測しFpとFtの関係を得た。例としてFig. 3に一人の被験者の結果を示す。

※1 マグニチュード推定法

被験者に基準となる刺激を与え、これとの比較で比較対象となる刺激の感覚的な大きさを数値で推定させる方法

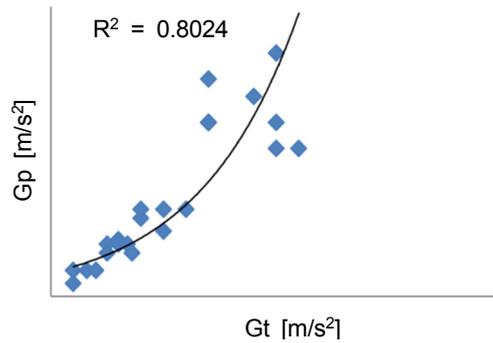


Fig. 2 Relation between Gt and Gp

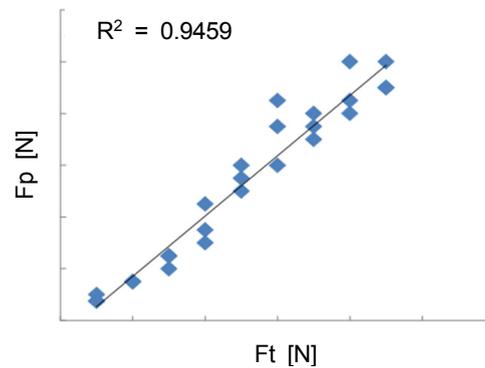


Fig. 3 Relation between Ft and Fp

これらの結果から、人間は加速度を物理的な加速度に対して指数関数的に感じ、一方でペダル踏力については物理量と感覚量は直線的な関係になっていることが分かった。よって、人間が感覚的にリニアと感じるペダル踏力Ftと減速度Gtの関係は以下の式で表される。

$$Gt = A * \log(Ft) + B$$

なお、本研究で行った全ての被験者実験は、試験開始前にインフォームドコンセントを得て行っている。

(2) 適切な踏力と減速度の勾配

踏み始めのペダル踏力と減速度の勾配の適正値を検討するために、人間特性を組み込んだシンプルなドライバー-車両モデル (Fig. 4) を構築し、ドライバーがコントロールしやすい減速度の立ち上がり勾配を調査した。

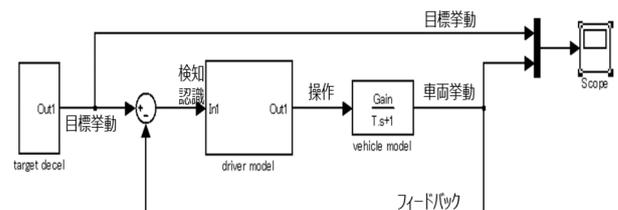


Fig. 4 Driver-Vehicle Model

ドライバーモデルは、制御因子として減速度弁別値、踏力弁別値及び反応時間を持ち、車両モデルは踏力-減速度特性と応答遅れを制御因子としてもつ。ドライバーモデルに与えるタスクは、一般的な走行シーンとして信号停止を想定した0.5秒で目標減速度1.4~2.6m/s²を発生させることとし、ドライバー誤差因子として減速度弁別値に±50%、踏力弁別値に±30%、反応時間に±15%、車両誤差因子として応答遅れに±30%の誤差を与えた。この条件にて目標減速度に対するドライバー制御減速度の誤差を調べた結果、踏力の増加に対して減速度の増加が小さいと目標減速度への到達が遅れ (Fig. 5a)、適度であると誤差は小さくなり (Fig. 5b)、大きすぎるとドライバー制御がハンチングする (Fig. 5c) 結果を得た。

■ Target Deceleration
■ Driver Controlled Deceleration

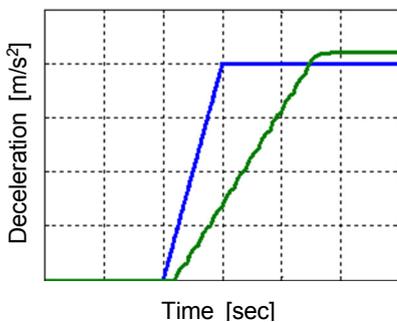


Fig. 5a Driver-Vehicle Model Simulation 1

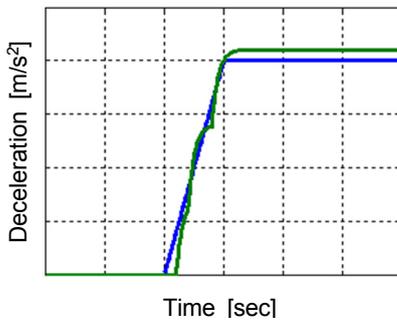


Fig. 5b Driver-Vehicle Model Simulation 2

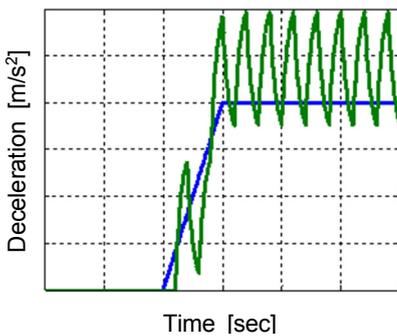


Fig. 5c Driver-Vehicle Model Simulation 3

これらの結果は、実際のドライバーの操作では、大きく応答が遅れた場合には、「思ったよりも減速度が出てこない場合には踏み増す」状況になり、ハンチングした場合には「思ったよりも減速度が出てしまう」という状況になると解釈できる。よってこの検討結果から踏み始めの踏力-減速度特性のおおよその適値を設定した (Fig. 6)。

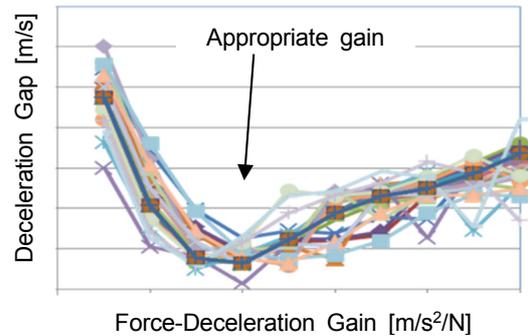


Fig. 6 Gap of Driver Control

以上の検討で求めた踏力と減速度の勾配と2.2 (1)での検討結果から、人間の感覚に合う踏力-減速度特性を決定した (Fig. 7)。

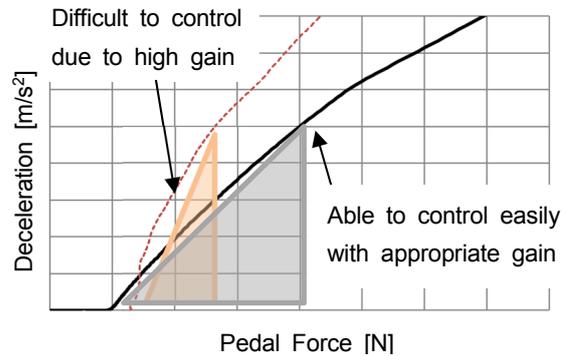


Fig. 7 Pedal Force - Deceleration

(3) コントロールしやすい踏み応え (剛性感) 特性

ブレーキペダルに踏力を加えるとペダルがストロークする。この踏力とストロークの比率 (以下、ペダル剛性) 及びこの時に発生する減速度との関係もブレーキのフィールに影響を及ぼす特性である。Fig. 8は減速度とペダル剛性の関係を表している。踏み応えを感じ始めるポイントである下に凸となる剛性カーブの頂点を、できるだけ低い減速度に位置させることでブレーキの効き始めと一致させ、そこから減速度が高まるにつれてペダル剛性がリニアに上がっていくように設定した。これにより、ドライバーはブレーキが効き始めるポイントをペダル剛性の明確な変化から感じ取ることが可能となり、かつ剛性の増加に伴い減速度が増加していくため、緻密なコントロールが容易となる。

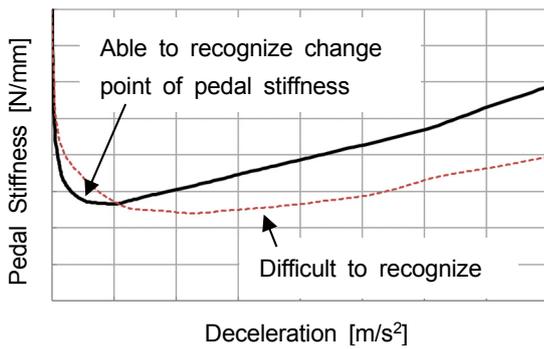


Fig. 8 Pedal Stiffness

3. 新型MAZDA3での実現

3.1 機械特性を実現する部品の具体化

ブレーキフィールの設計要素として最も寄与が高く、かつその自由度も高いのが、バキュームブースター (Vacuum Booster 以下、VB) のパワーアシスト特性である。新型MAZDA3用に設計したパワーアシスト特性のイメージをFig. 9に示す。

まず、Fig. 8で示したペダル剛性の明確な変化点を作り、かつ減速度が出始めるポイントと一致させるために、ジャンプアップ量をブレーキシステムの遊びを詰めるのに必要な最小限の値に設定した。次に、Fig. 7で示した踏力-減速度の特性を実現するために、ジャンプアップ領域とアシスト領域をつなぐ曲率とアシスト倍率を決定した。

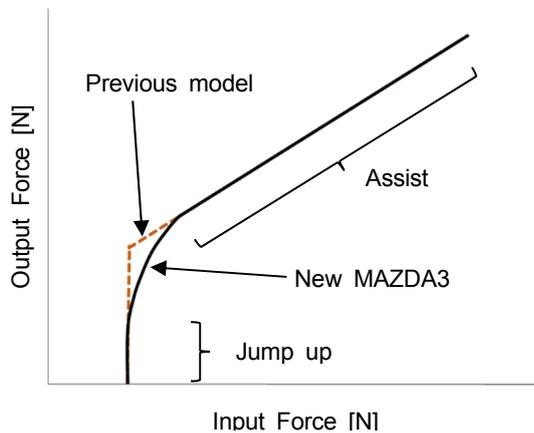


Fig. 9 Image of Vacuum Booster Assist Characteristic

これらを具体化する手段をFig. 10に示す。この図は、VB非作動時 (非制動時) の状態を示している。ゴム部品であるリアクションディスクとプランジャーには隙間 (Clearance) が設けてあり、この大きさがジャンプアップ量を決定する。ドライバーがペダルを操作するとプランジャーが図の左方に移動し、リアクションディスクに接触するとアシスト領域に入る。ジャンプアップとアシストを

スムーズな曲率でつなげるために、プランジャーの形状を先端の中心部分の平坦部分を小さくし、そこから外周に向かって緩やかなカーブを描いて丸みを持たせる形状とした。アシスト倍率は、リアクションディスクの面積と、プランジャーとリアクションディスクが接触する面積との比で決定されるため、この接触面積をペダルの踏み込みとともに徐々に拡大させることで、ジャンプアップ領域とアシスト領域を曲線で結ぶことができる。これにより、スムーズかつ違和感のないペダル踏力及びペダル剛性と減速度の関係を実現した。

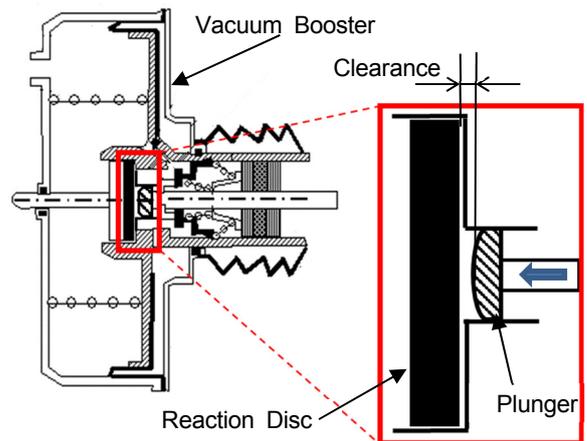


Fig. 10 Plunger Shape (Image)

3.2 環境技術との両立

(1) 回生協調ブレーキの採用

エネルギー回生機能をもつM Hybrid搭載機種では、Fig. 11に示すように、制動時に摩擦ブレーキによって発生するブレーキトルクに加えて、エネルギー回生によるブレーキトルクが発生する。しかし、この回生ブレーキトルクはドライバーの意図に関係なく増減するため、その強弱によって減速度が変動する。これは、ドライバーが意図した減速度からの外れにつながるため、ブレーキ調整のしにくさを生じさせる。

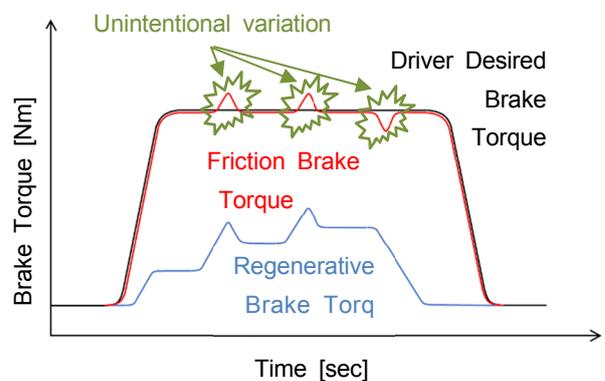


Fig. 11 Influence of Regenerative Brake Torque

この問題を解決するためには、回生ブレーキトルクの変動量に応じて摩擦ブレーキのトルクを自動的に増減し、ドライバーが意図する制動トルクとトータル制動トルクを一致させる必要がある。しかし、従来の液圧制御システムでは液圧を変化させるとブレーキペダルの踏み応えに違和感が発生してしまう。このため、新型MAZDA3ではM Hybrid搭載機種専用の回生協調ブレーキシステムを新たに開発した。そのシステム模式図をFig. 12に示す。

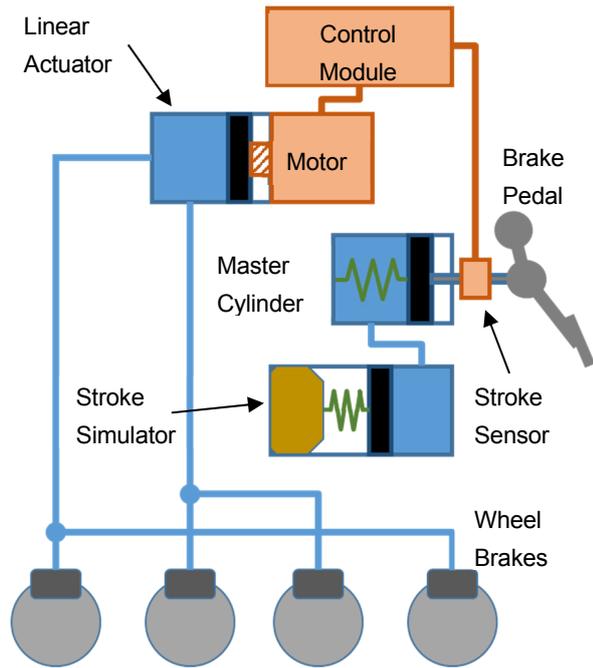


Fig. 12 System Scheme

このシステムでは、マスターシリンダー及びストロークシミュレーターでブレーキペダルの剛性感を形成し、ストロークセンサーにて検出したブレーキペダルのストロークに応じた液圧をリニアアクチュエーターで発生させ、ホイールブレーキに発生する摩擦ブレーキトルクをコントロールしている。つまり、ドライバーが操作するブレーキペダルと液圧発生源とが機械的に独立しているため、制動中にコントロールモジュールが液圧を変化させてもブレーキペダルのストロークが変化せず、ドライバーが感じている踏み応えは全く変化しない。

(2) 回生協調ブレーキのブレーキフィール

回生協調ブレーキにおいても、実現するブレーキフィールはVBシステムと同一であることを目指した。その手段として、まずストロークシミュレーターの静的なペダル踏力とペダルストロークの関係 (F・S) をバキュームブースター仕様のF・Sと等価に設計し、次にFig. 7, 8に示した減速度特性に沿うように、ペダルストロークと液圧の関係をプログラムした。

(3) 走行抵抗低減

ブレーキによる走行抵抗の低減は環境性能との両立を達成する上で大きな課題の一つである。一般に、ディスクブレーキでは非制動時にもブレーキパッドとブレーキディスクがわずかに接触しているため、ごく微小な制動力が発生し走行抵抗となっている。また、強めのブレーキをかけた後はブレーキパッドとブレーキディスクのクリアランスが小さくなるため、走行抵抗が増大する。一方で、このクリアランスが大きくなると、ブレーキの遊びストロークが増大し、ブレーキ踏み始めのフィーリング悪化を招く。このクリアランスを常に適値に保つため、キャリパーのピストンシールとピストンシールが収まるシール溝 (Seal Groove) の形状をキャリパーサプライヤ様と共同で開発した。具体的には、ピストンとピストンシールの摩擦係数が安定するようピストンシールの表面粗さを決定した。また、シール溝の形状を、Fig. 13のA部に示すようにラウンドさせることでピストンシールの変形量を低液圧から高液圧までコントロールし、ピストンクリアランスを安定させた。

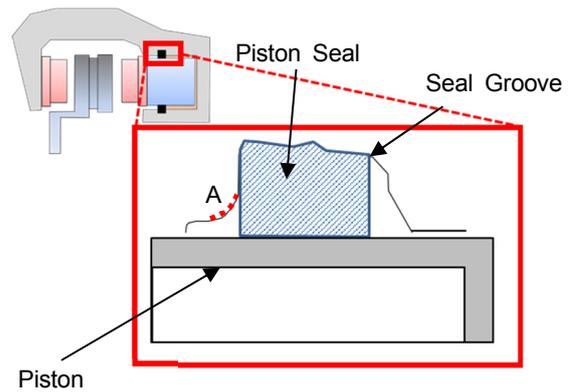


Fig. 13 Piston Seal Groove (Image)

その結果、ブレーキ踏み始めのブレーキフィールを損なうことなくFig. 14に示すように走行抵抗低減を実現し、燃費改善、排出CO₂の低減に貢献した。

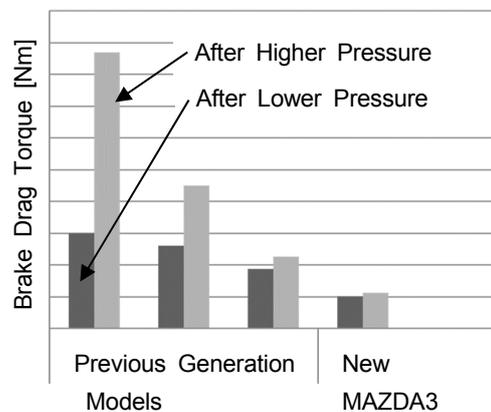


Fig. 14 Improvement of Brake Drag Torque

4. 新型MAZDA3のブレーキフィール

(1) 通常ブレーキ時のブレーキフィール

前章までに述べてきた目指すブレーキフィールを実車レベルで実現していることを、定量計測を行い確認した。その結果をFig. 15, 16に示す。

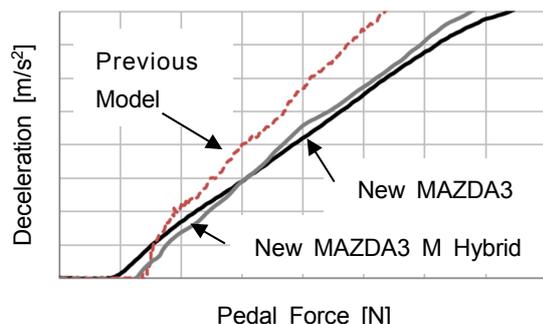


Fig. 15 Characteristic of Pedal Force and Deceleration

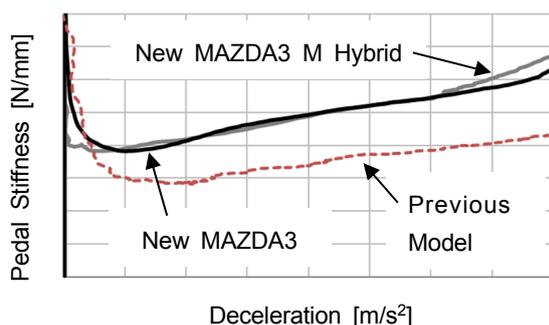


Fig. 16 Characteristic of Deceleration and Pedal Stiffness

Fig. 15の踏力-減速度特性に示すように、前モデルが低減速度域で急峻に上昇しているのに比べ、新型MAZDA3では低踏力領域から緩やかにカーブを描いて減速度が上昇する特性になっている。また、回生協調ブレーキシステムを採用するM HybridモデルとVBを採用するモデルでの特性差も最小限となっている。

Fig. 16に示すペダル剛性のカーブでは、VB仕様、回生協調ブレーキ仕様のどちらも極小点がより低い減速度に位置しており、ブレーキの踏み応え変化点とブレーキが効き始めるポイントがほぼ一致していることを確認した。更に、ペダル剛性のカーブは、その後直線状にねらいどおりの傾きをもって上昇している。これにより、ペダルの踏み応えの増減が、減速度の増減に対して感覚として1:1となっていることを確認した。

また、実車でのフィーリング評価結果を以下に列挙する。

- ・意図した減速度を意識せずに発生できる
- ・減速度をスムーズに立ち上げ、緩めることができる
- ・停止線などに容易にびたりと止めることができる
- ・駐車場や渋滞の中でも、扱いやすい
- ・同乗者にもやさしい（頭を揺らさない）運転ができる

以上より、2章で設定したねらいのブレーキフィールを実車レベルで実現していることを確認した。

(2) 回生協調時のブレーキフィール

詳細の評価結果は割愛するが、トランスミッションの変速や回生量の変動、及びエンジン本体によるさまざまな減速トルクの変化を、パワートレイン、回生協調ブレーキシステムそれぞれで細やかな制御を実施することで、不快に感じる頭の揺れを人間が感じ取りにくいレベルまで抑制することができた。

5. おわりに

新世代商品群で共通して目指すブレーキフィールは、その第一弾である新型MAZDA3で実現させることができた。

しかし、今後もさらなる環境性能向上に向けた走行抵抗低減を実現しつつ、ブレーキ性能も進化を続ける必要がある。今回達成した性能は、今後続く新世代商品にも進化させながら継承し、世界のベンチマークとなるブレーキフィールの実現を目指す。

■ 著 者 ■



池見 清



加村 孝信



開原 真一



丹羽 正浩