

特集：MAZDA CX-60

12 CX-60の回生協調ブレーキにおけるダイナミクス性能開発

Development of Vehicle Dynamics in Regenerative-Braking of CX-60

田中 繁弘^{*1} 丹後 佑太^{*2} 梅津 大輔^{*3}
Shigehiro Tanaka Yuta Tango Daisuke Umetsu
今村 泰理^{*4} 吉田 琢^{*5}
Yasumasa Imamura Taku Yoshida

要約

ラージ商品群の第一弾として、CX-60を発売した。マツダ初のプラグインハイブリッドモデルをラインナップし、従来のM Hybrid（24Vマイルドハイブリッド）に比べて、より多くの減速エネルギーを回収し、環境性能を向上している。減速エネルギーの回収には、回生協調ブレーキシステムを採用した。回生協調ブレーキは、マツダとして初めて、i-ACTIV AWDと協調制御させ、AWDならではのより安定した走り、自然なブレーキペダル操作感を実現した。

Abstract

Mazda launched CX-60 as the first product of the large platform line-up. Mazda's first plug-in hybrid model included in the lineup features improved environmental performance with which more deceleration energy is recovered than the conventional M Hybrid. The regenerative-friction brake coordination system is adopted to recover the deceleration energy. For the first time in Mazda, regenerative-braking is coordinated with i-ACTIV AWD to achieve more stable AWD-specific driving performance and natural brake pedal operation feel.

Key words : EV and HV systems, Vehicle dynamics, Plug-in hybrid, Regenerative-friction brake coordination, Brake-by-wire, Energy regeneration, Motion control

1. はじめに

昨今のCO₂規制をはじめとする環境規制への対応や環境負荷の低減のため、自動車のエネルギー回収技術は重要度を増している。マツダは、商品ラインナップに電動化技術を段階的に導入し、これらの規制対応と更なる環境性能の向上を進めている。2019年には、M HybridをMAZDA3に搭載し、そして今回市場導入したCX-60には、e-SKYACTIV PHEVを搭載してエネルギー回収能力を更に向上させた。

エネルギー回収は、ジェネレーターを用いて、減速時に車両の運動エネルギーを電気エネルギーへと変換し、バッテリーで蓄電することで行われ、この仕組みを回生ブレーキという。回生ブレーキによって得られる減速の強さは、ジェネレーターの回転数やバッテリーの充電状態等によって変動するため、回生ブレーキだけではドライバーが意図する減速を実現することはできない。そこ

で、マツダは回生協調ブレーキシステムを採用することで、エネルギー回収とドライバーの意図に忠実なブレーキ操作感を両立している。回生協調ブレーキは、ドライバーがブレーキペダルを踏むと、必要な減速をシステムが判断し、制動力を回生ブレーキと摩擦ブレーキへ最適に配分することでドライバーが意図する減速を実現するシステムである。

一方で、回生ブレーキは主駆動輪に制動力が偏るため、本来4輪に適切に加わるべき制動力のバランスが崩れ、車両ダイナミクスへ影響を与えてしまう。本稿では、回生協調ブレーキによるエネルギー回収と車両ダイナミクス性能を両立する制御について解説する。

2. 目指す姿

CX-60は、人間のバランス能力を発揮できる車両運動を実現し、修正操作を最小化することで、誰もがストレスなく運転を楽しめることをコンセプトとしている。

*1~3 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*4,5 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

e-SKYACTIV PHEV 搭載車では、AWD ならではの安定した走り、自然なブレーキペダル操作感を実現しつつ、従来よりも高い効率でエネルギー回収を行い、意のままに操れる車両ダイナミクス性能と環境性能の両立を目指した。

3. システム構成と課題

3.1 損失エネルギーの回収と PT システム構成

減速時のエネルギー損失は、摩擦ブレーキ損失、Powertrain（以下、PT）抵抗損失、走行抵抗損失に大別される。このうち走行抵抗損失以外の摩擦ブレーキ損失、PT 抵抗損失が回生システムで回収可能なエネルギーである。e-SKYACTIV PHEV では、モーターをエンジンとトランスミッションの間に配置しており、クラッチによりエンジンを切り離すことで、エンジンの抵抗損失を回収できるシステム構成となっている（Fig. 1）。

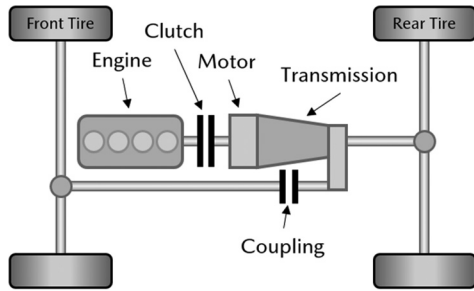


Fig. 1 Schematic View of e-SKYACTIV PHEV

また、CX-60 の AWD システムは、後輪駆動をベースとした i-ACTIV AWD で、電子制御多板クラッチ（以下、カップリング）を介して前輪に駆動力を伝達している。更に、前後のディファレンシャルギアの減速比に差をつけており、フロントの減速比を高速側に設定している。これにより、カップリングのクラッチに回転差を生じさせることで、トルク伝達の応答性を高め、シーンに応じたトルクコントロールを精度よく実現している。

3.2 回生協調ブレーキシステム

回生協調ブレーキは、ドライバーがブレーキペダルを踏んだ時に、ジェネレーターによる回生ブレーキトルクと摩擦ブレーキトルクの 2 つで制動トルクを発生させるシステムである。

このシステムでは、回生ブレーキトルクが変動しても、摩擦ブレーキトルクを調整することで、車両全体の制動トルクを変動なく発生させることができる。また、従来の倍力装置を介してブレーキペダルから制動トルクを発生させるシステムではなく、ペダルからホイールブレーキまでがつながっていないブレーキ・バイ・ワイヤを採用している（Fig 2）。そのため、摩擦ブレーキトルクが変動しても、ブレーキペダルの操作感に変化がなく、安定して制動力を自然なブレーキペダル操作感で実現できる。

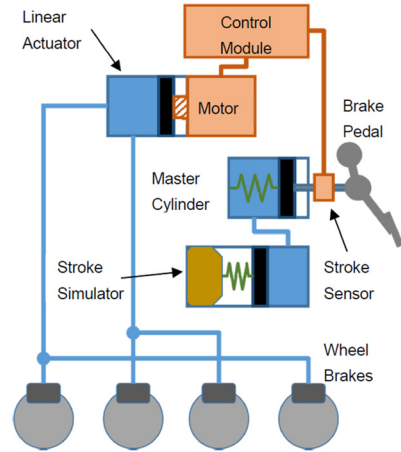


Fig. 2 Schematic View of Regenerative-Friction Brake Coordination

3.3 ダイナミクス性能の課題

(1) 制動配分の変化による後輪ロックの回避

Fig. 3 に、摩擦ブレーキと後輪駆動での回生協調ブレーキそれぞれの実制動配分と理想制動配分（前後輪が同時にロックする制動配分）を示す。また、後輪駆動ベースの AWD においても、実制動配分は後輪寄りとなる。そのため、主に雪道やアイスバーンといった低ミュー路における制動では、後輪からタイヤがスリップすることで、スピン挙動を誘発する。

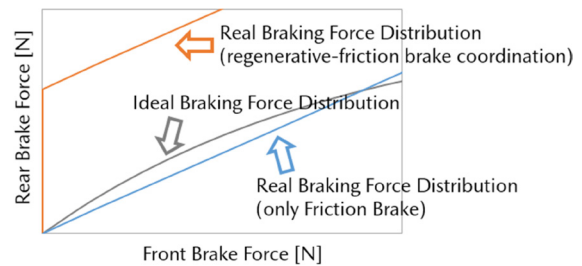


Fig. 3 Braking Force Distribution

(2) カップリング締結力の最適化による 4 輪同時ロックの回避

カップリングの締結力を強めていくと 4 輪が拘束され、1 輪ロックが他の輪のロックも誘発し、4 輪が同時にロックする懸念が高まる。そのため、トルク配分を前輪に伝達すること、カップリングの締結過多による 4 輪同時ロックを回避することを両立する必要がある。

(3) カップリング締結力の最適化によるヨー減衰効果の活用

また、カップリングの締結を強めていくと差動制限力が働き、旋回時に前後・内外輪の車輪速差がつきにくくなる。これにより、ヨー減衰効果が高まり、車両の“アンダーステア”傾向が強まる。そのため、前述の車両安定性を含め、カップリングによるトルク配分を最適化することが課題となる。

4. 回生協調ブレーキ時のダイナミクス制御

4.1 カップリング締結力のコントロール

カップリング締結による旋回特性への影響を検証した。回生協調ブレーキを作動させながら旋回するシーンにおいて、カップリングの締結力を変えて検証を行った。Fig. 4は、pattern1 から3の順でカップリング締結力を強め、ステアリング操舵角に対する車両のヨーレートの出方を示している。締結力の最も弱いpattern1では、操舵量に対してヨーレートが過過ぎておりスピン挙動となっている。Pattern3では、操舵量に対して、ある程度リニアにヨーレートを発生しているが、舵を切り込んでいくとpattern2に比べ、若干のアンダーステア傾向を示している。したがって、カップリングの締結力を最適化することで、安定した旋回特性を得られることが分かった。

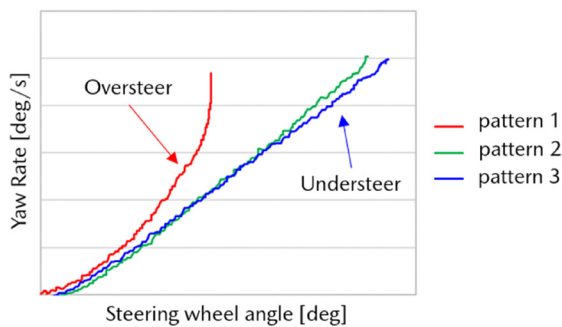


Fig. 4 Vehicle Stability

また、減速回生ブレーキ中には、モーター出力やギア変速などにより、トランスミッションのアウトプットトルクが変動する。そのため、前後ドライブシャフトのトルク変動を抑えるために、カップリングの締結力を制御し、前後のホイールトルクをコントロールする必要がある。そこで、コースティング及び回生実行時のPTトルクに対して、前後のトルク配分比が一定となるカップリング締結トルク制御を行った (Fig. 5)。

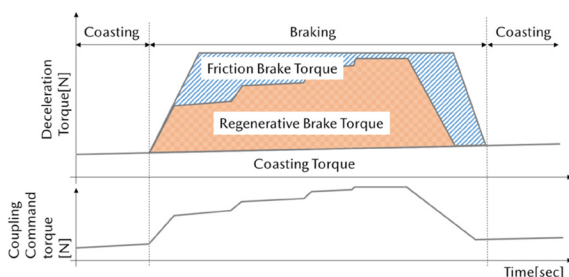


Fig. 5 Coordinated Control of Coupling and Regenerative Brake Torque

4.2 タイヤスリップ検知制御

(1) 制御ストラテジー

i-ACTIV AWD のハード特性及び回生協調ブレーキとの

AWD 協調制御を活かしたタイヤスリップ検知制御を開発した。i-ACTIV AWD は、前後のディファレンシャルギアにおいて減速比に差をつけることで、どこかにわずかな回転差が必ず生じる。この特性を利用して、4輪同時ロックが起こりやすい低ミュー路において、タイヤスリップを検知し、回生協調ブレーキを制限する機能を設けた。具体的には、Fig. 6に示すように、高ミュー路では、タイヤはほぼスリップせず、カップリングにおいて回転差 (以下、カップリング差回転) が生じる。一方で、低ミュー路では、主駆動輪であるリアタイヤがスリップすることで、カップリング差回転が少なくなる。これらの結果を利用して、PTトルクとカップリング差回転の関係からタイヤスリップを判定する閾値を設定し、4輪同時ロックの回避が可能となった。

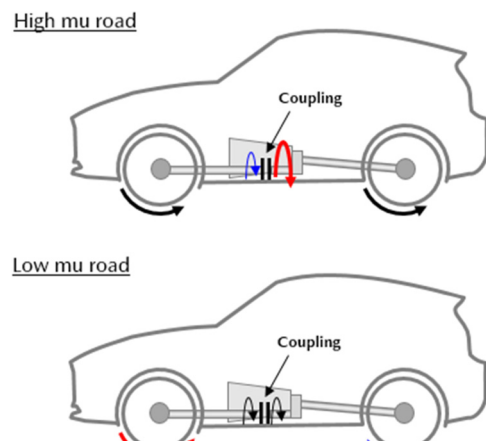


Fig. 6 Rotation Difference on the High and Low Mu Road

(2) 机上予測モデルによる仕様決定

今回のタイヤスリップ検知制御では、新しいアプローチで閾値を設定した。具体的には、机上予測モデルを構築し、タイヤスリップを検出したい路面ミューにおけるカップリング差回転を算出した。カップリング差回転は、路面ミューだけでなく、車速やPTトルクによっても変動する。そのため、それらを変数とするマップとして検知閾値を設定している (Fig. 7)。従来は、さまざまな走行条件で計測を行い、そのときのタイヤスリップ量から仕様を決定してきた。しかし、この手法では、実車を使用したテストで多くの時間が必要となる。更に今回、回生協調ブレーキとAWDとの協調制御により、制御条件がより複雑化している。そこで、予測モデルにより閾値を決定し、実車では代表シーンのみを確認とすることで、開発リードタイムの大幅な短縮が可能となった。

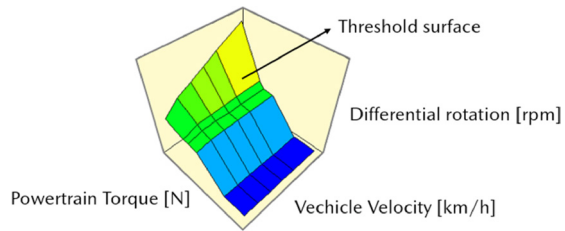


Fig. 7 Threshold Surface of Tire Slip

5. おわりに

CX-60の回生協調ブレーキは、各国の燃費規制対応だけでなく、市場環境での実用燃費についてもねらいとする減速エネルギーを回収できるシステムとなった。また、今回初めてAWD制御との協調制御を構築し、高い人馬一体感とAWDならではの安心感のある走りを実現した。今後、電動化や環境規制強化による、更なる減速エネルギーの回収量増加が想定され、車両ダイナミクス制御との連携が重要になると考えられる。電動化領域が拡大する中でもマツダらしい走りを提供できる車を目指していく。

参考文献

- (1) 森本ほか：新型 MAZDA3 M Hybrid 技術，[マツダ技報](#)，No.36，pp.66-70 (2019)
- (2) 池見ほか：新型 MAZDA3 のブレーキフィールの開発，[マツダ技報](#)，No.36，pp.107-112 (2019)

■著者■



田中 繁弘



丹後 佑太



梅津 大輔



今村 泰理



吉田 琢