

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

8

減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”の開発

Development of the “i-ELOOP”

高橋 正好 ^{*1} Masayoshi Takahashi	高橋 達朗 ^{*2} Tatsuro Takahashi	北木 義正 ^{*3} Yoshimasa Kitaki
山下 丈晴 ^{*4} Takeharu Yamashita	北川 浩之 ^{*5} Hiroyuki Kitagawa	平野 晴洋 ^{*6} Seiyo Hirano

要約

マツダは、技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき、「ビルディングブロック戦略」を推進している（Fig.1）。新世代技術「SKYACTIV TECHNOLOGY（スカイアクティブテクノロジー）」で、クルマの基本性能となるパワートレインの効率向上や車両の軽量化などのベース技術を徹底的に向上し、段階的に電気デバイス技術を組み合わせて、CO₂の総排出量を削減していく。そのSTEP2となるクルマの減速時に発生するエネルギーを電気として回収し、クルマが必要とする電気エネルギーとして再利用する新たな減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」（Intelligent Energy LOOP）を開発した。

今回その「ビルディングブロック戦略」のSTEP2となる減速回生技術「i-ELOOP」について技術紹介する。



Fig.1 Building Block Strategy

Summary

Based on the Sustainable “Zoom-Zoom” plan, Mazda’s long-term vision for technology development, we have been advancing what is called a “Building Block Strategy”.

With use of a new-generation technology called “SKYACTIV TECHNOLOGY”, we intend to thoroughly improve Mazda’s base technologies with an eye to improving the powertrain efficiency, reducing the vehicle weight, and eventually combining them with electric device technologies in a phased manner so as to reduce total CO₂ emissions.

As the second step of this approach, Mazda has developed a new regenerative braking system called “i-ELOOP”, where the energy generated during deceleration is recovered and reused as electric energy necessary for a vehicle to move.

This paper introduces the “i-ELOOP”, a regenerative braking technology developed as the second step of the Building Block Strategy.

1. はじめに

世界的な低燃費志向の高まりを受け、マツダでも数々の燃費低減策が提案されてきた。Fig.2 はスカイアクティブテクノロジーのコンセプトを示している。このコンセプトと“i-ELOOP”との関連をはじめに説明する。これらの改善

アイテムの中で、電気システムでの改善が効率的にできる領域として、Fig.2 の 5.の廃棄していたエネルギーの再利用と 3. エンジンの仕事量削減と 4.エンジンの駆動力不要時燃料カットを関連付けてシステム化し、改善できる領域があると考え、燃料を使用したオルタネータでの発電をゼロ

^{*1~5} 車両システム開発部
Vehicle system Development Dept.

^{*6} パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

にするコンセプトの“i-ELOOP”の開発となった。

このシステムは、「回生する」、「ためる」、「使う」の3要素からなっており、特に「回生する」、「ためる」では、減速時の短時間で、いかに減速エネルギーを効率よく回収するかが開発のポイントとなる。

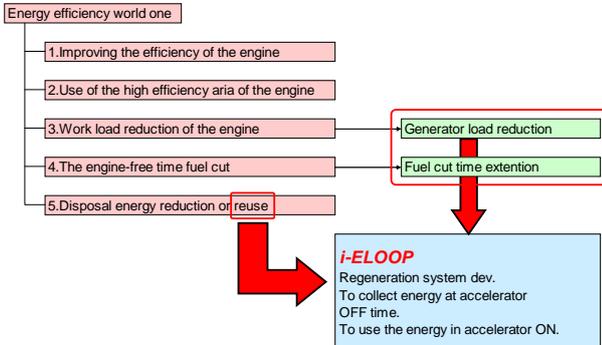


Fig.2 Improvement Items of Energy Efficiency Vs “i-ELOOP”

2. システム説明

2.1 主要機能説明 & レイアウト

減速エネルギーを回生する機能は、パルス幅コントロールにより励磁電流を制御した最大 25V 発電の可変電圧オルタネータに持たせた。回生したエネルギーを溜める機能は、主に電気二重層キャパシタ（以下 EDLC；Electric Double Layer Capacitor）に持たせている。瞬時に大きなエネルギーを溜めるため、低抵抗で大容量の EDLC をキャパシタサプライヤと開発した。（Fig.3, 4）

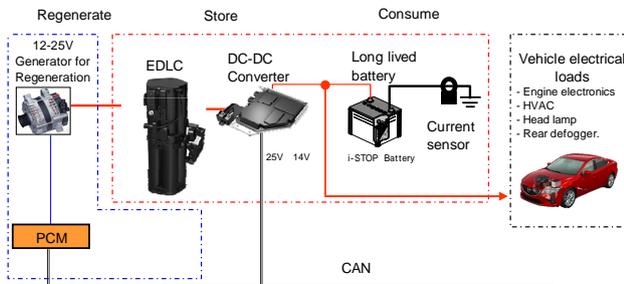


Fig.3 System Diagram

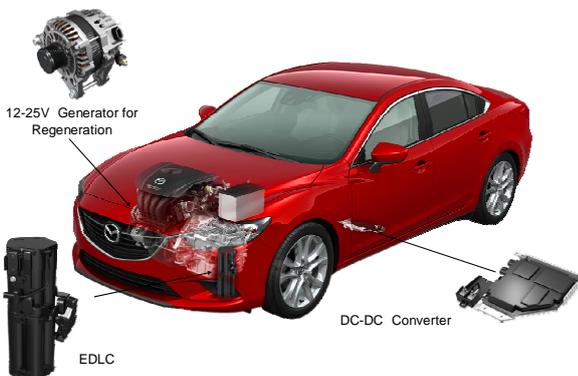


Fig.4 Layout

2.2 “i-ELOOP”システムのブレークスルー技術

効率的に減速エネルギーを回生し、回生したエネルギーを素早く蓄え、蓄えた電気を素早く・効率的に使用するシステムを構築するため、下記の 2 項目をブレークスルー技術（Fig.5）として開発した。

- ・高電圧化によりエネルギーを効率的に回生する 12V ~ 25V 可変電圧式の減速エネルギー回生用オルタネータを採用(Fig.6)
- ・回生したエネルギーを瞬時に溜める低抵抗大容量電気二重層キャパシタを採用 (Fig.7)

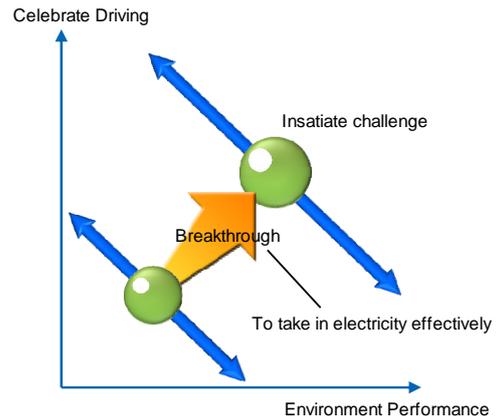


Fig.5 Break Through Image



Fig.6 12V-25V Generator for Regeneration



Fig.7 EDLC

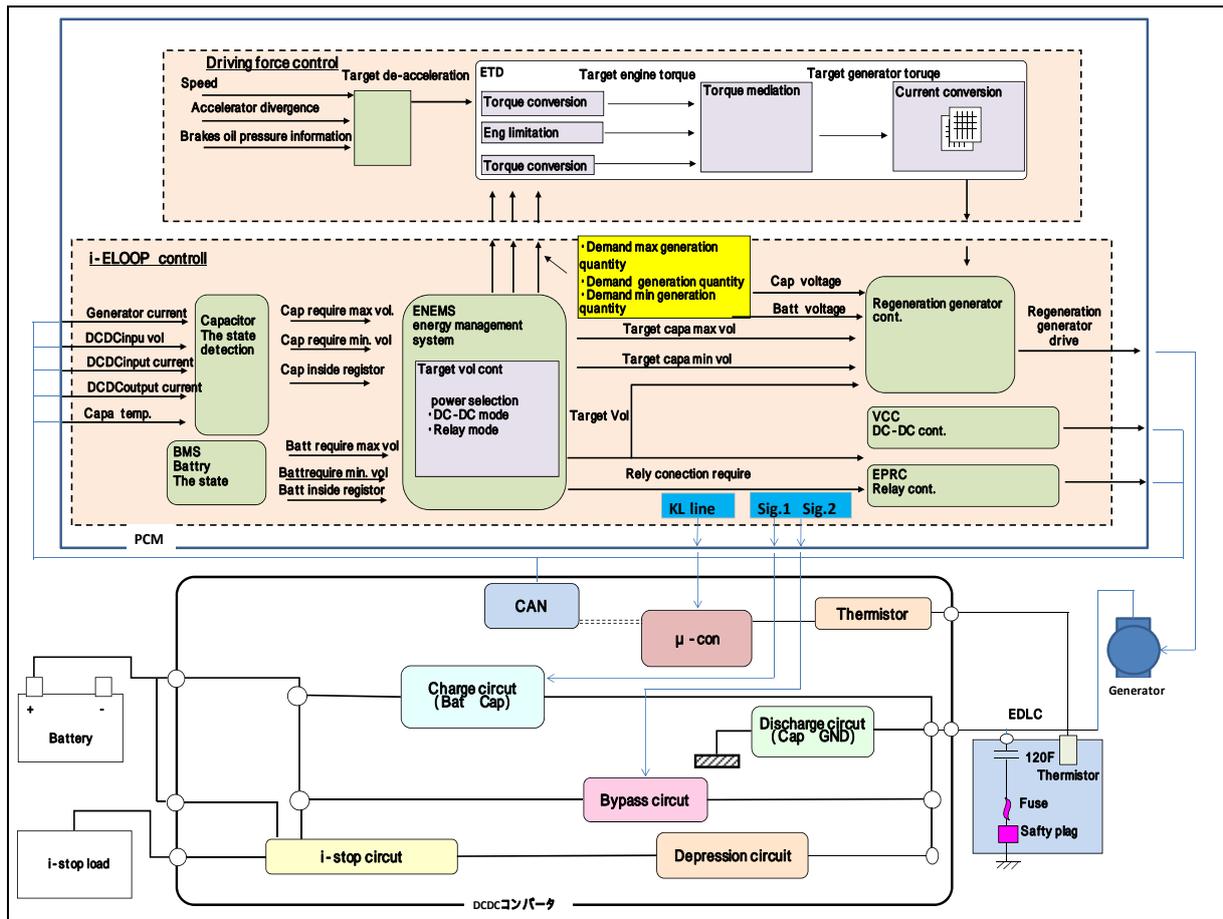


Fig.8 System

2.3 機能別システム説明

システム構成を電気回路の機能別に示した図が Fig.8 である。EDLC にはショート保護用ヒューズとサービス用安全プラグ、温度保証用としてサーミスタを配置している。DC-DC コンバータには降圧回路、EDLC 充電用回路、放電用回路、i-stop バックアップ回路、過電流時直結リレー回路、EDLC サーミスタ読み取り回路を配置している。

PCM(Power train Control Module)は車速、アクセル開度、ブレーキ油圧を読み込み、目標減速度を算出する。この結果と減速回生制御が監視している EDLC や鉛バッテリーの状態からオルタネータの発電量を決定している。更に PCM は、車両消費電流とバッテリー状態から DC-DC コンバータの出力電流を決定し、発電を指示している。

また、「i-ELOOP」システム関連のリレー制御指示も PCM が行っている。Fig.8 で示す KL ライン(図中青塗)は i-stop 時のリスタート情報を PCM から DC-DC コンバータに送りリスタート時の電源変動対応を行っているリレーを制御する回路である。Fig.8 で示す Sig1, Sig2(図中青塗)は、車両負荷が過負荷時や DC-DC 故障時などに対応するバイパスリレーを PCM から制御している信号である。バイパスリレーを ON するとオルタネータと鉛バッテリーは直結され、通常の車両と同じ機能になる。

2.4 燃費改善目標と個別部品スペックの決定について

“i-ELOOP”では、燃料を使用したオルタネータでの発電をなくし、回生エネルギーだけで車両消費電流をカバーすることを柱とした。

実際の加減速が頻繁にある市場走行シーンにおいて、相当の電気負荷時に約 10%程度の燃費改善率が得られるように目標を設定した。実際は、燃費測定モードの方が実走行シーンに比べ加減速が少なく回生エネルギーが少ないことから、燃費測定モードの走行において、燃料での発電をなしにできれば、狙いの燃費の向上が図れる。よって、ヨーロッパ燃費測定モード NEDC で燃料による発電をゼロとなるよう先行暫定目標を立て個別部品に振り分けた。Fig.9 のように最初に車両の必要総エネルギーを算出する。また回生エネルギーを取るための余裕減速度を算出し、回生取得可能総エネルギー量を出す。この総量から減速 1 回当たりの必要エネルギーを算出し、関連デバイスの個別スペックに振り分けた。

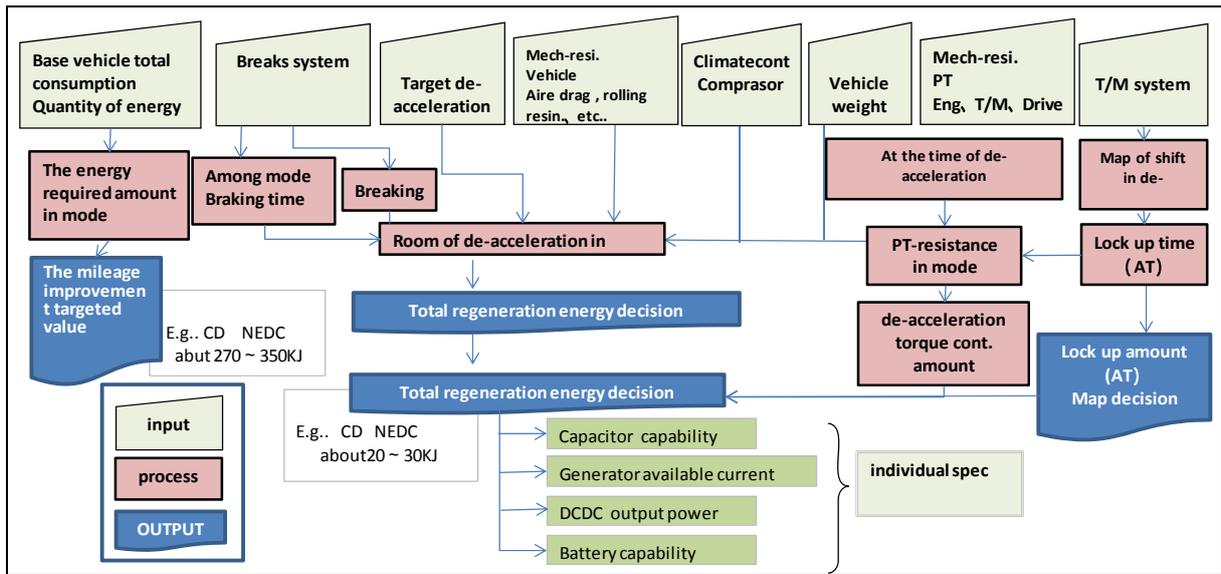


Fig.9 Relation for Spec

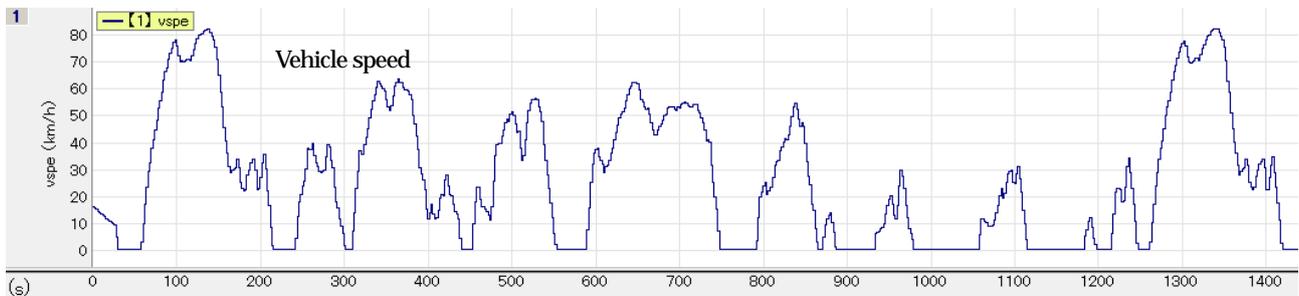


Fig.10 JC08 Speed Pattern

3. デバイス仕様と効果

3.1 “i-ELOOP” キャパシタ容量決定と効果

“i-ELOOP”は、消費電流が大きく加減速の比較的多い実走行時に実力を発揮する。仮の目標を決定するため、実際の走行シーンの加減速頻度の一般的代表として日本の燃費測定モード JC08 (Fig.10) を使用した。JC08 での加減速では、10 秒以上の車速ゼロおよびアクセル ON が 20 回で最長 80 秒であり、平均すると 38.7 秒となる。いろいろな走行シーンから、燃費モード測定時の消費電流値約 15 ~ 20A に対し実走行時を考え 40A の消費電流時でのエネルギー計算とした。40A の消費電流で、45 秒電力供給できる $13.5V \times 40A \times 45 \text{ 秒} = 24.3kJ$ を仮の目標とした。実際の仕様では EDLC の規格やオルタネータの仕様から 25.7kJ の設計となっている。

キャパシタの必要容量 C を求める。1 回当たりの充電必要エネルギー E は 24.3kJ。電荷を Q とすると E は Q の電圧 V での積分値となる。よって関係は次式となる。これにより静電容量 C を求める。

$$E = \int_{14}^{25} Q \, dv \quad Q=CV \text{ から } E = \int_{14}^{25} CV \, dv = \left[\frac{1}{2} CV^2 \right]_{14}^{25}$$

以上から C = 113F (実際は実用燃費優先で劣化も考慮し 120F とした。)

1 回あたり充電時間検証

充電時間 t は 1 回あたりの充電電流を 200A とすると、
 $Q = CV$ から $200t = 120 \times (25 - 14)$ $t = 6.6 \text{ sec}$
 ただし本計算では内部抵抗値は無視している。

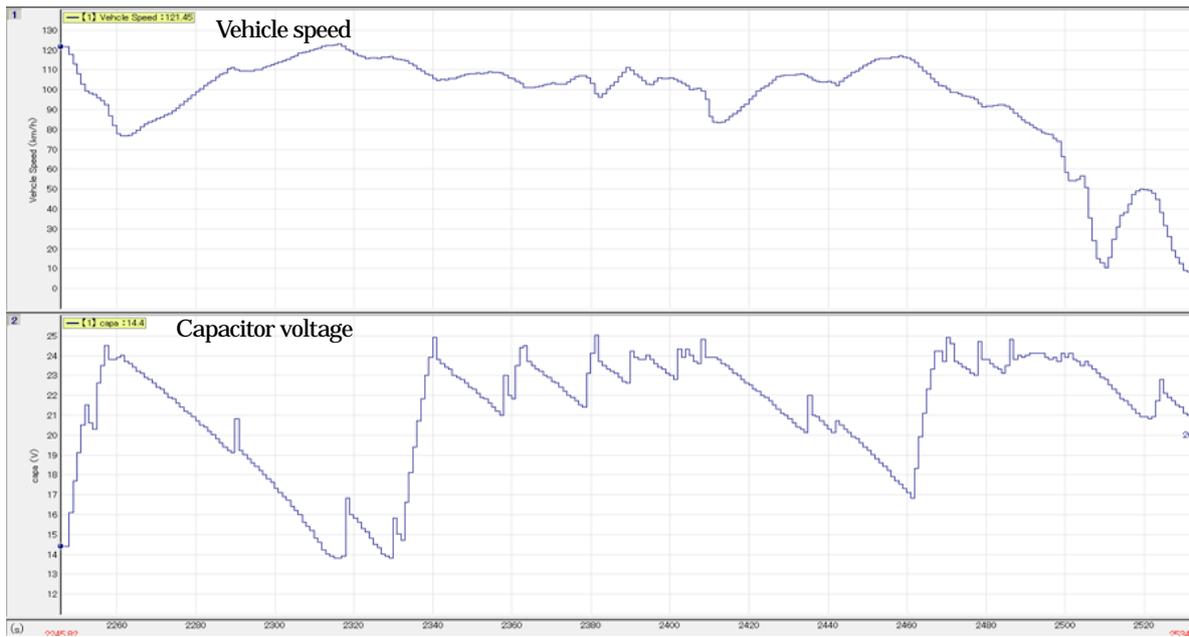


Fig.11 Test Data of USA 405 Freeway (Ex. Scene A)

シーン A < 充分な加減速頻度で常に車両消費電流を回生エネルギーで賄えるシーンでの効果 >

Fig.11 は、シーン A の実際の走行データである。USA405 フリーウエーでの約 5 分間のデータを示す。車間距離が詰まりながらも 80km/h から 120km/h の加減速を繰り返している。シーン A では、常に減速エネルギーのみで車両の電気負荷を補い、燃料による発電がないことがわかる。Fig.12 は充分な加減速頻度で常に車両消費電流を回生エネルギーで賄える場合の消費電流 Vs 燃費改善率のイメージをグラフ化したものである。実際の燃費改善率は、各車種の質量やエンジン効率、平均消費電流により変化する。

例えば 15A の平均消費電流の車種では、3~5%程度の改善率と推定される。実用走行では 30~40A の消費電流が一般的にあり、シーン A のような充分な加減速頻度で、常に車両消費電流を回生エネルギーで賄える場合の燃費 10%程度が見込まれる。

シーン B < 加減速頻度が少なく車両消費電流の約半分を回生エネルギーで賄えるシーンでの効果 >

Fig.13 は加減速頻度が少なく車両消費電流の約半分を回生エネルギーで賄える場合の消費電流 Vs 燃費改善率のイメージをグラフ化したものである。Fig.12 同様に実際の燃費改善率は各車種の質量やエンジン効率により変化する。同様に実用走行では 30~40A の消費電流でシーン B のような加減速頻度が少なく車両消費電流の約半分を回生エネルギーで賄える場合 5%程度の燃費向上が見込まれる。走行中の発電は約半分が燃料による発電となる。

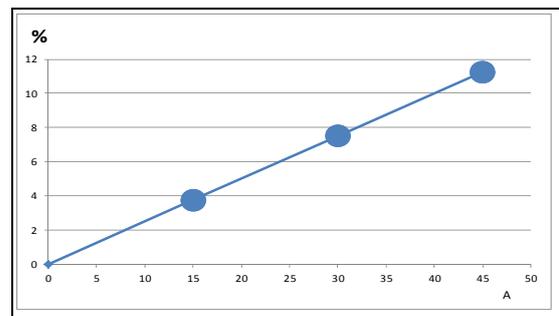


Fig.12 Fuel Economy Ratio Vs Current Image

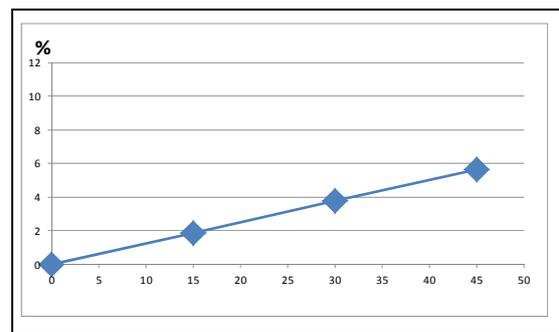


Fig.13 Fuel Economy Ratio Vs Current image

3.2 車両消費電流について

ヨーロッパの燃費測定モード NEDC では Fig.14 のような消費電流となる。

ただし車種やエンジン、ミッション等の種類で CD カークラスでは 16~24A 程度となる。

実用時では、上記のベース電流に加えて Fig.15 のような電気負荷がある。走行中の状況に消費電流は変化するが、例えば、夏の雨の日の夜であれば、フロア Cool-MID、ワイパー、ヘッドライトで約 23A が上記のベースに追加される。よってトータルの消費電流は約 40A となる。

このような場合，加減速が頻繁にあるシーンAのような状況では 10%程度の燃費向上が見込まれる。

また連続した加減速があまりないシーンBのような状況でも 5%程度の燃費向上が見込まれる。

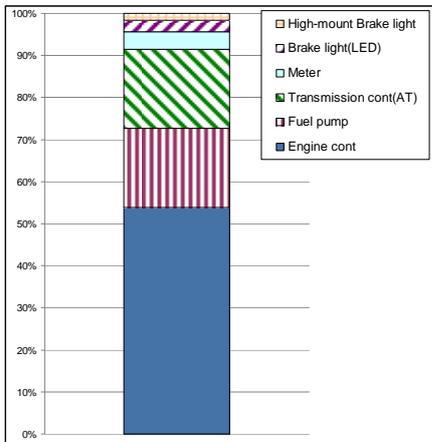


Fig.14 Basic Current for EU Image

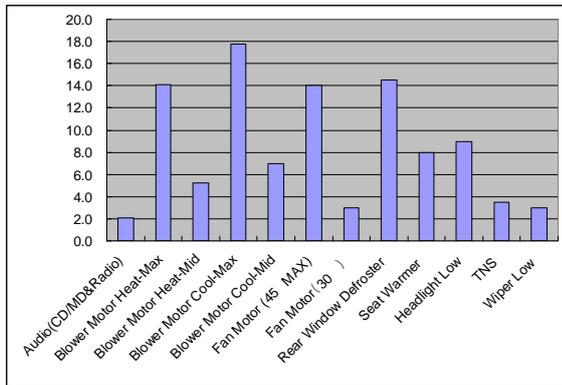


Fig.15 General Current Image

4. “i-ELOOP”のエネルギー表示について

新型アテンザの“i-ELOOP”表示について回生エネルギーの循環がわかる表示 (Fig.16) と，よりアトラクティブな表示 (Fig.17) の 2 種類を用意した。(ただし一部地域で異なる)

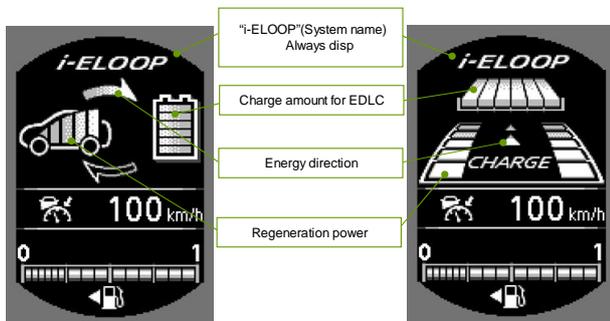


Fig.16 “i-ELOOP” Disp.1

Fig.17 “i-ELOOP” Disp.2

主な表示の説明

瞬間回生エネルギー量；

アクセル OFF 後回生オルタネータの発電電流量をバー表示で表したものの。

エネルギー移動の向き；

Fig16 では左から右への矢印が回生オルタネータから EDLC への充電方向を示す。

Fig17 では下から上の方向に回生オルタネータから EDLC への充電方向を示す。

右から左への矢印；

EDLC から車両電気負荷に送られる方向を示す。

EDLC の充電量；

EDLC の充電量を示す。

今回の表示では，実使用可能エネルギー 25.7KJ がフルバー表示となる。エンジンコントロールユニットからの表示指示に従いメータに表示する。また，上記 2 種類の画面は，ハンドルスイッチの中の INFO ボタンで選択可能である。

5. まとめ

燃料を使いオルタネータで発電した電気を使用する通常の車両のシステムに対し，これまで捨てていた減速時の運動エネルギーを再利用することで，極力燃料による発電をなくす回生システムである。通常のシステムに対し，オルタネータの電子回路の小変更とキャパシタ，DC-DC コンバータを追加するのみで，システム構成で大きな変更もなく，コストパフォーマンスに優れたシステムである。特に実用領域では，モード燃費測定時に比べ消費電流が多いため，より燃費向上効果を発揮することが見込まれ，環境対応に貢献できると考えている。将来的には，電動ウォーターポンプや電動コンプレッサの採用等の環境対応や衝突被害軽減装置等の安全装備のエレキシステムが増え，それらのシステムでの消費電流の増加による燃費悪化に対応できるシステムとして，システムの進化，デバイスの進化による対応が不可欠と考えている。“i-ELOOP”を通じて，環境に優しく“Zoom-Zoom”な走りのクルマの提供に今後も貢献していきたい。

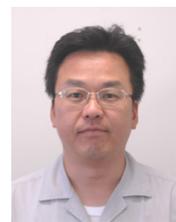
著者



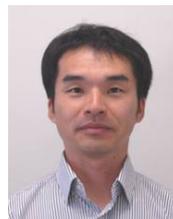
高橋 正好



高橋 達朗



北木 義正



山下 丈晴



北川 浩之



平野 晴洋