

特集：モデルベース開発

13

WLTC に対する i-ELOOP の適用

Application of i-ELOOP for WLTC

小谷 和也*1

Kazuya Kotani

久米 章友*2

Akitomo Kume

水落 洋行*3

Hiroyuki Mizuochi

平野 晴洋*4

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。i-stop に続く Step2 として、減速時の運動エネルギーを回生し、車の使用電力として再利用する i-ELOOP を 2012 年発売のアテンザから導入した。また、各社からも減速エネルギー回生技術が提案されており、減速エネルギー回生技術が重要な技術となっている。本稿では、WLTC (Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle) における i-ELOOP の妥当性を確認するため、ブレーキ協調機構、パワートレイン (以下、PT) 停止機構の有無による減速エネルギーの回収率を試算し、「つくる」「ためる」「つかう」の観点で分析を行った。

Summary

Based on the long-term vision of technology development, "Sustainable Zoom-Zoom", Mazda has been promoting "Building Block Strategy". As the second step of this approach, a new regenerative braking system "i-ELOOP" was introduced to the market in 2012, which regenerates the energy from decelerating vehicle and reuses it as electric power consumed by the vehicle. Recently not a few companies presented various types of the regenerative braking systems, which will continue to be an essential technology from now on. To confirm the validity of "i-ELOOP" in WLTC, the system was analyzed in difference of recoverable energy due to the presence or absence of cooperative regenerative brake or engine stop mechanism, and the results are shown as follows.

1. はじめに

マツダは、「ビルディングブロック戦略」に基づき、減速時に失われる運動エネルギー (以下、減速エネルギー) を回収し、車の使用電力として再利用する i-ELOOP を導入した⁽¹⁾。各社からも減速エネルギーを回収し再利用するシステム (以下、減速回生システム) が提案されており⁽²⁾⁽³⁾、減速エネルギー回生技術が重要視されている。また、現在国連では安全で環境性能の高い自動車を容易に普及させる観点から、自動車の安全・環境基準を統合し、国際的な相互承認を推進することが検討されている。その中で、CO₂ の排出量を計測する走行条件について、世界の走行条件を代表する全世界共通のテストサイクルとして WLTC が検討されている。

本稿では、多くの減速回生システムが提案される中

で i-ELOOP の妥当性を確認するため、ブレーキ協調機構、PT 停止機構の有無による減速エネルギーの回収率を WLTC で試算し、「つくる」「ためる」「つかう」の観点で分析を行った。

2. 減速回生システムの概要

減速エネルギーはフライホイールで直接運動エネルギーとする方法や、電気エネルギー、圧力エネルギーに変換して回収する方法がある。特に電気エネルギーとして回収する方法は、オーディオ、ライトやモータなどさまざまな再利用手段がありハイブリッド車でも用いられている。今回の検討で取り扱う減速回生システムも、一般的な方法である電気エネルギーとして回収し、再利用するシステムを対象としている。

減速エネルギーは大きく分けて摩擦ブレーキ損失、PT 抵抗損失、走行抵抗損失として失われる。例えば、

*1~4 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

JC08 モードで各損失が占める割合は、おおよそ摩擦ブレーキ損失 40%、PT 抵抗損失 30%、走行抵抗損失 30%である。このうち走行中に必ず発生する走行抵抗損失以外の摩擦ブレーキ損失、PT 抵抗損失分のエネルギーが減速回生システムで回収可能な損失である (Fig. 1)。

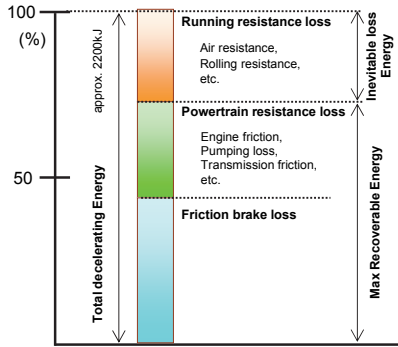


Fig. 1 Analysis of Total Decelerating Energy with Car of 1500kg in JC08

摩擦ブレーキ損失、PT 抵抗損失から回収できるエネルギーは、摩擦ブレーキ、PT 抵抗を低減することで削減した損失分のエネルギー (以下、回収可能エネルギー) である。

摩擦ブレーキ損失から回収可能エネルギーを得る方法を大きく分けると、ブレーキ協調機構の有無で分けられる。ブレーキ協調機構は摩擦ブレーキによる制動力を任意に調整できるため⁽⁴⁾、要求制動力に占める摩擦ブレーキの比率を任意に変化させることができる。そのため、ドライバの要求制動力を発電機だけで実現できる場合には、摩擦ブレーキ損失を全て回収することが可能となる。

ブレーキ協調機構がない場合にはドライバのブレーキ操作量に連動して発電量を増やすことで、発電しない場合に比べ強めの制動力を発生させている。その結果、ドライバのブレーキ操作量は発電しない場合に比べ少なくなり、要求制動力に占める摩擦ブレーキの比率を低減する効果が得られる (Fig. 2)。

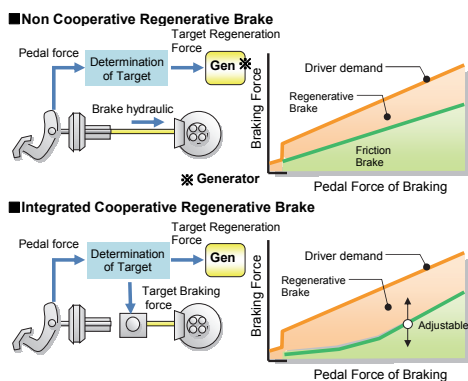


Fig. 2 Schematic View of Cooperative Regenerative Brake

PT 抵抗損失から回収可能エネルギーを得る方法は、大きく分け PT の回転を停止させる機構 (以下、PT 停止機構) の有無で分けられる。PT 抵抗はクランクシャフトが回転することで発生する摺動抵抗やポンピングロスなどであり、回転を停止させることなくすることができる。PT 停止機構はクラッチや遊星歯車を利用してエンジンなどの回転を停止させる機能と、エンジン停止中の負圧、油圧を補償する機能で構成される⁽⁵⁾。PT 停止機構の利用によって PT 抵抗損失を回収することが可能となるが、発電機は PT 停止機構で回転を停止されない場所に設置する必要がある (Fig. 3)。

PT 停止機構がない場合は、気筒停止やバルブタイミングの変更によりポンピング損失を低減することで回収可能エネルギーを得ることができる。

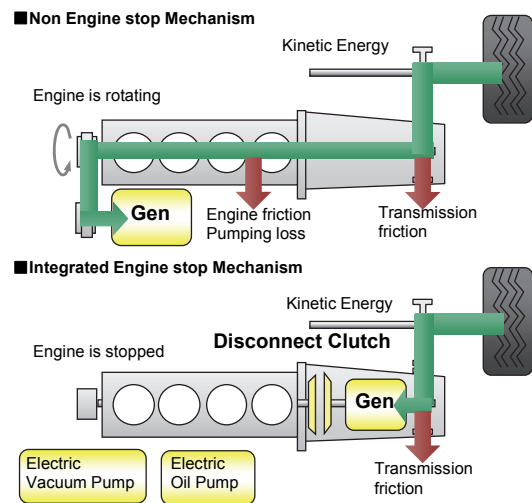


Fig. 3 Schematic View of Engine Stop Mechanism

以上から減速エネルギーの回収方法はブレーキ協調機構、PT 停止機構の有無で 4 つに分類することができる。ブレーキ協調機構や PT 停止機構を利用しない減速回生システムとしては i-ELOOP が上げられる (Table 1)。

Table 1 Classification of Regenerative Braking System

Engine stop Mechanism	Cooperative Regenerative Brake	Representative Example
Non	Non	i-ELOOP Hybrid Systems are corresponding to each type
	Integrated	
Integrated	Non	
	Integrated	

得られた回収可能エネルギーは発電機で電気エネルギーに変換し、蓄電装置に蓄え、電装品やモータで利用する。減速回生システムは、この「つくる」「ためる」「つかう」一連の流れで構成されている。次章以降ではブレーキ協調機構、PT 停止機構の有無による回収可能エネルギーの違いと、「つくる」「ためる」

「つかう」の観点で分析を行った結果を紹介する。

3. 減速エネルギー回生量の試算

3.1 試算方法と条件

試算は、i-ELOOP のモデルベース開発で構築した車両全体のエネルギーフローを解析できる仮想開発環境^⑥に、ブレーキ協調機構、PT 停止機構を加え試算を行った。

試算条件は、車両重量 1500kg とし、走行モードは WLTC V5.0 を前提とした (Table 2, Fig. 4)。WLTC は EU, インド, 日本, 韓国, 米国の実走行データをもとに策定されており、WLTC での減速エネルギーを有効に回収し、再利用できる減速回生システムであれば実走行での効果も期待できる。

Table 2 Simulation Condition

Vehicle Weight	1500kg
Engine Displacement	1.997L
Transmission Type	6AT
Driving Cycle	WLTC V5.0
Generation Efficiency	85%

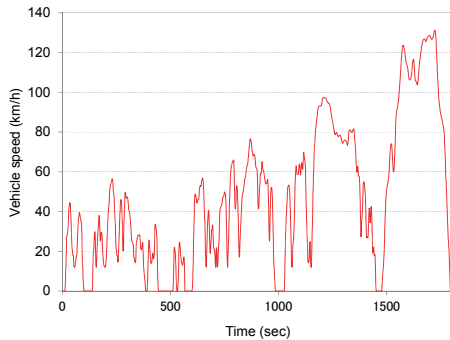


Fig. 4 Driving Cycle (WLTC V5.0)

ブレーキ協調機構は、摩擦ブレーキの制動力を任意に 0~100%まで調整できる機構を想定し、調整に必要な電気エネルギーは回収可能エネルギーから差し引いた (Fig. 5)。

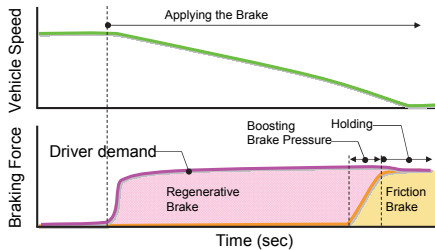


Fig. 5 Actuation Example of Cooperative Regenerative Brake

PT 停止機構は、トランスミッションとエンジンを分離するクラッチを想定し、エンジンを再始動させてクラッチを再締結するために必要な電気エネルギーは

回収可能エネルギーから差し引いた (Fig. 6)。

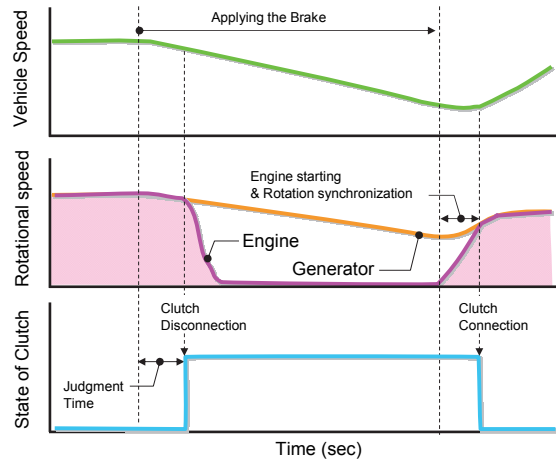


Fig. 6 Actuation Example of Engine Stop Mechanism

また、ブレーキ協調機構、PT 停止機構の有無により Fig. 7 に示す RG1~RG4 の 4 つのシステム構成を設定した。以降の説明では各システム構成を RG1~RG4 として取り扱う。

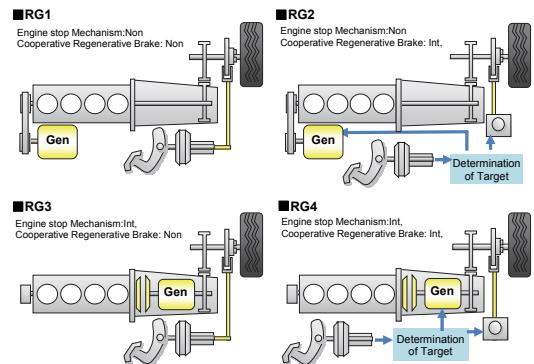


Fig. 7 System Configuration of Simulation Assumption

3.2 回収可能エネルギーの試算結果

WLTC で各損失が占める割合は、摩擦ブレーキ損失 35%, PT 抵抗損失 20%, 走行抵抗損失 45%である。JC08 モードと比べ车速が高いため、JC08 より走行抵抗損失の割合が高くなったと考える (Fig. 8)。

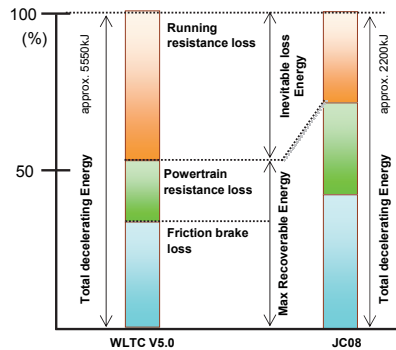


Fig. 8 Analysis of Total Decelerating Energy in WLTC
回収可能エネルギーは、ブレーキ協調機構、PT 停止機構を利用することで大きくなり、RG4 では減速エ

エネルギーの74%が回収可能となる (Fig. 9)。

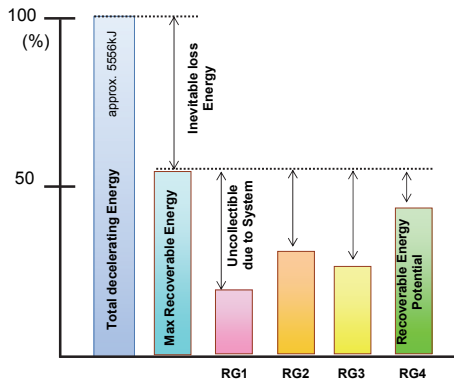


Fig. 9 Recoverable Energy Potential of Each System Configuration

ブレーキ協調機構を利用した場合、摩擦ブレーキ損失を回収できるため PT 停止機構の有無に関係なく、1秒当たりの回収可能エネルギーが大幅に大きくなる (Fig. 10)。

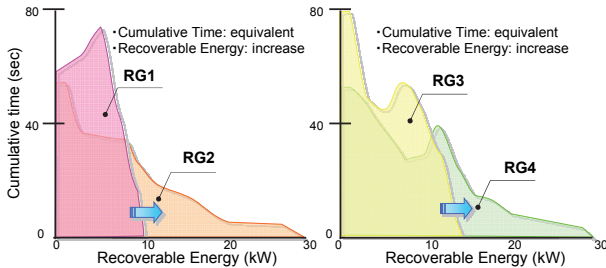


Fig. 10 Effect of Cooperative Regenerative Brake

PT 停止機構を利用した場合、PT 抵抗損失を回収できるためブレーキ協調機構の有無に関係なく、1秒当たりの回収可能エネルギーが大きくなる。更に、ロックアップ状態に関係なく発電できるため、減速エネルギーを回収できる時間が長くなる (Fig. 11)。

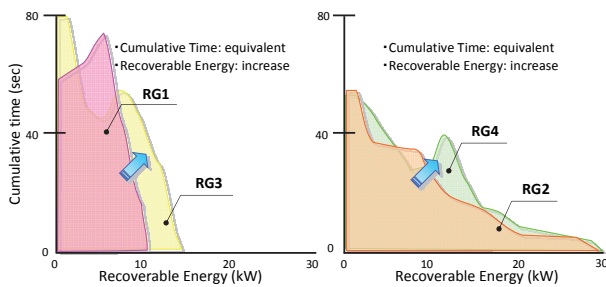


Fig. 11 Effect of Engine Stop Mechanism

4. 各機能と回生量の関係

4.1 「つくる (発電)」

回収可能エネルギーを電気エネルギーとして回収するには、回収可能エネルギーに応じた発電機の出力が必要となる。そこで、発電機の出力を考慮し回収可能エネルギーの回収量について分析を行った。発電機の出力が 5kW まではブレーキ協調機構、PT 停止機構の

有無による差は少なく、明確な差を出すには 10kW 以上が必要だと考える (Fig. 12)。

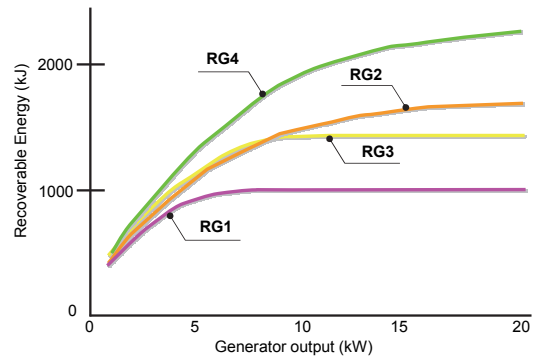


Fig. 12 Effect of Generator Output Given to Recoverable Energy in Driving Cycle

次に、発電機の出力と回収可能エネルギーの回収率について分析を行った。RG1 は 4.5kW で 80%、6kW で 95%、RG4 では 10kW で 80%、16kW で 95%の回収率となった (Fig. 13)。RG1 に分類される i-ELOOP は 5kW の発電機を採用し、回収可能エネルギーの 80%以上を回収できる。

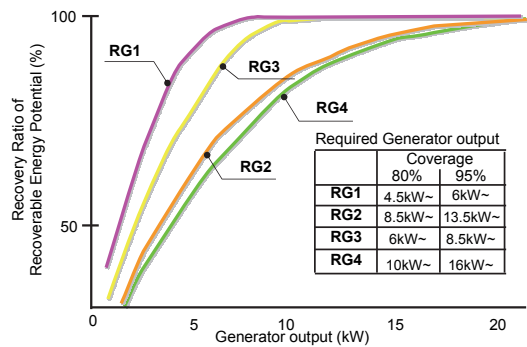


Fig. 13 Relationship between Generator Output and Recovery Ratio of Recoverable Energy Potential

4.2 「ためる (蓄電)」

発電機の出力を最大まで利用するには、発電機の出力を受け入れることができる蓄電装置が必要となる。一般的な電線ではジュール熱による損傷を防ぐため、電流を約 200A 以内に抑える必要がある。したがって、発電機の出力が 10kW の場合、その出力を利用するためには蓄電装置の電圧を 50V 以上とする必要がある (Fig. 14)。

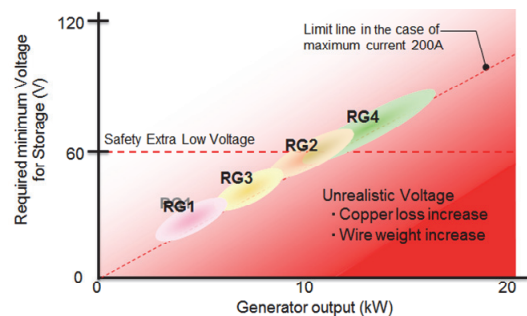


Fig. 14 Relationship between Source Voltage and Generator Output

12V以上の蓄電装置を利用する場合、従来の12Vで動作する電装品の損傷を回避するため、蓄電装置と12V電源とは分離する必要がある。更に、60V以上の蓄電装置は感電すると人に有害な影響を与えるため、人が感電しないための対策が必要となる。5kWの発電機を採用するi-ELOOPは最大25Vの高電圧電源と電装品に電力を供給する12Vの低電圧電源の2電源システムとなっている。

次に、蓄電装置の容量を考慮し、発電機で変換された電気エネルギーの回収量について分析を行った。蓄電装置が30kJまではブレーキ協調機構、PT停止機構の有無による差は少なく、明確な差を出すには60kJ以上が必要だと考える (Fig. 15)。

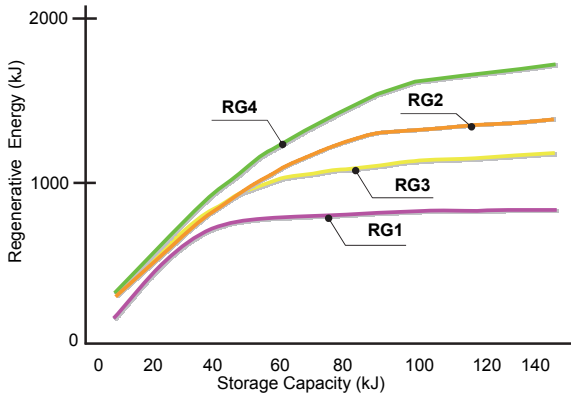


Fig. 15 Effect of Storage Capacity Given to Regenerative Energy in Driving Cycle

次に、蓄電装置の容量と発電機で変換された電気エネルギーの回収率について分析を行った。RG1は35kJで80%、60kJで95%、RG4では85kJで80%、140kJで95%の回収率となる (Fig. 16)。

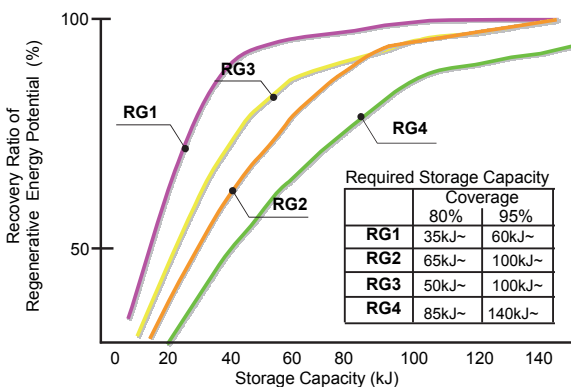


Fig. 16 Relationship between Storage Capacity and Recovery Ratio of Recoverable Energy Potential

i-ELOOPでは発電機の出力は入出力特性に優れたキャパシタに蓄え、蓄えた電気エネルギーは並行して大容量の鉛バッテリーに移動させている。その結果、25kJのキャパシタで蓄電装置の容量35kJに相当する80%以上の回収率を実現できる (Fig. 17)。

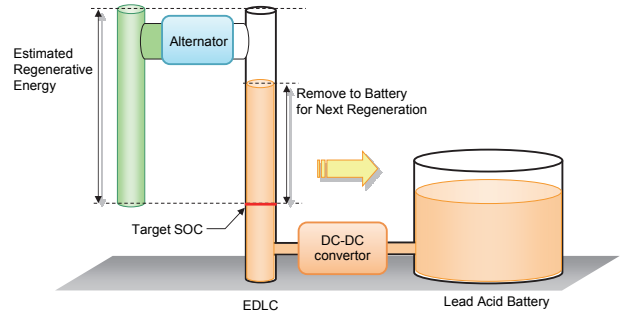


Fig. 17 Schematic Diagram of Dual Charge in i-ELOOP

4.3 「つかう (電力利用)」

減速回生システムでは、発電機で変換された電気エネルギーと車両で使用する電力 (以下、消費電力) のバランスが取れていることが必要となる。例えばWLTCの場合、おおよそ30秒~2分ごとに減速するため、毎分得られる電気エネルギーと消費電力が等しければ減速回生システムを効果的に利用しているといえる。

RG1が得られる電気エネルギーを平均化すると最大27kJ/min、RG2は最大46kJ/min、RG3は最大39kJ/min、RG4は最大62kJ/minとなる。消費電力は空調、ヘッドライトなどの電装品の作動状態の影響を受け、空調を使用しない昼間で約10~18kJ/min、夜間は約15~23kJ/minである。空調を使用する場合は昼間で約22~33kJ/min、夜間は27~38kJ/minである (Fig. 18)。

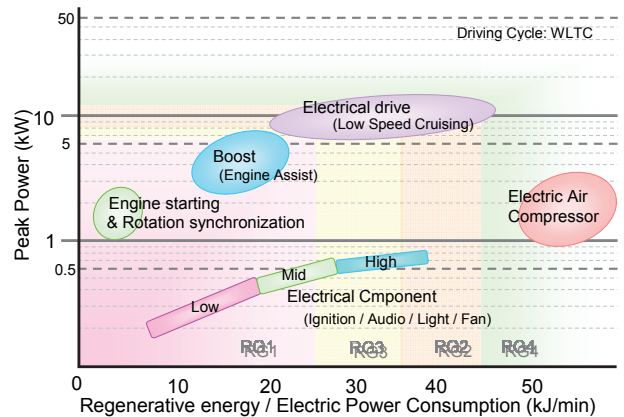


Fig. 18 Relationship between Regenerative Energy and Electrical Power Consumption

仮に電装品の消費電力38kJ/minを減速エネルギーで供給する場合、39kJ/minの電気エネルギーが得られるRG3が適している。その場合、消費電力が10~18kJ/minのシーンでは、29~21kJ/minが余剰となるため有効に利用する機能を追加することが適している。例えば3~5kWのモータを利用すればエンジンを補助

することができ、更に 8~10kW のモータを利用すれば低速での定常走行をモータのみで実現できる。RG3 の回収可能エネルギーを 80%以上回収できる発電機は 6kW 以上であり、消費電力が少ない場合はモータとしてエンジンを補助することで減速回生システムを効果的に利用できる。

i-ELOOP では RG1 の構成で、約 80%の回収率を実現する能力を有しているため、得られる電気エネルギーは約 21kJ/min である。消費電力が約 10~38kJ/min であることを考えると、減速エネルギーで電装品の電力を供給する減速回生システムとしてバランスが取れている。

5. 結論

今回、ブレーキ協調機構、PT 停止機構の有無による減速エネルギーの回収率について WLTC を用いて試算した。その結果、RG1 に分類される i-ELOOP は WLTC でも、減速エネルギーで電装品の電力を供給する減速回生システムとして適切な構成であることが確認できた。

また、検討結果から WLTC において減速エネルギーの回収率を高めていくと、減速回生システムは以下のように進化していくと考えられる (Table 3)。

- (1) RG1~RG4 全て 12V 以上の蓄電装置が適しており、蓄電装置と 12V 電源を分離した 2 電源システムの採用が広がる。
- (2) RG2~RG4 では、得られた電気エネルギーを有効に利用するため、モータ機能の採用が広がる。

Table 3 Summary of Study Results

		RG1	RG2	RG3	RG4
Cooperative Regenerative Brake		non	Int.	non	Int.
Engine stop Mechanism		non	non	Int.	Int.
Generator	Output(kW)	4.5~6	8.5~13.5	6~8.5	10~16
Storage	Voltage(V)	23~30	43~68	30~43	50~80
Separation of 12V Power Supply		Need			
High-voltage protection		non	non~Need	non	non~Need
Recovery Ratio of Max Recoverable Energy		26~31%	44~52%	37~44%	59~70%
Use of Regenerative Energy	Electrical Component	○	○	○	○
	Boost	△	○	○	○
	Electrical drive (Low Speed Cruising)	-	△	△	○
	Electric Air Compressor	-	-	-	△

○ Standard △ Possible

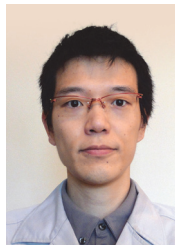
6. おわりに

今後も、全てのお客様に「走る歓び」と「優れた環境性能」をお届けするために、仮想開発環境と減速エネルギー回生技術を進化させる取り組みを続けていく。

参考文献

- (1) A. Kume, et al.: Mazda "i-ELOOP" Brake Energy Regeneration System and Strategy, AABC Europe 2013, AABTAM Symposium Session 2-4 (2013)
- (2) L. Alger, et al.: Li-Ion Battery Pack for Micro Hybrid Vehicles: Development and Series Application, AABC Europe 2013, AABTAM Symposium Session 2-5 (2013)
- (3) M. Uhl, et al.: Boost Recuperation Machine-Electric Motor for 48V Systems, EEHE, Session 2-1 (2013)
- (4) N. Ohkubo, et al.: Application of Electric Servo Brake System to Plug-In Hybrid Vehicle, SAE Paper, No.2013-01-0697 (2013)
- (5) N Mueller, et al.: Next Generation Engine Start/Stop Systems: "Free-Wheeling", SAE Paper, No. 2011-01-0712 (2011)
- (6) 柴田ほか: "i-ELOOP" 制御系開発における机上環境の進化, マツダ技報 No.30, pp.56-59 (2012)

■ 著 者 ■



小谷 和也



久米 章友



水落 洋行



平野 晴洋