

電気自動車の使い勝手に関する実証研究（第3報）*

市野瀬 和正¹⁾

北原 成倫²⁾

脇田 喜之³⁾

A Verification Study of the Effective Driving Condition of the EV in Daily Use (Part 3)

Kazumasa Ichinose

Masanori Kitahara

Yoshiyuki Wakita

It is important that the regenerative brake extends its cruising range. Therefore, we study the operating conditions of a cooperation system of a friction brake and a regenerative brake. In this paper, we measure the operating data of the new model EV, then we illustrate a comparison between its data and similar data of last paper. As a result, we obtained that the effective operating range of the new regenerative cooperation brake system improves from -0.25G to -0.4G. So that its regeneration efficiency increases on cruising in a city area.

Key Words: Electric Vehicle, Cooperation Brake System, Regenerative Brake, Regeneration Efficiency

1. はじめに

現在、内燃機関に替わる次世代自動車として、電気モータとリチウムイオンバッテリーとの組み合わせによる電気自動車の量産車が始まって約4年経ち、社会においても一定の評価を得るに至ったと言える。しかしながら、2012年末のマイナーチェンジ後も、依然として航続距離の不足が指摘されており、日夜、各分野で様々な研究が継続されている。

本研究では、市販の電気自動車を日常用途に使用した状況において、可能な限りカタログデータに近い航続距離が得られるような走行条件を求めることを目的として、実証研究を続けている。

第1報では、電気自動車に風速計を搭載し、車速及び走行時風速に対する電費を計測した。その結果、電費が良好となる上限速度がおおよそ75km/hであることが分かった。また、第2報では、回生協調ブレーキシステムに着目し、より多くの回生電力量を得るには、約-0.24Gより弱いブレーキ操作が望ましいとの結論を得た。

本稿では、2012年11月にマイナーチェンジが行われた新型車両について第2報と同じブレーキ実験を行い、旧型と新型の性能比較を行う。これにより、新型の回生協調ブレーキシステムの作動を明らかとし、より多くの回生電力量を得るためのブレーキ操作について検討を行う。

2. 実験車両の概要

本研究で実験に使用した車両は、2010年12月に日本とアメリカ、2011年にヨーロッパや中国でも発売され、2014年現在、4大陸35か国で販売されている世界初の量産型電気自動車である。よって今後開発される電気自動車は、この車両を手本とすることが予想され、本研究においても実験対象にふさわしいと判断した。また2012年11月にマイナーチェンジが行われ、大幅な軽量化や回生性能の向上、省電力暖房システムなどの採用により航続距離を伸ばしている。実験車両の諸元は表1に示す。

表1 実験車両 諸元^{(1),(2)}

	旧型	新型
車両型式	ZAA-ZEO	ZAA-AZEO
全長	4445 mm	
全幅	1770 mm	
全高	1545 mm	1550 mm
ホイールベース	2700 mm	
車両総重量	1795 kg	1715 kg
駆動用バッテリー	リチウムイオン電池	
総電圧	360 V	
総電力量	24 kWh	
前 ブレーキ	ベンチレーテッドディスク式	
後 ブレーキ	ベンチレーテッドディスク式	
回生協調ブレーキ	電動型制御ブレーキ	
タイヤサイズ	205/55R16	
最終減速比	7.9377	8.1938

*2014年8月6日受理。第46回全国自動車短期大学協会研究発表会において発表。

1)・2)・3) 新潟工業短期大学 (950-2076 新潟県新潟市西区上新柴町5-13-7)

2-1. EVの基礎構造についての変更点

マイナーチェンジによる変更点については、次のとおりである。なお、本研究と直接関わらないものとして、インテリア及びエクステリアの変更点については記述しない。

モータ、インバータ、DC/DCコンバータなど高電圧ユニットを一体化し、全体で容積30%、質量10%の大幅なサイズダウンを実現させ、機能統合によるパワートレインのユニット一体化、バッテリーモジュールとケースの構造を合理化、その他各部パーツを軽量化することで、現行車と比べて約80kgの軽量化を実現している。また、駆動系の性能比較を表2に示す。最大出力は80kWと変わらないが、最大トルクは280N・mから254N・mと下がり、一充電走行距離は200kmから228kmと上がっている。

表2 駆動系の性能比較^{(1),(2)}

	旧型	新型
モータ 型式	EM61	EM57
最高出力	80 kW (2730~9800rpm)	80 kW (3008~10000rpm)
最大トルク	280 Nm (0~2730rpm)	254 Nm (0~3008rpm)
一充電走行距離	200 km	228 km
交流電力量消費率	124 Wh/km	114 Wh/km

2-2. 電費改善に関する変更点

エアコン使用時の電費改善として、ヒートポンプ式キャビンヒータや全席シートヒータ、ステアリングヒータ、天井内側にアルミフィルムを張り巡らせる遮熱天井を採用し、消費電力の低減に寄与している。さらに、従来の回生協調ブレーキ制御範囲を変更し、高効率に回生させることでエネルギー回収量に貢献している。

2-3. 電動型制御ブレーキ^{(1),(3)}

電動型制御ブレーキユニットは、従来の負圧型ブースタと同等の場所にレイアウトされており、ドライバーの操作入力から摩擦ブレーキによる制動力と、駆動モータによる回生ブレーキを協調制御する。モータによりマスタシリンダ内のピストンを動かすことでアシスト力を発生させる。また、油圧ユニットの内部構成は図1のように、ブレーキペダルから接続されたインプットロッド、電気モータ、モータ回転の直動変換機構、直動変換機構によって動作するプライマリピストン、およびペダル反力を生成する各バネから構成される。

ブレーキシステムの構成としては、ドライバーのブレーキ操作入力を検出するストロークセンサ、ブレーキマスタシリンダの発生液圧を検出するマスタシリンダ液圧センサ、ドライバー操作や回生協調機能に応じたマスタシリンダ液圧を発生、制御する電動型制御ブレーキユニットからなる。

作動原理としては、インプットシャフトに対し、プライマリピストンの位置を電動モータによって任意に制御することで、摩擦ブレーキのみ使用時や回生協調ブレーキ時にマスタシリンダ液圧を増減させることが可能になっている。

回生ブレーキと協調させた場合、ドライバーのブレーキペダル操作入力によって決まる車両の目標減速度は、駆動モータの回生トルクによって生成される減速度と、摩擦ブレーキによって生成される減速度の和によって実現される。回生ブレーキと協調されない場合と比較して、プライマリピストンの位置は、マスタシリンダ圧を減少させるためにペダル側に戻され、同状態を維持することによって目標減速度を実現することができる。

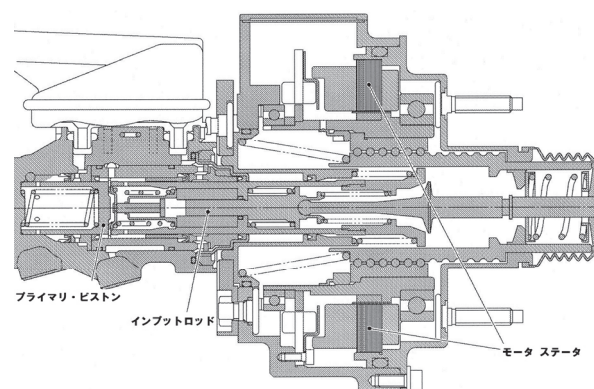


図1 油圧ユニットの内部構造⁽²⁾

3. 実験方法

本報告では、回生協調ブレーキシステムの新旧比較を行うため、第2報で報告した回生協調ブレーキ実験と同じ条件下で走行実験を行っている。ただし、新型車両では測定可能なデータ項目が変更されたため、不足するデータ項目については関連項目から算出している。本節では第2報で述べた実験方法を再掲し、不足データ項目の計算方法について説明を行う。

3-1. 回生協調ブレーキ実験⁽⁴⁾

本節では、走行実験の実施方法について、第2報より再掲する。まず平坦路を一定速度で走行し、測定開始と同時に一定のペダルストロークでブレーキ操作を行い、停止するまでの走行状態を記録した。制動時の初速度は、40km/hから10km/h刻みで90km/hまで6段階の測定を行っている。ブレーキの操作量については、弱(約0.2G)、中(約0.4G)、強(約0.6G以上)の3段階で測定を行った。

主となる測定データは、①車速、②ブレーキSWのON/OFF、③Gセンサによる減速度、④マスタシリンダ圧(摩擦ブレーキの制動力)、⑤モータ実トルク(回生ブレーキの制動力)、⑥モータ消費電力(回生電力値)の6項目である。そして総合評価として、1回のブレーキ操作で得られる回生電力量を、モータ消費電力の時間積によって算出した。

3-2. 不足データ項目の計算方法

新型の実験車両においては、上記 6 項目の測定データ項目のうち、④マスタシリンダ圧、⑤モータ実トルク、⑥モータ消費電力の 3 項目が測定対象から外された。本節では、この 3 項目の計算方法について説明を行う。

まず、マスタシリンダ圧の計算方法について述べる。計算の基となる関連データ項目としては、マスタシリンダ圧センサ電圧が新旧型ともに測定可能である。そこで、第 2 報の実験データにおいてマスタシリンダ圧と、マスタシリンダ圧センサ電圧の両方を測定していた 10 例について、回帰分析を行った。その結果、8 例においては一次関数を適用した際の相関係数 R^2 が 0.995 となり、一次関数の比例係数および y 切片の誤差も、次式の 1% 程度に収まったので、十分な信頼性が得られると判断した。結果として

$$\text{圧力(MPa)} = 4.065 \times \text{センサ電圧(V)} - 2.11$$

で計算を行っている。なお、残り 2 例については、圧力と電圧の関係に原因不明のヒステリシス性が見られたため、回帰分析の対象から除外した。

次に、モータ消費電力の計算方法について述べる。計算の基となる関連データ項目としては、バッテリー電圧、バッテリー電流、補機消費電力、エアコン消費電力、エアコン用コンプレッサ消費電力が、新型で測定可能である。そこで、

$$\begin{aligned} \text{モータ消費電力} = & - (\text{バッテリー電圧} \times \text{バッテリー電流}) \\ & - \left(\begin{array}{l} \text{補機} \cdot \text{エアコン} \cdot \text{コンプレッサ} \\ \text{の消費電力の合計値} \end{array} \right) \end{aligned}$$

で計算を行っている。なお、計算式の右辺がすべて減算となっているのは、モータ消費電力は回生時にマイナス値を取ることに対して、バッテリー電力は充電時にプラス値を、補機・エアコン・コンプレッサの消費電力は消費時にプラス値を取るためである。また、単位を kW に統一して計算している。

最後に、モータ実トルクの計算方法について述べる。まず、実験車両に用いられている駆動用モータは極めて効率が高いことから、モータ機械出力をモータ消費電力と仮定する。また、一般的にモータ機械出力は、トルクと回転数の積で表される。このことから、関連データ項目の車速を基にして、モータ回転数を算出し、前述のモータ消費電力と合わせて、実トルクが逆算可能となる。タイヤ仕様 205/55R16、最終減速比 8.1938 より、

$$\begin{aligned} \text{モータ回転数(1/sec)} &= 1.14653 \times \text{車速(km/h)} \\ \text{モータ実トルク(Nm)} &= \frac{\text{モータ消費電力(W)}}{2\pi \times \text{モータ回転数(1/sec)}} \end{aligned}$$

で計算を行っている。なお、計算の妥当性については旧型車両の実験データを用いて検証を行い、車速が約 20km/h 以上では十分に妥当な結果が得られた。しかし、車速が計算式の

分母に含まれているため、車速が約 5km/h 以下では誤差が増大することが明らかとなった。

4. 実験結果

本節では、第 2 報と本報告の両実験データを比較し、回生協調ブレーキシステムの新旧比較について、二つの側面から検討を行う。その一つ目の側面は、回生協調制御の制御方法についての検討であり、制動開始から停車までの走行状態のグラフを比較することで検討を行う。また、二つ目の側面は、回生協調ブレーキの効果が得られる制動条件についての検討であり、各実験データから集計した回生電力量を評価することで検討を行う。

そして、これらを総合して、新型車両の改良点や、より効率的に回生を行うブレーキ操作について議論をまとめる。

4-1. 回生協調ブレーキ実験

本実験で得られた走行データを整理すると、第 2 報の旧型車両と同様に、新型車両においても、そのすべてが回生協調制御の作動方法により三種類のパターンに当てはまることが明らかとなった。本節では、実験データを交えて、新型車両の回生協調ブレーキの作動について検討を行う。

まず、第 2 報の報告内容について、整理をしておく。第 2 報においては、旧型の協調ブレーキ作動パターンはブレーキ操作の強さ (G の強さ) で区別され、約 0.2G を①段階、約 0.4G を②段階、約 0.6G を③段階として、ブレーキ作動パターンを分類している。実験結果より、各段階のブレーキ作動は、①全制動時間に渡り協調制御が行われているパターン、②協調制御が途中で中断されるパターン、③最初から協調制御が作動しないパターン、と説明されている。

本報告では、新型車両との比較を容易とするために「摩擦ブレーキと回生ブレーキのどちらを優先的に作動させるか」という観点から、第 2 報の結果を整理する。すなわち、一方のブレーキを優先的に作動させるということは、他方のブレーキの作動に何らかの制約を課すこと、例えば「ゼロ」にすることを指している。この考えに従うと、旧型車両のブレーキ作動パターンは、次のように表現される。まず、①全制動時間に渡り協調制御が行われているパターンは、摩擦ブレーキの作動をゼロに制約しているため、「回生ブレーキを優先作動」させるパターンと考えられる。次に、②協調制御が途中で中断されるパターンは、安全のために回生ブレーキの実トルクをゼロに制約しているため、「摩擦ブレーキを優先作動」させるパターンと考えられる。そして、③最初から協調制御が作動しないパターンは、②と区別するために「摩擦ブレーキのみを作動」させるパターンとする。

そこで、新型車両の協調ブレーキ作動パターンについても、旧型車両のブレーキ作動パターンとの類似性に留意して、同様の分類を行う。

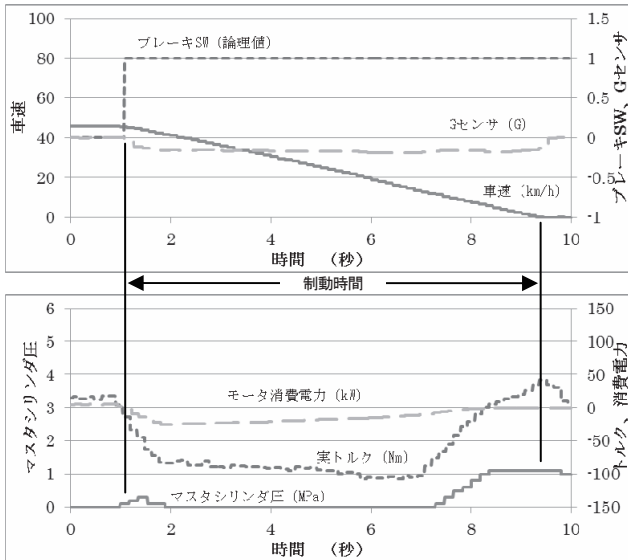


図2 旧型, 回生ブレーキ優先作動
(初速=45.8km/h, 最大G=-0.19G)

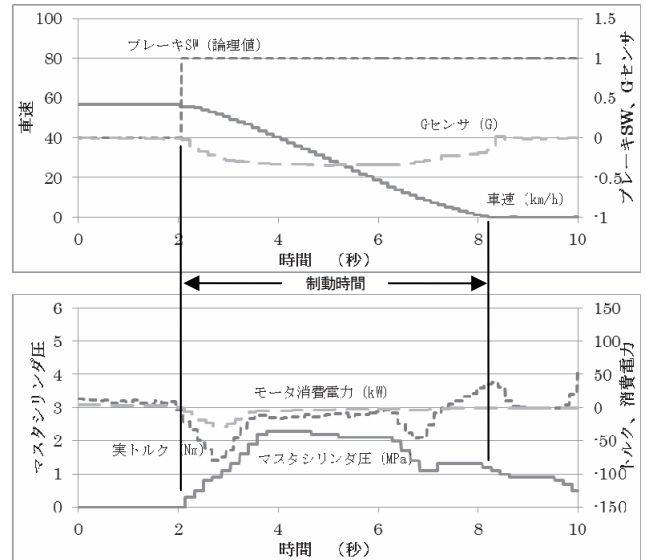


図4 旧型, 摩擦ブレーキ優先
(初速=56.8km/h, 最大G=-0.35G)

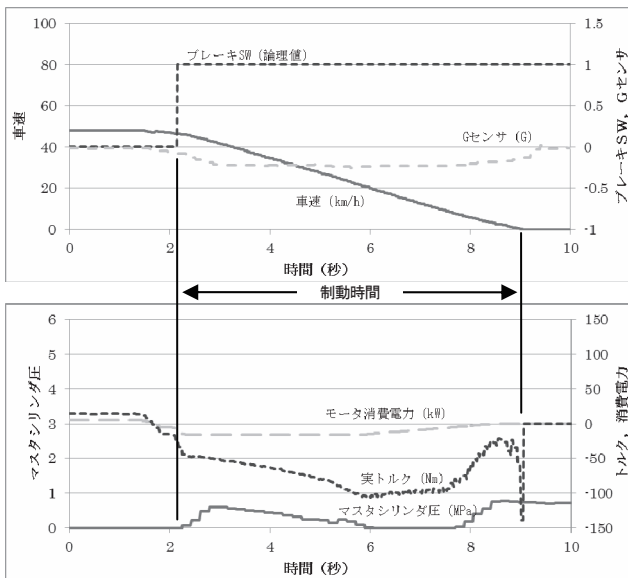


図3 新型, 回生ブレーキ優先作動
(初速=46.5km/h, 最大G=-0.25G)

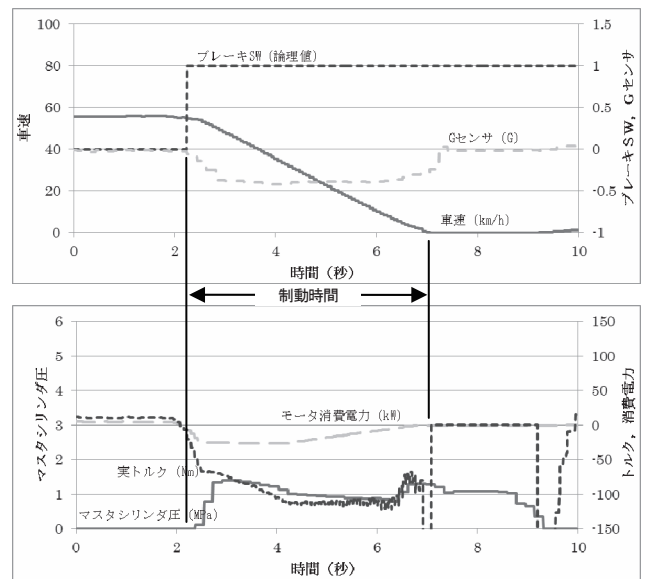


図5 新型, ミックスブレーキ制御
(初速=55.0km/h, 最大G=-0.42G)

まず、旧型の①回生ブレーキ優先作動の様子を図2に、これと同様の新型のブレーキ作動を図3に示す。マスタシリンダ圧がゼロとなる時間が図2より遅らされているが、全体としては旧型と同じ「回生ブレーキ優先作動」と考えられる。マスタシリンダ圧ゼロを遅延させている理由はABS作動待機のためと考えられるが、この影響で回生電力量は若干低下することが予想される。その代わりに回生ブレーキの作動開始を、アクセルOFF時にまで早めている。

次に、旧型の②摩擦ブレーキ優先作動の様子を図4に、これと同様の新型のブレーキ作動を図5に示す。旧型では、

ABSの作動待機のために回生ブレーキの実トルクを途中でゼロに制約しているが、新型では、実トルクもマスタシリンダ圧もゼロにせず、図5の2~6秒にかけて両ブレーキの変化量を完全に連動させている。よって、新型の作動は「回生ブレーキと摩擦ブレーキをミックスしたブレーキ制御（以下、ミックスブレーキ制御）」と言うことができる。これにより、②の段階での回生電力量は大幅に増加することが期待される。

最後に、旧型の③摩擦ブレーキのみの作動の様子を図6に、これと同様の新型のブレーキ作動を図7に示す。旧型ではABSが速やかに作動できるように回生ブレーキの実トルクを

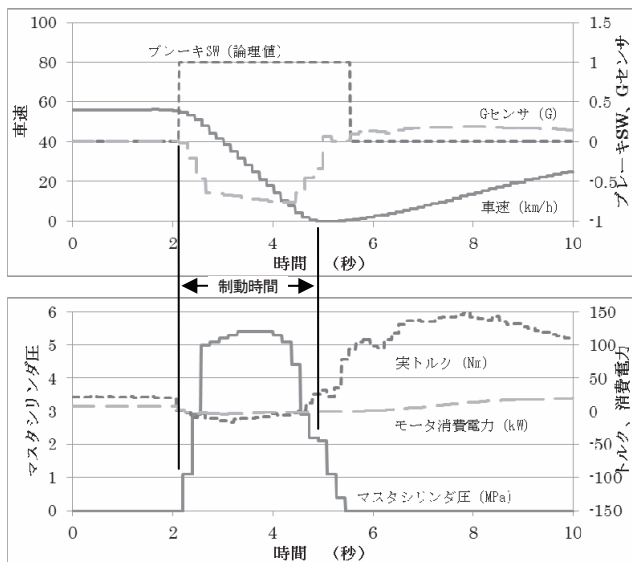


図6 摩擦ブレーキのみ作動
(初速=56.2km/h, 最大 G=-0.76G)

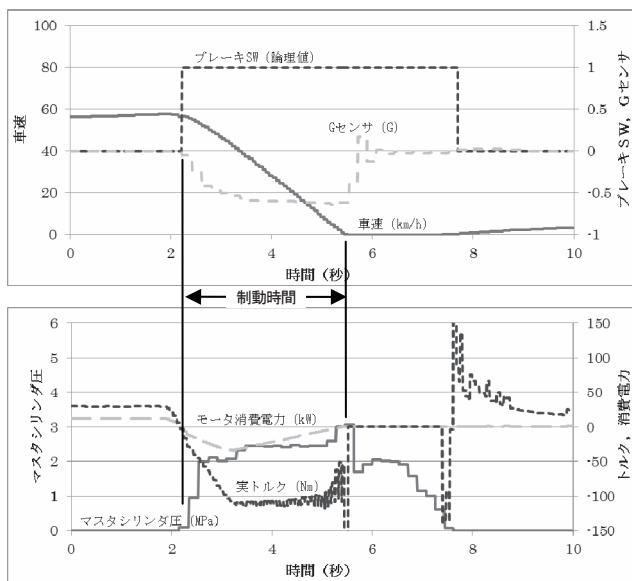


図7 新型, 摩擦ブレーキ優先
(初速=56.7km/h, 最大 G=-0.64G)

停止させているが、新型では②段階と変わりなく作動させている。これは回生電力量を増加させるための変更であるが、旧型に見られる ABS 作動待機状態への配慮には疑問が残る。そこで、①～③段階の実トルクの変化を詳細に観察すると、図3と図5では段階的に増加させていることに対し、図7では直線的に速やかに増加させた後は一定値を保っている。このことから、ABS 作動待機の方法として、回生ブレーキの実トルクをゼロではなく一定値にして、安全性と回生機能を両立したと推測される。以上から、図7にある新型の③段階のブレーキ作動は、旧型の②段階と同じ「摩擦ブレーキ優先作

動」と考えられる。

以上が新型車両のブレーキ作動パターンの分類結果であるが、この分類を通して新旧比較について検討すると、注目すべき点が多くみられる。

第一に、モータ消費電力すなわち回生電力を比較すると、図2と図3では旧型の方が勝るが、図4と図5、および図6と図7の比較では新型車両の方が勝る。つまり、弱いブレーキ操作では回生効率を下げているが、中～強程度のブレーキ操作では回生効率を上げている。これは、航続距離の伸長を目的とした変更であることは明らかであるが、次節において、さらに検討を加えることにする。

第二に、摩擦ブレーキを優先する中～強程度のブレーキ操作における回生ブレーキの作動に関して、新型車両では一定値の回生ブレーキの作動が実験データより認められている。一般的には、この段階のブレーキ操作では ABS 作動待機への配慮が必須であることから、回生ブレーキ作動させたまま ABS を安定作動させる制御が、実用に応え得る水準に達したと考えられる。

以上のように、回生協調ブレーキシステムは、ハードウェア的な変更は見られないが、ソフトウェア的には大規模な変更が加えられていることが明らかとなった。

4.2. 回生協調ブレーキの効果が得られる条件

回生協調ブレーキによる電費改善の効果は、制動時間における回生電力量で評価できる。ここで回生電力量とは、走行状態のグラフにおいて、モータ消費電力を制動開始から停車時までの範囲で積算した値である。本節では、全実験データにおいて回生電力量を集計し、前節で示した三種類の回生協調ブレーキ作動パターン別に回生電力量(kW 秒)を評価する。

まず、ブレーキ操作の強弱によりブレーキ作動パターンが変化する様子について確認を行った。最大 G に対する回生電力量の関係を、旧型車両は図8に、新型車両は図9に示す。

この結果より、三種類のブレーキ動作パターンを切替える閾値について旧型と新型ではあまり差が無いが、ブレーキ作動パターンの②段階(▲のプロット)と③段階(■のプロット)における回生電力量が新型では大幅にアップしていることが分かる。

このことから、電費を向上するためのブレーキ操作として、第2報では約-0.24G よりの弱いブレーキ操作が好ましいとしていたが、新型車両においてはブレーキ操作に配慮する必要は無いと結論づけられる。

次に、制動開始時の車速(以下、初速とする)に対する回生電力量の関係を、旧型車両は図10に、新型車両は図11に示す。この結果より、回生電力量の新旧比較において、ブレーキ作動パターンの①段階では旧型車両の方が回生電力量が大きい、②と③の段階では新型車両の方が大きいことが明らかとなった。このことから、急加速・急減速を頻繁に繰り返

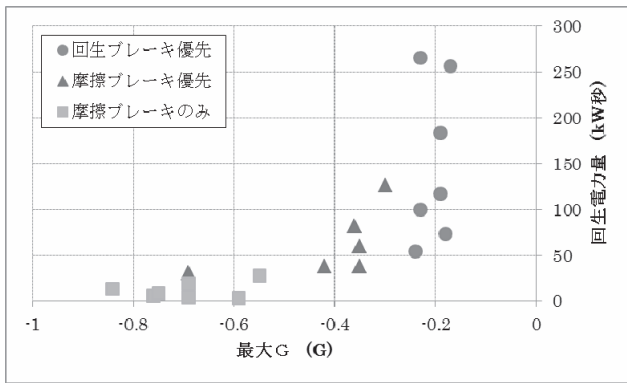


図 8 旧型, 最大減速度と回生電力量の関係

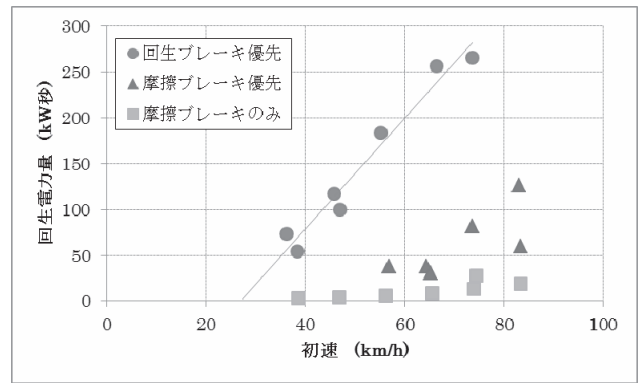


図 10 旧型, 制動時初速と回生電力量の関係

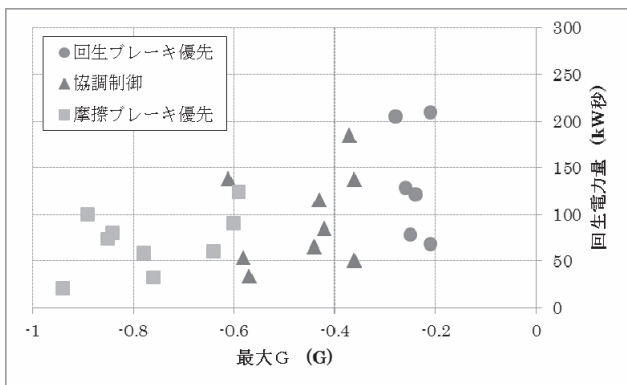


図 9 新型, 最大減速度と回生電力量の関係

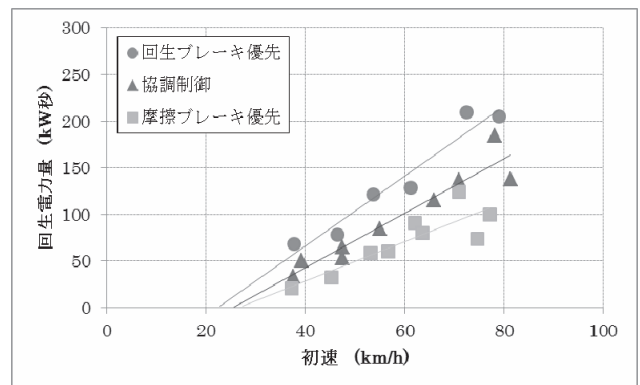


図 11 新型, 制動時初速と回生電力量の関係

返す都市部の走行において、電費向上が見込まれると考えられる。また、近似直線が回生電力量 0kW/h となる初速は殆んど変わっていない。初速が 30km/h 以下の実験を行っていないため、確かなことは分からないが、図 11 で近似直線からの判断では、低速における回生電力量については、新旧比較において変化なしと考えられる。

5. まとめ

本稿では、旧型と新型の実験車両において、回生協調ブレーキシステムの作動に着目し、より多くの電力が回収できるようなブレーキ操作の方法について、実験と検討を行った。

その結果、旧型車両では強いブレーキ操作で回生協調制御が中断されるため、電費の向上のためには、減速度が約-0.24G より弱いブレーキ操作が望ましかったが、新型車両ではブレーキ操作の配慮は不要と結論づけられた。

さらに新型車両では、ブレーキ操作が中～強程度のブレーキ操作における回生効率を上げており、急加速・急減速を頻繁に繰り返す都市部の走行において、電費の向上が見込まれると考えられる。

今後は、初速 30km/h 以下の低速時や、ABS が作動する条件下など、これまで取り扱わなかった領域での回生協調ブレーキの作動について検討を行っていきたい。

謝 辞

本研究の遂行にあたり「財団法人 東京自動車技術普及協会」の助成金を頂きましたことに感謝の意を表します。併せて、本研究の実験やデータ収集にあたり、ご協力を頂きました本学教職員の皆様にも、この場をお借りしてお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 日産自動車株式会社 編：新型車解説, LEAF ZE0 型 サービスマニュアル(CD-ROM), 東京, 日産自動車株式会社, 2010
- (2) 日産自動車株式会社 編：新型車解説, LEAF AZE0 型 サービスマニュアル, 東京, 日産自動車株式会社, 2012
- (3) 中尾誠治ほか：ブレーキ回生と制動感を両立させる電動型ブレーキシステムの開発, 日産技報 No.69・70, p.56-60 (2012)
- (4) 北原成倫ほか：電気自動車の使い勝手に関する実証研究 (第2報), 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第41号, p.11-16 (2012)