

電気自動車の使い勝手に関する実証研究 (第2報) *

北原 成倫¹⁾

市野瀬 和正²⁾

脇田 喜之³⁾

A Verification Study of The Effective Driving Condition of The EV in Daily Use (Part 2)

Masanori Kitahara

Kazumasa Ichinose

Yoshiyuki Wakita

On the production EV, it is important that the regeneration brake increases a cruising range. Therefore, we study the operation condition of the cooperation function between friction brake and regeneration brake. In this paper, physical data of the cooperation brake system are measured during deceleration at different initial vehicle speed, different brake pedal stroke. As a result, we obtained that the regeneration brake operates fully below -0.24G of deceleration. Additionally, it is confirmed that the regeneration power during deceleration is directly proportional to a initial vehicle speed of deceleration.

Key Words: Electric Vehicle, Cooperation Brake System, Regeneration Brake, Regeneration Power, Initial Vehicle Speed of Deceleration

1. はじめに

地球環境が問題となっている近年、内燃機関に替わる次世代自動車のパワーソースの候補として、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システムが量産車として登場している。しかしながら、現状の性能評価においては、航続距離の短さが指摘されており、充電インフラの整備と併せて課題となっている。

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、実証研究を行っている。

既報では、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。

本稿では第2報として、航続距離を延伸させる手段の一つとして回生協調ブレーキシステムに着目し、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。さらに、通常走行における検証として、登坂・降坂走行における検証実験を行った。

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、2012年までに全世界で販売予定であ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。実験車両の諸元は表1に示す。

表1 実験車両 諸元^{(1),(2)}

車名型式	日産 ZAA-ZE0
全長	4445 mm
全幅	1770 mm
全高	1545 mm
ホイールベース	2700 mm
車両総重量	1795 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

2-1. 回生協調ブレーキについて⁽¹⁾

航続距離を延伸させる手段の一つとして、減速時にモータによる発電によって電力を回収する回生ブレーキの活用が有効である。

図1に示すように、このブレーキシステムにより、従来の内燃機関車での制動時における車両の運動エネルギーを熱エ

*2012年8月 日受理。

*第44回全国自動車短期大学研究発表会において発表。

1)・2)・3) 新潟工業短期大学 自動車工業科

(950-2076 新潟県新潟市西区上新栄町5-13-7)

エネルギーとして消費させるのではなく、電気エネルギーとして回収することで、再度車両を駆動させるためのエネルギーとして利用することでエネルギーロスを大きく減らすことができる。

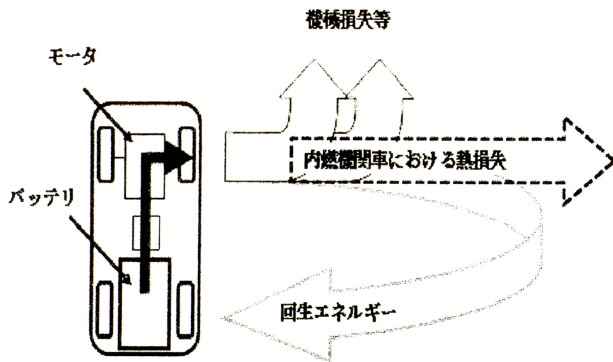


図1 エネルギーフロー⁽¹⁾

また、ドライバーがアクセルペダルから足を放している惰性走行時だけでなく、ドライバーのブレーキ操作による減速時にもエネルギーを回生することで、モーターやインバータ、バッテリーを最大限に利用することができる。

しかし、回生ブレーキだけでは車両の減速させるために十分な制動力を発生させることができないため、回生ブレーキと並行して、従来の摩擦ブレーキを使う必要がある。このため、回生ブレーキと摩擦ブレーキを協調制御することが重要となる。本車両では、電動型制御ブレーキがその役割を担っている。

2-2. 電動型制御ブレーキ^{(1),(2)}

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、ドライバーからの操作入力から摩擦ブレーキによる制動力と、駆動モーターによる回生ブレーキを協調制御する。モーター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2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、電気モーター、モーター回転の

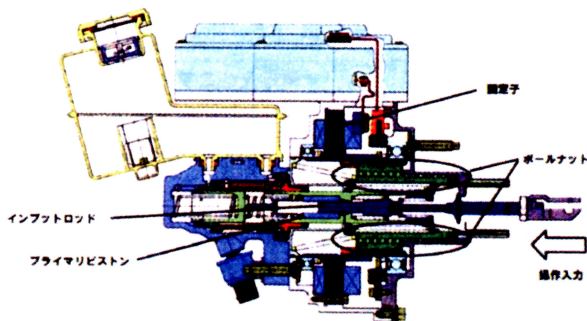


図2 油圧ユニットの内部構造⁽¹⁾

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ー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、駆動モーター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。

2-3. 回生ブレーキについて⁽³⁾

モーターの出力トルクと回転速度の関係を縦軸に回転速度、横軸に出力トルクとし、図3に示す。前進する場合には速度もトルクも正方向であり、モーターでは電気エネルギーを機械エネルギーに変換し駆動している。前進減速の場合には、モーターは機械エネルギーを電気エネルギーに変換して回生する。後進加速・減速についても駆動運転、と回生運転となる。このように、モーターの回転速度と出力トルクの両方が両極性となる運転を「四象限運転」と呼んでいる。

本報告においては、モーター消費電力が正の値の時を電動前進加速、負の値の時を回生前進減速として表すこととする。

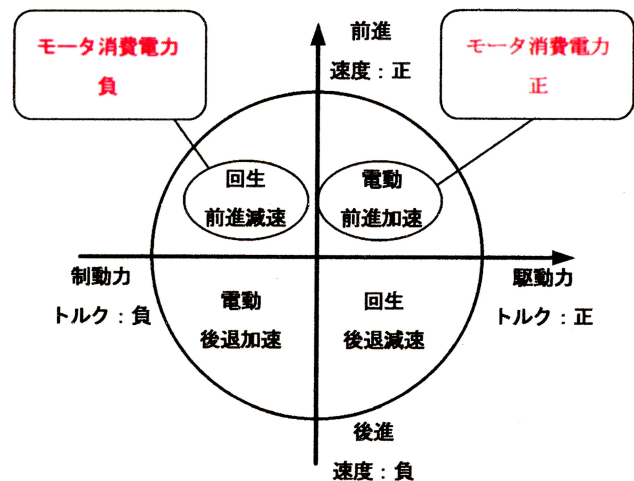


図3 四象限運転⁽³⁾

3. 実験方法

本報告では、電費に強い影響を与える減速時の回生電力量に着目し、様々な制動条件における回生電力量の変化について実験を行った。また、回生協調ブレーキの使い勝手を検証するために、実際に麓と山頂の間を往復し、登坂時および降坂時における消費電力量の増減を計測した。本節では、その方法の詳細を説明する。

3-1. 回生協調ブレーキ実験

まず、制動時における摩擦ブレーキと回生ブレーキの協調動作の状態と、回生電力量の関係を調査するために、次のような実験を行った。

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、強、中、弱の 3 段階に分けて測定を行い、その評価は実際の減速度によって表すこととした。

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）である。なお、1 回のブレーキ操作で得られる回生電力量は極めて少なく、バッテリー残量 (kWh) は全く変化しないため、回生電力量の評価は、モータ消費電力の時間積によって算出した。そのため、バッテリーの電力量は kWh (kW 時) であるが、回生電力量は kW 秒とした。

3-2. 登坂・降坂走行実験

次に、通常走行において、より効率的に回生を行うブレーキ操作の方法を検証するために、次のような実験を行った。

麓をスタート/ゴール地点、山頂を折返し地点とし、この区間の登坂時と降坂時の各々で走行状態を記録した。図 4 に測定コースを示す。GPS 情報による標高は、スタート/ゴール地点で 133m、折返し地点で 540m である。



図 4 登坂・降坂実験測定コース

主となる測定データは、3-1 回生協調ブレーキの制動実験と同一であるが、追加データとしてバッテリー残量 (kWh) を記録し、回生電力量の評価に用いた。

4. 実験結果

本実験で得られた大量の走行データは、各走行条件をよく反映しており非常に興味深い。より良い議論のため、走行データは典型的なデータのみを掲載し、その傾向を議論するに留める。そして走行データから評価量を集計したデータについて議論を行う。

4-1. 回生協調ブレーキ実験

実験で得られた走行データを整理すると、そのすべてが 3 種類の制動パターンに当てはまることが明らかとなった。制動パターンは回生協調制御の作動で区別され、①全制動時間に渡り制御が行われているケース、②制御が途中で中断されるケース、③最初から制御が作動しないケースである。図 5 から図 7 にそれぞれの典型的な走行データを示す。

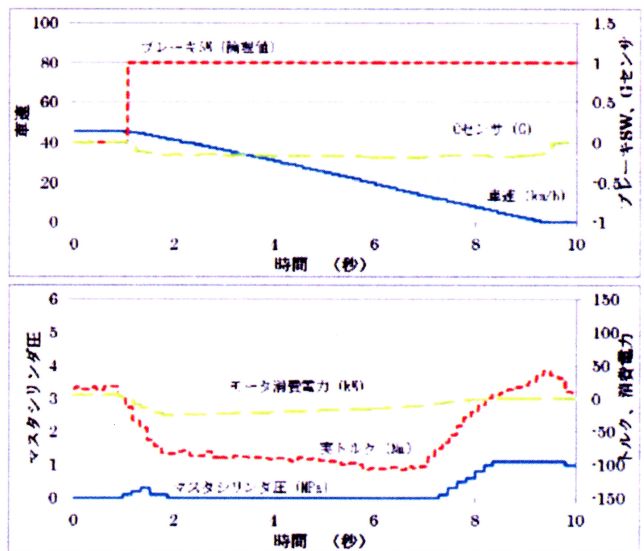


図 5 回生協調制御が行われている例
(初速=45.8km/h, 最大 G=-0.19G)

図 5 の回生協調制御が行われている例では、ブレーキペダルを踏むと、まずマスタシリンダ圧を上げてで速やかに摩擦ブレーキを作動させる。次に、遅れて回生ブレーキが作動を始めた（マイナスの実トルクが増大したら）、マスタシリンダ圧を下げて摩擦ブレーキを開放する。理論的には、車速が低下すると回生ブレーキの起電力も低下するため、バッテリーの充電可能限界を下回ると回生ブレーキが作動なくなることが予想される。そこで、車速が 15~10km/h 程度で、再びマスタシリンダ圧を上げて摩擦ブレーキを作動させると同時に、回生ブレーキの作動を停止させている。

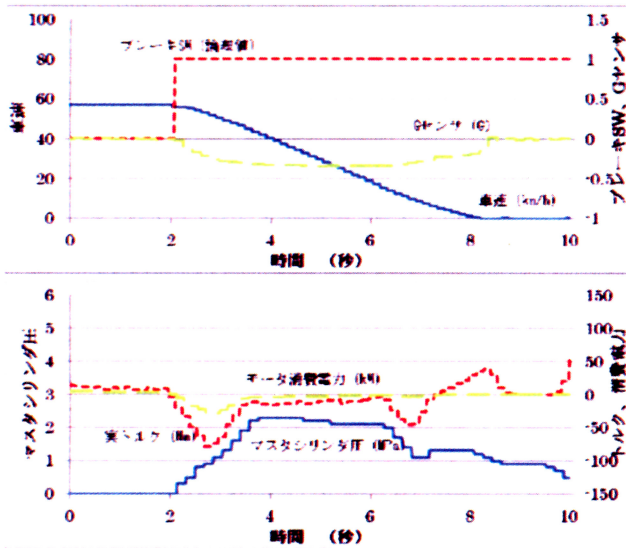


図6 回生協調制御が中断される例
(初速=56.8km/h, 最大G=-0.35G)

図6の回生協調制御が中断される例では、回生ブレーキが作動を開始しても、摩擦ブレーキのマスタシリンダ圧は上昇を続けている。これは、Gセンサの減速度が緩やかに増加していることから、目標の減速度に対して実際の減速度が不足しているものと考えられる。すなわち、電動型制御ブレーキのコントロールユニットが、回生ブレーキでは目標の減速度が得られないと判断し、マスタシリンダを倍力装置で加圧し続けると同時に、ABSの作動の可能性を踏まえて、ABS制御の妨げとなる回生ブレーキを停止していると考えられる。

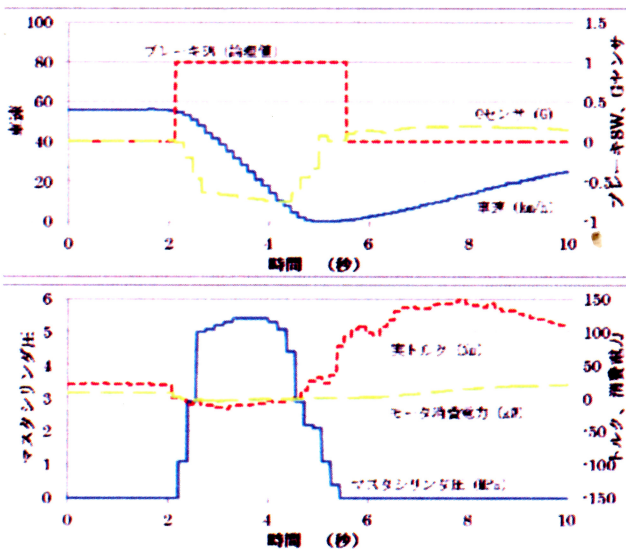


図7 回生協調制御が作動しない例
(初速=56.2km/h, 最大G=-0.76G)

図7の回生協調制御が作動しない例では、きわめて急なブレーキ操作をしており、-0.76Gもの減速度が得られている。この時、マスタシリンダ圧は極めて短時間で5MPaまで上昇

していることから、電動型制御ブレーキのインプットロッドが直接マスタシリンダを押して、回生協調制御を行えない状態になっていると考えられる。

なお、3つの制動パターンが切り換わる制動力の閾値については、次節の集計データにて報告する。

4-2. 回生協調ブレーキの効果が得られる条件

全測定データを3種類の制動パターンに当てはめ、制動パターン別に回生電力量 (kW 秒) を評価した。

まず、前節の検討において、目標の減速度に対して実際の減速度が到達しているか否かが、制動パターンを決定するとの事から、最大減速度と回生電力量の関係について集計を行った。図8にその結果を示す。

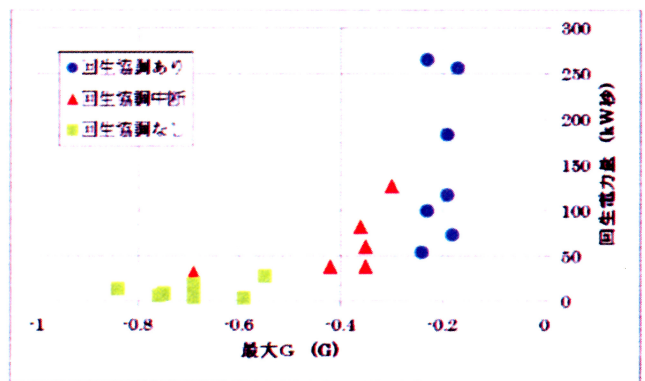


図8 最大減速度と回生電力量の関係

この結果より、回生協調制御が中断される閾値は-0.24Gから-3.0Gまでの間であり、それ以上の減速度となる強いブレーキ操作では、回生協調制御が中断されて回生電力量が大幅に低下することも明らかとなった。一方、回生協調制御が行われている減速度-0.24G以下では、最大減速度と回生電力量は相関が低く、ブレーキ操作の程度と回生電力量は無関係であることが分かった。

そこで、回生電力量を決定づける物理量は何であるかを検討するため、以下のような検討を行った。すなわち、発電機に入力される機械的エネルギーはトルクと回転数の積であることから、発電効率が一定のもとでは、発生電力は制動トルク (∝減速度) に比例すると考えられる。よって、電気的な関係式 (発生電力) × (制動時間) = (回生電力量) は、力学的な関係式 (減速度) × (制動時間) = (制動時初速) に置き換えることができ、回生電力量は制動時初速に比例すると結論付けられる。

そこで、制動時初速と回生電力量の関係について集計を行った。図9にその結果を示す。さらに、この結果の裏付けとして、①制動時間と回生電力量の関係 (最大減速度と同様に相関が低い)、②減速度と制動時間の積 (以下GT積と呼ぶ) と回生電力量の関係 (制動時初速と同様に相関が高い) につ

いても検証を行った。その結果を図 10、図 11 に示す。いずれも、回生電力量は制動時初速に比例することを裏付ける結果が得られた。

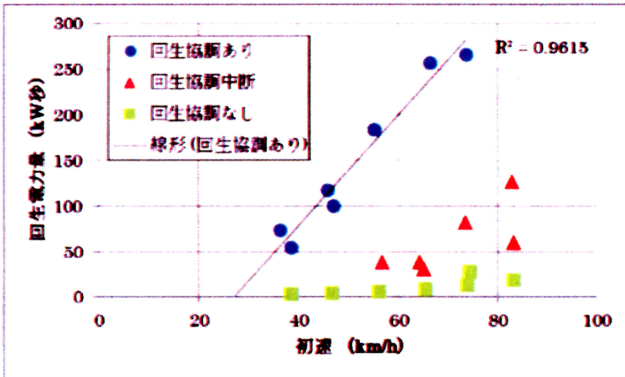


図 9 制動時初速と回生電力量の関係

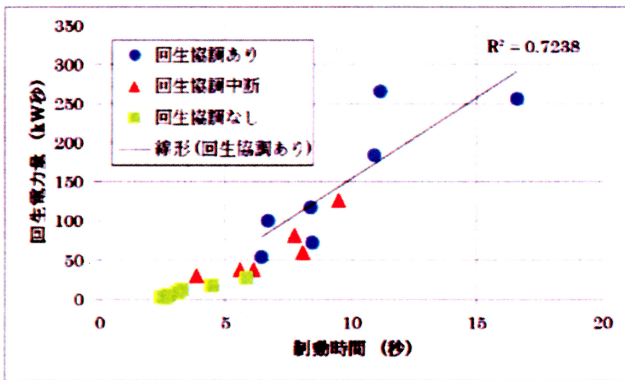


図 10 制動時間と回生電力量の関係

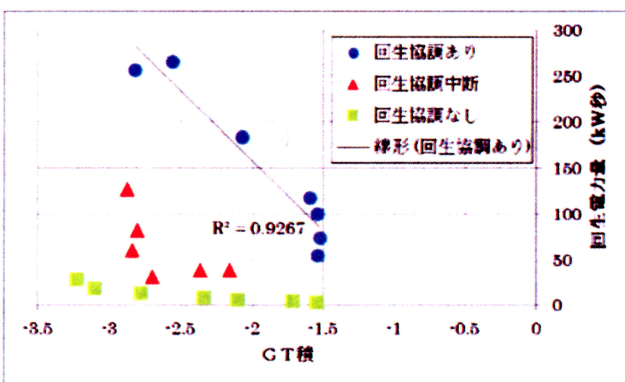


図 11 G T積と回生電力量の関係

以上の結果より、EVにおいてより効果的に回生を行うブレーキ操作とは、 $-0.24G$ を超えない減速を行うことであり、その範囲内であればブレーキの強さは関係ないと言える。併せて、 $-0.24G$ を超えないための心がけとして、十分な車間距離と早めのブレーキ操作で、急ブレーキが必要な状況にならな

いことが重要であり、これはガソリン車の燃費向上で言われている制動距離を長く心がける事と、議論の途中経過は異なるが、類似した結論につながる。

また、図 9 の線形近似直線を見ると、制動時初速 30km/h で回生電力量が 0kW 秒となることから、 30km/h 以下の制動時にはバッテリー充電を行えないことが明らかである。すなわち、信号機が多数設置された市街地でのストップ・アンド・ゴーの走行パターンでは、最高速度が低くなるため、回生による航続距離の延伸の効果が期待できないことが予想される。あるいは、今後の EV の改良においては、回生が限界となる制動時初速を 30km/h より引き下げるのが最も重要な技術的課題であるとも言える。

4.3. 登坂・降坂走行実験

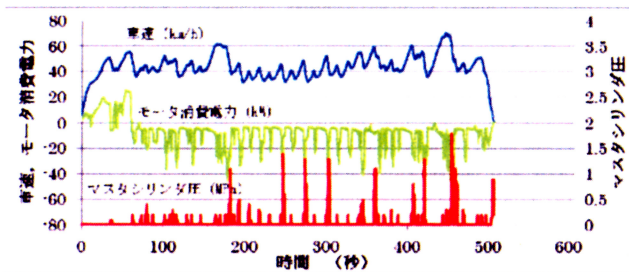
前節の結論を検証し、回生ブレーキによる効率の良い電力回収の方法について検討を行う。そのため、登坂・降坂走行実験では、降坂時のブレーキ操作について、2パターンの操作を行った。

第 1 に、大きなモータ消費電力を得ることを目的として、直線区間はノーブレーキで速度を上げ、カーブ直前で短時間の強いブレーキ操作を行った。降坂時の走行データを図 12 に示す。第 2 に、前節の結論に従い $0.24G$ を超えないブレーキ操作を目的として、直線区間もカーブも、長時間の弱いブレーキ操作を行った。降坂時の走行データを図 13 に示す。なお、この実験は電力を大量消費するため、走行回数は図に示した 4 回のみとなった。

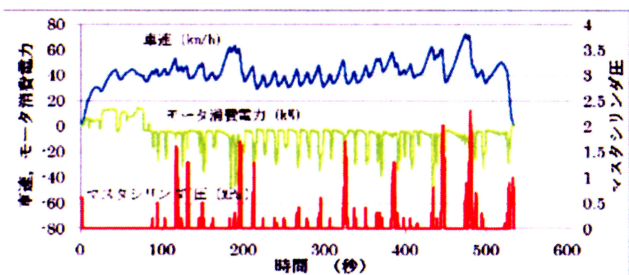
この結果からは、残念ながらブレーキ操作と回収電力の関連性について見出すことが出来なかった。その原因としては、以下の 2 つの理由が考えられる。

第一には、ブレーキ操作以外の回生制御による影響が考えられる。すなわち、第 1 のパターンのブレーキ操作では、降坂路の直線区間はノーブレーキで走行したが、この際も回生制御がおこなわれており、回生ブレーキよりも長時間にわたって作動していた。このため、回生ブレーキ操作の影響がわずかとなってしまったと考えられる。

第二には、バッテリーの充電状態（満充電に対するバッテリー残量率、State of Charge、以下 SOC と略す）による充電効率の変化の影響が考えられる。一般的に SOC が低下するにつれ、充電効率が向上すると言われている。すなわち、前述の回生協調ブレーキ実験では回収電力が小さいため各測定で SOC には差がなかったが、登坂・降坂走行実験ではバッテリーを大量消費するため、SOC が低く充電効率が良い 2 往復目の走行で良い結果が得られたと考えられる。また、短時間の強いブレーキ操作と、長時間の弱いブレーキ操作の走行データでは、SOC が異なるため、単純な比較ができない。

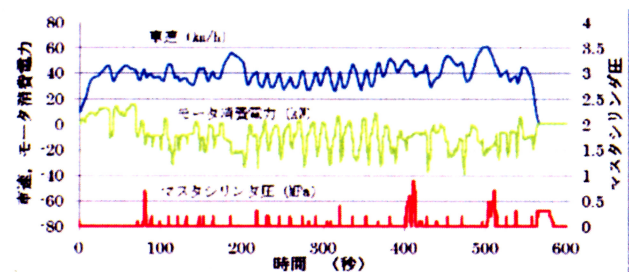


(1) 1往復目の降坂時走行データ，回収電力 640Wh
(ブレーキ率 36.0%，速度平均値 43.7km/h)

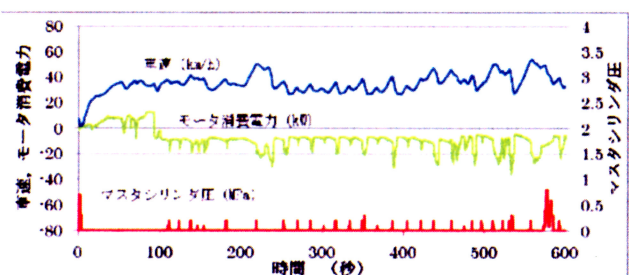


(2) 2往復目の降坂時走行データ，回収電力 1040Wh
(ブレーキ率 29.3%，速度平均値 41.6km/h)

図 12 短時間の強いブレーキ操作



(1) 1往復目の降坂時走行データ，回収電力 800Wh
(ブレーキ率 42.1%，速度平均値 39.0km/h)



(2) 2往復目の降坂時走行データ，回収電力 960Wh
(ブレーキ率 30.3%，速度平均値 35.0km/h)

図 13 長時間の弱いブレーキ操作

なお、本実験で行った長時間の弱いブレーキ操作は、摩擦ブレーキのみを持つガソリン車では推奨できない操作であるが、逆に、回生ブレーキを持つEV、HVには適した操作である。そして、その効果を究明することは燃費・電費の改善に繋がる重要なテーマであり、研究を継続していきたい。今後

は、各測定で車両状態、特にバッテリーの充電状態を同一条件にし、アクセルオフ・ノーブレーキ時の回生も評価に含めることで、より効率の良い電力回収を行う運転操作について評価検討を行う予定である。

5. まとめ

本稿では、航続距離を延伸させる手段の一つとして回生協調ブレーキシステムに着目し、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、強いブレーキ操作では回生協調制御が中断されるため、減速度が $-0.24G$ より弱いブレーキ操作が好ましいことが明らかとなった。また、回生電力量は制動時初速に比例し、 $-0.24G$ 以内であればブレーキ操作の強さに関係なく電力が回収されることが分かった。このことから、回生協調ブレーキシステムにおいても、十分な車間距離と早めのブレーキ操作が好ましいと結論付けられた。

さらに、実験結果では制動時初速が 30km/h 以下の場合には、回生による電力回収が期待できないことが分かった。今後のEVの発展においては、回生が限界となる制動時初速を引き下げる技術改良が重要課題であると結論付けられた。

また、通常走行において、より効率的に回生を行うブレーキ操作の検討として、登坂・降坂実験を行ったが、回生協調ブレーキ以外の回生制御の影響や、各測定時における車両状態の違いなどにより、有意義な結果は得られなかった。

今後は、回生協調ブレーキ時の電力回収だけでなく、アクセルオフ・ノーブレーキ時の回生制御における電力回収の実験も行い、より航続距離を延伸させる運転方法について検討を行っていききたい。

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) 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)
- (2) 日産自動車株式会社 編：新型車解説，LEAF ZEO 型 サービスマニュアル(CD-ROM)，東京，日産自動車株式会社，2010
- (3) 廣田幸嗣ほか編：電気自動車工学，第4章 駆動モータ，東京，森北出版，2011，p.76-106