

電気二重層キャパシタの電鉄応用 — キャパポストの車両走行試験 —

🔊 電気二重層キャパシタ，回生電力，電力貯蔵装置，省エネルギー

* 平松正宣 Masanobu Hiramatsu

概要

電車のブレーキの一種である回生ブレーキは，運動エネルギーを電気エネルギー（回生電力）に変換し，他の電気負荷へ供給するシステムである。回生電力を消費する負荷が無い場合，き電電圧が上昇し，回生ブレーキが動作できない回生失効が発生し，電車運転に支障が生じる。

この問題を解決するため，電気二重層キャパシタを用いた回生電力吸収装置（キャパポスト）を開発し，西武鉄道㈱に納入した。本格運用前の2008年3月，車両走行試験を行った。これにより，回生電力吸収装置が適用区間で有効に動作することを確認した。



キャパポスト外観

1. ま え が き

近年エネルギー問題や地球環境への意識が高まりつつある。鉄道システムでも効率化と経済性向上，CO₂排出量削減が望まれている。電車のブレーキの一種である回生ブレーキは，運動エネルギーを電気エネルギー（回生電力）に変換し，き電線へ返すものである。一方，電力貯蔵装置としての電気二重層キャパシタ（EDLC：Electric Double Layer Capacitor）は，急速充放電特性が良好で長寿命，重金属類を含まないなど，エネルギー貯蔵媒体として多くの特長を有する。そこで，電車のブレーキ使用時に生じる回生電力を，EDLCに充電し力行時に放電するキャパポストを採用することにより，鉄道システムを省エネルギー化できる。本稿では，装置の概要及び車両1編成と2編成での走行試験を行い，キャパポストを用いた効果を検

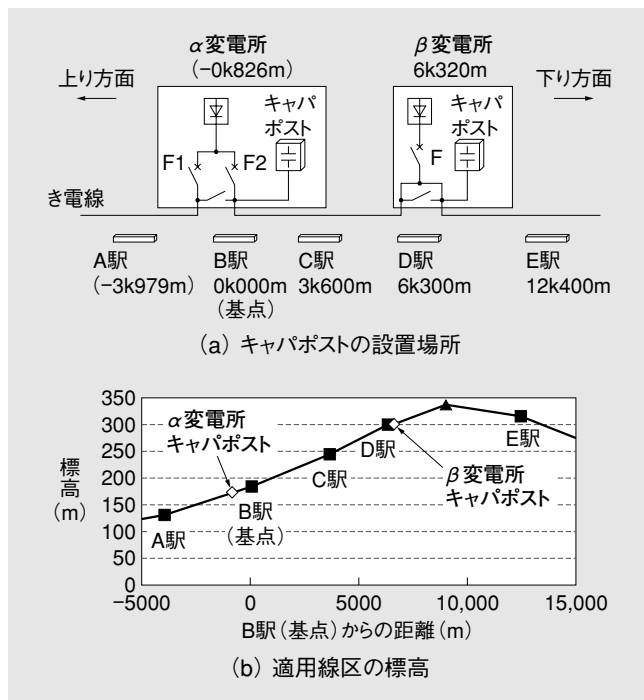
*基礎技術開発部

証したので，その結果について紹介する。

2. 適用線区

キャパポストは，第1図 (a) に示すように西武鉄道西武線の α 変電所と β 変電所の2か所（変電所定格3000kW）に新設された。第1図 (b) に各駅との距離や標高の関係を示す。この区間は単線区間であり最大8両編成の電車が通過する。

第1図に示すように，左側へ向かう場合は下り勾配でありD駅からA駅までは平均勾配が-10%以上であり，特にD駅からC駅を經由してB駅までに限っては，-25%以上の連続下り勾配である。この区間は単線区間である上，車両運転の間隔も長いので，回生機能付きの車両（回生車両）を走行させても車両間融通で回生電力を他の力行状態の車両に供給して消費させることが難しい。そのため，回生失効つまり回生電力の行き場がなく回



第1図 キャパポスの適用区間

(a)はキャパポストと適用線区駅との距離を示し、(b)は適用線区の標高と駅間距離を示す。

生ブレーキを中止し機械ブレーキなどに移行することが多くなる。そのことから、回生車両は走行車両本数が増加するイベント開催日などに限定して運用させていた。

この対策としてキャパポストを設置したものであり、力行状態の車両が存在しない場合でも回生電力をキャパポストが吸収して回生失効を防止できるため、回生車両の本格的な導入が可能となった。

3. キャパポスト概要

3.1 装置容量と主回路構成

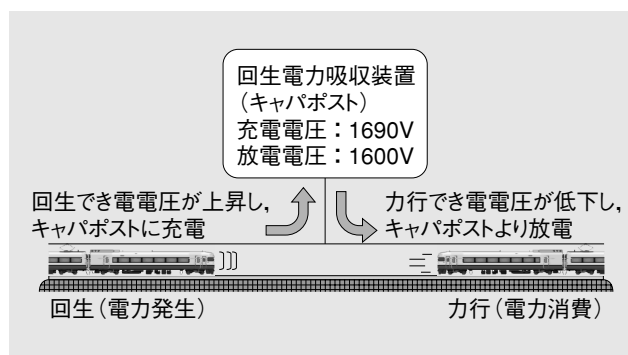
第1表に新設したキャパポストの定格を、第2図に動作イメージを、第3図に主回路構成を示す。ブレーキの動作には停止のための停止ブレーキと速度を調整する抑速ブレーキの2種があるが、EDLC容量はこの内の停止ブレーキ動作を8両1編成が行う場合の推定回生電力量よりも大きくなるように選定した。下り勾配では速度を調整する抑速ブレーキ動作による回生電力が加わり、EDLCが満充電になる。そこで、満充電に近くなるとEDLCと抵抗器との併用で電力を吸収することにより、回生失効を防止している。

充放電制御はチョップで行い、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子を採用した。EDLC

第1表 キャパポスト定格

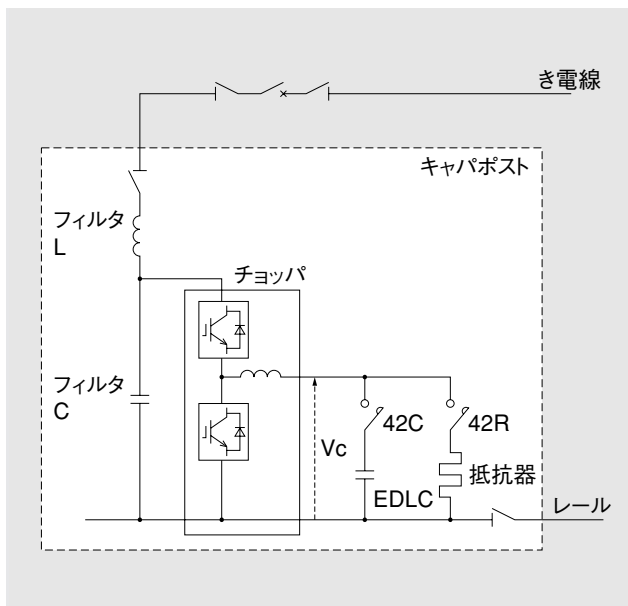
西武鉄道(株)に納めたキャパポストの定格を示す。

電気二重層 キャパシタ	使用電圧範囲	512~1280V
	最大電流	2000A
	静電容量	20.25F
昇降圧 チョップ	充電電圧	1690V
	放電電圧	1600V
	電力量	24.75MW・s



第2図 キャパポストの動作イメージ

キャパポストが回生吸収のための充電開始電圧が1690Vであることと、放電開始電圧は1600Vであることを示す。



第3図 キャパポスト主回路構成図

キャパポストの主回路を示す。

部には160V - 4.5FのMEICAP 600S1形を288ユニット (8直列36並列) 使用している。EDLC部の最大充放電電流は2000Aであり、き電線 (1500V) とキャパポスト間の最大充放電電流は1500Aである。

3.2 装置の制御動作

この装置はき電線との間で以下のような充放電動作を行っている。



(1) き電線の電圧を監視しており、電圧が上昇した時には回生電力をEDLCに充電し、電圧が低下した場合には逆に放電する。

(2) 充電中にEDLCが満充電状態に近づき、EDLC電圧 V_c が1200Vに達すると、マグネットスイッチ42RをONにして、EDLCと並列に抵抗器を接続しながら回生電力を吸収する。回生終了を検出すると42RをOFFさせ抵抗器を切り離す。

(3) (2)の並列抵抗接続状態でもEDLCの充電が進み電圧 V_c が1250Vを超えた場合には、42CをOFFしてEDLCを開放し、抵抗器のみで回生電力を吸収させる。しかし回生が終了すると、EDLCから抵抗器への放電を抑えるため、42RをOFFさせ抵抗器を切り離れた後、次の充放電に備えるため42CをONさせている。この抵抗器は20秒間の連続通電が可能ないように選定した。

4. 走行試験

4.1 走行試験の条件

営業運転後の深夜に、最大編成である8両編成の試験車両を用いて試験を行った⁽¹⁾⁽²⁾。この8両の試験車の内、モータを搭載しているのは6両である。この試験条件は、試験車両以外に負荷が無いいため回生電力によりき電電圧が上昇しやすく、回生失効になりやすい。

第4図に1編成のみで各駅での停車・発車運転を行った場合の時間経過を示す。第5図は2編成での走行パターンであり、交差運転試験をB駅とD駅とで行った場合を示す。

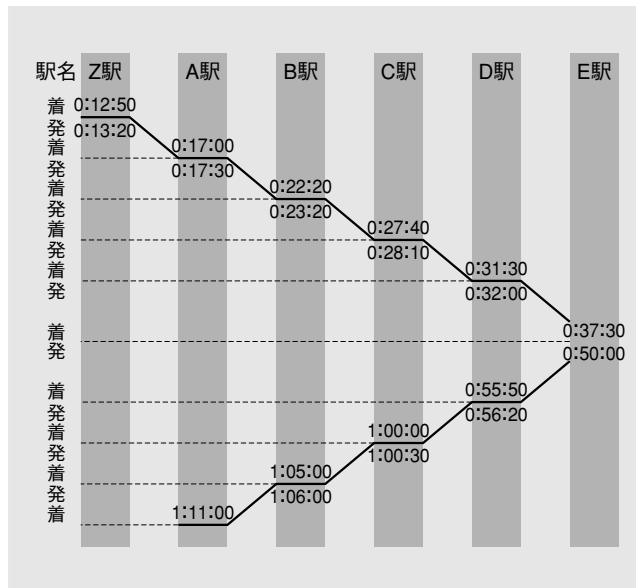
第4図と第5図の試験結果から、今回は第2表のようなパターンにつ

いて紹介する。1編成についてはパターン1と2のようなD駅付近の上りと下りの勾配条件及びパターン4の全区間の3種類を示し、2編成についてはパターン3のD駅での交差運転とパターン5の全区間運転の2種類を示す。第2表の上段のパターン1~3はD駅付近に限定したものであり、下段のパターン4・5は全区間で計測したものである。

4.2 D駅付近での停車・発車試験

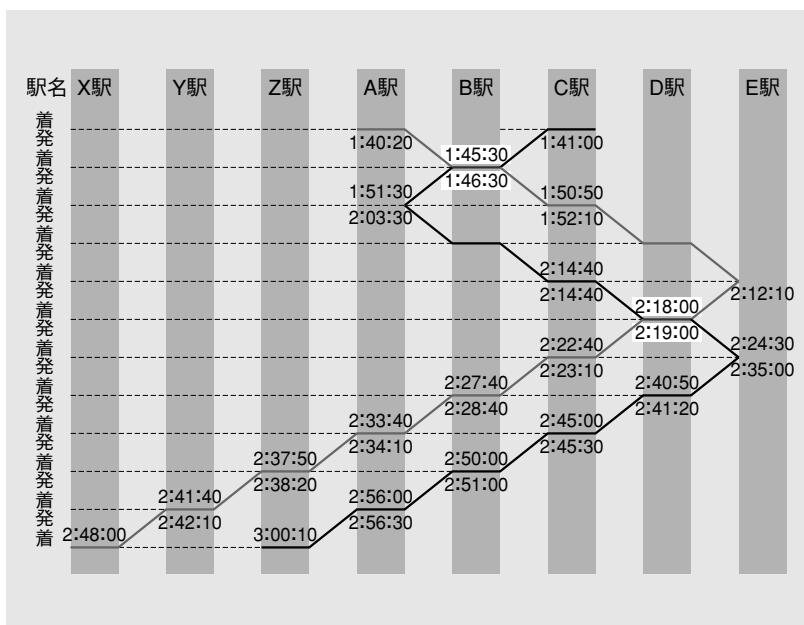
4.2.1 1編成D駅付近上り勾配 (パターン1)

第6図(a)にD駅において1編成を上り勾配方向



第4図 1編成走行パターン

1編成での走行試験。各駅停車時間・発車時間を示す。



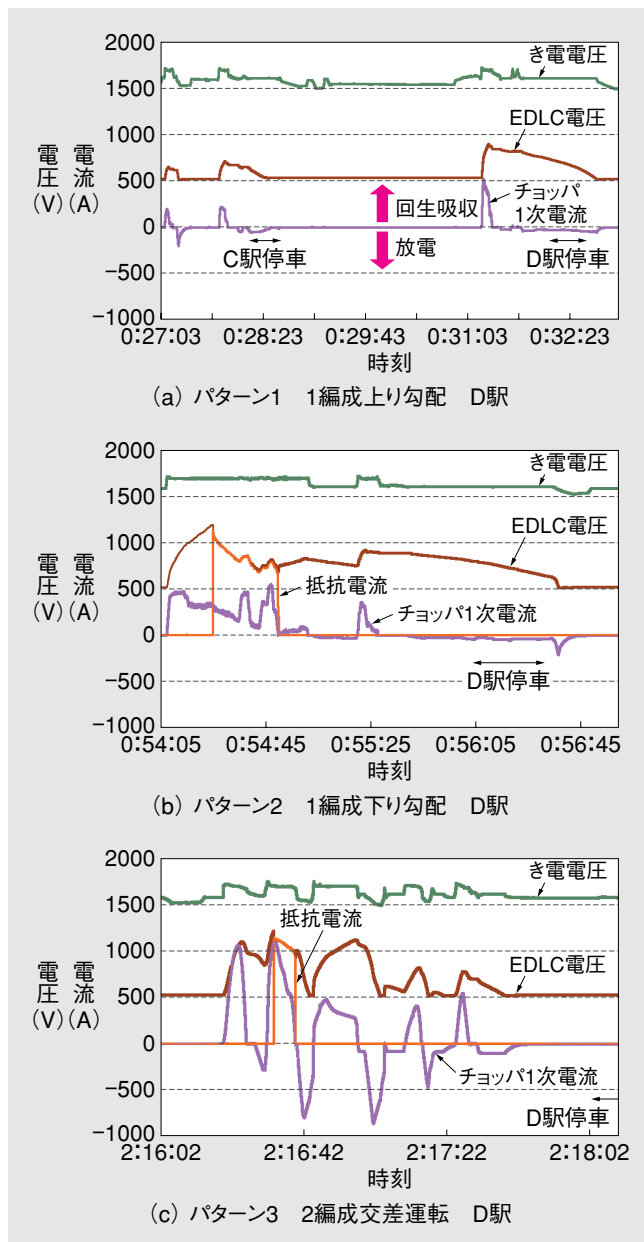
第5図 2編成走行パターン

2編成での各駅停車・発車時間を示す。2編成交差ははじめにB駅で行い、次いでD駅で行っていることを示す。

第2表 走行パターン一覧

試験結果への分析を行った走行パターンの一覧を示す。パターン1~3は、D駅での停車・発車について注目したものである。パターン4は1編成走行全体、パターン5は2編成走行全体について注目したものである。

	条件	特徴
パターン1	1編成上り勾配 D駅	力行支配的、回生少ない
パターン2	1編成下り勾配 D駅	回生支配的
パターン3	2編成交差運転 D駅	車両間で電力融通有
パターン4	1編成全区間	回生電力融通無
パターン5	2編成全区間	車両間で電力融通有



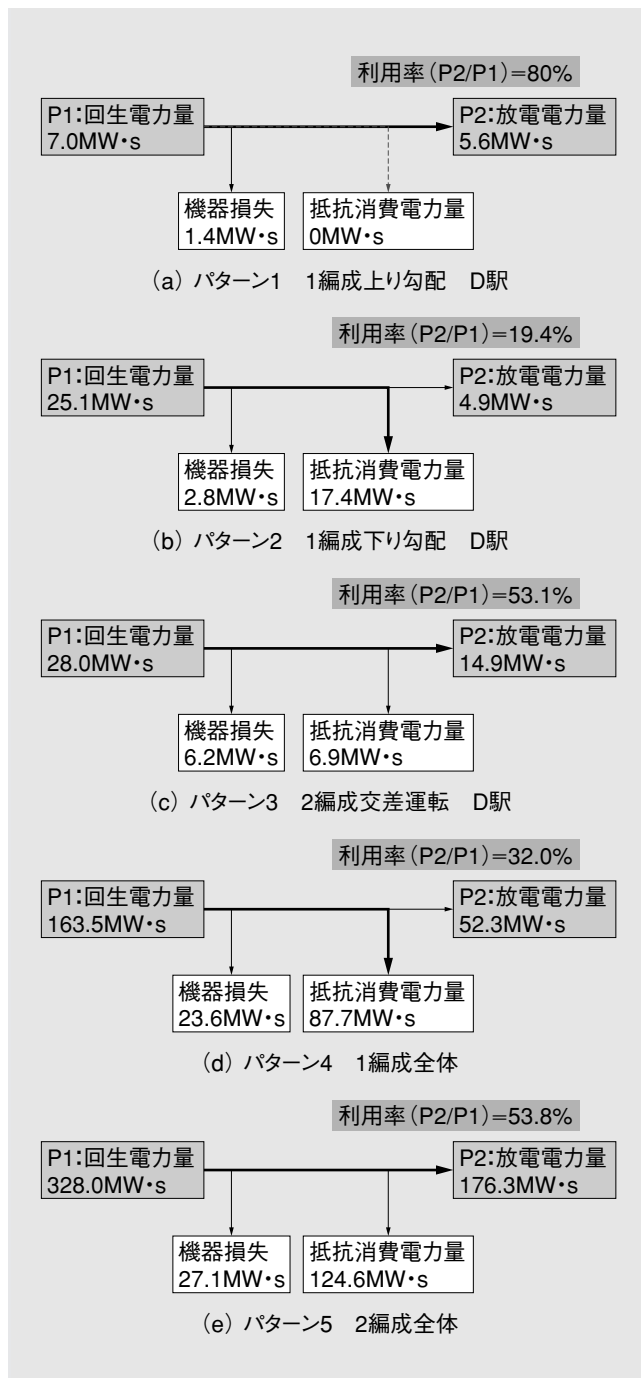
第6図 キャパポスト電圧・電流波形

最上段のき電線の電圧が上昇しないように、充放電している。電流は系の上側がき電からの回生吸収，下側がき電への放電を示す。

に停車及び発車をさせた場合のβ変電所における試験結果を示す。上り勾配なので回生ブレーキは停止ブレーキのみとなる。そのためチョップパ一次電流の充電電流は少なく、EDLCの電圧上昇も少ないためEDLCのみで回生電力を充電している。第7図(a)にこの計測期間の電力量フローを示す。キャパポストが充電した回生電力量のうち、き電線へ放電できた電力量を利用率とすると、80%の利用率となり、理論値とほぼ一致する良い結果となった。

4.2.2 1編成D駅付近下り勾配 (パターン2)

第6図(b)では回生車両1編成を下り勾配でD駅



第7図 キャパポストの回生電力量フロー

第2表の運転パターン1~5で、キャパポストが吸収した回生電力量の移動フローを示す。

停車・発車させた。急な下り勾配であるため抑速ブレーキによる回生電力が多い条件である。そのため、当初はEDLCで充電しているが、途中から抵抗器と並列に接続された状態で充電している。回生電力量が多く、他に回生電力を消費する負荷も無いという最悪条件であるため、き電電圧の高い状態が長く続く。抵抗器の接続期間も長く、回生電力の多くを抵抗器で消費しているため第7図(b)のように利用率は19.4%と悪くなった。



4.2.3 2編成D駅での交差運転 (パターン3)

第6図(c)は回生車両2編成をD駅で交差運転させたものである。この場合もう1編成の車両が回生電力を消費する負荷となる。つまり編成間で電力の融通が行われる。このため、キャパポストの放電機会が多くなり、EDLCと抵抗器が並列に接続された状態で充電する期間は第6図(b)より短くなる。その結果、このパターンでは第7図(c)のように利用率が53.1%とパターン2より大幅に改善した。

4.3 全区間での運転試験

第7図(d)と(e)に全区間運転した時の回生電力量の利用率を調べたものを示す。(d)は1編成で第4図のように全区間を往復した場合(パターン4)であり、(e)は2編成で第5図のように交差運転した場合(パターン5)である。

4.3.1 1編成での全区間走行試験 (パターン4)

1編成で全区間を運転した場合は、第7図(d)のように、下り勾配が連続し回生ブレーキを多用している区間ではキャパポストが吸収した回生電力の放電機会が少なく、抵抗器で消費されている電力量が多い。そのため利用率も32%となった。

4.3.2 2編成の全区間成走行試験 (パターン5)

回生車両を2編成で運転すると第7図(e)のように、キャパポストが吸収した電力量は1編成に比べおおよそ2倍になった。また、1編成でEDLCが満充電となっていた下り勾配の回生ブレーキを多用する区間でも、もう1編成側が負荷となる場合があるため、利用率は53.8%とパターン4より改善された。

4.4 試験結果のまとめ

第2表の走行パターンでの試験結果である第7図から、回生吸収電力量と利用率をまとめたものが第3表である。

キャパシタ容量を1編成が平坦な条件で停止ブレーキを行う場合の回生電力量を基準に選定しているため、第3表より、パターン1のように1編成で且つ上り勾配であれば、想定したようにEDLCのみで停止時の回生エネルギーを吸収及び放電することができている。

更に第6図に示したように、パターン2や3のような下り勾配で抑速ブレーキによる回生が連続した場合でも、抵抗器を併用すれば回生失効に至らないことも確認できた。また、ブレーキが長時間

第3表 走行試験まとめ

第2表のパターンごとのキャパポストの回生吸収した電力量と利用率を示す。

	条件	特徴	回生吸収 (MW・s)	利用率 (%)
パターン1	1編成上り勾配 D駅	力分支配的、回生少ない	7.0	80.0
パターン2	1編成下り勾配 D駅	回生支配的	25.1	19.4
パターン3	2編成交差運転 D駅	車両間で電力融通有	28.0	53.1
パターン4	1編成全区間	回生電力融通無	164.9	32.0
パターン5	2編成全区間	車両間で電力融通有	328.0	53.8

動作する条件では利用率が低下しているが、編成数を増やすとEDLCからの放電機会が増えるため利用率が改善できることも判明した。

5. む す び

今回は実車両による試験を行って、試験車両が1編成と2編成の場合において電力貯蔵装置が適用線区で有効に機能すること、及び回生失効を抑制できることを確認した。今回納入したものは、停止ブレーキ時の回生吸収を重視した装置であったが、今後は電圧補償を重視した装置など他のシリーズを充実させ、鉄道事業者の要望に応じていく所存である。

最後に本装置製作・試験にあたり、ご指導・ご協力いただいた多くの関係者のみなさまに深く感謝の意を表する次第である。

《参考文献》

- (1) 本田ほか：「直流電気鉄道の電力回生エネルギー吸収用キャパポストの適用」, 平成20年電気学会全国大会講演論文集, Vol.5, No.5~55, 2008, pp.87~88
- (2) 平松ほか：「直流電気鉄道のための電力貯蔵装置車両走行試験」, 平成20年電気学会産業応用部門大会, Vol.3, No.3~44, 2008, pp.277~280

《執筆者紹介》



平松正宣 Masanobu Hiramatsu
電力変換装置の開発に従事