

## 回生電力の有効活用を目的としたき電電圧変更による検証試験

吉永 孝\* 齊藤 里香 西 健太郎 井上 佳祐 長谷川 隆英  
青木 稔 井口 敬介 (東日本旅客鉄道株式会社)

Verification test by changing feeding voltage for the purpose of effective utilization of regenerative energy  
Takashi Yoshinaga\*, Rika Saito, Kentaro Nishi, Keisuke Inoue, Takahide Hasegawa,  
Minoru Aoki, Keisuke Iguchi (East Japan Railway Company)

On the DC electric railway, when a train brakes, regenerative energy is interchanged to power running trains nearby. However, when there is no power running trains nearby, the restriction of regenerative braking is controlled to suppress regenerative energy in order to prevent overvoltage of the overhead contact line. Therefore, further energy saving is expected by effectively utilizing this suppressed regenerative energy. In this study, we perform the field test by lowering the feeding voltage of DC substation, and report the results of verifying energy saving effect and influence of train acceleration.

キーワード：回生電力，直流電気鉄道，回生絞り込み，き電電圧，変電所，省エネルギー，列車の加速  
(regenerative energy, DC electric railway, restriction of regenerative braking, feeding voltage, substation, energy saving, train acceleration)

### 1. はじめに

JR 東日本では、鉄道事業にかかわるエネルギー使用量のうち、列車運転用のエネルギーが約 8 割を占める<sup>(1)</sup>。さらなる省エネルギー化を図るためには、この列車運転用のエネルギー削減が効果的であり、これまで回生電力の利活用の一環として、電力貯蔵装置や回生インバータを一部の箇所へ導入する取り組みを行ってきた<sup>(2)</sup>。現在では、直流変電所（以下、変電所若しくは SS）の直流母線電圧（以下、き電電圧）を低く変更し回生絞り込み量を低減させることで、エネルギー削減を図る検討を行っている<sup>(3)</sup>。しかし、き電電圧を低くすることで、列車の加速力の低下やき電損失の増加などの影響が考えられることから、多角的に分析を行う必要がある。

そこで本研究において、き電電圧を低く変更した現地試験を実施し、変電所および車両のデータ取得を実施した。本稿では、エネルギー削減効果および列車の加速への影響を検証した結果について報告する。

### 2. 回生電力の融通と回生絞り込み

車両のブレーキ時に発生する回生電力は、回生電力を発生する車両（以下、回生車両）にて架線電圧を上昇させることで、付近の力行する車両（以下、力行車両）へ電車線路を通じて融通される。一方で、直流電化区間では変電所に設置されているダイオード整流器によって受電側へ逆潮流しない

ため、回生車両の付近に力行車両の走行がない状況では、車両および電車線路の電圧が上昇し続けてしまう。そこで、車両および電車線路の過電圧を防止するため、車両側では架線電圧が一定の値（以下、回生絞り込み開始電圧）に達すると、回生電力を抑制する回生絞り込み制御を行っている。

この回生絞り込み制御が動作すると、不足したブレーキ力を発電・機械ブレーキにより補い、本来発生できる回生電力が熱として消費されてしまう。したがって、回生絞り込み制御を低減することができれば、さらなる省エネルギー化を見込める可能性がある。その手段の 1 つとして、図 1 のようにき電電圧を低く変更することで、回生絞り込み量を低減させる方法が挙げられる<sup>(4)</sup>。

そこで本研究では、き電電圧を変更した現地試験を実施し、エネルギー削減効果の検証のほか、き電電圧の低下により影響する列車の加速についても検証を行った。

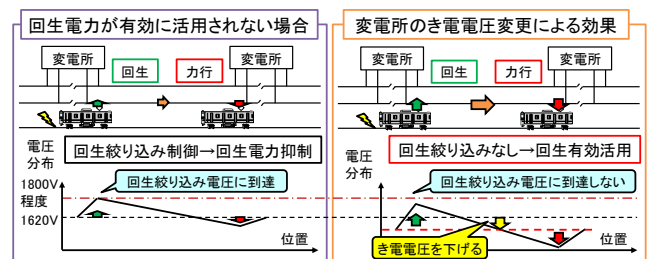


図 1 回生絞り込みとき電電圧変更

Fig. 1. Restriction of regenerative braking and feeding voltage change

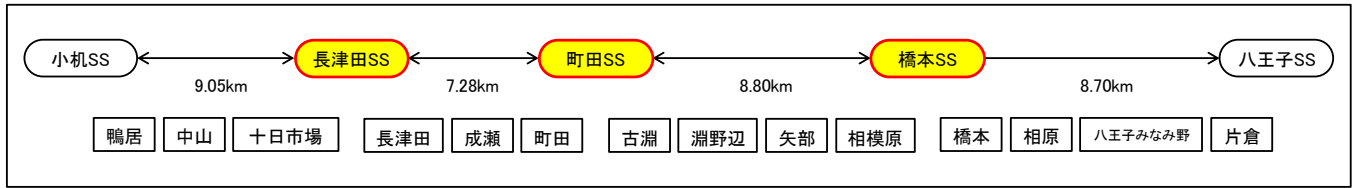


図 2 横浜線における変電所の位置  
Fig. 2. Substation location on the Yokohama Line

表 1 各変電所における試験前後での無負荷電圧

Table 1. No-load voltage before and after the test at each substation

変電所名	電圧変更	無負荷電圧			電圧変動率
		変更前	変更後	増減	
小机SS		1627V	1627V	±0V	6%
長津田SS	○	1590V	1555V	-35V	6%
町田SS	○	1620V	1584V	-36V	8%
橋本SS	○	1620V	1602V	-18V	8%
八王子SS		1697V	1697V	±0V	8%

3. き電電圧変更による検証試験の概要

本研究における検証試験では、図 2 に示す横浜線の長津田 SS、町田 SS、橋本 SS のき電電圧を変更して実施した。き電電圧変更の方法として、各変電所における固定タップ式の特高変圧器を 1 タップ変更して実施し、表 1 に示す電圧へ変化させた。検証範囲は、変更したき電電圧が影響する範囲までとするため、タップ変更を行った変電所から隣接変電所までとし、「小机 SS (長津田方面のみ) ~長津田 SS ~町田 SS~橋本 SS (相模線方面、電留線除く) ~八王子 SS (橋本方面のみ)」とした。

本試験では、変電所と車両のそれぞれのデータを取得し、変電所のデータからは、き電電圧の変更前後における消費電力量の変化について評価を行い、車両側のデータからは、回生絞り込み量と加速について評価を行った。

4. エネルギー削減効果の評価

〈4・1〉 回生絞り込み量の評価 まず、き電電圧の変更前後における回生絞り込み量の変化について検証を行った。横浜線 E233 系は回生絞り込み量を直接取得できないため、実測した車両のブレーキ・速度・乗車率情報等から回生絞り込み量を推定する演算を行うこととした<sup>(5)</sup>。回生ブレーキのトルク低下量を  $F'$ 、列車速度を  $v$  とした演算式は(1)式による。

$$\text{回生絞り込み量} = \int F' \times v \, dt \dots\dots\dots(1)$$

回生絞り込み量は、上下線別に駅間毎で演算して平均化し、変電所区間毎に合算した。活用した車両の運転記録データは、き電電圧変更前では 2022 年 4 月の平日昼間帯 (9~11 時) の 5 行路、変更後では 2022 年 5 月の平日昼間帯 (9~11

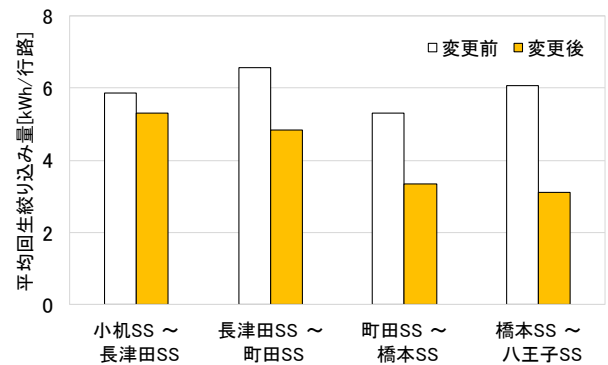


図 3 回生絞り込み量に関する検証結果 (上り線)

Fig. 3. Verification result in restriction amount of regenerative braking (Up line)

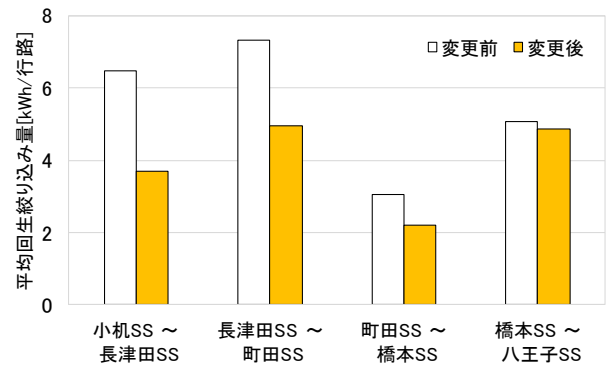


図 4 回生絞り込み量に関する検証結果 (下り線)

Fig. 4. Verification result in restriction amount of regenerative braking (Down line)

時) の 2 行路とした。き電電圧の変更前後において比較検証した結果を図 3、図 4 に示す。

電圧変更前と比較し、き電電圧を低くした全ての変電所区間において、回生絞り込み量が低減した。これは、き電電圧が低くなったことで、回生絞り込み開始電圧に到達しにくくなったためである。一方で、回生絞り込み量の大きさは、回生車両と力行車両の位置やタイミングによって大きく影響するため、今後多くのサンプルデータを取得して検証していく必要がある。

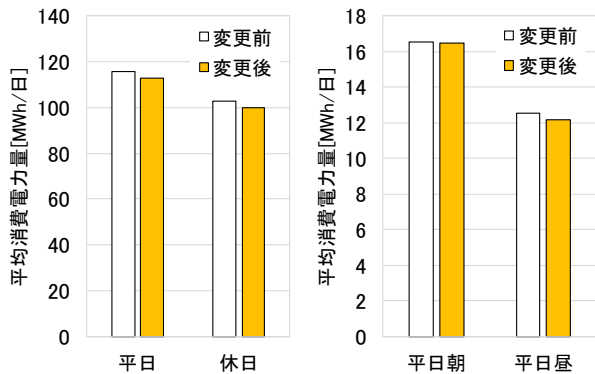


図 5 変電所の消費電力量に関する検証結果

Fig. 5. Verification results of substation power consumption

〈4・2〉 変電所における消費電力量の評価 次に、き電電圧を低くしたことで電損失の増加などの影響が考えられることから、全体としてのエネルギー削減効果について評価するため、変電所の消費電力量について比較検証した。変電所の消費電力量は、検証範囲における各変電所の消費電力量のデータを合算して平均化し、き電電圧変更前では 2022 年 4 月の平日および休日の各 5 日間、変更後では 2022 年 5 月の平日 2 日間、休日 1 日間のデータを活用した。き電電圧の変更前後において比較検証した結果を図 5 に示す。なお、2021 年度における 4 月と 5 月の変電所の消費電力量を確認したところ、大きな差は無かった。

図 5 の結果より、き電電圧を低くしたことで平日休日共に 3MWh/日程度の消費電力量が低減したことを確認できた。また、朝ラッシュ帯 (7~9 時)、昼間帯 (9~11 時) の時間帯別の検証においても、双方で消費電力量が低減し、特に昼間時間帯で低減量が大きいことがわかった。以上のことから、き電損失などの増加分よりも回生電力量の増加分が勝り、結果として全体のエネルギー削減効果が得られたものと考えられる。

## 5. 列車の加速への影響の評価

〈5・1〉 電圧に対する加速の影響 車両における力行制御特性は、定トルク領域、定電力領域、特性領域の 3 つの領域からなる。車両のトルクと電圧の関係は、図 6 に示すように、標準電圧 1500V を基準としてトルク制御ができる領域の範囲が変化する<sup>6)</sup>。

例えば、電圧が低い場合には、定トルク領域から定電力領域、特性領域へ移行する周波数が低くなるため、結果として高速域でのトルクが低下し、加速に影響することが考えられる。そこで、本試験ではき電電圧の変更前後における加速時間を比較検証することで、列車の加速への影響について評価を行った。

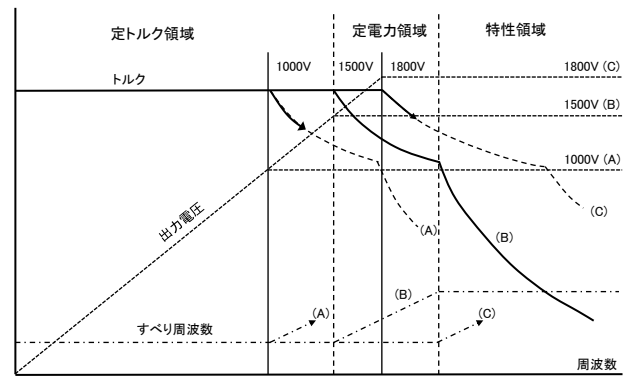


図 6 架線電圧変動と力行制御特性 (参考文献(6)より)

Fig. 6. Verification results of substation power consumption

〈5・2〉 加速の評価 加速の評価では、車両の運転記録データを用いてき電電圧の変更前後における加速時間の比較検証を行う。活用したデータは、き電電圧変更前では 2022 年 4 月の平日 5 行路、変更後では 2022 年 5 月の平日 3 行路とした。しかし、活用するそれぞれのデータは、各運転士の操作の影響で、ノッチオンやノッチオフのタイミング、ノッチ数が異なることから、比較検証するうえでの条件を以下の通り設定した。なお、比較検証した各列車の乗車率を確認したところ、大きな差はなかった。

(1) 駅間毎に複数の運転記録データを平均化し、同一駅間で比較する。

(2) 加速中のノッチ数は同一の条件とする。加速中にノッチ数が変化した場合などは除外する。

(3) 評価する速度は、より多くのデータを平均化するため、平均化するデータのうち、ノッチオフ速度が最も低い速度を設定する。

加速開始時 (0km/h) から設定した速度までの加速時間結果について、朝ラッシュ帯 (7~9 時) における上下線別の結果を図 7、図 8 に示す。き電電圧変更前に対するき電電圧変更後の加速時間の増減量を確認したところ、上り線 (図 7) では、「鴨居→小机」間で最大 2.8 秒増加、全ての平均で 0.4 秒増加していることがわかった。また、下り線 (図 8) では、「相模原→橋本」間で最大 2.5 秒増加、全ての平均で 0.9 秒増加していることがわかった。

これは、車両のパンタ点電圧が低くなったことによって、定電力領域および特性領域でのトルク (加速力) が低下し、加速時間が増加したと考えられる。また、上り線より下り線の方で平均の加速時間が増加した要因としては、図 9 に示すように、下り線での走行では上りの連続勾配が続くため、ノッチオフ速度が高かったことや、電圧降下がより大きかったことによる影響であると考えられる。

以上のことから、列車の加速への影響を評価した結果、き電電圧を低くしたことで、車両における力行制御特性により、僅かながら加速時間が増加していることがわかった。

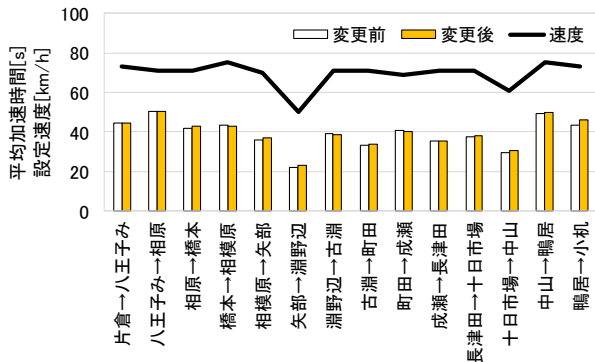


図 7 加速時間に関する検証結果 (上り線)

Fig. 7. Verification results of acceleration time (Up line)

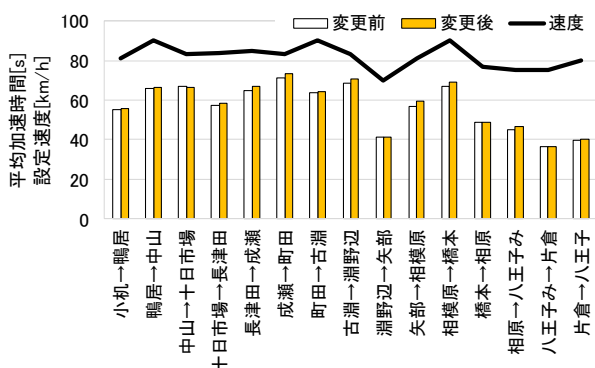


図 8 加速時間に関する検証結果 (下り線)

Fig. 8. Verification results of acceleration time (Down line)

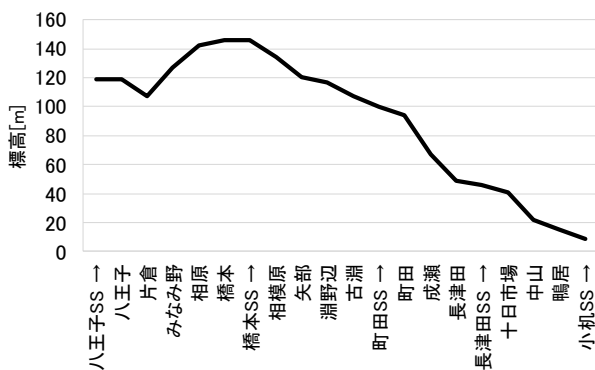


図 9 横浜線における標高

Fig. 9. Elevation on the Yokohama Line

なお、試験期間中は電圧を低くしたことによる要因でダイヤの乱れなどは発生しなかった。

### 6. 考察

本研究では、き電電圧を低く変更した現地試験を実施し、エネルギー削減効果および列車の加速への影響について検

証を行った。

エネルギー削減効果について評価した結果、き電電圧を低くしたことで回生絞り込み量が低減し、変電所の消費電力量が1日あたり3MWh程度低減したことがわかった。これは、電圧を低くしたことで回生絞り込み電圧に達しにくくなり、回生電力がより有効活用されたと考える。また、変電所の消費電力量は全体のエネルギー量であるため、き電損失などの増加分よりも回生電力量の増加分が勝った結果であると考えられる。

次に、車両の力行制御特性上、き電電圧を低くしたことで高速域でのトルクが低下することが考えられたため、加速時間を比較することで、加速への影響を評価した。検証区間の範囲における駅間の加速時間は、上り線では平均0.4秒増加、下り線では平均0.9秒増加することがわかった。上下線での加速時間に差が生じた理由は、下り線の走行にて、上り勾配が連続している影響であると考えられる。

### 7. まとめ

横浜線の条件においては、き電電圧を低く変更した場合、僅かながら列車の加速時間が増加した一方で、エネルギー削減効果が得られることがわかった。

今後は補機電力の多い時期での検証を行い、エネルギー量と加速影響の両面で引き続き検証していく予定である。

### 文 献

- (1) JR 東日本グループ:「JR 東日本グループレポート 2022」, [https://www.jreast.co.jp/eco/pdf/pdf\\_2022/all.pdf](https://www.jreast.co.jp/eco/pdf/pdf_2022/all.pdf)
- (2) K. Minamosono, M. Hashimoto and T. Yoshinaga: “Study of Potential and Utilization of Regenerative Power in Electric Railway”, 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications(ICRERA) (2019)
- (3) 吉永孝, 西健太郎, 青木稔, 井上佳祐, 井口敬介:「直流電気鉄道におけるき電電圧と回生絞り込み量との相関性に関する検証」, 令和4年電気学会全国大会, No.5-159, pp.267-268 (2022)
- (4) 高橋諒, 橋本慎, 南之園弘太:「変電所直流母線電圧制御における回生電力有効活用に関する研究」, 第25回鉄道技術連動シンポジウム (J-RAIL2018) (2018)
- (5) 大石慶也, 吉永孝, 橋本慎, 西健太郎:「首都圏近郊エリアにおける列車運転データを活用した鉄道回生電力の実態解析」, 2021年電気学会産業応用部門大会, No.5-28, pp.201-204 (2021)
- (6) 日本鉄道車両機械技術協会監修:「主回路電力変換装置—インバータ・コンバーター」, 日本鉄道車両機械技術協会, p.174 (2010)