# 回生電力の有効活用を実現する鉄道エネルギーマネジメントシステム

**Railway Energy Management System for Effective Utilization of Regenerative Energy**

佐々木　智文 SASAKI Tomofumi　　森　学人 MORI Manato　　大井　菜ノ香 OI Nanoka

近年，カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みが世界的に加速している。鉄道は，ほかの輸送機関と比較してエネルギー効率が高く，単位輸送量当たりの二酸化炭素排出量が少ないため，環境負荷が小さいが，更なる脱炭素化に向けた様々な施策が検討されている。

このような中，東芝は，回生電力貯蔵装置（TESS：Traction Energy Storage System）を活用して電力需給調整市場に調整力を供出し，回生電力の有効活用を実現する鉄道エネルギーマネジメントシステム（EMS：Energy Management System）を開発した。平滑化スプラインを用いた受電電力予測技術を新たに開発し，調整力供出時間帯における鉄道変電所の受電電力を，従来より高精度に予測できることを確認した。また，調整力供出量の拡大に向けて，充放電制御技術の高度化も進めている。

The worldwide movement toward the realization of carbon neutrality has recently been accelerating in various industrial spheres. Although railway transportation systems are environmentally friendly, with higher energy efficiency and lower carbon dioxide ($CO_2$) emissions per unit of transport than other transportation systems, railway companies are vigorously implementing various measures for further decarbonization.

In response to this trend, Toshiba Corporation has developed a railway energy management system (EMS) to make effective use of regenerative energy as balancing power in the electricity supply and demand adjustment market through utilization of a traction energy storage system (TESS). A newly developed power demand forecasting technology using smoothing splines is capable of predicting the power received by railway substations during the provision of regenerative energy with higher accuracy compared with conventional technologies. We are also advancing charge and discharge control technologies to increase the volume of balancing capacity provision.

## 1. まえがき

2020年10月の内閣総理大臣による「2050年カーボンニュートラル宣言」，及び2025年2月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」における2030年度の温室効果ガス排出・吸収量46 %削減目標（2013年度比）を背景として，鉄道分野においても脱炭素化への取り組みが加速している。

2022年3月から，国土交通省鉄道局主催の「鉄道分野のカーボンニュートラル加速化検討会」で，鉄道分野が目指すべきカーボンニュートラルの姿について検討が行われた。同検討会では，回生電力の有効活用に加え，鉄道アセットを生かした蓄電池の導入による再生可能エネルギー（以下，再エネと略記）利用の拡大や，電力系統への調整力供出などの方向性が示された。

調整力を供出する手法の一つに，バーチャルパワープラント（VPP：Virtual Power Plant）がある。VPPは，アグリゲーターが，太陽光発電や蓄電池などの分散型エネルギーリソースを遠隔かつ統合的に制御し，一つの発電所のように運用する仕組みである。アグリゲーターは，VPPを活用して需給バランスの維持に必要な調整力を創出し，需給調整市場に供出する。

東芝は，複数のTESSをエネルギーリソースとして活用し，VPPのように調整力を創出して需給調整市場に供出することを目的とした鉄道EMSを開発した。また，需給調整市場への調整力供出の際に重要になる受電電力予測技術，及び必要な調整力を供出するための充放電制御技術を開発した。

ここでは，調整力供出のための主な装置，調整力供出の概要，及び鉄道EMSの開発技術について述べる。

## 2. TESSを活用して調整力を供出するための主な装置

### 2.1 TESS

列車は制動時に，回生電力を発生させる。しかし，近くに消費する列車が存在しなければ，回生電力は車載の抵抗器あるいは機械ブレーキにより熱として捨てられる。TESSは，回生電力を，架線を介して地上側に設置した蓄電池に貯蔵し，ほかの列車の加速時などに再利用するシステムである（**図1**）。回生電力の再利用による省エネ効果の拡大だけではなく，停電などの非常時に列車に電力を供給する非常走行電源としても活用できる[1]。更に，TESSをバッテリーポストとして，変電所の代替設備として使用することもできる。

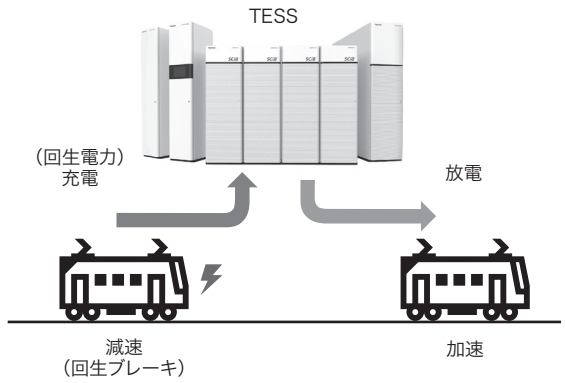



**図1. TESSの概要**

TESSは，列車の減速時に発生する回生電力を地上側の蓄電池に貯蔵し，加速時に再利用する。

Operating mechanism of TESS

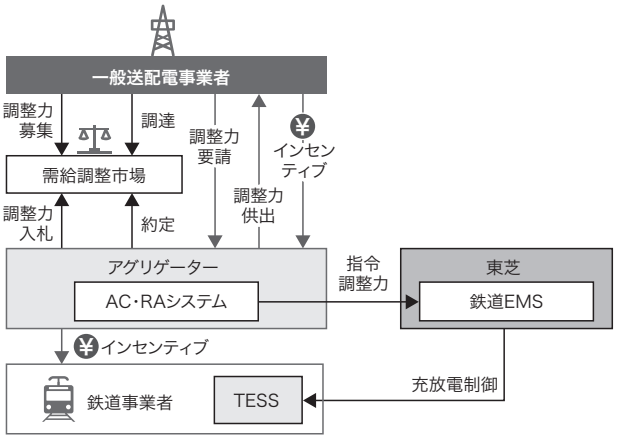



**図2. 調整力供出に際しての需給調整市場・アグリゲーター・鉄道EMSの関係**

鉄道EMSは，アグリゲーターのACシステム・RAシステムと協調し，需給調整市場に調整力を供出する。

Relationships among electricity supply and demand adjustment market, aggregator, and railway EMS when providing balancing capacity

一方で，TESSは回生電力の貯蔵を目的とする場合，充放電深度が浅く余力のある状態で運用されることが多い。そこで，回生電力の充放電機能を維持しながら，TESSの運用価値を最大化するため，回生電力を調整力として需給調整市場へ供出する仕組みを開発した。

アグリゲーターが需給調整市場に参入する際には，1,000 kWh以上の調整力が要求される。そのため，より多くの調整力を供出できる高出力タイプのTESSを新たに開発し，1バンク構成で定格出力3,000 kWを実現した。同時に，単位出力当たりの設置面積を従来比で約40 %削減し，スペース効率の向上を図った。

### 2.2 鉄道EMS

当社は，TESSを需給調整市場におけるエネルギーリソースとして活用するため，鉄道EMSを開発した。鉄道EMSは，アグリゲーターが運用するAC（Aggregation Coordinator）システム及びRA（Resource Aggregator）システムと連携し，TESSを充放電することで調整力として需給調整市場へ供出する。

ACシステム・RAシステムとのインターフェースには，API（Application Programming Interface）方式を採用した。これにより，多様なアグリゲーターとの接続を可能にして，将来的な市場環境の変化にも柔軟に対応できる。

## 3. 調整力供出の概要と鉄道EMSの開発技術

鉄道EMSは，需給調整市場の三次調整力②（変動性再エネの予測誤差に対応する調整力）を対象として開発した。

### 3.1 調整力供出の概要と鉄道EMS

**図2**に，調整力供出に際しての，需給調整市場，アグリゲーター，及び鉄道EMSの関係を示す。

需給調整市場における取り引きは，アグリゲーターが担う。鉄道EMSは，TESSを活用して調整力をアグリゲーターへ供出し，アグリゲーターはそれらをほかのエネルギーリソースの調整力と統合して，需給調整市場へ供出する。鉄道EMSが要求どおりに調整力を供出すると，アグリゲーターからインセンティブを受領できる。

調整力供出の運用フローは，需給調整市場の制度及びアグリゲーターの運用方針に基づいて決定される。この運用フローはアグリゲーターごとに異なるが，その一例を以下に示す。

⑴ 調整力供出日の前日までに，調整力を供出する時間帯の予測受電電力及び供出可能な予測調整力をアグリゲーターへ報告する。

⑵ 調整力供出時間帯の一定時間前に，供出するべき調整力の指令（指令調整力）をアグリゲーターから受信する。指令調整力は，再エネの発電量予測誤差などに影響されるため，当日にならなければ確定しない。

⑶ 調整力供出時間帯になると，受電電力が指令調整力を減じた値となるように，鉄道EMSがTESSの充放電を制御する。

⑷ 調整力供出後，実績受電電力が目標値の許容範囲を満足した場合，アグリゲーターからインセンティブを受領する。インセンティブは，アグリゲーターとの取り決めによるが，電気料金の割引や現金支払いなどの種類がある。

このように，鉄道EMSは，アグリゲーターと連携してTESSを需給調整市場の調整力リソースとして活用し，市場取引への参加を可能とする。

### 3.2　受電電力予測技術

3.1節で述べたように，需給調整市場へ調整力を供出するためには，調整力供出時間帯の受電電力を予測する必要がある。鉄道EMSは，予測受電電力を基準値としてTESSの充放電を制御することで，指令調整力に応じた受電電力の増減を実現し，調整力を供出する。そのため，指令調整力の供出を成立させるには受電電力の高精度な予測が不可欠である。

一方，電気鉄道用であるき電系統の負荷は一般的な系統負荷とは異なり，列車運行ダイヤや運転状況に加え，外気温などの様々な要因によって大きく変動する。このため，受電電力を高い精度で予測することは容易ではない。

需給調整市場における受電電力予測では一般に，電力需要の基準値の計算手法としてHigh4of5などが用いられる。これに対し，当社は外気温を説明変数とし，平滑化スプラインを適用した新たな受電電力予測技術（以下，平滑化スプライン手法と呼ぶ）を開発した。

平滑化スプライン手法とHigh4of5との比較結果を**表1**に示す。比較データは，ある実路線の実績消費電力を用いて，各時間帯における予測誤差の標準偏差を評価した。調整力供出対象である8:00～19:30の全ての時間帯において，平滑化スプライン手法の予測誤差の標準偏差が，High4of5より小さくなることを確認した。これにより，平滑化スプライン手法が受電電力予測の高精度化に有効であることを示した。

### 3.3　充放電制御技術

**図3**と**図4**に，調整力供出のための充放電制御と受電電力の変化を示す。鉄道EMSは，前日までに報告した予測受電

**表1. 平滑化スプライン手法と一般的なHigh4of5との比較**

Comparison of standard deviations of prediction errors obtained using conventional high4of5 and smoothing splines

| 時刻（時：分） | 誤差の標準偏差（kW） | | High4of5を100 %としたときの平滑化スプライン手法の割合（%） |
|---|---|---|---|
| | 平滑化スプライン手法 | High4of5（当日調整あり） | |
| 8:00 | 56.3 | 58.0 | 97 |
| 8:30 | 48.5 | 58.7 | 83 |
| 9:00 | 69.9 | 107.5 | 65 |
| 9:30 | 60.2 | 81.7 | 74 |
| 10:00 | 50.9 | 78.7 | 65 |
| 10:30 | 43.2 | 77.1 | 56 |
| 11:00 | 38.1 | 73.9 | 52 |
| 11:30 | 34.1 | 77.0 | 44 |
| 12:00 | 27.1 | 56.4 | 48 |
| 12:30 | 28.9 | 59.1 | 49 |
| 13:00 | 34.2 | 67.1 | 51 |
| 13:30 | 34.1 | 64.0 | 53 |
| 14:00 | 39.2 | 59.6 | 66 |
| 14:30 | 39.2 | 64.4 | 61 |
| 15:00 | 46.4 | 48.8 | 95 |
| 15:30 | 36.4 | 49.8 | 73 |
| 16:00 | 38.7 | 51.9 | 75 |
| 16:30 | 42.4 | 58.3 | 73 |
| 17:00 | 49.6 | 60.3 | 82 |
| 17:30 | 43.1 | 50.5 | 85 |
| 18:00 | 34.5 | 55.6 | 62 |
| 18:30 | 29.9 | 59.1 | 51 |
| 19:00 | 41.6 | 63.0 | 66 |
| 19:30 | 43.1 | 63.9 | 67 |
| 平均 | 42.1 | 64.4 | 66 |

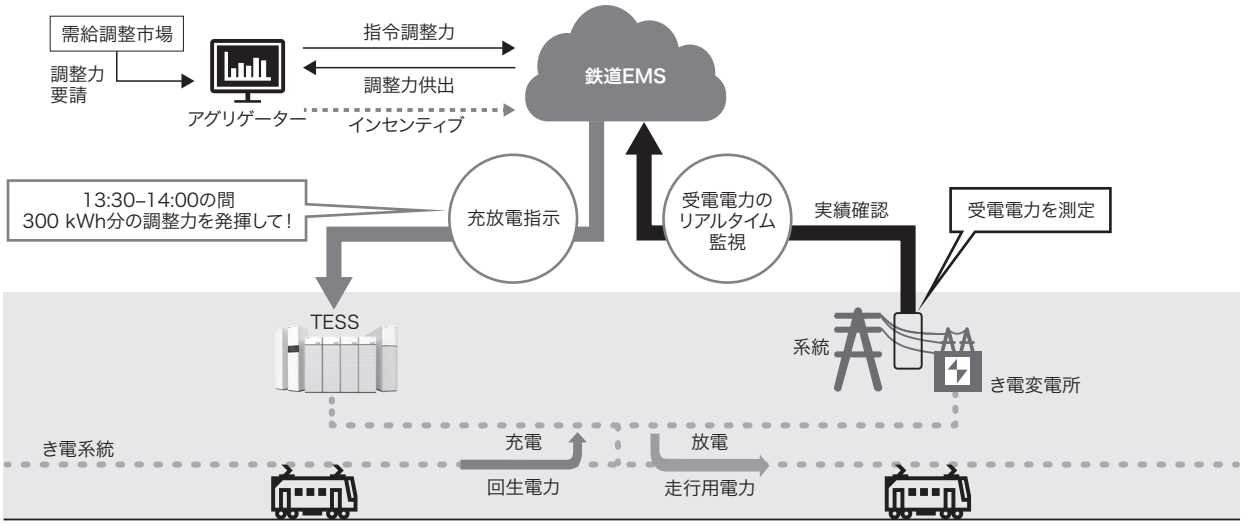



**図3. 鉄道EMSによるTESSの充放電制御**

鉄道EMSは，受電電力をリアルタイム監視しながら，指令調整力を供出するようにTESSを充放電する。

Charge and discharge of TESS controlled by railway EMS

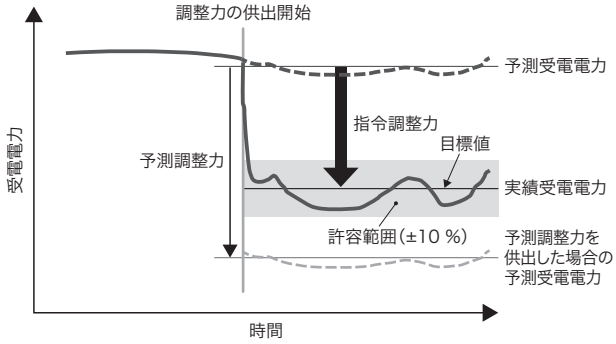



**図4. TESSの充放電制御と受電電力の変化**

予測受電電力から指令調整力を減じたものを充放電制御の目標値とする。

Change in received power caused by charge and discharge control of TESS

電力に対し，指令調整力を減じた受電電力(目標値)となるよう，TESSの充放電を制御する。

3.1節で述べたとおり，指令調整力は再エネの発電量予測誤差に依存して決定される。そのため，再エネの発電量が予測どおりであれば受電電力は予測値付近で推移するが，発電量が予測を下回った場合には，不足分を補うためにTESSを放電し，系統からの受電電力を低減させる制御が必要となる。

制御実施後，実績受電電力が目標値に対して所定の許容範囲内に収まった場合，調整力が適切に供出されたものとして，アグリゲーターからインセンティブを受領できる。

なお，鉄道のき電系統はネットワーク状に構成されており，複数の変電所が同一の電力系統に接続されている。このため，ある変電所の受電電力が減少した場合でも，電力潮流の変化によってほかの変電所の受電電力が増加することがある。したがって，指令調整力供出の達成可否は，個々の変電所ではなく，同一のき電系統に接続された全変電所の受電電力総和を用いて評価する。

### 3.4　今後の展望

**図5**に，鉄道EMSの将来像を示す。

今回は，TESSをエネルギーリソースとして活用し，需給調整市場へ調整力を供出する鉄道EMSを開発した。しかし，鉄道分野には複数のTESSのほかに，車上蓄電池や駅設備負荷など，調整力として活用可能なアセットが多数存在する。

今後は，これらのエネルギーリソースを鉄道EMSに統合し，鉄道事業者が保有するアセットを一元的に制御することで，より大規模な調整力の供出を実現する。更に，鉄道運行に関わるあらゆるアセットを活用したVPPを構築し，需給調整市場への参加を可能にすることで，鉄道システムの脱炭素化及び新たな収益創出に貢献していく。

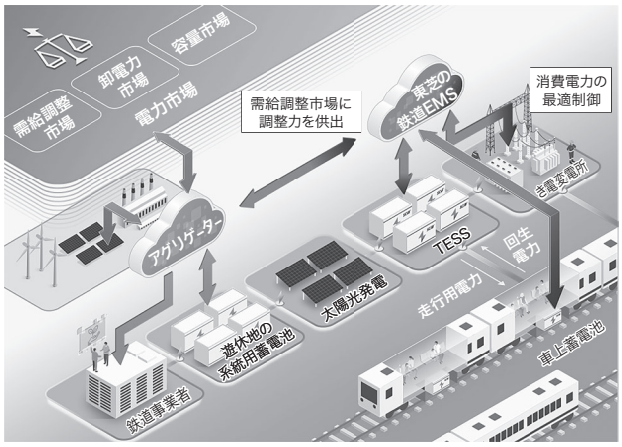



**図5. 鉄道EMSの将来像**

TESSだけではなく，鉄道事業者が保有するエネルギーアセットを一元的に制御し，調整力を供出する。

Conceptual diagram of future development of railway EMS

## 4. あとがき

当社は，鉄道分野におけるカーボンニュートラル実現に向け，TESSをエネルギーリソースとして需給調整市場へ調整力を供出する鉄道EMSを開発した。鉄道EMSにより，TESSの基本機能を損なうことなく，需給調整市場において価値創出できる。

当社は今後も，鉄道アセットの価値最大化とカーボンニュートラル社会の実現に貢献していく。

## 文　献

(1)　佐竹信彦．省エネで安全かつ強靱な鉄道インフラを構築する回生電力貯蔵システム．東芝レビュー．2021, **76**, 4, p.7–10. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2021/04/a03.pdf>, (参照 2026-08-04).



佐々木　智文　SASAKI Tomofumi
モビリティ・インフラソリューション事業部
鉄道システム技術第二部
Railway Systems Engineering Dept.2



森　学人　MORI Manato
モビリティ・インフラソリューション事業部
鉄道システム技術第二部
Railway Systems Engineering Dept.2



大井　菜ノ香　OI Nanoka
モビリティ・インフラソリューション事業部
鉄道システム技術第二部
Railway Systems Engineering Dept.2