

列車運転エネルギー低減に向けた取り組み

Approach to reduction of train driving energy



蘭田 秀樹*

Aiming to reduce the train driving energy, which accounts for more than 70% of our energy consumption, we have been researching and development. Towards the reduction of train driving energy, the challenge is reduction of equipment loss, increase of regenerative energy and the energy-saving driving operation. As a stepping stone of the above problem-solving, we conducted a survey of the actual situation of energy consumption in commercial operation, and have the basic data of the energy-saving measures considered. In this paper, we describe the overview of operational energy measurement and analysis, and various efforts to outline the operational energy reduction.

●キーワード：運転エネルギー、回生ブレーキ、TIMS、シミュレーション

1. はじめに

JR東日本の消費エネルギーのうち7割以上を列車運転エネルギーが占めており、環境技術研究所ではこのエネルギーの低減を目指し研究開発を進めている。運転エネルギー低減に対し、かつてはブレーキ時に発生するエネルギーの架線回生やVVVFインバータの実用化など多くの省エネ効果が見込める技術進化があり、当社でも新型車両に導入するなど逐次進めている。しかし、ここ数年のうちにこうした大きな技術革新が実現される見通しは低い。このような中、運転エネルギー低減に向け、大きく分けて機器損失の低減、回生エネルギーの増大、省エネ運転操作の実現が課題となっている。環境技術研究所では、上記の課題解決の足がかりとして、営業運転での消費エネルギーの実態調査（運転エネルギーの測定）を行い、省エネ方策検討の基礎データとしている。本論分では、運転エネルギー測定・分析の概要と、運転エネルギー低減に向けた方策についての各種取り組みについて述べる。

2. 運転エネルギーの測定・分析

2.1 測定概要

2.1.1 測定線区・車種

2011年の相模線205系での測定を皮切りに、3線区での運転エネルギーの測定を完了し、2015年初めの段階で2線区の測定を継続している（表1）。測定は、多様な線区の把握を行うため、通勤タイプ（山手線）、近郊タイプ（湘南新宿ライン等）、特急タイプ、新幹線など、運行形態ごとに実施している。主な目的を以下に示す。

- (1) 通勤タイプ（山手線）：当社の代表的な稠密線区であり、回生絞込みの状況や乗車率の影響等の分析を実施。また、変電所との同時測定を行い、地上-車上間のエネルギーの流れを分析した。
- (2) 新幹線：最高速度や運用方法による運転エネルギーへの影響や運転操作による省エネ効果等を分析。
- (3) 近郊タイプ（湘南新宿ライン等）：比較的駅間の長い近郊運転による運転エネルギーの分析や近郊区間での架線電圧の変動状況や回生絞込み状況等を調査する計画である。
- (4) 特急タイプ（中央線）：特急運転時の分析のほか、E257系に搭載されている電気ブレーキ（回生エネルギーを車両に搭載した抵抗で消費）の発生状況等を調査する計画である。

表1 運転エネルギー測定線区・車種

| 時期 | 区分 | 線区 | 車種 |
|------------|-----|----------|-------|
| 2011年 | 通勤 | 相模線 | 205系 |
| 2012～2013年 | 通勤 | 山手線 | E231系 |
| 2013～2014年 | 新幹線 | 東北新幹線等 | E5系 |
| 2014年～ | 特急 | 中央線 | E257系 |
| 2015年～ | 近郊 | 湘南新宿ライン等 | E231系 |

2.1.2 測定方法・測定項目

運転エネルギーの測定・記録は、E231系等に搭載されているTIMS (Train Information Management System) を活用して実施する。TIMSは常に編成全体の情報を収集していることから、簡易的かつ同期が取れる測定を実現している（相模線205系、新幹線主回路電力測定を除く）。例として図1に山手線E231系での概要を示す。TIMS、VVVF、

空調装置のソフトを変更し、TIMSに記録装置を接続する構成としている。既存のデータを記録するだけでなく、例えば回生絞込み発生状況をVVVFで演算してTIMSへ伝送する変更なども実施している。

山手線では車両相互間の影響を分析するため10編成での測定を実施し、分割併合があるE257系、E231系近郊タイプにおいても複数編成で実施している。

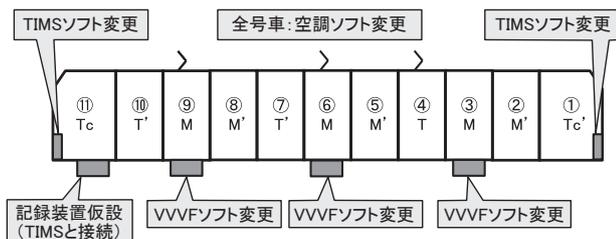


図1 E231系山手線測定の構成

測定項目は、主に、架線電圧、架線電流、回生絞込み量、空調消費電力、補機消費電力等のエネルギーデータに加え、日時、場所、運転操作、外気温、乗車率等の運転データとなっており、運転操作や位置、乗車率等に対する運転エネルギー分析を可能としている。記録時隔はデータ量と分析精度を考慮し、200msec毎としている。

データ量が膨大となることから、専用の分析ツールを開発し、分析の効率化を図っている(2.3項)

2.2 測定結果の一例

2.2.1 山手線E231系¹⁾

測定結果の一例として、回生絞込みの発生状況を示す。運用開始から終了まで、ある日における1編成の回生絞込み発生状況を図2に示す。この日の最後の運用であった列車のみ回生絞込みが発生し、山手線一周での回生絞込み量は約11kWhであった。これは、1日の総回生電力量である約7300kWhに対して、わずか0.15%程度であった。他の日でもほぼ同様の傾向であったことから、山手線では回生絞込みがほぼ発生せず、回生エネルギーが有効に使われていることがわかった。

回生ブレーキ動作時のみの架線電圧の変動(4日分)を図3に示す。回生時ではどの区間においても架線電圧がほぼ安定していた。このことから、山手線においては負荷とのバランスが取れており、回生エネルギーが有効に活用されていることがわかる。

以上から、稠密線区である山手線においては、回生ブレーキを利用できる領域を拡大できる可能性があることが判明したため、新型車両E235系の主回路設計に知見を活かしている。

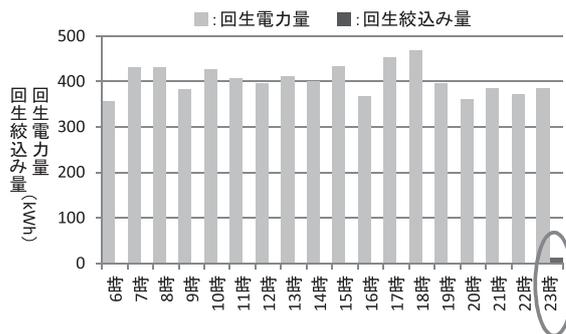


図2 時間帯毎の回生絞込量

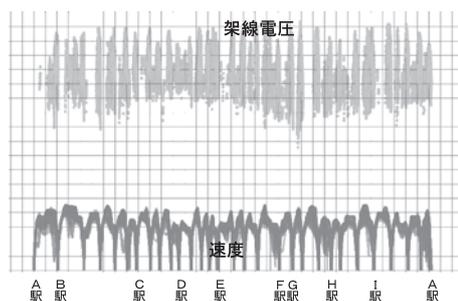


図3 架線電圧の変動(回生時)

2.2.2 新幹線E5系

測定結果の一例として、はやぶさ運用(東京～青森間)の電力測定結果を示す(図4)。当然ではあるが、高速を維持するためのエネルギーが圧倒的に大きく、ブレーキ回数が少ないことから、回生エネルギーは少ない。省エネに向けたターゲットとしては、高速での定速走行に対する対策が最も効果が高いと言える。

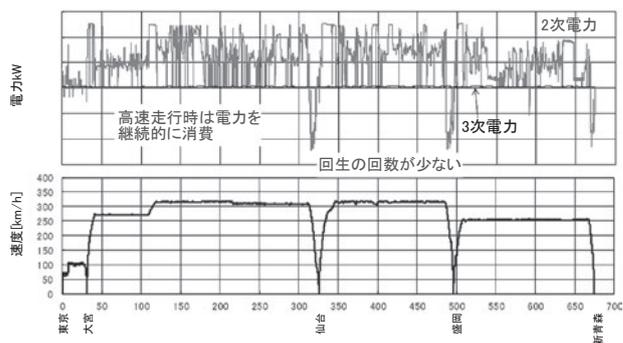


図4 定速運転時の消費エネルギー比較

2.3 分析ツールの開発

運転エネルギーの測定は1年間程度継続して実施するため、データ量が膨大となり分析やデータ整理に多大な時間が掛かる。また、必要なデータを見つけ出すことが難しく、効果的な分析が難しい。そこで、運転エネルギーの分析を効率的かつ効果的に行うための分析ツールを開発した。図5に画面例を示す。時間帯や区間、乗車率等を指定することにより、必要なデータを短時間で抽出できるようになり、また、グラフ化等も簡易的に表示できるようになったため、視覚的な

検討が可能となった。複数線区に対応しており、今後の分析にも活用していく計画である。このツールでは、データの抽出や統計的手法の実現にPythonというプログラミング言語を用いた。データ分析や科学計算に使えるモジュール群も用意されており、将来の拡張性を考慮できる仕様になっている。



図5 運転エネルギー分析ツール画面例

3. 省エネ運転操作の検討に向けて

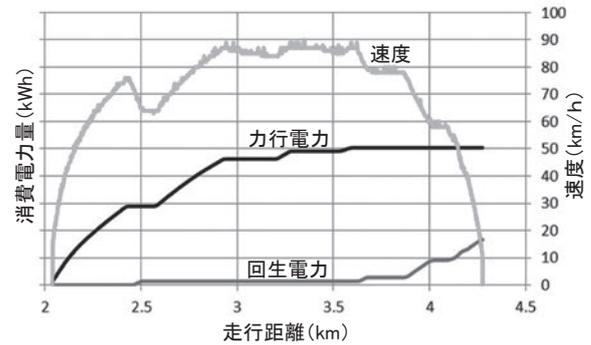
3.1 山手線測定結果からの検討

運転操作（ランカーブ）による運転エネルギーへの影響について多くの研究開発が行われているが、実際の走行データからアプローチを行う研究は見られない。そこで、山手線の実測データから、運転パターンによる運転エネルギーの違いを分析し、エコ運転となる運転手法を実現することを目指し、データの分析を行った。

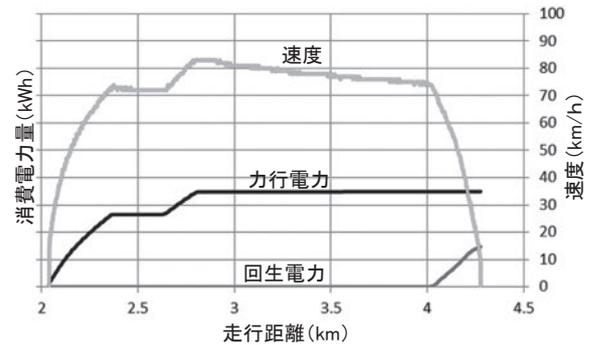
山手線は東京都の都心部で環状運転を行っている路線で、一周の距離は約34.5km、駅数は29駅である。省エネ運転パターンの検討として、まずは距離の長い駅間（約2.2km）と短い駅間（約1.3km）を選定し、運転エネルギーの比較を行った。運転時間が同じ場合（標準運転時間）における走行電力量（力行電力量-回生電力量）と運転パターンの一例を図6、7に示す。駅間が長い場合では、走行電力量が最小の場合(b)に対し、最大の場合(a)では約60%の増加となり、駅間が短い場合では、同様に13%の増加となっている。

図8に駅間距離が長い場合の運転時分ごとの走行電力量の違いを示す。このデータの範囲では運転時間が長いほど、少ない電力量で運転できていることが分かる。駅間の余裕時間を上手に活用することにより、省エネとなる操作が実現可能である。

運転パターンの違いにより走行電力量の差が発生し、運転パターンの最適化を図ることにより、大幅な省エネ効果が得られることが明らかとなった。特に駅間距離が長いほうが省エネ効果が高く、今後は駅間距離の長い近郊タイプや特急タイプを優先して、省エネ運転パターンの構築を進めていく。

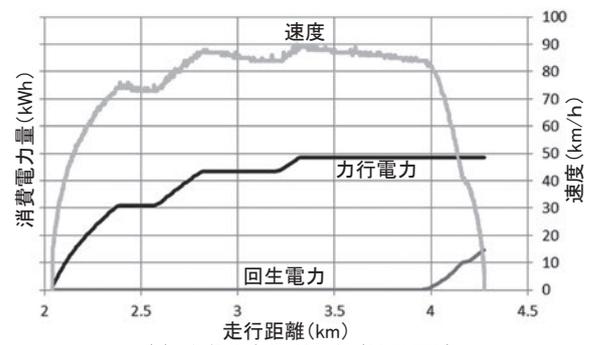


(a) 走行電力量が最大(33.7kWh)

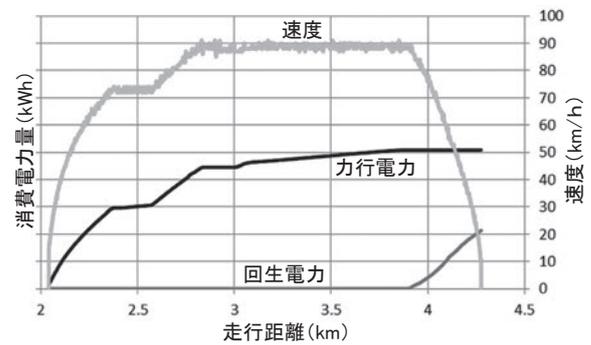


(b) 走行電力量が最小(20.2kWh)

図6 ランカーブと運転エネルギー（駅間距離が長い場合）



(a) 走行電力量が最大(20.7kWh)



(b) 走行電力量が最小(18.3kWh)

図7 ランカーブと運転エネルギー（駅間距離が短い場合）

3.2 シミュレータを活用した検討

運転エネルギー削減に向けた研究開発手段の一つとして、電車の運転エネルギーを算出するエネルギーシミュレータを開発した。3.1項に述べた測定データからのアプローチに加え、このシミュレータを活用し、データと理論の両面から省エ

ネ運転操作の検討を進めている。

計算結果の例として、磐越西線で計算結果の一例を表2に、その際のランカーブを図9に示す。ノッチや操作タイミング等のパラメータを変更しながら省エネとなる操作を検討した結果、48%の削減が可能となる計算結果となった。駅間ごとに勾配や距離が異なることから、それぞれの駅間に特化した運転操作の検討が必要となり、各線区の特状に合わせた精密な検討が必要であることが検討を通して改めて分かった。今後は、開発したシミュレータを運転操作による省エネに加え、4章に述べる省エネ制御の検討等にも活用していく計画である。

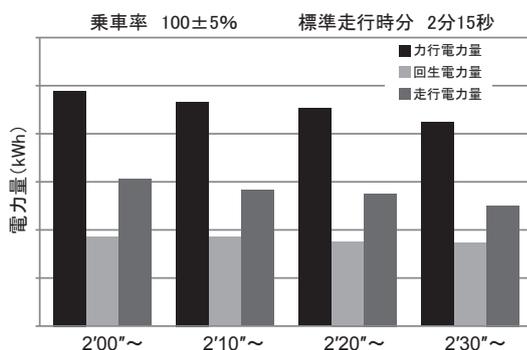


図8 運転時分ごとの運転エネルギー

表2 省エネ運転操作の効果 (磐越西線) 磐梯熱海～安子ヶ島間 (上り線)

| | 走行時間 | 運転エネルギー (kWh) | 回生率 |
|-------|------|---------------|------|
| 従来運転 | 3:28 | 7.5 | 75.8 |
| 省エネ運転 | 3:29 | 3.9 | 87.0 |

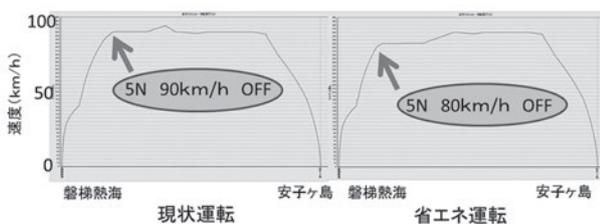


図9 運転パターンの比較

4. 省エネ制御手法の開発にむけて

4.1 在来線の省エネ制御

主回路装置の省エネに向けた開発として、ハードや制御に対する多くの開発が進められており、環境技術研究所ではハードまで含めた研究として、SiC素子適用主回路の開発を行い、試験車両での評価を行なった²⁾。SiC素子は従来のSi素子と比較し、低抵抗で高温稼動可能なことから、今後も更なる活用が広がると考えられる。

制御方式の改善による省エネ策の一つとして、各構成機器の最も効率の高いポイントを狙って使用するという手法が考

えられる。特に主電動機の効率は一定ではなく必要トルク等の走行状態によって変わるが、トルクパターンはノッチ、速度、負担重量によって決められており、効率を意識した設定とはなっていない。効率の高いポイントを意識的に使用することにより、省エネを図ることが可能となる。当然ながら、編成としての必要トルクを守る必要があるため、必要トルクの確保と効率の向上を両立する制御方式を確立していく計画である。そのための第一歩として主回路構成機器 (主電動機、インバータ、フィルタリアクトル等) の効率について、詳細な分析を進めていくことから始める計画である。

4.2 新幹線の省エネ制御

営業車での運転エネルギー測定から、新幹線においては、速度を維持するエネルギーが圧倒的に大きいことが分かった。新幹線では駅間が長く、在来線と比較して一定速度で走行する時間が長いため、定速制御を使用する頻度が高い。図10に定速制御使用時の電力発生状況の一例を示す。あくまでも一例であるが、定速制御では効率が低い領域 (力行電力が小さい) で長く走行しており、運転エネルギーの損失が発生している可能性が高いことが判明した。この点に着目して、今後の省エネ制御の開発を進める計画である。

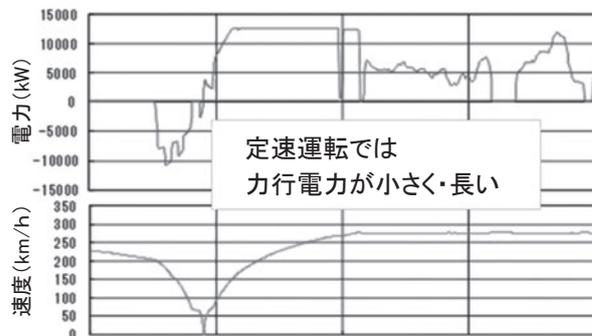


図10 定速運転使用時の電力発生状況

5. まとめ

運転エネルギーの低減に向けた環境技術研究所の取り組みをまとめた。営業運転のデータ分析からシミュレータによる分析まで多角的なアクセスを進めている。今後はこれらの様々なデータや手法を用いて、新しい主回路制御方式の開発や省エネ運転操作方法の検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 水口芳樹, 藪田秀樹, 真保光男, 神孫子博: 山手線における運転エネルギーの測定と分析, J-Rail2013
- 2) 藪田秀樹, 柴沼健一, 石田貴仁, 千葉佳範: Research of Efficient main power equipment using SiC power device, IPEC2014