

# Special edition paper

## 山手線における運転エネルギーの現況



磯 峻介\*1



柴田 悠介\*2



飯田 隆幸\*3

### Overview of Running Energy Consumption of the Yamanote Line

Shunsuke ISO\*1, Yusuke SHIBATA\*2, and Takayuki IIDA\*3

\*1 Assistant Chief Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory, Research and Development Center of JR EAST Group

\*2 Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory, Research and Development Center of JR East Group

\*3 Chief Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory, Research and Development Center of JR East Group

#### Abstract

For the purpose of expanding energy-efficient driving operations by train crews, we have been developing studies to visualize train-monitoring-data to give feedback to train crews on their driving operations and their energy saving effects. In this study, a total of more than 10,000 hours of train-monitoring-data were analyzed for operations from 2019 to 2022. This paper reports on the trends in operational energy on the Yamanote-Line obtained from the analysis of these train-monitoring-data.

●**Keywords:** Energy-saving, Energy-consumption, Driving-operation, Monitoring, Data analytics

\*1 JR東日本研究開発センター 環境技術研究所 副主幹研究員  
\*2 JR東日本研究開発センター 環境技術研究所 研究員  
\*3 JR東日本研究開発センター 環境技術研究所 主幹研究員

## 1. はじめに

JR東日本では、2030年度までの鉄道事業におけるエネルギー使用量40%削減（2013年度比）の実現をめざしている。鉄道は環境に優しい輸送機関と言われるものの、図1に示すように、当社では年間47.9億kWhのエネルギーを使用している。そのうち列車運転用エネルギーが38.1億kWhであり、約8割を占めている。そのため、列車運転用エネルギー削減に向けたさまざまな取り組みを実施している。

JR東日本研究開発センター環境技術研究所では、乗務員による省エネ運転の取り組みを推進するために、車両から取得したデータ（以下車両モニタリングデータ）を可視化して、乗務員に運転操作や省エネ効果をフィードバックする研究を推進してきた。この研究では、2019年から2022年にかけて、山手線において10,000時間を超える車両モニタリングデータを取得した。本稿では、これらの分析から得られた運転エネルギーの傾向について報告する。

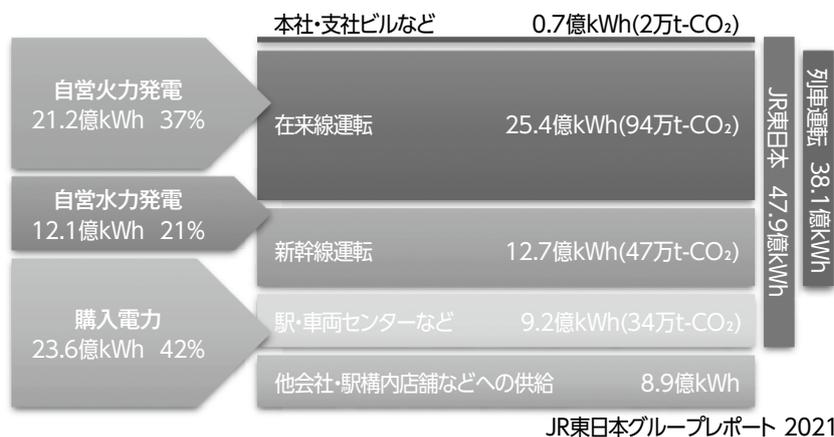


図1 JR東日本におけるエネルギー消費内訳

## 2. 山手線の概要

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、一周約34.5km、駅数は30駅である。終日各駅停車の運用で快速などの速達列車はなく、他線区からの乗り入れる列車がない独立した運用が行われている。山手線で運用されているE235系電車は、車両に搭載された機器やセンサからの状態監視データである車両モニタリングデータを常時取得しており、列車情報管理装置INTEROS（インテロス）により一定のサンプリング周期で常時記録され、WiMAX通信網を介して地上システムに蓄積される。

## 3. 走行中の積算電力量の変化について

列車が駅を発車して、次駅に停車するまでの動きをモデル化すると、力行・惰行・ブレーキに分類される。駅間距離が長い場合や、速度制限区間が存在する場合は、再力行や、定速制御を用いる状況もあるが、山手線は、平均駅間距離が1.15kmであり、駅間で再力行や定速制御を用いることは少なく、積算電力量の変化は、多くの場合で力行→惰行→ブレーキという3ステップで表すことができる。

具体例として、内回りの代表的な4駅間について、発車から次駅停車までの積算電力量と経過秒数の関係を図2に示す。また、各区間の運転条件を表1に示す。全体的なグラフの形状は、駅発車後の力行で積算電力量が上昇し、その後ノッチオフ（力行切）すると、グラフ形状が水平となり電力消費の無い状態（惰行）に推移し、ブレーキ時には、列車の運動エネルギーを電気エネルギーに変換して還元する回生ブレーキの作用により積算電力量が減少していく。本稿では、力行で消費したエネルギーと回生ブレーキで還元したエネルギーの差を2駅間の消費電力量と定義する。

力行中のグラフの形状を比較すると、4駅間とも力行開始後0～10秒程度までは、積算電力量の傾きが徐々に大きくなり、力行開始後10秒以降はほぼ一定の傾きとなる。また、発駅ごとに傾きが異なるのは、乗車率に応じた応荷重制御による主回路電流の差によるものと考えられる。応荷重制御では、荷重が変化しても一定の加速度を保つため、荷重に応じて出力が変化するように制御される。そのため、荷重に相当する乗車率が高いほど、主回路電流も増加し、傾きが大きくなる傾向にある。

また、ブレーキ時のグラフの形状を比較すると、ブレーキ投入直後に回生ブレーキが立ち上がり、積算電力量が減少し始め、停車直前まで回生電力が減少し続ける傾向にあることが分かる。

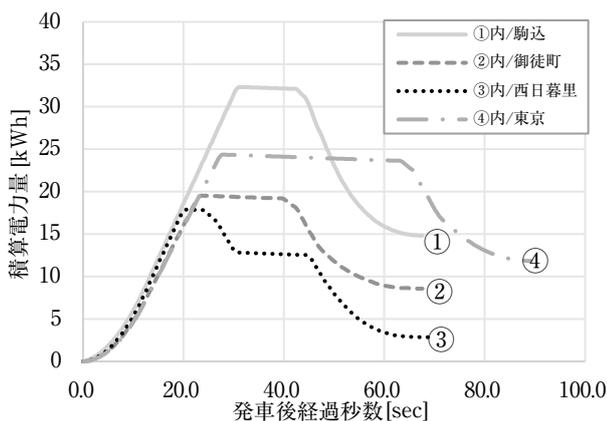


図2 発車後経過秒数と積算電力量の関係

表1 各区間の運転条件

日時・天候： 2021年6月1日(火) 曇時々雨			
列車・編成： 616G トウ10編成 E235系 6M5T			
区間	発車後勾配	最高速度	乗車率
① 駒込→巣鴨	上り 10% →0% (平坦)	74km/h	54%
② 御徒町→上野	上り 6.7%	63km/h	10%
③ 西日暮里 →田端	下り 10%	66km/h	44%
④ 東京→神田	0% (平坦)	73km/h	10%

#### 4. 力行時間と力行電力量の相関について

力行時間と力行電力量の関係を図3に示す。走行条件を統一するために、多数の運転実績から、駅発車時に最大加速である力行5ノッチを投入した運転から、複数回力行および定速制御機能を扱った操作を除いた運転のみを抽出した。サンプルは、2021年6月1日～14日、トウ10～20編成(11編成)における車両モニタリングデータ、延べ約27,000駅間の運転実績を示している。この散布図による近似直線は式(1)で表される。式より、力行時間を1秒削減することで、力行電力量1.13kWh程度の削減が期待できることが読み取れる。

$$\text{力行電力量(kWh)} = 1.13 \times \text{力行時間(sec)} - 4.8 \quad (1)$$

また、各点の濃淡は乗車率の大小を表し、乗車率が高いほど近似直線の傾きも大きくなることが確認できる。前項において、積算電力量のグラフの傾きは乗車率に依存することを示した。図3においても、同じ力行時間であれば乗車率が高いほど、力行電力量は上方に位置する傾向が表れており、乗車率の大小が積算電力量の傾きに影響することが、多数の運転実績からも示される。

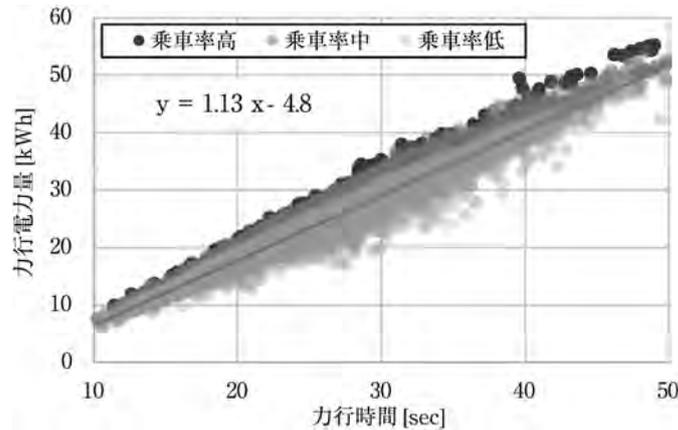


図3 力行時間と力行電力量の関係

#### 5. 力行1秒あたりの消費電力量について

乗車率帯およびノッチオフ速度帯ごとの1秒あたりの消費電力量および各条件のサンプル数を表2に示す。前項で1秒あたりの力行電力量に関する近似直線を示したが、速度帯や乗車率によっても力行1秒あたりの消費電力量に影響が出ることも考慮し、分析した。これにより、線形や乗車率などの条件に応じた消費電力量を試算することも可能になる。表中括弧内はサンプル数を示す。ノッチオフ速度50km/h未満や80km/h以上は、サンプル数が少ないため、算出対象外とした。表2より、ノッチオフ速度帯が高速であるほど、1秒当たりの消費電力量が大きくなる傾向が読み取れる。これは、ノッチオフ速度が高い駅間ほど、力行投入時間を短くすることによる省エネ効果が期待できることを示している。

表2 1秒あたりの消費電力量および各条件のサンプル数

上段：1秒あたりの消費電力量 kWh 下段：サンプル数 n		乗車率		
		～50%	51～100%	101%～
ノッチオフ速度	50～59 km/h	0.910 (n=2782)	1.056 (n=756)	1.123 (n=41)
	60～69 km/h	0.979 (n=9112)	1.096 (n=2636)	1.208 (n=141)
	70～79 km/h	1.040 (n=7894)	1.093 (n=2167)	1.202 (n=93)

## 6. ブレーキ操作による回生電力量の違いについて

図4は運転曲線の重ね合わせの例である。駅発車後の力行操作は多くの乗務員が力行5ノッチを投入していることから、力行時の運転曲線は概ね同一の軌跡を描いている。一方で、惰行開始地点やブレーキ開始地点および扱うブレーキノッチは乗務員により異なるため、多様な運転曲線が存在している。回生電力量はブレーキ初速やブレーキノッチ（減速度）、乗車率、線路勾配、架線電圧などさまざまな運転条件の影響を受けるが、本稿では大量の運転実績データを分析することで山手線における運転エネルギーの全体像を把握した。

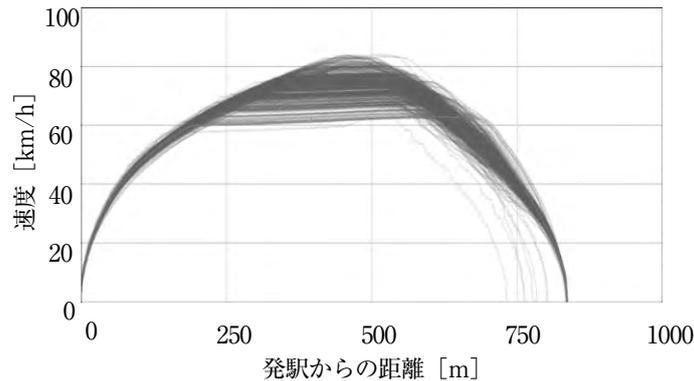


図4 運転曲線の重ね合わせの例

## 7. 山手線1周あたりの運転エネルギーの分析

図5に1周あたりの平均乗車率と運転エネルギーの分布を示す。乗車率に応じて力行電力量および回生電力量と共に、消費電力量の値が大きくなっていることから、平均乗車率の増加に伴う力行電力量の増加分が回生電力量の増加分を上回っていることが分かる。

続いて、図6および表3に1周あたりの運転エネルギーおよび回生率を示す。時間帯別に分析すると、乗車率が高い通勤時間帯（7～10時）において、力行電力量および回生電力量が共に大きく、消費電力量が最も大きいこと分かる。

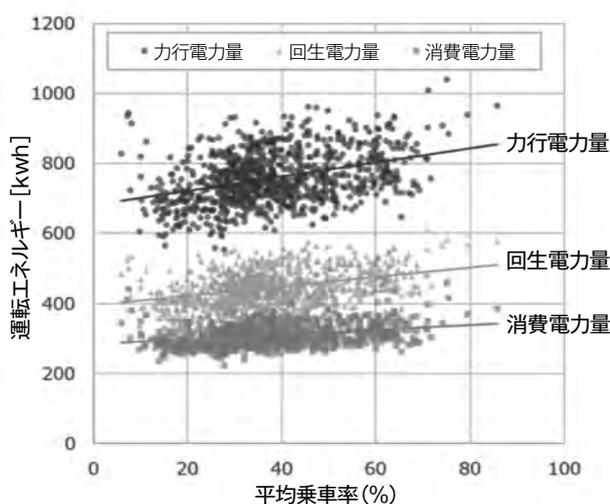


図5 1周あたりの平均乗車率と運転エネルギーの分布

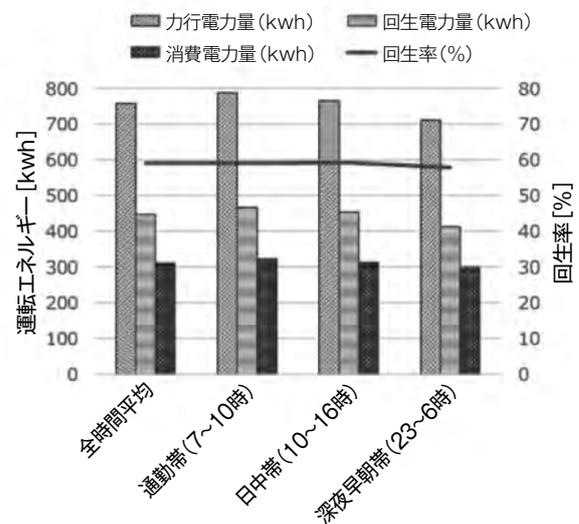


図6 1周あたりの運転エネルギーおよび回生率

表3 1周あたりの運転エネルギーおよび回生率

	全時間平均	通勤時間帯 7:00～10:00	日中帯 10:00～16:00	深夜早朝帯 23:00～翌6:00
力行電力量 (kWh)	756.9	788.5	764.9	711.2
回生電力量 (kWh)	446.5	466.0	452.5	412.1
消費電力量 (kWh)	310.4	322.5	312.4	299.1
回生率 (%)*	59.0	59.0	59.2	57.9
乗車率	—	高	中	低

※ 回生率=(回生電力量/力行電力量)×100

一方で、力行電力量に対する回生電力量を示す回生率の割合は乗車率の変動の影響を受けにくく、57.9～59.2%と概ね一定の値を示している。山手線で、E235系電車の前に使用されていたE231系電車における回生率が47%<sup>1)</sup>と報告されているのに対して、E235系電車では10%以上の向上が確認できた。E231系の分析時と比較して、本研究の検証データは新型コロナウイルス感染症の影響による緊急事態宣言期間(2021年6月)のものであり、平均乗車率には違いがあるが、前述のとおり乗車率が回生率に与える影響は小さいと考えられる。E235系ではSiC(シリコンカーバイド)半導体素子を採用したVVVFインバータ装置が採用されており、E231系と比較して回生ブレーキ性能が向上したため、高い回生率が得られたものと考えられる。

## 8. 運転時分と消費電力量の相関について

図7に山手線1周あたりの運転時分(停車時分は含まない)と消費電力量の分布を示す。山手線は終日各駅停車で運用されているが、駅間の運転時分は42～46分まで分布している。列車によって運転時分に差が生まれる理由として、曜日および時間帯により列車ダイヤに違いがあることや、先行列車の遅れ、ダイヤ乱れなどの運転状況に応じて臨機応変に運転されていることが挙げられる。また、運転時分が短くなるにしたがって、消費電力量が大きくなる傾向にある。これは、運転時分短縮のために、駅間で高い速度まで加速する必要があり、力行電力量が高くなるためである。本分布の近似直線は以下の式(2)で表される。

$$\text{消費電力量(kWh)} = -21.8 \times \text{山手線1周の運転時分(min)} + 1269.9 \quad (2)$$

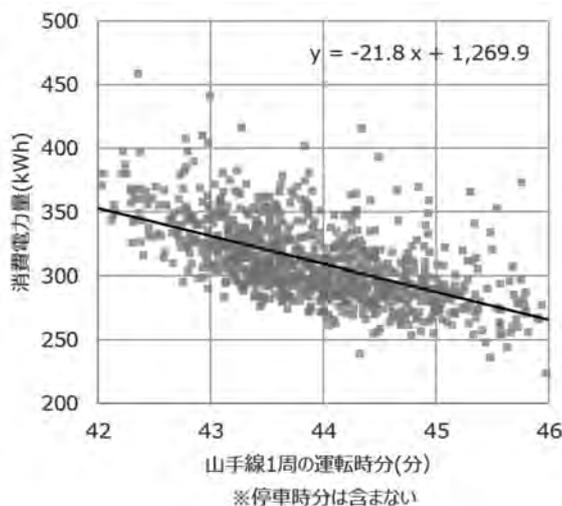


図7 1周あたりの運転時分と消費電力量の分布

式の傾きが-21.8であるので、運転時分を1分延長することで、消費電力量21.8kWh程度の削減効果が期待できる。近似直線の式の傾きは駅間ごとに異なり、消費電力量削減効果の高い駅間と、低い駅間が存在する。そのため、消費電力削減効果の高い駅間において重点的に最高速度を下げ、運転時分を延長することにより、効率的に線区全体の運転エネルギーの削減が期待できる。図8に運転時分融通による消費電力量削減イメージを示す。例えば、消費電力量削減効果の大きいA駅～B駅において運転時分を5秒延長し、消費電力量削減効果の小さいB駅～C駅において運転時分を5秒短縮することにより、A駅～C駅の運転時分は変えずに1.4kWh程度の消費電力量削減が期待できる。

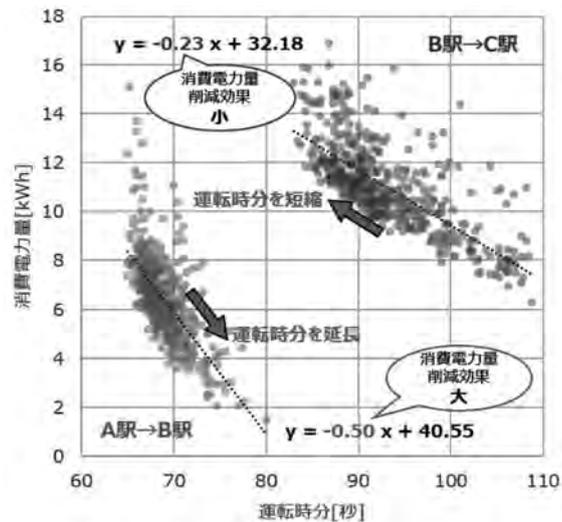


図8 運転時分融通による消費電力量削減イメージ

## 9. おわりに

本稿では、山手線E235系の車両モニタリングデータを収集し、大量の運転実績データを分析することで、力行時の力行電力量、回生ブレーキ時の回生電力量の傾向を把握した。これらを、駅間、速度帯、乗車率、運転時分などの条件によって抽出・可視化することで、従来の車種では把握が難しかった詳細な運転エネルギーの傾向を明らかにすることができた。

今後は、運転エネルギーの更なる削減に向け、本分析結果をもとに、より省エネとなる運転操作の検討を詳細に進めていく。さらに、消費電力量削減効果の大きい駅間と小さい駅間の間で運転時分を融通するなど、運転操作以外のアプローチとして、ダイヤ策定の考え方にもフィードバックして、省エネ効果を最適化できる検討も進めていく。

### 参考文献

- 1) 真保光男、神孫子博、藪田秀樹、水口芳樹：山手線における運転エネルギーの測定と分析、J-Rail2013(2013)