

Special edition paper

列車情報管理装置(INTEROS)による高効率な車両編成制御の開発



柴田 悠介^{*1}



豊永 師大^{*2}

Development on high-efficiency control system for traction motors that utilizes the functions of train condition management system (INTEROS)

Yusuke SHIBATA^{*1}, Norihiro TOYONAGA^{*2}

^{*1} Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory, Research and Development Center of JR East Group

^{*2} Chief Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory, Research and Development Center of JR East Group

Abstract

East Japan Railway Company has been researching energy-saving rolling stock and energy-saving driving methods in order to reduce train running energy. In this research, we developed high-efficiency control system for traction motors of the E235 Series that utilizes the functions of train condition management system (INTEROS). This paper reports the results of running tests on the Yokosuka/Sobu Rapid Line to confirm energy-saving effects and train running behavior.

●**Keywords:** Motor efficiency, Train formation torque control, Train condition management system, INTEROS, Energy-saving driving operation, Constant speed control

^{*}JR東日本研究開発センター エネルギー・環境ユニット 研究員

^{*}JR東日本研究開発センター エネルギー・環境ユニット 主幹研究員

1. 緒言

JR東日本グループは2020年度に環境目標として、「ゼロカーボン・チャレンジ2050」を策定し、2050年度CO₂排出量「実質ゼロ」に挑戦している。鉄道は環境に優しい輸送機関と言われるものの、当社では年間約47億kWhのエネルギーを使用しており、列車の運転エネルギーが全体の約8割を占めている¹⁾(図1)。そのため、列車の運転エネルギーの削減に向けて、新型の省エネ車両の導入の他、乗務員の運転操作による省エネ運転の研究²⁾など、ハードとソフトの両面から様々な取組みを実施している。

本稿では、列車の運転エネルギーの削減に向けた車両制御からのアプローチとして、横須賀・総武快速線E235系の列車情報管理装置INTEROS(インテロス)によるモーターの高効率車両編成制御(以下、省エネ編成制御)の開発について紹介する。

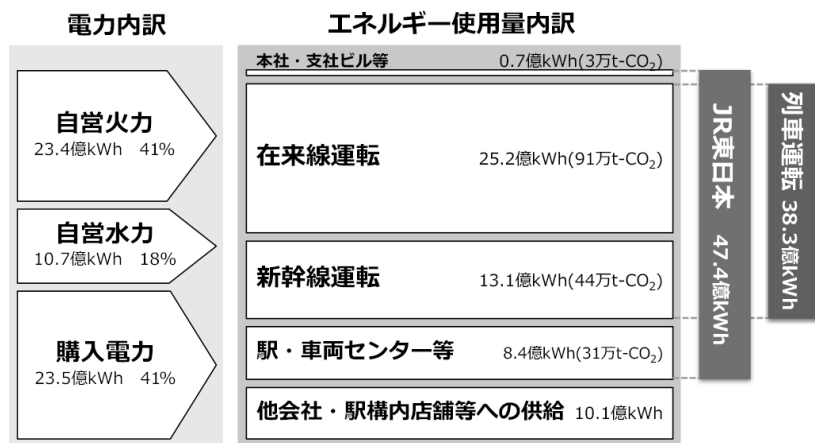


図1 JR東日本のエネルギー消費内訳

2. 省エネ編成制御の概要

電車のモーターは使用条件によりモーター効率が変動するため、高効率の領域で駆動するように制御することで省エネ化を図ることができる。図2に横須賀・総武快速線E235系のモーター効率マップの例を示す。速度とトルクが大きくなるにつれて、モーター効率が高くなることが分かる。一方で、車両が出力するトルクパターンは運転士が指定するノッチ、列車速度、乗車率などの条件により決められており、必ずしもモーター効率を意識した設定とはなっていない。

そこで本開発では、編成中のモーターをより高効率で動作させ、主回路機器の損失を最小限にすることを目的として、車両速度およびトルクに応じて稼働するモーター数を最適化する制御を開発した。具体的には、図3に示すように、稼働モーター数を最適化し、非稼働モーター分のトルクを稼働モーターに負担させることで、編成として必要なトルクを維持したまま、モーター効率の高い条件で動作させることが可能となった。

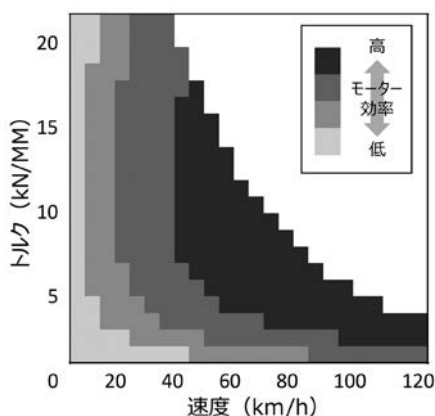


図2 モーター効率マップの例

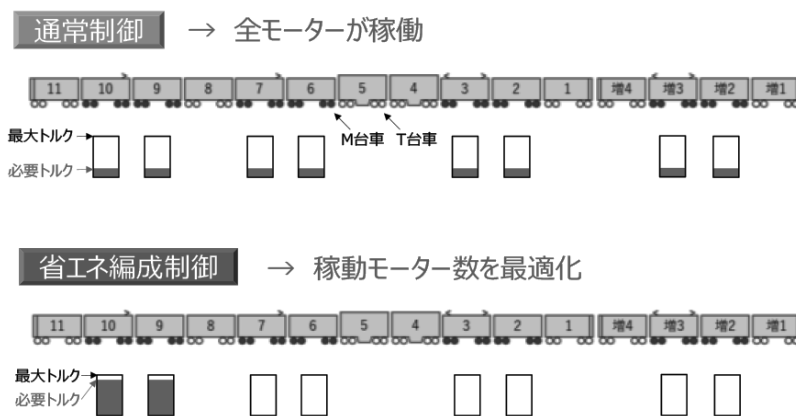


図3 省エネ編成制御の動作イメージ

3. 省エネ編成制御のアルゴリズム

図4に省エネ編成制御のアルゴリズムのイメージを示す。通常の制御方式では、乗務員のノッチ操作、車両速度、乗車率の入力条件から、INTEROSで編成必要トルクを演算し、各VVVFインバータ装置にトルク指令値を出力している。一方、省エネ編成制御では、通常の制御方式同様に編成必要トルクを演算後、事前にINTEROS内部に保持させた以下の2つのテーブルを参照する。

- ①最適効率テーブル：各M車のトルク負担割合を、あらかじめモーター効率が最高となるように計算して保持する。速度と編成必要トルクに応じて、M車の負担割合を決定する。
- ②M車割当てテーブル：稼働M車の平準化（主回路機器の稼働時間の平準化）を目的として、あらかじめ稼働M車の割当てパターンを保持する。駅停車ごとに稼働M車の割当てパターンを切り替える。

編成必要トルクを省エネの観点から最適分配して各VVVFインバータ装置にトルク指令値を出力することで、編成全体のモーター損失を最小化することが可能となる。

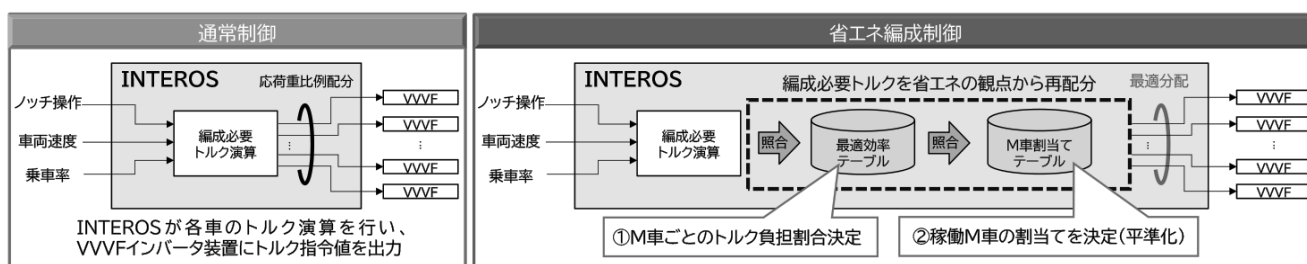


図4 省エネ編成制御のアルゴリズムのイメージ

省エネ編成制御は、モーター効率が低い動作点を高い動作点に移すことによって、省エネ効果を得る制御である。本制御は必要なトルクが比較的小さい運転条件で効果的である。例えば、定速運転（主回路の定速機能により走行中に設定された速度を一定に維持する制御）や低ノッチでの力行時などモーターが低負荷となる状況では、通常制御でモーター効率が低いため、省エネ編成制御を用いることで効率を改善することができる。

一方、省エネ編成制御では、モーター1台が負担するトルクが通常制御よりも大きい状況となる。そのため、粘着性能の問題が発生しないか、主回路機器（モーター・VVVFインバータ装置・フィルタリアクトル）に対して熱的な悪影響がないかを走行シミュレーションにより確認し、省エネ編成制御の動作条件を検討した。検討結果を表1に示す。

表1 省エネ編成制御の動作条件（15両併結編成時）

運転モード		省エネ編成 制御動作	動作条件（対象外の事由）
力行	1N（最小ノッチ）	対象外	（トルクパターンが特殊なため）
	2～4N（中間ノッチ）	対象	全 8M 車の内、最大 6M 車まで開放可能
	5N（最大ノッチ）	対象外	（通常制御で既にモーター効率の高い動作点で使用されており、モーター効率の更なる向上が見込めないため）
定速運転（速度維持）		対象	全 8M 車中最大 6M 車まで開放可能
ブレーキ		対象外	（モーター1台当たりの回生トルク増大により滑走の可能性が高まるため）

4. 現車走行試験による評価

現車走行試験により、開発した省エネ編成制御の評価を行った。通常制御との比較を行うため、INTEROSのソフトウェアを変更した上で、同一区間で同一の運転操作により列車を走行させて、車両データの比較を行った。表2に走行試験の概要を示す。運転操作ごとに設定した各試番において、走行キロ程が同一となる区間について、INTEROSから取得した車両データを基に消費電力量を算出した。また、乗り心地を評価するため、車内に設置した加速度センサから前後振動加速度を測定した。

表2 走行試験の概要

試験車両	横須賀・総武快速線 E235 系 15 両併結編成
試験区間	横須賀線 品川～大船間
運転操縦	省エネ編成制御が動作する運転モードを多用したランカーブ（図5）
測定項目	・消費電力量 ・前後振動加速度（乗り心地） など

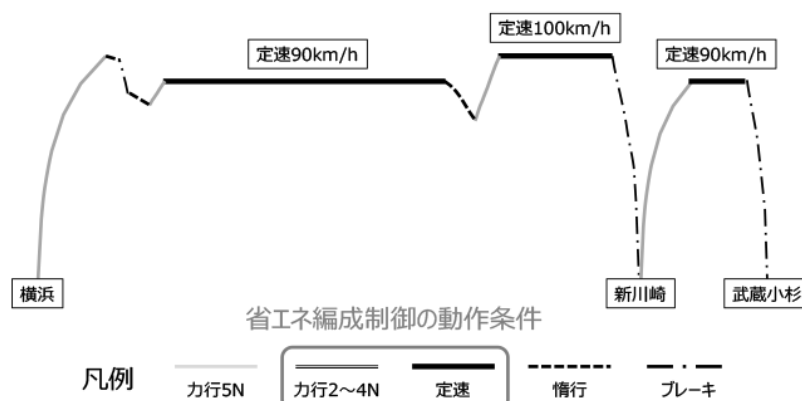


図5 試験ランカーブのイメージ（横浜～武蔵小杉）

4・1 力行2～4N (中間ノッチ) の省エネ効果

表3に力行2～4N (中間ノッチ) の省エネ効果を示す。省エネ効果は最大でも0.6%程度であり、効果は限定的であった。省エネ効果が得られなかった要因として、以下の2点が考えられる (図6参照)。

- ①M車開放によりモーター1台当たりの負荷を上げてもモーター効率が向上しない (低速域)
- ②通常制御におけるトルクが大きく、元々高効率域で動作しているため、モーター効率の改善幅が小さい (中～高速域)

表3 力行2～4N (中間ノッチ) の省エネ効果

力行ノッチ (速度変化)	消費電力量 (通常制御)	消費電力量 (省エネ編成制御)	省エネ 効果
2N (0→20km/h)	2.73 kWh	2.75 kWh	-0.2%
3N (0→65km/h)	26.95 kWh	26.78 kWh	0.6%
4N (0→90km/h)	49.90 kWh	49.84 kWh	0.1%

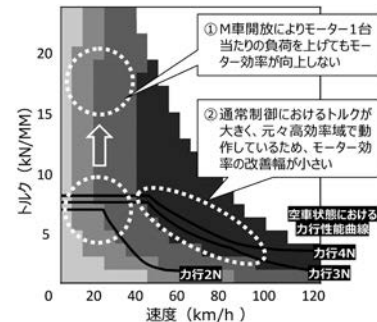


図6 中間ノッチで省エネ効果が得られなかった要因

4・2 定速運転時の省エネ効果

表4に定速運転時の省エネ効果を示す。定速運転では通常制御に対して平均6.9% (最小1.9%～最大13.9%) の省エネ効果が確認した。図7に定速運転における速度と省エネ効果の分布を示す。速度が高くなるにつれて、省エネ効果が小さくなる傾向にあることが分かった。これは、速度が高くなるにつれて元々モーター効率が高い条件で運転されていたためと考えられる。加えて、省エネ効果が5%を下回る試番では、稼働M車数が変動する際に、4M車程度の大きな変動 (2M車→6M車→2M車など) が試番中に複数回確認された。

省エネ効果が大きい試番 (図8) では、稼働M車の変化が少ない傾向になった。通常制御では、編成内の全8M車が稼働しているが、省エネ編成制御では、全8M車中の2M車が稼働しており、省エネ編成制御の意図通りに一部のM車が開放されていることが分かる。稼働M車が少ない状態を維持することで、モーター効率の高い条件で長時間運転できたため、高い省エネ効果が得られたものと考えられる。

表4 定速運転の省エネ効果

試番	速度	走行距離	消費電力量 (通常制御)	消費電力量 (省エネ編成制御)	省エネ 効果
1	70 km/h	1500 m	11.80 kWh	10.59 kWh	10.3%
2	80 km/h	4100 m	20.34 kWh	17.52 kWh	13.9%
3	80 km/h	4600 m	12.94 kWh	11.50 kWh	11.1%
4	90 km/h	4380 m	33.38 kWh	29.47 kWh	11.7%
5	90 km/h	730 m	12.63 kWh	12.37 kWh	2.0%
6	90 km/h	4100 m	32.08 kWh	30.45 kWh	5.1%
7	100 km/h	710 m	6.26 kWh	5.88 kWh	6.2%
8	100 km/h	2010 m	29.32 kWh	27.96 kWh	4.7%
9	100 km/h	890 m	21.62 kWh	21.20 kWh	1.9%
10	100 km/h	3050 m	33.02 kWh	31.64 kWh	4.2%
合計			213.39 kWh	198.58 kWh	6.9%

※定速運転区間500m未満、消費電力量5kWh未満の試番は算出対象外

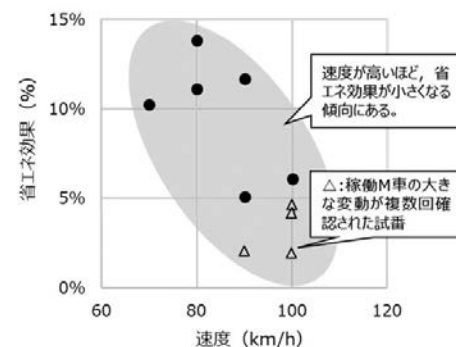


図7 定速速度と省エネ効果の関係

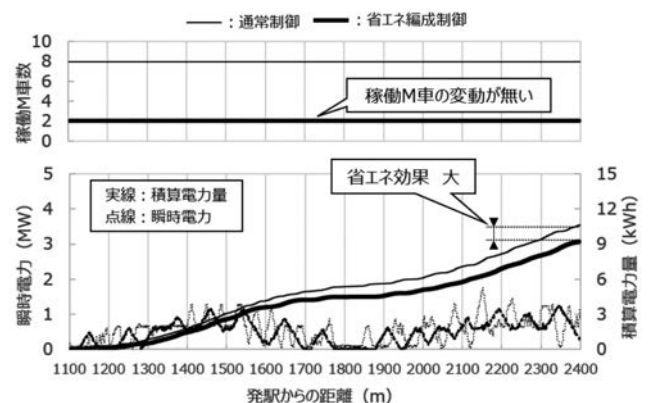


図8 省エネ効果が大きい試番 (No.1) の結果

省エネ効果の小さい試番(図9)では、稼働M車が大きく変動する挙動が確認された。これは、稼働M車が変化(主回路機器が起動または停止)する際に、トルクが小さい領域(モータ効率が低い領域)で動作することで、稼働M車数を最適化させることによって得られる省エネ効果が低下したものと考えられる。また、稼働M車が大きく変動するような状況では、通常制御と比較して、前後振動加速度の値が大きくなり、乗り心地に悪影響を及ぼす可能性があることが分かった(図10)。

省エネ編成制御では、最適効率テーブルを参照する際に、編成トルクと速度に応じて稼働M車数が決定される。一方、定速運転は目標設定速度に対する速度偏差に応じて、出力する編成トルクが変わる制御仕様であるため、1~2km/h程度の小さな速度変化であっても、編成トルクに急激な変化が生じる。そのため、走行抵抗が変動する勾配などの線形条件によって、車両速度および編成トルクが急激に変動するような場合は、稼働M車が大きく変化する。稼働M車の変化量は省エネ効果や乗り心地に大きく影響しており、定速運転時に一定の省エネ効果を確認できた一方、稼働M車の大きな変動は今後の課題と考える。「稼働M車の変化量を制限する」、「編成トルクの急激な変動を抑制する」など、引続き制御の改良に向けた検討を進める。

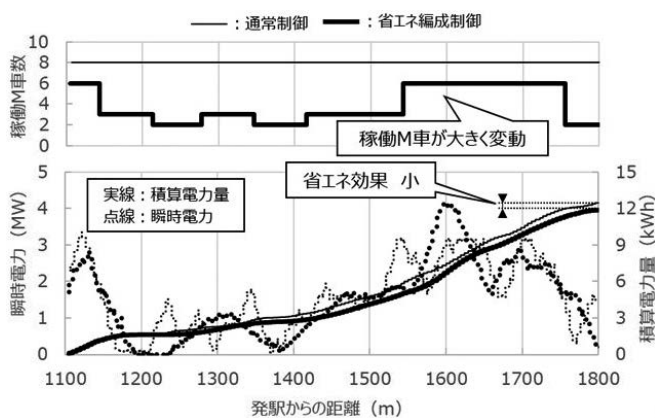


図9 省エネ効果が小さい試番(No.5)の結果

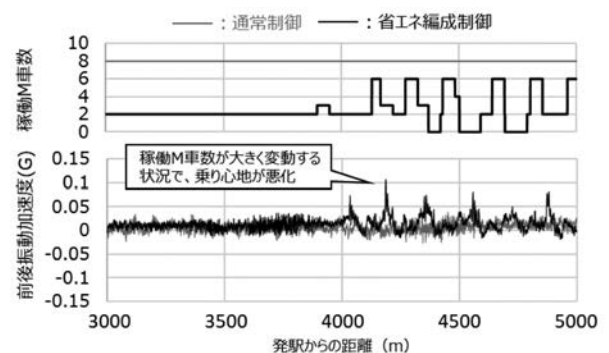


図10 稼働M車と前後振動加速度の推移

5. 結言

横須賀・総武快速線E235系を対象に、モーターの高効率化を目的とした「省エネ編成制御」を実現する列車情報管理装置(INTEROS)のソフトウェア開発を行い、現車走行試験による評価を行った。定速運転時に一定の省エネ効果を確認できた一方、稼働M車数が大きく変動した際の省エネ効果および乗り心地の悪化は今後の課題と考える。本制御の営業車への導入に向けて、省エネ性能の更なる向上と乗り心地の改善に向けた制御の改良を進めていく。本研究で対象とした横須賀・総武快速線のように、駅間距離が比較的長く、定速制御が使われやすい線区条件では、省エネ編成制御のように、主回路機器の運用方法の工夫などソフト面の対策を講じることで、一定の省エネ効果が得られることを確認できた。本研究で得られた知見を基に、他線区、他車種への展開を見据えた検討も進めていく。

参考文献

- 1) JR東日本グループレポート2024
- 2) 柴田 他: 省エネ運転支援ツールの開発、JR-EAST Technical Review, No69 (2023)