

運転曲線作成システムと汎用シミュレータとの連携による主電動機の性能評価

横内 俊秀* 岡本 侑己** 近藤 稔*

Performance Evaluation for Traction Motor
by Collaborating of Train Run Curve Preparation System and General Simulator

Toshihide YOKOUCHI Yuki OKAMOTO Minoru KONDO

In development of traction motors for rolling stocks, it is important to evaluate power consumption and temperature rise of traction motors during operations because they are important performance metrics. In particular, when a traction motor is to be used in an operation, it is common to evaluate power consumption and temperature rise for a line and a run curve by a running simulation in advance. This study aims to adapt SPEEDY, a train run curve preparation system with long years of experience, to running simulations, linking a general-purpose simulator that creates models of traction motors. In this report, running simulations are conducted assuming a commuter train with high-efficiency induction motors. As a result, the amount of energy consumption is reduced by up to 17% by using a high-efficiency induction motor. In addition, the temperature rise is kept within the appropriate range.

キーワード：主電動機，消費電力量，温度上昇，SPEEDY，走行シミュレーション

1. はじめに

鉄道車両に使用される主電動機の開発に当たっては、走行時の消費電力量や温度上昇の定量的な評価が重要である。消費電力量に関しては、地球温暖化対策のための二酸化炭素排出量削減等の目的から幅広い分野で省エネルギー化が要求されている。日本では「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」により鉄道事業者に対して、さらなる鉄道輸送の省エネルギー化が求められている。また、温度上昇の点では、主電動機の寿命を支配する固定子巻線の絶縁材料の劣化速度が温度の影響を受けるため、温度上昇を限度内に収める必要がある。そのため、実運用への車両投入を計画する場合、予め走行シミュレーションを使用して線区や運用に応じた主電動機の消費電力量や温度上昇を評価するのが一般的である。

本研究では、鉄道総研が開発し、運転曲線作成システムとして長年実績のある「SPEEDY」を活用した走行シミュレーション法を提案する。SPEEDYを活用することで、車両性能や地上設備、運転条件等の複合要素を考慮して、走行シミュレーションに必要な運転曲線および主電動機の運転パターンを決定する。さらに、汎用シミュレータを使用して、運転パターンに応じて主電動機の温度上昇および損失を計算するモデルおよび車両の消費電力量計算機能を実装する。このように、SPEEDYと汎

用シミュレータを連携させることで、任意の設計仕様に対する主電動機性能を評価するシステムを構築する。

2. 使用ソフトウェア

2.1 SPEEDY

SPEEDYは、鉄道総研が開発した運転曲線作成システムである。SPEEDYでは、表1に示すようなデータが入力されることで、運転曲線が自動的に作成される。現在、基本運転時分の算出のほか新製車両や新線計画に必要なシミュレーション等の用途で、複数事業者で使用されている。

2.2 汎用シミュレータ

今回は汎用シミュレータとしてWolfram Research社製のSystem Modelerを使用する。System Modelerは様々な物理量を扱うモデルの作成およびモデルを使用したシミュレーションを行うソフトウェアであり、モデルはModelica言語を使用して記述される。

表1 SPEEDYにおける入力

データ	項目
車両性能	編成重量，編成駆動軸数，最高速度等
引張力	速度－引張力特性
線路設備	曲線，勾配，分岐器，駅等
信号	信号現示
走行条件	走行区間，番線，通過・停車等

* 車両技術研究部 駆動システム研究室

** 元 車両制御技術研究部 動力システム研究室

3. ソフトウェアの連携

3.1 概要

ソフトウェア連携の概要を図1に示す。本研究では既存のSPEEDYに下記機能を追加・拡張し、System Modelerとの連携を図った。

- (1) 主電動機回転速度およびトルクの計算機能
- (2) 減速時にブレーキ力一定として減速度を計算する機能（走行抵抗を加味する）
- (3) 運転曲線、主電動機回転速度およびトルクデータ（以下、「負荷パターン」と呼ぶ）の出力機能
- (4) System Modelerの出力ファイル（消費電力、温度上昇）の読み込み・表示機能

System Modelerは負荷パターンに応じて、主電動機における消費電力および温度上昇を計算する。計算に用いるモデルの作成にあたっては、主電動機新製時の型式試験結果から電気的なモデルおよび熱的なモデルの定数を同定する。以下に詳細を述べる。

3.2 SPEEDYの拡張

既存のSPEEDYは主電動機性能評価に必要な主電動機の回転速度およびトルクを計算しない。そこで、式(1)、式(2)に従い、運転曲線から主電動機の回転速度 N [rpm]および力行時のトルク τ [N・m]を計算する機能を付加する。

$$N = \frac{1000GR}{60\pi(D_w/1000)} v \quad (1)$$

$$\tau = \frac{D_w/1000}{2GR(\eta_g/100)} F \quad (2)$$

ここで、 GR ：歯車比、 D_w ：車輪径 [mm]、 v ：列車速度 [km/h]、 η_g ：歯車効率 [%]、 F ：主電動機1台分の引張力 [N]を示す。一方、減速時のトルクは回生ブレーキ力に比例する。一般的な在来線電車では、高速域になると最大回生ブレーキ力が低下するため、機械ブ

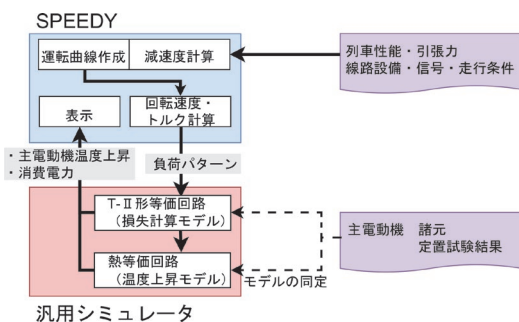


図1 ソフトウェア連携の概要

レーキで必要なブレーキ力を補償する（図2）。そこで、減速時の主電動機トルクは、必要ブレーキ力のうち回生ブレーキ分から計算する。

次に、既存のSPEEDYでは、減速時に減速度一定として運転曲線を作成している。一方、実際の在来線電車はあるブレーキノッチに対してブレーキ力一定となるように設計されている場合が多い。また、消費エネルギーを評価するためには走行抵抗を適切に考慮する必要がある。そのため、一定のブレーキ力に対して走行抵抗を加味した減速度を基に運転曲線を作成する仕様とする。走行抵抗 R [N]は、在来線電車の評価で使用される式(3)¹⁾を使用する。

$$R = (12.936 + 0.16072v)W + \{0.2744 + 0.07644(n - 1)\}v^2 \quad (3)$$

ここで、 W ：車両質量 [t]、 n ：編成両数である。このうち、第1項は機械抵抗、第2項は空気抵抗および主電動機の機械損の和としている。在来線用主電動機の機械損は自己通風ファンの損失が主であり、その速度に対する特性は空気抵抗に類似しているため、このように整理する。

また、既存のSPEEDYに対して、負荷パターンの出力機能を追加することで、System Modelerでの計算に必要なデータを渡す仕様とした。

そして、System Modelerで計算された消費電力および主電動機の温度上昇データをSPEEDYのGUI上で確認するため、System Modelerの出力ファイルを読み込む機能を付加した。

3.3 汎用シミュレータによる計算モデル

主電動機の性能評価では損失および温度上昇を評価するため、それぞれ損失計算モデルおよび温度上昇モデルを作成する。

まず、主電動機の損失計算モデルについて述べる。主電動機の損失は固定子銅損、回転子銅損、漂遊負荷損、鉄損、機械損に分類される。これらのうち、機械損以外は電気規格調査委員会標準規格JEC-2137²⁾で定められ

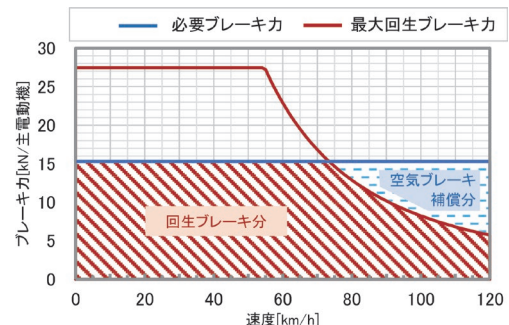


図2 ブレーキ力

た図3のT-II形等価回路を使用して計算する。機械損は後述するように実測結果に基づき評価する。

また、主電動機の温度上昇モデルは、図4の全損失を熱源とする熱等価回路モデルを使用する。有限要素法を用いた解析と比較して計算負荷が小さいため、走行シミュレーションのように各時刻の温度上昇を計算するケースでは熱等価回路モデルが適していると考えられる。

熱等価回路における総括熱伝達率 H_t [W/K] および熱容量 C [J/K] は、連続定格温度上昇試験および1時間定格温度上昇試験の結果から式(4)および式(5)のように算出することができる。

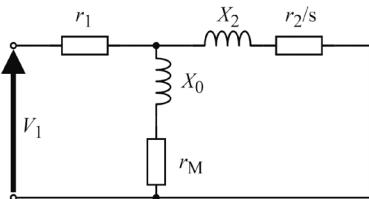
$$H_t = \frac{w_{tc}}{\theta_c} \quad (4)$$

$$C = -\frac{H_t \times 3600}{\log\left(1 - \frac{\theta_1}{w_{t1}/H_t}\right)} \quad (5)$$

ここで、連続定格温度上昇において、 w_{tc} ：試験での全損失 [W]、 θ_c ：試験終了時の温度上昇 [K] である。また、1時間定格温度上昇試験において、 w_{t1} ：試験での全損失 [W]、 θ_1 ：試験終了時の温度上昇 [K] である。

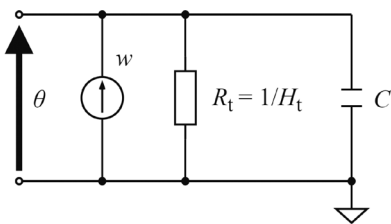
このように図4のようなシンプルな熱等価回路を採用することで、新製時に通常実施される1時間定格と連続定格の温度上昇試験結果のみから温度上昇モデルの作成ができる。

なお、検討対象とする誘導電動機は自己通風冷却方式



r_1 ：一次抵抗
 r_2 ：二次抵抗、 X_2 ：二次漏れリアクタンス
 r_M ：鉄損抵抗、 X_0 ：励磁リアクタンス、 V_1 ：相電圧、 s ：すべり

図3 T-II形等価回路（一相分）



w ：全損失[W]、 R_t ：総括熱抵抗[K/W]、 H_t ：総括熱伝達率[W/K]
 θ ：温度上昇[K]、 C ：熱容量[J/K]

図4 熱等価回路

を採用しており、冷却性能は主電動機回転速度に依存する。そこで、本論文では総括熱伝達率 H_t を回転速度の関数とすることで、自己通風による冷却性能の変化を表現する。ここで冷媒の物性値が冷媒温度に対して一定であり、熱伝達率の変化が実験式³⁾に従うと仮定すると、 H_t と冷媒の流速 V [m/s] の間には式(6)の関係が成立する。

$$H_t \propto V^{0.8} \quad (6)$$

また、 V が回転速度 N [rpm] に比例すると仮定すると、 N_R を連続定格回転速度として、 N に対する H_t は式(7)で表される。

$$H_t(N) = H_t(N_R) \times \left(\frac{N}{N_R}\right)^{0.8} \quad (7)$$

力行電力は主電動機の機械出力に主電動機損失を加えて算出し、回生電力は機械入力から主電動機損失を引いて算出する。消費電力量は力行電力量から回生電力量を引いて算出する。列車走行時に発生する機器損失は、主電動機損失の他にインバータ損失（フィルタリアクトル損失を含む）、走行抵抗損失、歯車損失を考慮する。

4. 評価

4.1 評価条件

4.1.1 運転曲線

本シミュレーション法の有効性を例示するための対象車両として、大都市圏の地下鉄線または近郊線に使用される通勤電車を想定した。評価では、日本鉄道車輛工業会規格 JRIS R 1001:2003 鉄道車両—通勤・近郊電車の標準仕様ガイドライン⁴⁾のうち「タイプA」（20m車両、8両編成）を参考にして車両データを SPEEDY に入力し、走行シミュレーションを実施した。表2に想定した車両諸元を示す。

また、評価する線路設備データとして、鉄道車両の消

表2 車両諸元

編成	4M4T 8両 (Tc-M1-M2-T-T-M1-M2-Tc)
編成質量	323.2t (100%乗車)
乗車定員	1200人
最高運転速度	120km/h
減速度	1.5km/h/s (減速時) 2.5km/h/s (停車時)
歯車比	7.07 (99/14)
インバータ効率 (フィルタリアクトル含む)	98%
減速機効率	98%

費エネルギーを評価することを目的とした欧州規格 EN50591:2019 Railway Applications - Rolling Stock - Specification and verification of energy consumption⁵⁾で規定された標準路線を参考にして設定した。主電動機の性能評価において、消費電力や温度上昇は想定する路線に依存する。そのため、特徴の異なる複数種類の路線を対象として評価・比較することで、消費電力や温度上昇への路線の影響を確認することができると思われる。評価に使用した標準路線データは以下の3種類である。

- (1) Suburban Passenger Traffic (以下、「Suburban線」)
→郊外路線を想定
- (2) Regional Passenger Traffic (以下、「Regional線」)
→地方路線を想定
- (3) Metro Passenger Traffic (以下、「Metro線」)
→地下鉄線を想定

各路線の諸元を表3、制限速度および標高を図5～図7にそれぞれ示す。なお、Regional線の最高制限速度は140km/hだが、想定する車両の最高運転速度は120km/hなので、実質的に120km/hが最高制限速度である。

4.1.2 主電動機

計算対象とする主電動機は過去に鉄道総研で設計した、2種類の誘導電動機（「形式A」および「形式E」⁶⁾）を評価に使用した。各形式の定格を表4に示す。また、文献ではT形等価回路として与えられているが、これはT-II形等価回路と可換であるため、変換後のパラメータを表5に示す。なお、形式Eは、形式Aの高効率化を目的として、固定子巻線の素線絶縁、回転子導体、鉄心等の材料を変更したことで、固定子銅損、回転子銅損、鉄損を低減したものである。

機械損は、評価対象とする2形式の測定実績がないため、同程度の出力、寸法を有する過去に鉄道総研が開発した誘導電動機の測定結果を基に算出した。なお、機械損は主電動機回転速度の3乗に比例するとみなした。

主電動機の温度上昇モデルも、上記誘導電動機の測定結果を参考に決定した。これは、評価対象とする2形式

は実際には製作されていないため、連続定格温度上昇試験および1時間定格温度上昇試験が未実施のためである。上記測定結果から、熱容量Cは134kJ/K、総括熱伝達率H_tは図8のように得られた。

4.2 結果

各路線について得られた運転曲線を図9～図11に示

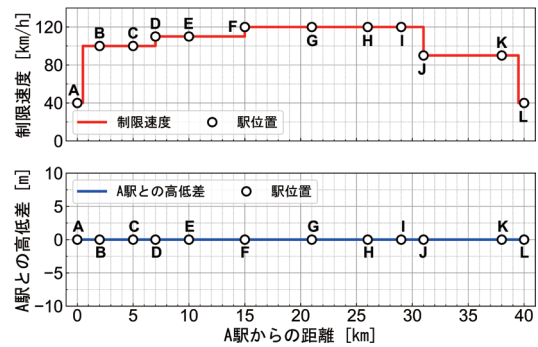


図5 Suburban線の制限速度および標高

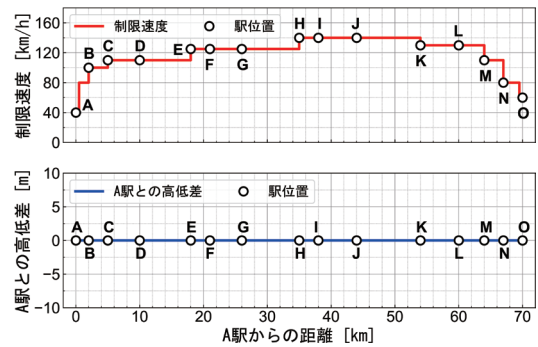


図6 Regional線の制限速度および標高

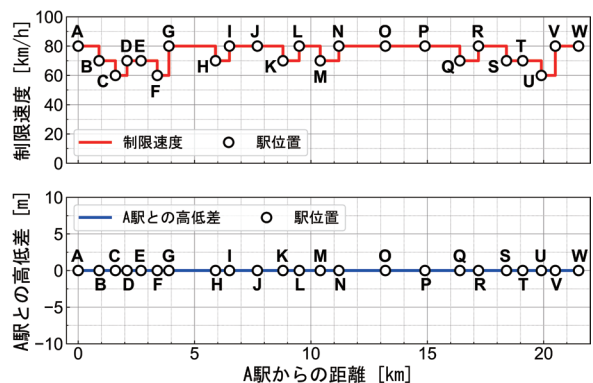


図7 Metro線の制限速度および標高

表3 各路線の諸元

	Suburban	Regional	Metro
総距離[km]	40.0	70.0	21.5
駅数	12	15	23
最高制限速度[km/h]	120	140	80
走行時間目安[h:mm:ss]	0:33:00	0:53:00	0:30:30
平均速度[km/h]	72.7	79.2	42.3
停車駅での停車時間 [mm:ss]	01:00	02:00 ^{※1} 01:00 ^{※2}	00:30

※1 E, H, K 駅

※2 E, H, K 駅を除く全駅

表4 主電動機定格

形式	出力 [kW]	電圧 [V]	電流 [A]	回転速度 [rpm]	周波数 [Hz]	効率 [%]
A	190	1100	138	1825	62.3	90.1
E			137		61.4	92.6

表5 T-Ⅱ形等価回路パラメータ

形式	r_1	r_2	X_0	X_2	r_M
A	0.104	0.137	9.10	0.769	164.8
E	0.090	0.058	8.76	0.750	187.3

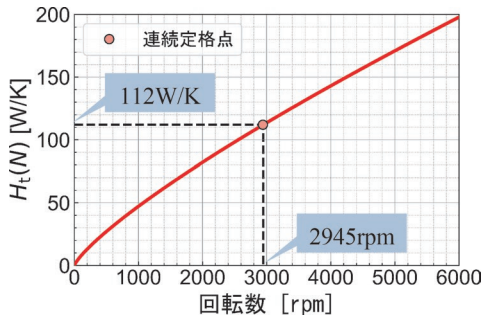


図8 総括熱伝達率

す。また、走行時間および平均速度を表6に示す。

さらに、主電動機の性能評価の計算結果として、消費電力量を図12、損失を図13に示す。縦軸の「エネルギー消費原単位」は、消費電力量を走行距離と車両数で除した値である。図12より、各路線のエネルギー消費原単位は0.9~1.1程度であるが、通勤列車における過去のエネルギー消費実測結果⁷⁾や、走行シミュレーションによる過去の計算結果⁸⁾では0.8~1.1程度であり、これらの結果と概ね一致した。また、形式Eと形式Aを比較すると、平均速度が高く駅間距離も長いSuburban線およびRegional線において消費エネルギーの低減率は約10%であるが、平均速度が低く駅間距離の短いMetro線では約17%であった。さらに、図13より、主電動機損失のうち特に回転子銅損の低減が全損失の低減に大きく影響しており、Metro線ではその影響が顕著に表れた。以上から、Metro線のような比較的低速な路線において、損失の低減や回生性能の向上といった主電動機の性能向上がエネルギー消費量の低減に影響することが示された。

続いて、温度上昇の計算結果として走行終了時の温度上昇量を図14に示す。また、路線別の温度上昇の推移を図15~17にそれぞれ示す。図14より、各路線で形式Eが形式Aに対して約30%温度上昇が抑えられており、主電動機の損失低減が温度上昇の抑制にもつながったと考えられる。また、形式A、形式Eともに絶縁等級はH（運転時の許容最高温度180℃）であることから、温度上昇は使用限度の範囲内に抑えられ、列車の走行に耐え得ることが確認された。

このように、提案するシミュレーション手法を用いることで、主電動機の型式試験結果を基に走行時の温度上昇を評価することが可能となるとともに、主電動機の設計に起因するエネルギー消費量の低減効果を評価できる。

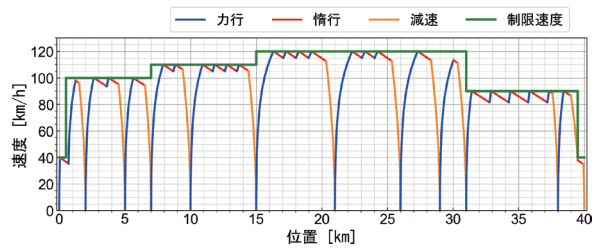


図9 運転曲線 (Suburban線)

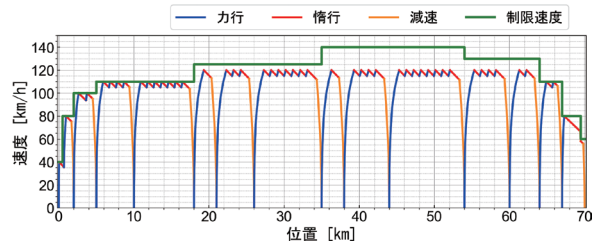


図10 運転曲線 (Regional線)

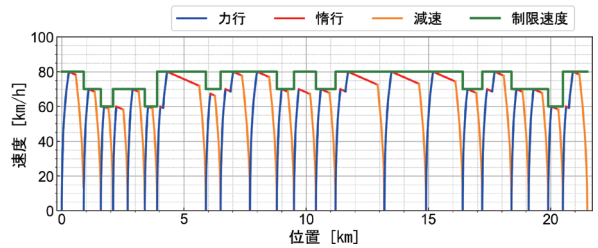


図11 運転曲線 (Metro線)

表6 走行時間

	Suburban	Regional	Metro
走行時間目安 [mm:ss]	33:00	53:00	30:30
走行時間 [mm:ss]	31:11	48:02	26:50
走行時間の差 [mm:ss]	01:49	04:58	03:10
平均速度 [km/h]	77.0	87.4	48.1

5. おわりに

本報告では、SPEEDYと汎用シミュレータの連携により、走行シミュレーションを実施して主電動機の性能評価を行う手法について、構築した手法の有効性を検証した。規格で定められた標準車両および標準路線を対象に、過去に設計した効率の異なる2種類の誘導電動機を対象に走行シミュレーションを実施し、消費電力量や温度上昇の評価を行った。消費電力量については、高効率誘導機を使用することで、平均速度が低く駅間距離が短い地下鉄線を想定した路線の走行時に約17%低減されることが分かった。また、温度上昇は主電動機の自己通風による冷却の影響を考慮して評価を行い、各主電動機形式、路線の組み合わせにおいて使用限度範囲内に抑え

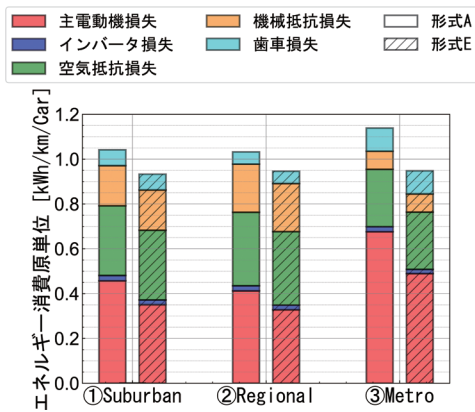


図 12 消費電力量

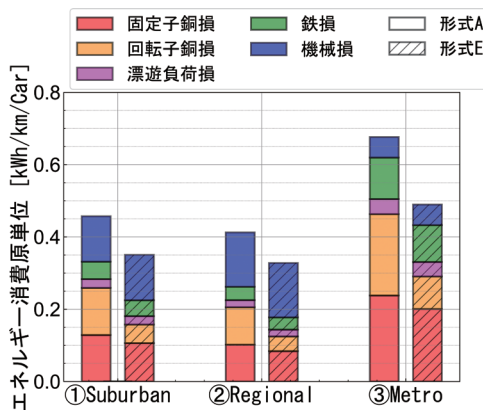


図 13 主電動機損失

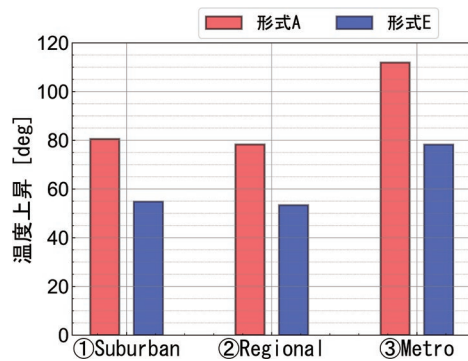


図 14 走行終了時の温度上昇

られていることが確認された。

今後は、温度上昇の評価結果について、実測結果との比較による評価結果の妥当性の検証を目指す。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

1) 運転理論研究会：運転理論（再改訂版）—基礎知識と応用

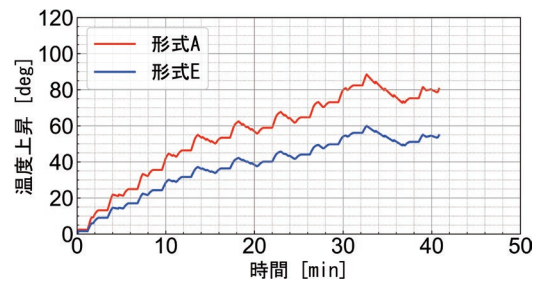


図 15 温度上昇推移 (Suburban 線)

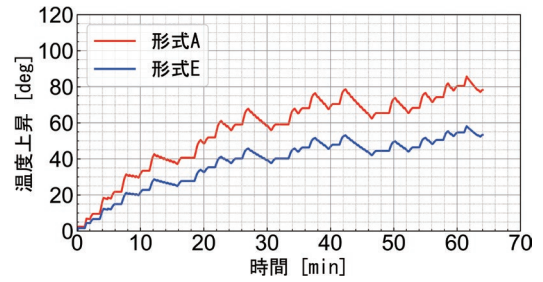


図 16 温度上昇推移 (Regional 線)

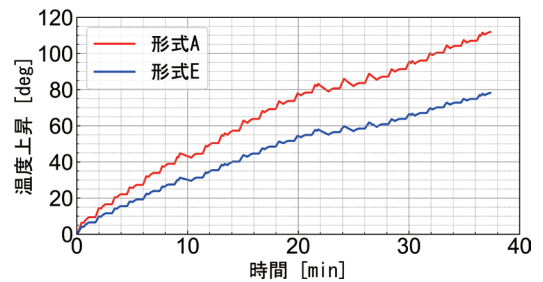


図 17 温度上昇推移 (Metro 線)

実務一，日本鉄道運転協会，pp.16-19, 44-72, 101-105, 2003

2) 電気学会 電気規格調査会標準規格 JEC-2137-2000：誘導機，2000

3) 日本機械学会：伝熱工学資料 改訂第 5 版，日本機械学会，pp.45-46, 2009

4) 日本鉄道車輛工業会：JRIS R 1001：2003 鉄道車両—通勤・近郊電車の標準仕様ガイドライン，2003

5) CENELEC, "EN 50591 Railway Applications - Rolling Stock - Specification and verification of energy consumption," 2019.

6) 近藤稔：主電動機の高効率設計による電車の省エネルギー効果，鉄道総研報告，Vol.23, No.11, pp.29-34, 2009

7) 本倉幹弘：E233 系，E231 系における回生エネルギーの現況，鉄道車両と技術，Vol.14, No.11, pp.6-9, 2009

8) 近藤稔，宮部実：走行シミュレーションによる高効率誘導電動機の消費電力量評価，鉄道総研報告，Vol.27, No.12, pp.47-52, 2013