

営業車両における車両情報記録装置を活用した 走行抵抗の推定手法

小川 知行* 真鍋 慎一** 吉川 岳***
今村 洋一# 影山 真佐富#

A Method of Calculating Running Resistance using Commercial Train Data Obtained
by a Train Data Collection Device

Tomoyuki OGAWA Shinichi MANABE Gaku YOSHIKAWA
Yoichi IMAMURA Masahisa KAGEYAMA

Running resistance is one of important factors to design train performance and to plan speed profiles. Running resistance is also an important factor to analyze energy consumption, because it causes majority of energy consumption. This paper proposes a method of calculating running resistance under various conditions without the running tests by using commercial train data obtained by a train data collection device. This paper verifies the proposed method by a running test result. This paper further presents running resistance under various conditions calculated by the proposed method.

キーワード：走行抵抗，車両情報記録装置，消費エネルギー，エネルギー計算，機械抵抗，空気抵抗

1. はじめに

列車の走行抵抗は、車両性能検討や運転曲線作成に用いられる重要なパラメータの一つである。近年は、消費エネルギー削減の要請が高まり、列車運行に伴う消費エネルギーの多くを走行抵抗が占めるため、省エネルギー技術の検討においても重要な要素として考えられている。車両走行エネルギーシミュレータ¹⁾を用いて試算した消費エネルギーの内訳の一例を図1に示す。列車の走行パターンによってその割合は異なるが、同一区間を走行した本例では普通列車で37%、快速列車で52%のエネルギー損失を走行抵抗が占めている。これより、走行抵抗によるエネルギーの消費は重点的に考えるべき要因の1つであることが確認される。しかしながら、走行抵抗は車両の形式、走行速度によって異なることはもちろんのこと、トンネルの有無や形状、軌道の種別、列車の乗車率など様々な要因によって変動するため、その定量的な把握は限定的な条件でしか行われていない。

走行抵抗の把握は、走行抵抗測定のための試験走行を実施し、惰行時の減速度から走行抵抗を算出する惰行法が一般的である。例えば、ある特定の区間を数日間に分

けて、合計10往復程度の試験走行が行われる。その際には、車両速度を変えて一定以上の距離を惰行し、その減速度から各車両速度での走行抵抗値を算出する。これを近似曲線によって結ぶことで、走行抵抗式を求めている。このように、試験走行による走行抵抗の測定は、多くの労力を要する。そこで、筆者らは、車両情報記録装置に着目し、営業列車の走行データから走行抵抗を推定する手法を構築した。

営業走行データは、日々の走行データを取得しているため、データ規模は大きく、試験走行に比べて桁違いに多くのデータが取得可能である。しかしながら、試験走

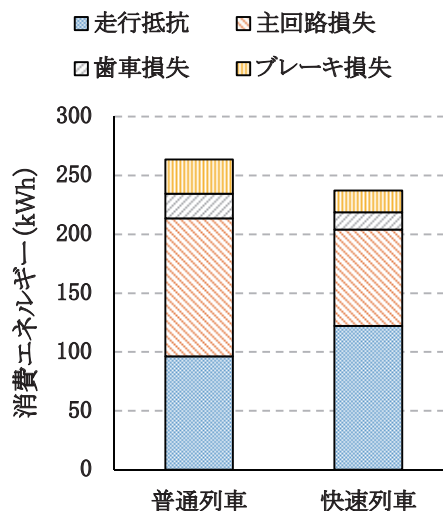


図1 エネルギー消費量の内訳の例

* 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室
** 車両制御技術研究部 動力システム研究室
(現 西日本旅客鉄道株式会社)
*** 車両制御技術研究部 駆動制御研究室
西日本旅客鉄道株式会社

特集：車両技術

行では試験条件に合わせた走行方法が可能であるが、営業走行では定められた列車ダイヤを守るように走行されており、取得したい条件で走行しているとは限らない。また、試験走行では、添乗者が試験状況を把握しており、測定データに記録されていない様々な外的状況についても把握されているのに対し、営業走行データでは、データに記録されている項目以外の情報は取得できない。このように、営業走行データは、試験走行に比べて有効なデータの割合が低い、データの信頼度が低いなどの課題がある。これに対しては、データの規模の大きさを補うことを基本的な思想として、本手法を構築した。

本手法では、試験走行を行わなくとも、営業走行の実績から走行抵抗を把握できることに加え、従来は把握されていなかったトンネル形状、軌道種別、乗車率などに応じた走行抵抗も把握することが可能となる。

2. 車両情報記録装置の概要

2.1 対象車両

対象車両は、7両固定編成の直流通勤型車両とした。対象車両は、デジタル伝送装置によって編成内で制御情報やモニタ情報が共有されている。対象形式のうち2編成にデータ収集システムを有する車両情報記録装置が搭載されており、デジタル伝送装置から取得した営業走行データが収集されている。対象車両の主な仕様を表1に示す。

2.2 データ収集システム

データ収集システム^{2) 3)}の概要を図2に示す。データ収集システムは、沿線無線WAN用いて、営業走行中のデータを随時地上サーバに伝送することでデータ取得を行うシステムである。

2.3 取得データ

対象とするデータは、対象形式2編成にて、2009年12月から2014年8月にかけて5年弱に渡り取得された営業走行データである。駅停車毎にCSV形式のファイルが作成される。ファイル数としては42万ファイル程度、容量としては900GB程度となる。記録項目は、時刻、地点、車両速度、ノッチ、各種の電圧、電流、ブレーキ力、AS圧、空転・滑走フラグ等多岐に渡り、号車毎やユニット毎に記録されている。項目数は250個程度、記録間隔は0.08sである。なお、車両速度は、編成内の各車軸の速度から間引き処理及び平均処理を行った編成基準軸速度が小数点以下2桁で取得されている。

2.4 加減速度分析システム

営業走行データは大規模なデータとなるため、これを様々な用途において分析するための大規模データ分析処

表1 対象形式車両の諸元

編成構成	6M1T (M車は4軸中2軸が動軸)
編成質量	232.8 [t] (M車 205.5 [t] T車 27.3 [t])
慣性係数	M車 1.08 [t] T車 1.06 [t]
台車	ボルスタレス台車, 軸ハリ式
運転最高速度	120 [km/h]
車輪直径	860 [mm] (新製時)
車輪形状	修正円弧踏面
車輪軸受	円錐コロ軸受
車体長	19500 [mm]
車体幅	2950 [mm]
車体高さ	3630 [mm]

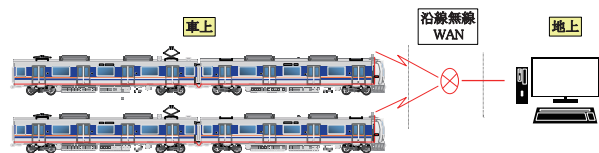


図2 データ収集システムの概要

理支援システム³⁾を開発した。本システムのうち、走行抵抗の分析に用いる加減速度分析システムは、営業走行データから指定したフィルタリング条件を満たすデータを対象にして、加減速度を算出するものである。加減速度の分析においては、線路条件の影響を考慮する必要があるため、施設管理データベースとの照合機能を有し、走行地点に応じた線路条件を取得する。これにより、加減速度分析システムでは、引張力、走行抵抗、ブレーキ力の特徴を分析することができる。

3. 走行抵抗の算出方法

3.1 惰行法による走行抵抗算出

列車の惰行時に減速度 β [km/h/s]となった場合の走行抵抗 R_r [kN]は、等価編成質量 M_e [t]、勾配抵抗 R_g [kN]、曲線抵抗 R_c [kN]に対して式(1)で計算される。ここで、等価編成質量とは、空車時の編成質量 M [t]と車両の回転部分の慣性力を質量に換算した慣性質量と人員質量の和となる。

$$R_r + R_g + R_c = \frac{1000}{3600} M_e \beta \tag{1}$$

よって、走行抵抗は、減速度と勾配抵抗と曲線抵抗を求めることにより算出できる。

勾配抵抗 R_g [kN]は、走行地点の勾配 S [%], 重力加

速度 g [m/s/s] に対して、式 (2) で計算される。

$$R_g = \frac{1}{1000} SMg \quad (2)$$

曲線抵抗 R_c [kN] は、走行地点の曲線半径 C [m]、係数 K に対して式 (3) のように表される^{4) 5)}。

$$R_c = \frac{1}{1000} \frac{K}{C} Mg \quad (3)$$

3.2 測定試験による算出方法

測定試験では、各試験地点において惰行を行い、そのときの減速度から走行抵抗を算出する。横軸を車両速度、縦軸を走行抵抗とするグラフに示し、最小二乗法により導出した2次の多項式による近似式を走行抵抗式とする。測定試験によって算出した走行抵抗を図3に示す。各プロットは、試験地点における減速度を0.5s間隔でサンプリングしたものである。プロット数は3032である。なお、測定試験では、勾配の変化点がない区間かつ直線区間となるように試験地点を設定する。このため、勾配抵抗については試験地点の勾配により式(2)で計算され、曲線抵抗については0となる。

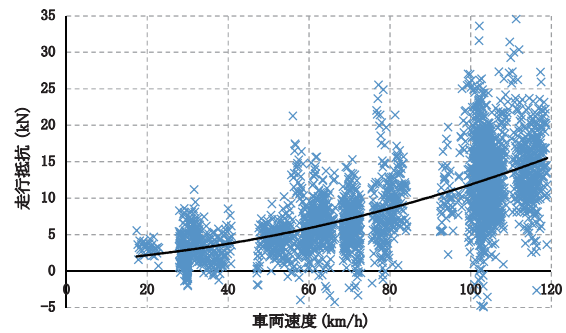


図3 測定試験による走行抵抗算出結果

3.3 走行データ分析による算出方法

3.3.1 算出方法の概要

走行データ分析による走行抵抗の計算方法の概要を図4に、抽出処理の概要を図5に示す。走行データ分析では、減速度は、時系列で取得された営業走行データから車両速度の変化によって算出する。勾配抵抗は、営業走行データから走行地点推定処理を行った後、施設管理データベースを用いて、勾配の値を取得して算出する。

勾配については、本手法では7両編成の編成全体が同一勾配区間の場合のみ走行抵抗を算出する対象としている。また、勾配変化点前後は縦曲線により勾配が変化していることや、地点推定の誤差のため、勾配変化点前後のある程度の距離を分析対象から外すことにした。

曲線については、式(3)は簡易式であり精度が低いことから、本手法では曲線区間を分析対象から外すことにした。なお、勾配抵抗と同様に、曲線変化点前後は緩和曲線により曲線半径が変化していることや、地点推定の誤差のため、曲線変化点前後のある程度の距離を分析対象から外すことにした。

また、走行抵抗は、トンネルの有無や形状、軌道の種別、列車の乗車率によって変動するため、施設管理データベースから構造物と道床の情報を取得し、営業走行データから乗車率の情報を取得し、これらの情報に応じて分類して結果を出力するようにした。

3.3.2 走行地点の推定方法

走行地点の推定は、営業走行データに記録されている車両速度及び走行区間の情報を用いて行われる。施設管理データベース上の発駅の停止目標地点を L_d [m]、施設管理データベース上の着駅の停止目標地点を L_a [m] とすると、時刻 T における列車先頭部の地点 L_h [m] は、時刻 t [s] における車両速度 $v(t)$ [km/h] に対して式(4)で計算される。

$$L_h = L_d + \frac{1000}{3600} \int_0^T v(t) dt \quad (4)$$

着駅に到着した際の時刻 T_a においては式(5)となることが期待されるが、実際には車両速度の積算誤差や管理上の地点情報と実際の地点との差の影響で、一致した値に

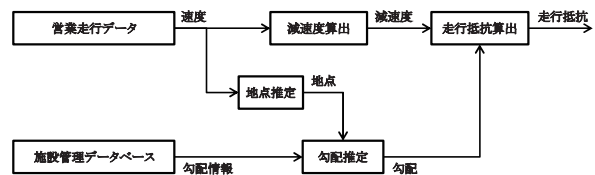


図4 走行データ分析による走行抵抗計算の概要

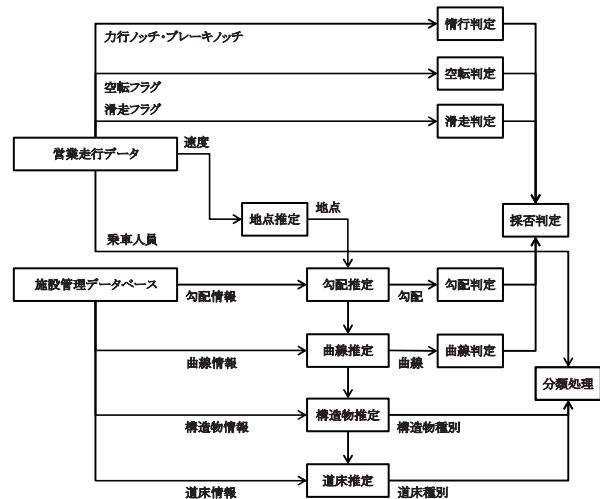


図5 走行データ分析による走行抵抗抽出の概要

特集：車両技術

はならない。一方で、営業走行データにおいても、通信異常などによりデータの欠損が生じる可能性がある。そこで、式(5)の関係について、一定程度の閾値を設けてその範囲内にある場合を有効なデータとし、範囲外にある場合には当該区間は分析対象から外すこととした。

$$L_a = L_d + \frac{1000}{3600} \int_0^{t_a} v(t) dt \quad (5)$$

3.3.3 減速度の算出方法

離散化された営業走行データにおける減速度の算出方法を示す。時刻 t [s] におけるレコードを i とすると、減速度 $\beta[i]$ [km/h/s] は、車両速度 $v[i]$ [km/h]、測定間隔 ΔT [s] に対して、式(6)で計算される。

$$\beta[i] = \frac{v[i-1] - v[i+1]}{2\Delta T} \quad (6)$$

走行抵抗は車両速度から換算されるため、走行抵抗の精度は車両速度の精度の影響を受ける。車両速度は車軸軸端取り付けの速度センサを用いて検出している。対象車両の速度センサは非接触型誘導発電機であり、車軸の回転に応じて矩形波のパルスが発生しており、矩形波を一定時間で計数する際の計数誤差や、機械的振動による影響により、検出速度には誤差が生じるため⁶⁾、車両速度の精度には限界がある。

対象車両の営業走行データは 0.08s の測定間隔となっているが、速度データには短時間の変動が含まれている。本手法で対象とするのは、短時間の走行抵抗でなく、広い速度域での統計的な傾向を把握することであるため、瞬間的な変動を除去することとした。このため、次に示す2段階の処理を行うこととした。始めに、減速度の算出には前後 T_v [s] における車両速度 $v[i]$ [km/h] から瞬時減速度 $\beta_i[i]$ [km/h/s] を式(7)で算出する。次に、前後 N レコードの瞬時減速度 $\beta_i[i]$ [km/h/s] の平均を取ることによって当該 i レコードの平均減速度 $\beta_a[i]$ [km/h/s] を式(8)のように算出する。なお、短時間の変動の除去の観点からは、 N は大きい方が望ましいが、 N を大きくすると、ノッチ・勾配・曲線等の抽出条件が一定となるデータ範囲が限定されてしまうため、本報告では、 N は 4 を用いている。式(7)及び式(8)を合わせて表現すると式(9)となる。

$$\beta_i[i] = \frac{v\left[i - \frac{T_v}{\Delta T}\right] - v\left[i + \frac{T_v}{\Delta T}\right]}{2T_v} \quad (7)$$

$$\beta_a[i] = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \beta_i[i+n] \quad (8)$$

$$\beta_a[i] = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \frac{v\left[i - \frac{T_v}{\Delta T} + n\right] - v\left[i + \frac{T_v}{\Delta T} + n\right]}{2T_v} \quad (9)$$

3.3.4 対象データ抽出

惰行法を用いて走行抵抗を算出するため、惰行条件の判定が必要となる。営業走行データには、力行ノッチ及びブレーキノッチの情報が記録されているため、これらが扱われていない状態が惰行と判定される。ただし、ジャーク制御のため、ノッチの操作に対して実際の車両の加減速には遅れが生じる。そこで、ノッチ扱いから一定時間を空けたデータのみを分析対象とした。

また、空転や滑走が生じると速度が正確に求められない。惰行法を用いるため、力行に伴う空転やブレーキに伴う滑走が発生している瞬間のデータが含まれることはないが、式(4)を用いて計算される地点推定に誤差が生じることとなる。対象形式は、非駆動軸も多くあるため、力行時の編成基準軸速度の演算への影響は軽微であると考えられるが、ブレーキ時の演算への影響は懸念される。このため、空転フラグ及び滑走フラグの発生が少ないデータのみ分析対象とした。

3.3.5 サンプリング

走行データ分析では、測定試験よりも多くのプロットが得られる。ただし、測定試験のように速度を指定した試験地点の設定はできないため、速度によってサンプル数にばらつきが生じる。これを少しでも緩和するため、サンプリングの際には、測定試験のような一定時間毎のサンプリングではなく、速度刻み ΔV [km/h] を設定し、速度刻みを超える速度の変化が生じることにサンプリングすることとした。サンプリングの概念図を図6に示す。なお、本報告では、速度刻み ΔV [km/h] として 2.0km/h を用いている。

4. 分析結果

4.1 走行データ分析の結果

走行データ分析によって算出した走行抵抗を図7に、そのときの抽出条件を表2に示す。次節に示す測定試験との比較のため、測定試験に近い条件となる抽出条件の結果を示している。プロット数は 11859 である。このときの車両速度データの度数分布を図8に示す。営業走行データから惰行しているデータを抽出しているため、高速域のデータは多数取得できているが、低速域のデータは少ない。

4.2 分析手法の検証

測定試験と走行データ分析によって算出した走行抵抗の比較を図9に示す。参考として、従来から広く使われ

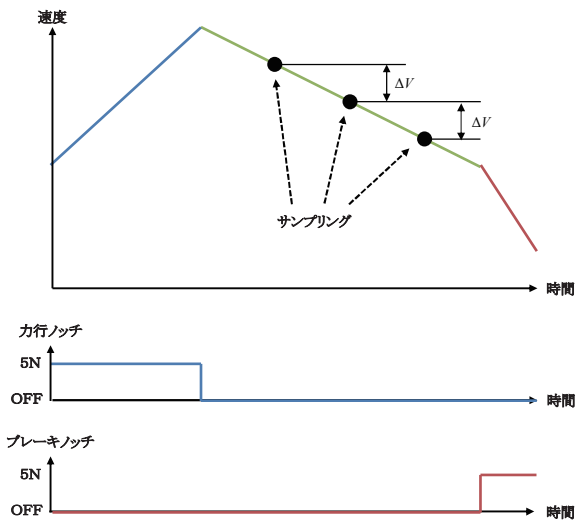


図6 走行データ分析によるサンプリングの概念

ている日本工業規格の走行抵抗式（以下、JIS式）⁵⁾も図示しているが、JIS式は策定から時代を経て近年の車両とは合わなくなっていると考えられる。これに対して、測定試験と走行データ分析の走行抵抗は概ね一致している。これらの走行抵抗を用いて、車両走行エネルギーシミュレータにより計算した消費エネルギーを図10に示す。なお、エネルギー計算において、走行抵抗を変更すると、走行時分が変わってしまう。このため、走行時分に合わせた運転曲線を作成することができるエネルギー評価用運転曲線⁷⁾を用いて走行時分を合わせた条件で評価した。この結果、測定試験の結果を基準とすると、JIS式を用いた場合は+6.8%となるが、走行データ分析の走行抵抗を用いた場合は+0.1%となる。以上より、走行データ分析は、測定試験と同等の走行抵抗の算出が可能であることが確認された。

4.3 トンネル区間の比較

走行データ分析により、測定試験では行われていなかった条件での走行抵抗の把握も可能となる。トンネル区間では空気抵抗による走行抵抗によって、特に高速域での走行抵抗が影響を受けると考えられる。走行データ分析によって得られたトンネル区間と明かり区間の走行抵抗の比較を図11に、そのときの抽出条件を表3に示す。地下トンネルは、都市部の単線トンネルの結果を、山岳トンネルは、複線トンネルの結果を示す。本手法によりトンネル断面積の違いによる走行抵抗への影響を定量化して把握することが可能となった。なお、トンネル区間は高速での走行が多く、低速域でのデータは限られているため、近似式の切片の精度が課題となってしまう。このため、トンネル区間の走行抵抗の算出には明かり区間の切片の値を用いることとした。取得できる速度域が限定されてしまう課題はあるものの、走行抵抗に影響が大

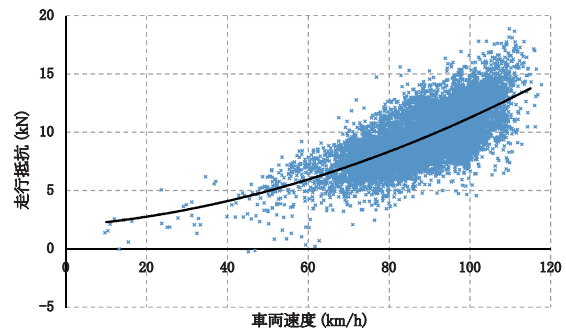


図7 走行データ分析による走行抵抗算出結果

表2 抽出条件

人員質量	0 ~ 20 [t]
構造物	地平
道床種類	砕石

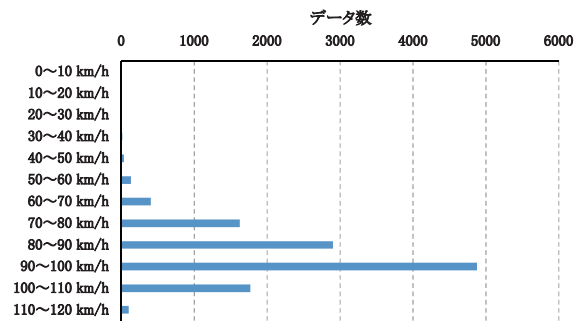


図8 走行データ分析による走行抵抗算出結果

きく、実際の営業運転でも頻度が高い高速域での比較が可能となり、測定試験を行わずに簡易に走行抵抗を把握する手法として活用できると考えられる。

5. おわりに

車両情報記録装置を活用して、営業走行データを用いた走行抵抗の算出方法を提案した。その結果、測定試験によって得られた走行抵抗と、走行データ分析によって得られた走行抵抗は概ね一致していることを確認した。また、エネルギー計算に用いることを想定して試算を行った結果、消費エネルギーはほぼ同等となり、実用上十分な精度が得られることが確認された。さらに、測定試験では試験条件の設定上、取得困難な詳細な条件での走行抵抗も得られることを確認した。

走行データ分析の課題としては、得られる速度域が限られること、営業走行データの蓄積に時間を要することなどが挙げられる。また、走行データ分析の手法を用いるためには、車両情報記録装置で記録される速度データの精度と時間刻み、施設管理データベースで管理される

特集：車両技術

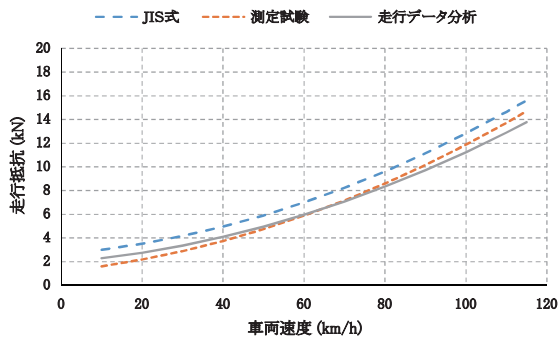


図9 測定試験と走行データ分析による走行抵抗の比較

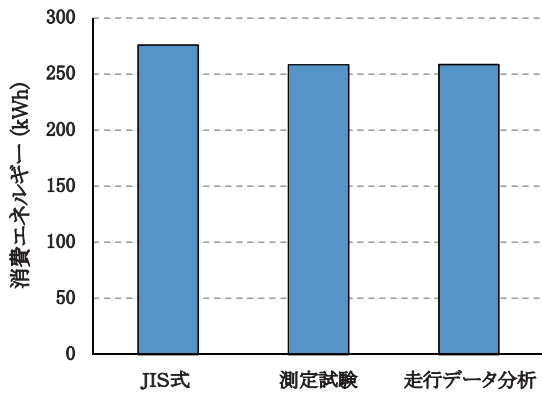


図10 測定試験と走行データ分析による消費エネルギーの比較

勾配・曲線・分岐器・停止目標等の精度などの情報が重要となる。

今後は、車両情報記録装置の普及により、より多くのデータを活用した走行抵抗算出が可能となると期待される。より詳細な条件での走行抵抗を定量化していくことを予定している。

文献

1) 小川知行, 近藤稔, 熊澤一将, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 島田直人, 添田正, 杉山義一: 汎用鉄道車両走行エネルギーシミュレータの開発, 電気学会リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会, LD-14-067 / TER-14-030,

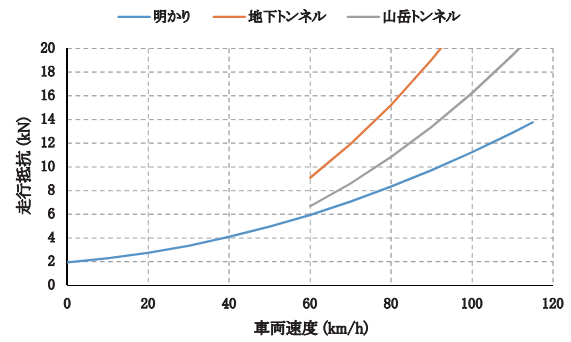


図11 トンネル区間と明かり区間の走行抵抗の比較

表3 抽出条件

種別	明かり	地下トンネル	山岳トンネル
人員質量	0 ~ 20 [t]	0 ~ 20 [t]	0 ~ 20 [t]
構造物	地平	地下トンネル	山岳トンネル
道床種類	碎石	弾性枕木直結	スラブ

2014

2) 川村淳也, 山本雄一, 小川展央, 福井省三: データマイニング手法を用いた営業列車蓄積データの分析, 第17回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2010), S1-2-1, 2010

3) 小川知行, 武内陽子, 菅野晋, 影山真佐富, 東海勝人, 平松英: 車両情報記録装置の大規模データ分析処理支援システムの開発, 第22回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2015), SS3-1, 1705, 2015

4) 運転理論研究会: 運転理論 (再改訂版), 一般社団法人日本鉄道運転協会, pp.99-114, 2010

5) 日本工業規格 JIS E 6002:1989 通勤用電車の性能通則, 日本規格協会, 1990

6) 渡邊朝紀: 車両速度の高精度検出, 平成元年電気学会産業応用部門全国大会, 12, 1989

7) 小川知行, 佐藤圭介, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 影山真佐富, 島田直人: 鉄道車両走行シミュレータのエネルギー評価用運転曲線の開発, 電気学会論文誌D, Vol. 135, No. 5, 2015