

直流電気鉄道の列車間隔調整による回生ブレーキ有効利用

原 崇文*, 渡邊 央朗, 古関 隆章 (東京大学), 水間 毅 (交通安全環境研究所)

The best use of regenerative brakes by adjusting train intervals in DC-electrified railway systems

Takafumi Hara*, Hiroaki Watanabe, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Takeshi Mizuma (National Traffic Safety and Environment Laboratory)

Abstract

A recent electric train uses electric brakes which convert mechanical to electric energy and send the regenerated energies to other trains on the same route. These brakes are called regenerative brakes. Regenerative brakes have to be used with conventional mechanical brakes using frictional force, regenerative brake force is less than the simultaneous service brake force required at high speed. The response of mechanical brakes is much slower than electric brakes. The source of mechanical brake force is friction, which strongly depends on environment. A change of frictional force worsens ride quality and causes slip. Furthermore, mechanical brake force costs time and money for maintenance. In this research, author propose to reduce mechanical brakes usage by doing headway optimization based on PWM substation and regenerative brakes.

キーワード：電気鉄道 PWM 変電所 回生ブレーキ 列車間隔 機械ブレーキ 直流き電方式
(electric railway PWM substation regenerative brake train interval mechanical brake DC feeding system)

1. 序 論

近年、京都議定書による温室効果ガス排出量削減目標の設定などにより、環境問題に人々の関心が集まっている。鉄道の1人を1 km 運ぶ際に排出されるCO₂の量は他の主要交通機関と比較して最も低く、また移動に必要なエネルギーも他の輸送機関と比較して小さい⁽¹⁾⁽²⁾。このように環境にやさしい移動手段である鉄道だが、省エネルギー化を軸とした環境対策は盛んに行われている。

電気鉄道における省エネルギー化のために注目されている回生ブレーキは、列車の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し他所へ融通するシステムである。回生ブレーキ利用率を上げる手法として機械ブレーキを用いずに電気ブレーキのみを動作させる純電気ブレーキ⁽³⁾⁽⁴⁾や、電力融通率を高める手法としてPWM変電所の設置が提案されているが、どちらもすぐ組み込めるわけではない。ただし、PWM変電所はコストの問題はあるものの現在のシステムを大きく変えることなく導入可能であり、設備の老朽化に伴う機器更新とともに部分的に導入するといった手法をとることができる。そこで本論文では、変電所をはじめとした地上設備の変更過渡期における部分的な新性能機器の導入時に、その機器を最大限利用できるようにダイヤを設定することで機器導入の効果を最大限に引き出すことを目指す。そのために、一部の变電所をPWM変電所に変更したシステムにおいて、列車間隔を適切に設定し、駅間の所要時間の変更なく回生ブレーキの利用率を高める手法を提案する。その効果は、回生ブレーキが架線電圧上昇により絞込まれることで増えてしまった、機械ブレーキの負担増加量によって評価する。また、電気ブレーキ利用率の向上による省エネルギー効果についても検討する。

2. 回生ブレーキ有効活用評価のための計算方法

本章では、回生ブレーキ有効活用評価のための設定と計算手法、走行に伴うパンタ点電圧の変動を考慮した回路計算と、回路方程式の非線形要素である負荷の線形近似法について述べる。

2.1 列車走行に関する設定 列車走行モデル作成の際に必要な運転曲線の作成法について述べる。Fig. 1に運転曲線を作成する際のブロック線図を示す。主電動機特性からくる引張力・ブレーキ力と出発抵抗、走行抵抗、勾配抵抗、及び曲線抵抗との差が実際に列車を加速したり減速させたりする力となる。ここから加減速度を求め、積分することで速度及び距離が決定される。

2.1.1 列車の走行時における各種抵抗 列車が出発または走行する際に受ける抵抗には、出発抵抗、走行抵抗、勾配抵抗、曲線抵抗などがある⁽⁵⁾。出発抵抗 R_s は、列車停止時に電機子軸と軸受の間および歯車に給油された潤滑油の油膜が切れ、起動時に大きな摩擦を生ずることから発生する。なお、列車が動き出すと

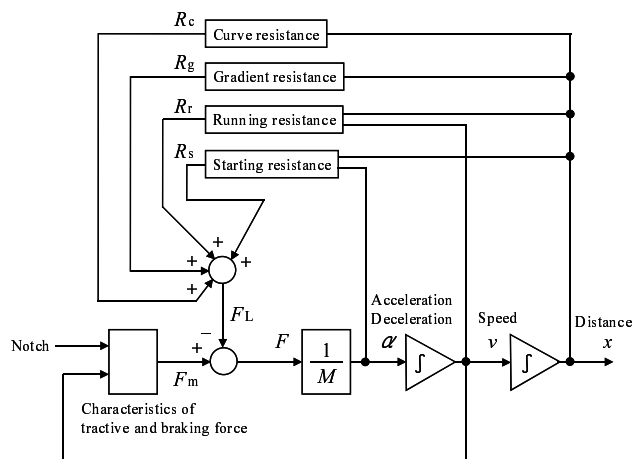


図1 車両システムのブロック線図

Fig. 1. Block diagram of electric railways

接触面に油膜を生じ、摩擦抵抗は速度に対してほぼ直線的に急激に減少し、2~3 km/hで最小となる。走行抵抗 R_r は車軸と軸受の摩擦抵抗、車輪とレール間のこがり摩擦抵抗、車両の動揺によって生ずる各種摩擦抵抗および空気抵抗からなる。勾配抵抗 R_g は列車が重力により勾配の下方に引き下げようと受ける力から生じる。曲線抵抗 R_c は、列車が曲線を通過するとき、遠心力に抗して方向を変えるため外側レールと外側車輪のフランジとの間に生じる摩擦抵抗と、内側レールと外側レールの長さが異なるため同軸に固定された車輪のどちらかが滑ることにより踏面とレールとの間に生じる摩擦抵抗などを総称したものである。 v を列車速度、 M を列車質量として、それぞれの抵抗値を式(1)~式(4)に示す。なお、出発抵抗 R_s は0 km/hでの値である。

$$R_s = 9.8 \times 4M \dots\dots\dots (1)$$

$$R_r = 9.8(1.32 + 0.0164v)M + 0.0358v^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$R_g = 9.8M \left(\frac{i}{1000} \right) \left(\frac{L}{L_t} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$R_c = 9.8 \left(\frac{600}{r} \right) \left(\frac{L}{L_t} \right) \dots\dots\dots (4)$$

2.1.2 エネルギー計算 列車の力行時、制動時におけるエネルギーを力学的エネルギーから導出する。

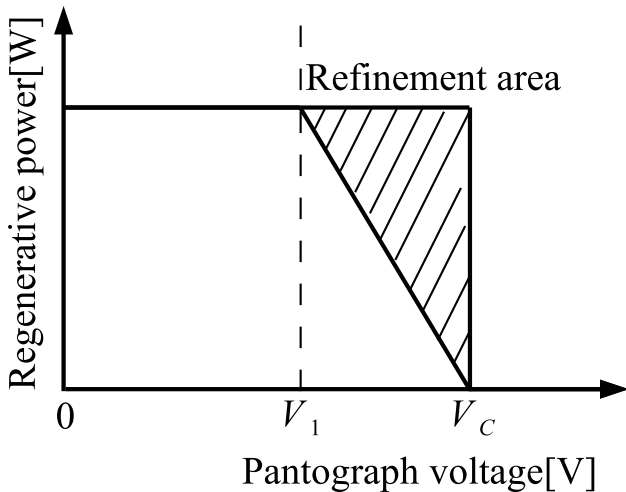


図2 列車回生時の絞込み特性
Fig. 2. Characteristic of regenerative brake

力行・回生エネルギー 力行エネルギー E_p を、列車の引張り力 F_p と、エネルギー変換効率 η 、および v から求める電力を時間積分することで算出する。これを式 (5) に示す。また回生エネルギー E_r は、列車の回生ブレーキ力 F_r と、 v 、 η を用いて力行エネルギーと同様に求める。これを式 (6) に示す。なお η は、モーターの効率を η_m 、インバータの効率を η_i 、駆動装置の効率を η_g とすると、式 (7) で表される。

$$E_p = \int F_p v \frac{1}{\eta} dt \dots \dots \dots (5)$$

$$E_r = \int F_r v \eta dt \dots \dots \dots (6)$$

$$\eta = \eta_m \eta_i \eta_g \dots \dots \dots (7)$$

また、列車のパンタ点電圧の値が絞り込み電圧 V_1 を超えた場合に、その超えた割合に応じた電力を絞り、回生失効電圧 V_c に達した場合回生ブレーキの使用を停止する。パンタ点電圧と回生電力絞込み量の関係を Fig. 2 に示す。

減った制動力はすべて機械ブレーキで補う。この時機械ブレーキが多く負担した仕事量を W_{loss} とし、この値で評価する。時刻 t における電気ブレーキ絞込み量を P_{loss} とすると、 W_{loss} は式 (8) で表される。

$$W_{loss} = \int P_{loss} dt \dots \dots \dots (8)$$

列車運行で消費した総電力量 列車運行のために直流キシステム内で消費した総エネルギーである、それぞれの変電所が送出した電力量の合計 W_{SS} を計算し、電気ブレーキ絞込み量との関連性を調べる。単位時間での変電所送出電力を P_{SS} とし、 W_{SS} を式 (9) に示す。

$$W_{SS} = \int P_{SS} dt \dots \dots \dots (9)$$

2.2 回路計算における設定

2.2.1 き電回路の直流回路設定 Fig. 4 のように、変電所間に 2 列車が走行する状況を例に説明する。変電所 1、2 の送出電圧を V_0 、変電所の内部抵抗を r 、変電所 1 と列車 A との間の電流を I_1 、列車 A までの距離を d_1 、変電所 2 と列車 B との間の電流を I_3 、変電所 2 から列車 B までの距離を d_3 、列車 AB 間を流れる電流を I_2 、各列車のパンタ点電圧を V_A 、 V_B 、列車 A、B が受け取る電力を P_A 、 P_B 、電車線の抵抗値を $\rho \Omega/m$ とすると、この回路方程式は次のように立式できる。

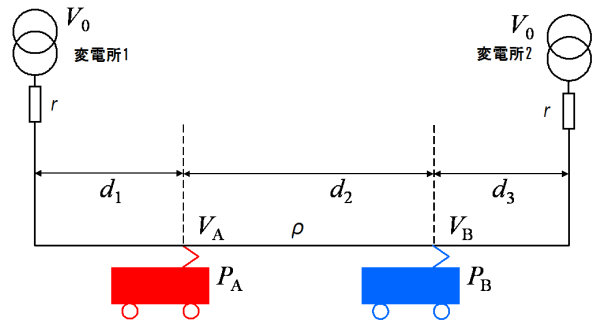


図3 2変電所間2列車走行時の直流回路

図4 DC circuit of two substations and two trains

$$P_A = (I_1 + I_2)V_A \dots \dots \dots (10)$$

$$P_B = (I_3 - I_2)V_B \dots \dots \dots (11)$$

$$V_0 - V_A = (\rho d_1 + r)I_1 \dots \dots \dots (12)$$

$$V_B - V_A = \rho d_2 I_2 \dots \dots \dots (13)$$

$$V_0 - V_B = (\rho d_3 + r)I_3 \dots \dots \dots (14)$$

ここで、式を単純化するために $\rho d_1 + r = \rho d'_1$ 、 $\rho d_3 + r = \rho d'_3$ として、 V_A について解くと、

$$(d_2 + d'_3) \{ \rho d'_1 d_2 P_A + (d'_1 + d_2) V_A^2 - d_2 V_0 V_A \}^2 - \rho d_1^2 d_2 d'_3 P_B V_A - d'_1 V_A (d_2 V_0 + d'_3 V_A) \{ \rho d'_1 d_2 P_A + (d'_1 + d_2) V_A^2 - d_2 V_0 V_A \} = 0 \quad (15)$$

これより、2変電所間2列車の場合は V_A に関する 4 次方程式を解くことで解が得られるが、列車数が増えると方程式の次数も増え、列車が n 本存在する場合には $2n$ 次の方程式となるため、多くの列車が存在する場合高次の方程式を解かなくてはならない。

2.2.2 負荷特性線形近似 列車本数を多く考えると、直流回路を解く過程で方程式が高次化してしまう。これは、式 (10)、(11) に非線形要素が存在するためである。変電所間の列車本数が多い場合に容易に直流回路が解けるよう、列車の負荷特性 $P = VI$ に対して最小二乗法を用いて $V = aI + b$ とする線形近似を適用する。近似範囲は 1500 V を中心とした 1300 ~ 1700 V の範囲で、50 V おきに 9 点をとり近似直線を求める。第 2.2.1 項で述べた状況に適用すると、式 (10) および式 (11) は次のように近似できる。

$$V_A = a_a(I_1 + I_2) + b_B \dots \dots \dots (16)$$

$$V_B = a_B(I_3 - I_2) + b_B \dots \dots \dots (17)$$

この近似により高次の回路方程式をすべて一次方程式で解くことができるため、列車本数が増えた場合でも容易に計算できる。

2.3 数値解析対象路線とその特徴 数値解析を行う路線の特徴を述べる。

- (1) 末端の一駅間 (駅 23, 駅 24 間) を除き、全線複線である。
 - (2) 始点から 2 つ目の変電所は PWM 変電所であり、直流キシステム側で余剰になった電力は回収できる。その他の変電所はシリコン整流器を用いたタイプで、電力回収はできない。
 - (3) 8 両編成と 6 両編成の列車が交互に走行する。
 - (4) 種別は各駅停車のみ、1 時間当たり 6 本走行している。
- 以下に、計算に用いる各数値を記載する。

なお、今回の数値解析では片方向のみの走行を考える。

3. 回生ブレーキを有効活用したダイヤの作成と定量的評価

3.1 運転計画作成における条件 本論文では、部分的に

表 1 数値解析条件

Table 1. Simulation parameters

Route length	26.5[km]
The number of stations	24
The number of substations	4
Delivery voltage of Silicon substation	1590[V]
Delivery voltage of PWM substation	1500[V]
Overhead contact line resistance	0.0409[Ω/km]
Number of passengers per vehicle	100[%]
Auxiliary machine power	100[kW/set]
Total weight of a train (8 cars)	W=300.8[t]
Total weight of a train (6 cars)	W=226.0[t]
Decelerating force	2.5[km/h/s]
Motor efficiency η_m	0.92
Inverter efficiency η_i	0.975
Driving device efficiency η_g	0.975

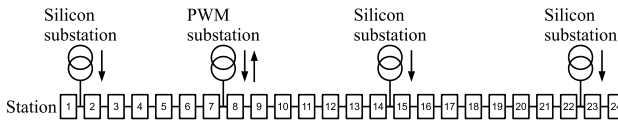


図 5 モデル路線図と変電所位置

Fig. 5. Route model and substation position

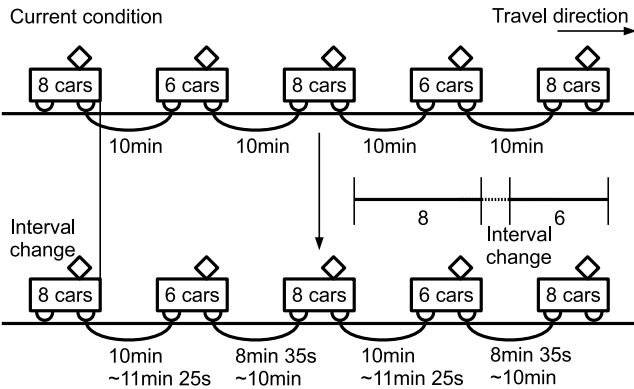


図 6 列車間隔変動幅

Fig. 6. Range of train intervals

導入された回生変電設備を活かすよう、ダイヤを変更することによる回生ブレーキ使用率の向上を目指す。現状のモデル路線では 8 両編成と 6 両編成が交互に 10 分おきで走行しているため、現状のダイヤまでの輸送力の不均等は許容されるものとする。これより、ダイヤ変更の際に列車間隔をずらす幅は、8 両編成と 6 両編成の 2 本の列車を 1 セットと見た時に 20 分を 6:8 で分割した時分を基準とし、8 両編成～6 両編成の間隔は 8 分 35 秒～10 分、6 両編成～8 両編成の間隔は 11 分 25 秒以下とする。また、ずらす単位は 1 秒とした。

ただし、総列車本数が変化して、列車が走行する際の消費エネルギーが等しくなることを防ぐため、決めたある時間周期(列車 3 本間ならば 20 分周期)内で列車本数が増減しないように列車間隔を変更することとする。

3・2 運行数値解析と機械ブレーキ負担増加量の比較

3・2・1 列車 3 本間の場合 Fig. 7 のように列車 3 本間(20 分サイクル)での列車間隔最適化を行う。このとき、1 本目～2 本目の列車間隔を t_1 、2 本目～3 本目の列車間隔を t_2 とし、これらの制約を式 (18)～(20) に示す。

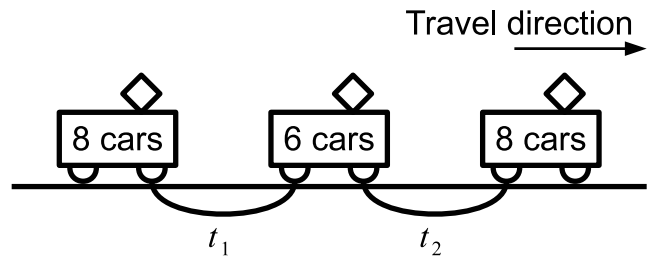


図 7 3 列車間の列車間隔図

Fig. 7. Train interval of three trains

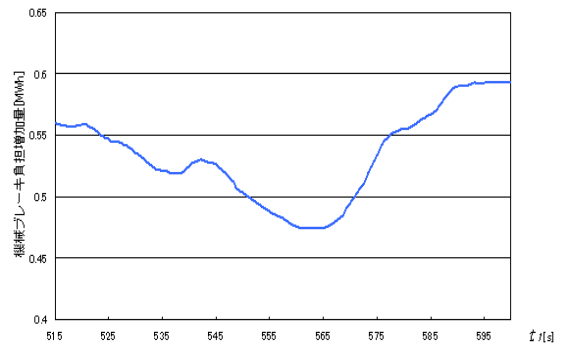


図 8 3 列車での列車間隔に対する機械ブレーキ負担増加量

Fig. 8. Mechanical brake increment of three trains

$$515 < t_1 < 600 \dots \dots \dots (18)$$

$$t_2 < 685 \dots \dots \dots (19)$$

$$t_1 + t_2 = 1200 \dots \dots \dots (20)$$

この時の列車間隔と機械ブレーキ負担増加量の関係を Fig. 8 に示す。

3 列車間での運転間隔最適化では 8 両編成～6 両編成間が 9 分 23 秒、6 両編成～8 両編成間が 10 分 37 秒の間隔で、回生ブレーキの絞込みに伴う機械ブレーキによるブレーキ力の負担増加量が 0.473 MWh と最も少なかった。現状が全列車 10 分間隔での走行であるが、この時の機械ブレーキ負担増加量が 0.594 MWh であるため、約 20.4% の削減となった。Fig. 8 を見ると、極小値を取る列車間隔はひとつだけではなく、極小値と極大値を取りながら波のようになっていることが確認できる。列車間隔変更による機械ブレーキ負担増加率への影響を考察するため、輸送力の不均等を無視して t_1 を 4 分から 10 分まで変更した場合の数値解析を行った。その結果を Fig. 9 に示す。

全体的に見ても、波形は極小値と極大値を複数とっているが、波の極大値、極小値にある程度の周期性が予想できる。極小値をとる列車間隔の平均を取ると、約 28.5 秒であった。今回のモデル路線で列車間隔の最適化による機械ブレーキ負担増加量を最適化する際に、一箇所の探索解始点からスタートする方法をとってしまうと、複数存在する局所最適解に落ちてしまい脱出できない可能性が高い。そのため、極小値をとる間隔におおよその周期があることを利用し、この周期分ずつ離れたいくつかの探索開始点を取り、機械ブレーキ負担増加量が小さくなる値を採用していく多スタート局所探索が有効であると考えられる。なお、28.5 秒という値に関しては、数値解析モデル路線の平均停車時分が約 30 秒程度であり、また駅間走行時分の平均が約 87 秒で、惰行時間を考えて力行と回生が 30 秒前後であるとすると、28 秒程度の間隔で前後列車間での回生と力行のタイミングがちょうど入れ替わる形になるためであることが考えられる。

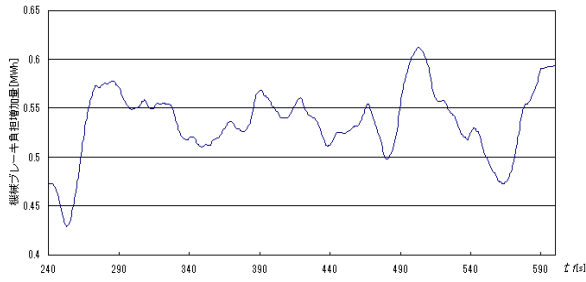


図9 列車間隔を広い範囲で変更した場合の機械ブレーキ負担増加量に対する影響

Fig. 9. Mechanical brake increment of three trains by changing train intervals on a widespread basis

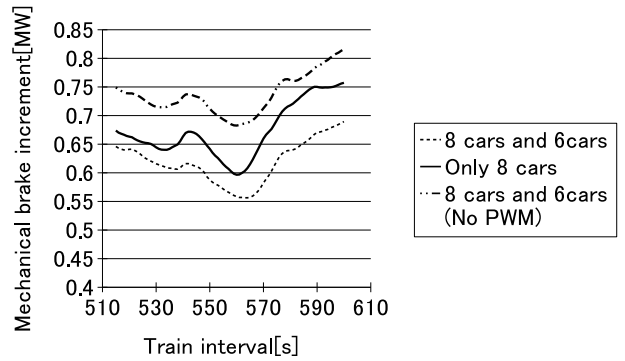


図16 編成における両数・PWM変電所の有無による列車間隔図

Fig. 16. Mechanical brake increment of three trains by changing number of cars and PWM substation

PWM変電所が電力を吸収しているためである。

左側の Fig. 10, Fig. 12, Fig. 14 は列車間隔の変更によって比較的機械ブレーキ負担増加が抑えられているもので、右側の Fig. 11, Fig. 13, Fig. 15 は列車間隔がうまく設定できていないものである。この違いは、それぞれの図の中央やや終点よりに現れている。右側の図に対して左側の図では、15000m ~ 20000m 付近の機械ブレーキ負担増加量が比較的低めになっている。これらは、PWM変電所の効果が有効に得られない場所において前後列車で電力融通ができていたためであると考えられる。また、Fig. 13 ~ Fig. 15 では、路線の両端で列車がらず回生の絞込みや失効が起きているが、列車間隔が短い Fig. 10 ~ Fig. 12 では、路線の端における機械ブレーキ負担増加量が比較的低めになっている。これは、列車間隔が広い場合、路線の端の近くであると前もしくは後ろを走行する列車が存在しない確率が高いことによるものと考えられる。

次に、列車編成における両数の違いによる列車間隔最適化への影響と、PWM変電所の有無による列車間隔最適化への影響について考える。6両編成と8両編成が混在している場合、8両編成のみが走行する場合、6両編成と8両編成が混在しているがPWM変電所が存在しない場合についてそれぞれ数値解析を行ったものを、Fig. 16 に示す。

値の上下はあるが極大・極小値をとる列車間隔についてはどの場合も大きく差がなく、またそれぞれのケースにおける最小値を取る列車間隔も、6両編成と8両編成が混在している場合では $t_1 = 563$ 、8両編成のみが走行する場合、6両編成と8両編成が混在しているがPWM変電所が存在しない場合ではともに $t_1 = 560$ と、ほぼ同じ値となる。これより、編成中の両数の違いやPWM変電所の有無による最適解への影響は小さいと考えられる。

3.2.2 列車4本間の場合 次に、最適化に組み込む編成数を増やした場合にどのような影響が出るかを調べるため、Fig. 17 のように列車4本間(30分サイクル)での列車間隔最適化を行う。このとき、1本目の列車と2本目の列車間隔を t_1 、2本目の列車と3本目の列車間隔を t_2 、3本目の列車と4本目の列車間隔を t_3 とする。

ここで、第3.2.1項のように8両編成と6両編成が交互に走行するものとする。4本目と5本目(次のサイクルの1本目と2本目に該当するもの)での編成における両数の関係が崩れてしまう。そこで、列車4本間での列車間隔最適化はすべて8両編成が走行するものとする。編成での両数の違いにおける最適化の全体的な傾向への影響は、Fig. 16 で示したように小さいため、無視できるものとする。また、 $t_n (n = 1, 2, 3)$ が最小となるのは、 t_1, t_m (ただし $m, l \neq n$) がともに最大の685秒である時で、 $t_n = 430$ である。この条件の下、 t_1, t_2, t_3 の制約式(21) ~ (24)に示す。

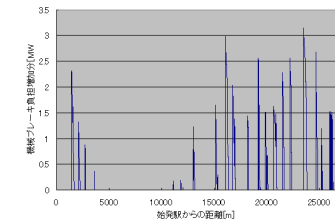


図10 t_1 が 253 秒の場合
Fig. 10. $t_1 = 253$ s

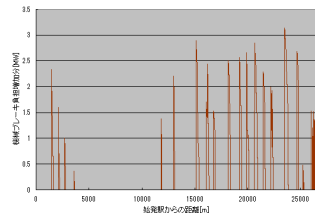


図11 t_1 が 285 秒の場合
Fig. 11. $t_1 = 285$ s

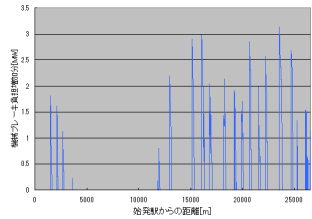


図12 t_1 が 348 秒の場合
Fig. 12. $t_1 = 348$ s

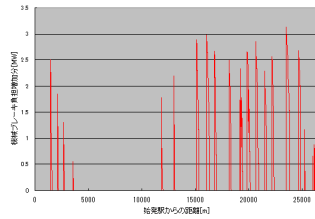


図13 t_1 が 503 秒の場合
Fig. 13. $t_1 = 503$ s

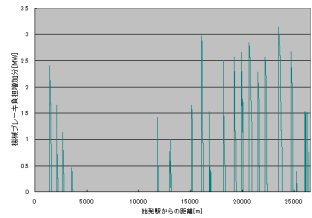


図14 t_1 が 563 秒の場合
Fig. 14. $t_1 = 563$ s

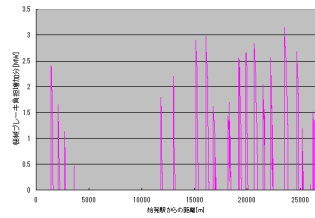


図15 t_1 が 600 秒の場合
Fig. 15. $t_1 = 600$ s

さらに、Fig. 9 において極大値や極小値をとる列車間隔で具体的にどのような現象が起きているかを検討するため、機械ブレーキ負担増加量が極小値をとる t_1 が 253 秒、348 秒、563 秒の時と、極大値をとる t_1 が 285 秒、503 秒、600 秒の時での、走行距離に対する列車全体での平均機械ブレーキ負担増加量を求めた。

Fig. 10 ~ Fig. 15 のすべての図において、5000m ~ 10000m 付近での回生絞込みが発生していない。これは、7000m 地点に存在する

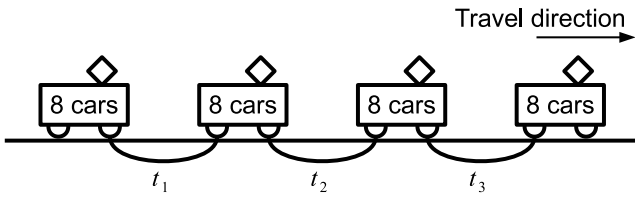


図 17 列車 4 本間の列車間隔図
Fig. 17. Train interval of four trains

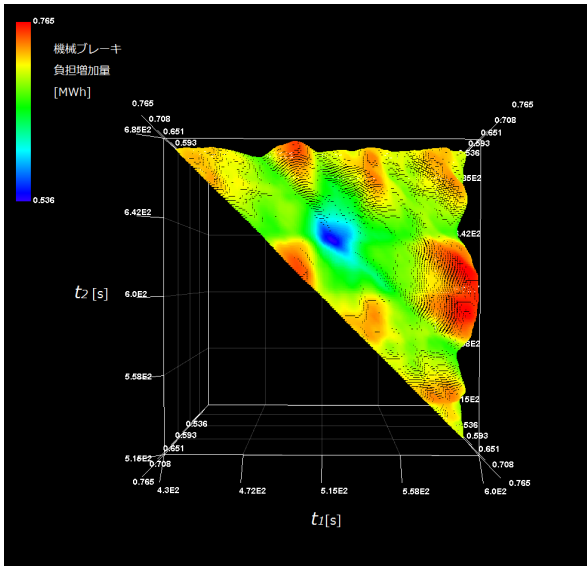


図 18 4 列車間の列車間隔に対する機械ブレーキ負担増加量 (俯瞰図)
Fig. 18. Mechanical brake increment (Overhead view)

$$430 \leq t_1 \leq 685 \dots\dots\dots (21)$$

$$430 \leq t_2 \leq 685 \dots\dots\dots (22)$$

$$430 \leq t_3 \leq 685 \dots\dots\dots (23)$$

$$t_1 + t_2 + t_3 = 1800 \dots\dots\dots (24)$$

式 (21) ~ (24) を満たす範囲で列車間隔を変更した際の、機械ブレーキ負担増加量との関係を Fig. 18 に示す。

Fig. 18, 19 から、30 分サイクルの時でもほぼ同様の間隔の時に機械ブレーキの負担増加量が最小となる列車間隔があることが分かる。最小値を取るのは $t_1 = 522, t_2 = 639$ の時であり、その時の機械ブレーキ負担増加量は 0.536 MWh である。現状の 10 分おきである $t_1 = 600, t_2 = 600$ での機械ブレーキ負担増加量は 0.757 MWh であるため、約 29.2% の低減ができる。加えて、8 両編成のみが走行する 3 列車間で列車間隔最適化を行った時の機械ブレーキ負担増加量が 0.597 MWh であるため、そこから約 10.3% 低減ができています。また、第 3・2・1 項の時と同様に、極小値と極大値を複数持つ形状であることが確認できたが、この山と谷にもある程度の周期性が見られる。このため、第 3・2・1 項で提案した手法と同様に、ある程度の間隔ごとにスタートして、それぞれのスタート地点から付近の極小値を探索する方法で最適化が可能であることが分かる。

次に、列車 4 本間における、PWM 変電所の有無による列車間隔最適化への影響を調べる。Fig. 20 から 21 に、PWM 変電所がない場合で列車間隔最適化を行った結果を示す。

この時の最適解は、PWM 変電所が存在する時と同様である $t_1 = 522, t_2 = 639$ の時であった。また、最小値をとる点以外での、

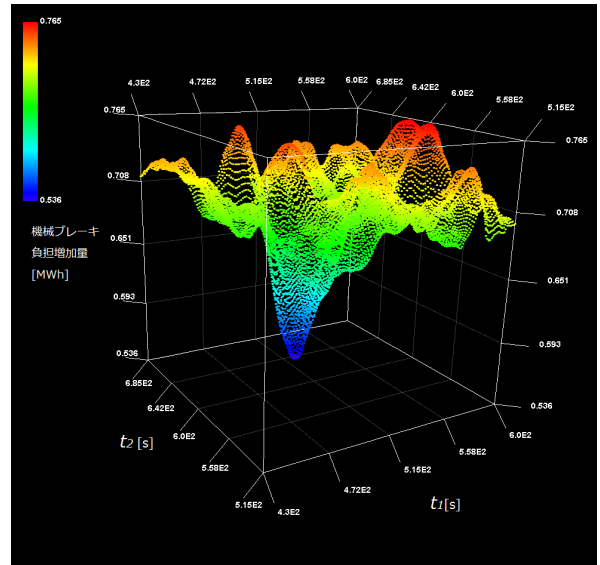


図 19 4 列車間の列車間隔に対する機械ブレーキ負担増加量 (側面図)
Fig. 19. Mechanical brake increment (Edge view)

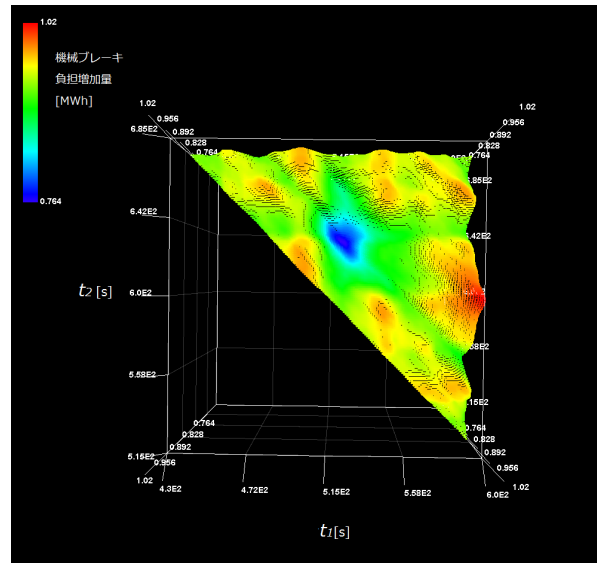


図 20 PWM 変電所がない場合での 4 列車間の列車間隔に対する機械ブレーキ負担増加量 (俯瞰図)
Fig. 20. Mechanical brake increment (Overhead view, no PWM substation)

機械ブレーキ負担増加量が極大・極小をとる列車間隔にも PWM 変電所がある場合とない場合で差がほとんど見られなかった。これより、3 列車間での列車間隔最適化の場合と同様に、4 列車間の場合においてもこのモデル路線において PWM 変電所の存在が最適解に及ぼす影響はほぼないと考えられる。

4. 結論

4・1 まとめ 本論文では直流電気鉄道のき電システムにおいて部分的に導入された PWM 変電所などの電力回収装置を有効活用するために列車間隔を最適化する手法について扱った。3 列車間での間隔最適化の結果からは、列車間隔の最適化は路線中央部での電力融通に有効であること、PWM 変電所の効果は基

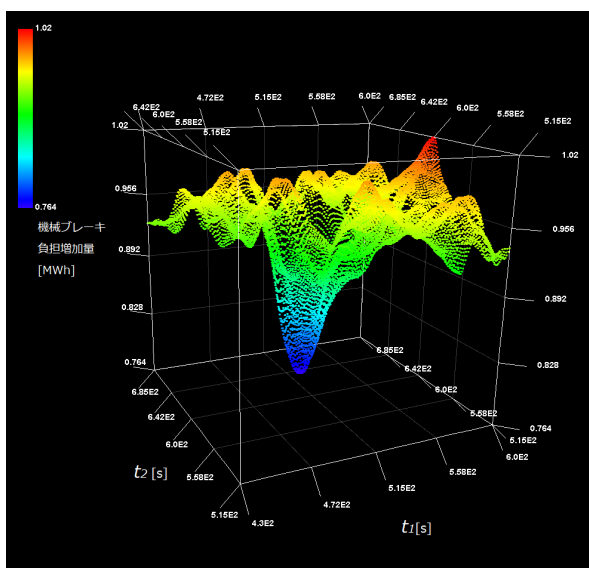


図 21 PWM 変電所がない場合での 4 列車間の列車間隔に対する
機械ブレーキ負担増加量 (側面図)
Fig. 21. Mechanical brake increment (Edge view, no PWM substation)

本的に列車間隔の違いの影響を受けにくいこと、路線始終端部の電力融通率は列車頻度に大きく影響されること、編成における両数の不均等さによる最適解への影響は小さいこと、機械ブレーキ負担増加量と列車の運行に必要なエネルギーには高い相関性があることが分かった。また、4 列車間での間隔最適化の結果からは、最適化する列車数が増えても、極小値を取る列車間隔に周期があるため採用する最適化手法を変える必要はないこと、最適化する列車数が増えても、PWM 変電所の有無による最適解への影響は小さいことが確認できた。これより、地上設備と列車間隔の協調による回生ブレーキ有効利用のためには、片方ずつ検討するのではなく、地上設備とダイヤの両方の側面を総合的に考慮して設計することが非常に重要であると言える。

4.2 今後の課題 この路線では始点から終点までの間に最大で 5 列車存在している。そのため、このモデル路線で実務的な知見を得る目的で機械ブレーキ負担増加量の最適化をするには 5 列車以上の間隔を取り扱う必要がある。また、本論文では列車は片方向のみの走行で検討したが、変電所では上下線のき電回路が接続されているため、両方向への列車走行を考えることで電力融通をより効果的にできる可能性がある。これは、特に路線の端にある駅の周辺において、本論文で得られたものよりよい結果が得られることが予想される。さらに、第 4.1 章で述べたように、回生ブレーキを最大限に利用できるよう最適化するためには設備とダイヤ両方の側面を同時に考える必要がある。そのため、設備の配置位置や、PWM 変電所以外の電力回収装置や蓄電・蓄勢装置（化学電池やフライホイールなど）の設置など含めた、き電システムの総合的な設計問題とその中での運行の最適化を扱うことのできる理論的枠組の構築が課題となる。

謝 辞

千葉大学の近藤圭一郎准教授、千葉大学の齋藤達仁さんには、研究打ち合わせの場で懇意にご指導頂きました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 交通エコロジー・モビリティ財団：“2009 年版 運輸・交通と環境” p. 11
- (2) 国土交通省総合政策情報管理部：“交通関係エネルギー要覧（平成 19 年度版）”
- (3) 鈴木高志，古閑隆章，曾根悟：“純電気ブレーキ実用化の検討”，平成 12 年電気学会全国大会，5-244，Mar. 2000
- (4) 野田昂志，古閑隆章：“地上回生機能を活用した直流電気車の高速回生ブレーキ導入効果の評価”，平成 20 年電気学会全国大会，5-086，Mar. 2008
- (5) 電気学会編：“最新 電気鉄道工学”，コロナ社 (2000)
- (6) 飯田秀樹，加賀敦：“インバータ制御電車概論”，株式会社電気車研究会 (2003)
- (7) エレクトリックマシーン & パワーエレクトロニクス編纂委員会編：“エレクトリックマシーン & パワーエレクトロニクス”，森北出版株式会社 (2004)
- (8) レールアンドテック出版：“鉄道車両と技術 No. 88” pp. 2 ~ 19
- (9) 関島康直，工藤靖之，戸田伸一，藤浦一夫，森田政次，大島友子：“鉄道車両向け EDLC 電力貯蔵システム”，JREA Vol. 45
- (10) 山田健一，板垣匡俊，竹岡俊明，岡山秀夫：“車両制御装置回生率向上の手法を示した現車試験報告”，JREA Vol. 45