

— 修士論文 —

地上回生機能を活用した直流電気車高速回生ブレーキ
有効活用法の提案と定量的評価

Proposal and Quantitative Validation of the Effectiveness of Using
the Full Force of Regenerative Brakes at High Speed
– Case Study Examining the Usefulness of Regenerative Substations –

平成21年2月4日

指導教員 古関 隆章 准教授

東京大学大学院工学系研究科
電気工学専攻 修士課程 76421

野田 昂志

内容梗概

近年の電気鉄道車両はブレーキ時に主電動機を用いて発電し、回収したエネルギーを同一供給電車線路内に存在する他の列車等に供給する電気ブレーキ、即ち回生ブレーキを用いている。このような車両であっても、従来の摩擦力による機械ブレーキと電磁気力による回生ブレーキが併用されている。これは回生ブレーキだけでは常用最大ブレーキ力を下回ってしまうからである。電気車の機械ブレーキは空気圧で制御されているため応答速度が遅い。ブレーキ力の源は摩擦力であるから、摩擦係数という環境に左右されやすい要素を含んでいる。さらに、機械ブレーキは保守に手間と費用がかかる上、摩擦の変動要素が原因で乗り心地を悪化させたり滑走を誘発したりする問題もある。

本研究では、常用ブレーキとして機械ブレーキを用いず、回生ブレーキのみを利用する純電気ブレーキシステムを提案し、地上回生機能を備えた変電所を持つ直流電気鉄道的高速車両を対象に、その導入効果を示した。

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. The regenerative brakes have to be used with conventional mechanical brakes using frictional force, the regenerative braking force is less than the simultaneous service braking force required at high speed. The response of mechanical brakes is much slower than electric brakes. The source of mechanical braking force is friction, which strongly depends on environment. A change of frictional force worsens ride quality and causes slip. Furthermore, mechanical braking force costs time and money for maintenance.

In this research, the author proposes using pure electric brakes as the ordinary brakes, which means that only the regenerative brakes without any mechanical brakes will be used at high speed. And the author evaluates the advantage of the proposed braking concept under the assumption of regenerative substations in a modern DC-electrification system.

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	電気車におけるブレーキシステムの構成	4
2.1	機械ブレーキ	4
2.2	電気ブレーキ	6
2.3	電空併用ブレーキ	7
2.4	純電気ブレーキ	9
第 3 章	高速回生ブレーキ評価のための数値計算	10
3.1	数値計算手法の概要	10
3.1.1	列車抵抗	10
3.1.2	Tustin 変換を用いた数値積分	12
3.1.3	エネルギー計算	15
3.2	パンタ点電圧変動のモデル化	15
3.2.1	変電所間に一編成のみ走行する場合	15
3.2.2	変電所間に二編成走行する場合	16
3.3	負荷特性線形近似	17
3.4	対象とする路線とその特徴	17
第 4 章	高速回生ブレーキを有効活用した運転曲線の作成と定量的評価	20
4.1	運転曲線作成における計算条件	20
4.2	一列車走行時の高速回生ブレーキ有効活用の評価	20
4.2.1	パンタ点電圧を変電所送出電圧と同一にしたケース	20
4.2.2	パンタ点電圧の変動を ± 100 V 固定としたケース	23
4.2.3	回路方程式によりパンタ点電圧の変動を考慮したケース	25
4.3	本章のまとめ	27
第 5 章	複数列車間における電力融通を考慮したときの定量的評価	30
5.1	負荷特性線形近似の妥当性確認	30
5.1.1	典型的な運転曲線の場合	30
5.1.2	定速走行区間を含む運転曲線の場合	30
5.2	複数列車走行時の高速回生ブレーキ有効活用の評価	33
5.2.1	ダイヤに与える影響	33
5.2.2	変電所入出力エネルギーに与える影響	33
5.2.3	省エネルギー化による経済的效果	36
5.3	本章のまとめ	37

第 6 章	各種条件下における感度解析	39
6.1	補機使用量変動時の評価	39
6.2	列車運行乱れ時の評価	39
6.2.1	ダイヤに与える影響	41
6.2.2	変電所入出力エネルギーに与える影響	41
6.3	複数列車による協調運転	44
6.4	本章のまとめ	44
第 7 章	結論と今後の課題	46
7.1	結論	46
7.2	今後の課題	47
参考文献		48
本研究に関する発表論文		50
謝辞		51

Table of contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Background of This Research	1
1.2	Purpose of This Research	2
1.3	Composition of This Paper	2
Chapter 2	The Constitution of Braking System in an Electric Train	4
2.1	Mechanical Brakes	4
2.2	Electric Brakes	6
2.3	Electro-Pneumatic Brakes	7
2.4	Pure Electric Brakes	9
Chapter 3	The Numerical Method for Evaluation of Regenerative Brakes at High Speed	10
3.1	Outline of the Numerical Method	10
3.1.1	Train Resistance	10
3.1.2	Numerical Integral with Tustin Transform	12
3.1.3	Energy Calculation	15
3.2	Modeling of Voltage Fluctuation at Train Pantograph	15
3.2.1	The Case that a Train Runs between Substations	15
3.2.2	The Case that Two Train Run between Substations	16
3.3	Linearization for Load Characteristics	17
3.4	Features of Model Line	17
Chapter 4	Drawing of Run-Curve with Regenerative Brakes Effectively and its Quantitative Validation	20
4.1	Condition of Case Studies	20
4.2	Evaluation for the Effectiveness of Using High Speed Regenerative Brakes during a Train Set running	20
4.2.1	The Case that Voltage at Train Pantograph is Equal to Voltage at Substations	20
4.2.2	The Case that Voltage Fluctuation at Train Pantograph is Plus or Minus 100 V	23
4.2.3	The Case that Voltage Fluctuation at Train Pantograph is Derived from Circuit Equation	25
4.3	Chapter Conclusion	27
Chapter 5	Quantitative Validation of Consideration of Electric Power Interchange between Multiple Train Sets	30
5.1	Validation of Linearization for Load Characteristics of an Electric Train	30
5.1.1	The Case that Run-Curve is Typical	30
5.1.2	The Case that Run-Curve Includes Constant Speed Running Section	30

5.2	Evaluation for the Effectiveness of Using High Speed Regenerative Brakes during Multiple Train Sets Running	33
5.2.1	Influence on Train Operation	33
5.2.2	Influence on Input and Output Energy of Substations	33
5.2.3	Economic Effects of Energy Saving	36
5.3	Chapter Conclusion	37
Chapter 6	Sensitivity Analysis under Various Conditions	39
6.1	Evaluation for Variation in Auxiliary Components Power	39
6.2	Evaluation for Disordered Operation	39
6.2.1	Influence on Train Operation	41
6.2.2	Influence on Input and Output Energy of Substations	41
6.3	Cooperative Operation of Multiple Train Sets	44
6.4	Chapter Conclusion	44
Chapter 7	Conclusion	46
7.1	Summary	46
7.2	Future Work	47
Reference		48
List of Publications		50
Acknowledgement		51

第1章 序論

1.1 研究の背景

鉄道は他の交通と比べて、エネルギー特性、土地利用効率、資源問題、安全性などの特性が目立って優れていると言われている。特に最近ではエネルギー問題や資源のリサイクルなど環境問題が取り沙汰されていることから、鉄道業界には注目が集まっている。

旅客部門のエネルギー消費量は、GDP の伸び率を上回る伸びで増加してきた。また、旅客部門では輸送量、エネルギー消費量ともに貨物部門を上回って推移している。1965 年から 2004 年の 39 年間にエネルギー消費量は運輸部門全体で 4.8 倍（年率 4.1 % 増）となり、このうち旅客部門は 7.1 倍（年率 5.2 % 増）となった。エネルギー源としては、主として乗用車に使われるガソリンの割合が 1956 年度の 53 % から 2004 年度では 75 % に増加している一方で、主として鉄道に使われる電力の割合は 1956 年度の 7 % から 2004 年度には 3 % に減少している (Fig. 1.1[1])。鉄道で使用する電力は日本の総使用電力量の約 2.1 % であり、消費エネルギーの約 92 % が電気エネルギーにより賄われている。また、旅客輸送に使われる主な交通機関の輸送量に対するエネルギー消費量を比較した場合、自家用乗用車は他の輸送機関に比べエネルギー効率が悪く、鉄道が最もエネルギー効率の良い輸送機関であることが分かる (Fig. 1.2[1])。

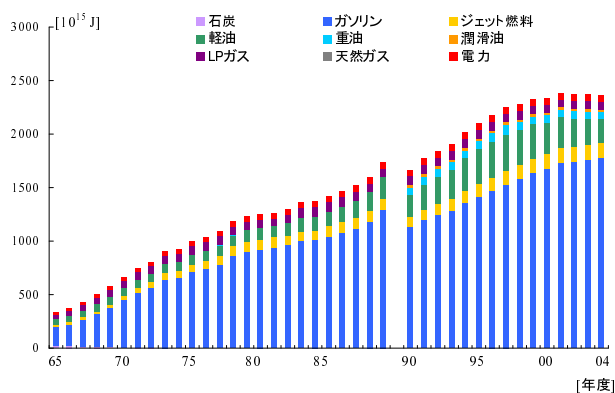


Fig. 1.1: 旅客部門のエネルギー源別消費量の推移

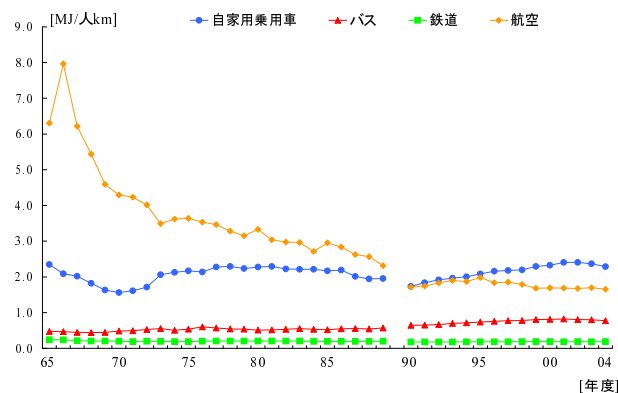


Fig. 1.2: 輸送機関別エネルギー消費原単位の推移

たとえ鉄道の使用電力が全て石油火力発電であるとしても、総合効率で若干有利、即ち同一の輸送形態での石油消費量がやや少なくて済むとされている。さらに、省エネルギー特性に優れている鉄道自体をさらに向上させるよりも、エネルギー特性の悪い自家用乗用車などから鉄道へのモーダルシフトを図ることが社会全体での交通分野の省エネルギー化にははるかに効果的であり、総合的な環境対策が推進されつつある [2]。この目的のためには鉄道のエネルギー特性を若干悪化させてでも、高速化・高頻度化などによって競争力を高めるべきとの議論に至っている。特に京都議定書での国際公約になっている 2008 ~ 2012 年の実績データを示すべきときが近づいている中で、達成が困難とされている運輸部門では緊急の課題とも言える。

また、鉄道分野ではパワーエレクトロニクス技術の発展に伴い、ブレーキ時に主電動機を用いて発電し、回収したエネルギーを同じ路線上の他の列車等に供給する電気ブレーキ、即ち回生ブレーキが一般

化してきた [3]。海外ではスイスの登山電車で 19 世紀末に実用化されており，日本でも 20 世紀半ばには実用化されて導入が進められてきた。回生ブレーキは得られた電気エネルギーを捨てずに何らかの方法で有効活用するシステムであり，電気駆動の大きな利点の一つと言える。近年では，エンジンとモータを組み合わせ駆動に用いるハイブリッド自動車など，鉄道以外でも回生ブレーキが用いられるようになってはいるが，バッテリーの重量や充放電効率などの面で問題を抱える自動車に対し，き電システムに電力を返せばよい電気鉄道の優位性は高い。

しかし，き電システムが回生ブレーキに対応していなければしばしば回生失効が発生する。そこで，電力貯蔵装置を利用して失効する分を一時的にため込めば，後の力行時に再使用することで省エネルギーとなり，これを積極的に利用して設備容量を減らしたり，車両としての高速時の回生性能自体を向上させることもできる [4]。このように，鉄道で更なる省エネルギー化を実現するための技術的課題は，き電システム，回生，エネルギー蓄積がキーワードとなっている。

1.2 研究の目的

古閑研究室では鉄道の更なる省エネルギー化を目指す目的などから，常用ブレーキとして機械ブレーキを用いず，電気ブレーキのみを作用させる純電気ブレーキを提案し，計算機により評価してきた [5][6]。これらの研究では，純電気ブレーキ化時の定点停止精度や過剰な回生絞り込みなどに注目して，純電気ブレーキ化の効果を明らかにしてきた。これまでの研究では，回生ブレーキを有効活用しようにも設備上の制限から列車の持つ性能を最大限に発揮できないという問題点があった。そのため，き電システムの制御を見直したり駆動系の出力増強を図ったりすることで，純電気ブレーキの良さを引き出していた。

しかし，昨今の技術進歩により回生ブレーキの性能を最大限に発揮し，省エネルギー効果を更に高められる可能性が出てきた。それが，電力貯蔵装置や PWM 整流器を備えた変電所の導入である。実路線への適用例はまだほとんど見られないが，これらの設備を利用すれば回生ブレーキを有効活用でき，純電気ブレーキの実現も容易に可能となる。また，回生失効対策として変電所送出電圧を下げる必要性もほとんどなく，寧ろ列車性能の向上を図るために昇圧することも可能となる。

以上のことを踏まえて本論文では，直流電気鉄道的高速車両において純電気ブレーキの導入を提案し，対象路線の地上設備が回生機能を備えていることで，その性能を最大限に引き出すことを考える。ブレーキシステムの変更に伴い，列車ダイヤ作成の基礎となる運転曲線を見直すことで，現状の運用に支障をきたすことなく，純電気ブレーキを有効的に活用することを目指す。その効果については，運転曲線およびエネルギー収支により評価する。また，これまでの回生ブレーキに関する研究でほとんど行われてこなかった複数列車の走行モデルを構築することで，列車間の電力融通を考慮し，回生ブレーキの省エネルギー効果をより詳細に検討する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りとする。

序論 研究背景および回生ブレーキの位置づけやこれまでに行なわれた検討などをまとめ，本論文で明らかにする課題をまとめる。

ブレーキシステム 本論文で対象とする電気鉄道車両にて一般的に用いられているブレーキシステムおよび提案手法である純電気ブレーキの特徴について述べる。

数値計算手法 数値検討を行う上で必要となる運転曲線作成の計算手法についてまとめる。数値計算として精度の高い結果を得るためにどのような手法を適用するのか，その方法を論じる。また，ケーススタディを行うために用いるモデル路線とその特徴について述べる。

高速回生と運転曲線 高速回生ブレーキを有効活用した運転曲線の作成を行い，純電気ブレーキ化の効果を明らかにする。また，パンタ点電圧変動が運転曲線およびエネルギー収支に与える影響についても検証する。

列車間電力融通 複数列車が走行するモデルを用いて列車間の電力融通を考慮し，純電気ブレーキ化による省エネルギー効果を明らかにする。このモデルで列車の負荷特性に線形近似を適用することの妥当性についても検証する。また，電力会社からの購入エネルギーという経済的観点からも評価する。

感度解析 本研究の対象であるブレーキパターン以外の条件を変更したときの感度解析を行う。季節など気象条件により出力の異なる補機の使用量が変動したとき，列車運行乱れが生じて列車間での電力融通のタイミングが変動したときのエネルギー収支を評価する。また，省エネルギー化を図った複数列車による協調運転の可能性について述べる。

結論 最後に，本論文で得られた結果をまとめる。

第2章 電気車におけるブレーキシステムの構成

本章では、電気鉄道車両にて一般的に用いられているブレーキシステムについて述べる。

2.1 機械ブレーキ

現在、電気鉄道車両のブレーキには Fig. 2.1 に示されるように様々な種類がある [7]。多くの場合、機械ブレーキと電気ブレーキが併用されているが、あくまで機械ブレーキが中心であり、電気ブレーキはその補助的な役割しか担っていない。

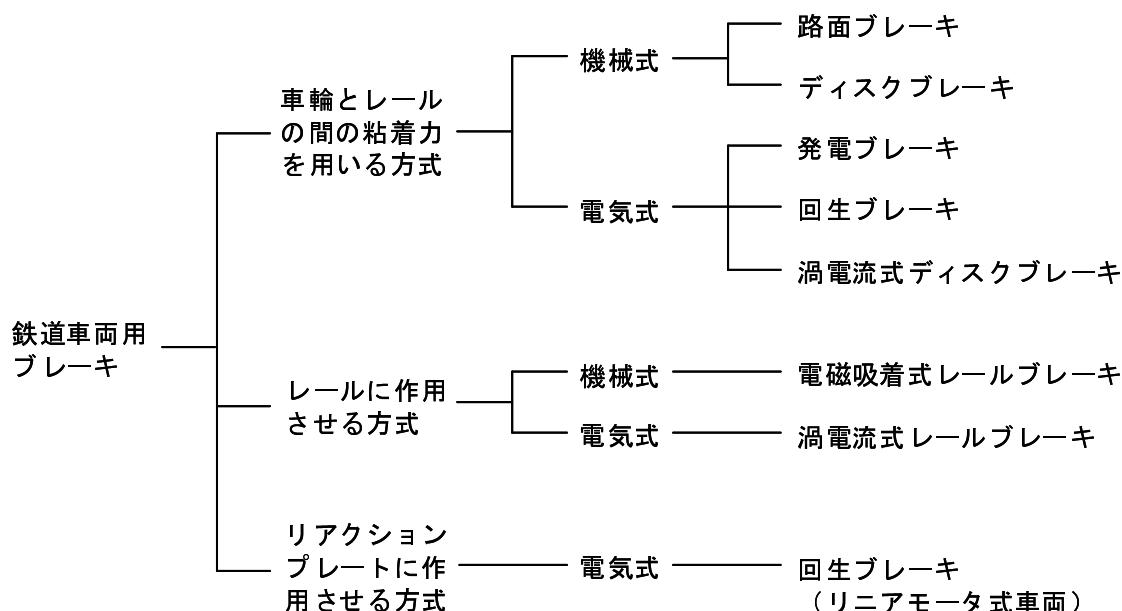
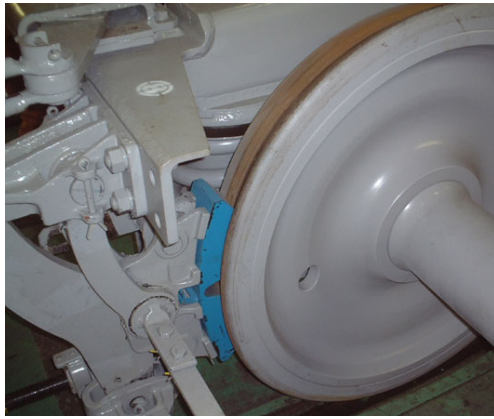


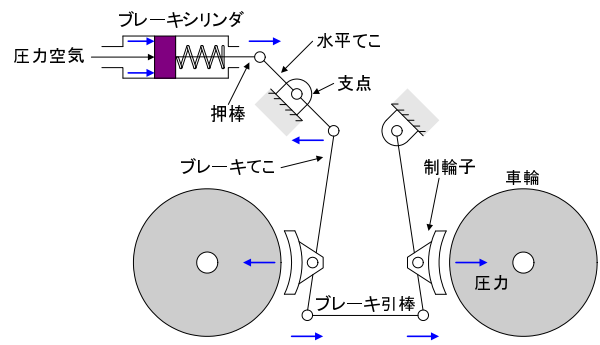
Fig. 2.1: 電気車におけるブレーキの種類

機械ブレーキは Fig. 2.2 や Fig. 2.3 に示すような車輪とレールの間の粘着力を用いる方式が大半を占めている。

踏面ブレーキ 踏面ブレーキは制輪子（ブレーキシュー）を車輪踏面に押し付けてその摩擦力によりブレーキ力を得る方式で、摩擦機構の一方を車輪踏面が兼ねている。この方式は鉄道車両において最も初期から使われたブレーキで、現在でも広く使用されている。車輪の削正によって車輪直径が小さくなっても、摩擦係数と制輪子の押し付け力が一定であれば一定のブレーキ力が得られる。また、踏面の汚れや異物などを排除して最大粘着力を向上する利点がある。しかしながら、摩擦面が車輪兼用であり、あまり高い熱負荷に耐えることができない。さらに、摩擦により車輪踏面が摩耗し、車輪の寿命が短くなるなどの欠点がある。構造としては両抱式と片押式の二種類がある。前者は車輪の前後から抑える方式で、構造が複雑になることや制輪子の数が増え、保守に手間のかかることから古い車両に多い。後者は両抱式と比べて保守が容易なことから採用が増えている。



(a) 車輪および制輪子



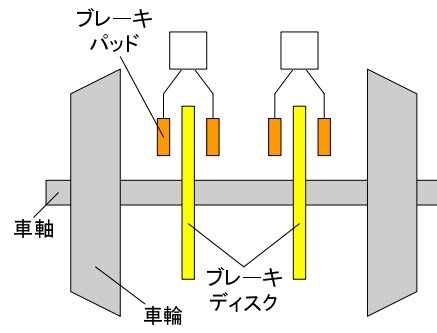
(b) ブレーキ構造

Fig. 2.2: 踏面ブレーキ

ディスクブレーキ ディスクブレーキは摩擦円盤，即ちブレーキディスクを車輪，車軸，推進軸などに固定し，これに制輪子を押し付けてその摩擦力でブレーキ力を得る方式である。この方式は車輪の直径が削正で小さくなると，摩擦係数と制輪子の押し付け力が一定であれば，ブレーキ力が大きくなる欠点がある。しかし，車輪踏面に対する熱の影響や踏面形状を変化させる悪影響はないので，電気ブレーキがなく機械ブレーキのみの付随車に多く使用されている。なお，新幹線は高速域からブレーキをかけるため，電動車には車輪ディスクブレーキを使用している。



(a) 車輪およびブレーキディスク



(b) ブレーキ構造

Fig. 2.3: ディスクブレーキ

機械ブレーキは古くから用いられており長い実績を持っているが，いくつかの問題を抱えている。まず，圧縮空気により制御されていることから，ブレーキの応答速度が遅いことが挙げられる。ブレーキ指令を電気信号として伝送して空気弁の開閉を行う電気指令式が一般的ではあるが，それでも数百ミリ秒程度の応答遅れが存在する。次に，精密なブレーキ力制御ができないことが挙げられる。これは空気圧による制輪子の押し付け力とブレーキ力，即ち摩擦力との間に摩擦係数という変動要素が介入することに起因する。摩擦係数は環境に左右されやすく，その変動幅は数十 % にも達する。よって，制輪子の押し付け力制御はできても，厳密なブレーキ力制御はできないのが現実である。さらに，保守に大きな労力と費用がかかることが挙げられる。ブレーキをかけることで制輪子が磨耗するため，定期的な交換しなければならない。この他にも，動作時の騒音や異臭，粉塵の発生などといった問題も抱えている。

2.2 電気ブレーキ

電気ブレーキは走行する車両の運動エネルギーや位置エネルギーを駆動用主電動機によって電気エネルギーへ変換し、消費または再利用することによって生じるブレーキ力を利用するシステムの総称である。その中でも発電ブレーキと回生ブレーキに大別される。

発電ブレーキ 発電ブレーキは主電動機を発電機として使用し、発生する電力を車両に搭載した抵抗器で熱として消費させる方式である。主電動機として直流電動機が主体であった 1950 年代頃から常用ブレーキ系として一般に普及し広く発展を遂げた。負荷の有無に関わらず自車単独で安定したブレーキ性能が得られ、信頼性が高い。

回生ブレーキ 回生ブレーキは変換した電気エネルギーを架線（電車線）に戻し、他の力行中の電気に供給することでエネルギーの再利用を図る方式である。運動エネルギーを熱エネルギーとして大気に出すことがなく、省エネルギー効果が期待できる。しかしながら、回生エネルギーを再利用するためには直流き電の場合、次のような回生負荷が必要となる。

1. 同一供給電車線路内に存在する他編成力行負荷
2. 同一供給電車線路内に存在する他編成補助電源負荷
3. 自編成内補助電源負荷
4. 電力回生インバータを通しての変電所からの鉄道関連一般負荷
5. 電力回生インバータを通しての電力会社への電力供給
6. 余剰電力再利用のための各種電力貯蔵システム

上記の負荷がないと、架線電圧が上昇してしまうため機器保護のために回路遮断をしたり、電圧上昇を抑えるために回生電流の絞り込みが行われたりする。このような現象により回生ブレーキが全く使えなくなることを回生失効と呼ぶ。都心部のような列車密度の高い路線において回生失効はほとんど起こらないが、列車密度がそれほど高くない路線では回生電流の絞り込みにより、性能設計通りの電気ブレーキ力が得られていない場合も多い。

次に、一般的な誘導電動機駆動車の減速特性を Fig. 2.4 に示す。この特性は低速側から定トルク領域、トルクが速度に反比例する定電力領域、トルクが速度の二乗に反比例する特性領域に分けられる。定トルク領域では V/f （電圧/周波数）が常に一定になるように、周波数と電圧の制御を同時に行い、二次電流を一定に保つようにすべり周波数を制御する。周波数と電圧の両方を制御するため、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 領域とも呼ばれる。このときのトルク値は起動時の電流制限などから決められている。定電力領域ではこれ以上電圧を上げられず、回転速度の上昇とともに電動機電流が減少するため、さらに回転数を上げるために、すべり周波数を上げるとともに電動機電流を一定に保つ制御を行う。速度上昇とともに回路のインピーダンスが増加するため、トルクは $1/f$ の関係で低下していく。特性領域ではすべり周波数が許容値に達するため一定とし、電源周波数を制御する。このときの電流は周波数に反比例し、トルクはさらに $1/f^2$ の関係で低下していく。

Fig. 2.4 に示すように高速域では回生ブレーキ力となるブレーキトルクが低下している。鉄道では一般的に、ブレーキ力は速度に関係なく一定の減速度を得られるように設定する。そのため高速域では不足分を機械ブレーキによって補っているのが現状である。

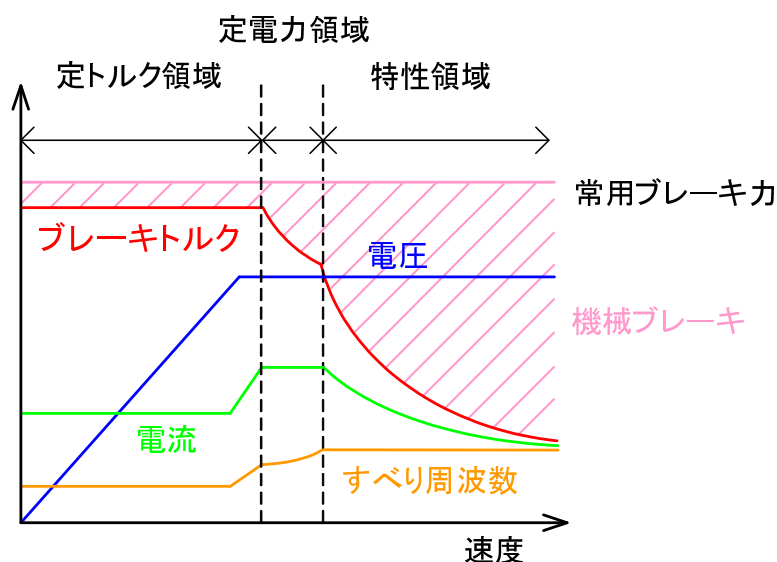


Fig. 2.4: 誘導電動機駆動車の減速特性

2.3 電空併用ブレーキ

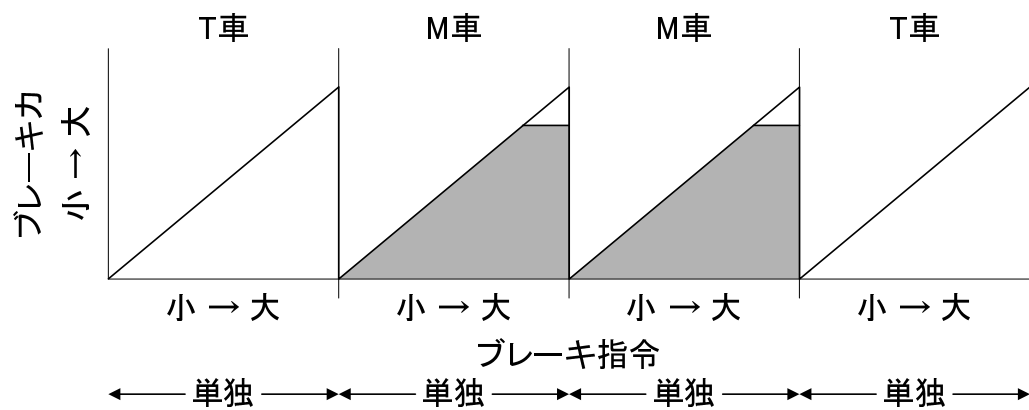
電空併用ブレーキとは、電気ブレーキと空気ブレーキを混用するブレーキシステムのことである。空気ブレーキは機械ブレーキの一種でブレーキシリンダ内の空気圧を制御することによってブレーキ力を得る方式である。電気ブレーキと空気ブレーキとの分担方法には、均一ブレーキ制御と遅れ込めブレーキ制御がある。

均一ブレーキ制御 均一ブレーキ制御は編成として負担すべきブレーキ力について、各車両ごとに所定のブレーキ力で均等に負担する方式である。Fig. 2.5 (a) は均一ブレーキの分担を示したもので、ブレーキの指令値に対応して T 車（空気ブレーキ）・M 車（電気ブレーキ）とも自車分だけを負担する均一のブレーキ力になっている。T 車は付随車、M 車は電動車を意味する。付随車は常時空気ブレーキが作用しているため当然制輪子の摩耗量は多くなる。

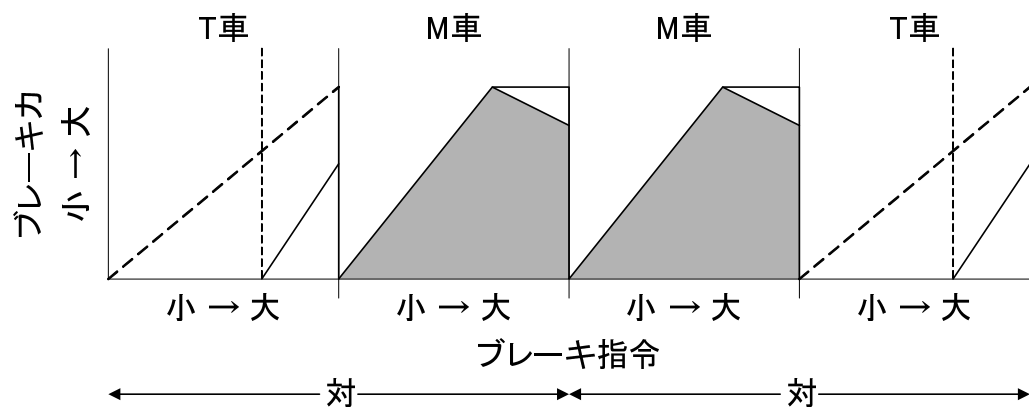
遅れ込めブレーキ制御 遅れ込めブレーキ制御は電気ブレーキの高粘着制御を最大限に作用させるために、編成として必要なブレーキ力を満足させながら、付随車と電動車はそれぞれ異なる値でブレーキ力を分担する方式である。電動車は粘着限界と電動機特性の限界までの最大限の電気ブレーキ力が設定されている。

電動車はブレーキ指令が小さい領域では付随車の分までブレーキ力を負担し、この領域では付随車には空気ブレーキは作用しない。Fig. 2.5 (b) の点線は指令値が大きくなり電気ブレーキが負担できる限界を超えた時点から空気ブレーキが補足されることを示す。T 車優先遅れ込め制御では、電気ブレーキ力が不足した場合、その不足分の空気ブレーキ力が付随車に補足される。そのまま付随車の空気ブレーキ力が自車に必要な最大のブレーキ力まで達した場合は、以後動力車の空気ブレーキ力で電気ブレーキの不足量を補足する。回生失効した状態では、動力車、付随車とも空制均一ブレーキとなる。

しかしながら、このようなシステムにもいくつかの問題点がある。まず、遅れ込め制御といっても実際には歴史的に実績があって信頼がおける空気ブレーキが最初に動作するため、立ち上がりが遅く、空走時間も長い。また、電気ブレーキ力のフィードバック量に応じて空気ブレーキを調整するといっても、両者の応答速度には一桁以上の違いがあり、合計のブレーキ力は大きく変動する。特に、停止間際の電空切り替え時におけるブレーキ力の変動は、停止精度に大きな影響を与え、乗り心地の悪化を招く。



(a) 均一ブレーキ



(b) 遅れ込めブレーキ

■ 電気ブレーキ □ 空気ブレーキ

Fig. 2.5: 編成におけるブレーキ力分担の方法

2.4 純電気ブレーキ

純電気ブレーキという用語は、現在二通りの意味として用いられている。一つは「低速において電気ブレーキから機械ブレーキへの切り替えを行わず、停止まで電気ブレーキを作用させるブレーキシステム」のことを指し、電気停止ブレーキとも呼ばれる [8]。通常、ブレーキ時の電空切替点は 5 km/h 付近に設定されているが、0 km/h まで延長することを意味する。この電気停止ブレーキは 1998 年に新京成電鉄 8900 系で初めて営業運転を実現し [9]、その後、他社にも採用が広がっていった。0 km/h までブレーキ力を制御するには逆相モードが必要であるため、直流電動機を主電動機とする車両では困難であり、インバータ制御車であれば比較的容易に実現可能である。

もう一方は「常用ブレーキとして機械ブレーキを用いず、Fig. 2.4 に示す電動機 - 発電機のトルク特性の範囲内で電気ブレーキのみを作用させるブレーキシステム」のことを指す [10][11]。こちらが本来の純電気ブレーキの定義である。在来線にて現在これを実用化している車両はない。常用ブレーキを回生ブレーキのみとするには、周囲の状況に左右されずに所望のブレーキ力が得られるよう回生失効対策が必要となる。常用ブレーキと限定しているのは、非常用および停止状態の維持のために機械ブレーキを残すからである。電気ブレーキは停電すると作用しなくなる危険性があること、安全の基本装置であるブレーキは二重系以上とする思想があることから、バックアップとして機械ブレーキは残さなければいけない。停止状態維持まで電気ブレーキで行うことも技術的には不可能ではないが [12]、そのために絶えずエネルギーを注ぎ込まなければならず、あまり合理的でない。従って、純電気ブレーキといっても従来の機械ブレーキ系は当面そのままの形で残る。ただ、電空併用時のブレーキ力分担に関わる制御が不要となる。ここに加え、後述のように機械ブレーキ摩擦部分の保守が本質的に軽減される利点が大である。

第3章 高速回生ブレーキ評価のための数値計算

本章では、運転曲線を作成するための数値計算手法を述べる。次に、列車の走行に伴うパンタ点電圧の変動を考慮した回路計算を述べ、回路方程式における非線形要素である負荷の線形近似の適用について述べる。また、以降の章で行うケーススタディに用いるモデル路線とその特徴について紹介する。

3.1 数値計算手法の概要

ここでは、高速回生ブレーキの有効活用を数値計算によって求めるために、運転曲線の作成手法を考える。Fig. 3.1 に運転曲線を作成する際のブロック線図を示す。数値計算の入力は運転士のノッチ操作のみとし、車両の主電動機特性に合わせて引張力またはブレーキ力が決まる。さらに抵抗として、出発抵抗、走行抵抗、トンネル抵抗、勾配抵抗および曲線抵抗を想定し、速度および距離に合わせて逐一値を決定していく。これらの値の差が実際に列車を動かしたり停止したりする力となる。そこから加減速度を計算し、積分することで速度および距離が順に計算される。

3.1.1 列車抵抗

列車が出発または走行しているときには、牽引に抗して抵抗力が生ずる。列車抵抗には車輪とレール間の摩擦抵抗、車輪と軸受間の摩擦抵抗、空気による抵抗、勾配を上るための抵抗、曲線による抵抗、速度を上げるための抵抗などが挙げられる [13][14]。

出発抵抗 Eq. (3.1) に出発抵抗 R_s [N] を示す。 M は乗客を含めた列車質量 [t] である。出発抵抗は停車中の列車が出発のときに生ずる抵抗である。列車を長く止めておくと、車軸と軸受の間、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抵抗を生ずる。列車が動き出すと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。このことから適用範囲は速度が 0 ~ 3 km/h の間としており、Fig. 3.2 に示すように 0 km/h の出発抵抗値と 3 km/h の走行抵抗値を直線で結び、3 km/h を超えると走行抵抗に移行させる。

$$R_s = 9.8 \times 4M \quad (3.1)$$

走行抵抗 Eq. (3.2) および Eq. (3.3) に走行抵抗 R_r [N] を示す。Eq. (3.2) は明かり区間、Eq. (3.3) はトンネル区間での走行抵抗である。 v は列車速度 [km/h]、 M_M は電動車質量 [t]、 M_T は付随車質量 [t]、 n は編成両数である。走行抵抗は車軸と軸受の摩擦抵抗、車輪とレール間のころがり摩擦抵抗、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。走行抵抗は関係する因子が複雑に絡み合っているため理論的に求めることは困難であり、現車による実測データを基に速度の二次式で表される。なお、列車がトンネル内を走行する場合、速度が高くなると空気との摩擦により抵抗が増大する。そのため、高速運転を行う鉄道やトンネル断面の小さい地下鉄線では明かり区間とトンネル区間で区別している。

$$R_{r1} = 9.8[(1.65 + 0.0247v)M_M + (0.78 + 0.0028v)M_T + \{0.028 + 0.0078(n - 1)\}v^2] \quad (3.2)$$

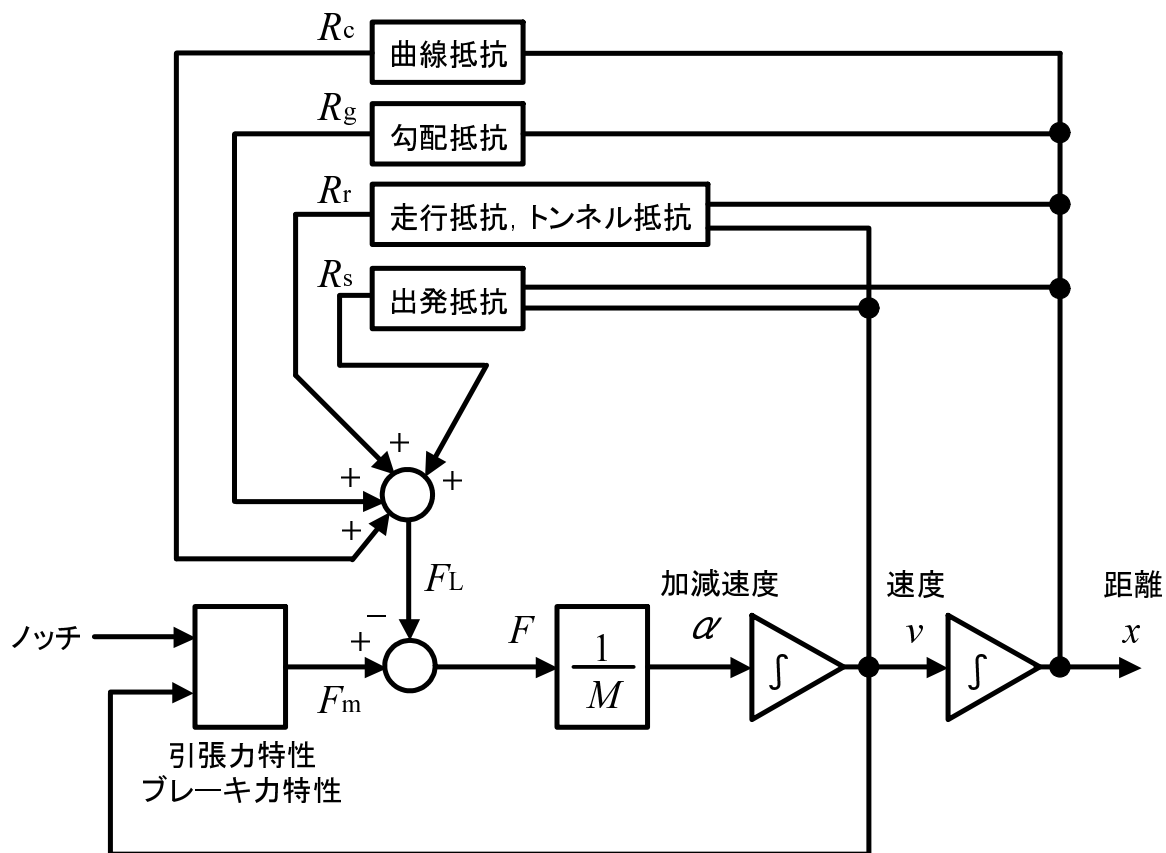


Fig. 3.1: 車両システムのブロック線図

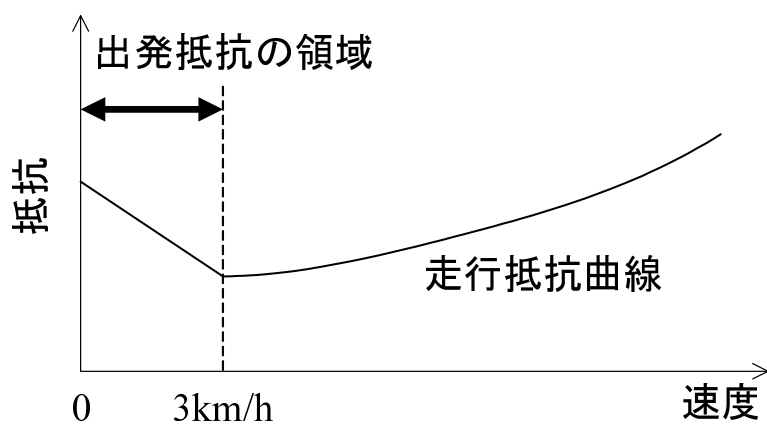


Fig. 3.2: 出発抵抗と走行抵抗

$$R_{r2} = 9.8(2.088 + 0.0394v + 0.00067v^2)M \quad (3.3)$$

勾配抵抗 Eq. (3.4) に勾配抵抗 R_g [N] を示す。 i は勾配の傾斜を表す勾配量 [%] , L は勾配区間にある列車の長さ [m] , L_t は列車の全長 [m] である。勾配抵抗は列車が勾配上にあるとき、重力により勾配の下方に引き下げようと受ける力で、列車の運転に対して上り勾配で受ける場合を正、下り勾配で受ける場合を負で表す。勾配を上る列車に対しては減速させる力として作用し、勾配を下る列車に対しては加速させる力として作用する。また、勾配抵抗を列車の先頭位置 x に関する連続関数として表すことで、列車長 L_t にわたる質量の一様分布を考慮できる。Fig. 3.3 では勾配抵抗が R_{g1} から R_{g2} へと変化する例を示している。

$$R_g = 9.8M\left(\frac{i}{1000}\right)\left(\frac{L}{L_t}\right) \quad (3.4)$$

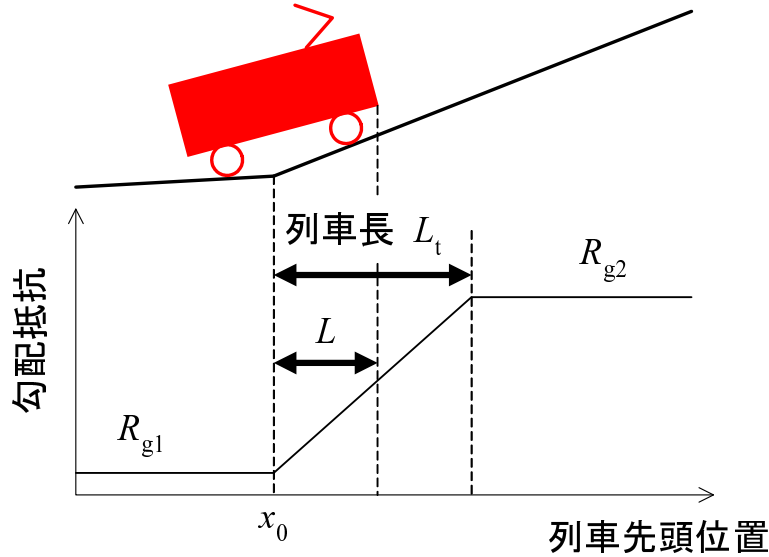


Fig. 3.3: 列車長にわたる質量分布を考慮した勾配抵抗

曲線抵抗 Eq. (3.5) に曲線抵抗 R_c [N] を示す。 r は曲線半径 [m] である。曲線抵抗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、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生じる摩擦抵抗などを総称したものである。曲線提供は軌間、曲線半径、カント、スラック、台車の固定軸距、通過速度などの影響を受け、モリソン提唱の式が基本となっているが、実際には試験結果などを勘案して誘導した Eq. (3.5) を用いている。

$$R_c = 9.8\left(\frac{600}{r}\right)\left(\frac{L}{L_t}\right) \quad (3.5)$$

3.1.2 Tustin 変換を用いた数値積分

Fig. 3.1 に従って精度よくデジタル化した数値積分を行うため、漸化式の導出は線形近似に基づく双一次変換を用いた離散化 (Tustin 変換)[15] および状態遷移行列を用いて行う。まず、走行抵抗 R_r , 勾配抵抗 R_g , 曲線抵抗 R_c を微小時間 $t \rightarrow t + \Delta t$ の間で線形近似した微分方程式を Eq. (3.6) , Eq. (3.7) ,

Eq. (3.8) とする。それぞれ列車速度 v および列車位置 x の関数となる。これにより局所的線形化される。

$$R_r(v + \Delta v) = R_r(v) + \frac{\partial R_r(v)}{\partial v} \Delta v \quad (3.6)$$

$$R_g(x + \Delta x) = R_g(x) + \frac{\partial R_g(x)}{\partial x} \Delta x \quad (3.7)$$

$$R_c(x + \Delta x) = R_c(x) + \frac{\partial R_c(x)}{\partial x} \Delta x \quad (3.8)$$

以上三式を Fig. 3.1 に入れて、引張力特性およびブレーキ力特性から得られる列車の牽引力 F_m から計算すると、加減速度および速度は Eq. (3.9)、Eq. (3.10) のように示される。

$$\frac{d}{dt} \dot{x} = -\frac{1}{M} \left(\frac{\partial R_g}{\partial x} + \frac{\partial R_c}{\partial x} \right) \Delta x - \frac{1}{M} \left(\frac{\partial R_r}{\partial v} - \frac{\partial F_m}{\partial x} \right) \Delta v + \frac{1}{M} (F_m - R_r - R_g - R_c) \quad (3.9)$$

$$\frac{d}{dt} x = \dot{x} \quad (3.10)$$

従って、Eq. (3.11) のように行列を定義すると、Eq. (3.9) および Eq. (3.10) は Eq. (3.12) のように整理できる。ただし、Eq. (3.13)、Eq. (3.14)、Eq. (3.15) の関係式を満たしているものとする。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_c(t) \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_c(t) U(t) \quad (3.12)$$

$$\mathbf{A}_c(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{M} \left(\frac{\partial R_g}{\partial x} + \frac{\partial R_c}{\partial x} \right) & -\frac{1}{M} \left(\frac{\partial R_r}{\partial v} - \frac{\partial F_m}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{B}_c(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$U(t) = F_m - R_r - R_g - R_c \quad (3.15)$$

さらに、Eq. (3.12) について状態方程式の離散化を行う。短いタイムステップ T で離散化するとき、 $nT \leq t \leq (n+1)T$ において以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}(t) &= \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(nT) \\ &= \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_n \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_c(nT) \Delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_n(nT) U(nT) \\ &= \mathbf{A}_n \Delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_n U_n \end{aligned} \quad (3.17)$$

ただし $t = nT$ を初期値とし、 $nT \leq t \leq (n+1)T$ でシステム行列および入力行列は $t = nT$ における値を固定値とする。Eq. (3.16)、Eq. (3.17) より Eq. (3.18) を得る。

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n (\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_n) + \mathbf{B}_n U_n \quad (3.18)$$

これを $nT \leq t \leq (n+1)T$ で積分すると, Eq. (3.19), Eq. (3.20), Eq. (3.21) のように漸化式が導出できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}((n+1)T) &= e^{\mathbf{A}_n T} \mathbf{x}_n + \int_0^T e^{\mathbf{A}_n(T-\tau)} d\tau \mathbf{B}_n U_n \\ \mathbf{x}_{n+1} &= \mathbf{A}_d(n) \mathbf{x}_n + e^{\mathbf{A}_n T} \left[-\mathbf{A}_n^{-1} e^{-\mathbf{A}_n \tau} \right]_0^T \mathbf{B}_n U_n \\ &= \mathbf{A}_d(n) \mathbf{x}_n + \mathbf{A}_n^{-1} (e^{\mathbf{A}_n T} - \mathbf{I}) \mathbf{B}_n U_n \\ &= \mathbf{A}_d(n) \mathbf{x}_n + \mathbf{B}_d(n) U_n \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_d(n) &= e^{\mathbf{A}_n T} \\ &= \mathbf{I} + \mathbf{A}_n T + \frac{1}{2!} \mathbf{A}_n^2 T^2 + \frac{1}{3!} \mathbf{A}_n^3 T^3 + \dots \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_d(n) &= \mathbf{A}_n^{-1} (e^{\mathbf{A}_n T} - \mathbf{I}) \mathbf{B}_n \\ &= \left(T + \frac{1}{2!} \mathbf{A}_n T^2 + \frac{1}{3!} \mathbf{A}_n^2 T^3 + \dots \right) \mathbf{B}_n \end{aligned} \quad (3.21)$$

これにより得られた (x_n, v_n) を $n = 0, 1, 2, \dots, n$ までプロットすることで, Fig. 3.4 に示すような運転曲線を作成できる。

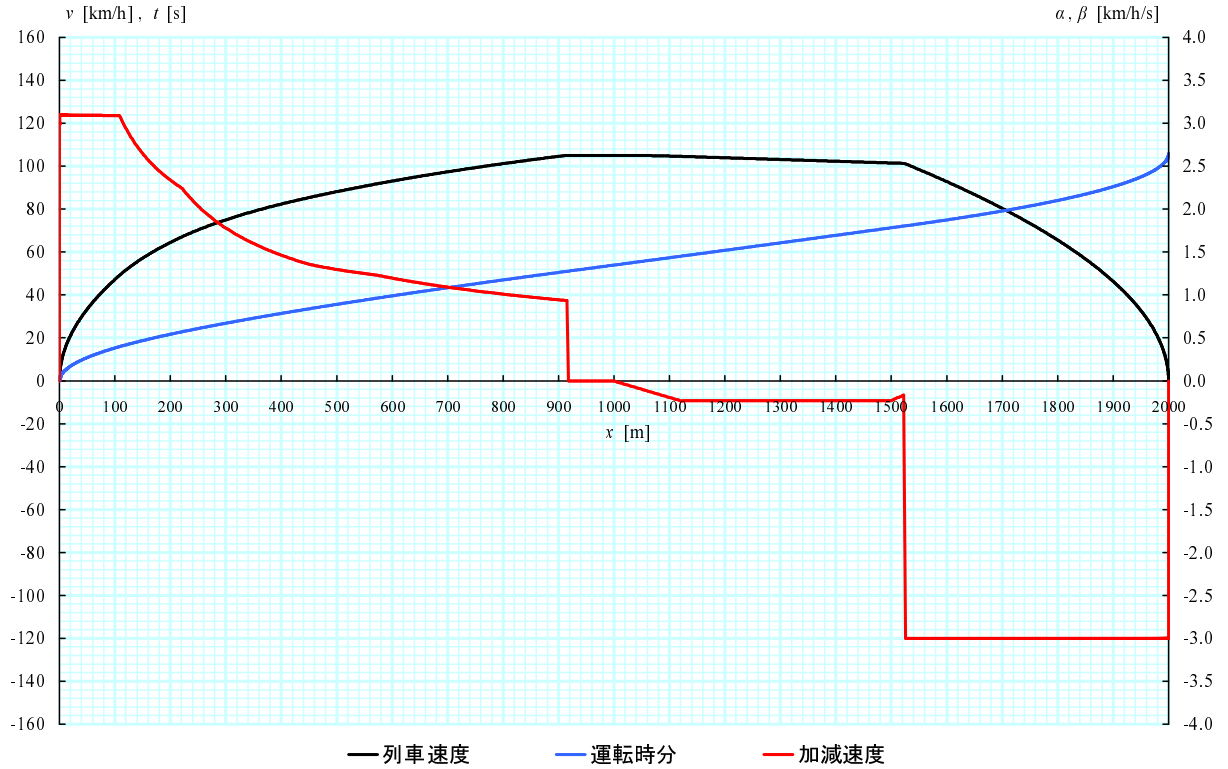


Fig. 3.4: 運転曲線例

3.1.3 エネルギー計算

力行時および制動時のエネルギーは，列車の持つ力学的エネルギーから変換効率を考慮することで導出する。

力行エネルギー 力行エネルギー E_p [kWh] は Eq. (3.22) に示すように，列車の引張力，列車速度およびエネルギー変換効率 η から求まる電力を時間積分することで算出する。ただし，エネルギー変換率は Eq. (3.23) に示す「モータの効率 \times インバータの効率 \times 駆動装置の効率」とする。

$$E_p = \int F_m v \frac{1}{\eta} dt \quad (3.22)$$

$$\eta = 0.90 \times 0.95 \times 0.975 \quad (3.23)$$

回生エネルギー 回生エネルギー E_r [kWh] も力行エネルギーと同様に，Eq. (3.24) から算出する。ただし，力行エネルギーとはエネルギー変換率が逆数となる。

$$E_r = \int F_m v \eta dt \quad (3.24)$$

3.2 パンタ点電圧変動のモデル化

仮に，変電所送出電圧が一定であったとしても，架線電圧は列車が力行や回生を行うたびに刻々と変動している。即ち，列車がパンタ点において電力を受け取る時点で，変電所送出電圧とは異なる値となる。パンタ点電圧の変動は主電動機のトルク特性にも影響を及ぼすため，考慮すべき事項の一つである。

3.2.1 変電所間に一編成のみ走行する場合

変電所間に一編成のみ列車が走行する場合，Fig. 3.5 に示すようにパラメータを与える。変電所 1 からの送出電圧を V_1 ，電流を I_1 ，列車までの距離を d_1 ，変電所 2 からの送出電圧を V_2 ，電流を I_2 ，列車までの距離を d_2 ，列車が得る電力を P ，パンタ点電圧を V ，架線抵抗を R としたとき Eq. (3.25) の関係式が成り立つ。

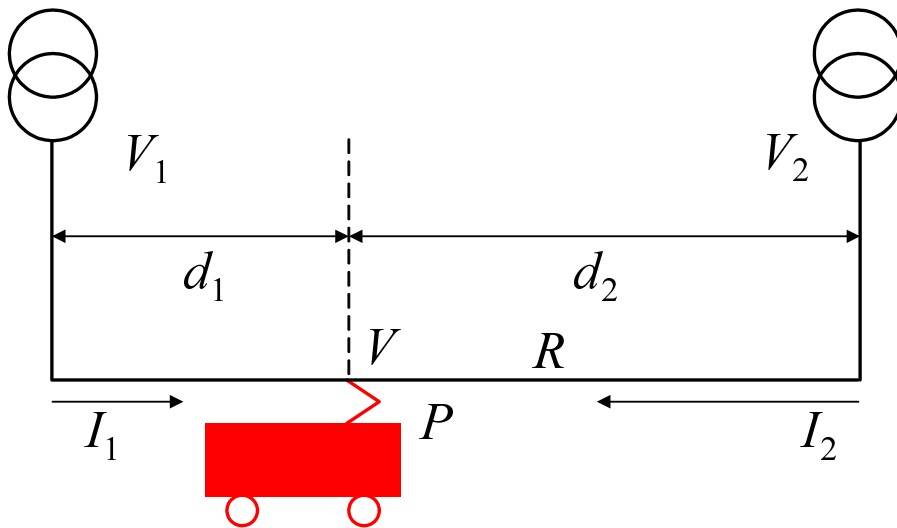


Fig. 3.5: 一編成走行時におけるパンタ点電圧計算

$$\begin{cases} P = V(I_1 + I_2) \\ V_1 - V = I_1 R d_1 \\ V_2 - V = I_2 R d_2 \end{cases} \quad (3.25)$$

以上三式から電流 I_1 と I_2 を消去して Eq. (3.26) を得る。

$$(d_1 + d_2)V^2 - (d_1 V_2 + d_2 V_1)V + P R d_1 d_2 = 0 \quad (3.26)$$

この二次方程式を解くことで、パンタ点電圧 V は Eq. (3.27) のように導かれる。

$$V = \frac{d_1 V_2 + d_2 V_1 \pm \sqrt{(d_1 V_2 + d_2 V_1)^2 - 4(d_1 + d_2) P R d_1 d_2}}{2(d_1 + d_2)} \quad (3.27)$$

また、変電所 1 および変電所 2 の送出電圧が同じである場合は $V_0 = V_1 = V_2$ とすることで Eq. (3.28) のように簡略化できる。

$$V = \frac{V_0}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{V_0^2 - \frac{4 P R d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (3.28)$$

V の値は \pm で二つ存在するが、変電所送出電圧および列車位置の関係により $+$ のみが意味を持つ解となる。

3.2.2 変電所間に二編成走行する場合

変電所間に二編成列車が走行する場合、Fig. 3.6 に示すようにパラメータを与える。変電所 1 からの送出電圧を V_0 、電流を I_1 、列車までの距離を d_1 、変電所 2 からの送出電圧を V_0 、電流を I_3 、列車までの距離を d_3 、二列車間での電流を I_2 、距離を d_2 、各列車が得る電力を P_A および P_B 、パンタ点電圧を V_A および V_B 、架線抵抗を R としたとき Eq. (3.29) の関係式が成り立つ。

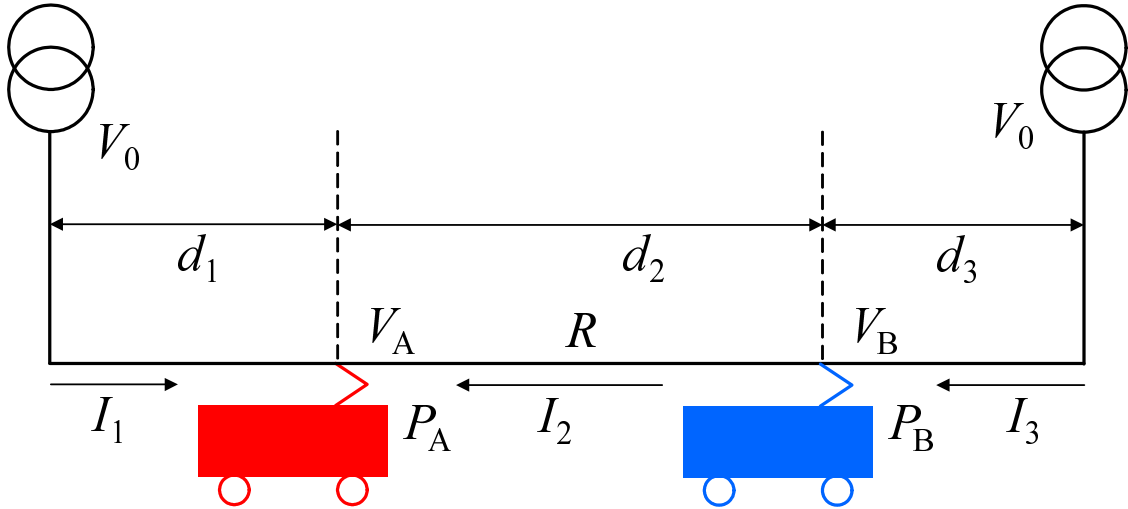


Fig. 3.6: 二編成走行時におけるパンタ点電圧計算

$$\begin{cases} P_A = (I_1 + I_2)V_A \\ P_B = (I_3 - I_2)V_B \\ V_0 - V_A = I_1 R d_1 \\ V_B - V_A = I_2 R d_2 \\ V_0 - V_B = I_3 R d_3 \end{cases} \quad (3.29)$$

以上三式から電流 I_1 , I_2 および I_3 を消去して Eq. (3.30) および Eq. (3.31) を得る。

$$(d_1 + d_2)V_A^2 - (d_1V_B - d_2V_0)V_A + P_ARd_1d_2 = 0 \quad (3.30)$$

$$(d_2 + d_3)V_B^2 - (d_2V_0 + d_3V_A)V_B + P_BRd_2d_3 = 0 \quad (3.31)$$

さらに V_A の二次方程式に含まれた V_B を消去するため, Eq. (3.30) を式変形して Eq. (3.31) に代入することで Eq. (3.32) を得る。

$$\begin{aligned} & d_2(d_1 + d_2)(d_1 + d_2 + d_3)V_A^4 - d_2V_0\{(d_1 + d_2)(d_1 + 2d_2) + 2d_2(d_2 + d_3)\}V_A^3 \\ & + [(d_1 + d_2 + d_3)d_2^2V_0^2 + Rd_1d_2\{2d_2(d_1 + d_2 + d_3)P_A + d_1d_3(P_A + P_B)\}]V_A^2 \\ & - P_AV_0Rd_1d_2^2(d_1 + 2d_2 + 2d_3)V_A + (d_2 + d_3)P_A^2R^2d_1^2d_2^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.32)$$

四次方程式の解法は Ludovico Ferrari や Leonhard Euler などによって発見されているが, どれもが三次分解方程式と呼ばれる補助的な方程式を解くことで根を求めている。そのため, 解の公式はとても複雑な式となってしまう。また, 変電所間に n 編成の列車が存在する場合, パンタ点電圧を計算するには $2n$ 次の回路方程式を解く必要がでてくる。即ち, 変電所間隔や列車本数によっては高次の回路方程式を解かなければいけない。

3.3 負荷特性線形近似

前節で述べたように, 変電所間を走行する列車編成が増加すると, パンタ点電圧変動を計算する際の回路方程式が高次化してしまう。列車編成が増加してもパンタ点電圧を容易に計算できるようにするため, 列車の負荷特性 $P = VI$ に対して $V = aI + b$ とする線形近似を適用する。最小二乗法により Fig. 3.7 に示すような線形近似した直線を求める。既知の値としては電圧変動範囲を考慮し, 変電所送出電圧 1500 V を基準として 1300 V から 50 V 刻みで 1700 V までの 9 点を与える。

変電所間に二編成走行する場合で考えると, Eq. (3.29) の P_A および P_B の二式を Eq. (3.33) とすることで, Eq. (3.34) および Eq. (3.35) を得る。

$$\begin{cases} V_A = a_A(I_1 + I_2)b_A \\ V_B = a_B(I_3 - I_2)b_B \end{cases} \quad (3.33)$$

$$(Rd_1d_2 + a_Ad_1 + a_Ad_2)V_A - a_Ad_1V_B - a_Ad_2V_0 - Rd_1d_2b_A = 0 \quad (3.34)$$

$$(Rd_2d_3 + a_Bd_2 + a_Bd_3)V_B - a_Bd_3V_A - a_Bd_2V_0 - Rd_2d_3b_B = 0 \quad (3.35)$$

以上を示すとおり, 列車の負荷特性に対して線形近似を用いることで, 高次の回路方程式をすべて一次方程式として解くことができる。即ち, 変電所間に同時に存在する列車編成が増えたとしても, 同様の手順で容易にパンタ点電圧の変動を計算することができる。線形近似の数値的評価については 5.1 節で行う。

3.4 対象とする路線とその特徴

高速回生ブレーキの有効活用を評価するために, 4 章以降で行うケーススタディで用いるモデル路線の条件を Table 3.1, 停車パターンを Fig. 3.8 に示す。また, この路線およびダイヤの特徴は以下の通りである。

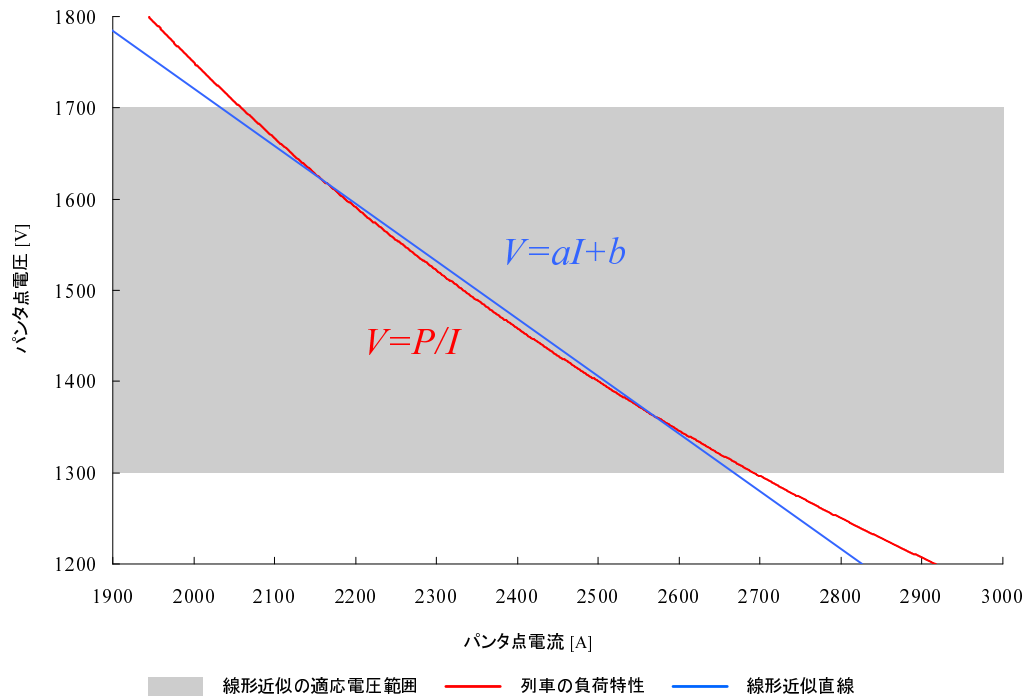


Fig. 3.7: 列車負荷特性の線形近似例

1. 全区間が複線である
2. 地上回生機能を備えた設備により，余剰回生エネルギーは上位系統への回生が可能となっている
3. 30 分サイクルに上下線とも快速列車一本，区間快速列車一本，普通列車二本が走行する
4. 上下線とも駅 12 で快速列車が普通列車を追い抜く

Table 3.1: 路線条件

路線長	37.4 km
駅数	15
変電所数	9
変電所送出電圧	1500 V
乗車率	100 %
回転部等価質量	
電動車	空車重量の 10 %
付随車	空車重量の 5 %
補機電力	100 kW/編成
駅停車時間	30 秒
待避時間	300 秒
き電方式	直流き電
信号システム	ATO および ATC

停車駅

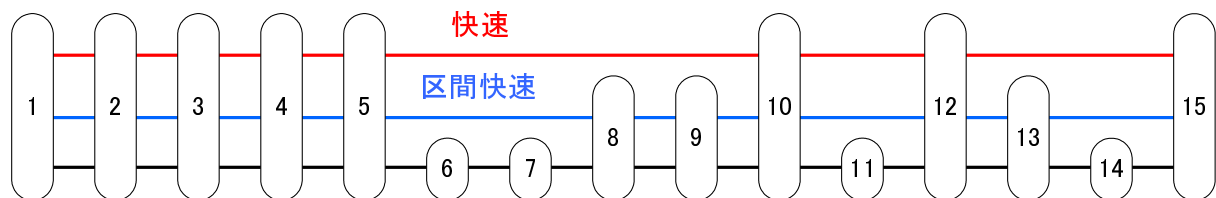


Fig. 3.8: モデル路線の停車パターン

第4章 高速回生ブレーキを有効活用した運転曲線の作成と定量的評価

本章では，第3章で述べた数値計算手法によって純電気ブレーキ化による省エネルギー効果を明らかにする。また，パンタ点電圧変動が運転曲線およびエネルギー収支に与える影響についても検証を行う。

4.1 運転曲線作成における計算条件

本研究において検討を行う計算条件を Table 4.1 に示す。高速回生ブレーキの有効活用として従来の電空併用ブレーキを純電気ブレーキに置き換えることを提案し，その効果について評価する。純電気ブレーキにおける運転曲線では，ノッチオフ速度（加速を止めて惰行を開始する速度）を電空併用ブレーキと同じ速度にする。また，純電気ブレーキ化による走行時分増加の影響を低減するため，オフブレーキ運転により惰行を行わない運転曲線も検討する。さらに，純電気ブレーキの性能向上を図るため，変電所送出電圧を昇圧したモデルについても同様の検討を行う。

Table 4.1: 計算条件

		ブレーキパターン		
		電空併用ブレーキ	純電気ブレーキ	純電気ブレーキ かつ オフブレーキ運転
変電所	1500 V	モデル I	モデル II	モデル III
送出電圧	1600 V	モデル IV	モデル V	モデル VI

4.2 一列車走行時の高速回生ブレーキ有効活用の評価

本節では走行列車として普通列車一本のみを想定し，以下のケースについて検討を行う。

1. パンタ点電圧を変電所送出電圧と同一にしたケース
2. パンタ点電圧の変動を ± 100 V 固定としたケース
3. 回路方程式によりパンタ点電圧の変動を考慮したケース

4.2.1 パンタ点電圧を変電所送出電圧と同一にしたケース

まず，パンタ点電圧を変電所送出電圧と同一の 1500 V にしたケースについて検討を行う。パンタ点電圧が変動しないことから，常に一定のトルク特性が得られる。ただし，変電所送出電圧とパンタ点電圧との間に電位差がないことから，き電抵抗による損失は考えないものとする。前節で示したモデル I ～ モデル III において，運転曲線およびエネルギー収支に与える影響を以下で示す。

運転曲線に与える影響

駅 1 ～ 駅 15 の各駅間を走行する普通列車のうち、運転曲線例として 駅 13 ～ 駅 14 間のものを Fig. 4.1 に示す。電空併用ブレーキから純電気ブレーキに変更することで、高速域のブレーキ力が十分に得られずブレーキ開始点が大幅に手前へと移動する。モデル I に比べてモデル II では 140 m 程度制動距離が延びる結果となった。さらに、オフブレーキ運転では惰行が行われていないため、モデル III では 280 m 程度制動距離が延びる結果となっている。ここでは運転曲線を示していないが、純電気ブレーキにおいて最大 400 m も制動距離が延びる駅間が存在した。この制動距離の増加は駅間運転時分に大きく影響する。

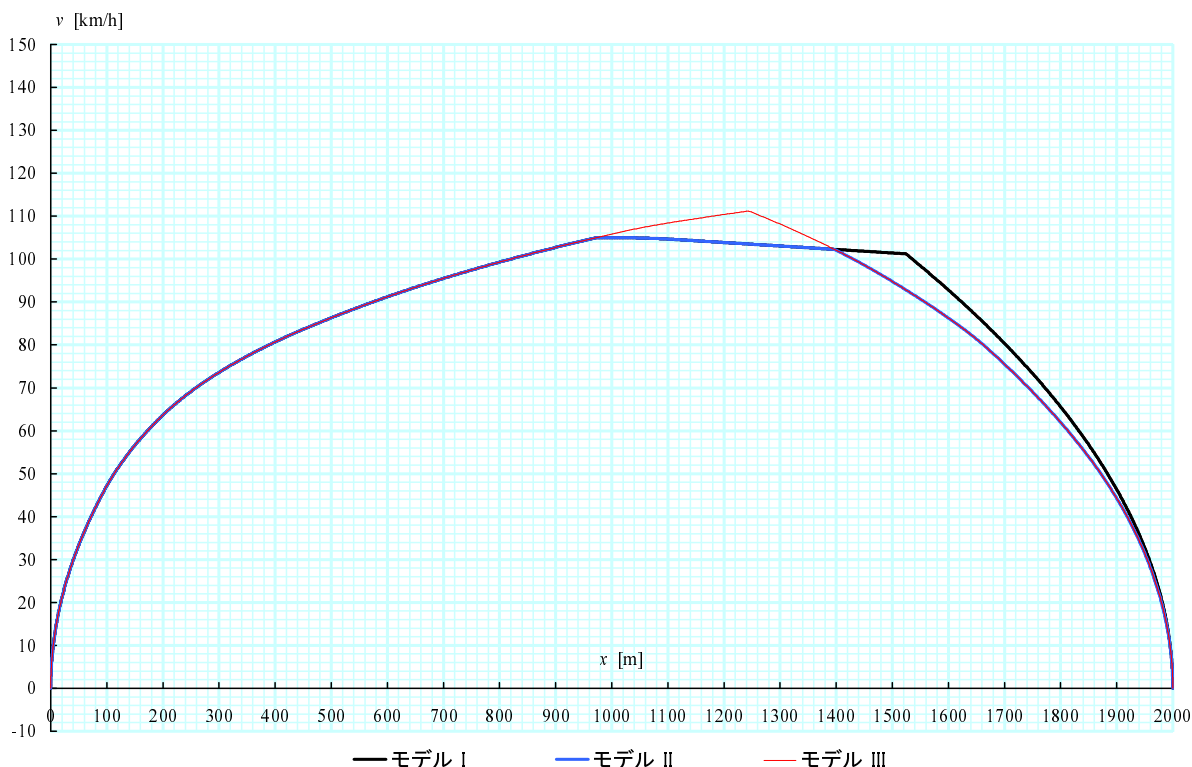


Fig. 4.1: ケース 1 における 駅 13 ～ 駅 14 間の運転曲線

駅 1 ～ 駅 15 の各駅間運転時分の合計を Fig. 4.2 に示す。基準運転時分とは、制限速度など一定の条件に基づいて決められた駅間の所要時分であり、走行する際の目標となる時間である。ただし、列車に遅延が発生した場合には遅延時間が小さいうちに回復させることが重要であることから、回復余力を持たせる方法として列車ダイヤ作成時に別の時分が加えられる。この別に加えられる時分のことを余裕時分という。

モデル I は従来どおりの電空併用ブレーキであり、基準運転時分以内の走行を模擬することができている。通常、基準運転時分は秒単位で設定されているため、計算上では各駅間運転時分がコンマ数秒ずつ早い。そのため合計運転時分ではモデル I の方が短くなっている。モデル II では高速域のブレーキ力低下により合計運転時分が 7.0 秒、一駅間あたりにして 0.5 秒増加し、基準運転時分を超過した。しかし、余裕時分まで考慮すれば十分範囲内に収まる結果である。モデル III では運転時分の短縮を図っているため、全体としては基準運転時分の範囲に収まっている。

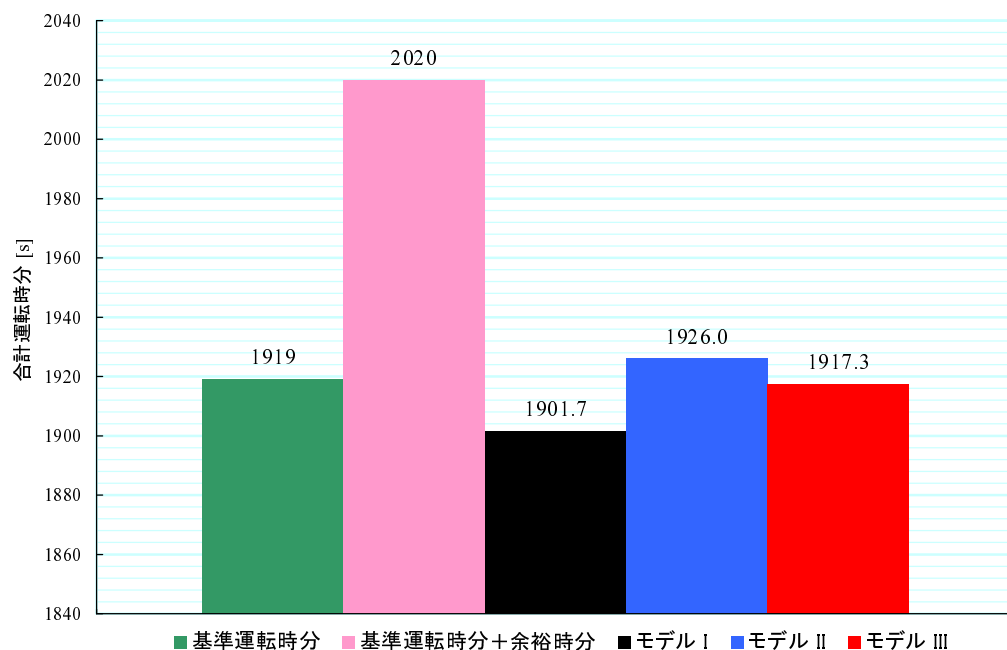


Fig. 4.2: ケース 1 における合計運転時分の変化

エネルギー収支に与える影響

駅 1 ～ 駅 15 まで普通列車が走行したときの総力行エネルギーを Fig. 4.3，総回生エネルギーを Fig. 4.4，総消費エネルギーを Fig. 4.5 に示す。ケース 1 ではき電損失を考慮していないことから，エネルギーは全て列車のパンタ点で算出した値である。モデルⅠおよびモデルⅡではノッチオフ速度が同じであるため，加速時間がほぼ等しく，力行エネルギーもかなり近い値である。しかし，モデルⅢではオフブレーキ運転により制限速度内で最大限に加速しており，力行エネルギーが 9 % 程度多く必要となる。一方，モデルⅡおよびモデルⅢでは制動時に機械ブレーキで捨てていたエネルギーを全て回収するため，回生エネルギーが増加した。モデルⅡでは約 24 %，より高速域から制動を行うモデルⅢでは約 40 % の増加である。

その結果，地上回生機能を活用することで回生エネルギーを全て再利用できたとするなら，消費エネルギーは大幅に軽減される。モデルⅡでは約 16 %，モデルⅢでも約 11 % の省エネルギー効果が期待できる。

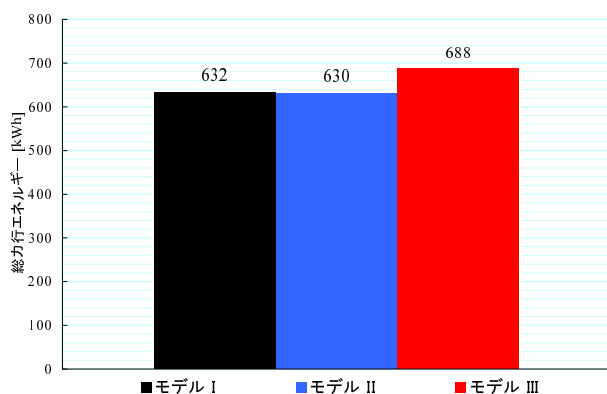


Fig. 4.3: ケース 1 における総力行エネルギーの変化

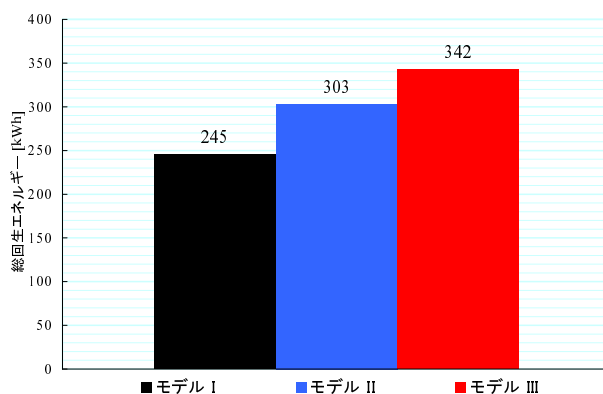


Fig. 4.4: ケース 1 における総回生エネルギーの変化

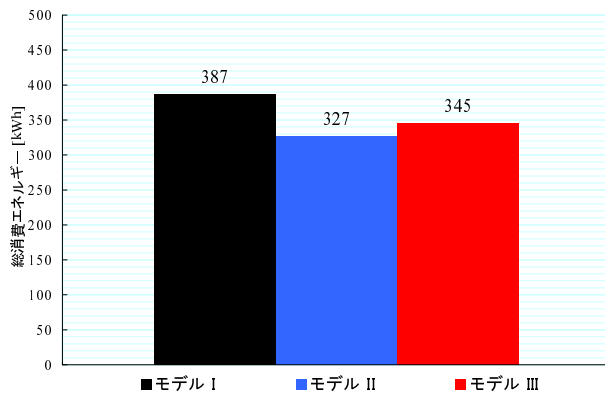


Fig. 4.5: ケース 1 における総消費エネルギーの変化

4.2.2 パンタ点電圧の変動を ± 100 V 固定としたケース

次に、パンタ点電圧の変動を変電所送出電圧から ± 100 V 固定としたケースについて検討を行う。一般的に、列車の引張り特性などを用いた計算を行う場合、変電所送出電圧に力行時は $-100 \sim 150$ V、回生時は $+100 \sim 150$ V することでパンタ点電圧を簡易的に与えている。そこで、パンタ点電圧の変動を変電所送出電圧から力行時は -100 V、回生時は $+100$ V としたときのモデル I ~ モデル VI において、運転曲線およびエネルギー収支に与える影響を以下で示す。

運転曲線に与える影響

運転曲線例として 駅 13 ~ 駅 14 間のものを Fig. 4.6 に示す。ケース 1 のモデル II と比較することで、力行時にはパンタ点電圧の降下によって高速域での引張力が低下し、回生時にはパンタ点電圧の上昇によって高速域での制動力が増しているのが分かる。そのため、モデル I とモデル II とのブレーキ開始点の差は小さくなっているが、それでも 100 m 程度制動距離が延びる結果となった。モデル IV ~ モデル VI では変電所送出電圧を 1600 V に昇圧しており、引張りおよび回生ブレーキ負担分の制動力が向上している。そのため、高速域での加速力および純電気ブレーキ時の減速力が高まった。列車性能の向上は駅間運転時分に大きく影響する。

駅 1 ~ 駅 15 の各駅間運転時分の合計を Fig. 4.7 に示す。ケース 1 と比較するとモデル I ~ モデル III では合計運転時分が 12 秒程度増加している。これはパンタ点電圧の変動が列車走行に対して与える影響が大きいことを意味する。それでもモデル I ではきちんと基準運転時分以内の走行ができていたが、モデル II およびモデル III ではそれぞれ 18.5 秒、11.0 秒超過してしまった。

1600 V に昇圧したモデル IV ~ モデル VI では 1500 V のときと比べ、合計運転時分として 15 秒程度短縮される。その結果、純電気ブレーキのモデル V では基準運転時分に対して合計で 3.8 秒の超過に収まっている。モデル VI においては十分基準運転時分の範囲内で走行することが可能である。

エネルギー収支に与える影響

駅 1 ~ 駅 15 まで普通列車が走行したときの総力行エネルギーを Fig. 4.8、総回生エネルギーを Fig. 4.9、総消費エネルギーを Fig. 4.10 に示す。ケース 1 と同様にき電損失を考慮していないことから、エネルギーは全て列車のパンタ点で算出した値である。モデル I および モデル II において力行エネルギー

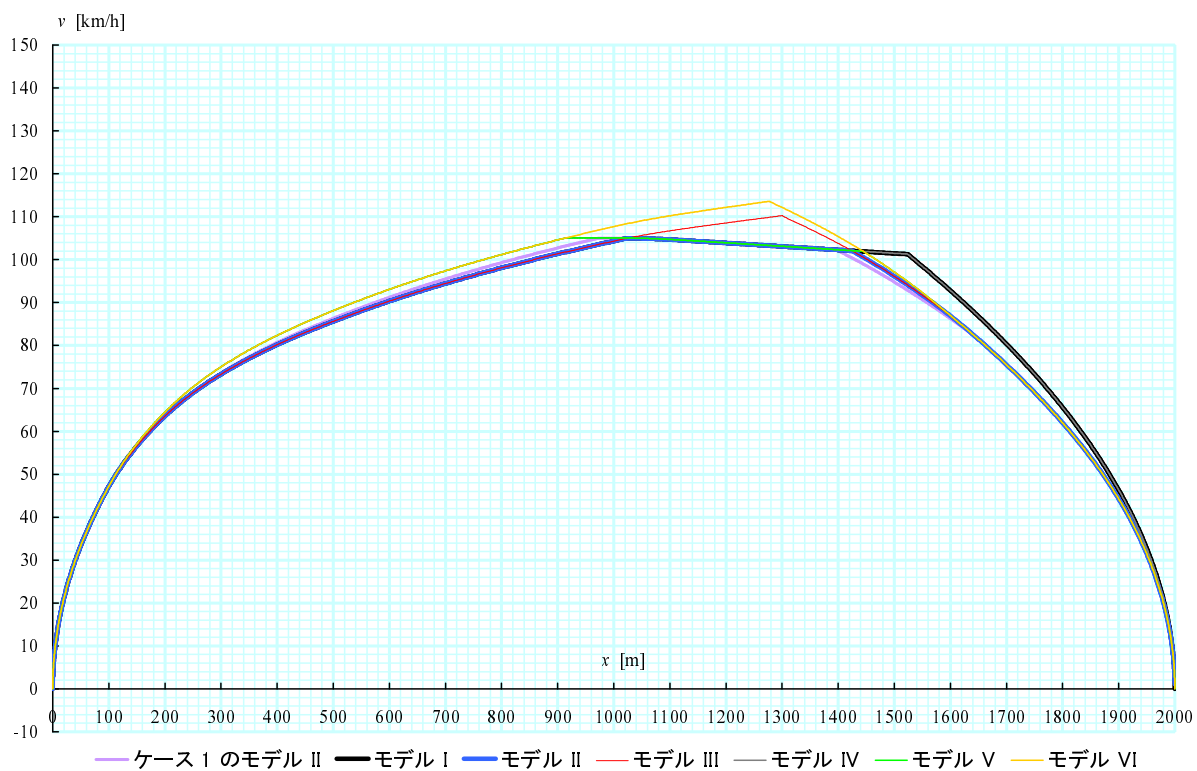


Fig. 4.6: ケース 2 における駅 13 ~ 駅 14 間の運転曲線

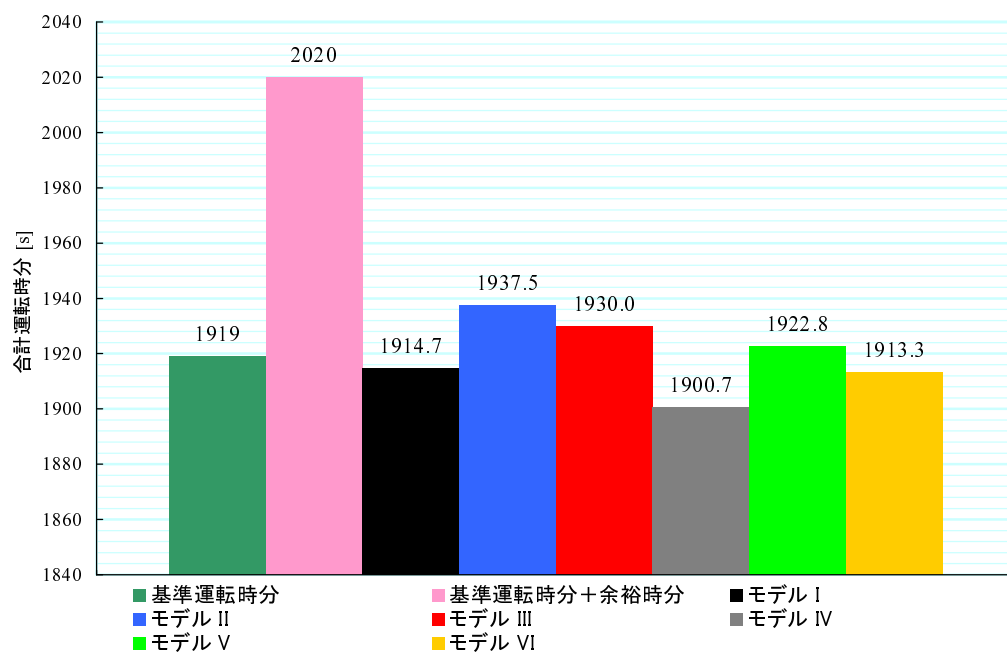


Fig. 4.7: ケース 2 における合計運転時分の変化

ギーはほぼ同一であり、モデル III では力行エネルギーが 8 % 程度多く必要となる。一方、モデル II では約 20 %、より高速域から制動を行うモデル III では約 35 % 回生エネルギーが増加した。その結果、地上回生機能を活用することで消費エネルギーは大幅に軽減され、モデル II では約 14 %、モデル III でも約 9 % の省エネルギー効果が期待できる。

また、1600 V に昇圧したモデル IV ~ モデル VI でも同様の傾向が見られる。モデル IV と比べて消費エネルギーはモデル V で約 12 %、モデル VI で約 7 % の減少となった。以上のように、パンタ点電圧変動を ± 100 V と考慮したことによってエネルギーに与える変化量は無視できない。さらに 1500 V のときと比較すると、同じブレーキパターンであれば消費エネルギーはほぼ等しいにも拘らず、既に示したように運転時分の短縮が見込まれる。つまり、ブレーキパターンに因らず昇圧の効果は大きいと言える。

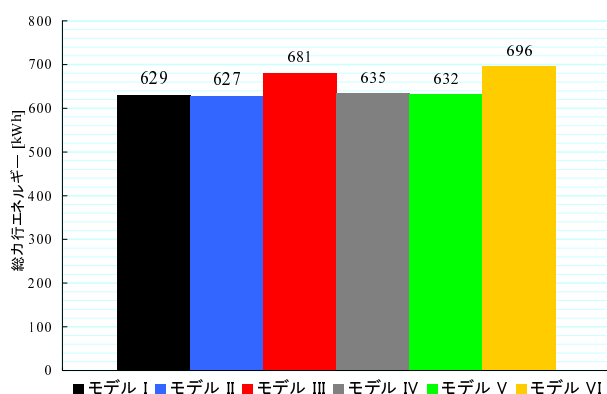


Fig. 4.8: ケース 2 における総力行エネルギーの変化

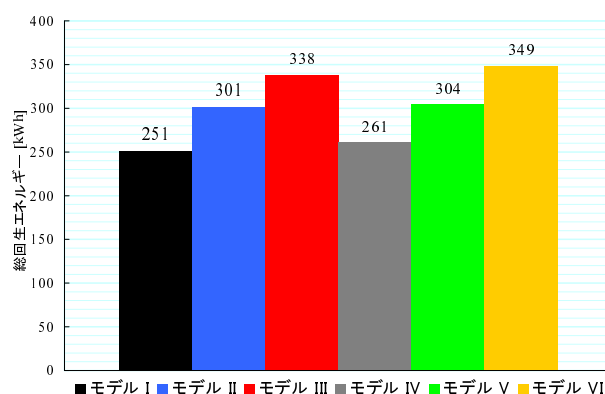


Fig. 4.9: ケース 2 における総回生エネルギーの変化

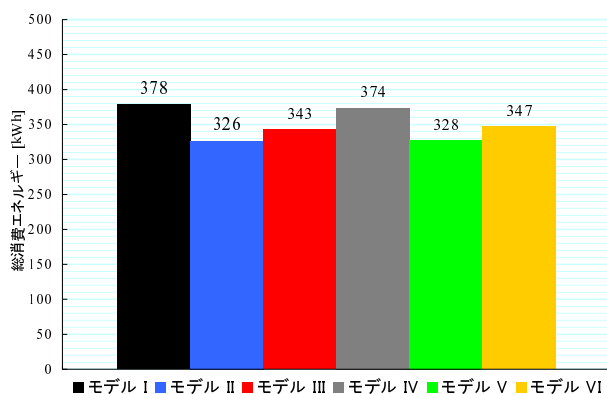


Fig. 4.10: ケース 2 における総消費エネルギーの変化

4.2.3 回路方程式によりパンタ点電圧の変動を考慮したケース

最後に、列車の力行および回生状況に合わせた回路方程式を解くことで、パンタ点電圧を時々刻々と変動させるケースについて検討を行う。変電所と列車との間の架線抵抗により力行時は電圧降下、回生時は電圧上昇が生じる。モデル I ~ モデル VI において、運転曲線およびエネルギー収支に与える影響を以下で示す。

運転曲線に与える影響

運転曲線例として 駅 13 ~ 駅 14 間のものを Fig. 4.11 に示す。モデル II におけるパンタ点電圧変動を見ると、力行時の電圧降下は最大でも 1410 V と変電所送出電圧からすれば -90 V 程度である。回生時は変電所近辺ということもあり、1520 V と変電所送出電圧から +20 V しか変動していない。ただし、駅間によっては最大で ± 150 V も変動している。パンタ点電圧の変動は変電所間の距離や走行列車の位置関係などにも依存することから、駅間によって大きく差は生じているが、 ± 100 V を超えるのは僅かな時間である。そのため、ケース 2 のように常にパンタ点電圧の変動を ± 100 V としてしまうのは条件としてかなり甘く見積もっていると言える。ケース 3 はケース 2 に比べて、力行時の大部分はパンタ点電圧が 1400 V より高いため列車の主電動機性能は良く、回生時の大部分は 1600 V より低い主電動機性能は悪くなっている。その影響は運転時分に顕著に現れている。

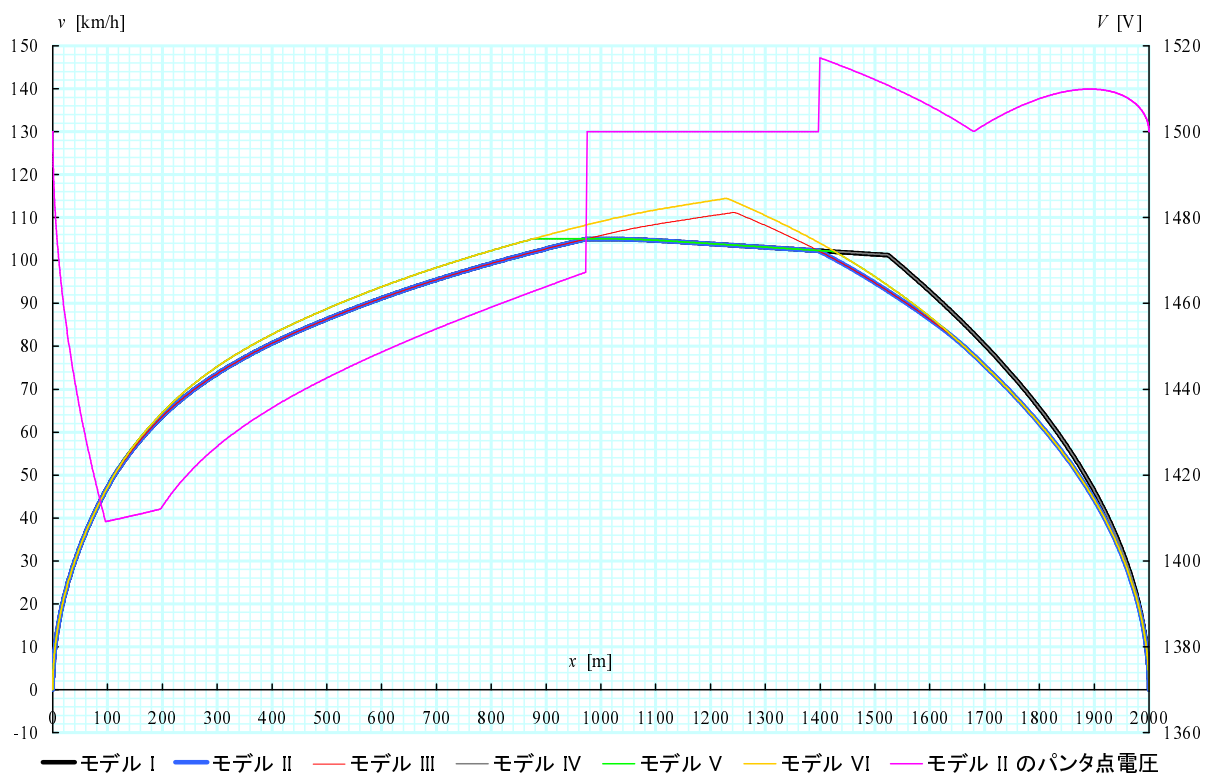


Fig. 4.11: ケース 3 における 駅 13 ~ 駅 14 間の運転曲線

駅 1 ~ 駅 15 の各駅間運転時分の合計を Fig. 4.12 に示す。モデル I ではきちんと基準運転時分以内の走行ができているが、純電気ブレーキのモデル II およびモデル III ではそれぞれ 12.4 秒、4.1 秒の超過が生じた。ケース 2 と比較するとモデル I ~ モデル III では合計運転時分が 6 秒程度短くなっている。これはパンタ点電圧変動のうち力行時の電圧降下による影響が大きく、変電所送出電圧から -100 V したことによる加速力低下が響いた結果である。つまり、力行および回生によるパンタ点電圧変動をきちんと考慮しなくては、走行時分に対して大きな差が生じてしまうと言える。

1600 V に昇圧したモデル IV ~ モデル VI では 1500 V のときと比べ、合計運転時分が 12 秒程度短縮される。その結果、純電気ブレーキのモデル V では基準運転時分に対して合計で僅か 0.3 秒の超過に収まっている。モデル VI に至っては十分基準運転時分の範囲内で走行することが可能である。ただし、各駅間ごとで見ると基準運転時分を超過するところも存在する。即ち、純電気ブレーキを実路線で適用する場合には、運転曲線の変更はもちろんのこと、基準運転時分および余裕時分の各駅間に対する配分を変更しなければ、全体として現状の運転時分を維持することができない。

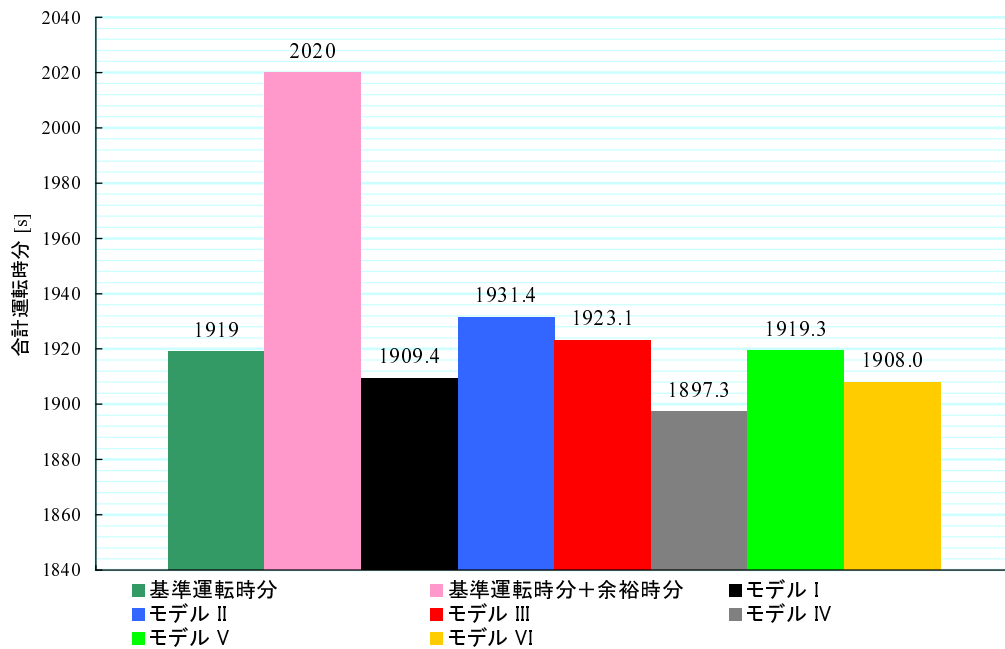


Fig. 4.12: ケース 3 における合計運転時分の変化

エネルギー収支に与える影響

駅 1 ～ 駅 15 まで普通列車が走行したときの総力行エネルギーを Fig. 4.13，総回生エネルギーを Fig. 4.14，消費エネルギー中のき電損失を Fig. 4.15，総消費エネルギーを Fig. 4.16 に示す。ケース 3 ではパンタ点電圧の変動によるき電損失を考慮したことから，エネルギーは全て変電所における入出力に換算した値である。ケース 1 およびケース 2 と比較したとき，き電損失によるエネルギーの差が生じている。モデル I および モデル II において力行エネルギーはほぼ同一であり，モデル III では力行エネルギーが 8 % 程度多く必要となる。一方，モデル II では約 21 %，より高速域から制動を行うモデル III では約 36 % 回生エネルギーが増加した。純電気ブレーキ化は架線を通る電流を増やし，き電損失の増加を招く。モデル II で約 7 %，モデル III で約 19 % き電損失が増えている。しかし，消費エネルギーに対するき電損失の割合はとても小さいため，消費エネルギーにはほとんど影響を及ぼさない。モデル II では約 13 %，モデル III でも約 8 % 消費エネルギーが軽減されており，大きな省エネルギー効果が期待できる。

また，1600 V に昇圧したモデル IV ～ モデル VI でも同様の傾向が見られる。モデル IV と比べて消費エネルギーはモデル V で約 11 %，モデル VI で約 5 % 減少した。さらに，昇圧することで同じエネルギーを列車に送電するにも小さな電流で済むことから，き電損失を軽減することができる。その軽減量は僅かであるが，回生エネルギーの増加と相まって省エネルギー効果を高めている。

4.3 本章のまとめ

本章では，第 3 章で述べた数値計算手法によって純電気ブレーキ化した運転曲線を作成し，運転時分およびエネルギーの観点から評価した。

数値計算の結果，従来の電空併用ブレーキモデルでは各駅間で見た基準運転時分との間に大きな差は見られなかった。また，純電気ブレーキ化により運転時分の増加が見込まれるものの，機械ブレーキにより熱などとして捨てられていた分のエネルギーを回生エネルギーとして全て回収することができるため，省エネルギー効果が顕著に現れることが分かった。

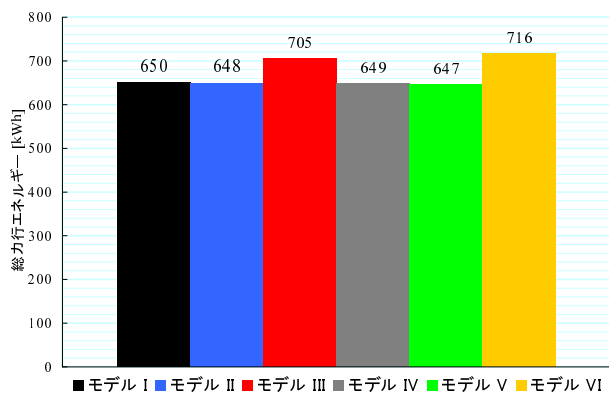


Fig. 4.13: ケース 3 における総力行エネルギーの変化

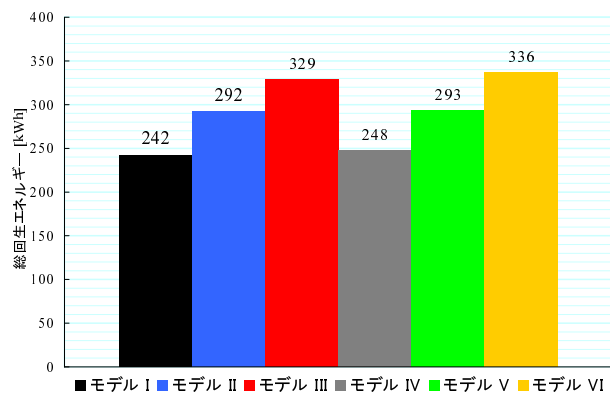


Fig. 4.14: ケース 3 における総回生エネルギーの変化

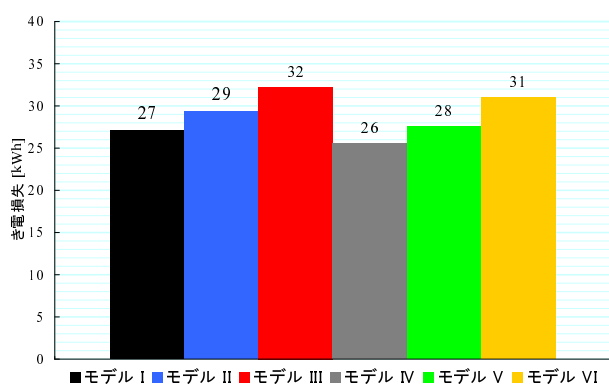


Fig. 4.15: ケース 3 における電損失の変化

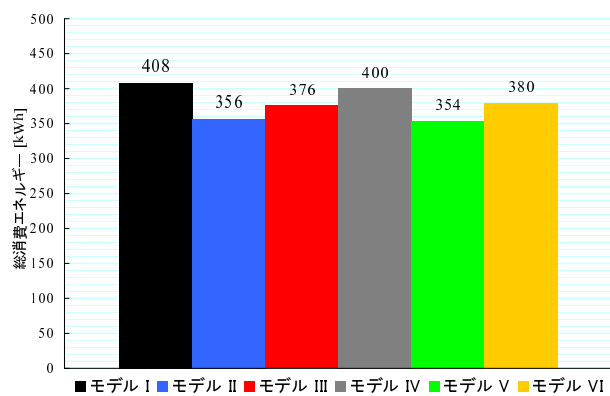


Fig. 4.16: ケース 3 における総消費エネルギーの変化

純電気ブレーキの実現によって期待される効果は大きい。まず、ブレーキ制御の高速・高精度化が挙げられる。電気ブレーキの応答速度は機械ブレーキと比べて一桁以上速く、無駄時間が短いことから、高速制御が可能となる。電気ブレーキは摩擦係数の変動といった環境要素に左右されにくいいため、より厳密なブレーキ力制御ができる。これにより操作性や乗心地などの向上を図れる。次に、保守の軽減が挙げられる。機械ブレーキの保守がほとんど不要になり、車輪や制輪子等も寿命が延び、大幅な費用の削減にもつながる。

純電気ブレーキはメリットが多いものの、実用化に至るには問題点もある。純電気ブレーキは中・高速域で減速度が大きく低下する特性のため、運転士によるマニュアル運転では操作性などの点で実施が難しい。通常、列車のブレーキ力はノッチに合わせて多段階に設定されている。そのため、主電動機のトルク特性に沿ったノッチ操作はできない。もし純電気ブレーキパターンに近いノッチ操作を運転士に要求するのであれば、何らかの支援情報を与える必要がある [16]。

しかし、近年導入が進んできている自動列車運転装置 (ATO : Automatic Train Operation) や定位停止装置 (TASC : Train Automatic Stop Control) といった自動運転システムを用いれば、ブレーキ力の設定など運転目標パターンを本提案のように設計することで容易に実現できる。既に新交通システムや地下鉄などを中心に ATO などのシステムは利用されており、ソフトウェアの改修により純電気ブレーキが適用可能な路線は多い。だが、変電所回生ができない既存の電力設備では、別途回生失効対策が必要となる可能性が高い点も考慮しなければいけない。

第5章 複数列車間における電力融通を考慮したときの定量的評価

本章では、複数列車走行を想定したときの数値計算に用いる負荷特性線形近似の妥当性について検証する。さらに、複数列車が走行するモデルを用いて列車間の電力融通を考慮し、純電気ブレーキ化による省エネルギー効果を明らかにする。また、エネルギー評価に関しては4章で示した消費エネルギーに加え、機械ブレーキによる熱損失および電力会社からの購入エネルギーに着目し、経済的評価も行う。

5.1 負荷特性線形近似の妥当性確認

ここでは3.3節で述べた列車の負荷特性線形近似について、その妥当性を検証する。パンタ点電圧は列車の主電動機特性を変動させる重要なパラメータの一つである。パンタ点電圧変動を考慮する際に直接回路方程式から解いた値と、列車の負荷特性に線形近似を適用して算出した値とに大きな差がないことを示し、数値検討に影響を及ぼさないことを確認する。典型的な運転曲線および定速走行区間を含む運転曲線を描く駅間の二通りを対象として検証を行う。ただし、ブレーキパターンは純電気ブレーキとする。

5.1.1 典型的な運転曲線の場合

まず、典型的な運転曲線の場合として駅8～駅9間でのパンタ点電圧を比較する。この駅間はFig. 5.1に示すように125 km/hまで加速し、その後惰行・減速する典型的な運転曲線を描く。つまり、加速および減速時は常に主電動機のトルク特性曲線に沿った最大のパワーを発揮している。負荷特性線形近似を行ったときにパンタ点電圧の差が生じた累積時間をFig. 5.2に示す。直接回路方程式により計算した場合のパンタ電圧を基準にすると、負荷特性線形近似を行うことで力行時には電圧が低く、回生時には高くなる傾向が概ね見られた。しかしながら、その電圧差は1500 V送電に対して高々0.4 V程度の差しか生じていない。駅間運転時分でも155.3 sのうち61.6 s、割合にして40 %が ± 0.1 V以内に収まっている。このことから、負荷特性線形近似がエネルギーに対して与える影響はほとんどないと考えられる。

5.1.2 定速走行区間を含む運転曲線の場合

次に、定速走行区間を含む運転曲線の場合として駅14～駅15間におけるパンタ点電圧を比較する。この駅間はFig. 5.3に示すように125 km/hまで加速し、その後定速走行・減速するランカーブを描く。そのときパンタ点電圧の差が生じた累積時間をFig. 5.4に示す。前小節の場合と比べて定速走行区間の影響が大きく、力行時の電圧差にバラつきが見られたが、力行時に電圧が低く、回生時に高くなる傾向は同じである。さらに、電圧差の値自体も高々0.5 V程度の差しかなく、駅間運転時分でも218.8 sのうち134.9 s、割合にして62 %が ± 0.1 V以内に収まっている。また、定速走行時はトルク特性曲線よりも小さな値のノッチを利用しているため、トルクは電圧値に関係なく一定であり、負荷特性線形近似が定速走行時のエネルギーに与える影響はほとんどない。

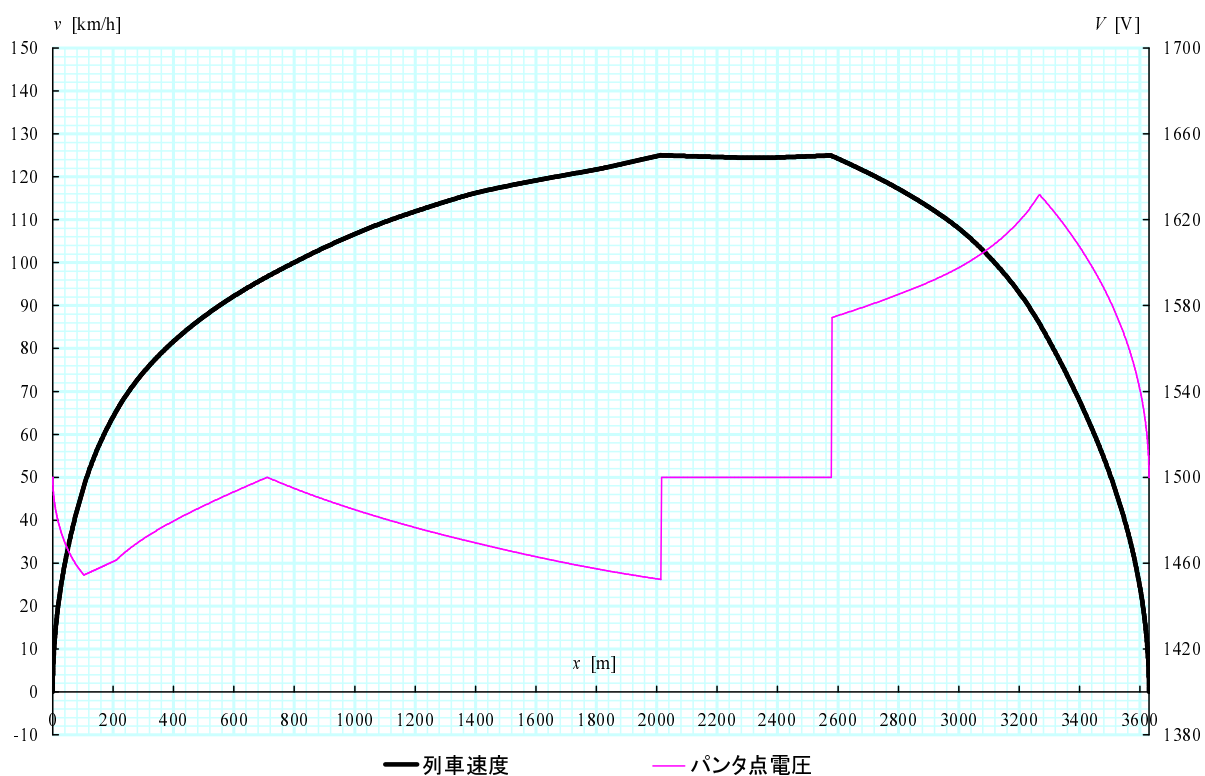


Fig. 5.1: 純電気ブレーキ時における駅 8 ~ 駅 9 間の運転曲線

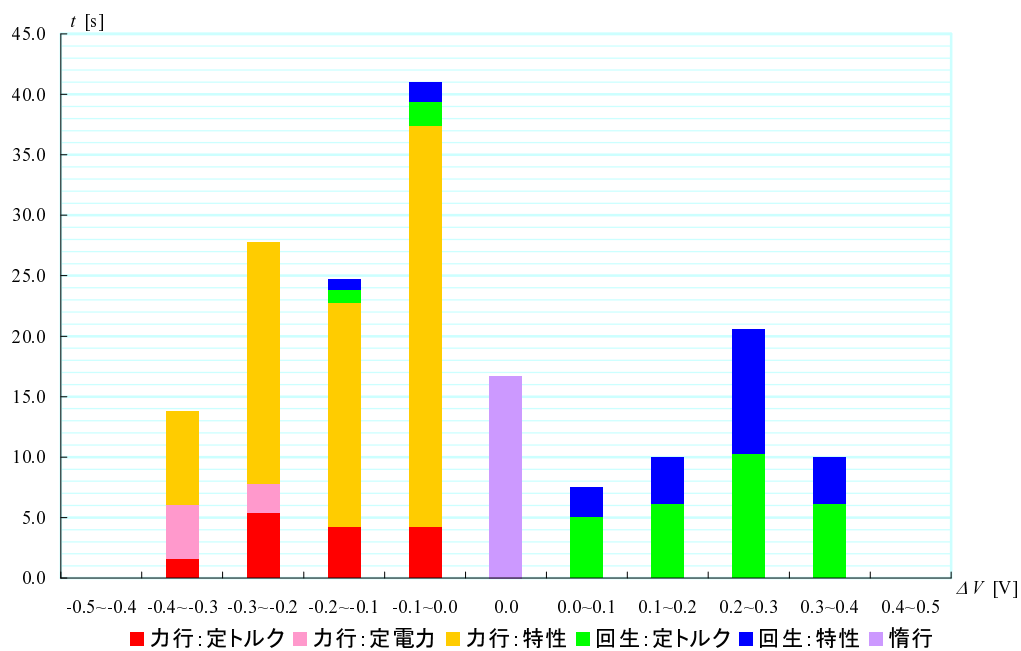


Fig. 5.2: 駅 8 ~ 駅 9 間走行時にパンタ点電圧の差が生じた累積時間

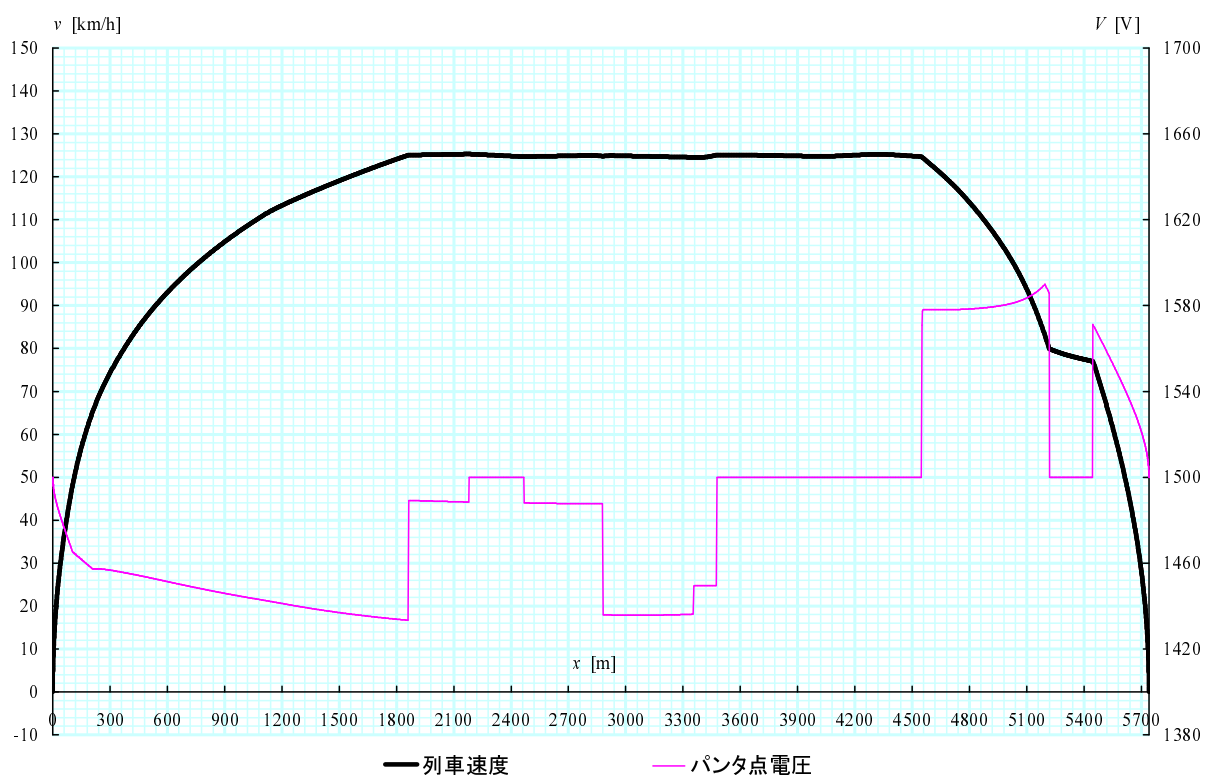


Fig. 5.3: 純電気ブレーキ時における駅 14 ~ 駅 15 間の運転曲線

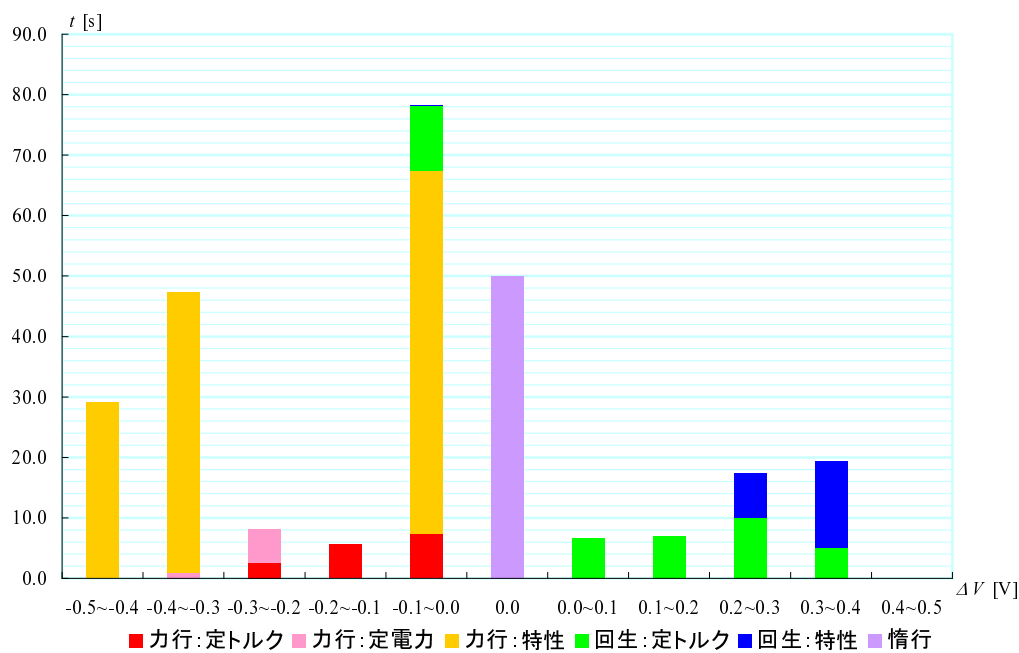


Fig. 5.4: 駅 14 ~ 駅 15 間走行時にパンタ点電圧の差が生じた累積時間

5.2 複数列車走行時の高速回生ブレーキ有効活用の評価

本研究の対象路線は地上回生機能を活用することで余剰回生エネルギーは上位系統への回生が可能となっているが、通常回生エネルギーは同一供給電車線路内に存在する他の力行車へと電力融通することで、省エネルギー効果を大きく発揮する。そのため、複数列車間の電力融通を数値検討の中で考慮することは、回生エネルギーを議論する上で非常に重要な点である。

本節では普通列車、区間快速列車および快速列車が複数編成走行するダイヤを想定し、列車間の電力融通を考慮したケースについて検討を行う。Table 4.1 に示す計算条件のうち、変電所送出電圧 1500 V で電空併用ブレーキを用いるモデル I、純電気ブレーキ化したモデル II、それぞれのブレーキで 1600 V に昇圧を行ったモデル VI、モデル V を対象とする。

5.2.1 ダイヤに与える影響

モデル I における 30 分の周期ダイヤを Fig. 5.5、モデル II におけるダイヤを Fig. 5.6、モデル VI におけるダイヤを Fig. 5.7、モデル V におけるダイヤを Fig. 5.8 に示す。周期ダイヤでは列車種別として普通列車、区間快速列車および快速列車すべてが走行している。ブレーキおよび変電所送出電圧の条件を変えたときの傾向を見ると、各駅間の運転時分に与える影響は前章で示した列車一編成における検討結果とほとんど変わらない。ある変電所間に二編成もしくは三編成入ってきた場合でも、これらの条件の相違が運転時分に与える影響はほとんどなく、0 ~ 0.2 s 程度の差であった。このことから、同一変電所間における複数列車の走行がパンタ点電圧の変動に与える影響は小さいということが言える。

さらに、パンタ点電圧の変動が列車の加減速度性能に影響を及ぼすのは、主電動機のトルク特性のうち定電力領域および特性領域である。これらの領域で特性に沿った最大トルクを発生させる時間は全体から見れば極めて短く、性能にあまり影響を及ぼさない。

以上から、純電気ブレーキ化を行っても駅 1 ~ 駅 15 間で 20 s 程度の差しかなく、30 分周期のダイヤ上でその違いはあまり見られない。詳細を検討するには、前章のように列車一編成で各駅間ごとに見る必要がある。

5.2.2 変電所入出力エネルギーに与える影響

次に、前小節の周期ダイヤにおける総力行エネルギーを Fig. 5.9、総回生エネルギーを Fig. 5.10、消費エネルギー中のき電損失を Fig. 5.11、機械ブレーキによる熱損失を Fig. 5.12、総消費エネルギーを Fig. 5.13 に示す。モデル I とモデル II を比較したとき、純電気ブレーキ化により力行エネルギーが 150 kWh/h、割合にして約 2 % 減少している。回生エネルギーに至っては機械ブレーキで捨てていたエネルギーを回収することで 649 kWh/h、約 25 % も増えている。純電気ブレーキ化は架線を通る電流を増やすため、37 kWh/h、約 8 % のき電損失の増加を招くという欠点もある。しかし、消費エネルギーに対するき電損失の割合は高々 10 % 以内と小さい。また、電空併用ブレーキの場合、機械ブレーキによる熱損失は消費エネルギーに対して 17 % にも及び、純電気ブレーキ化によりそれが零になる効果は大きい。結果として地上回生機能を活用することで消費エネルギーは大幅に軽減され、799 kWh/h、約 14 % の省エネルギー効果となる。

1600 V に昇圧したモデル IV およびモデル V でも同様の傾向が見られる。モデル IV と比べてモデル V は消費エネルギーが約 13 % 減少した。さらに、昇圧することで同じエネルギーを列車に送電するにも小さな電流で済むことから、3 ~ 4 % 程度ではあるがき電損失が軽減された。機械ブレーキによる熱損失は消費エネルギーに対して 15 % にも及び、省エネルギー効果の大きな要因となっている。

また、前章で示した列車一編成が走行した場合のエネルギーを基にすると、1000 kWh/h 程度の回生エネルギーが列車間でやり取りされた計算となる。即ち、回生ブレーキにより生み出したエネルギーの

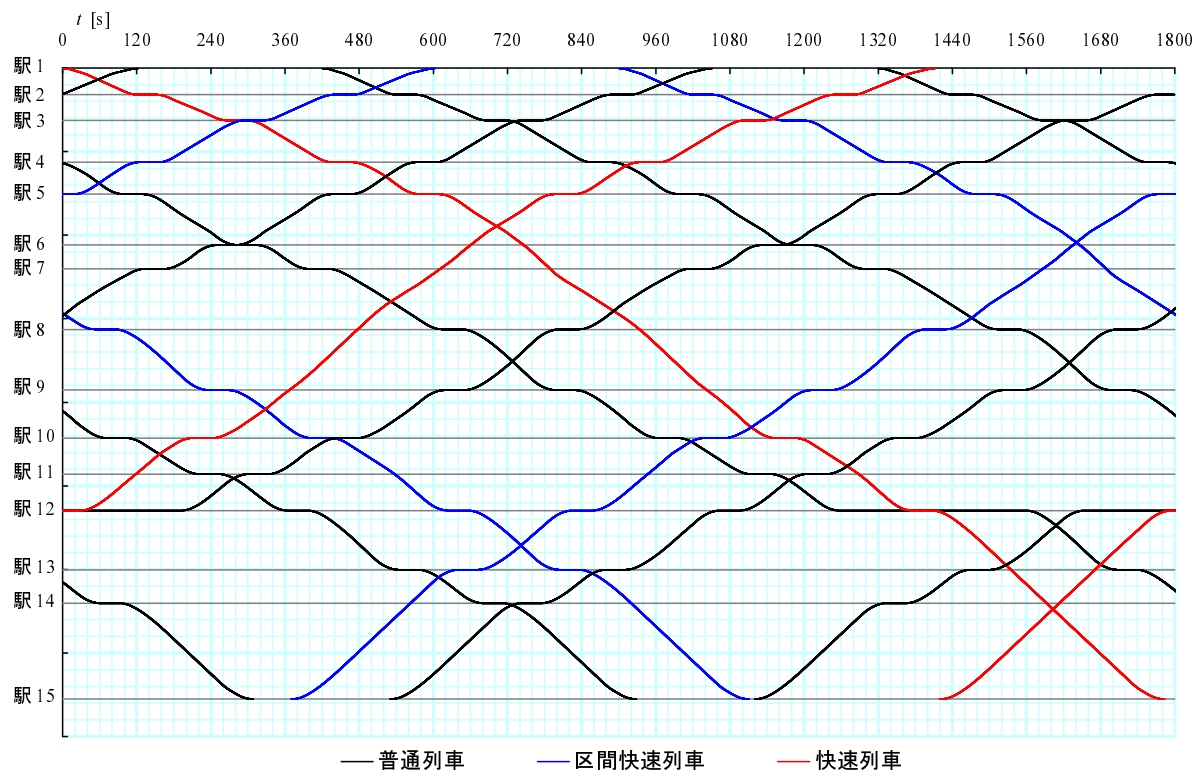


Fig. 5.5: モデル I における周期ダイヤ

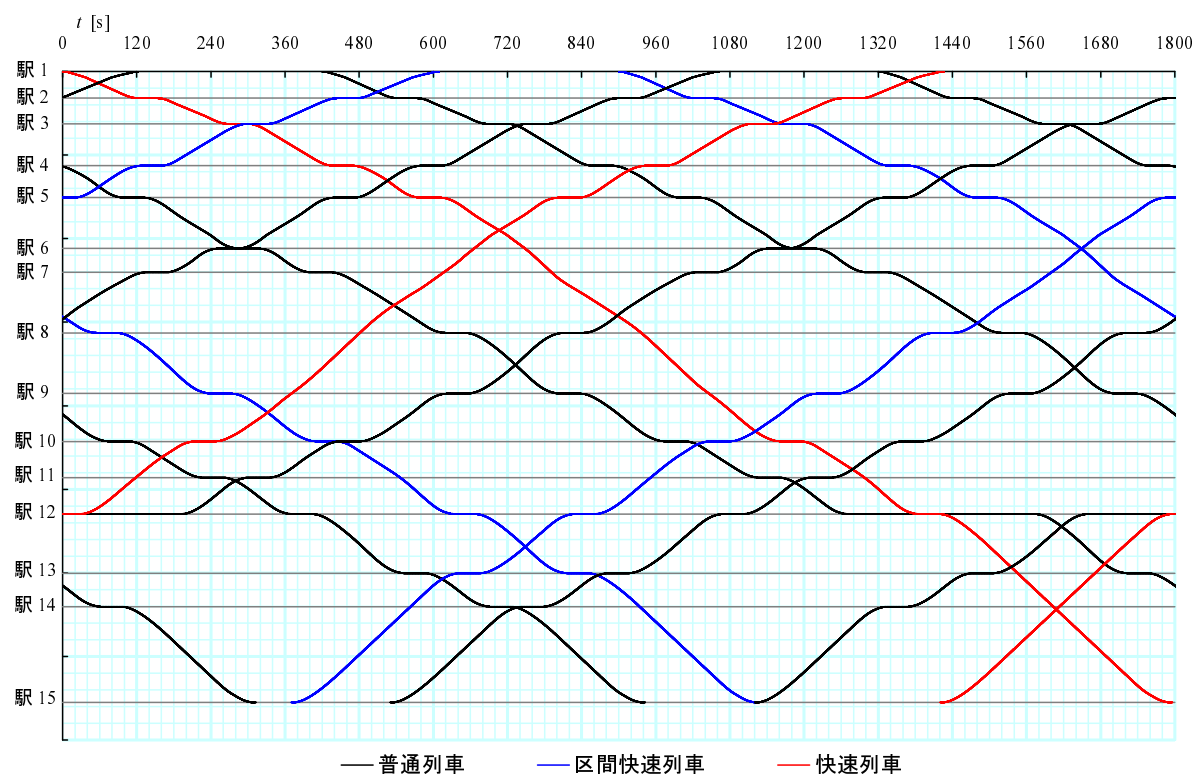


Fig. 5.6: モデル II における周期ダイヤ

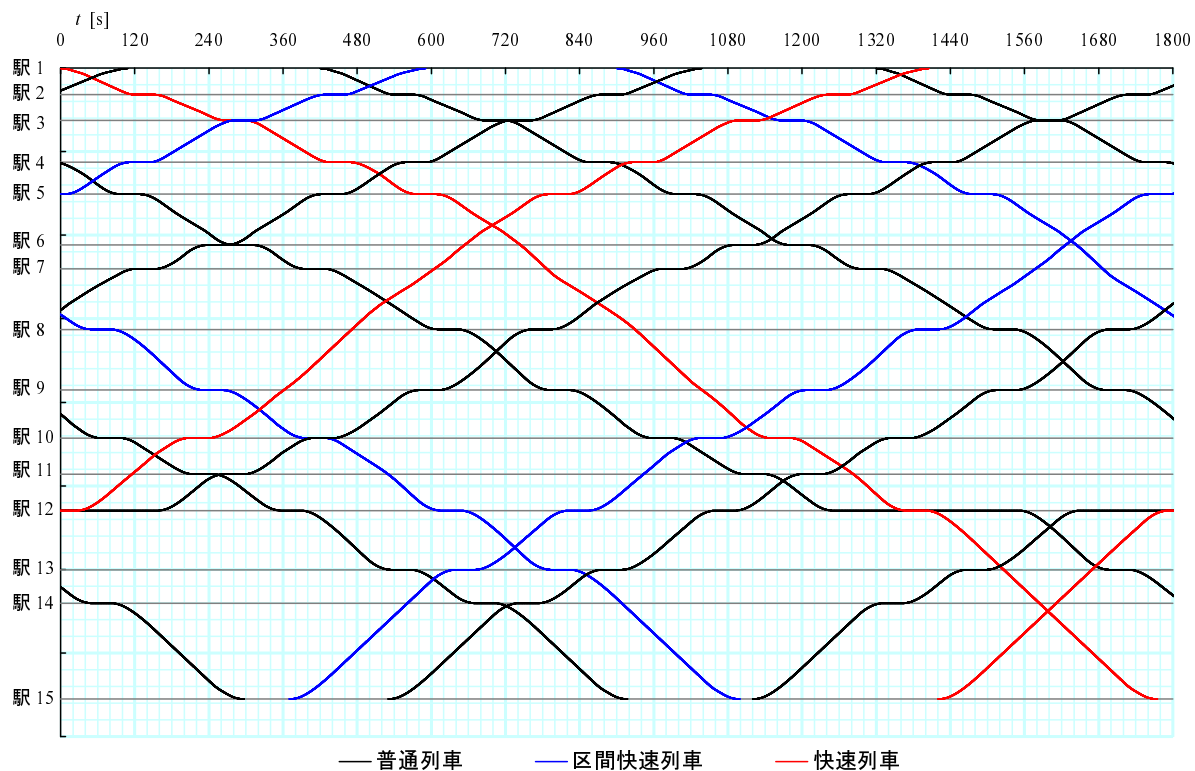


Fig. 5.7: モデル IV における周期ダイヤ

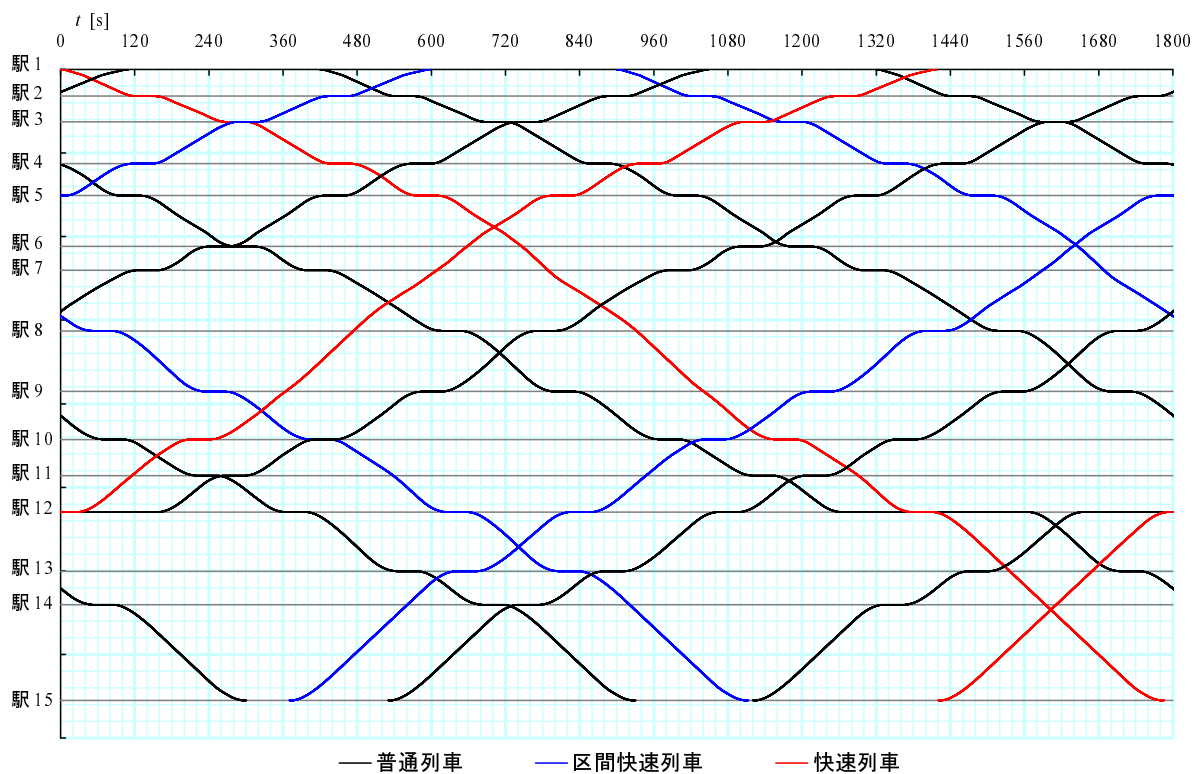


Fig. 5.8: モデル V における周期ダイヤ

うち 20 ～ 30 % が列車間で再利用されたことを意味する。列車間での電力融通を考慮したことによる効果の重要性は高い。

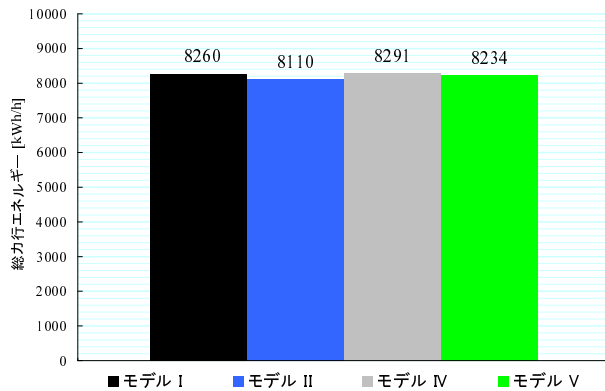


Fig. 5.9: 周期ダイヤにおける総力行エネルギーの変化

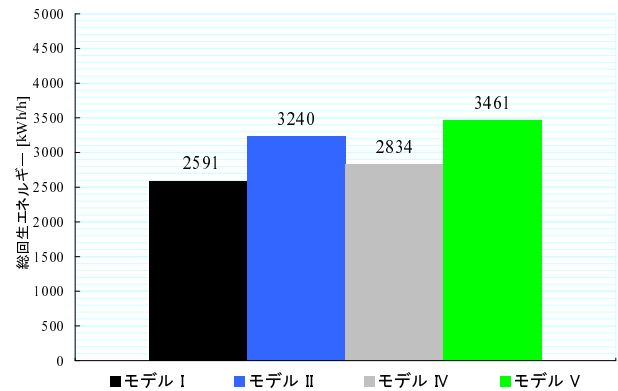


Fig. 5.10: 周期ダイヤにおける総回生エネルギーの変化

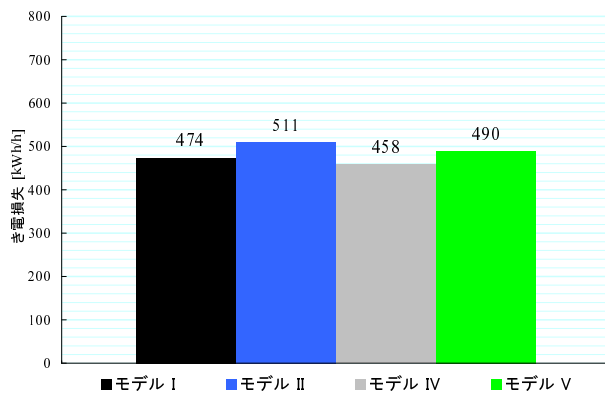


Fig. 5.11: 周期ダイヤにおけるき電損失の変化

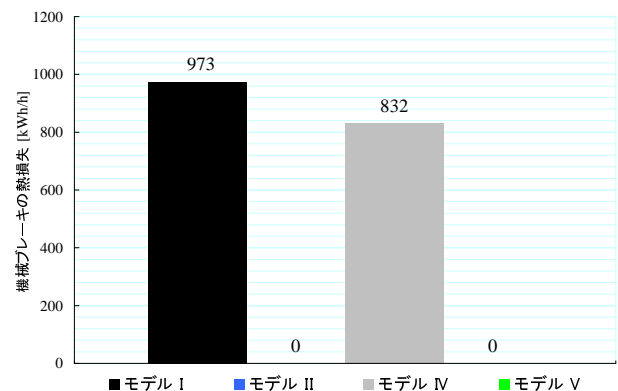


Fig. 5.12: 周期ダイヤにおける機械ブレーキの熱損失の変化

5.2.3 省エネルギー化による経済的效果

回生エネルギーによる省エネルギーを検討するにあたり、今までのケーススタディでは変電所へと回生されたエネルギーは再利用されるものとして消費エネルギーを算出してきた。しかし、多くの直流変電所では三相交流をシリコンダイオード整流器で直流に変換しているため、回生エネルギーを上位系統へ返すことができない。仮に、PWM 整流器を備えた変電所などであったとしても、変電所に備え付けられているメータは回生時に逆回転をしないため、電力会社が余剰エネルギーを買い取ってくれるわけではなく、上位系統への回生は鉄道事業者にとって特にメリットがない。そのため、実際に電力会社から購入するエネルギーを評価しなくては省エネルギーの効果は明らかにされない。そこで本小節では、周期ダイヤにおいて消費エネルギーではなく、電力会社から購入するエネルギー量を評価する。

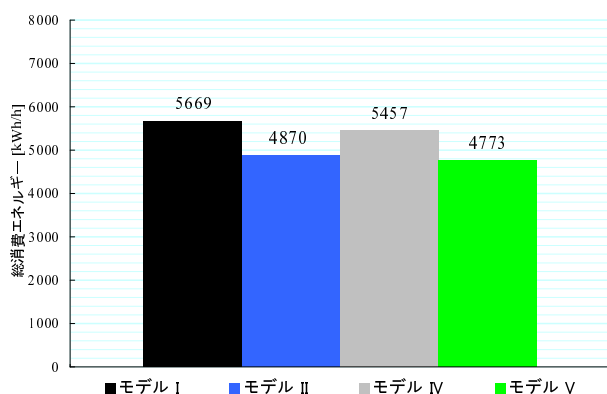


Fig. 5.13: 周期ダイヤにおける総消費エネルギーの変化

電力会社からの購入エネルギー

本章で算出したエネルギー値はすべて変電所ベースのものである。従って、電力会社から購入するエネルギーは Fig. 5.9 に示す総力行エネルギーに相当する。変電所送出電圧が 1500 V の場合には電空併用ブレーキから純電気ブレーキに変更することで 150 kWh/h、割合にして 2 % 購入エネルギーが軽減される。1600 V の場合では 87 kWh/h、割合にして 1 % 軽減される。列車の走行タイミングで電力融通量が変動してしまうため軽減幅は一定とならないが、純電気ブレーキ化によって 1 ~ 2 % 程度の省エネルギー効果が見込まれるものと推測される。1 ~ 2 % 程度の軽減であっても、鉄道事業者が年間に支払う電力量料金は何十億ともなるため、その効果は重要である。

ただし、パンタ点電圧変動の計算過程で複数の変電所間を跨ぐ電力融通までは考慮されていない。そのため、隣接変電所間を跨ぐ電力融通を考慮した場合にはより回生エネルギーを同一供給電車線路内に存在する他の力行車へと電力融通することが可能となり、純電気ブレーキ化による省エネルギー効果はさらに高まると考えられる。

また、Fig. 5.10 に示す回生エネルギーが全て無駄になるわけではない。変電所や駅など付帯設備では補機などの使用電力が常に必要となる。本研究においては列車の補機が 100 kW/編成 と設定されているように、使用電力として無視できる大きさではない。そのため、変電所に回生されたエネルギーの多くは付帯設備などで使用することが可能である。付帯設備での消費エネルギー算出は設備規模などによって大きく異なるため、具体的な数値としての検討は難しいが、さらなる省エネルギー効果が期待できるのは明らかである。

5.3 本章のまとめ

本章では、複数列車走行を想定したモデルを用いて列車間の電力融通を考慮することで、純電気ブレーキ化による省エネルギー効果を示した。

まず、負荷特性線形近似の妥当性についての検証では、列車一編成が走行した場合のパンタ点電圧変動導出について、直接回路方程式を解く方法と負荷特性線形近似を適用した回路方程式を解く方法の二通りで比較した。数値計算上、二つの方法により求めたパンタ点電圧の差は変電所送出電圧の値からすれば極僅かであった。負荷特性線形近似を行ったことによる計算結果への影響はほとんどないことが分かった。

複数列車が走行する周期ダイヤのモデルを用いた検討では、各駅間の運転時分が列車一編成における検討結果とほとんど変わらなかった。即ち、運転時分を議論する際には個々の駅間において列車一編成

の走行モデルを用い、より詳細に運転曲線を検討すればよいということが言える。変電所入出力エネルギーの点では、列車間の電力融通が考慮されたことで純電気ブレーキ化による省エネルギーがより顕著に現れた。

さらに、電力会社からの購入エネルギーという経済的観点から見ても、割合としては小さいものの省エネルギーの効果が現れることが分かった。しかし、本研究で用いたモデルでは複数の変電所間を跨ぐ電力融通までは考慮されていない。そのため、本来は変電所を越えた先の力行車へと電力融通されるはずのエネルギーが全て変電所に返されている。これにより、各エネルギーが全体的に大きく算出されている。また、回生エネルギーの再利用を他の力行車のみとしており、付帯設備などによる消費が考慮されていないことから、結果としては厳しく見積もられており、数値以上の省エネルギー効果が期待される。

第6章 各種条件下における感度解析

本章では、第5章で述べた周期ダイヤに基づき、ブレーキパターン以外の条件を変更したときの感度解析を行う。まず、季節など気象条件により出力の異なる補機の使用量変動を考慮したときのエネルギーを評価する。次に、列車運行乱れが生じて列車間での電力融通のタイミングが変動してしまうときのエネルギー評価を行う。さらに、省エネルギー化を図った複数列車による協調運転の可能性について述べる。

6.1 補機使用量変動時の評価

現在、列車の補機としては空気調和装置や圧縮機などが挙げられる。客室内を家庭やオフィスと同じ環境とするため、換気、空気清浄、冷房、暖房、除湿といった空気調和や照明などのために用いられている。空気調和装置の場合は車内温度、圧縮機の場合は圧力を考慮しなければならないので、電力消費のみを考えて補機を連続で使用することは不可能である。しかし、圧力や車内温度の変化の時定数は電力消費に比べて著しく大きい。そこで、今回の数値検討では補機を連続運転させる定電力源と仮定し、補機の消費エネルギーに対する感度を評価する。季節など気象条件の違いにより、補機の使用量は大きく変動する。その出力の大きさが消費エネルギーにも影響を与える。そこで、初期条件として設定した補機電力 100 kW/編成 を 50 kW, 150 kW, 200 kW, 300 kW あるいは 400 kW と変化させたとき、各エネルギーに対してどの程度の影響を与えるのか算出した。列車運行は Fig. 5.5 および Fig. 5.6 に示すダイヤを基にしている。ブレーキパターンは電空併用ブレーキおよび純電気ブレーキの二通りとする。

電空併用ブレーキ時あるいは純電気ブレーキ時の総力行エネルギーを Fig. 6.1, Fig. 6.2, 総回生エネルギーを Fig. 6.3, Fig. 6.4, 総消費エネルギーを Fig. 6.5, Fig. 6.6 に示す。電空併用ブレーキ時には補機使用量が 50 kW 変わるだけで力行エネルギーとして 360 kWh/h, 回生エネルギーとしては 125 kWh/h 変化している。列車が力行、惰行および停車しているとき補機はエネルギーを変電所から供給されているが、回生しているときには自列車からエネルギーを供給されているために、それぞれの時間の差が力行エネルギーと回生エネルギーの変化量の差として見えている。その結果、消費エネルギーが 488 kWh/h 増加もしくは減少した。これは割合にして 10 % の増減に値する。純電気ブレーキ時にも同様に補機使用量が 50 kW 変動しただけで、力行エネルギーとして 347 kWh/h, 回生エネルギーとして 140 kWh/h 変化している。その結果、消費エネルギーが 484 kWh/h 増加もしくは減少した。

春や秋など気候が温暖で空気調和装置を使用せずに済む季節に比べ、夏や冬など冷房や暖房を積極的に使用する季節では、補機の使用量が三倍程度に膨れ上がると言われている。そのため、補機使用量の変動幅は季節によってかなり大きく、消費エネルギーに与える影響も大きい。実際、本研究のように定電力源として補機を連続運転することは不可能であるが、少なくとも補機制御により力行時にはオフ、回生時にはオンといったような使用タイミングを考慮することで、回生ブレーキの更なる効率化を図ることができる [17]。

6.2 列車運行乱れ時の評価

高い定時運行性をもって知られる日本の鉄道であるが、突発的な事故や天災、車両故障などの発生によって列車運行が乱れることがある。遅延時間が小さい場合には余裕時分により計画ダイヤに回復させ

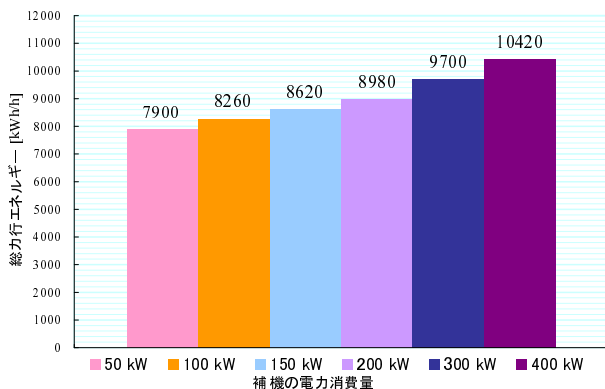


Fig. 6.1: 電空併用ブレーキ・補機使用量変動時の総力行エネルギーの変化

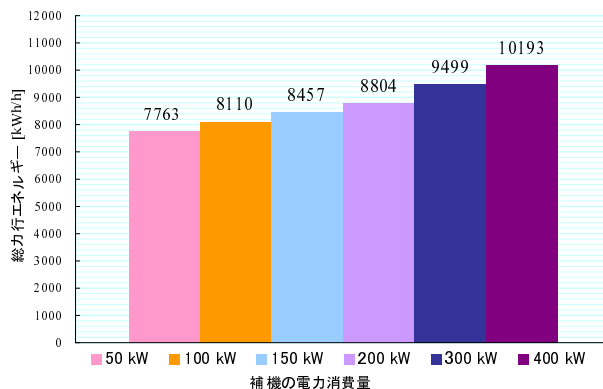


Fig. 6.2: 純電気ブレーキ・補機使用量変動時の総力行エネルギーの変化

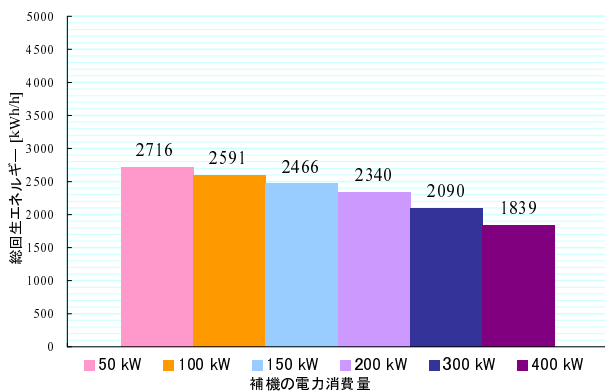


Fig. 6.3: 電空併用ブレーキ・補機使用量変動時の総回生エネルギーの変化

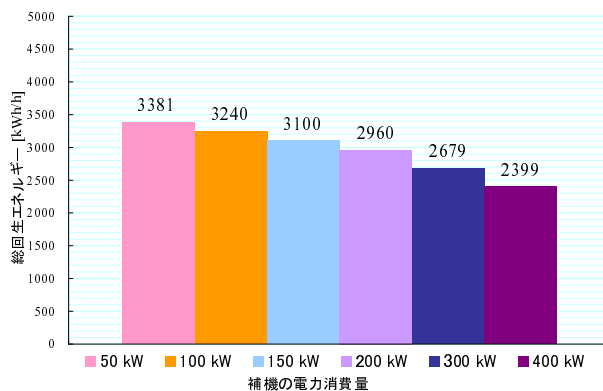


Fig. 6.4: 純電気ブレーキ・補機使用量変動時の総回生エネルギーの変化

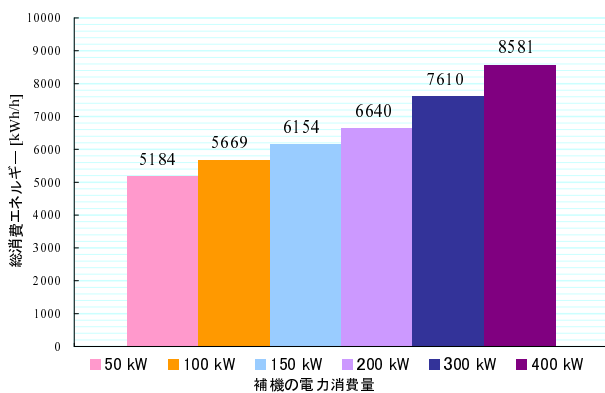


Fig. 6.5: 電空併用ブレーキ・補機使用量変動時の総消費エネルギーの変化

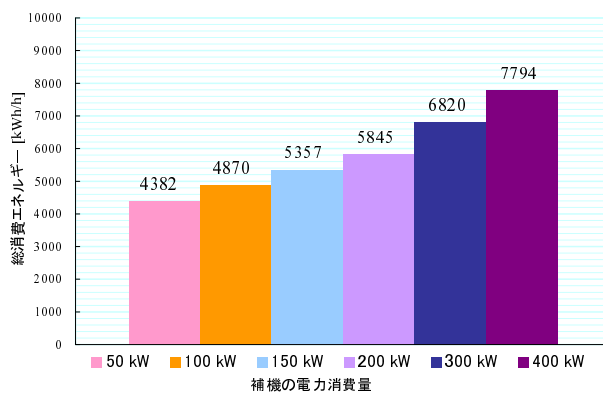


Fig. 6.6: 純電気ブレーキ・補機使用量変動時の総消費エネルギーの変化

ることができるが、それ以上の遅延が発生した場合には運転整理と呼ばれるダイヤ変更が行われる。ダイヤが変更されるということは、回生ブレーキにも影響を及ぼす。列車運行が異なるタイミングになることで、列車間での電力融通が変わってしまう。即ち、回生ブレーキによる省エネルギー効果にも影響を与えることを意味する。そこで、駅 12 にて普通列車を追い抜く快速列車の駅停車時間増加による遅延発生を想定する。遅延時間は 10 s もしくは 20 s と小さな乱れであり、余裕時分を最大限に利用することで回復運転は行わない。このときの各エネルギーに対する影響を算出した。

6.2.1 ダイヤに与える影響

電空併用ブレーキ・列車運行乱れ時のダイヤを Fig. 6.7，純電気ブレーキ・列車運行乱れ時のダイヤを Fig. 6.8 に示す。ダイヤの左端から駅 12 を出発する上りの快速列車の駅停車時分を 10 s もしくは 20 s 延ばすことにより遅延を模擬している。回復運転等の運転変更を行わず、遅延が発生した以外は通常どおり運行をしていることから、ダイヤ上では該当列車の動きを示す線が時間軸上を横にシフトするよう描かれている。そのため、運行乱れとしては規模が小さい。本研究で対象としている周期ダイヤは比較的列車間隔が広く、余裕を持った時間帯である。さらに、遅延させた列車が快速列車，即ち優等列車であるため、後続列車への遅延波及も特に発生しない。

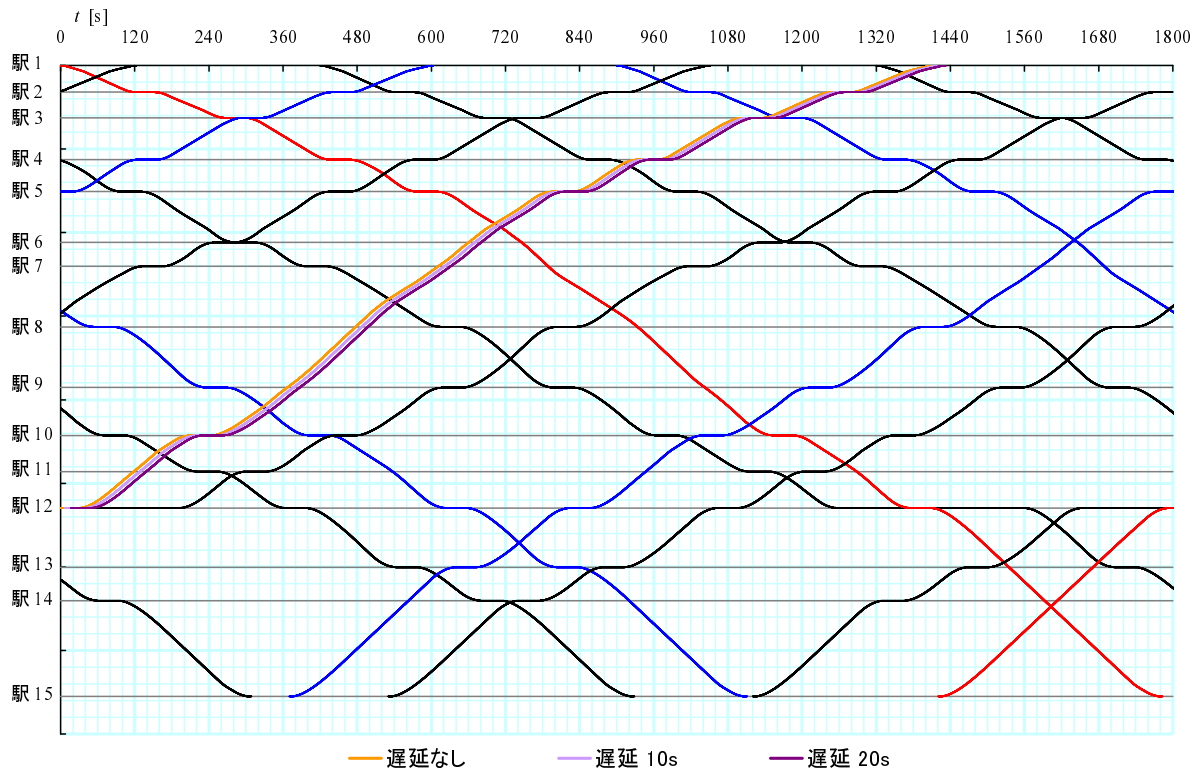


Fig. 6.7: 電空併用ブレーキ・列車運行乱れ時のダイヤ

6.2.2 変電所入出力エネルギーに与える影響

次に、列車運行乱れ時の総力行エネルギーを Fig. 6.9，総回生エネルギーを Fig. 6.10，消費エネルギー中のき電損失を Fig. 6.11，総消費エネルギーを Fig. 6.12 に示す。電空併用ブレーキ時には消費エネルギーが 10 s 遅延時，20 s 遅延時ともに 4 kWh/h 減少した。そのうち，き電損失は 2 kWh/h を占めている。純電気ブレーキ時も同様に消費エネルギーが 10 s 遅延時に 6 kWh/h，20 s 遅延時に 9 kWh/h

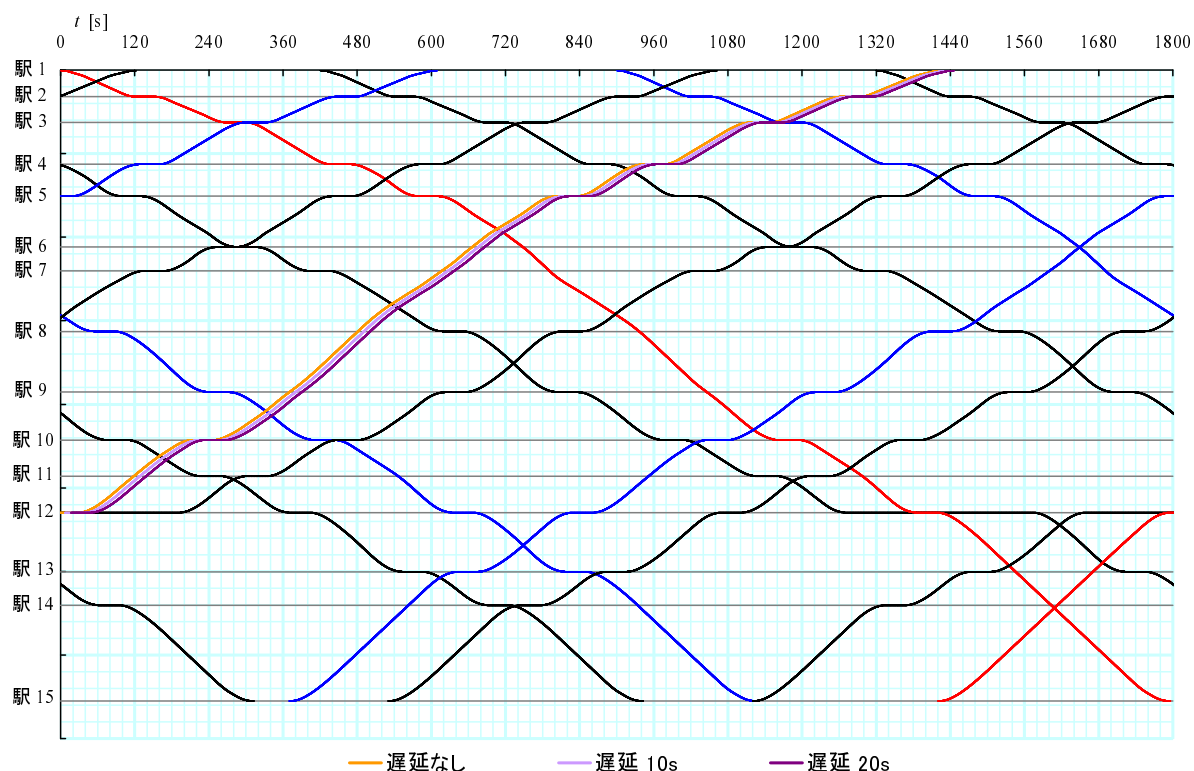


Fig. 6.8: 純電気ブレーキ・列車運行乱れ時のダイヤ

減少した。そのうち、き電損失は 3 kWh/h , 4 kWh/h を占めている。列車運行のタイミングが変わったことで与える消費エネルギーへの影響は全体として 0.1 ~ 0.2 % と小さな割合だが、その変化の中でき電損失の差が占める割合は高い。遅延対象が快速列車一本であることや、ダイヤの周期が 30 分と比較的長めであることから、今回のケーススタディでは列車運行のタイミングのエネルギーに対する感度は低いと考えられる。

しかし、列車運行のタイミング次第では消費エネルギーが増加してしまうことも十分に考えられる。別の列車運行頻度の高い路線を対象に上下線でダイヤをシフトさせた検討では、シフトさせる時間が一定時間を越えると消費エネルギーに大きなバラつきが生じた。その大きさは基準時のダイヤに対し $\pm 10\%$ 前後である。このことから、ダイヤシフトがエネルギーに与える影響は路線条件等に大きく依存し、実用的にダイヤのタイミングを考慮することは難しい。

以上の結果は、二つの視点から考察することができる。一つには、乱れが小さい場合においては消費エネルギーに与える影響が小さいことである。列車運行乱れが生じたことで大きな遅延が発生してしまった場合には、通常遅れを取り戻すために回復運転を行う。そのため、オフブレーキ運転などを行うことで消費エネルギーが大幅に増加してしまう。しかし、遅延が生じた場合でも余裕時分で吸収できる範囲内であれば、回復運転をせずに計画ダイヤどおり運行することで、消費エネルギーをほとんど増やさずことなく運行を継続することができる。もう一方では、列車運行のタイミングを考慮することで僅かではあるが現状より省エネルギー化の可能性を秘めていることである。乗客流などの条件により計画どおりの正確なタイミングによる運行はできないが、時間などの制約条件さえ満たせば、数十秒オーダでのダイヤ変更により回生エネルギーの列車間電力融通を増やすことで、省エネルギー化を促進できる。

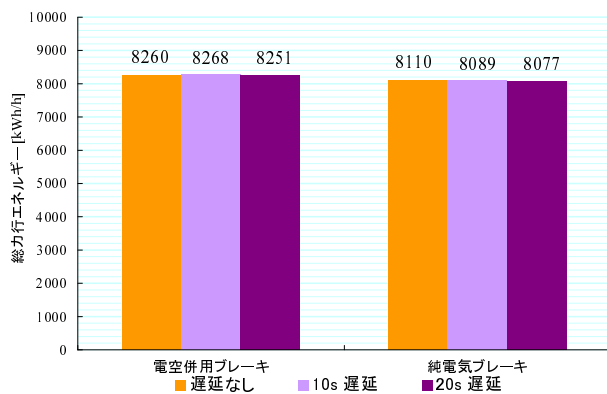


Fig. 6.9: 列車運行乱れ時の総力行エネルギーの変化

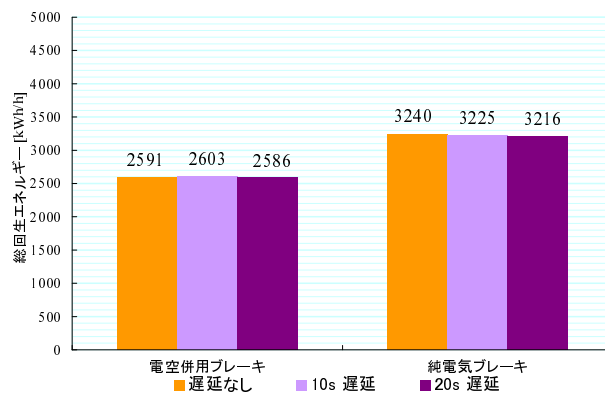


Fig. 6.10: 列車運行乱れ時の総回生エネルギーの変化

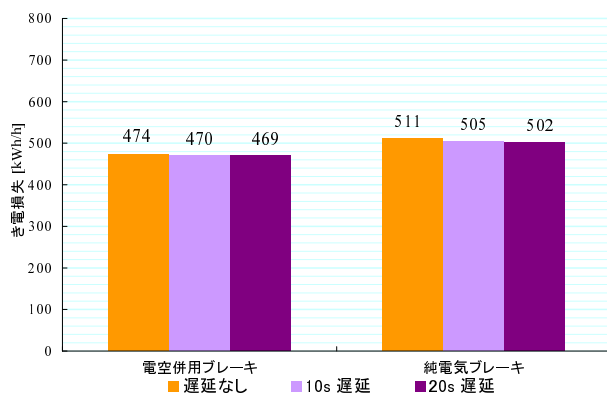


Fig. 6.11: 列車運行乱れ時のき電損失の変化

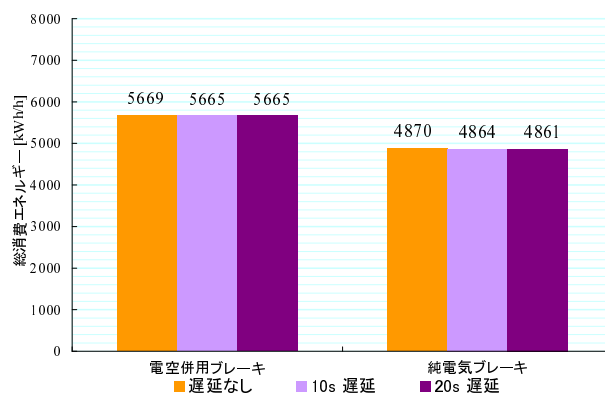


Fig. 6.12: 列車運行乱れ時の総消費エネルギーの変化

6.3 複数列車による協調運転

運転計画では Table 6.1 に示すような物理的な制約を守った上で、利用者の利便性として輸送力や乗換え、接続の便利さなど様々な事柄が考慮されている。それ故に列車ダイヤ作成は非常に複雑であり、現在でも専門家によって人手で行われている。一部に計算機システムが導入されているが、アルゴリズムや評価の系統的方法論が確立しておらず、人間の定性的判断と経験に頼る部分が大きい。特に、大都市近郊の線区では列車が数百本以上になることも珍しくなく、これら列車相互の関係と列車運行に関する制約を考慮しつつ、各列車の運転時刻や番線等を決定して行かなければならないという複雑で大規模な組合せ最適化問題となり困難度は増す。そのため、運転計画の段階でエネルギーまで考慮した協調運転を求めるのは非常に難しく、実用化には至っていない。

Table 6.1: 列車ダイヤ作成の物理的制約

項 番	制 約
1	基準運転時分
2	時隔
3	線路（複線の場合、駅間での追い越しは不可。 単線の場合、駅間での行き違いは不可）
4	進路
5	番線および番線の有効長
6	プラットフォーム
7	停車時間（乗降時間、折り返し時間、分割・ 併合などの作業に要する時間）
8	論理的制約

さらに、列車の回生能力はトルク特性やパンタ点電圧変動の影響を大きく受けるため、最適な列車運転法を見出すことは困難とされている。回生能力を持つ列車を対象とした列車最適運転法に関する研究においては、多くの場合で一列車における運転曲線最適化問題としている。複数列車を対象とした最適化計算には、膨大な計算機リソースが必要となったり、解析作業が煩雑になったりすることからあまり研究されていない。二列車への拡張を行った研究例もあるが [18]、大規模なものへの適用はまだ為されていない。

6.4 本章のまとめ

本章では、第 5 章で述べたダイヤに基づき、ブレーキパターン以外の条件を変更したときの感度解析と評価を行った。

季節など気象条件によって異なる補機の出力を変動させた検討では、補機使用量の変動幅が季節によって大きく異なり、消費エネルギーに与える影響が無視できない大きさであることが分かった。そのため、補機を運転状況に連動させて制御し、全体を通しての使用量は変えることなく、空気調和装置のオン・オフなど使用タイミングを考慮することで、更なる省エネルギー化が可能である。

列車運行に乱れが生じた場合の検討では、列車間での電力融通のタイミングが変動してしまうことで、僅かではあるが消費エネルギーに差が生じることが分かった。このことは、列車運行のタイミングを列車間で調整することで、現状より省エネルギーとなる可能性を示している。ただし、タイミングを変えることで必ずしも消費エネルギーが減少するとは限らない。路線条件等によっては寧ろ増加してしまう場合もあるため、一概にダイヤシフトを行うことが良いとは言い切れない。

省エネルギー化を促進する方法の一つとして複数列車の協調運転が挙げられるが、運転計画の段階でエネルギーまで考慮することは現実的に難しい。しかし、既存の列車運行管理システム [19] や運転整理支援システム [20] などと、本研究で行ったダイヤに対するエネルギー評価とを組み合わせたアルゴリズムが確立できれば、乗客のメリットも考慮しつつ、事業者にとっても省エネルギーとなる経済的なダイヤの作成が可能となる。

第7章 結論と今後の課題

7.1 結論

本論文では、電気鉄道車両の常用ブレーキとして機械ブレーキを用いず、回生ブレーキのみを利用する純電気ブレーキシステムを提唱した。高速域での回生ブレーキを有効活用するために、地上回生機能を備えた変電所を持つ直流電気鉄道を対象に検討を行い、7章の構成としてまとめた。

まず、第1章は序論として研究背景および回生ブレーキの位置づけやこれまでの経緯をまとめ、本論文で明らかにする課題を整理した。

第2章では、電気鉄道車両にて一般的に用いられているブレーキシステムとして、機械ブレーキおよび電気ブレーキについての基本的説明を行った。また、本論文で提案する純電気ブレーキの特徴について整理した。

第3章では、数値検討を行う上で必要となる運転曲線作成の計算手法を記述するとともに、数値計算として精度の高い結果を得るための手法を考察した。また、ケーススタディを行うために用いるモデル路線とその特徴について整理した。

第4章では、3章で述べた数値計算手法に基づき、列車一編成の走行を模擬したモデルにて運転曲線の作成を行い、高速域でも積極的に回生ブレーキを用いる方法を提案した。従来の電空併用ブレーキを純電気ブレーキに変更することで運転曲線が大幅に変更され、モデル路線の14駅間では合計運転時分が4～12秒程度延びる結果となったが、各駅間に対する時間配分の見直しや変電所送出電圧の昇圧を行うことで、現状の運行を維持することが可能である。また、機械ブレーキにより熱などとして捨てられていた分のエネルギーを回生エネルギーとして全て回収することができるため、変電所ベースの消費エネルギーは8～13%減少し、省エネルギー効果が大きいことを示した。

第5章では、列車複数編成の走行を模擬したモデルにて同一変電所間内の列車間電力融通を考慮し、高速回生ブレーキの有効活用法を検討した。純電気ブレーキ化がダイヤに与える影響はほとんどなく、運転時分を議論する際には個々の駅間において列車一編成の走行モデルを用い、より詳細に運転曲線を検討すればよいことを示した。変電所ベースの消費エネルギーは14%減少しており、列車間電力融通による省エネルギー効果も明らかとなった。また、電力会社からの購入エネルギーという鉄道事業者側の経済的観点からも評価を行い、1～2%程度の購入電力量削減効果が見込まれた。

第6章では、5章で検討したモデルを用い、ブレーキパターン以外の条件を変更したときの感度解析を行った。補機使用量の変動幅は季節など気象条件によって大きく異なり、消費エネルギーに与える影響が無視できない大きさであることを示した。そのため、更なる省エネルギー化を図るには運転状況に連動させた補機の制御を考える必要がある。また、列車運行乱れが生じて列車間での電力融通のタイミングが変動したときのエネルギー収支を評価し、0.1～0.2%ではあるがダイヤシフトを行うことによる省エネルギー化の可能性を示した。

本章では本研究の内容を総括し、問題点を今後の課題として整理した。

以上により、本論文は直流電気鉄道のブレーキシステムとして回生ブレーキを有効活用できる純電気ブレーキに着目し、地上設備の回生機能を利用することの効果、および具体的なケーススタディで高速車両を対象としても現状の運用に支障をきたさないことと、その実用性を定量的に示した。

7.2 今後の課題

本論文では、高速回生ブレーキの有効活用法の評価として列車複数編成の走行を模擬し、同一変電所間内の列車間電力融通を考慮したモデルにて検討を行ったが、複数の変電所間を跨ぐ電力融通までは考慮されていない。そのため、本来は変電所を越えた先の他の力行車へと電力融通されるべき回生エネルギーが全て変電所に返されており、結果として省エネルギー効果を低く見積もってしまっている。この問題を解決するには、エネルギー計算を一変電所間で区切らず、路線全体を一つとしたモデルに拡張する必要がある。

また、回生エネルギーの再利用先を他の力行車のみとしており、付帯設備などによるエネルギー消費が考慮されていないことから、省エネルギー効果は低く見積もられている。列車だけで消費するエネルギーを算出しただけでは不十分であり、回生エネルギーの有効活用としては付帯設備なども考慮に入れることで、さらに省エネルギー効果が向上するであろう。

一方、本論文では純電気ブレーキをより有効活用するために、車両性能の向上として変電所送電電圧の上昇を検討した。しかし、車両性能を向上させるのであれば、車両編成の MT 比を変えるのも一つの方法である。M 車比率を上げれば高速域での回生ブレーキ力は高まり、純電気ブレーキ化を行っても運転時分の増加を抑えられる。さらに、回生エネルギーが増加することからより省エネルギーとなる。しかし、回生失効を生じる可能性が高まることには注意しなければならない。また、M 車比率を上げることは新製時の費用増加だけでなく、メンテナンスの面からもデメリットとなる。そのため、運転計画に対して最適な MT 比を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁ホームページ：「エネルギー白書 2006」，
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2006EnergyPdf/indexpdf.html>
- [2] 東京大学交通ラボ：「それは足からはじまった—モビリティの科学」，技報堂出版，pp.192-199 (2000)
- [3] 高木 亮：「電力回生ブレーキとき電システム 現状と展望」，鉄道車両と技術，No.78，pp.2-9 (2002)
- [4] 高橋 弘隆：「回生電力の有効利用 —蓄電池式回生電力吸収装置—」，鉄道と電気技術，Vol.16，No.2，pp.17-21 (2005)
- [5] 鈴木 高志，古関 隆章，曾根 悟：「定電力ブレーキパターンの運転曲線及び回生率への影響の定量評価」，電気学会 交通・電気鉄道/ITS 合同研究会，TER-02-12/ITS-02-2 (2002)
- [6] 岡田 万基，古関 隆章：「直流電気鉄道における回生ブレーキ有効活用のための車両と電気システム」，電気学会 交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会，TER-04-39/LD-04-60 (2004)
- [7] 電気学会 電気鉄道における教育調査専門委員会 編：「最新 電気鉄道工学」，コロナ社，pp.69-77 (2000)
- [8] M. Ogasa, T. Watanabe, Y. Imamura, M. Matsuoka, S. Toda：「Running Test Result of Electric Brake to Zero Speed」，Quarterly Report of RTRI, Vol.40, No.4, pp.214-218 (1999)
- [9] 佐藤 康晴：「電気停止ブレーキ（純電気ブレーキ）の開発について (1)」，鉄道車両と技術，Vol.4-12，No.41，pp.2-6 (1998)
- [10] 植田 直季，曾根 悟：「電車のブレーキシステムの純電気ブレーキ化」，平成 8 年電気学会全国大会，1237，pp.5-350-5-351 (1996)
- [11] 曾根 悟：「純電気ブレーキの技術課題と可能性」，鉄道車両と技術，Vol.4-2，No.31，pp.2-7 (1998)
- [12] 渡邊 朝紀，小笠 正道：「停止まで使える電気ブレーキ」，Railway Research Review 1999 年 2 月号，pp.10-15 (1999)
- [13] 持永 芳文：「電気鉄道工学」，エース出版，pp.52-57 (2000)
- [14] 電気鉄道ハンドブック編集委員会 編：「電気鉄道ハンドブック」，コロナ社，pp.388-404 (2007)
- [15] 原島 博，堀 洋一：「工学基礎 ラプラス変換と z 変換」，数理工学社，pp.154-156 (2004)
- [16] 田淵 宏樹，鈴木 高志，古関 隆章：「電気ブレーキ負担率向上のための制動標識利用の提案と検討」，平成 13 年電気学会全国大会，5-253，pp.2092-2093 (2001)
- [17] 福田 吉紀，岡田 万基，古関 隆章：「補機消費電力の積極的利用による直流電気鉄道での回生ブレーキ有効利用」，平成 16 年電気学会全国大会，5-133，pp.191-192 (2004)

- [18] 高 英聖, 宮武 昌史 : 「直流饋電特性を考慮した列車運転曲線最適化問題の数値解法」, 電気学会論文誌 D, Vol.126, No.8, pp.1104-1112 (2006)
- [19] 高野 たい子, 川端 敦, 堀田 正人, 日野 知明 : 「列車運行管理システム」, 電子情報通信学会誌, Vol.82, No.10, pp.1023-1027 (1999)
- [20] K. Kumazawa, K. Hara, T. Koseki : “A novel train rescheduling algorithm for correcting disrupted train operation in a dense urban environment”, The 11th International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and other Transit Systems, pp.565-574 (2008)

本研究に関する発表文献

国際学会

1. **T. Noda**, T. Koseki : “Full Regenerative Braking in a Train at High Speed and Enhancement of Voltage, Powered by DC-electrification with Regenerative Substations”, The International Conference on Electrical Engineering 2008, July 2008.
2. **T. Noda**, T. Koseki : “DESIGN OF A RUN-CURVE FOR ENERGY SAVING OPERATION IN A MODERN DC-ELECTRIFICATION -EFFICIENCY ASSUMING PERFECT REGENERATIVE BRAKING-”, The International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009, June 2009. (発表予定)

国内学会

1. 野田 昂志, 古関 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, pp.137-138, Mar. 2008.
2. 野田 昂志, 古関 隆章 : 「直流回生変電所下における高圧化と高速回生ブレーキ有効活用時の列車間電力融通の評価」, 平成 21 年電気学会全国大会, Mar. 2009. (発表予定)

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々から多大なるご支援、ご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表したいと思います。

指導教員の古関隆章准教授には修士課程としての二年間、終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜り、暖かい御激励を賜りました。また、学会発表や海外からのお客様と接する機会を数多く設けていただき、非常に貴重な経験をさせていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。また、これからもお身体に気をつけて、お元気な姿でご活躍されることを心から願ってやみません。

工学院大学の曽根悟教授、高木亮准教授、永田康明様、武蔵工業大学の山崎大生准教授にはPEB 共同研究会の場で大変お世話になりました。活発な議論を行う中で数え切れないほどのアドバイスをいただき、研究を進める上で非常に有意義なものとすることができました。共同研究会では鉄道事業者やメーカの専門家の方々から列車の運行や運転曲線に関する様々な資料や先行研究に関する紹介、現場からの貴重なご助言などをいただくとともに、現場を見学する機会を設けていただくなど多大なるご支援をいただきました。大変感謝しております。

博士課程を卒業された野崎雄一郎さんには研究室の計算機環境整備の面で大変お世話になりました。特に計算機管理者として素人でありましたが丁寧に教えていただき、多くのことを学ぶことができました。また、共同研究においてはアドバイザとして会議に参加していただき、発表資料などにも多くのアドバイスをいただきました。博士課程の福正博之さんには研究室配属前からメールのやり取りを含め、研究以外の面でも数多くのサポートをしていただき、本当に感謝しております。特に、留学先のドイツから戻られてからは、研究室の最上級生としてリーダーシップを発揮していただきました。次の世代の古関研究室の操縦をよろしく願います。また、研究室の管理・維持など、古関准教授の片腕として活躍されることをお祈り申し上げます。

修士課程を卒業された鈴木武海さん、原和弘さん、中田貴之さんには日頃より研究や授業など多方面で助けていただきました。特に鈴木さん、原さんには研究に関することはもとより、自分に不足している鉄道の基礎知識を数多く教えていただき、大変感謝しております。その知識の多さにはいつも目を見張るものがありました。

同期の熊澤一将君、小幡寛君とは共に学外からの修士課程として古関研究室に配属されたこともあり、研究の苦勞を共有することはもちろんのこと、研究室での雑談など楽しい研究室生活を送ることができました。熊澤君には鉄道について熱く語ってもらったり、野球の話で盛り上がりました。小幡君は実験ということもあり苦勞している場面も見られましたが、頑張っている姿は大きな励みとなりました。

Genevieve Marie Patterson さんには論文投稿、発表の際に私の拙い英語を修正していただき大変お世話になりました。また、母国のことについてもいろいろと紹介してもらいました。

修士課程 1 年の槻木澤佑公君、田中峻一君には研究室の雑用などをお任せしたり、日々の生活でなくてはならない存在でした。来年度の古関研究室を牽引する立場として今以上に頑張ってもらいたいと思います。墜落しないように気をつけてください。学部生の川上千幸君、櫻井大輔君とは一年間でしたが同じ研究室の仲間として楽しい時を過ごすことができました。就職されても元気で活躍されることを願っています。また、道念大樹君とは他の研究室に移られてからも、研究室生活をともにした仲間として交流できたことを嬉しく思います。

留学生の Martin Bacik 君には短い間でしたが、母国のことを含め欧州についていろいろと紹介してもらいました。

高田康宏技術職員には研究室内をすっきりと片付けていただくなど，研究環境整備の点でご尽力いただきました。計算機管理の点でも数多くのご指導をいただきました。また，楽しく会話できたことも非常によい思い出となっています。

秘書の南佳子様，松崎由香子様には出張の際の事務手続き等でお世話になっただけでなく，楽しい会話で研究室の雰囲気をも明るく盛り上げていただきました。これからも，古関研究室をよろしくお願いします。

最後に，長年の学生生活もこれで終わりです。大学生活を精神面，経済面において支えてくれた家族に心より感謝の意を表し，謝辞といたします。

平成 21 年 2 月 4 日

野田 昂志