

- 修士論文 -

直流電気鉄道の電力流を考慮した
省エネルギー運転手法の研究

Research on Energy-Saving Operation Method
Considering Power Flow in DC-Electric Railway

平成 26 年 2 月 6 日 提出

指導教員 古関 隆章 教授

東京大学 大学院工学系研究科

電気系工学専攻 修士課程

学籍番号 37-126499

渡邊 翔一郎

内容梗概

いま世界では地球環境問題解決に向けた取り組みが盛んに行われており、低炭素社会、循環型社会の構築が早急に望まれている。加えて我が国はエネルギー問題ならびに電力問題を抱えている。そのような中で鉄道は環境親和性の高い乗り物として注目を浴びているが、更なる省エネルギー化を実現する可能性を秘めている、魅力ある交通手段である。本論文では都市交通で利用される直流電気鉄道に注目し、運行管理を見据えた省電力・省エネルギー化の実現に向けた以下の検討を行っている。

電気鉄道車両の多くには電動機を発電機として用いる回生ブレーキが備えられており、制動時に車両が持つ運動エネルギーを電気エネルギーに変換して他の車両がそのエネルギーを利用して加速することが可能である。しかし、直流電気鉄道の場合は一般的に電力蓄積装置を備えていないために回生ブレーキで得た回生電力は同じタイミングで力行車両によって消費されなければ、再利用されることなく捨てることになる。これを回生失効と呼ぶ。

本論文ではこの回生失効を抑え、回生エネルギーを有効に活用するため、数値解析法を用いた異なる運転方法の電力および電力量の評価と試運転車両による営業路線での現車試験によるその理論の検証を行った。前者の数値解析では 2 つの省エネルギー運転方法を比較分析し、列車の加速に必要なエネルギーを減らすより回生ブレーキを性能いっぱい使うことが省エネルギーに有効との知見を得た。

現車試験でその実証と問題点の抽出を行った。そして回生ブレーキを最大限活用するために運転士に運転方法をアシストする運転支援装置を開発し、実験的に明らかになった操作遅延の対策を行い、マニュアル運転の支援という形で提案する運転法が実現可能であるということを実証した。また、過去の運転最適化研究の成果として知られている最大力行・惰行・最大制動という結果に回生ブレーキを積極的に用いる考え方を適用し、回生電力の抑制を考慮した電力制限回生ブレーキの適用により従来よりも省エネルギー効果があることを明らかにした。

これらの検証により 1 列車で得られる省エネルギー効果の限界が把握できたので、さらに省エネルギー化を進めるため列車群の知的管理による省エネルギー手法の検討を行うこととした。現車試験データの分析により列車群の電力流に注目すれば回生負荷を予測できる成果を得たことから、列車群の電力制御に向けて ATO 制御路線を対象としたダイヤ改正を含めた検証試験を計画している。現在、ピーク電力をダイヤから数値解析し、補機電力を考慮した省エネルギー運転を評価することで駅間走行時分配分最適化をダイヤ改正の主方針とする結論を得ている。

目次

1. 序論	1
1.1. 研究背景と問題点	1
1.1.1. 省エネルギー	1
1.1.2. ピークカット	2
1.1.3. ダイヤ乱れ時の旅客サービスの維持と省エネ・ピークカットの実現	2
1.2. 研究目的	4
1.3. 本論文の構成	5
第1章 参考文献	5
2. 電気車両の力学モデル	7
2.1. ブレーキシステム	7
2.1.1. 電気ブレーキと機械ブレーキ	7
2.1.2. 回生失効	7
2.1.3. 電空協調ブレーキ	8
2.2. 引張り特性と回生性能曲線	9
2.2.1. 誘導機	9
2.2.2. リニアモータ	11
第2章 参考文献	14
3. 電力・電力量評価のための運転曲線と数値計算	15
3.1. 力学モデル数値計算手法	15
3.1.1. 運転曲線の数値計算	15
3.1.2. 電力・電力量の数値計算	16
3.1.3. 応荷重装置	16
3.2. 饋電回路モデル数値計算手法	18
3.2.1. 饋電回路モデルとは	18
3.2.2. 変電所の回路モデル	18

3.2.3.	饋電線の回路モデル	19
3.2.4.	車両の回路モデル	20
3.2.5.	架線電圧変動による引張り特性の変化	23
第 3 章	参考文献	24
4.	最適制御問題としての省エネルギー運転曲線の設計	25
4.1.	変分法	26
4.2.	動的計画法	28
4.2.1.	動的計画法とは	28
4.2.2.	R. Bellman の最適性条件	28
4.2.3.	拘束条件の処理	29
4.2.4.	動的計画法の応用	32
4.3.	最適制御問題まとめ	32
第 4 章	参考文献	33
5.	省エネルギー運転	34
5.1.	省エネルギー運転とは	34
5.2.	運行管理を考えた省エネルギー運転	34
第 5 章	参考文献	36
6.	省エネルギー運転手法の評価	37
6.1.	2 つの最大制動	37
6.2.	運行管理と省エネルギー運転	37
6.3.	列車運転のモデル化とエネルギーの計算方法	38
6.3.1.	運転モデル	38
6.3.2.	勾配を考える意味	38
6.3.3.	ブレーキのかけ方	39
6.3.4.	エネルギーの計算方法	39
6.3.5.	回生失効と回生率	39

6.4.	運転曲線の計算結果と省エネルギー運転法の傾向分析	40
6.4.1.	全体に見られる傾向	41
6.4.2.	回生失効しない場合における回生ブレーキの大きな優位性	41
6.4.3.	回生失効が回生ブレーキの優位性に与える影響	43
6.4.4.	勾配抵抗が与える影響	44
6.5.	第6章まとめ	46
	第6章参考文献	46
7.	トンネル区間を走るリニアモーター車両と補機の影響評価	47
7.1.	車両の補機電力を検討する目的	47
7.1.1.	列車の消費エネルギーと走行時分の関係	47
7.1.2.	等増分消費エネルギー則 ⁽²⁾	49
7.2.	検証方法	49
7.2.1.	エネルギーの計算条件	49
7.2.2.	力学モデルと運転曲線の計算	49
7.2.3.	ブレーキのかけ方	50
7.2.4.	列車長を考慮した数値解析と補機のエネルギーの計算	51
7.3.	数値解析結果	51
7.3.1.	全体の傾向と補機の影響	51
7.3.2.	単調減少でない場合	52
7.3.3.	等増分消費エネルギー則が適用できる場合とできない場合	52
7.4.	得られた知見のまとめ	57
	第7章 参考文献	57
8.	現車試験による省エネルギー運転手法の効果の検証	58
8.1.	現車試験の目的	58
8.2.	省エネルギー運転と運転支援システム	58
8.2.1.	検証する省エネルギー運転パターン	58

8.2.2.	回生電力有効活用のための電力制限回生ブレーキ.....	59
8.2.3.	回生率の定義.....	61
8.3.	運転支援の提案.....	61
8.3.1.	省エネルギー運転の難しさ.....	61
8.3.2.	運転支援方法のための列車情報の取得.....	61
8.3.3.	支援意志の決定.....	61
8.3.4.	ブレーキ操作支援の方法.....	63
8.3.5.	操作遅延時間低減の工夫.....	63
8.3.6.	運転支援の安全性の確保.....	64
8.4.	基本的な電力制限制動支援とその効果の実証.....	64
8.4.1.	試験環境.....	64
8.4.2.	運転曲線で見える運転支援の効果.....	65
8.4.3.	走行時分と回生率で見える運転支援の効果.....	68
8.5.	複雑な制動区間に強い速度制限のある制動支援とその問題点の解決.....	68
8.5.1.	試験環境.....	68
8.5.2.	安全な停止に向けた運転支援曲線.....	69
8.5.3.	運転曲線で見える運転支援の効果.....	70
8.5.4.	省エネルギー運転支援と運転士の操作の比較.....	70
8.5.5.	ブレーキ指令とパンタ点電圧の変化.....	72
8.5.6.	回生率の評価.....	75
8.6.	現車試験で得られた知見とまとめ.....	75
	第8章 参考文献.....	75
9.	列車群における省エネルギー運転と運行管理を見据えた電力ピークの分析.....	76
9.1.	電力可視化の提案.....	76
9.1.1.	電力を検討する意味.....	76
9.1.2.	電力可視化のモデル.....	76

9.1.3.	電力可視化のモデルからわかること	77
9.2.	運行管理と電力可視化.....	77
9.2.1.	電力可視化を運転整理に適用する意味	77
9.2.2.	電力可視化ダイヤへの適用と瞬間電力	78
9.2.3.	運転整理時の電力可視化ダイヤでわかること	78
9.3.	第9章まとめ	78
第9章	参考文献.....	82
10.	結論.....	83
10.1.	直流電気鉄道の力学・饋電回路モデルの構築と最適化.....	83
10.2.	省エネルギー運転手法の優位性の分析	83
10.3.	現車試験による省エネルギー効果の検証.....	83
10.4.	列車群の知的管理の必要性和電力可視化の提案	83
11.	今後の課題.....	85
11.1.	定速度運転モデルの検討.....	85
11.2.	列車群制御における電力・電力量分析	85
11.3.	電気設備の活用による回生エネルギーの有効活用法	85
11.4.	運転支援法と回生負荷推定について	85
11.5.	ATO への応用と列車群の知的管理	85
11.6.	Cyber-Physical-Systems	86
研究実績	87
謝 辞	89

1. 序論

1.1. 研究背景と問題点

本論文の背景と問題点について(1)省エネルギー、(2)ピークカット、(3)ダイヤ乱れ時の旅客サービスの維持と省エネルギー・ピークカットの実現、に分けて説明する。

1.1.1. 省エネルギー

近年は地球環境問題に対する意識が高まり、低炭素社会・省エネルギー化が期待されている。鉄道は環境親和性の高い乗り物であると言われており、二酸化炭素排出量で見ると、鉄道はヒト一人を 1km 運んだときの二酸化炭素排出量が図 1-1 に示すように他の交通機関に比べて非常に少なく、また鉄道は軌道を走るため走行抵抗も小さく、自動車はじめ他の輸送機関に比べて人ひとりを運ぶエネルギーが少ない。特に電気鉄道は 209 kJ/人/km と、自動車の 2484 kJ/人/km という数字を大きくリードしている⁽²⁾。

この鉄道をより環境親和性の高い乗り物にするために各機関では様々な取り組みが行われている。たとえば欧州では ERRAC(European Rail Research Advisory Council)というプロジェクトを立ち上げ、二酸化炭素排出量を 2050 年に 1990 年比で 50%削減するという目標が掲げられている⁽³⁾。

鉄道の、特に電気鉄道では 1970 年代からは車両のモータを発電機として利用し、制動力を得ると同時に運動エネルギーを電気エネルギー(以下、回生電力とする)に変換して再利用を図る回生ブレーキ車両が量産化された。これを機に電気鉄道の省エネルギー化は進み、特に都市近郊を走る直流電気鉄道では 79%近い車両がこの回生ブレーキ車両である。これには省エネルギー化だけでなく、事業者側にとっては機械ブレーキ時の摩耗品の交換頻度を減らすことができ、利用者側にとっては乗り心地が良くなる利点があるために非常に有用である。しかし、この回生ブレーキの致命的な弱点は、この回生電力が消費されなければ制動力を失い、エネルギーを熱として捨てざるを得ないことである。このことを回生失効と呼ぶ。

この回生エネルギーの有効活用に向けて鉄道事業者は回生電力量を調査したり⁽⁴⁾、蓄電池の設置など地上設備を整備して電力の再利用を試みている⁽⁵⁾。海外では変電所に蓄電池とスーパーキャパシタを設置した事例もある⁽⁶⁾。また、車両側でも車両の軽量化や制御装置の改善で省エネ化を図っている取り組みもある⁽⁷⁾。海外では交流饋電区間において回生電力を遠くの車両にまで送るような取り組みもある⁽⁸⁾。

このようにハードウェアの改良により省エネルギー化を図る手法もあるが、一方で運転方法を工夫することにより省エネルギー化を達成できることも知られている⁽⁹⁾。運転時に無駄な加速を避け、適切なブレーキを用いることで省エネルギー化を実現している事例もある⁽¹⁰⁾。

鉄道事業全体のうち運行に必要なエネルギーは図 1-2 に示すように事業全体の約 8 割である⁽¹¹⁾。したがって、列車運行に必要なエネルギーを削減することで、大きな省エネルギー効果を得られることが期待される。列車運行のエネルギーの損失は大きく分けて変電所、送電線などの地上設備と、軌道を走る列車に分けて考えることができる。化石燃料などの源エネルギーから鉄道で扱う変電所までの有効仕事量は約 37%で、車両での有効仕事量は 30%である。つまり、この 7%は鉄道の電力供給上の工夫で軽減できることが示唆されている⁽¹²⁾。

1.1.2. ピークカット

近年のパワーエレクトロニクス技術の進歩により、鉄道車両は高性能化して高加速度で走行できるようになった。移動時間の短縮と列車本数の増加はこの恩恵であり、事実駅間を走るのに必要なエネルギーも減少傾向にある。しかし、この高加速・高頻度運転は電力ピークを押し上げており、近年は変電所からの出力電力が増加傾向にある。しかし、3.11 の東日本大震災以降、大電力を消費する電気鉄道はその影響を大きく受け、鉄道事業者の関心は省エネルギー技術だけでなく省電力技術にも向けられることになった。事実、これまでの研究東日本大震災の影響で、鉄道事業者には 8%の節電要請が課せられた⁽¹³⁾。ここで注目したいのは、この節電は昼間の最大電力を抑えること、つまりピークカットが目的であり、先述の省エネルギーとは別問題である⁽¹⁴⁾。近年の学会ではピークカットに対する技術的取り組みは省エネルギー化の取り組みに比べて少ない。それは高加速運転が省エネルギーにつながるという電力と電力量の間にあるトレードオフ関係が根底の問題として存在するためである⁽¹⁵⁾。

1.1.3. ダイヤ乱れ時の旅客サービスの維持と省エネ・ピークカットの実現

先述のように事業者は旅客サービスの向上の取り組みとして高頻度運転を行っているが、これにはロバスト性がなく、一度何らかのトラブルにより運行ダイヤが乱れると平常時並みの状態に戻るまでに多大な時間と労力を要する。(ダイヤ乱れからの復旧作業を運転整理と呼ぶ)。我が国の定時運行率が高いのは科学技術の恩恵よりも人のノウハウの恩恵が大きく、事実ダイヤ乱れ時の復旧作業は手作業で行われている。加えて、ダイヤ乱れ時の列車運行はピークカットや省エネルギーのことが一切考慮されていない。特にピークカットは平常時ダイヤ乱れ時を問わず実現しなければ意味が無いことは明白である。これらの解決に向けてメーカーが動き始めており、ATO(Automatic Train Operation)に関してはダイヤ乱れ時に着目して、信号情報を利用し無駄な加速減速を抑えて消費電力量を抑える手法が提案されている⁽¹⁶⁾。

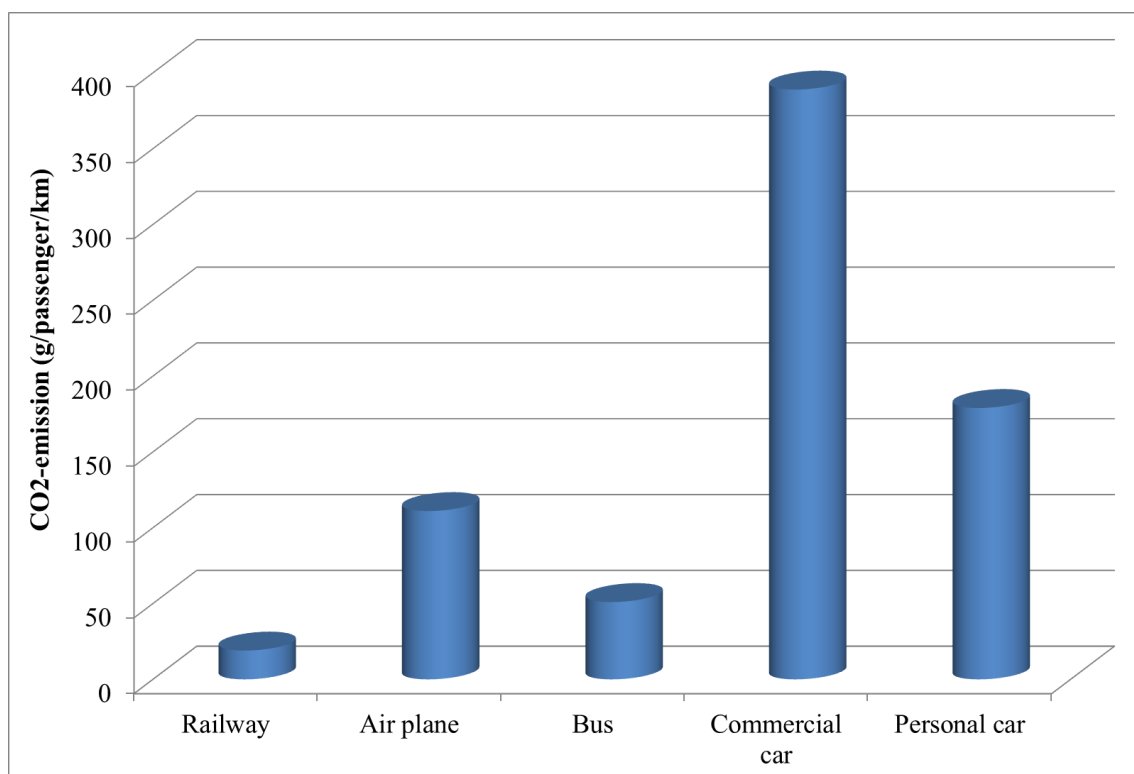


図 1-1 各交通機関の CO2 排出量
(文献(1)を参考に著者作成)

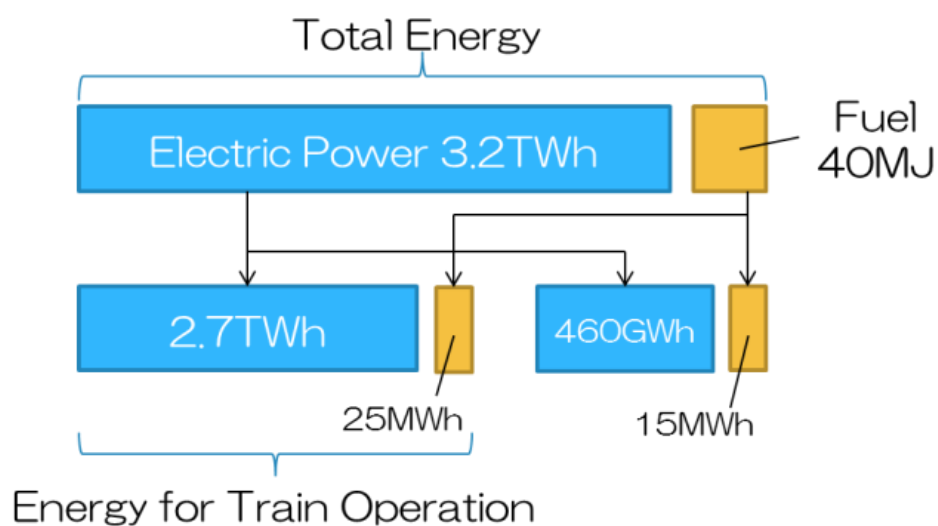


図 1-2 鉄道事業者における車両のエネルギー消費の割合
(文献(3)を参考に著者作成)

1.2. 研究目的

前節のことを踏まえ、本論文で扱うのは

「電力流を考慮した直流電気鉄道の省エネルギー化」

である。直流電気鉄道は主に都市鉄道で普及している電気鉄道方式であり、一方閑散線区や都市間鉄道では交流電気鉄道が普及している。図 1-3 に直流電気鉄道車両、図 1-4 に交流電気鉄道車両の一例を示す。本論文では世界的な研究の流れも視野に、回生ブレーキに注目した直流電気鉄道の省エネルギー化を目的とする。そこでまず 1 列車の運転手法について比較分析を行い、その効果について現車試験にて運転手法の効果の検証を行う。また列車群の電力流に注目し、省エネルギーだけでなく省電力化(ピークカット)に向けて道筋を作るべく運行管理場面での電力可視化を試みた。



図 3 都市を走る直流電気車両



図 4 大都市間を走る交流電気車両

1.3. 本論文の構成

- 2 章では電気車両の力学モデルを考え、車両の加速・減速の仕組みを説明する。
- 3 章では運転曲線の数値計算手法を説明する。特に電力・電力量を計算するための力学モデルおよび饋電回路モデルについて説明する。
- 4 章では運転曲線の計算の場面で議論されている最適化手法について説明する。
- 5 章では省エネルギー運転の定義を述べる。
- 6 章では省エネルギー運転手法の数値計算によって得られた結果を評価する。
- 7 章では省エネルギー運転での補機の影響を評価する。
- 8 章では現車試験による省エネルギー運転の検証結果を報告する。
- 9 章では運行管理の場面での列車群における省電力・省エネルギー化に向けた電力分析について報告する。
- 10 章では本論文の結論を述べ、11 章で今後の課題を述べる。

第 1 章 参考文献

- (1) T. Koseki, "Technical Trends of Railway Traction in the World, " The 2010 International Power Electronics Conference, 2010.
- (2) M. Ogasa, "Energy Saving and Environmental Measures in Railway Technologies : Example with Hybrid Electric Railway Vehicles", IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2008.
- (3) Christophe Cheron et al "ERRAC-European railway energy roadmap: towards 2030", WCRR2011
- (4) 山下高賢, 可児周博, 中村悦章 "JR 西日本における回生電力有効活用の取り組み" 鉄道車両と技術 No150, P10
- (5) 東日本旅客鉄道㈱ "鉄道電力システムへの「スマートグリッド」技術の適用について" プレスリリース, 2012 年 5 月 8 日, <http://www.jreast.co.jp/press/2012/20120504.pdf>
- (6) H. Lee, J. Song, H. Lee and C. Lee "Capacity Optimization of The Supercapacitor Energy Storages on Dc Railway System Using A Railway Powerflow Algorithm" International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 7, 2011.
- (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, No150, P6
- (8) S. Goh, M. Griffith, K. Larbi "Energy Saving By Using Regenerating Braking As Normal Train Operation", RTS2010, April 2010
- (9) 濱崎康宏:「新京成電鉄における省電力への取り組み」, 鉄道車両と技術, No.196, pp.15 (2013)
- (10) 井関一隆 "JR 西日本における電力削減に向けた挑戦～運転士とともに～" 鉄道車両と技術 No199, P2

- (11) 西日本旅客鉄道,
"http://www.westjr.co.jp/company/action/env/eco/004_01.html".
- (12) 秦広, 奥井明伸 “鉄道におけるエネルギーと電力問題” 鉄道車両と技術 No178, P11
- (13) 経済産業省 「電力需給対策-大口需要家に対する電気使用制限(電気事業法第 27 条)」
<http://www.meti.go.jp/setsuden/pdf/keiho.pdf>
- (14) 曾根悟 “「節電ダイヤ」を大きなチャンスに変える方法” 鉄道車両と技術 No178, P34
- (15) 古関隆章, 渡邊翔一郎, Ninh Van Cuong (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 磯部栄介 (日本地下鉄協会) “運転支援におけるブレーキ操作遅れ時間の補償と ATO による電力制限制動活用の提案”, リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会, LD-13-060, TER-13-041, 2013 年 8 月, 一ノ関
- (16) 三菱電機技報 Vol.83, No11, 2009

2. 電気車両の力学モデル

2.1. ブレーキシステム

2.1.1. 電気ブレーキと機械ブレーキ

鉄道の電気車両のブレーキは、電動機によって制動力を得る電気ブレーキと、摩擦力によって制動力を得る機械ブレーキの 2 つからなっている。

まず電気ブレーキとは、ブレーキをかけるときに車両の電動機を発電機として利用して運動エネルギーを電気エネルギーに変換して制動力を得るものである。ここで、変換して得た電気エネルギーの消費方法によってより細分化された言葉がある。電気エネルギーを抵抗器で熱として逃がすものを発電ブレーキ、電気エネルギーをそのまま架線に返して他の車両のエネルギーとして再利用するものを回生ブレーキという。特にこの回生ブレーキはパワーエレクトロニクス技術の進歩により、1968 年から回生ブレーキ車両が量産されるようになり⁽¹⁾、回生ブレーキから生み出される回生電力によって鉄道の列車全体で省エネルギー化が進んだ。加えて、機械ブレーキの使用頻度低減や、操作性と乗り心地の向上など、回生ブレーキの恩恵はエネルギー以外の点でも受けられるようになった。回生ブレーキの省エネルギー化への貢献度は大きく、そのメリットを受けて現在の電気鉄道車両の回生ブレーキ車は全体の 75.7%になっている⁽²⁾。

次に機械ブレーキとは、圧縮空気や油圧を利用して機械的な動作による摩擦力で制動力を得るものである。摩擦力はその日の気温や湿度、天候に左右されることや機械音が鳴るため乗客への乗り心地は低下するほか、ディスクブレーキの摩耗、ブレーキ応答が遅いなどデメリットも多いが、大きな制動力を得られるものであることに加え、歴史的な実績評価もあって必ずどの車両にも搭載されている。

2.1.2. 回生失効

電気ブレーキのうち回生ブレーキについては、エネルギーの消費先が他の車輛であるためにブレーキが有効に働くかどうかは周囲の列車の状況に左右される。都市近郊にある直流電気鉄道においては、多くの変電所にダイオード整流器を用いているため鉄道変電所から先の電力系統では回生電力が利用できない。したがって同一き電区間内に回生電力を消費する力行車両がいなければ、電力を回生しても利用されることはない(図 2-1)。また回生してある程度消費できても回生電力が消費電力よりも大きい場合には架線電圧が高くなる。この場合、機器の保護のために車両のインバータ制御により回生電力を小さくする回生絞込みが行われる。この状況では運転士が所望する制動力が回生ブレーキだけでは得られないため機械ブレーキで補足する。

この回生ブレーキを発動した時に周囲の列車が回生エネルギーを利用しなかったために列車の主回路を開いて回生ブレーキを中断する状況を狭義の回生失効と呼び、主回路を完全に関することはなくとも回生絞り込みが起きて回生性能を 100%活かしきれなくなる状況

を広義の回生失効という^③。本論文では断りのない限り回生失効はこの広義の回生失効を指す。

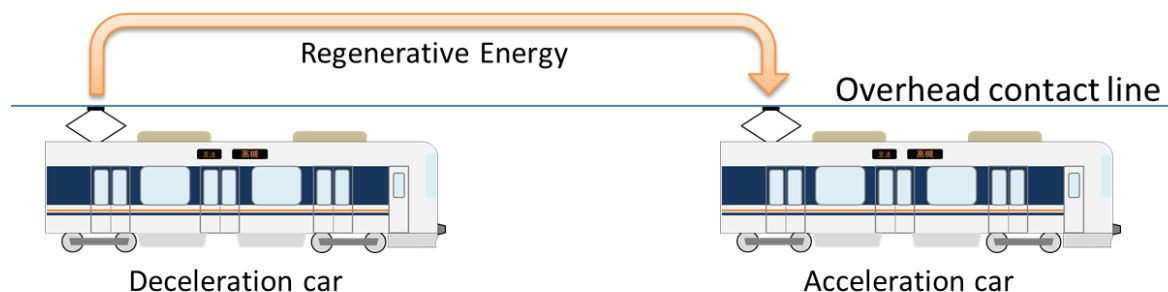


図.2-1 回生ブレーキシステムのモデル

2.1.3. 電空協調ブレーキ

電空協調ブレーキとは、電気ブレーキによる制動力と機械ブレーキによる制動力を合わせて必要な制動力を得るものである。一般にはメンテナンスや省エネルギー性を考えて制動力を優先的に電気ブレーキに負担させ、機械ブレーキは足りない分を補足するという遅れ込め制御が用いられている。これらにより、たとえ電気ブレーキが回生失効により制動力を失っても制動力を確保する安全性が保たれている。

この電空協調ブレーキの特性を図.2-2 に示す。電空協調ブレーキの特徴として、低速域では大きな制動力を発揮し、高速域では小さな制動力しか得られない。つまり速度が遅い時は優先的に回生ブレーキが制動力を負担するが、速い速度で大きな制動力を得ようとする時は機械ブレーキが立ち上がるようになっている。また、回生ブレーキが回生失効により制動力を失っても機械ブレーキにより安全性と制動力は担保されている。

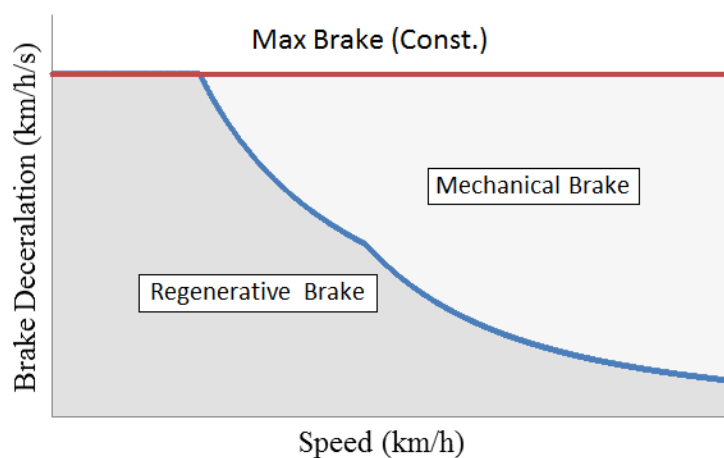


図.2-2. 電空協調ブレーキ使用時における列車速度と回生ブレーキと機械ブレーキの負担割合

2.2. 引張力特性と回生性能曲線

まず引張力とは、列車の動輪が列車をけん引する力である。後に詳しく説明するが、このけん引する力から列車にかかる抵抗などを差し引いた分が列車を加速する力となる。この引張力は車両の電動機とインバータの性能による。この引張力と速度の関係を示した図を引張力特性図と呼ぶ。一方車両の電動機による回生ブレーキの制動力と速度の関係を示した図を回生性能曲線と呼ぶ。この引張力特性および回生性能曲線は乗車人数と架線電圧によって変化する。乗車人数による影響は応荷重装置の節で、架線電圧の影響は饋電回路演算の節で詳しく述べる。以下では乗車人数と架線電圧を一定とみなし、力学モデルを考える。

2.2.1. 誘導機

電気鉄道の電力饋電には直流方式と交流方式があり、都市鉄道においては主に直流饋電が採用されている。都市鉄道における直流饋電では歴史的に直流機の抵抗制御方式から始まり、チョップ制御、添加励磁制御を経て今日では誘導機のインバータ制御方式が広く普及している。図 2-3 にその車両の一例を示す。



図 2-3 VVVF 制御の誘導機車両

まず、誘導機の採用のメリットは回転子の構造が堅牢で低コストであること、周波数の制御精度がそれほど高くなくとも良いこと、1 台のインバータで複数の誘導機が駆動できる

ことがある。そしてインバータ制御方式が採用された理由は電圧と周波数を連続的に制御でき、誘導機の制御ができることにある。このインバータは VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータと呼ばれる。主回路構成を図.2-4 に示す。これらの組み合わせにより主回路・整流機構は無接点化し、省エネルギー・省メンテナンス化された。

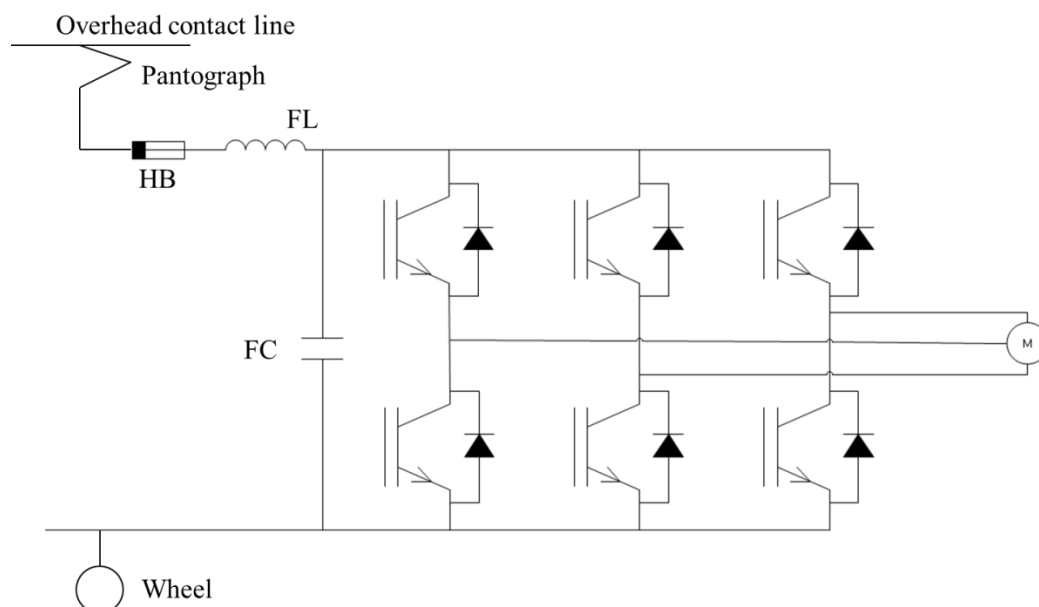


図 2-4 VVVF インバータ制御車両主回路構成図

(文献 4 を参考に著者作成)

インバータ制御主回路について説明する。まず、インバータの入力側にはインバータから流れる高調波電流が軌道回路に影響を及ぼさないように LC フィルタ回路が構成されている。このフィルタリアクトルはインバータなどの短絡事故電流を抑制する機能も兼ね備えている。そして過電流を保護するために入力側に遮断機が備えられている⁽⁴⁾。

誘導機車両の引張力特性・回生性能曲線について説明する。図 2-5 に一定電圧時の誘導機車両の引張力・回生性能曲線を示す。まず引張力特性について説明する。引張力特性は大きく 3 つの領域で表され、A を定トルク領域、B を定電力領域、C を特性領域という。列車のパワーは式(1)で表されるため、D 点を特に最大パワー点という。 $P(W)$ は列車のパワー、 $F(N)$ は引張力、 $v(m/s)$ は列車の速度である。定トルク領域では、モータの性能を常に最大に発揮していると滑走や変電所容量を超えてしまうことがあるために最大性能から幾分か性能を落としている。

一方回生ブレーキでは自らが電源となるため変電所の容量を気にする必要はないために最大パワー点は滑走しない制動力で発揮できるモータ性能の最大点にとっている。この回生性能の最大パワー点は点 E で示される。そのため、引張力特性の点 D と回生性能曲線の点 E はパワーが異なっている。

$$P = F \cdot v \quad \cdots \cdots (2-1)$$

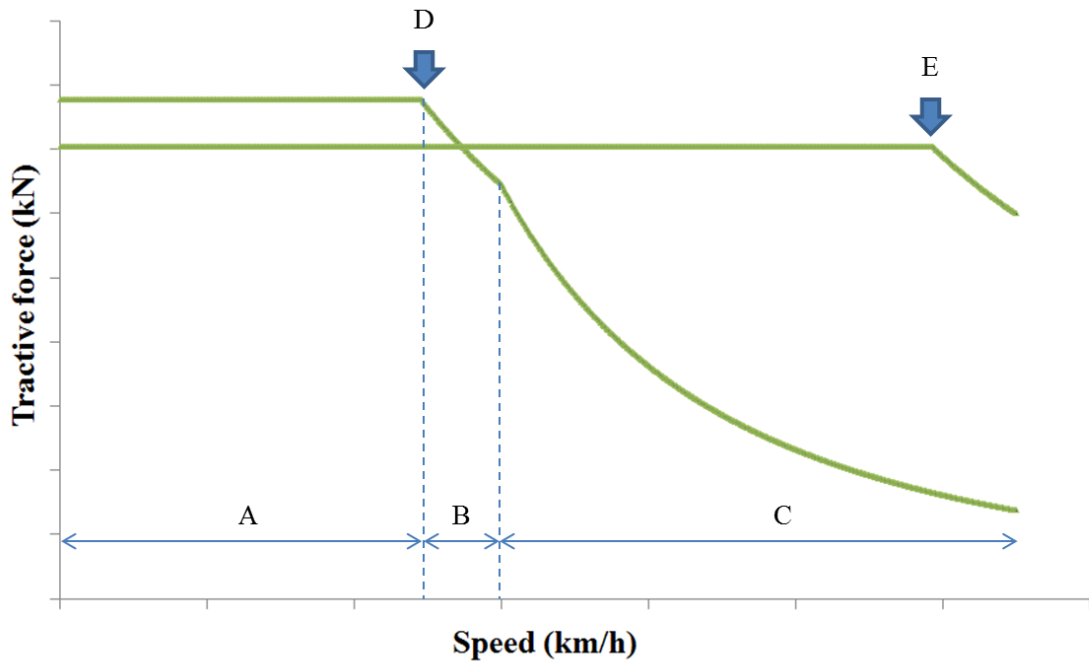


図.2-5 引張力特性と回生性能曲線

2.2.2. リニアモータ

蒸気機関車をはじめ回転機を動力源とした車両は広く普及しているが、車上動力による粘着駆動には限界があるため、急勾配区間ではラック式が採用されたり、時には大気圧鉄道が建設された。そして鉄道が次第に高速化してくると引張力の限界は 250km/h である(0系新幹線当時の値。現代では 350km/h が限界とされている⁽⁵⁾。)として粘着駆動に依存しないリニア駆動式鉄道が台頭した。歴史的にはカナダのスカイトレインが先駆者である。リニア駆動式鉄道には、図 2-6 のように車両を鉄輪で支えてリニアモータにより推進力を得て走るものと、図 2-7 のように磁気浮上あるいは空気浮上で支持する方式がある。



図 2-6 鉄輪式リニアモーター車両



図 2-7 浮上式リニアモーター車両
(大橋和也撮影)

交流電動機に同期電動機と誘導電動機があるように、リニアモータにも 2 つの駆動方式があり、それぞれリニア同期電動機(LSM)とリニア誘導電動機(LIM)と呼ぶ。一般にリニアモータは電動機を切り開いて線状に構成したものと説明されるが、この“展開”により空隙を小さく保持できないこと、推力以外の力も現れること、端部効果が生じることが回転型との大きな違いである。本論文ではリニア誘導電動機について説明する⁶⁾。

リニア誘導電動機では、車上を 1 次側、レールを 2 次側として構成し、2 次側には大きな推力が得られる銅板と安価なアルミ板が用いられ、リアクションプレートという。図.2-9 にリアクションプレートを示す。この図 2-8 のように、リアクションプレートは鉄軌道の間に敷設されている。

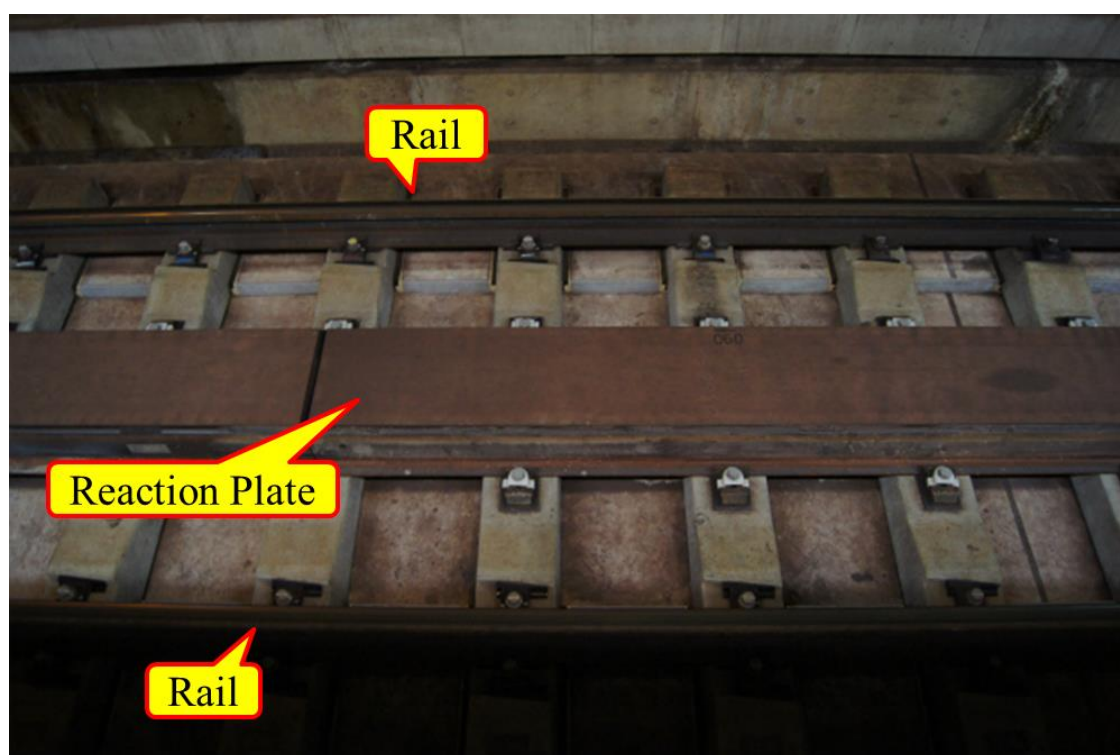


図 2-8 鉄軌道の間に敷設されたリアクションプレート

次に一定電圧時のリニア誘導電動機の引張力特性・回生性能曲線を図 2-9 に示す。ここでの特徴は引張力特性に定トルク領域が存在しないことと、その特性がほぼ直線で表されることである。そして、回転機と違い、速度が早くなっても極端に引張力が低下しないことである。

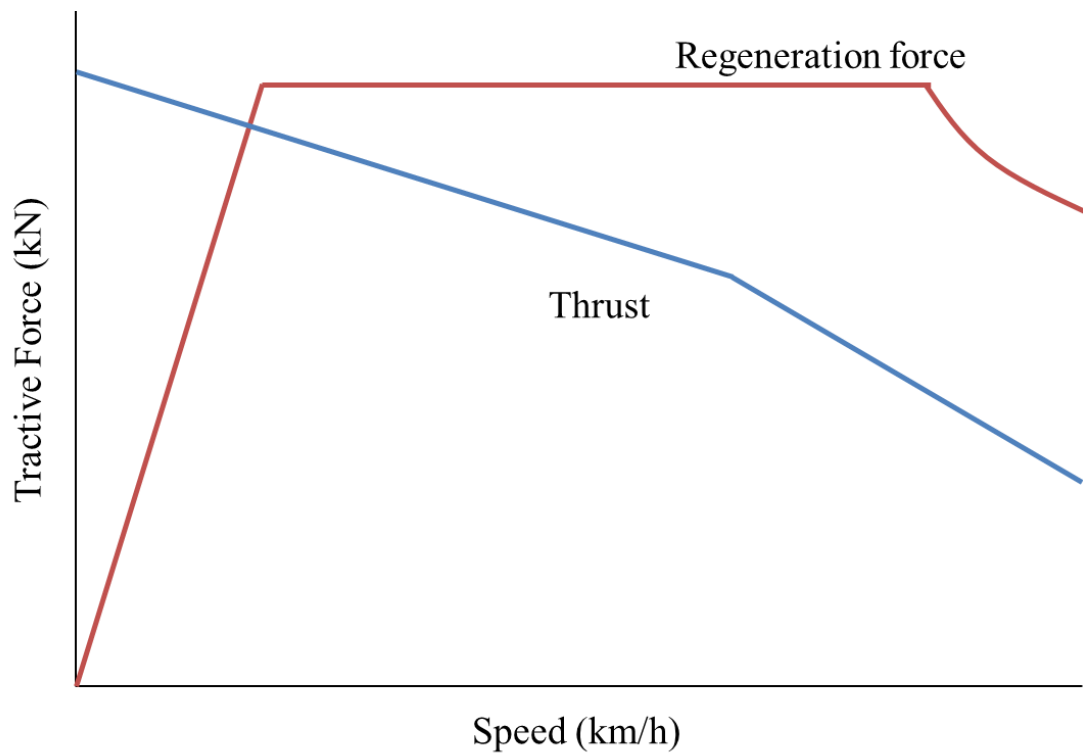


図.2-9 リニアモータの引張り特性と回生性能曲線

第2章 参考文献

- (1) 電気車研究会「鉄道ピクトリアル」1999年2月号, No. 665, P. 48-53
- (2) 日本民営鉄道協会, 環境パンフレット「環境と鉄道」, 2008. 10
- (3) 高木亮 東京大学学位論文 1994年, p9-33
- (4) 近藤圭一郎「鉄道車両技術入門」オーム社, 平成25年
- (5) 佐々木拓二「リニア鉄道に対する考察-粘着を断念した鉄道の歴史-」鉄道車両と技術 No.105

3. 電力・電力量評価のための運転曲線と数値計算

列車の消費する電力・電力量そして走行時分を求めるには、列車を力学・回路モデルに起こして数値計算する必要がある。このとき、縦軸に速度、横軸に距離を取って列車の走行の様子を表したグラフを運転曲線という。この運転曲線を比較することで後に述べる運転手法を分析することができる。

3.1. 力学モデル数値計算手法

3.1.1. 運転曲線の数値計算

ここで運転曲線を作成するための数値計算手法を述べる。まず図.3-1 に車両システムのブロック線図を示す。運転士のノッチ操作を数値計算の入力として扱い、車両の引張力およびブレーキ力は前述のように車両の主電動機特性とインバータ制御によって決まる。さらに列車にかかる抵抗として、出発抵抗、走行抵抗、勾配抵抗および曲線抵抗があり、引張力および制動力と走行抵抗の差(制動力の場合は和)を求めることで列車に作用する合計の力および加速度を計算できる。そして、そこから積分することで速度および距離が順に計算される。

列車抵抗それぞれは過去の走行実績に基づいた、言わば実験的に得られた式である。本論文では具体的な点には触れないが、数式に関しては文献(1)を、コンピュータでの計算手法については文献(2)を参照されたい。

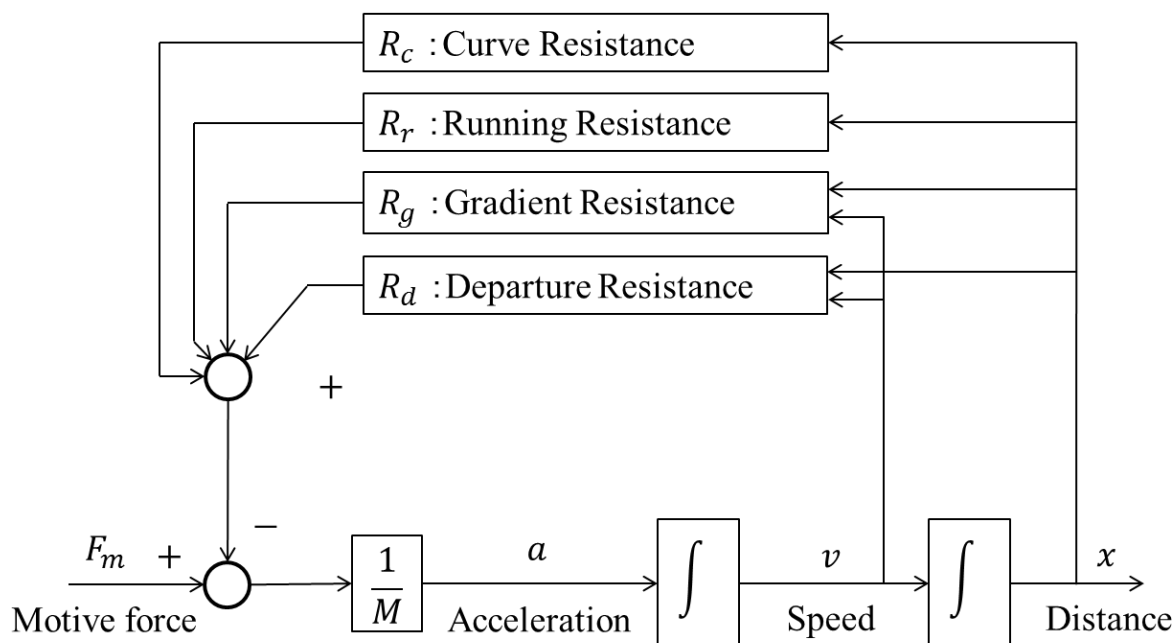


図.3-1 運転曲線を求める数値計算のブロック線図

3.1.2. 電力・電力量の数値計算

列車の消費する電力、電力量は力学モデルでは式(3-1)-(3-3)で表される。

$$P = F \cdot v \quad \cdots\cdots(3-1)$$

$$E_p = \int F \cdot v \cdot \eta \, dt \quad \cdots\cdots(3-2)$$

$$E_r = \int -F \cdot v \cdot \frac{1}{\eta} \, dt \quad (v > 6) \quad \cdots\cdots(3-3)$$

P は列車の力行・回生電力、 E_p は力行エネルギー、 E_r は回生エネルギーである。 η はモータ効率で回生時は力行時の逆数になっている。回生エネルギーの E_r は列車の速度が小さくなると架線に返すだけの電圧が得られなくなるため 6km/h 以下の時はゼロとしている。列車の消費するエネルギーは列車の走行を数値計算する際に得られる F, v, x を利用すれば求まることになる。

3.1.3. 応荷重装置

応荷重装置とは、列車の乗車人数に応じてインバータ制御によりモータ性能を変化させ、空車や満車にかかわらず列車の加速度を同じに調整する装置である。これにより運転士は列車の乗車人数を気にすることなくいつもと同じ操作で列車を運転することができる。また、この応荷重装置は列車の滑走を防ぐ意味でも重要な役目を持つ。しかし一方で、乗車人数に関係なくモータ性能を落とさず加速するほうが省エネルギーであるという提案をしている論文もある⁽³⁾。

ここで、応荷重装置による引張力特性・回生性能曲線の変化を考える。図.3-2 に満車時、定員乗車時、空車時の列車の引張力特性を、図 3-3 に回生性能曲線を示す。応荷重装置が引張力特性・回生性能曲線に与える影響は引張力の最大値である。式 3-4 を見れば明らかなように、乗客が乗車して車重が重たくなると加速度を一定にするために引張力 F を大きくしている。しかし、モータの最大性能は限界があるので定電力領域、特性領域は乗客の人数に関係なく同じ曲線に乗る。ここで注意したいのは、モータの最大パワー点は応荷重装置にかかわらず一定だが、定電力領域に入る速度が変化するという点である。

$$F = Ma \quad \cdots\cdots(3-4)$$

また、応荷重装置のもう一つの利点は滑走を防ぐことである。仮に応荷重装置を取り払って乗客が居ない状態で最大性能を発揮して加速したとすると、車輪が空転して滑走してしまう。滑走は車輪とレールを傷め、後に乗り心地の低下を招くためにできるだけ避けるべきである。なお、これら滑走の問題は列車の粘着制御で扱われている。しかし、理想的には(4)の論文にある通り列車は最大加速するほうが省エネルギーなため、粘着制御を大き

な問題としないリニアモータ車両はこの手法を検討すべきである。

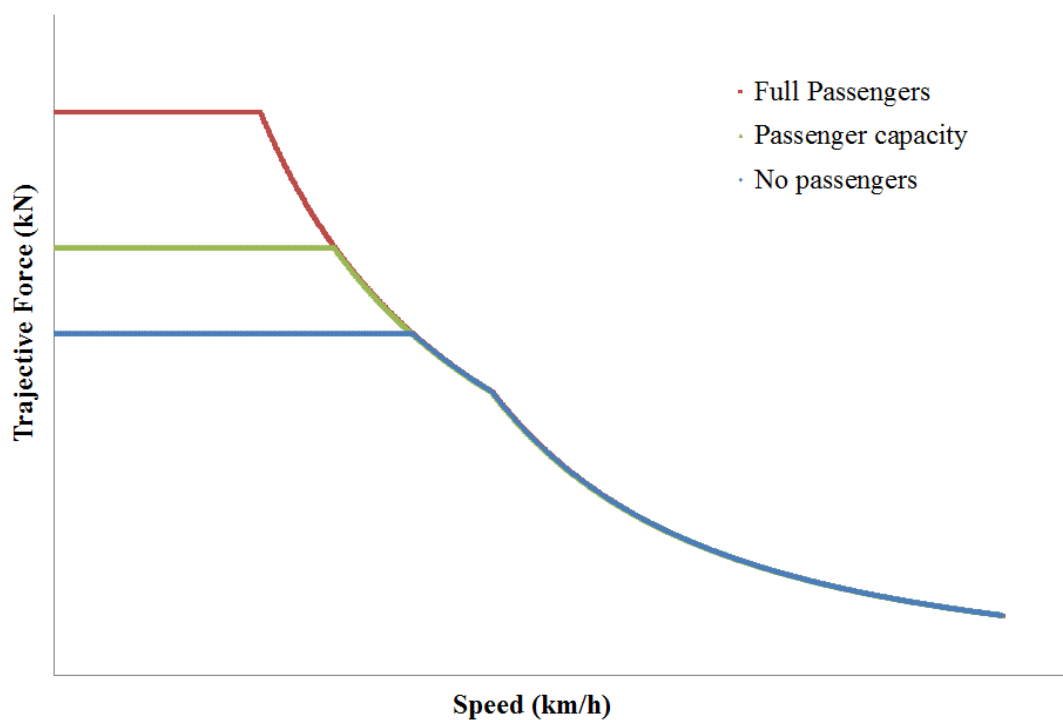


図.3-2 応荷重装置による引張力特性の変化

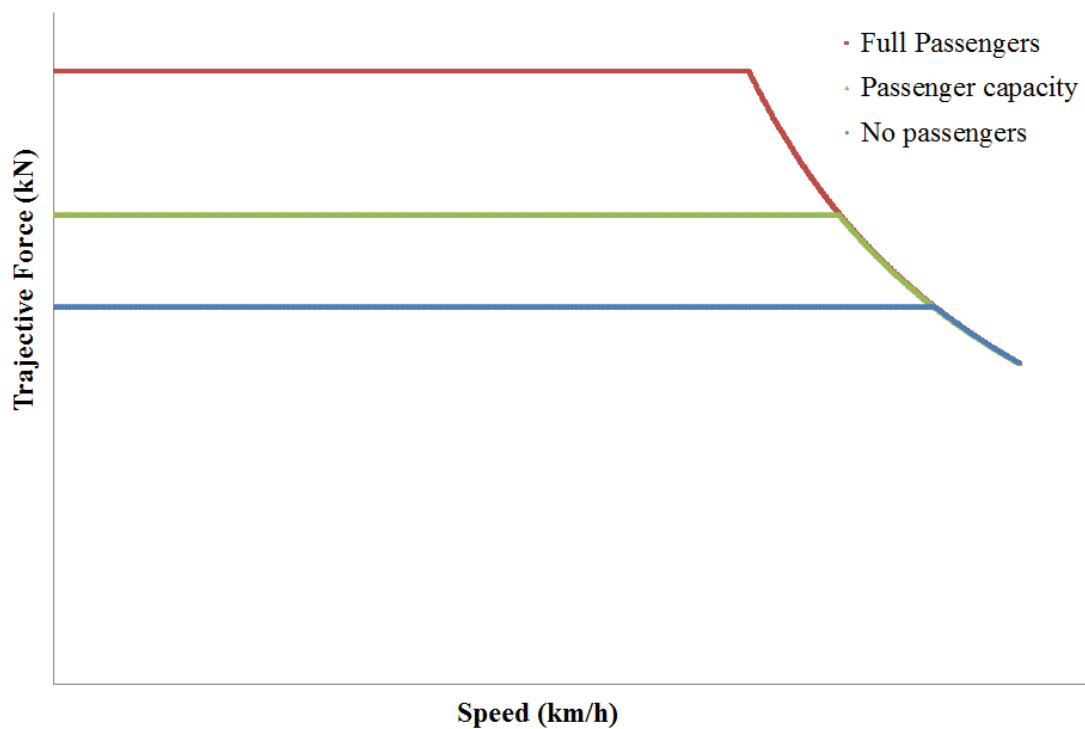


図 3-3 応荷重装置による回生性能曲線の変化

3.2. 饋電回路モデル数値計算手法

3.2.1. 饋電回路モデルとは

ここで、誘導機駆動車両を例に饋電回路モデルについて説明する。まず饋電回路モデルとは、変電所から車両の誘導機までの等価回路のことである。しかし、静的なパラメータは変電所の内部抵抗だけで、他のパラメータは列車の運動に合わせて変化する。したがって、列車の電力流を考えるには力学モデルと回路モデルを別にして考えることはできない。ここでは都市鉄道における直流饋電区間を扱う。図 3-4 にその回路の構成例を示す。

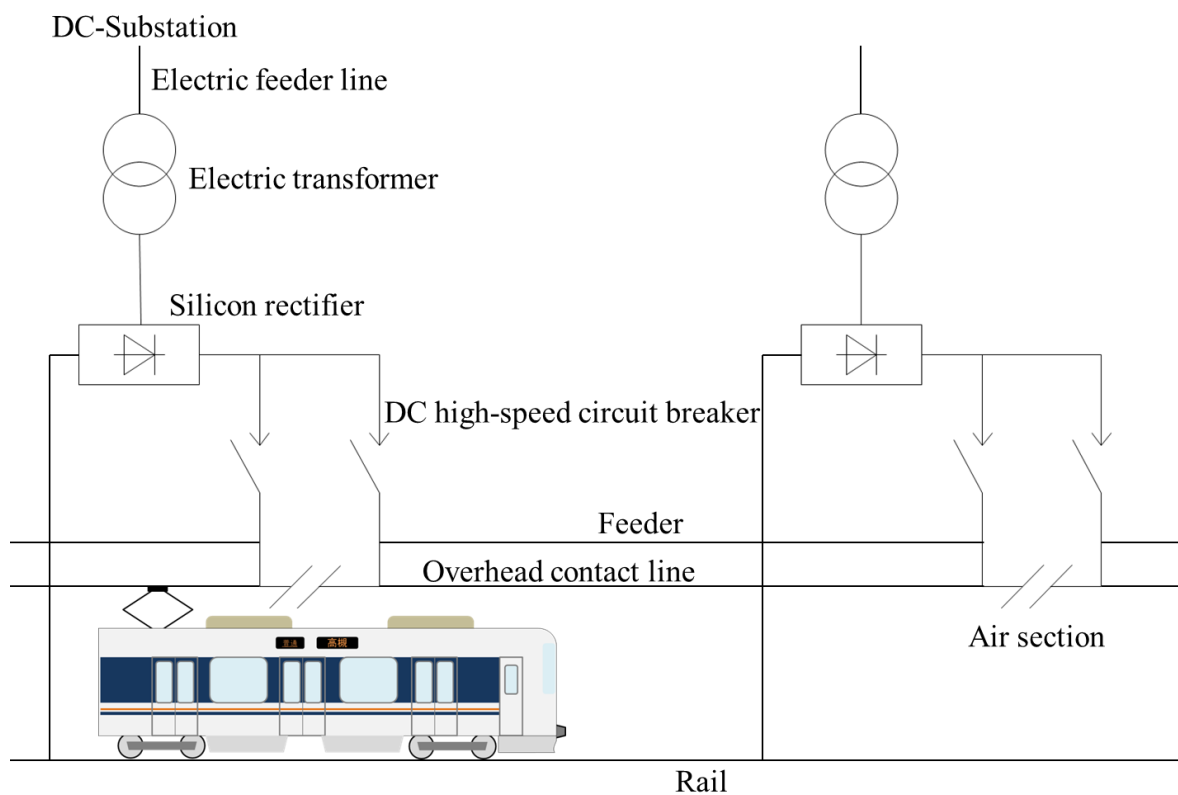


図 3-4 直流饋電回路の構成例
(文献(1)を参考に著者作成)

3.2.2. 変電所の回路モデル

変電所は都市鉄道の直流饋電区間では 7~10km ごとに設置されており、変電所を中心に両脇の架線に電力が供給される。変電所と変電所の間の 1 つの区間を饋電区間、区間の境目をセクションという。直流電気鉄道の変電所は系統から交流で受電した後に整流し、多くの場合定格 DC1500V で送り出すが、このとき整流にはダイオードが広く利用されており、車両の回生電力は変電所から先の系統には返らない。しかし、近年回生電力を系統に返す

回生変電所も導入されつつあり、さらには売電事業も行われている⁶⁾。変電所は一般的に設備容量として数 MW、内部抵抗は定格電流が 3000A のとき 0.5Ω である。静的なパラメータはこれだけで、送り出し電圧や電流は饋電区間の車両の状況に応じて変化するが、変電所は通常時の 1.5～2 倍の容量が確保されている。これは非常時に備えたもので、ある変電所が開放してしまっても両脇の変電所から車両に電力を供給出来るだけの余裕をもたせているためである。しかしながら、これが原因で変電所の設備利用率は低く、事業者のコストダウンや規模縮小のニーズは依然として大きい。本論文の目的に省電力化ならびにピークカットをあげている理由のひとつがここにある。

3.2.3. 饋電線の回路モデル

架線は硬化銅でできており、吊架線につられて路面に対して平行に張られている。饋電線を図 3-5 に示す。この架線の伝導率は約 $0.02\Omega/\text{km}$ である。ここで注目したいのは架線の抵抗は伝導率から求めるために鉄道車両の位置という動的パラメータに依存することになる。またレールの抵抗も同じく伝導率であるため同様である。さらに、ひとつの饋電区間には 2 つの変電所から電力が供給されるため電力の流れも動的となる。架線とレールには保安上の制約条件があり、架線は温度が 90°C 以下でなければならない⁶⁾。本論文ではこの制約に抵触する恐れが少ないために計算の高速化もあって検討を省略しているが、消費電力の大きい貨物用の電気機関車の運行を考える場合には考慮が必要であることが示唆されている⁶⁾。

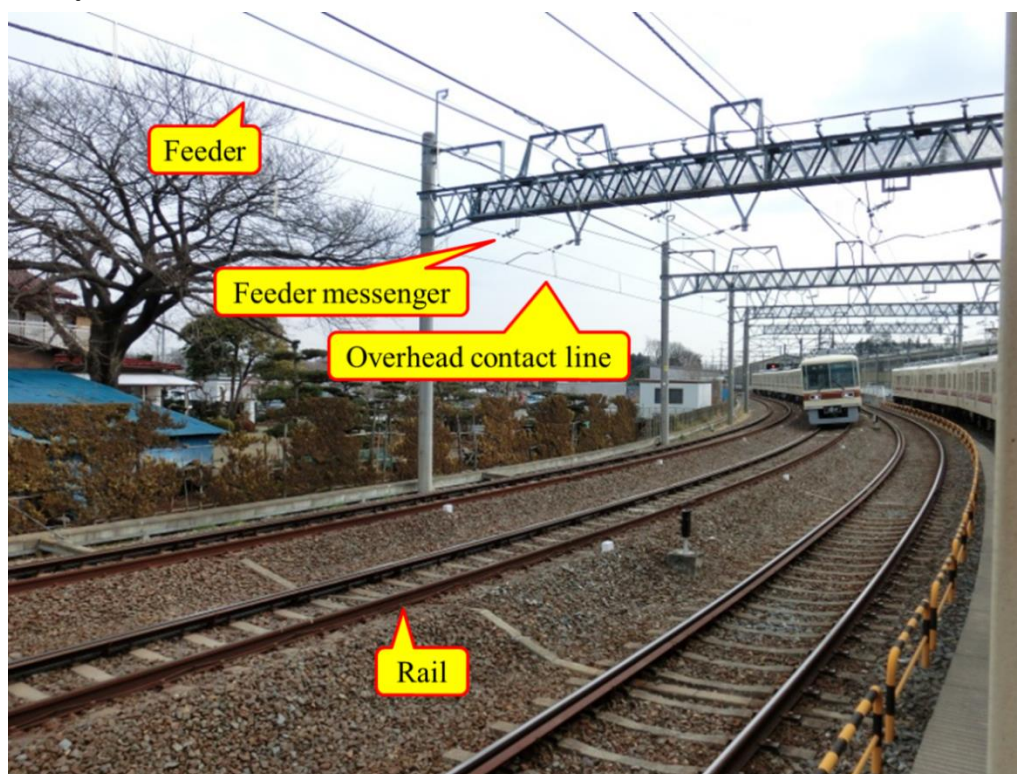


図 3-5 饋電線の配置

3.2.4. 車両の回路モデル

最後に電気車両について述べる。最初に注意していただきたいのは電圧と電流について「パンタ点電圧・パンタ点電流」と「モータ電圧・モータ電流」を区別していることである。車両のモータはインバータ制御されているのでパンタ点の電圧・電流とモータ電圧・電流は別物である。

電気車両は架線と接するパンタグラフから電力を得てインバータ制御を経て主電動機と補機に電力を供給し、車輪からレールを通して GND につながっている。回生制動時は車両から架線に向かって電力を返す。主電動機の挙動とインバータ制御は引張力に影響するため力学モデルを考える上でも饋電回路は必要である。図 3-6 に饋電回路の例を示す。この饋電回路モデルでは電気車両は電流源とみなす。

ここで力行時と回生時の車両の引張力とモータ電流・モータ電圧の関係について説明する。図 3-7 に力行時の引張力特性とモータ電流・モータ電圧の関係を示す。まず力行時は、誘導機は一定の電流を消費しながらモータ電圧が上昇していき、一定の引張力を維持する。この領域を定トルク領域という。そしてインバータの出力電圧が最大になったところで引張力はモータ電力が一定になるように、つまり反比例の関係を維持しながら減少する。この領域を定電力領域という。そして最後に列車速度は上がるがモータ電流が減少するので引張力は大きく減少する。この領域を特性領域という。

図 3-8 に回生時の引張力特性とモータ電流・モータ電圧の関係を示す。いま回生時で速度が減少していくことを想定する。回生時は高速域ではまず定電力領域でモータ電圧は一定で電流が上昇していき、制動力が大きくなる。そして速度が低下して最大パワー点に到達するとここからはモータ電流が減少し引張力が一定となる第Ⅱ種の定トルク領域に入る。さらに減速すると電流は維持される一方でモータ電圧が低下し引張力が一定に保たれる第Ⅰ種の定トルク領域に入る。しかし、低速域になるとモータ電圧の低下によりインバータを介しても架線に電力を返せなくなり、逆相制動モードに入る。逆相制動モードとは、制動力を得るためにモータに電流を流す動作のことである。

ここで力行時と比較して注目したいのが最大パワー点で、図 2-6 に見られるように、回生時は力行時に比べて最大パワーが大きい。これは力行時の過負荷を回避し変電所の設備を守るため、力行時には複数の車両が同時に力行を開始して大きな電力を要求することがないよう余裕を持たせるためにモータの最大性能を絞るインバータ制御を行っている。一方回生時は、最大パワーは車両性能を最大限発揮する点に置かれている。

しかし、省エネルギーの観点から見ると力行は最大力行が望ましく、意図的に性能を下げるのは目的に逆行している。そして回生ブレーキの最大パワー点に変電所の設備は守れるとしても車両自体の機器を保護するため回生絞込が行われることがある。このときは車両の運動エネルギーを電気エネルギーに変えることができず熱エネルギーとして捨ててしまっているので、改善の余地がある。

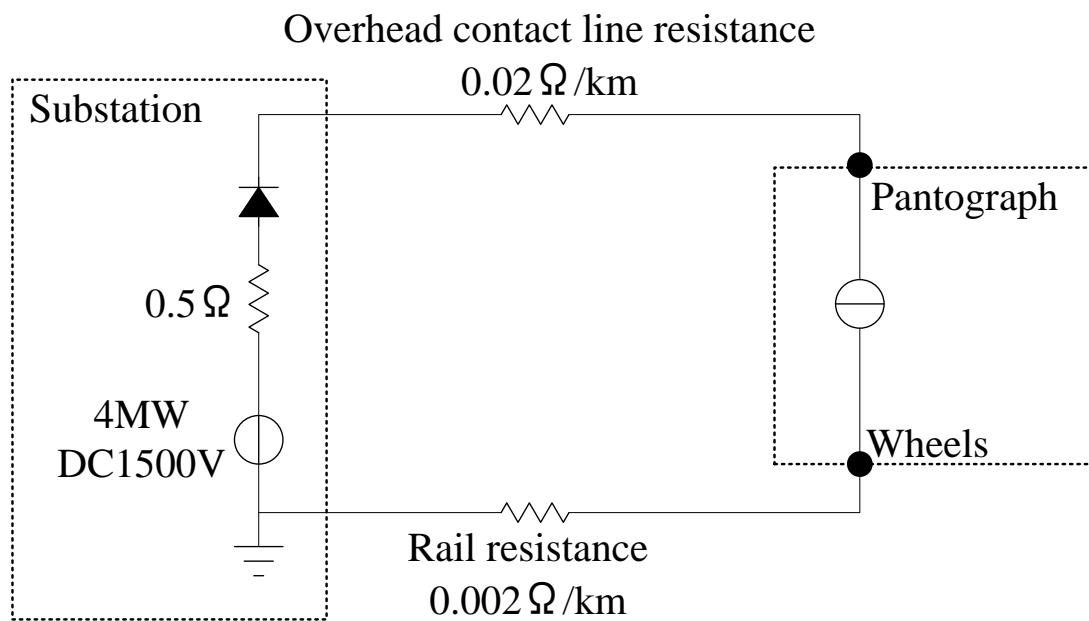


図 3-6 饋電回路モデルの例

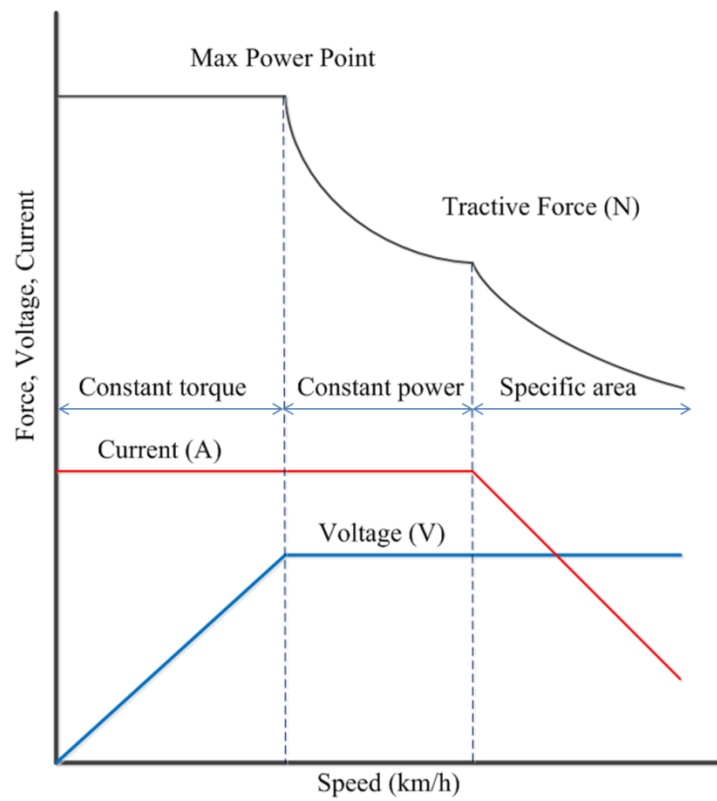


図 3-7 力行時の引張力特性とモータ電流・電圧の関係

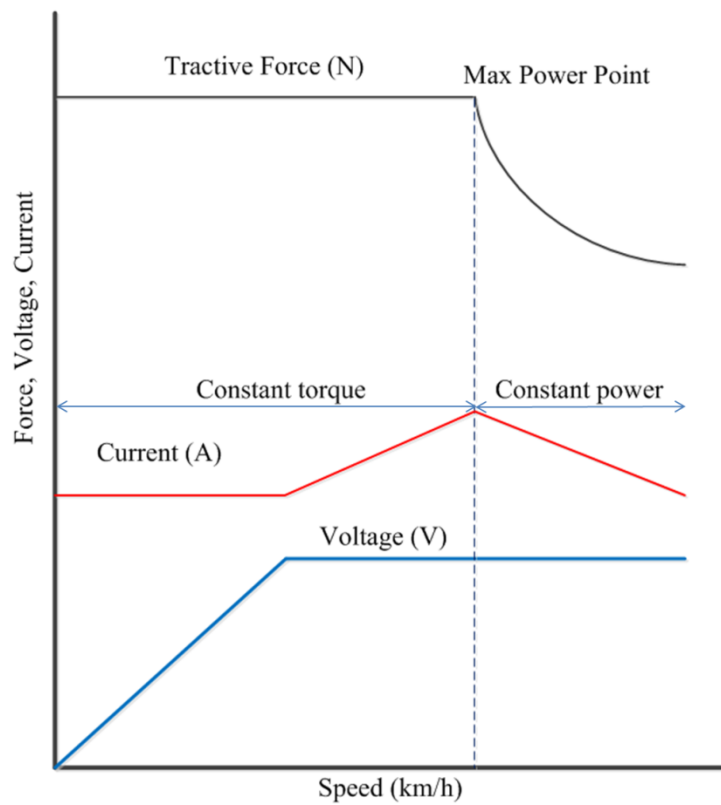


図 3-8 回生時の引張力特性とモータ電流・電圧の関係

3.2.5. 架線電圧変動による引張力特性の変化

さて、ここで饋電回路モデルにおいて電気車両を電流源とみなす理由を説明する。車両が変電所から架線を介して電力を受け取るとき、パンタ点の電圧は周囲の車両や架線抵抗の影響を受けて架線電圧が変動する。たとえば架線電圧が低くなった場合では車両のインバータの出力電力が低下するため最大パワー点が左に推移する。このとき、最大パワー点の速度より速い領域で車両が走行中であった場合には突然に引張力が低下することになる。逆に電圧が高くなると最大パワー点は右に推移するため、その領域にある車両は突然に引張力が大きくなる。このように、応荷重装置で最大引張力は維持されつつも、架線電圧の変化に応じてインバータからモータに出力される電力の最大値が変化するため車両性能が変化し、力学的な加減速度に影響する。しかし、パンタ点で見ると電圧が変動してもインバータの要求する電流は同じである。したがって饋電回路モデルでは車両を電流源とみなして計算できる。

ここで引張力の性質をまとめると、

1. 応荷重装置で最大引張力が決まる
2. 架線電圧でモータの最大パワー点が決まる
3. 車両が最大パワー点の速度より速い領域で走行している場合に架線電圧変動の影響を受けて引張力が変化する

ということになる(図 3-9)。

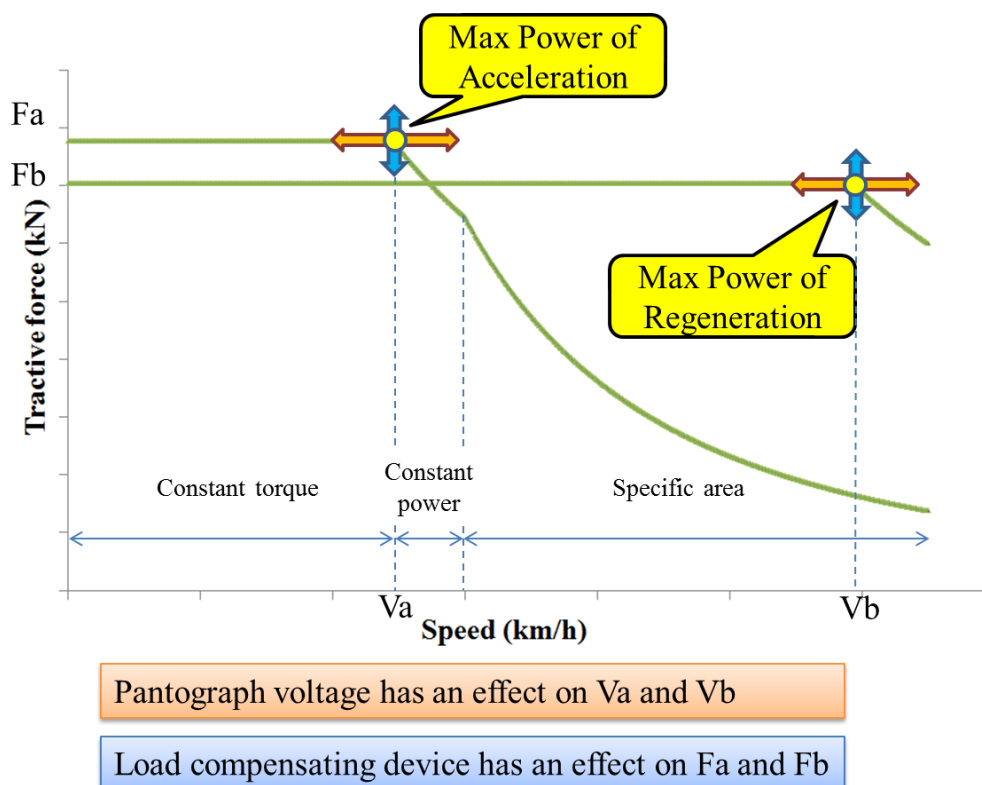


図 3-9 引張力特性・回生性能曲線の変化

こうして見ると静的なパラメータは電流だけであり、変電所の容量や周囲の列車状況、さらには列車の位置による架線抵抗の電圧降下を考慮しなければならないことに加え、先述の加減速度がパンタ点電圧の影響を受けることを考えると、数値計算では逐次演算が必要であり、パラメータのほとんどは動的と捉えるべきである。そのため、次章に述べるような最適化計算では膨大な計算量を“うまく”処理するための手法が重要であり、鉄道研究においても様々な数理的手法が提案されている。

第3章 参考文献

- (1) 最新電気鉄道工学 コロナ社 電気学会 電気鉄道における教育調査専門委員会 編 P.82
- (2) Takafumi KOSEKI and Takashi NODA: “Run-Curve Design for Energy Saving Operation in a Modern DC-Electrification,” Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 3 (2010) No. 1, pp.349-357
- (3) Takafumi Koseki, Yuto Takahashi, and Zhe Yang, “Energy-Saving Operation of an Electric Train at Multiple Service Section Based on Sensitivity Analysis of Energy Consumption to Running Time” , ICEMS2012, October 2012, Sapporo, Japan
- (4) 古関隆章, 渡邊翔一郎, Ninh Van Cuong (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 磯部 栄介(日本地下鉄協会) “運転支援におけるブレーキ操作遅れ時間の補償とATOによる電力制限制動活用の提案” , リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会, LD-13-060, TER-13-041, 2013年8月,一ノ関
- (5) つくばエクスプレス News Release
<http://www.mir.co.jp/company/release/upload/9d2933de751f44e759d99877dfc8c4a2.pdf>
- (6) 中田智史, 森下誠二, 島津孝則(西日本旅客鉄道株式会社) “北方貨物下り線 線路切換における最適な架線方式の検討”, ITS・交通電気鉄道研究会, ITS-13-30, TER13-56, 2013年11月, 広島

4. 最適制御問題としての省エネルギー運転曲線の設計

省エネルギー化を実現するには、まず列車の運転曲線を考察する必要がある。その理由は、列車の運転曲線からその駅間を走るのに要するエネルギーが計算できるからである。つまり、駅間を走るのに必要なエネルギーを最も小さくすることを目的とした運転曲線の最適化を行えば、ソフトウェアの手法で列車の省エネルギー化が達成できることになり、このとき電気設備の改造は必要としないため安価に実行できる。

しかし、列車の運動を力学モデルで計算しようとするとその複雑な拘束条件から関数が非線形になる等で複雑になり、さらには前節で述べた饋電回路演算を逐次行うことを考えると解析時間が膨大になることは容易に想像がつく。そこで、本章では解析時間を短縮するための数学的最適化手法を 2 つ取り上げ、鉄道力学をそれぞれの最適化手法に落としこむ方法を説明する。

まず運転曲線を最適化するにあたり、課題になるのは次の 5 つである。

- (i) 走行抵抗の非線形速度依存性
- (ii) 位置に依存する勾配抵抗
- (iii) 速度制限がある、もしくは速度制限区間がある
- (iv) 引張力(駆動力)、制動力の速度依存性
- (v) ノッチ入力が量子化されている

たとえば(i)については 3 章で挙げた文献(2)にもあるように、列車の力学モデルは非線形の速度依存性があり、他の課題についても複雑な要因が絡んでいる。したがって、解析に膨大な時間を要する原因となっている。ここでは列車の消費エネルギーを評価関数とし、ノッチを制御入力、速度、位置などを状態変数とした最適制御問題⁽¹⁾を考える。

ここで、最適制御問題の条件を整理する。駅間距離を d とすると、

- (a) 駅に停車する列車の拘束条件

$$v(0) = 0 \cdots \cdots (4-1)$$

$$v(d) = 0 \cdots \cdots (4-2)$$

Eq.(4-1)(4-2)は列車が駅から発車するとき、駅に到着する時の速度は 0 であるということを意味する。最適制御問題ではこのような初期条件と終了条件を含む問題を 2 点境界値問題として扱うことが多い。

- (b) 駅間を走行する列車の拘束条件

$$0 \leq v(x) \leq V(x) \cdots \cdots (4-3)$$

Eq.(4-3)は列車が駅間を走行中に速度制限を受けることを意味する。この速度制限は走行路

線環境に依存するもので、具体例を挙げれば曲線や駅ホーム進入前に設けられる。コンピュータを用いて最適制御問題を解く場合には式(4-3)のような不等式拘束条件は等式拘束条件に変換するほうが利用しやすい。そこで、ここで不等式拘束条件を等式拘束条件に変換するために変数 u を用意する。この u は一般にダミーの制御変数と呼ばれる。この u を用いると式(4-3)は式(4-4)のように変換される。

$$v(x) = \frac{1}{2}V(x) \sin(u) + \frac{1}{2}V(x) \cdots \cdots (4-4)$$

不等式拘束条件をこのように三角関数をうまく利用することによって等式拘束条件に変換して付帯条件とし、最適制御問題を解いていく。このとき、制御入力はできるだけ陽に含まれるように設定することが望まれている。

4.1. 変分法

最適制御問題を解く手法の一つに変分法がある。変分法では評価関数に汎関数を用いる。そして重要なのは、その汎関数を決める変関数である。この変関数のうち境界条件や連続性を満たすものは許容関数と呼ばれる。ここで、許容関数は連続性を満たすことが特徴的で、後に述べる動的計画法では連続値は扱えない。この許容関数の中で汎関数の変化率をゼロにすること、つまり停留することが変分法の目的であり、変分法の問題である。ここで、変分法で扱う各関数を整理した図を図 4-1 に示す。

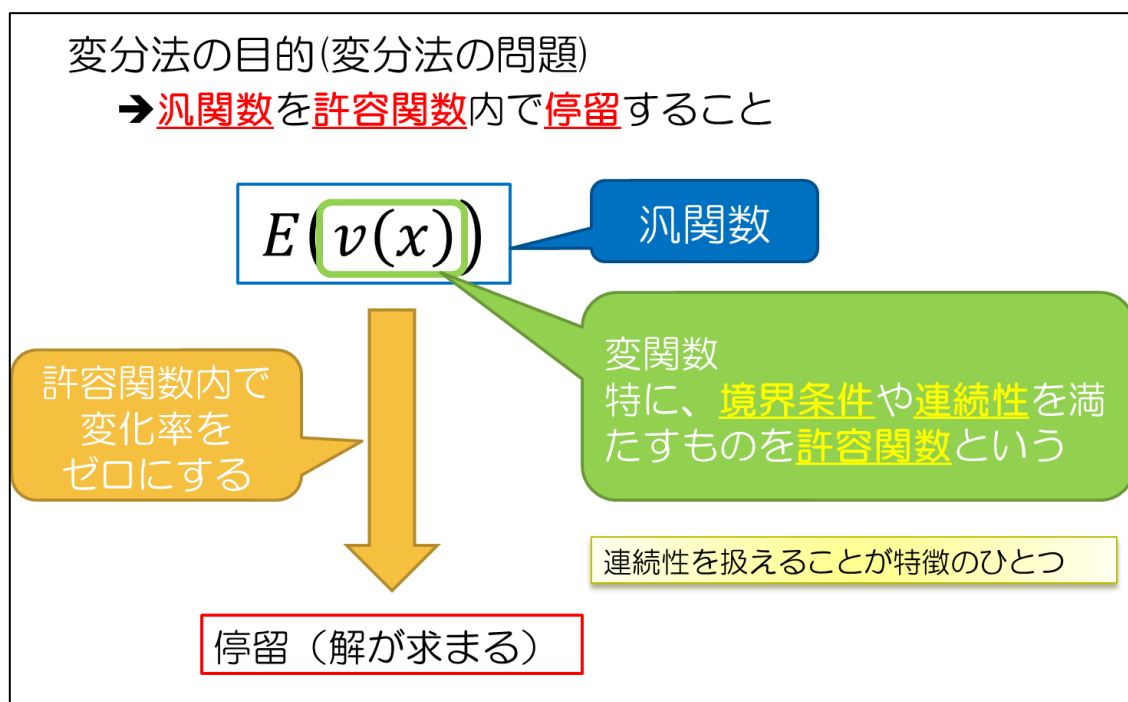


図 4-1 変分法問題

次に変分問題における多変数とパラメータ処理手法について説明する。前章で述べたとおり、鉄道の運動は複雑で変数もかなり多い。多変数の問題は、変換数ベクトルとパラメータを導入して対応する。本論文の場合では、列車の速度を式(4-5)(4-6)のように定義する。

$$v = y_1(p_1, x) \cdots \cdots (4-5)$$

$$p_1 = (p_{10}, p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}) \cdots \cdots (4-6)$$

このように表現することで列車速度に関する多変数を扱うことができるようになり、独立変数もパラメータを利用して表現することで計算しやすくしている。

続いて評価関数であるが、 p_1 、 p_2 、 p_3 をそれぞれ力行、惰行、制動のパラメータとし、ノッチオフ位置を d_1 、制動開始点を d_2 とすると、評価関数は式(4-7)で表すことができる。

$$E_{total} = f(d_1, d_2, p_1, p_2, p_3) \cdots \cdots (4-7)$$

次に拘束条件であるが、式(4-1)(4-2)の条件を変分法で表現すると式(4-8)(4-9)のようになる。

$$v(0) = (y_1(p_1, x))_{x=0} = 0 \cdots \cdots (4-8)$$

$$v(d) = (y_3(p_3, x))_{x=d} = 0 \cdots \cdots (4-9)$$

さらに、これらを変形すると

$$y_1(p_1, d_1) - y_2(p_2, d_2) = 0 \cdots \cdots (4-10)$$

$$y_2(p_2, d_2) - y_3(p_3, d_3) = 0 \cdots \cdots (4-11)$$

$$y_1(p_1, 0) = 0; y_3(p_3, d) = 0 \cdots \cdots (4-12)$$

式(4-10)(4-11)(4-12)より、拘束条件は関数 H を用いて式(13)のようになる。

$$H(d_1, d_2, p_1, p_2, p_3) = 0 \cdots \cdots (4-13)$$

ここで、列車の運動方程式を、連続値を扱う変換数 $v(x)$ に落としこむ作業が重要になる。例えば本論文では、力行の変換数として次の式(4-14)を考えた。ここでは力行の状態数を4つに分割し、それぞれの状態ごとに変関数を設定している。右肩の添字がその4つの状態の番号である。これらの変関数を表現するために、パラメータ群を式(4-15)のように置いた。

$$v(x) = \begin{cases} \sqrt{2 \left(p_{11}^{(1)} x^{\frac{5}{4}} + p_{12}^{(1)} x^{\frac{4}{3}} + p_{13}^{(1)} x^{\frac{3}{2}} + p_{14}^{(1)} x \right)} & \text{if } 0 \leq x \leq d_1^{(1)} \\ \sqrt{2 \left(p_{11}^{(2)} x^5 + p_{12}^{(2)} x^4 + p_{13}^{(2)} x^3 + p_{14}^{(2)} x^2 + p_{15}^{(2)} x + p_{16}^{(2)} \right)} & \text{if } d_1^{(1)} \leq x \leq d_1^{(2)} \\ \sqrt{2 \left(\frac{p_{11}^{(3)}}{x^2} + \frac{p_{12}^{(3)}}{x} + p_{13}^{(3)} \log(x) + p_{14}^{(3)} x + p_{15}^{(3)} \right)} & \text{if } d_1^{(2)} \leq x \leq d_1^{(3)} \\ \sqrt{2 \left(\frac{p_{11}^{(4)}}{x^2} + \frac{p_{12}^{(4)}}{x} + p_{13}^{(4)} \log(x) + p_{14}^{(4)} x + p_{15}^{(4)} \right)} & \text{if } d_1^{(3)} \leq x \leq d_1 \end{cases} \quad \dots\dots(4-14)$$

$$p_1 = \left(p_{11}^{(1)} \dots p_{14}^{(1)} p_{11}^{(2)} \dots p_{16}^{(2)} p_{11}^{(3)} \dots p_{15}^{(3)} p_{11}^{(4)} \dots p_{15}^{(4)} d_1^{(1)} \dots d_1^{(3)} \right) \dots\dots(4-15)$$

これらの結果によれば、駅間を最も少ないエネルギーで走行する運転曲線の最適解は最大力行→惰行→最大制動であるという先行研究^②と同様の結果が得られた。

4.2. 動的計画法

4.2.1. 動的計画法とは

変分法などの解析的手法による最適化には、速度制限が非線形最適化問題としてみた場合の状態変数制約になっていることでアルゴリズムが複雑になる問題点があった。しかし最適制御問題を解く場合に、動的計画法を用いると、離散制御入力や不連続関数を含むような問題でも R. Bellman の最適性条件^③によって大域的最適解を単純なアルゴリズムの適用によって得ることができる。

4.2.2. R. Bellman の最適性条件

R. Bellman の最適性条件とは、「最適政策は最初の状態及び最初の決定が何であっても、残りの決定は最初の決定から生じる状態に関して最適政策を構成しなければならないという性質を持つ^④」ことである。(図 4-2)

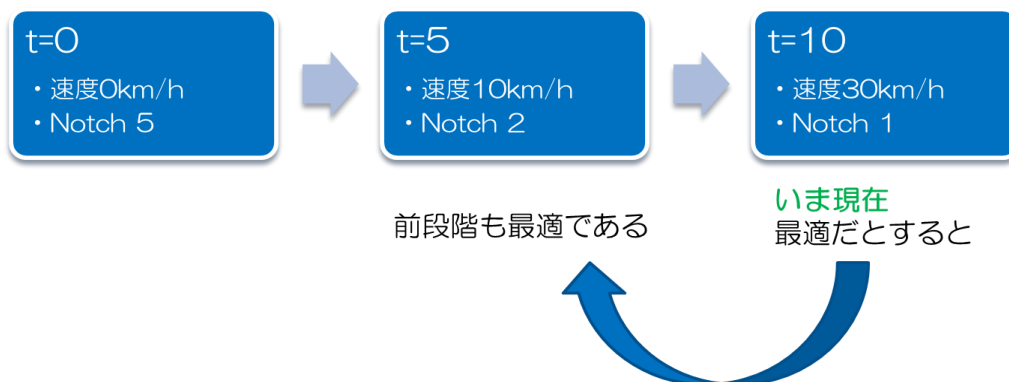


図 4-2 R. Bellman の最適性条件の鉄道での考え方

これによれば、次の計算アルゴリズム⑥を得て、図.4-3.のように計算することができる。

(f)状態空間を格子状に分割し、最適制御問題を N 個の位相面を持つ N 段階決定問題へと変換する

(i)いま k 番目の位相面で格子点 S にいるとする。時間ステップ数 k を $k=N-1$ とし、部分評価関数のラベル J_{k+1} を読み、それにペナルティを足してラベル J_k を求める。

(v) J_k の最適な制御入力と、そのときの J_k をラベルとして S に貼る。この作業を位相面のすべての格子状で行う。

(e)時間を遡って一つ前の位相面へ移り、(i)(v)の作業を行う。これを $k=0$ まで繰り返す。

(d) $k=0$ から $k=N$ に向かって、図.4-4.のように順にラベルをたどりながら最適制御入力を選べば、最適化結果が得られる⑥。

このように、変分法とは違い制御入力や関数に連続性を必要としないことが有利な点である。さらに、問題の規模に対する計算量の依存性は、意思決定段階数の増加に伴い、指数関数的ではなく、ほぼリニアに増加するのみであるため、計算量を抑えることができる。そして、ステップごとに格子点を考えるため、外乱で経路が乱れた場合にもすぐに最適経路に修正することができる。

4.2.3. 拘束条件の処理

動的計画法にとって、不等式の拘束条件は有利に働く。図.4-5,4-6 に状態空間と速度制限のある運転曲線を示す。このように速度制限を設けると、格子点の数が減るために、5-2.(v)の計算数を減らすことができる。さらに、列車の運転曲線で経験的に解になり得ない点を図 4-7 のように削っておくとさらに計算が高速化される。しかし、等式制約からずれた場合にペナルティを課す設定を考えた場合、このペナルティが大きすぎると最適化の目的がずれる可能性があるため注意が必要である。このペナルティとは、具体的に終端(到着駅)に確実に到達する可達性を保証するために評価関数に付加される。ここで見られるようにペナルティが小さいと可達性が保証されなくなり、逆に大きくすると最大制動が得られないようになる。ペナルティの議論は文献(7)を参照されたい。

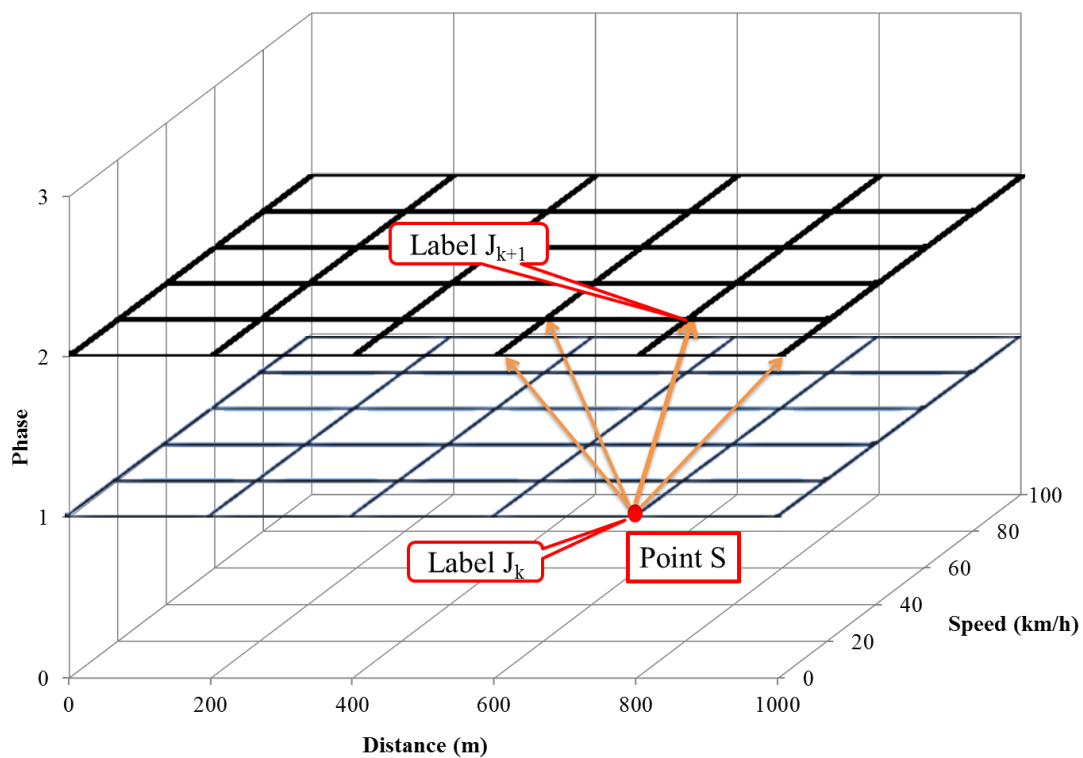


図.4-3 各位相面での最適軌道探索
(文献(6)を参考に著者作成)

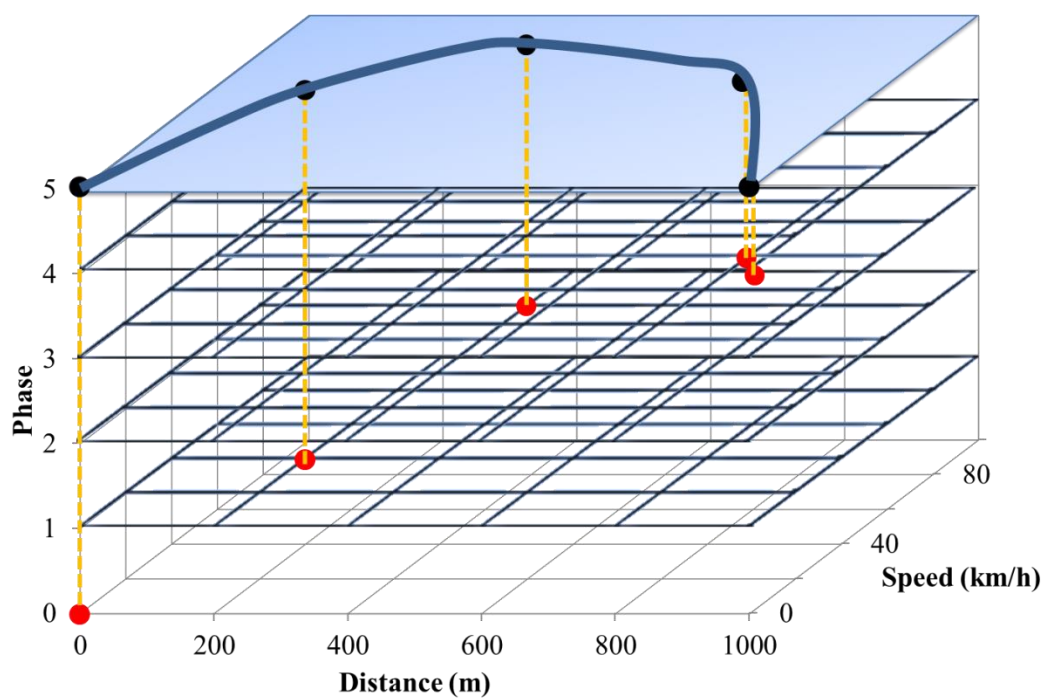


図.4-4 複数の位相面間での最適経路探索
(文献(6)を参考に著者作図)

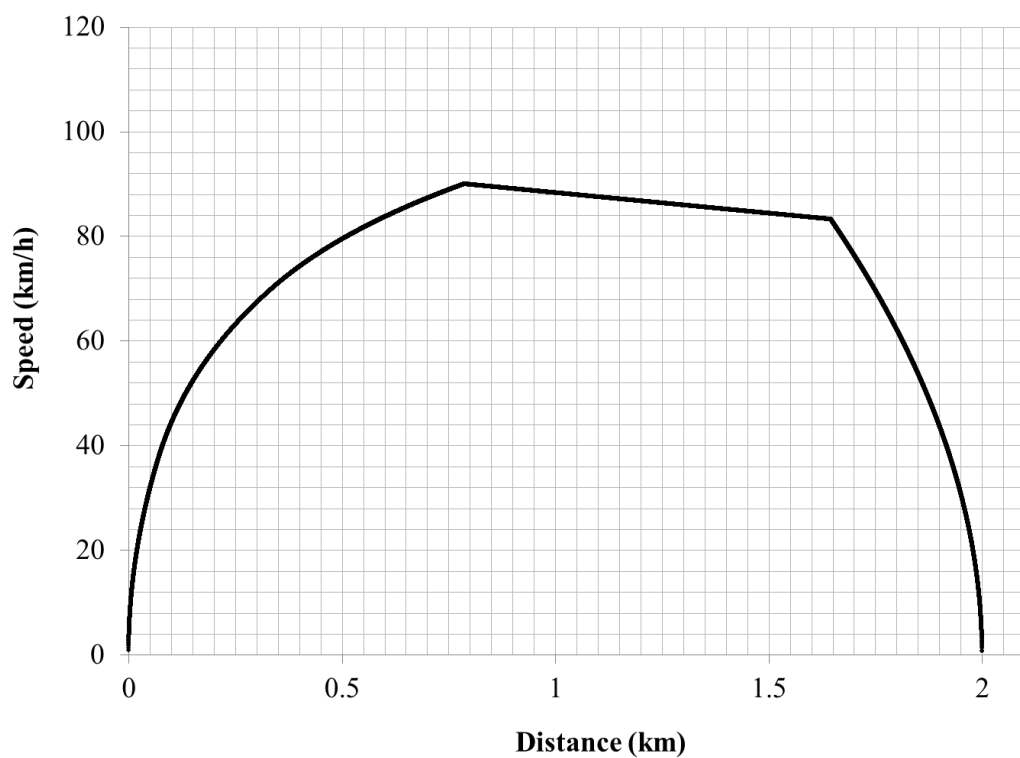


図 4-5 通常の運転曲線と格子点

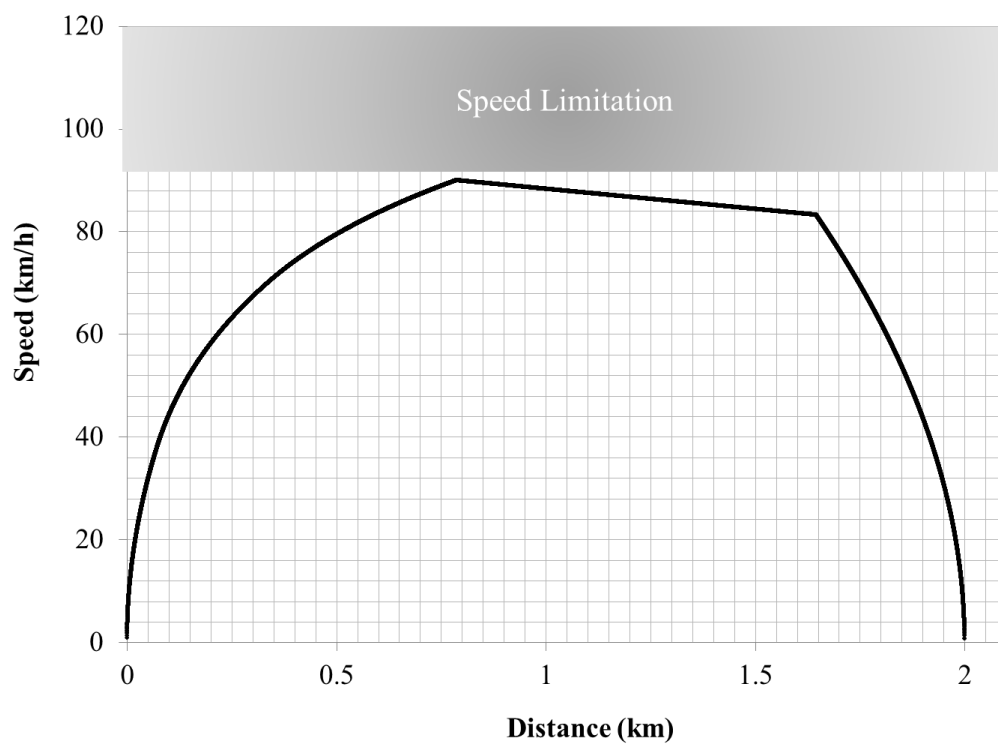


図 4-6 速度制限による格子点の削減

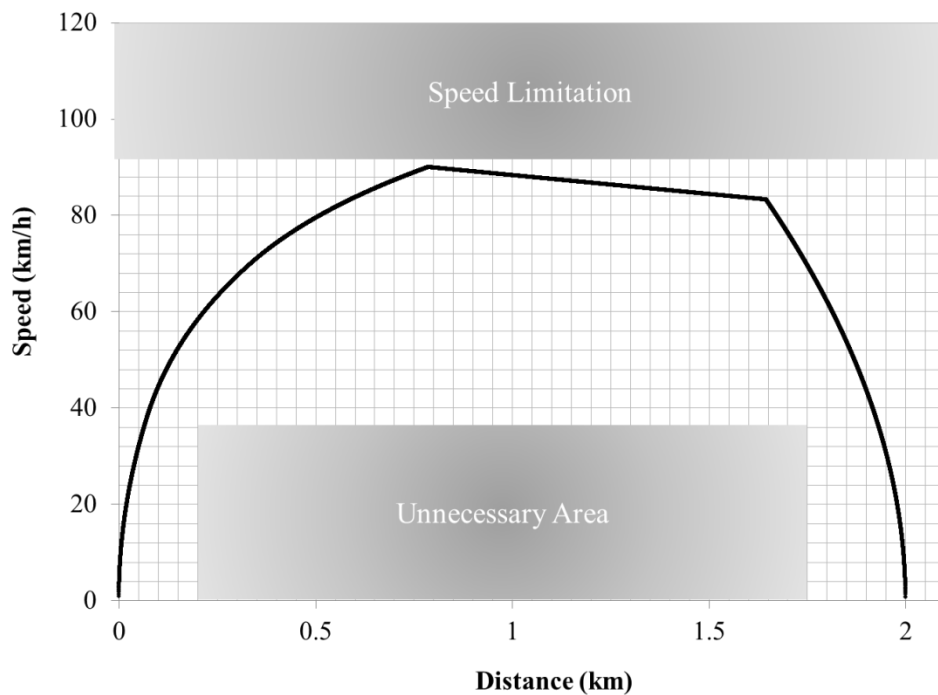


図 4-7 経験的に計算不要な格子点を削った運転曲線と格子点

4.2.4. 動的計画法の応用

図.4-4.では位相面を時間で区切ったが、これを位置で区切る手法も考えられる。つまり位置 x を独立変数として時間を状態変数に組み込んで扱えば、可達性が保証される。これは列車が後退しないという鉄道運行の性質を利用した手法である。しかし、この場合には駅に到達するまでの走行時分にずれが生じる恐れがあるため、走行時分の誤差をペナルティとして付加する必要がある。

4.3. 最適制御問題まとめ

本章では列車の複雑な非線形モデルを最適制御問題に落としこむ手法を先行研究に習って説明し、駅間を最も少ないエネルギーで走行する運転曲線パターンが最大力行→惰行→最大制動であることを確認した。これらの結論を受けて、次章では路線環境を考慮した省エネルギー運転手法を説明する。

第 4 章 参考文献

- (1) 工学的最適制御-非線形へのアプローチ- 加藤寛一郎, 東京大学出版会
- (2) 宮武昌史: “省エネルギーな列車ダイヤ作成のための簡易数理モデル”, 電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 6, pp. 860-861, 2011
- (3) R.Bellman, R.Kalaba: “Dynamic programming and modern control theory”, academic Press 1964
- (4) 動的計画法 杉山昌平 日科技連出版社, 1976
- (5) Hideyoshi KO, Takafumi KOSEKI, Masafumi MIYATAKE, “Numerical Study on Dynamic Programming Applied to Optimization of Running Profile of a Train”, IEE-Japan Industry Applications Society Conference, 2004
- (6) Takafumi KOSEKI, Takashi SUZUKI, “Application of the Dynamic Programming to a Calculation of Optimal Running Profile of a Train for Investigating Electric Brake”
- (7) Takafumi KOSEKI and Chinchun YEO, “Application of the Dynamic Programming to a Calculation of Optimal Energy-Saving Running Profile of a Train and Problems in its Numerical Implementation”

5. 省エネルギー運転

5.1. 省エネルギー運転とは

省エネルギー運転とは、与えられた走行時分内である駅間を走行したとき、消費エネルギーが最も少なくなる列車運転のことである。前章の最適化研究の結果によれば省エネルギー運転パターンは最大力行・惰行・最大制動であった。これは列車がある駅間を最も少ない力行エネルギーで走行するには、できるだけ惰行時間を多くとればよいということの意味する。ここで力行エネルギーと限定しているのは、列車が駅間を走行するのに必要なエネルギーは力行エネルギーの他に後に述べる補機の消費するエネルギーも考慮する必要があるためである。惰行時間を多く取るということは列車の力行をやめるノッチオフ速度を低く設定でき、また制動による損失が最小限に抑えられるということである。

ここで走行時分に注目すると、走行時分と消費エネルギーの間にはトレードオフ関係があり、走行時分に余裕があると消費電力量を減らすことができることが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。これは上でも述べた惰行時間を伸ばすことができるためである。しかし、最高速度や走行時分に制限がある場合には省エネルギー運転のパターンが定速度運転を含めたパターンに変化する。そこで本章では運行管理を考えた省エネルギー運転パターンについて述べる。

5.2. 運行管理を考えた省エネルギー運転

鉄道事業の主眼は旅客サービスであるため、駅間はできるだけ早く走りたいというのが乗客及び事業者の希望であり、それを定常的に叶えるために運行ダイヤが定められている。したがって、省エネルギー運転はこの運行ダイヤの中で実現するべく検討しなければならない。本論文では前述のように運行ダイヤの中、つまり運行管理の中で最も少ないエネルギーで駅間を走行するための手法を提案する。先行研究⁽¹⁾では、駅間を最も少ない力行エネルギーで走る運転曲線が提案されており、定速度運転も考えると図 5-1～5-4 のようになる。

それぞれの図について式(5-1)を条件に詳しく説明すると、まず図 5-1 は惰行時間が無いため図 5-1～5-4 の中で最も多くのエネルギーを消費する。しかし、走行時分は最も短く、駅間を早く走ることができる。この運転は特にオフブレーキ運転と呼ばれる。

次に図 5-2 は力行の後に定速度運転が入っている。これは図 5-1 ほど駅間をはやく走ることとはできないが、最高速度を抑えている分エネルギーを抑えることができる。(最高速度を抑えてエネルギーを抑えることができるのは運動エネルギーが速度の 2 乗に比例することに加え、走行抵抗が高速域で大きくなることを考えれば明瞭であろう)。

次に図 5-3 は惰行時間を入れることで図 5-2 ほど早くは走れなくともエネルギーをより抑えて走ることができる。

最後に図 5-4 は最も省エネルギーな運転曲線であるが、この中で一番走行時分が長い。

これらの図から走行時分、消費エネルギーについて定式化すると式 5-2、5-3 のような関係になる。したがって与えられた運行ダイヤの走行時分を見て図 5-4 から図 5-1 の順に運転

曲線を計画すればよいことになる。なお、図 5-1 でも走行時分内に収まらない時はノッチオフ速度を大きくし、図 5-4 でも余裕時分がある場合にはノッチオフ速度を下げれば良い。

$$V_a = V_b = V_c = V_d \cdots \cdots (5-1)$$

$$T_a < T_b < T_c < T_d \cdots \cdots (5-2)$$

$$E_a > E_b > E_c > E_d \cdots \cdots (5-3)$$

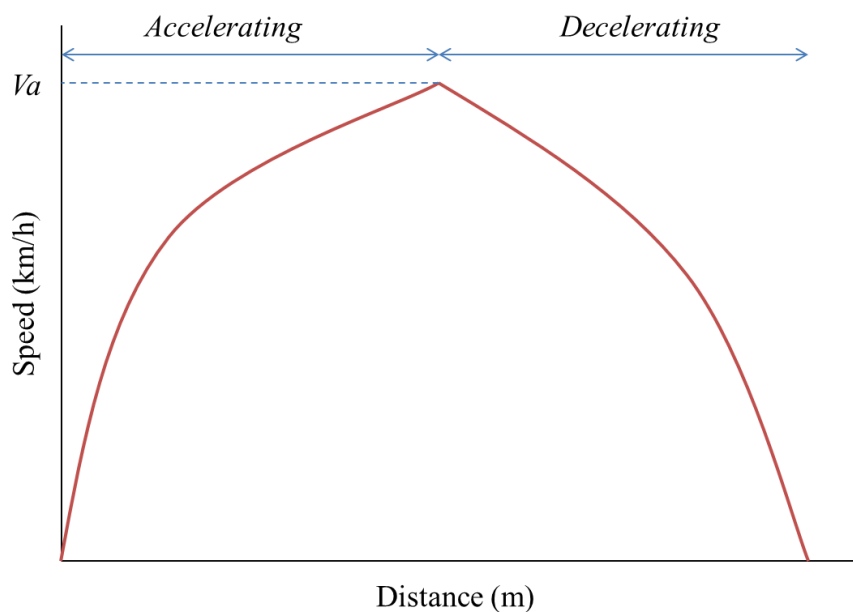


図 5-1 力行と制動のみで走行した場合の運転曲線(オフブレーキ)

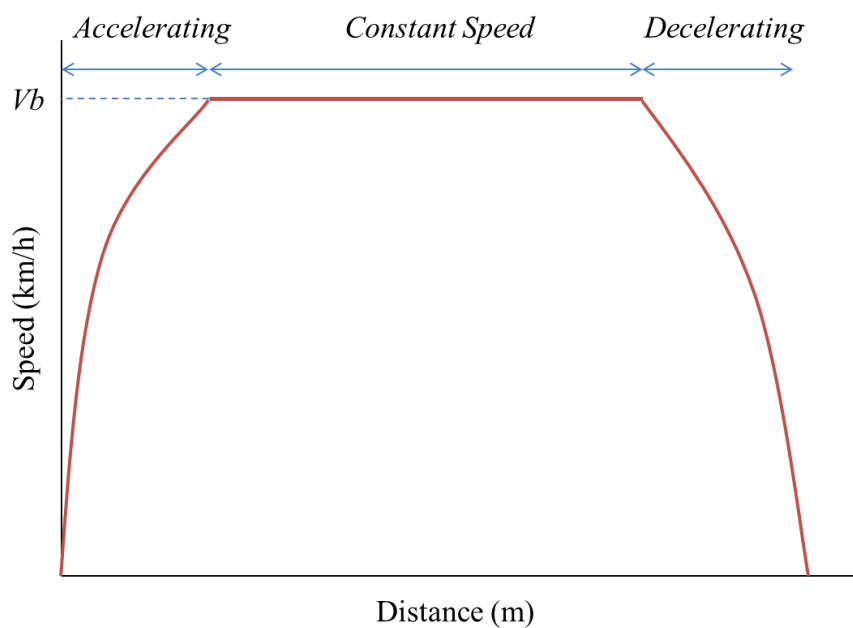


図 5-2 力行、定速度運転と制動で走行した場合の運転曲線

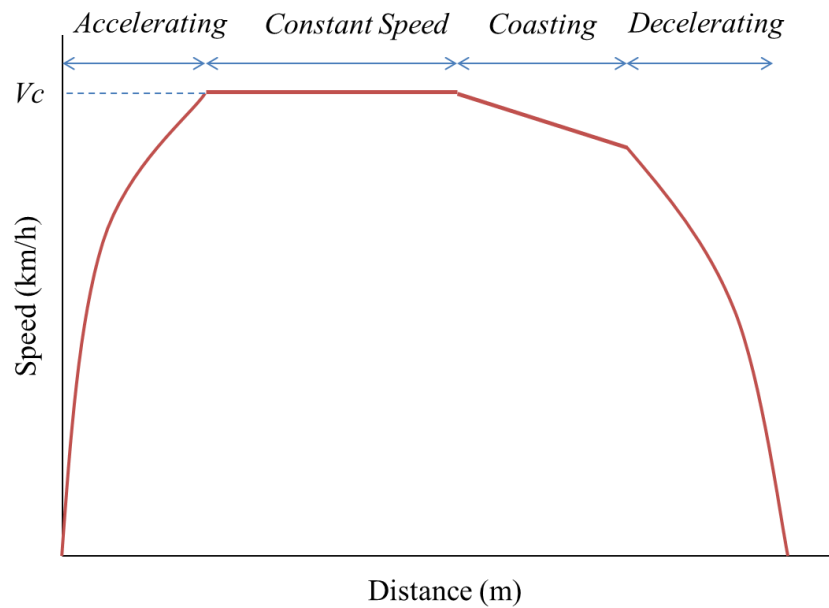


図 5-3 力行、定速度運転、惰行、制動を扱った運転曲線

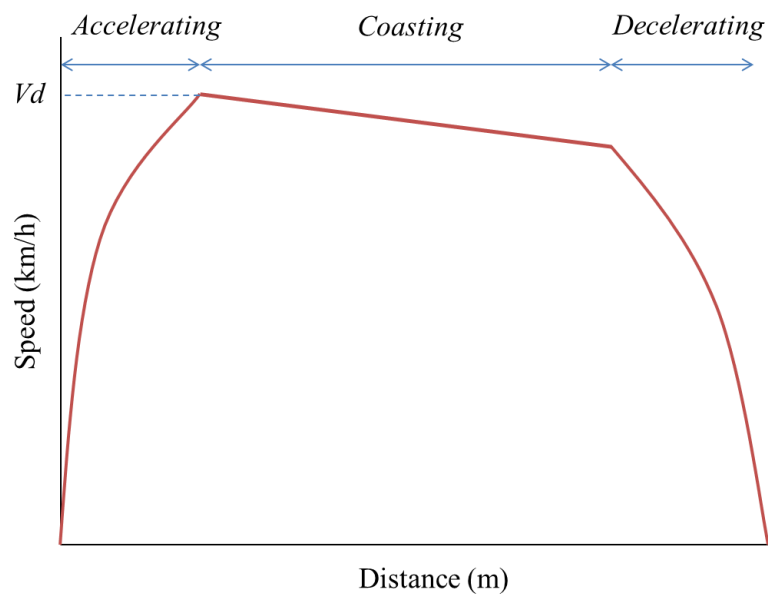


図 5-4 定速度運転のない力行、惰行、制動で走行した場合の運転曲線

第 5 章 参考文献

- (1) 宮武昌史：“省エネルギーな列車ダイヤ作成のための簡易数理モデル”，電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 6, pp. 860-861, 2011
- (2) Y. V. Bocharnikov, A. M. Tobias, C. Roberts, "Reduction of Train and Net Energy Consumption Using Genetic Algorithms for Trajectory Optimisation," Railway Traction Systems (RTS 2010), IET Conference, 2010.

6. 省エネルギー運転手法の評価

6.1. 2つの最大制動

先述の最適制御問題ならびに省エネルギー運転パターンで得られた結果によると、惰行時間を増やすために最大制動が考えられていた。しかし、ここには2つの最大制動の解釈がある。図2-3で述べたように、電気鉄道のブレーキは電気ブレーキと機械ブレーキで成り立っているが、この最大制動とは

(I)電気ブレーキと機械ブレーキ両方を用いた電空協調ブレーキでの制動

(II)電気ブレーキ、とりわけ回生ブレーキの性能だけで得られる制動

がある。そこで、明かり区間を図5-4のような力行、惰行、制動のパターンで誘導機車両1編成が走行したときの消費エネルギーを評価する。

6.2. 運行管理と省エネルギー運転

本論文の目的である運行計画、そして将来的に運転整理の議論に省エネルギーの視点を入れるには運行ダイヤを守らなければならない。つまり、走行時分を守ることが運転法を考える上で重要になる。そこで走行時分を守るという制約を考えると、省エネルギー運転の方法は次の2つに絞られる。

(I) ノッチオフ速度を下げ、強いブレーキをかける

(II) 回生ブレーキのみで制動を得られるように(機械ブレーキを立ちあげないように)ノッチオフ速度を下げずにブレーキを早い時点からかけはじめる

これらはそれぞれ6.1の(I)(II)に対応し、これらの運転方法を取り入れた場合の運転曲線を図6-1に示す。(I)ではノッチオフ速度を下げ、時間がかった分を強いブレーキをかけて補い、(II)では(I)のブレーキよりも緩い回生ブレーキのみを使って時間がかった分を最初の力行で補っている。この(II)の運転手法はATO(Automatic Train Operation)システムだけでなく、手動運転車両でも実現できることが近年の研究成果として報告されている⁽¹⁾。これらはいずれも有効な手段ではあるが、先述の通り一般に走行時分と消費電力量はトレード・オフの関係にあるため⁽²⁾、両者を同時に実現することは不可能である。そこで、これら2つの手法を比較検討していくことにする。

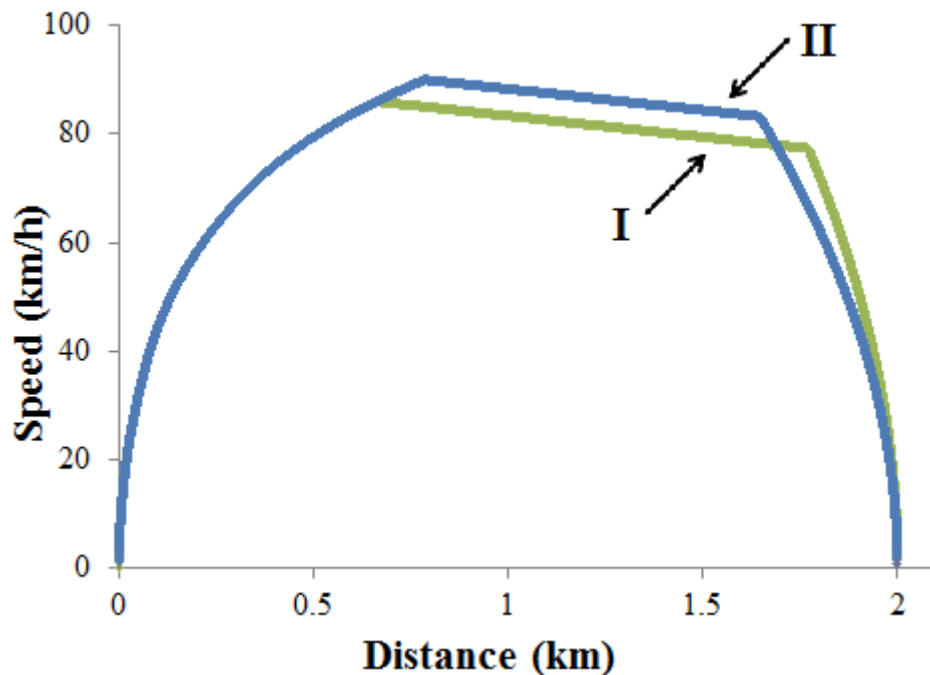


図 6-1 2つの省エネルギー運転手法による運転曲線

6.3. 列車運転のモデル化とエネルギーの計算方法

6.3.1. 運転モデル

今回の検討では通勤電車をモデルに、架線電圧が一定の条件で図 6-1 に示すような 2km の駅間を力行－惰行－制動で運行することを考える。ここでは、再力行は行わない。そして、走行時分と消費電力量の対応を見るために、ノッチオフ速度を変化させた場合に、消費電力量がいくらかになるのかを計算した。なおノッチオフ速度とは、列車が力行から惰行に入った時の速度を言う。また、次節で述べる目的で、一定の勾配のあるケースも考えた。

6.3.2. 勾配を考える意味

列車が駅間を走行する際にエネルギーを損失する一因として走行抵抗がある。その中でも本論文では勾配抵抗に注目し、上り勾配 2‰、平坦、下り勾配 2‰を設定し、それぞれで数値計算を行った。その理由は、まず勾配抵抗は列車の加速度に大きく影響することにある。上り勾配であれば力行時にエネルギーを大きく消費する要因になるが、制動時には減速の手助けになる。下り勾配はその逆である。本論文で検討する 2 つの運転手法はエネルギーの観点で見れば、

(I) 力行エネルギーを削減する運転手法

(II) 制動時にエネルギーを効率よく回収する運転手法

の比較であるため、勾配が影響するところが大きいと考える。

また、勾配は列車の位置エネルギーを変化させる。上り勾配であれば力行エネルギーの一部は列車の位置エネルギーになり、下り勾配であれば列車の位置エネルギーが列車の力行エネルギーと回生エネルギーになる。さらに、走行時分の観点では列車の引張力は応荷重装置が働く場合であれば車重で決まるため、勾配は加速に要する時間にも影響を与えることになる。

6.3.3. ブレーキのかけ方

(Ⅰ)の運転手法では遅れ込め制御の入った電空協調ブレーキを用いる。電空協調ブレーキのうち機械ブレーキは列車の運動エネルギーを摩擦熱として捨てることになるが、確実に制動力を得ることができ、この制動力は回生ブレーキよりも大きいため走行時分を縮める上では有効である。今回の電空協調ブレーキの減速度は常用最大ブレーキの 3.5km/h/s に設定した。

(Ⅱ)の運転手法では電空協調ブレーキの機械ブレーキを立ちあげないように減速度を調整しながらブレーキをかけ、回生ブレーキのみで最大限の制動を得られるようにする。図 2-3 にもあるように、回生ブレーキだけでは高速域で大きな制動力を得られないため減速するのに時間を要するが、エネルギーの視点で見れば列車の運動エネルギーを最大限電気エネルギーに変換することができる。

6.3.4. エネルギーの計算方法

消費電力量 E_p [kWh]と回生電力量 E_r [kWh]の計算には式(3-1)～(3-3)を用いた。そして、評価するエネルギー量 E [kWh]は式(6-1)とする。

$$E = E_p - E_r \cdots \cdots (6-1)$$

この式はある列車が力行で消費したエネルギーのうち、どれだけの運動エネルギーを回生エネルギーとして他車に還元できたかを示し、1列車の正味の消費エネルギー量となっている。

6.3.5. 回生失効と回生率

2.1.2 で述べた回生ブレーキの制約を考慮して、理論上回生できるエネルギーのうち、他の力行車で消費された割合(回生率)を検討した。これはある列車が回生ブレーキを使って生み出した回生エネルギーの一部が他の力行車に利用された場合を想定している。本論文では、回生のための周囲の状況が複雑に変化し、結果的に全回生電力量のうち 50%と 30%が回生された場合を検討した。つまり、式 6-1 の E_r が 50%、70%減少することを考える。この場合は列車が回生ブレーキ制動中に重負荷回生から軽負荷回生に変化して回生性能曲線は図 6-2 に示すように回生ブレーキで制動できる領域が狭くなるが、広義の回生失効の定

義により、後に軽負荷回生から重負荷回生となって回生ブレーキの最大性能が再度維持できる状況に変化したときに制動力が再び回生性能曲線に乗る(復帰する)ことを考えている。そのため、軽負荷回生時は図 6-2 の青線-紫線の間のみだけ機械ブレーキで補足する。これは回生絞り込みが起こるかどうかの不確定要素に依存せず、力行エネルギーを削減する(I)の手法に優位性があるかどうかを分析する上で重要である。

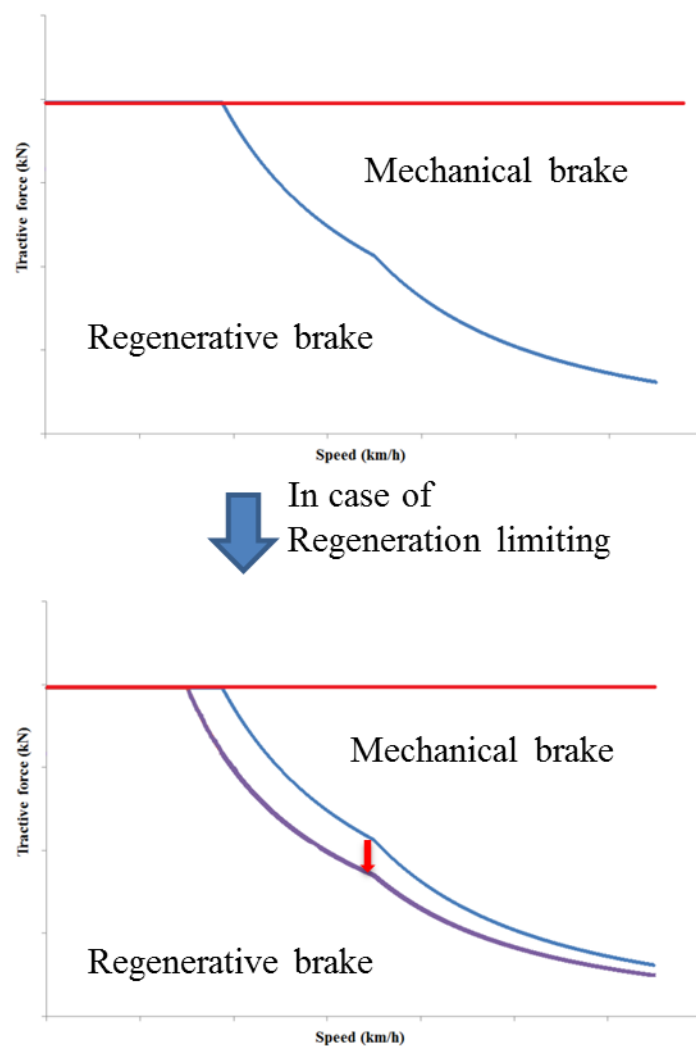


図 6-2 本論文での回生率と引張力特性の考え方

6.4. 運転曲線の計算結果と省エネルギー運転法の傾向分析

定員乗車で計算を行い、得られた走行時分と消費電力量の関係を図 6-3 に示す。各図の凡例の「機械ブレーキ」と「電空協調ブレーキ」が(I)の手法に対応し、「電力制限回生ブレーキ」と「回生ブレーキ」が(II)の手法に対応している。

6.4.1. 全体に見られる傾向

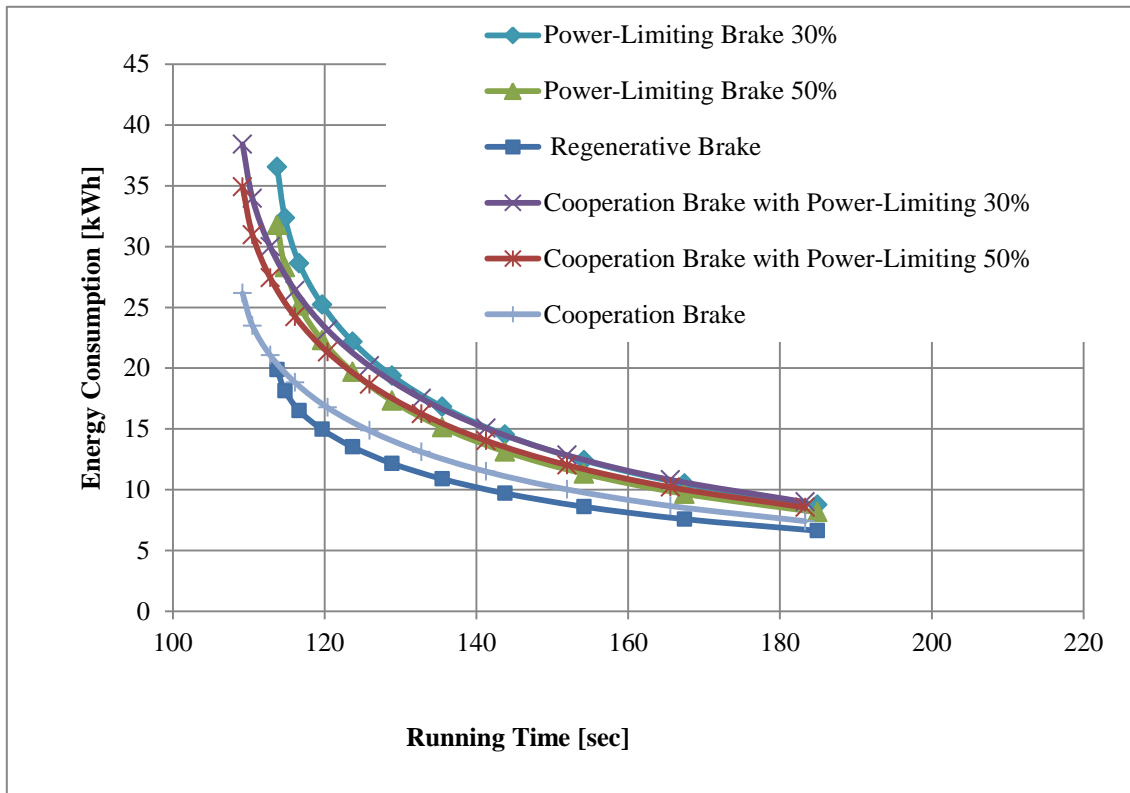
走行時分を縮めるのに必要なエネルギーについて考える。消費電力量に注目すると、駅間を早く走ろうとするほど消費電力量は大きくなっている。

そして、グラフの傾きに注目すると、最短時間に近づくほど 1 秒縮めるのに必要なエネルギーが大きくなっている。これは惰行時間が短くなるために見られる普遍的な傾向である。ここで、このグラフの傾きの大きさを(Ⅰ)と(Ⅱ)で比較すると、(Ⅰ)より(Ⅱ)のほうが大きい。(Ⅱ)の運転手法は(Ⅰ)に比べて惰行時間を多く取ることができないため、(Ⅱ)の手法で早く走ろうとすると惰行時間を大きく削ることになる。したがって、グラフの傾きの絶対値は(Ⅰ)に比べて(Ⅱ)が大きくなっている。

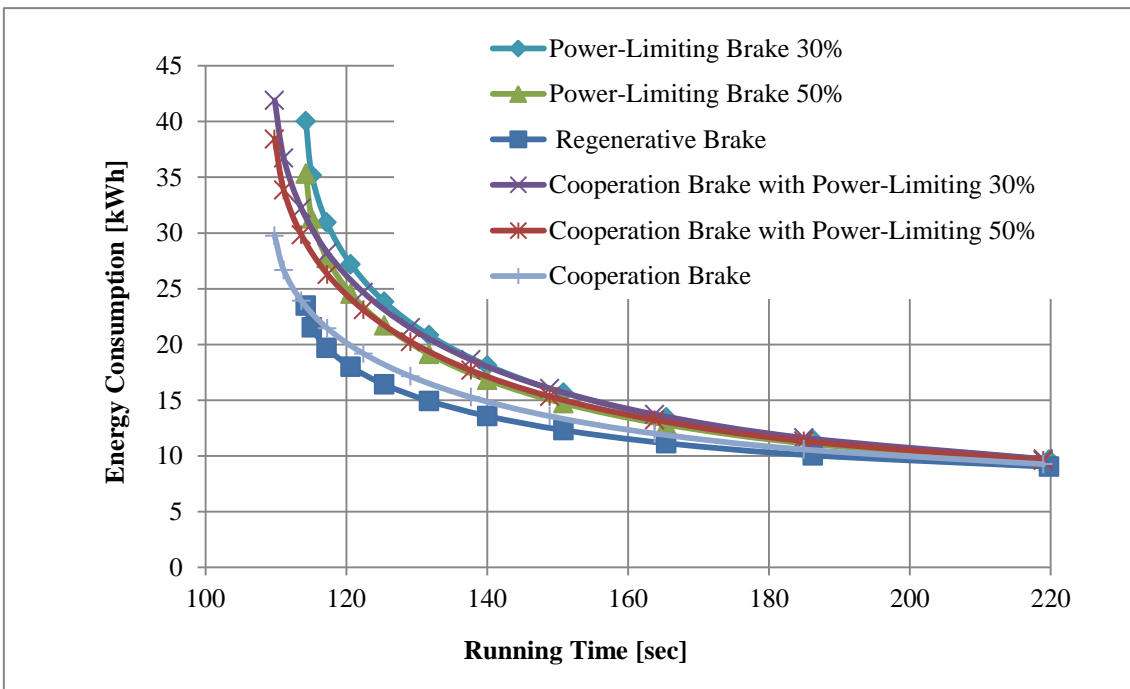
また、グラフの左端に注目すると、(Ⅱ)の運転手法では(Ⅰ)の運転手法より早く走ることができないことがわかる。これは高速域において回生ブレーキの減速度が小さいためである。

6.4.2. 回生失効しない場合における回生ブレーキの大きな優位性

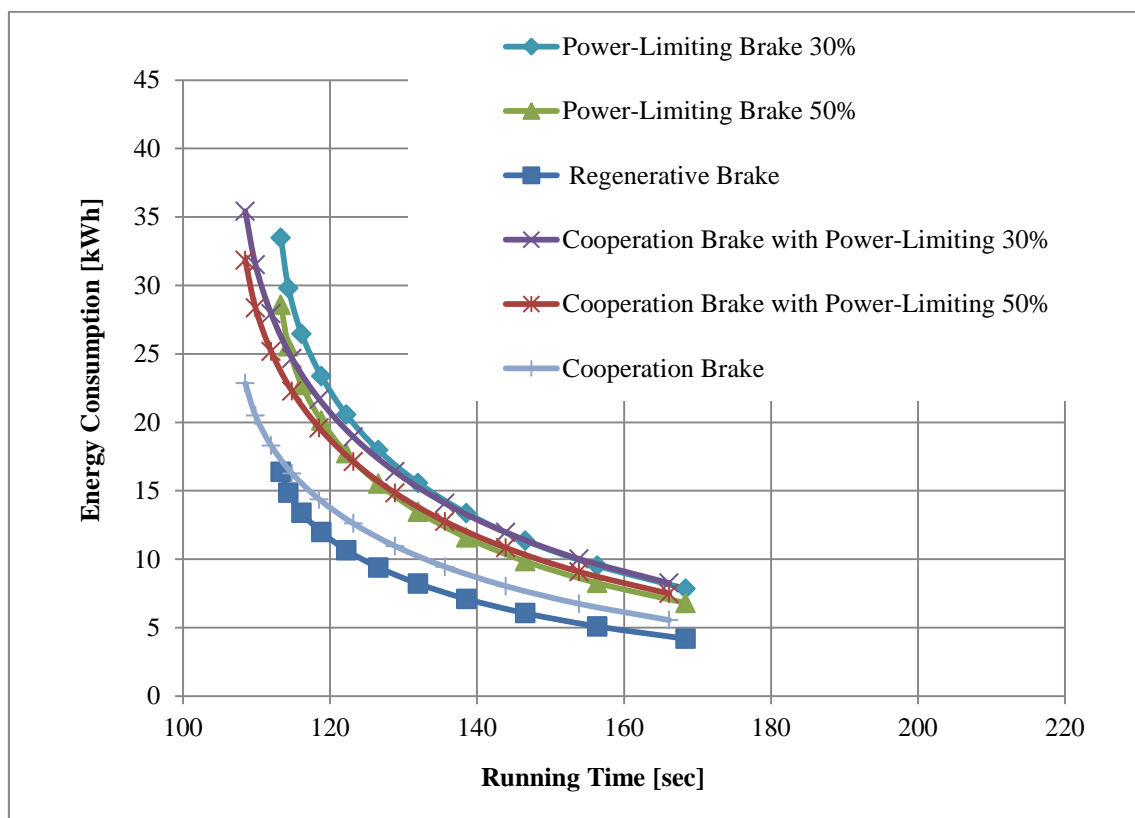
回生ブレーキが列車の省エネルギー運転に貢献する優位性を考える。図 6-3 の(a)～(c)は、各勾配における消費電力量と走行時分の関係である。図 6-3 の各グラフにおいて同じ走行時分で見ると、回生失効しない場合ではどのケースでも(Ⅱ)の運転手法が消費電力量が少なくなっている。したがって、回生失効しない路線では(Ⅰ)の手法より(Ⅱ)の手法の方が、省エネルギー効果が非常に大きく、この結果から今後列車の ATO を設計する際の思想として、回生ブレーキを精一杯活用する運転法が良いと結論付けられる。



(a) 勾配 0‰



(b) 上り勾配 2‰



(c) 下り勾配 2‰

図 6-3 定員乗車時での消費電力量と走行時分の関係

6.4.3. 回生失効が回生ブレーキの優位性に与える影響

前節において、回生失効しない場合においては回生ブレーキを使った運転はいかなる条件においても省エネルギー運転法に有効であるということを明らかにした。しかし、現実には回生失効が起こりうるのでその影響を簡易なケーススタディを通して分析する。

ここで、(I)と(II)の運転手法の消費電力量を同じ回生率の元で比較する。図 6-4 の(a)～(c)に、グラフの交差点に注目した図 6-3 の拡大図を示す。まず走行時分が長いところでは(II)の運転手法のほうが消費電力量が少ない。しかし、走行時分走行時分が短くなるとグラフが交差し、(I)の運転手法のほうが消費電力量が小さくなる。これらのことから、回生エネルギーの回生率が下がると、ノッチオフ速度を下げた運転手法の方が有利になる領域が広がる傾向がわかる。この理由は 6.4.1 で述べた惰行時間による影響である。

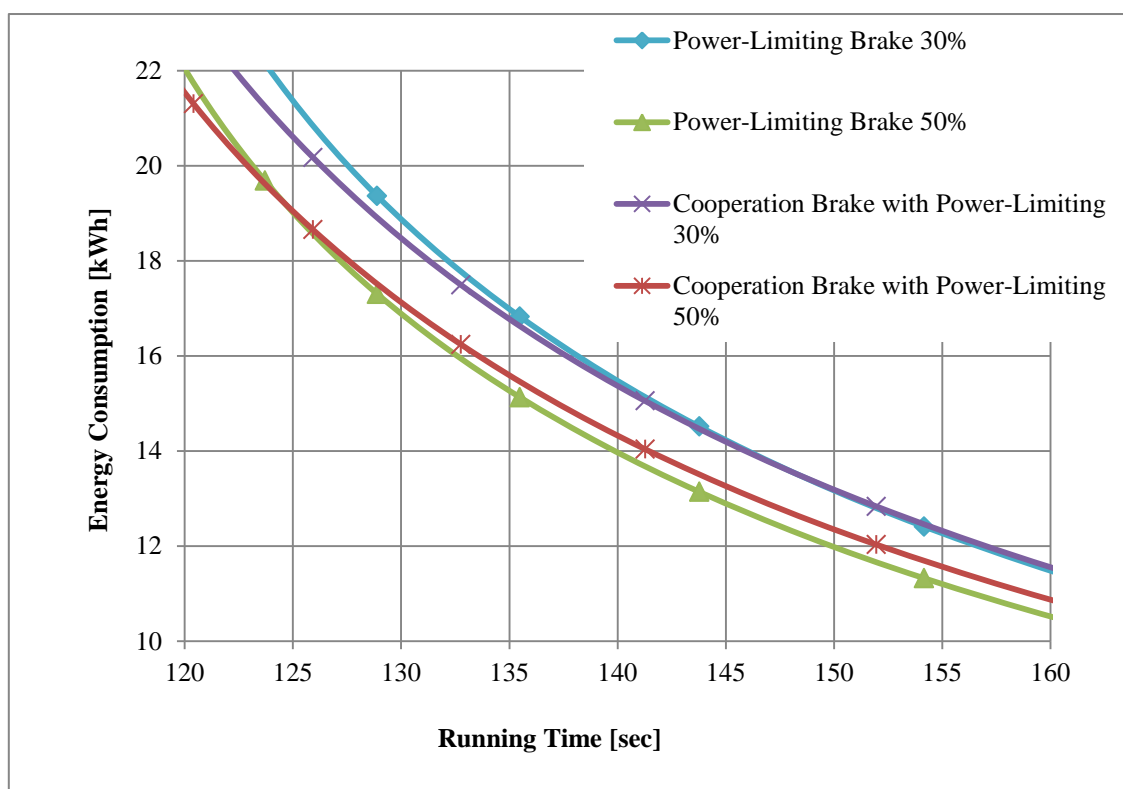
しかし、回生失効が起こる場合で速く走らない限り運転方法による消費電力量の差は小さい。したがって、運転法を使い分ける場面は次の 2 つの場合に限られるものと考えられる。

- ・ 短い走行時分で駅間を走りたい場合
- ・ 回生失効が生じない路線の場合

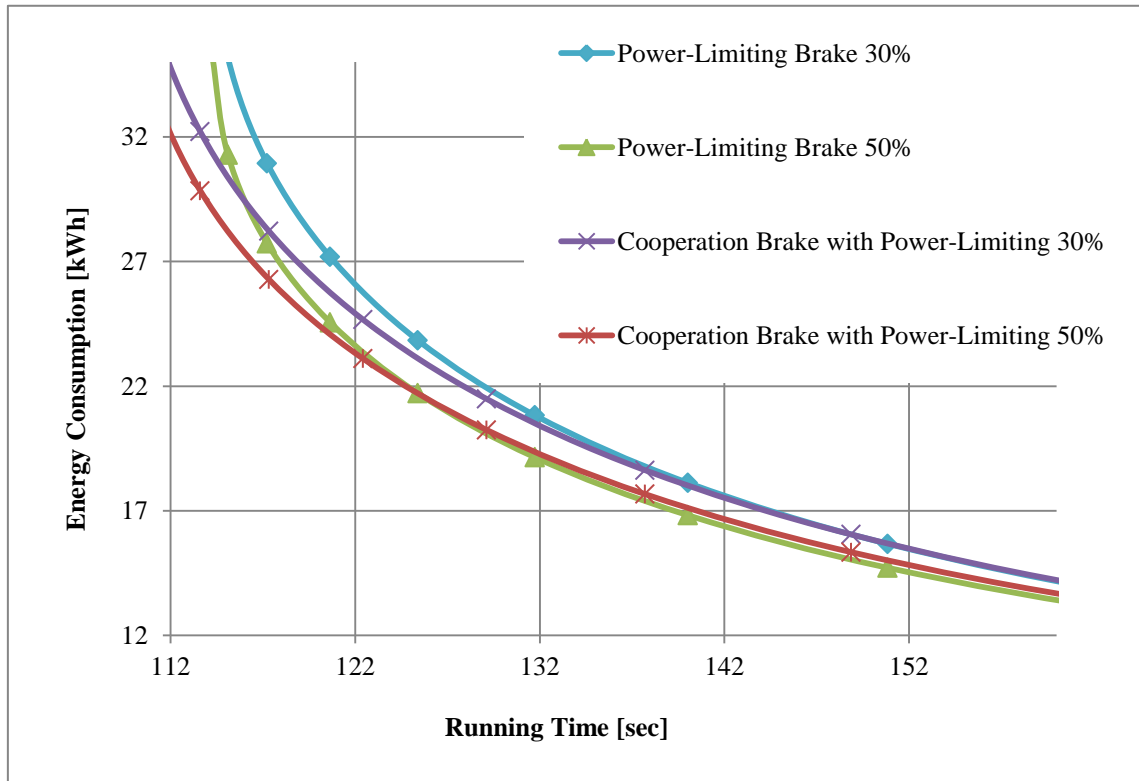
6.4.4. 勾配抵抗が与える影響

勾配抵抗が列車の加減速、走行時分ならびに消費電力量に与える影響を考える。

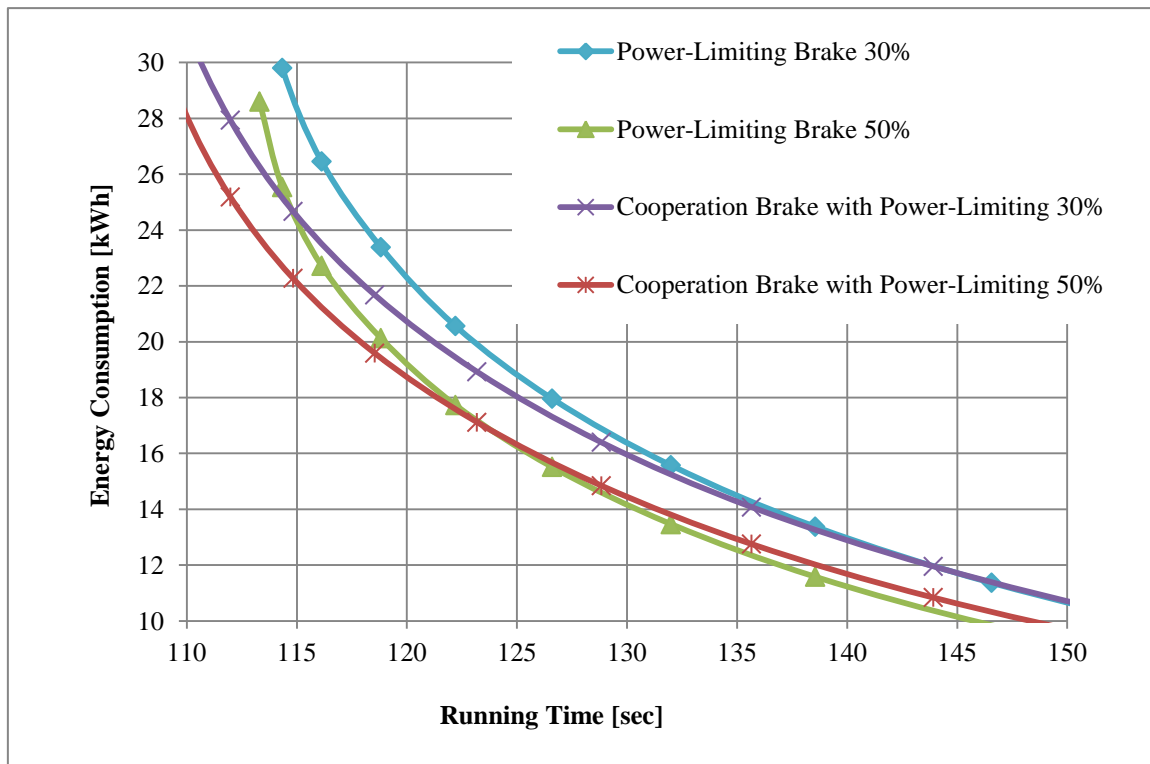
ここで同じ回生率における、走行時分が長いところでの3つのグラフの間隔に注目すると、図6-4の(c)、(a)、(b)の順に開いている。これは上り勾配では列車の力行エネルギーが列車の位置エネルギーと運動エネルギーになり、力行時に扱う電力量が増える一方で、回生ブレーキで扱う回生電力量が減っているためである。逆に下り勾配は列車の力行エネルギーの他に列車の位置エネルギーが運動エネルギーになるため、力行時に扱う電力量が減り、回生ブレーキで扱う回生電力量が増えるためである。つまり、下り勾配時では回生制動を活用することの優位性が高くなり、さらに時間に余裕のある場合には無理に加速をしない方が、消費エネルギーが少なくなる。



(a) 勾配 0‰



(b) 上り勾配 2%



(c) 下り勾配 2%

図 6-4 グラフ交差点に注目した図 3 の拡大図

6.5. 第 6 章まとめ

本章では 4 章で得られた省エネルギー運転の最適解の最大制動の部分に注目し、回生ブレーキによる最大制動、つまり回生ブレーキを最大限活用する運転手法が大きな省エネルギー効果が得られることを明らかにした。しかしその一方で回生失効が起こる場合や走行時分に強い制限がある場合にはノッチオフ速度を下げて力行エネルギーを減らす運転手法が大きな効果が得られることもわかり、条件に応じて使い分けるべきであるとの結論を得た。

第 6 章参考文献

- (1) 楊 哲, 渡邊 翔一郎, 古関 隆章, 水間 毅, 濱崎 康宏 “回生有効活用で省エネルギーを図るブレーキ制御とその支援の実証研究”, 交通・電気鉄道/フィジカルセンサ合同研究会, 岐阜, 2013.03, TER-13-006/PHS-13-010
- (2) Y. V. Bocharnikov, A. M. Tobias, C. Roberts, "Reduction of Train and Net Energy Consumption Using Genetic Algorithms for Trajectory Optimisation," Railway Traction Systems (RTS 2010), IET Conference, 2010.

7. トンネル区間を走るリニアモータ車両と補機の影響評価

6 章では車両の電動機による力行エネルギーと回生エネルギーを分析することにより省エネルギー運転手法の優位性の分析を行った。ここで回生失効に着目すると、ある車両の生み出す回生エネルギーは車両の電動機だけでなく空調などの補機が消費することも考えられる。つまり、車両の補機は回生負荷のひとつであるために回生率の議論で一度取り上げる必要がある。本節では、車両の補機電力が省エネルギー運転手法にどの程度影響するのかを考察する。

7.1. 車両の補機電力を検討する目的

7.1.1. 列車の消費エネルギーと走行時分の関係

列車の電動機の消費エネルギーと走行時分は一般的にトレードオフの関係にあることが知られており⁽¹⁾、前節でのその関係性を確認した。しかし、補機の消費するエネルギーは走行時分に比例して増加するので電動機と補機の両方を足しあわせた列車の消費エネルギーは単調減少にならない可能性がある。図 7-1～7-3 に概念図を示す。図 7-3 は図 7-1、7-2 の和であるが、ここでは消費エネルギーと走行時分の関係に最小点があり、省エネルギー運転においての最適点が見つかっている。そこで本節では、補機の消費するエネルギーが実際の基準運転時分にどの程度影響を及ぼすのかを試算した。

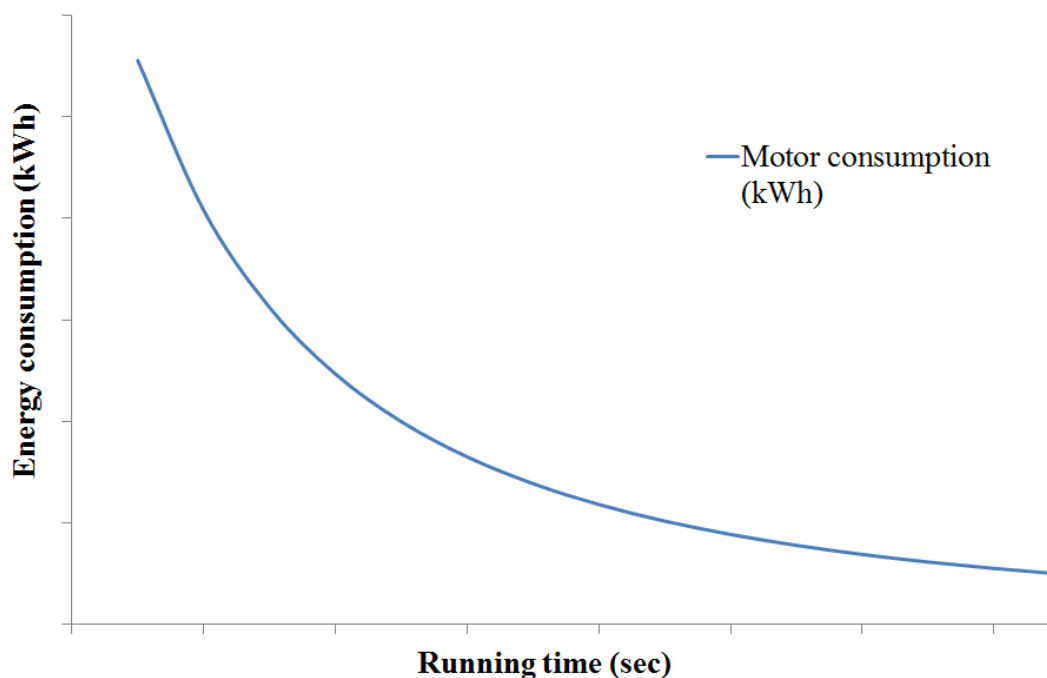


図 7-1 電動機の消費エネルギーと走行時分の関係の概念図

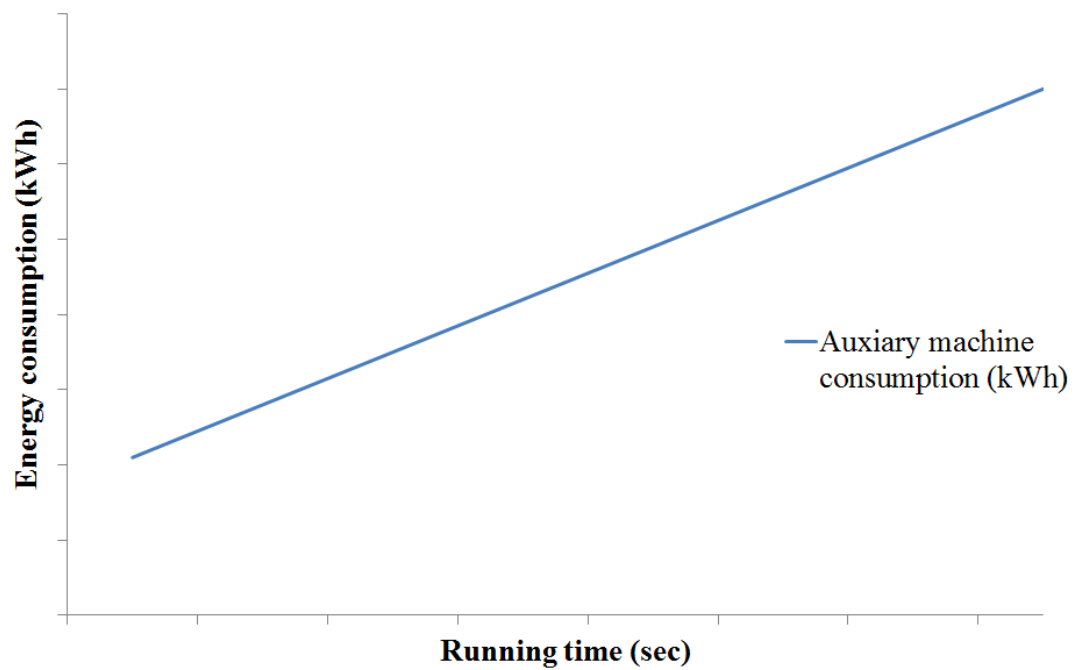


図 7-2 補機の消費するエネルギーの概念図

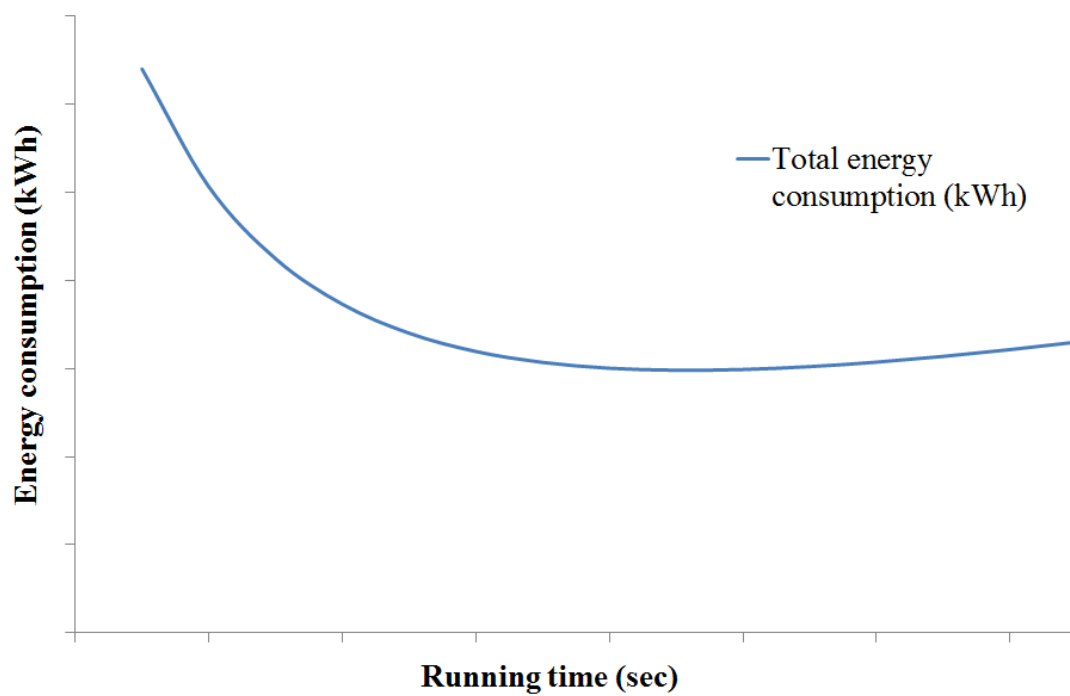


図 7-3 車両が消費するエネルギーの概念図

7.1.2. 等増分消費エネルギー則⁽²⁾

列車の消費エネルギーと走行時分の関係性を応用して、駅間走行時分の配分最適化による省エネルギー化が検討されている。これは始発駅から終点駅までの総走行時分は変えずに、途中の駅間走行時分を調整し、余裕時分配分を考えることで省エネルギー化を図るものである。

等増分消費エネルギー則とは、文献(2)で提唱されている駅間走行時分の最適化モデルである。駅間 i において、駅間走行時分 T_i に対する消費エネルギー W_i が単調減少の関数 $W_i(T_i)$ で表されるとき、ラグランジュの未定乗数法を用いるとすべての駅間合計の消費エネルギーを最小にする走行時分が求まり、それは各 i における $W_i(T_i)$ の傾きが一致するときである。

7.2. 検証方法

7.2.1. エネルギーの計算条件

本論文ではリニア地下鉄を想定して運転曲線の計算をすることにより力行・回生エネルギーを得た。その際の架線電圧と補機の消費電力は走行中一定とし、回生失効は起こらないものと仮定する。また、走行パターンは力行・惰行・制動とし、乗車人数は定員乗車としている。

7.2.2. 力学モデルと運転曲線の計算

本論文で扱うモデルは地下鉄道なので、列車の走行抵抗 R_r [N] の計算には下記の式⁽³⁾⁽⁴⁾を用いる。明かり区間の走行抵抗 R_{r1} [N]、トンネル区間の走行抵抗 R_{r2} [N] を式(7-1)(7-2)に示す。

$$R_{r1} = 9.8[(1.65 + 0.0247v)M_M + (0.78 + 0.0028v)M_T + \{0.028 + 0.0078(n - 1)\}v^2] \dots\dots(7-1)$$

$$R_{r2} = 9.8(2.088 + 0.0394v + 0.00067v^2)M \dots\dots(7-2)$$

M_M は電動車質量[t]、 M_T は付随車質量[t]、 n は編成両数、 v は速度[km/h]、 M は乗客を含めた列車質量[t]である。明かり区間とトンネル区間を走る列車の走行抵抗の違いを図7-4に示す。ここでは1M1Tの2両編成の車両を想定し、出発抵抗に係る速度6km/h以下の部分は除外している。なお、車両数が大きくなると R_{r1} のグラフの傾きは速度が大きくなるに従って顕著に大きくなる。

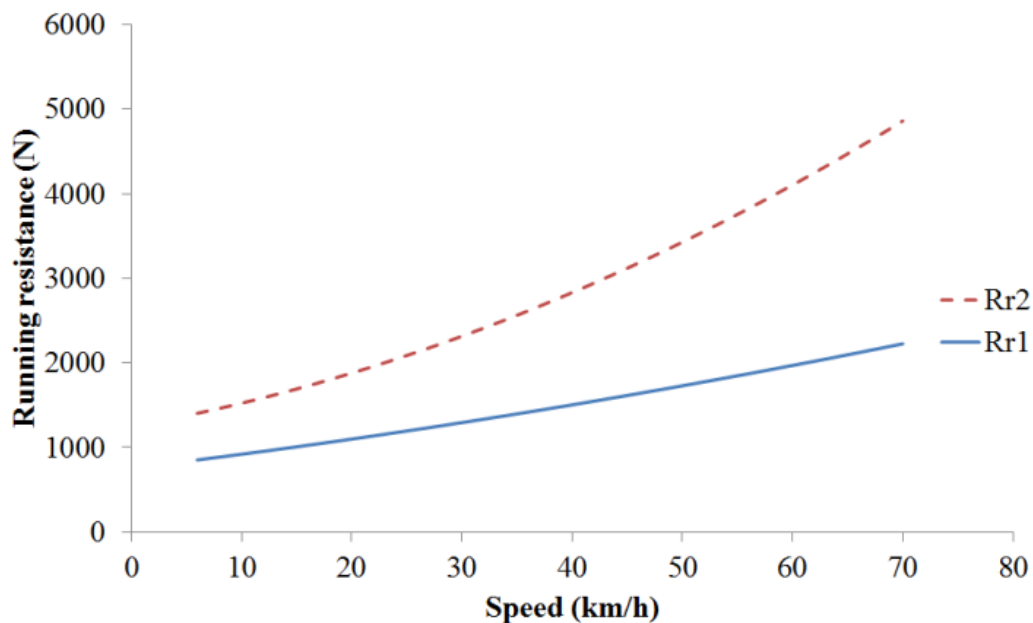


図 7-4 明かり区間とトンネル区間での走行抵抗と列車速度の関係

7.2.3. ブレーキのかけ方

本章では電空協調ブレーキを扱うが、省エネルギー運転に注目して 6.3 で説明した(II)の制動時にできるだけ回生ブレーキに負担させる運転手法を用いる。図 7-5 にリニアモータのブレーキ性能曲線を示す。誘導機車両とは異なり、リニアモータ車両の回生ブレーキはある速度以下になると比例して制動力が低下する。

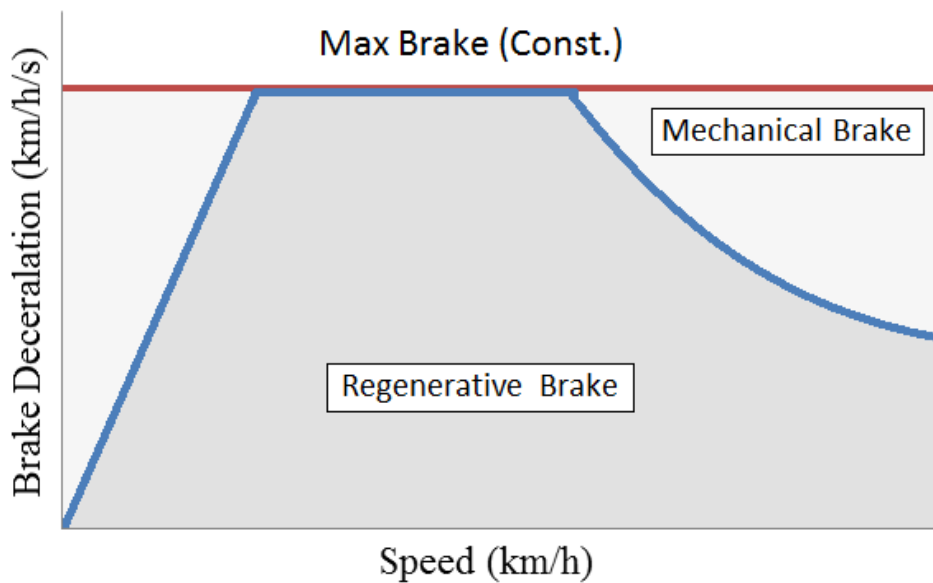


図 7-5 リニアモータ車両における電空協調ブレーキ使用時の列車速度と回生ブレーキ負担割合の関係

7.2.4. 列車長を考慮した数値解析と補機のエネルギーの計算

電動機のエネルギーの計算は 3.1 で説明した内容に沿って行う。

一方、補機の消費するエネルギーは季節によって大きく異なるため、本論文では冷房を使う夏季と暖房を使う冬季それぞれにおいて計算を行った。

本章では仮想的な路線を走行した場合の数値解析に加えて、実路線の勾配、曲線等の情報を元に列車長を考慮した列車抵抗の算出を行い、数値解析を行った。

ここで勾配や曲線などの列車抵抗を考慮する理由を述べる。補機の消費するエネルギーは列車の走行時分が長くなるほど大きくなるが、その影響を受けるかどうかを考えるには相対的に電動機の消費エネルギーを考えなければならない。電動機の消費エネルギーの増減は列車抵抗の大きさに左右される。したがって補機の影響を評価するためには様々な路線を想定したケーススタディが必要であるため、表 7-1 のように 4 つの路線ケースで計算した。Case 1～3 は仮想的な路線で、補機の影響を一般的に評価するために行った。Case 4 はリニア地下鉄の走行する実路線で、勾配と曲線が距離に応じて変化する要素を含んでいる。ここでは実路線上での補機の影響を調べている。

Table 7-1. Four case studies.

Running pattern	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Gradient	0 ‰	12.5 ‰	-12.5 ‰	variability
Distance	1000 m	1000 m	1000 m	670 m

7.3. 数値解析結果

図 7-6～7-9 に Case 1～4 の数値解析によるエネルギーの計算結果を示す。各図の(a)(b)はそれぞれ夏季と冬季を指している。

7.3.1. 全体の傾向と補機の影響

図 7-6～7-9 の電動機と補機を合わせた消費電力量と走行時分の関係を見ると、図 7-6(a)の水平区間の 115 秒以降を除くすべての領域で単調減少となっている。これらの結果から、基準運転時分で走行する範囲では消費エネルギーと走行時分の関係がトレードオフであるという結果に一般性があることがわかり、Case4 の図 7-9 の結果からも理想より複雑な実路線のケースでもトレードオフ関係が確認された。したがって等増分消費エネルギー則は一般的に有効である。

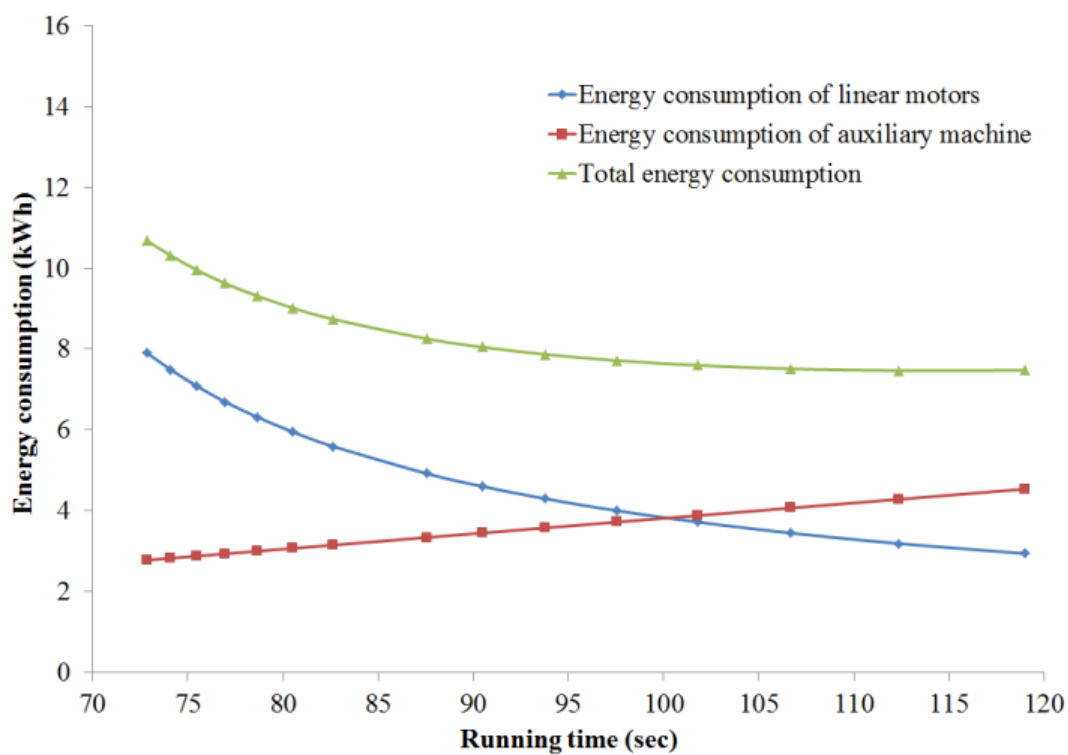
7.3.2. 単調減少でない場合

図 7-6 (a) の水平区間の 115 秒以降では単調減少から単調増加に転じる最小点が見られた。この領域を詳しく分析すると、最小点になる時のノッチオフ速度は 42km/h のときであることがわかった。

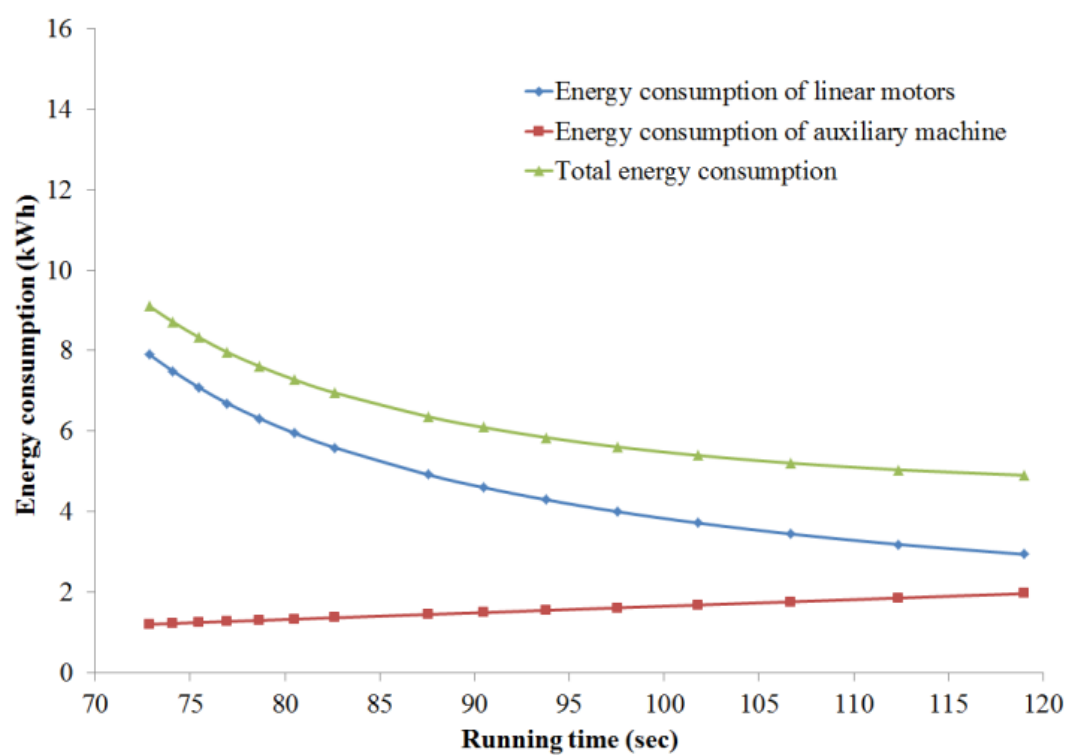
7.3.3. 等増分消費エネルギー則が適用できる場合とできない場合

図 7-6 (a) では最小点が 115 秒あたりで見つかったが、図 7-9 を見るに、一般的な基準運転時分を考えると等増分消費エネルギー則の適用には影響なく、これはダイヤ乱れ時であっても影響はないものとする。その理由を考察すると、まず複数駅を含むある駅間を走行するのに要する時間を T_{Total} 、各駅間で電動機が消費するエネルギーの総和を E_A 、各駅間で補機が消費するエネルギーの総和を E_B とすると、 T_{Total} が決まると E_B は一意に決まるため E_B は T_{Total} の関数と考えることができる。一方、 E_A は単調減少であることが図 7-6～7-9 で明らかになったので E_A を最小化するような駅間走行時分の配分最適化を考えれば良い。また、回生失効が起こる場合についても E_A は単調減少であることに変わりないので適用は可能である。また、ダイヤ乱れが生じた場合には T_{Total} が変化するため E_B も変化するが、前述のとおり E_B は T_{Total} の関数で単調増加であるため、最適化問題のモデルを変えることなく解くことが可能である。

しかし、一方でローカルに補機電力に変化が起こる場合には、等増分消費エネルギー則を適用するにあたって再考が必要とされる。この場合にはまず E_A を最小化する解が T_{Total} を最小にする解とは必ずしも一致しない。したがってこの場合には E_{Total} を最小化する最適化問題を考える必要があり、その制約条件の一つに「駅間走行時分が長くなり過ぎないこと」が加わることになる。具体的には駅間ごとに空調の電源を ON/OFF する場合や、長い駅間を走行する際に早めにノッチオフして惰行でゆるゆると走る場合である。

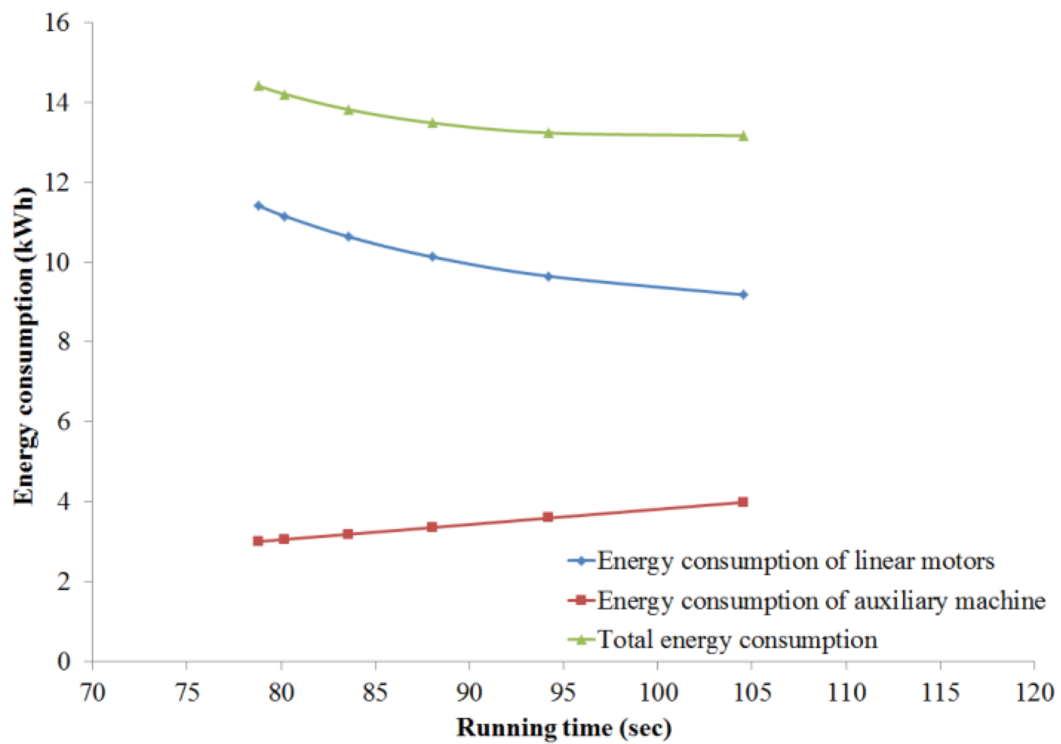


(a) 夏季

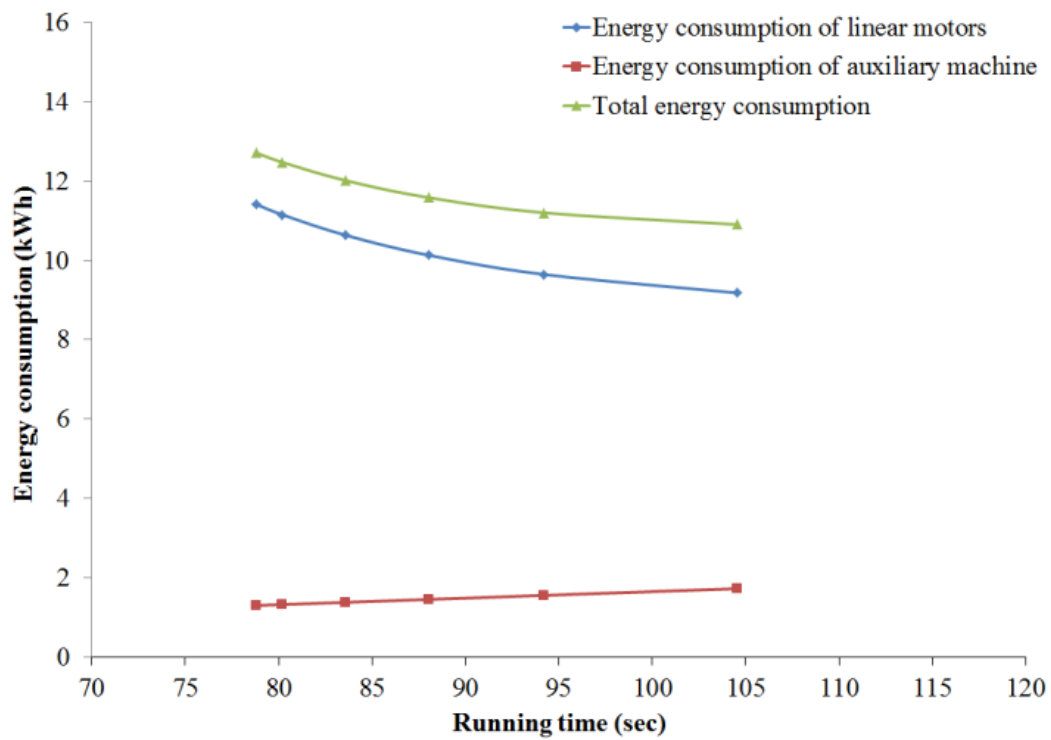


(b) 冬季

図 7-6 0%勾配での消費エネルギー量と走行時分の関係

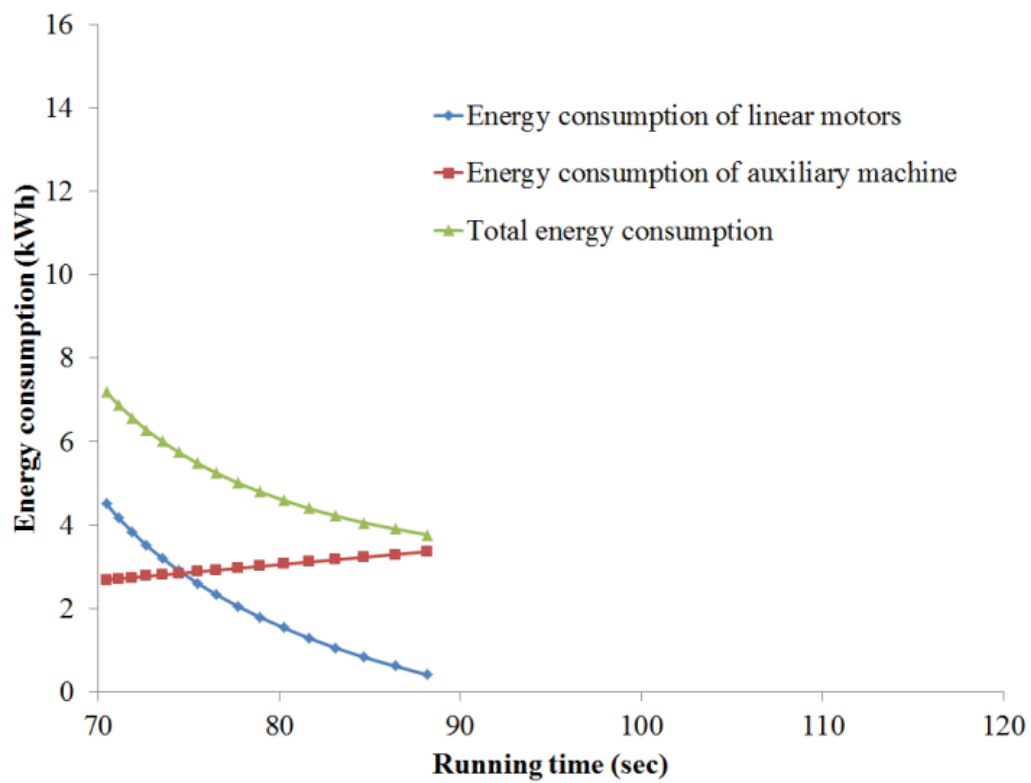


(a) 夏季

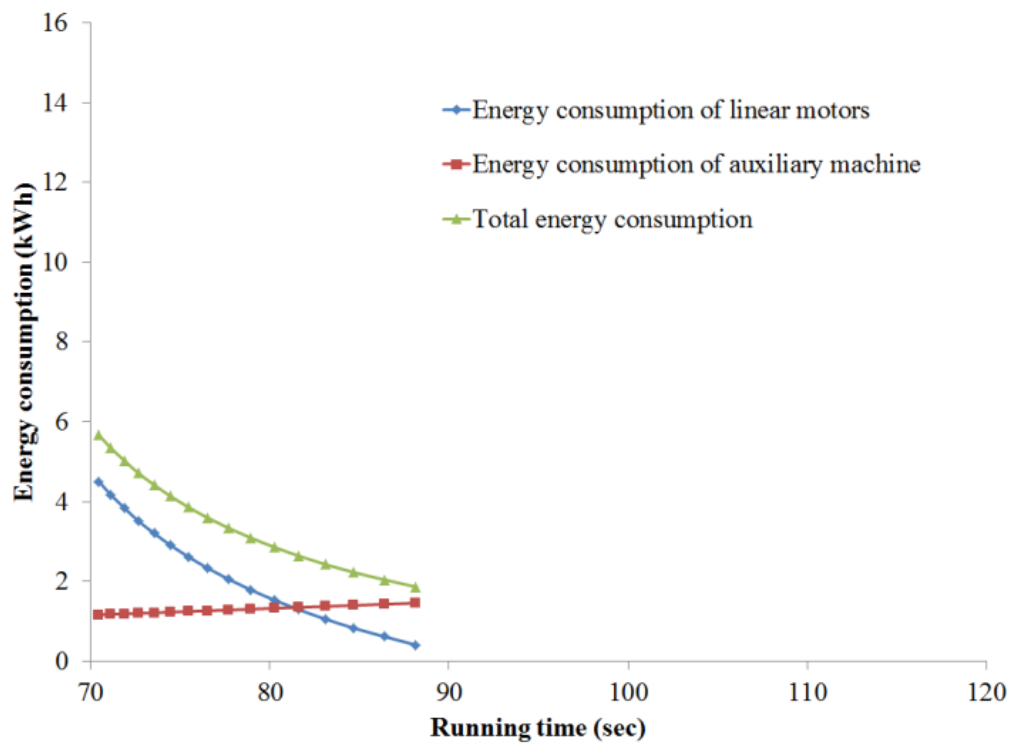


(b) 冬季

図 7-7 12.5%勾配での消費エネルギー量と走行時分の関係

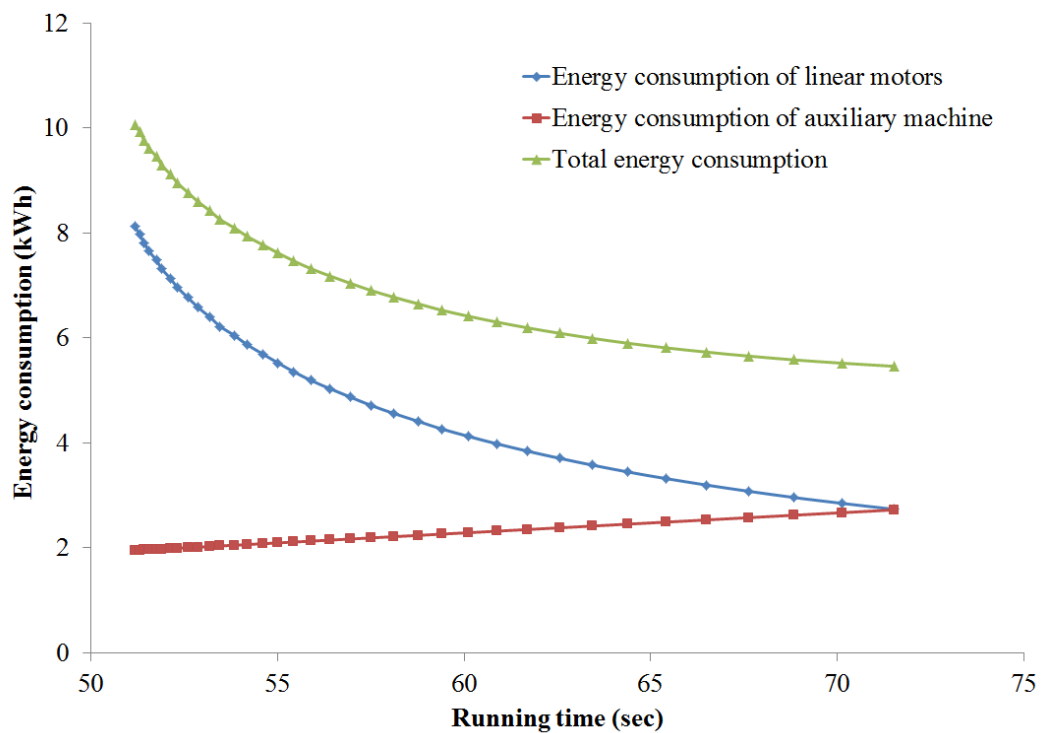


(a) 夏季

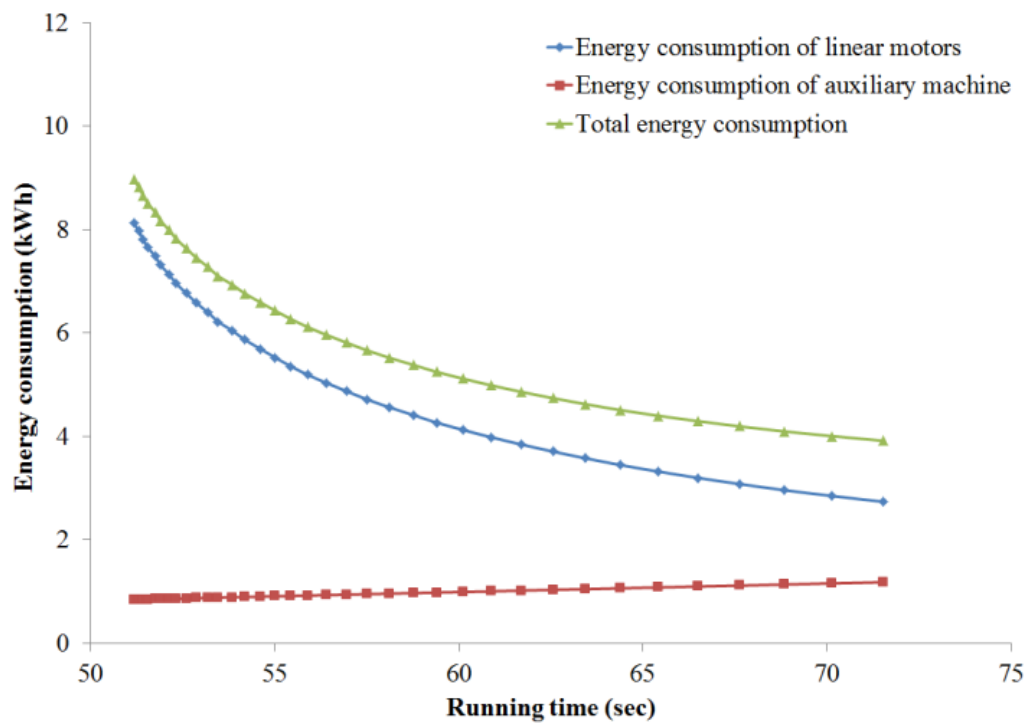


(b) 冬季

図 7-8 -12.5‰勾配での消費エネルギー量と走行時分の関係



(a) 夏季



(b) 冬季

図 7-9 実路線での消費エネルギー量と走行時分の関係

7.4. 得られた知見のまとめ

本章では、補機の電力が一定であれば、その影響を考慮しても一般的な運行管理の中において消費エネルギーと走行時分の間にはトレードオフの関係にあることを明らかにした。そして等増分消費エネルギー則の適用に際して補機電力の時間的推移がある場合には電動機の消費エネルギーを最小にする解と電動機と補機を合わせた消費エネルギーを最小にする解が一致しないため制約条件を追加して最適化問題を考える必要がある。

第 7 章 参考文献

- (1) Y. V. Bocharnikov, A. M. Tobias, C. Roberts, "Reduction of Train and Net Energy Consumption Using Genetic Algorithms for Trajectory Optimisation," Railway Traction Systems (RTS 2010), IET Conference, 2010.
- (2) 宮武昌史：“省エネルギーな列車ダイヤ作成のための簡易数理モデル”，電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 6, pp. 860-861, 2011
- (3) Takafumi Koseki, Yuto Takahashi, and Zhe Yang, “Energy-Saving Operation of an Electric Train at Multiple Service Section Based on Sensitivity Analysis of Energy Consumption to Running Time”, ICEMS2012, October 2012, Sapporo, Japan
- (4) Takafumi KOSEKI and Takashi NODA: “Run-Curve Design for Energy Saving Operation in a Modern DC-Electrification, ”Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 3 (2010) No. 1, pp.349-357

8. 現車試験による省エネルギー運転手法の効果の検証

8.1. 現車試験の目的

2.1.2 で述べたように、回生電力を利用して大きな省エネルギー効果が得られる可能性があるにもかかわらず、その本来の性能が十分に発揮されていないのが現状である。これらの対策として回生変電所や蓄電装置の利用などが研究されているが、このようなハードウェアの改造を必要とせず、運転方法を工夫することによって回生電力の効率的な利用を実現し、省エネルギー効果が得られることが知られている⁽¹⁾。そこで筆者らは他車が効率的に回生電力を利用できるように、5 章で述べた運転曲線の最適化研究の成果として知られている最大力行、惰行、最大制動という考え方に高速域で弱いブレーキを積極的に用いる電力制限回生ブレーキを考案し、周囲の列車状況を把握できないという一般的な条件下で回生時に架線電圧を抑制し、回生絞り込みを回避することを目的とした現車試験を行った。

また、本論文での省エネルギー運転手法は一般的な運転操作とは異なり徐々にブレーキを強めていく操作である。このようなブレーキ操作は新幹線で見ることができると聞くと、最高速度が大きく駅間の長い新幹線では省エネルギーとは別の理由でそのような操作は自然であり、また ATC の存在が最悪の場合でも行き過ぎによる危険性から列車を防護しているという安心感もあろう。これに対し本論文で対象としている路線は都市鉄道で駅間が短いため、そのような操作が本来困難であるが、そのような状況においてもマニュアル運転で省エネルギー運転が実現できるように運転士に運転支援を行うことに特徴がある。

ここで、支援指示からブレーキの立ち上がりまでに遅延が生じるため、この操作遅延を考慮した運転支援アルゴリズムを実装して成果を得た。本論文手法は運転操作系に直接関与しないため安全性は確保されており、さらに列車は位置と速度で管理していることから、アドオンで既存車両に適用可能であり、低コストで実現可能である。

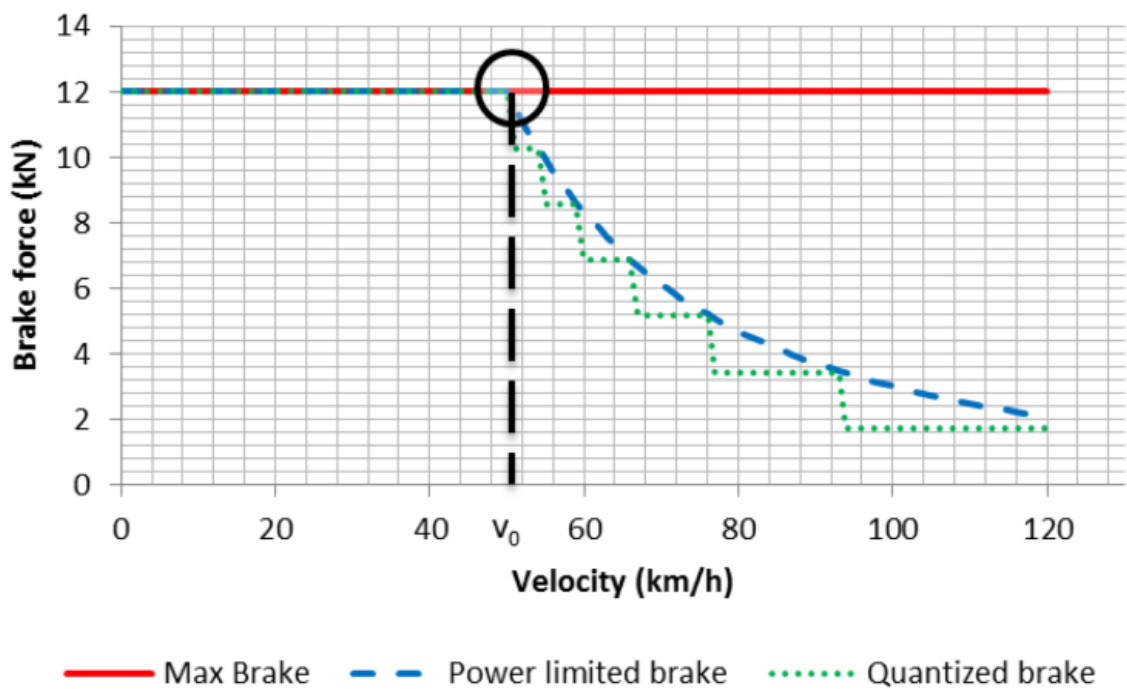
8.2. 省エネルギー運転と運転支援システム

8.2.1. 検証する省エネルギー運転パターン

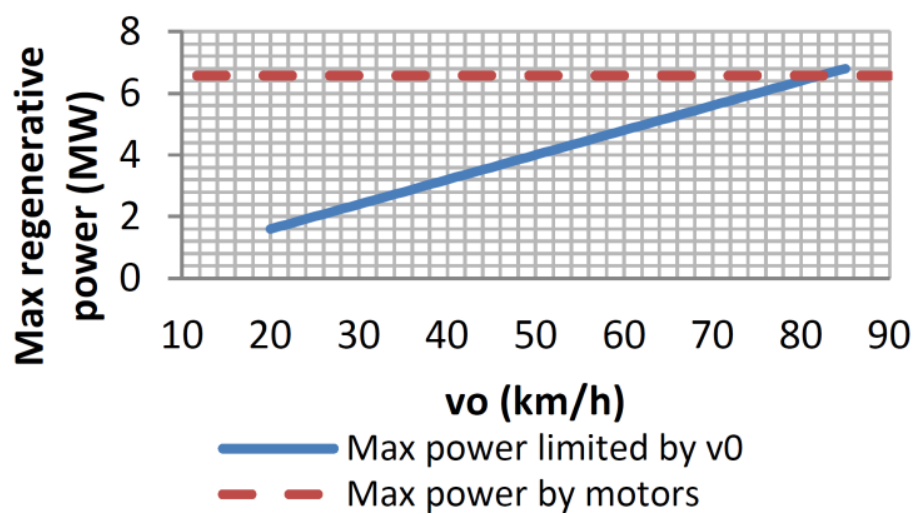
6.2 で述べた 2 つの運転手法について、どちらが省エネルギー効果が大きいのかを比べると、6.4 での結果から回生失効しない場合では(Ⅱ)の運転手法のほうが、省エネルギー効果が大きいことがわかった。そこで本現車試験では、周囲の列車状況を把握できないという一般的な条件下で、1 列車ができる最大限の省エネルギー効果を狙い、機械ブレーキを立ち上げず、回生ブレーキで多くの制動力を得る運転手法によって得られた成果と課題を報告する。

8.2.2. 回生電力有効活用のための電力制限回生ブレーキ

本現車試験の目的は電空協調ブレーキの機械ブレーキを立ち上げずに、できるだけ回生ブレーキだけで制動すること、つまり運転士に回生性能曲線に沿ってブレーキをかける操作を実行してもらうことである。図 2-3 の回生ブレーキの制動力と速度の関係を見れば、高速域で回生ブレーキを利用し、かつ強い制動力を得ようとすれば非常に大きな回生電力を生み出していることがわかる。したがって、筆者らは機械ブレーキを立ち上げずに回生ブレーキだけで駅に止まるという目的に加え、回生絞り込みを抑えるための工夫として図 8-1 の V_0 を小さくして最大パワーを抑えるブレーキ制動手法「電力制限回生ブレーキ」を考えた。図 8-1(b)によれば、 V_0 が大きければ回生電力が大きくなることがわかる。これだけでは完全に回生絞り込みや回生失効を防ぐことはできないが、周辺の列車と情報通信して路線状況などを把握することができない一般的な条件においては最大の効果を得るものである。そして、後に述べる運転支援のために、図 8-1(a)に示すようなブレーキを離散化したノッチ指令を考える。



(a) 電力制限回生ブレーキ



(b) 回生パワー出力

図 8-1 モータ性能とブレーキ力の関係⁽²⁾

8.2.3. 回生率の定義

本現車試験においては、2 章で述べた回生失効および回生絞り込みを最小限に抑えることを目的としている。そこで、本章では回生率を式(8-1)式で定義し、省エネルギー効果の評価指標として扱う。

$$\text{回生率} = \frac{\text{動力車の回生エネルギー}}{\text{編成全体のブレーキ制動エネルギー}} \times 100 \dots\dots (8-1)$$

8.3. 運転支援の提案

8.3.1. 省エネルギー運転の難しさ

一般的な運転士は、列車が次駅でオーバーランしないように惰行距離を縮めて早めに強いブレーキを掛けて速度を落とす運転方法を行う。しかし、省エネルギー運転で扱う電力制限回生ブレーキは高速域で早めに緩いブレーキをかけ、速度が低下すると徐々に強いブレーキを入れるという方法で一般的な操作方法とは大きく異なる。加えて、列車速度により回生制動力が異なるため運転士によるマニュアル運転では実現は難しい。そこで本論文では、ブレーキ制動時に速度制限があるような複雑な路線であっても、運転士のマニュアル操作で省エネルギー運転が実現できる運転支援手法を提案する。

8.3.2. 運転支援方法のための列車情報の取得

この運転支援では列車の速度、位置、走行時間、き電電圧をリアルタイムに収集している。そして、列車の将来の運転状態を比較的正確に推測し、運転士にノッチ操作の指示を出す。図 8-2 にリアルタイムに情報を収集するための車上装置を示す。

8.3.3. 支援意志の決定

本論文の支援意志の決定とは、車上装置でリアルタイムに収集した列車の走行情報から基準運転時分以内に駅に到着し、かつオーバーランすることなく駅に安全に停止するための最も緩いブレーキパターンを決定することである。この決定は迅速に行わなければならないため、予め支援開始位置での速度と残り時間に応じたブレーキパターンを複数用意し、速度と時間を index にした「ブレーキ辞書」を準備しておく。図 8-3 に準備した index データを示す。しかし、支援開始位置を多く設けるとデータ量が膨大になり迅速に意思決定ができなくなるため、支援開始位置は数カ所にとどめておく。しかしながら、支援開始位置を複数設定する理由は雨や風などの天候はじめ外乱要素による影響をその都度補正し駅の到着時間と停止位置を確実にするためである。



図 8-2 運転支援のための車載装置

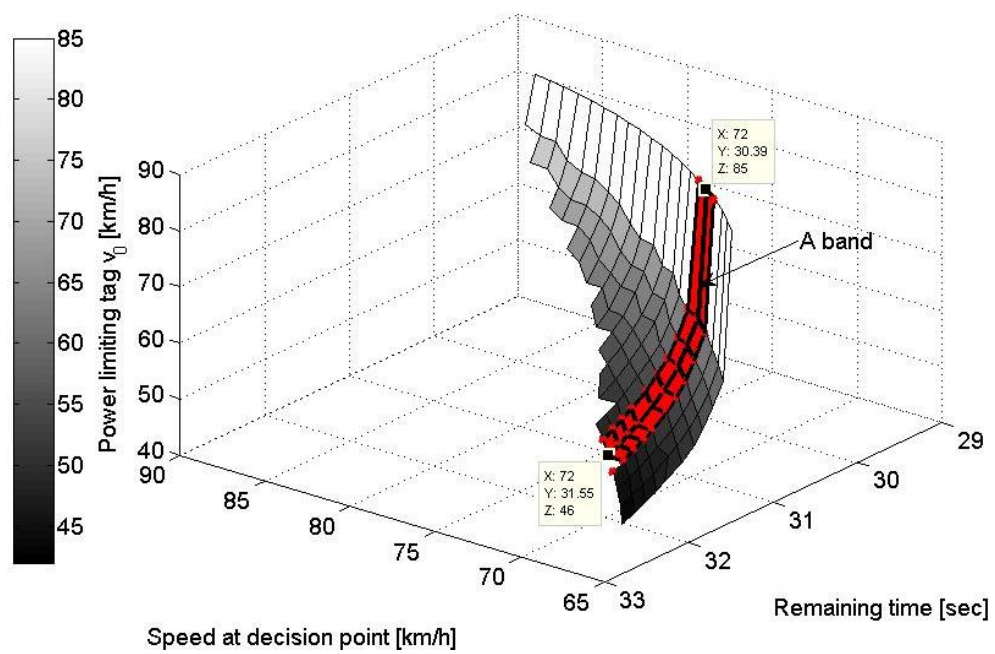


図 8-3 二次元ブレーキ辞書⁽²⁾

8.3.4. ブレーキ操作支援の方法

本論文でのブレーキ操作支援とは、決定したブレーキパターンに沿って列車を走らせるために、図 8-1 で離散化したブレーキノッチ操作を運転士に伝達することである。運転士が円滑に運転支援の指令を受け取ることができるように、できるだけ操作が簡単で、連続する操作には一定の間を開けるなどの工夫をした。そして、運転台の側に支援モニタを設置し、直感的にノッチ操作ができるようにした。また、音声スピーカからも雑音の中でも聞き取りやすい女性の声で指令を読み上げるようにし、ノッチ指令は普段の運転士の習慣に合わせ、ノッチ操作範囲の 3 段階に絞った。運転支援の様子を図 8-4 に示す。

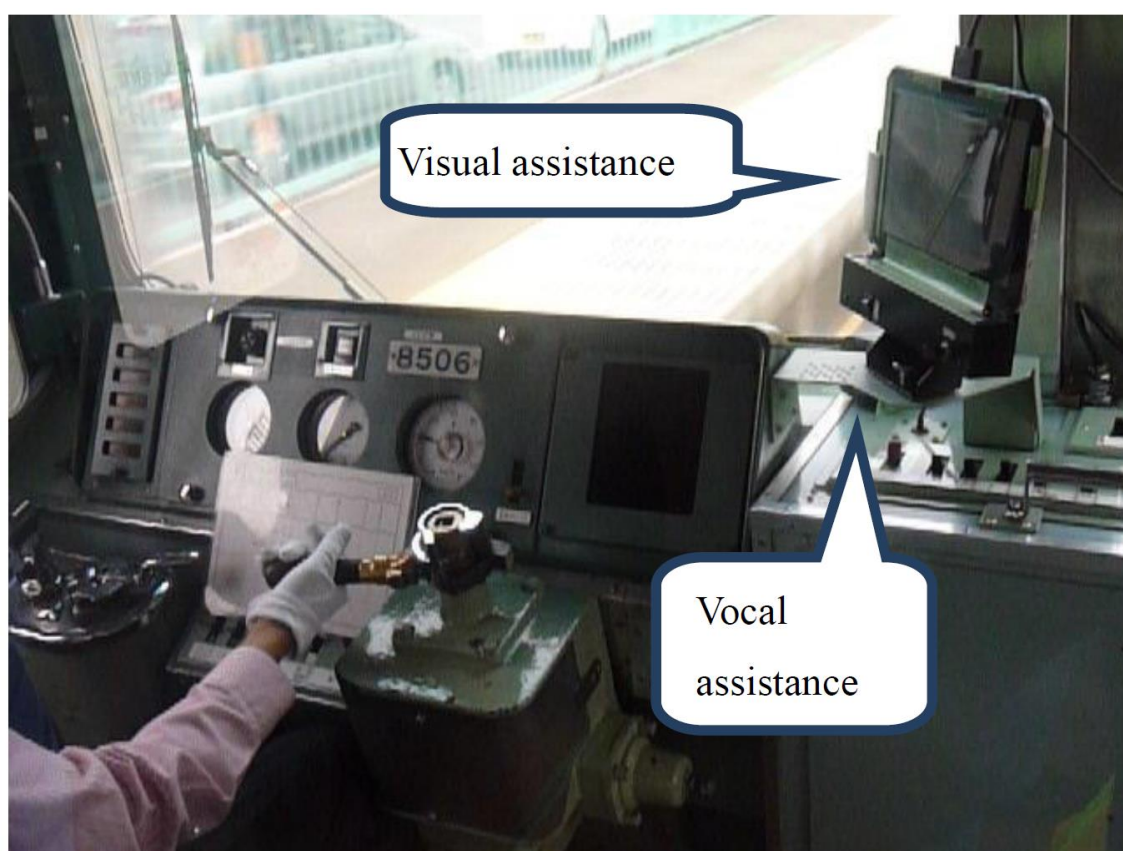


図 8-4 運転支援の様子

8.3.5. 操作遅延時間低減の工夫

列車の走行状態に応じて適切な指令信号を運転士に知らせても、その操作を実行するのは人の手であるため、コンピュータの判断から列車の駆動装置までの伝達に遅延時間が生じ、これが操作遅延時間となる。ブレーキ支援の長い区間では、この遅延時間により高速で走る列車では数十mの支援開始位置のずれが生じ、想定したブレーキパターンで走行できないことがあった⁽³⁾。そこで本論文では列車の反応時間に応じて支援指令を先読みし、運

転士に伝達する仕組みを取り入れた。支援先読みの手法を図 8-5 に示す。実際の列車速度と位置を測定し、その位置で計画時間より予め決めておいた遅延時間だけ先の計画速度を現在の速度と比較し、両者が一致するなら支援指令を送り運転支援を開始する。その支援指令の先読み機能により遅延時間の影響を抑え、列車を計画通りに走らせられるようにした。

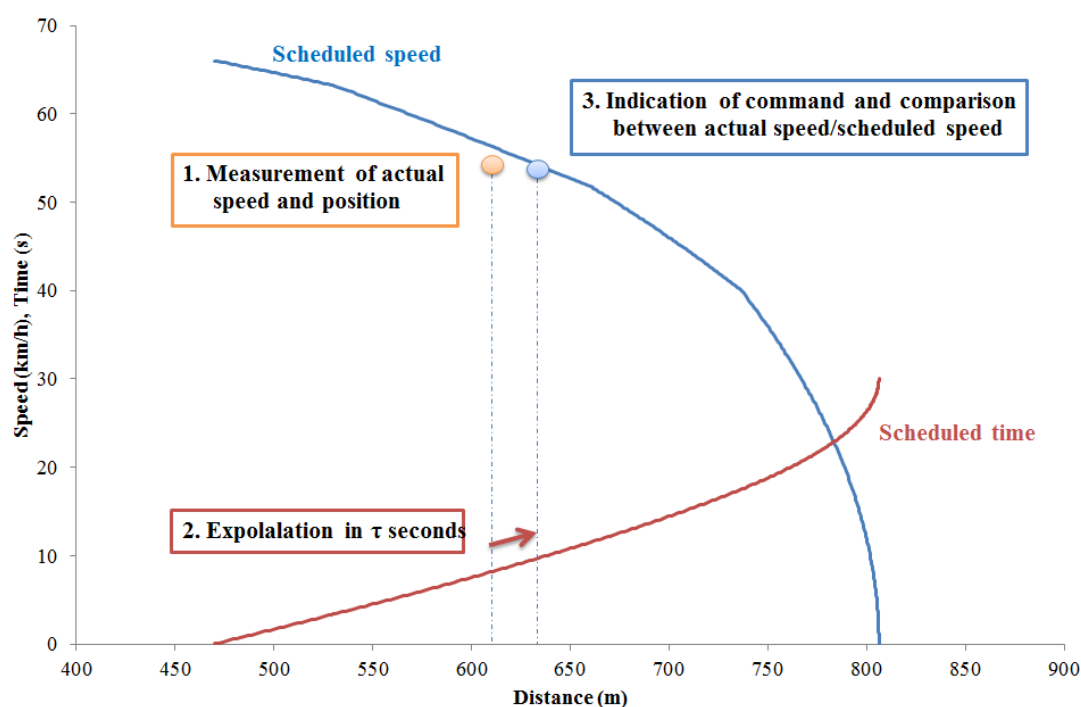


図 8-5 操作遅延低減のための先読み手法

8.3.6. 運転支援の安全性の確保

本現車試験の運転支援では安全面に十分な配慮をするために運転操作系に直接介入していない。本論文で開発した運転支援装置は設計思想としてアドオンで適用することを考えているため、電氣的・機械的に列車の制御系とは絶縁されており、また運転支援指示は運転士の操作への強制力は持たせず、運転操作を熟知している運転士に操作の最終判断を委ねている。また、支援指令のブレーキ力を最大の 70% とし、支援指令で停止位置に止まることができない不測の事態に備えてより強いブレーキ力を温存した。

8.4. 基本的な電力制限制動支援とその効果の実証

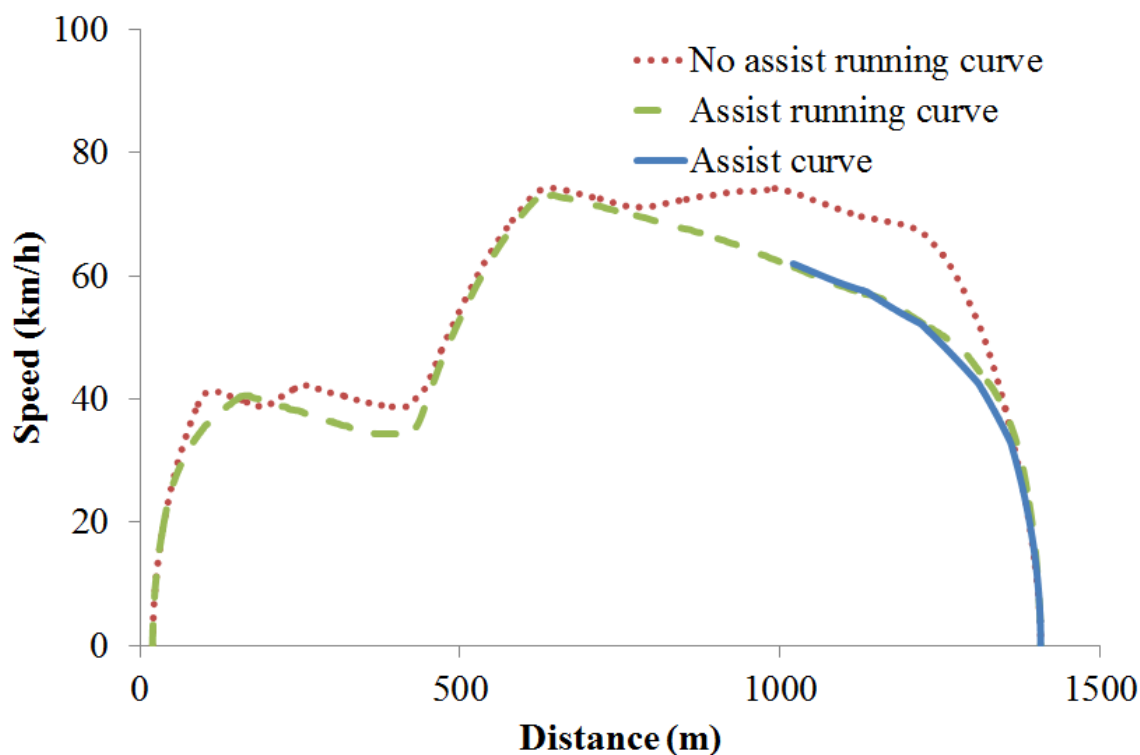
8.4.1. 試験環境

筆者らは、新京成電鉄の新津田沼駅-前原駅間において現車試験を行い、比較的単調なブレーキパターンの省エネルギー運転を運転士によるマニュアル操作で実現する運転支援の

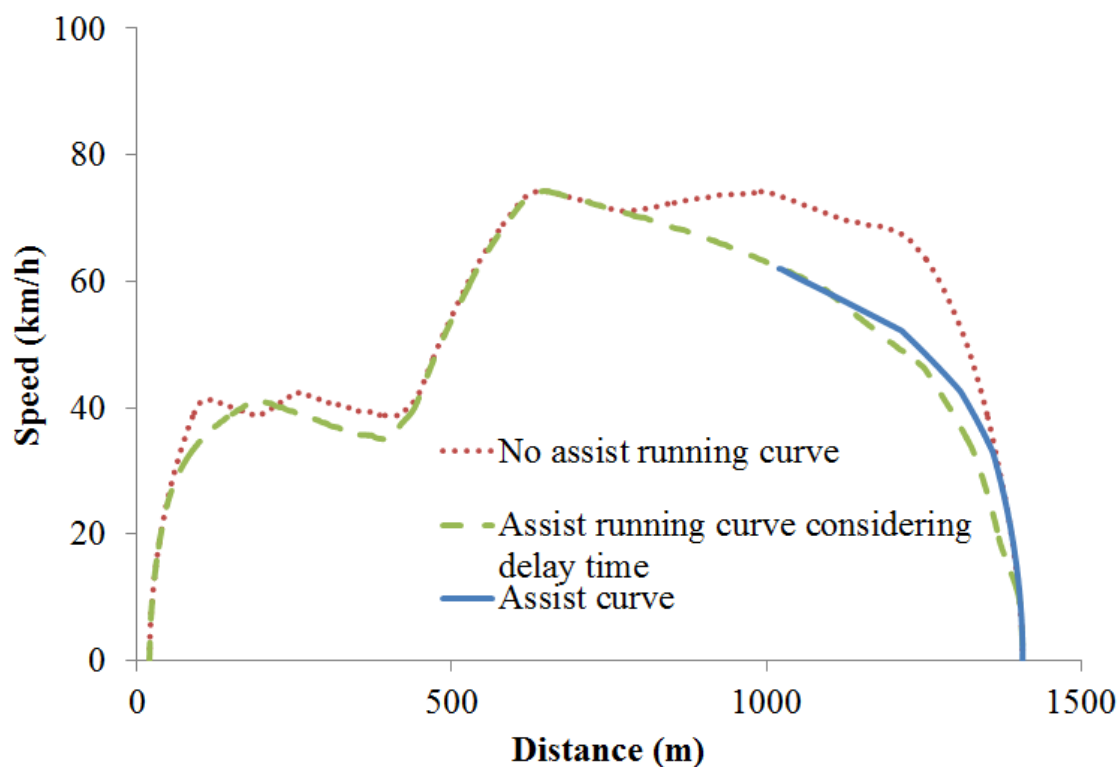
効果を検証した。なお、試験車両がセルフラップ式ブレーキハンドルという特徴に合わせて支援モニタは扇型の図を表示するようにした。

8.4.2. 運転曲線で見える運転支援の効果

図 8-6 に運転士が平常通り運転した時の運転曲線と(a)に運転支援を行った場合の運転曲線、(b)に操作遅延を考慮した運転支援を行った場合の運転曲線ならびに支援曲線を示す。横軸の距離は営業キロである。支援した運転曲線では、支援なしの運転曲線に比べて制動時に緩いブレーキをかけており、特に(b)の操作遅延を考慮した運転支援では支援曲線より膨らむことなく確実な制動が得られている。図 8-7 の(a)(b)(c)で運転士が平常通り運転した時、運転支援を行った時、操作遅延を考慮した運転支援を行った時のブレーキパワー、架線電圧を比較した。図 8-7(a)の 1200m 付近を見ると制動パワーが大きく、回生絞り込みにより機械ブレーキが大きく立ち上がっている。一方で図 8-7 の特に(c)を見ると、制動パワーが小さく抑えられ、架線電圧上昇が抑制されていることで有効な回生が得られている。

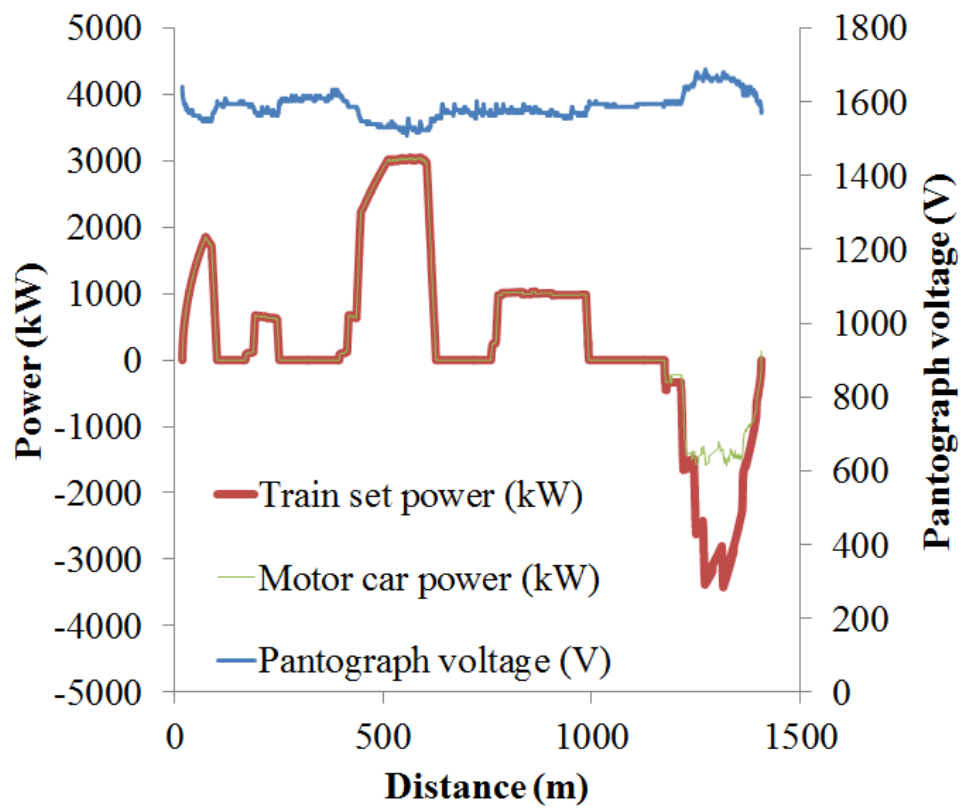


(a) 通常運転の運転曲線と操作遅延を考慮していない運転支援による運転曲線

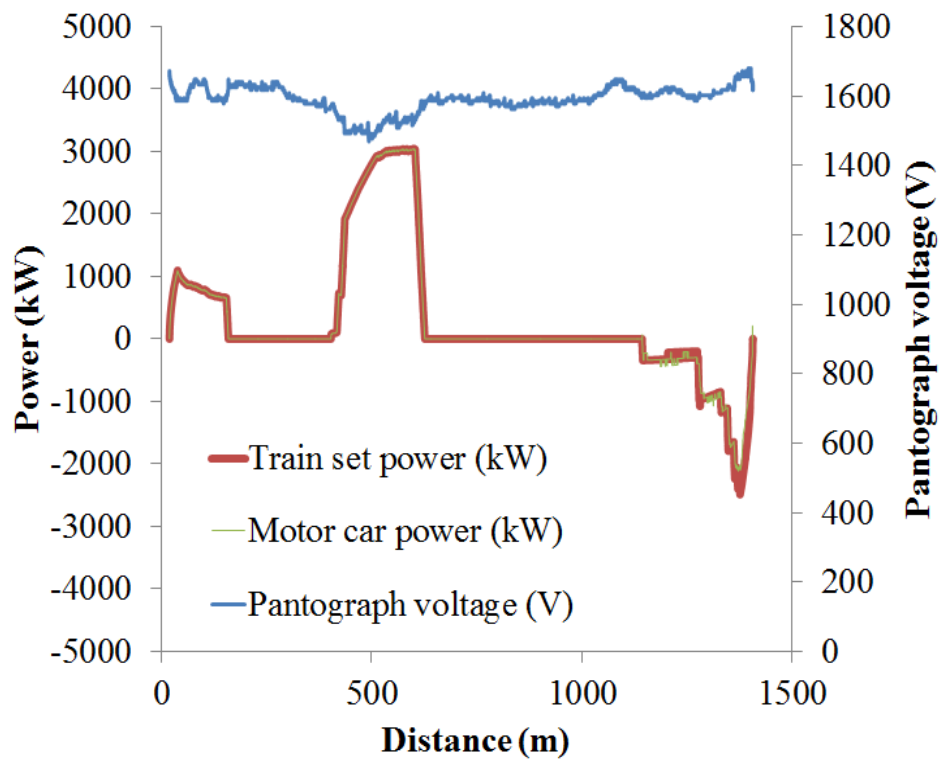


(b) 通常運転の運転曲線と、操作遅延を考慮した運転支援による運転曲線

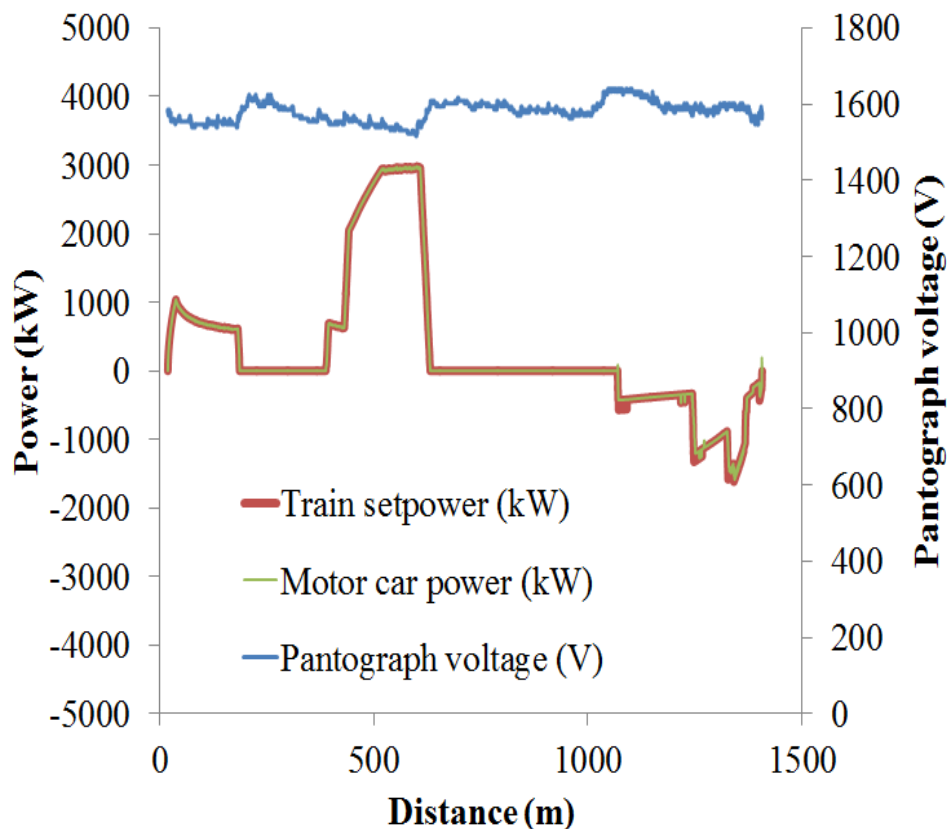
図 8-6 通常の走行区間での運転曲線



(a) 通常運転



(b) 操作遅延を考慮していない運転支援による運転



(c) 操作遅延を考慮した運転支援による運転
図.8-7. ブレーキパワーとパンタ点電圧

8.4.3. 走行時分と回生率で見る運転支援の効果

表 8-1 を見ると、走行時分は基準運転時分内に収まっている。単調な制動区間での支援運転では回生率が 28.71% 上昇し、さらに実験的に明らかになった操作遅延による影響を解決する先読み手法を実装した結果、回生率は 37.51% 上昇し、省エネルギーに有効であることを確認した。また、その回生率の大きさから、機械ブレーキの負担が小さくなっていることもわかる。これにより省エネルギー化だけでなくメンテナンス低減にも貢献していることが言える。

8.5. 複雑な制動区間に強い速度制限のある制動支援とその問題点の解決

8.5.1. 試験環境

次に、同じく新京成電鉄の路線で制動支援区間に速度制限があり、急カーブもある走行条件が最も厳しい北初富駅-くぬぎ山駅間において現車試験を行い、制動-惰行-制動という複雑なブレーキパターンでの運転支援の効果を検証した。

8.5.2. 安全な停止に向けた運転支援曲線

この区間では駅に停止する直前に速度制限があり、先行研究^③では、いきなり強いブレーキノッチを入れる 1STEP 操作では安全な停止が難しいという結果を得ていた。そこで 15500m 付近の最後のブレーキ操作では強い制動の前に必ず一段階緩いブレーキノッチを入れる 2STEP 操作を入れた。図 8-8 に運転支援曲線と支援するノッチ操作を示す。この工夫は省エネルギー運転の効果を限定的にするが、本論文の目的である複雑な路線でも安全に運転支援ができることを実証し、多少なりとも省エネルギー効果が得られることを検証するために取り組んだ。

Table 8-1. Results of on-board test under normal course.

Assistance pattern	No assistance	Assist	Assist considering delay time
Running time [sec]	106	113	119
Acceleration energy [kWh]	16.54	13.00	13.45
Braking energy [kWh]	-9.48	-6.21	-6.38
Regenerative energy [kWh]	-5.60	-5.45	-6.17
Percentage of regeneration [%]	59.05	87.76	96.56

Basic running time is 120s.

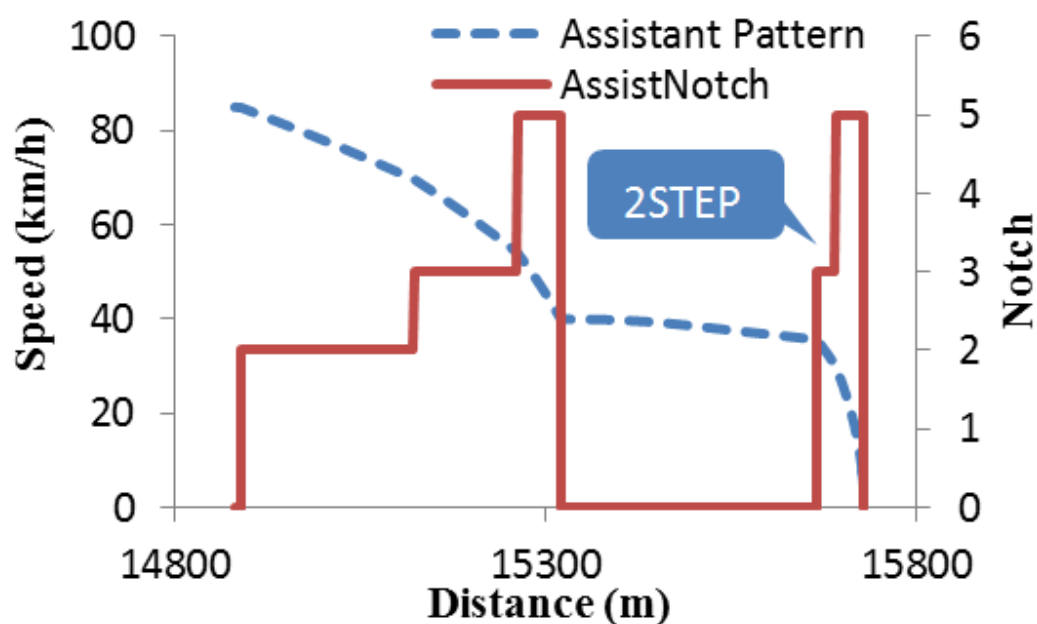


図 8-8 支援曲線と支援したノッチ操作

8.5.3. 運転曲線で見える運転支援の効果

図 8-9 に運転士が平常通り運転した時の運転曲線、操作遅延を考慮した運転支援を行った場合の運転曲線ならびに支援曲線を示す。支援した運転曲線では、支援なしの運転曲線に比べて早く加速して時間を稼ぎ、制動時は早くブレーキをかけ始めている。その結果、表 2 にあるように基準走行時分とほぼ同じ時間で運行でき、駅の停止位置で正確に停車できていることがわかる。また、14400m 付近と 15200m 付近の速度制限にも対応できており、この運転支援は制限の多い複雑な路線にも対応できていることがわかる。

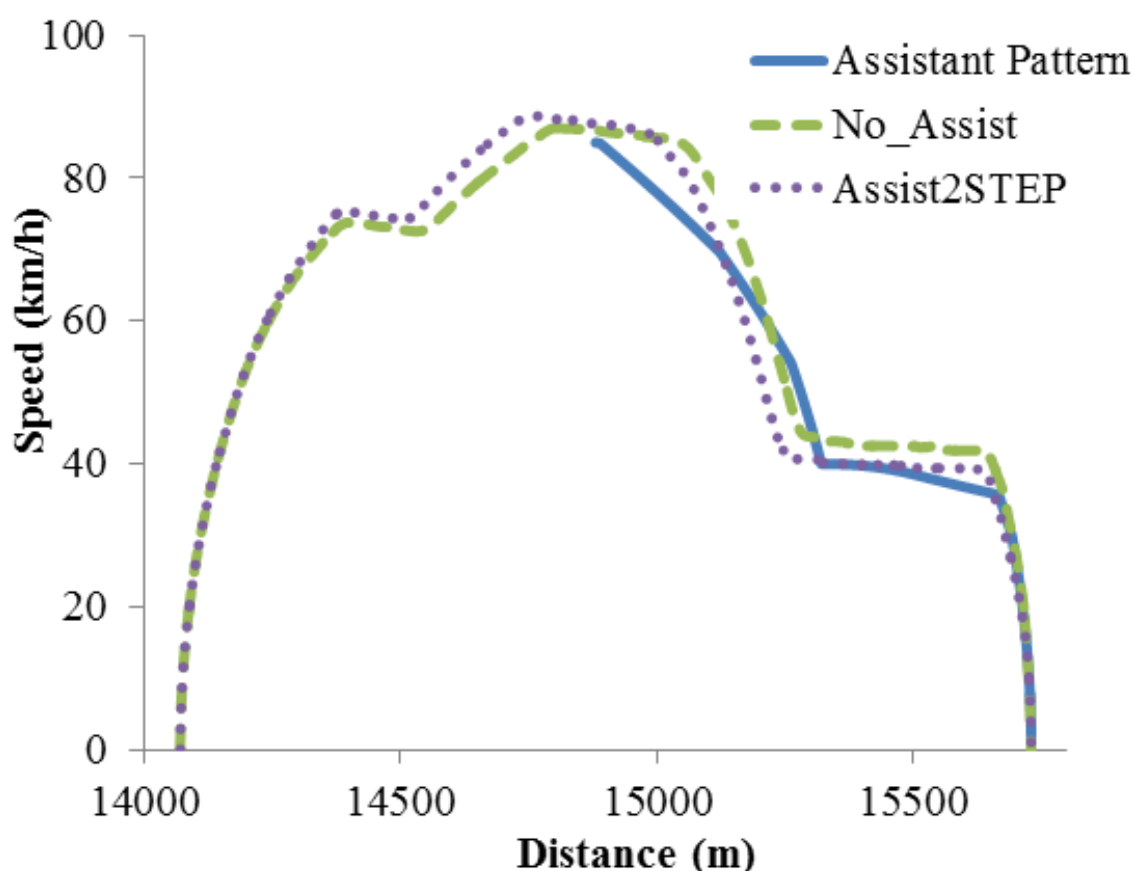


図 8-9 特殊な走行区間での通常の運転曲線と操作遅延を考慮した運転支援による運転曲線

8.5.4. 省エネルギー運転支援と運転士の操作の比較

本論文では周囲の列車状況を把握できないという一般的な条件下において、その電車の出来る最大限の省エネルギー効果を狙った試験を試みている。表 8-2 に現車試験の消費エネルギー、回生エネルギー、回生率を示す。この表を見ると回生率が 4.52%、11.13% 低くなつたが、前回の 1 STEP 制動よりも走行時分は通常時に近づいている。

図 8-10 は実際に扱われたノッチ操作である。図 5 と比較すると、駅到着前の 5 ノッチが扱われていないが、計画時分よりに余裕があったために運転士が強いノッチ操作を避けたものとみられる。結果、筆者らの支援が実際の運転に支障のないことが実証された。

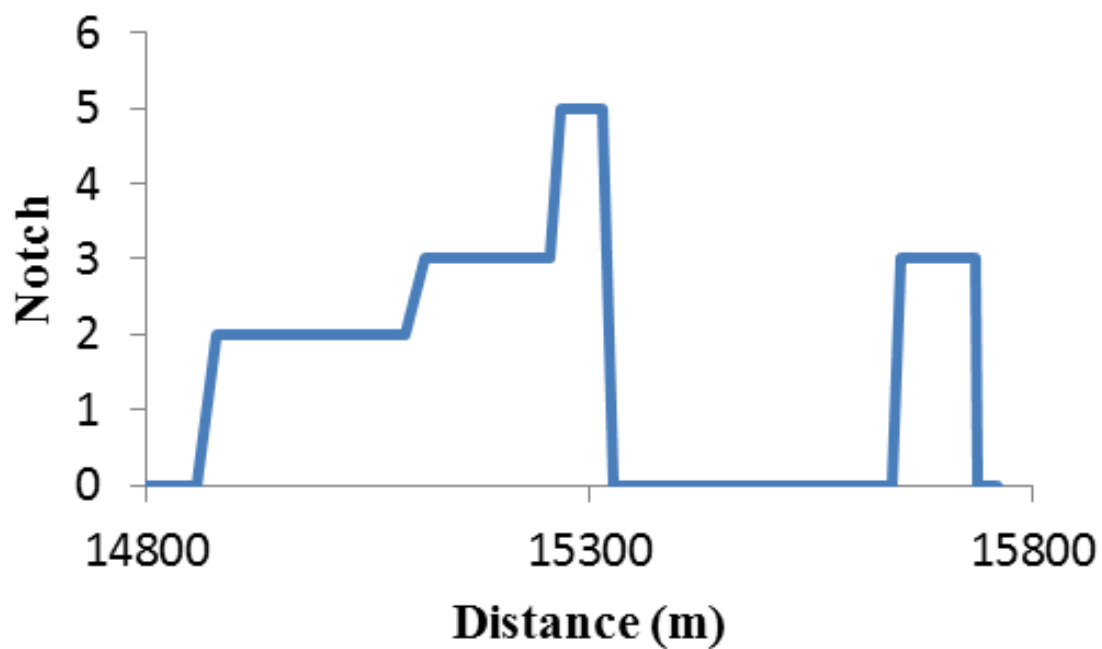


図 8-10 実際のノッチ操作

Table 8-2. Results of on-board test under normal course.

Assistance pattern	No assistance	Assistance 1STEP	Assistance 2STEP
Running time [sec]	114	118	115.6
Acceleration energy [kWh]	18.02	17.01	18.45
Braking energy [kWh]	-14.64	-13.84	-15.03
Regenerative energy [kWh]	-10.50	-9.31	-9.10
Percentage of regeneration [%]	71.70	67.28	60.57

Basic running time is 124s.

8.5.5. ブレーキ指令とパンタ点電圧の変化

より詳しく結果を考察するためにブレーキ指令とパンタ点電圧に注目する。図 8-11 に通常時と 2STEP 運転支援時の編成全体のブレーキパワーと回生ブレーキパワー、パンタ点電圧の変化を示す。横軸の距離は営業キロである。

(i)はじめの力行時

図 8-11 の(a)(b)を比較すると、まず図 8-11 (a)の力行時では架線電圧が 1300V まで減少しており、図 8-11 (b)と比較して 6.2%の差がある。これによりモータが早々に特性領域に入り、力行に強い引張力が発揮できなかったことがわかる。

(ii)2 回目の力行時

次に、再力行時の場面を見ると、この時点でも図 8-11 (b)の運転支援時より図 8-11 (a)の支援なしの方が、架線電圧が低くなっている。同じく図 8-11 (a)(b)の架線電圧を比較すると 8.5%の差がある。

(iii)惰行の時

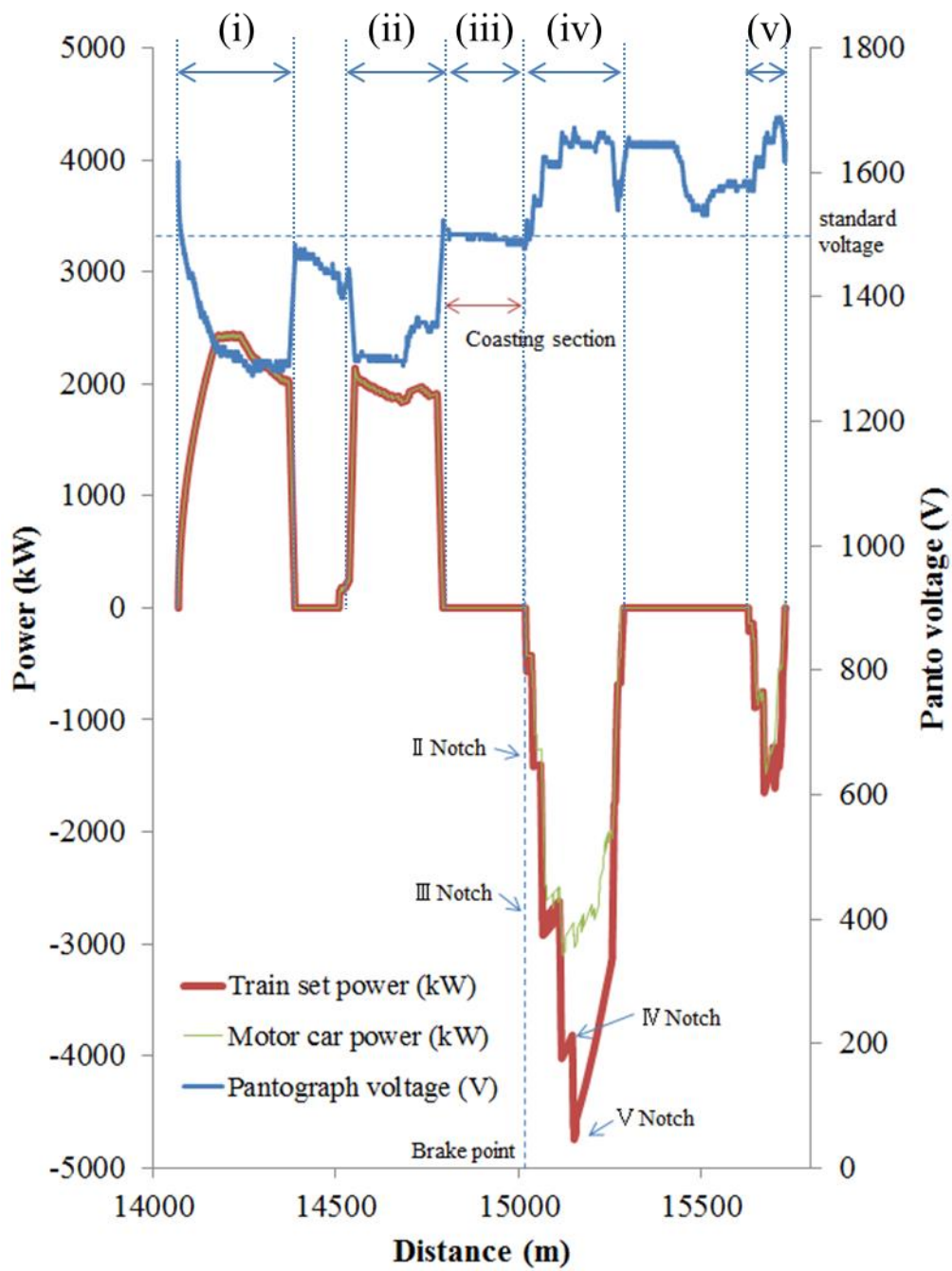
図 8-11 (a)を見ると架線電圧は標準電圧の 1500V に落ち着いている。一方図 8-11 (b)を見ると、列車が力行から惰行に入ると架線電圧が 1600V まで上昇しており、周囲に回生制動車が走行していることがわかる。したがって、図 8-11 (b)の試験時において支援車両は力行時に回生電力を受けて走行していたと推察される。また、支援車両が惰行に入ってから架線電圧が徐々に減少していることに注目すると、周囲の回生車は回生絞り込みもしくは低速度まで減速したものと考えられる。

(iv)はじめの制動時

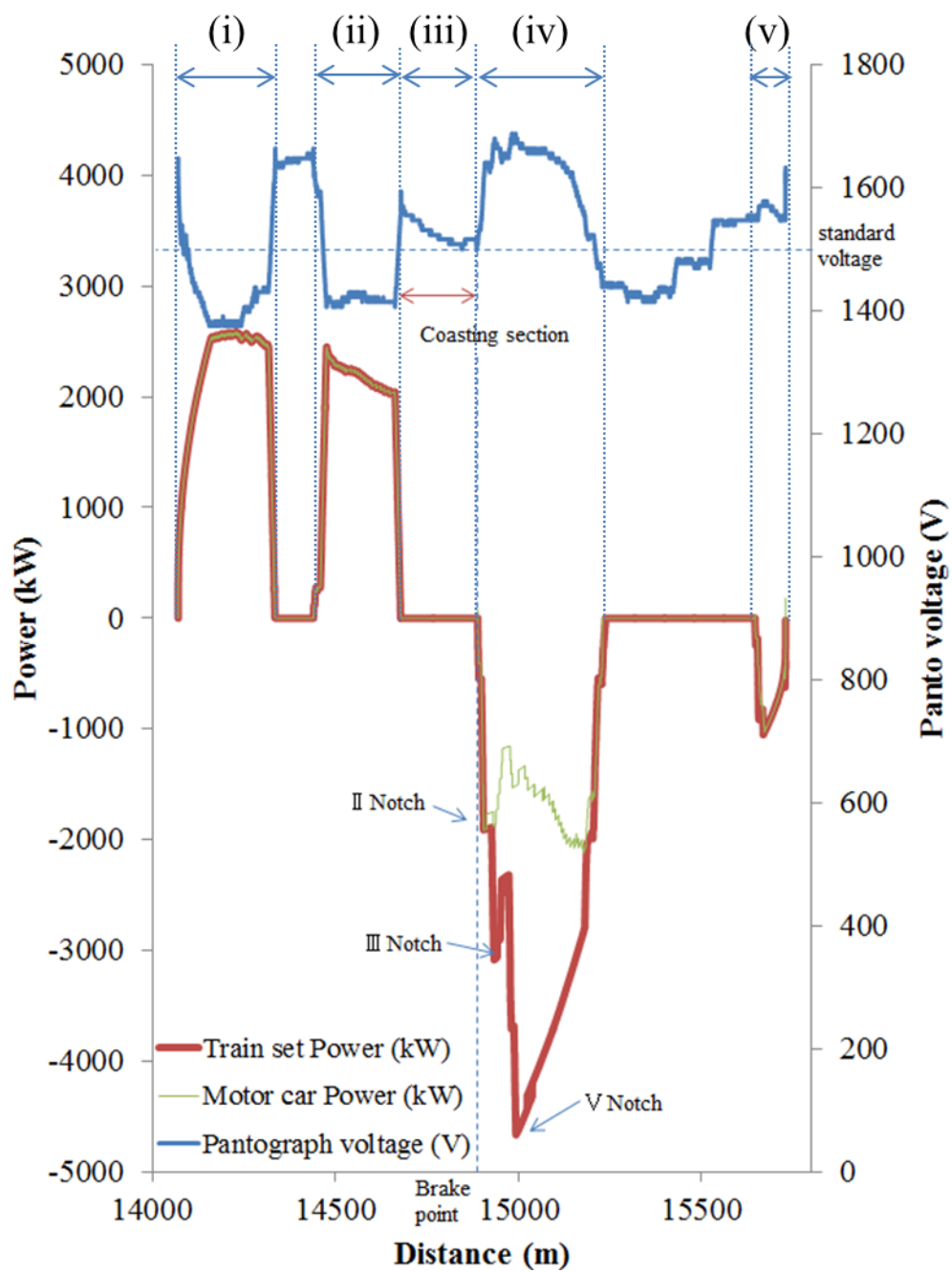
最初の制動は列車が急カーブに差し掛かるために速度制限まで減速している状態である。ここは最も速い速度で回生ブレーキが働くところである。図 8-11 (a)では 4820kW のブレーキパワーが生じているが、図 8-11 (b)では図 8-11 (a)に比べて速度が速いにもかかわらずそのブレーキパワーの大きさは図 8-11 (a)より 10.3% 小さく抑えられている。ここで架線電圧を見ると、ブレーキ開始位置では図 8-11 (a)では 1475V なのに対し、図 8-11 (b)では 1510V と 2.4%高くなっている。図 8-11 (a)ではブレーキノッチを 2 ノッチから 3 ノッチに上げても架線電圧が 1600V であるため回生制動を得られているが、一方架線電圧の高い図 8-11 (b)では架線電圧が急上昇し、周囲の回生負荷が小さいことが確認できる。したがって、ブレーキノッチを 2 ノッチから 3 ノッチに上げると図 8-11 (a)とは異なり回生絞り込みが始まっている。

(v)最後の制動時

最後の制動は到着駅で停車する制動である。ここでは 2STEP 制動を導入するために手前から 3 ノッチのブレーキをかけるよう支援されていた。図 8-11 (a)を見ると、架線電圧は 1580V で、この時の制動はほぼ回生ブレーキが負担している。同じく図 8-11 (b)でもまた、架線電圧の上昇も抑えられており、回生ブレーキによる制動が得られている。



(a) 通常運転



(b) 2STEP 支援

図 8-11 それぞれの運転におけるブレーキパワーとパンタ点電圧

8.5.6. 回生率の評価

表 8-2 の回生率を見ると、運転支援を行った時に比べて支援をしなかった時のほうが回生率が高くなっている。これは図 8-8、8-10 を比較してわかるように、運転支援自体は成功しているものの、図 8-11 (a)(b)での分析から周囲の回生負荷が小さかったためである。

8.6. 現車試験で得られた知見とまとめ

省エネルギー効果と運転支援の実用性について、現車試験では運転支援システムによる電力制限回生ブレーキを用いた省エネルギー運転に操作遅延を考慮したことで、総走行時分を守りながら制動時の最大回生電力を抑制することができた。特に電力制限回生ブレーキが適用しにくい区間でも最大ブレーキパワーを 10.3%抑制することができた。

単調な制動区間での支援運転では回生率が 28.71%上昇し、さらに実験的に明らかになった操作遅延による影響を解決する先読み手法を実装した結果、回生率は 37.51%上昇し、省エネルギーに有効であることを確認した。

一方制動区間に速度制限があるような電力制限回生ブレーキが適用しにくい区間においては、運転士の慣習に合わせることで省エネルギー効果は理論的に限定的となるが、運転支援は成功し、意図通りのノッチ操作を実現することができた。そして、架線電圧とブレーキパワーの分析により周囲の回生負荷の状況の推測と回生絞り込みの原因を明らかにすることができた。

第 8 章 参考文献

- (1) 濱崎康宏：「新京成電鉄における省電力への取り組み」,鉄道車両と技術, No.196 ,pp.15 (2013)
 - (2) 楊哲, 渡邊翔一郎, 古関隆章 (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 濱崎康宏 (新京成電鉄), “直流電気鉄道の省電力運転のためのブレーキ力制御と運転支援の提案”, 日本機械学会第 19 回鉄道技術連合シンポジウム 2012 年 12 月, No.3416,東京
 - (3) Zhe YANG, Shoichiro WATANABE and Takafumi KOSEKI, Takeshi MIZUMA, Yasuhiro HAMAZAKI, “Theoretical and Experimental Studies on Braking Assistance for Energy-saving Train Operation with Effective Usage of Regenerative Brake”, Transportation and Electric Railway” and “Physical Sensor”, IEE Japan, TER-13-006, PHS-13-010, (2013)(in Japanese)
- 楊 哲, 渡邊翔一郎, 古関 隆章, 水間 毅, 濱崎 康宏:「回生有効活用で省エネルギーを図るブレーキ制御とその支援の実証研究」, 電気学会研究会資料 TER-13-006, PHS-13-010,2013

9. 列車群における省エネルギー運転と運行管理を見据えた電力ビ

ークの分析

8 章までは周囲の列車状況を把握できないという一般的な条件下で 1 列車ができる最大限の省エネルギー化を検討してきた。しかし、現車試験での実験を通じて電気鉄道の省エネルギー化にはエネルギーを評価するだけでなく電力も分析の対象に含め、さらに列車群の知的管理を通じた検討を行う必要があると考えた。そこで本章では運行管理を見据えた電力流を分析するための電力可視化と、省電力・省エネルギー化について分析を行った結果を報告する。

9.1. 電力可視化の提案

9.1.1. 電力を検討する意味

近年の車両の高性能化によって、列車の消費電力量は減少する傾向にあるが、一方で変電所のピーク電力は大きくなっている傾向にあり現在の変電所の大きさに収まっているのはパワーエレクトロニクス技術の、特に半導体デバイスの進歩の恩恵を受けていることが大きい。ピーク電力に対する変電所からの出力を減らす手段として蓄電池の応用などが挙げられているが、運転計画の段階であればダイヤを設計する際にこれらについて議論することは時間的にも可能である。

しかし、指令員が列車の運行管理を指示する場面においてはピーク電力の対策についての議論はなされていない。運行管理にあたって指令員が電力の流れを自然に意識でき、ピーク電力を抑制する考慮ができるよう支援を行うための基本技術として、本論文では列車群の電力可視化を提案する。

指令員の運行管理によって列車はダイヤで定められた通りに運転できているが、ダイヤが乱れた時に行われる運転整理では、ダイヤの復旧のみに焦点を当てているために力行のタイミングが重なりやすい。この点についても本章では議論することにする。

9.1.2. 電力可視化のモデル

列車 1 編成が走る運転モデルは 6.3 章で述べた(Ⅱ)の運転手法で得られた運転曲線を用いる。この理由は(Ⅱ)の運転手法は(Ⅰ)の運転手法に比べて電力の消費・回生が多いことに加え、回生失効しない場合では最も省エネルギーな走り方だからである。図 9-1 に(Ⅱ)の運転手法で駅間 2km を勾配なしで走った場合の、電力を可視化した運転曲線を示す。ここでは式(2-1)に習って電力を計算し、色で電力の大きさを示している。力行で色が濃いほど消費電力が大きく、制動で色が濃いほど回生電力が大きくなっていることを示している。

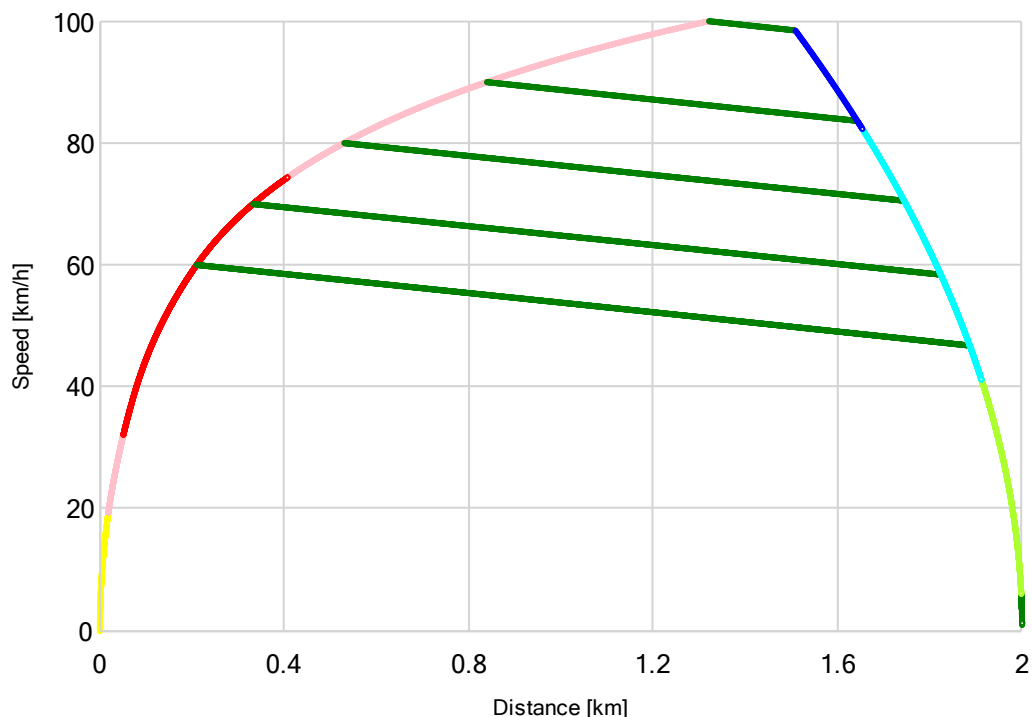


図 9-1 電力を可視化した運転曲線

9.1.3. 電力可視化のモデルからわかること

図 9-1 を見ると、消費電力のピークは列車が時速 50～80km/h に到達した時に生じ、回生電力のピークは回生を始めてから速度が 20km/h になる間で生じていることがわかる。消費電力のピークが高速域で生じないのは、ここで想定している電力制限制動法ではモータの特性領域で制動力を意図的に小さくして電力制限をかけているからである。

9.2. 運行管理と電力可視化

9.2.1. 電力可視化を運転整理に適用する意味

電力可視化ダイヤは指令員が運行管理をする上で、ダイヤのスジを引き直す作業の中で電力に留意することを促すために有用である。それはスジを引き直した時に、ダイヤを見てすぐにピーク電力がどの時間に来るかを予測できるからである。また、ピークが来る時間を予測出来れば、更にスジをずらして引き直すことも可能である。特に運転整理の業務では現在すべての調整業務が指令員によって手動で行われており⁽¹⁾、この負担を減らすためのコンピュータによる運転整理が研究されている。このコンピュータによる運転整理手法では近年小乱れであれば最適解を求められる成果が得られている⁽²⁾。そこで本章ではコンピュータでスジを引き直す場面に注目し、混合整数計画法を用いた運転整理手法に電力可視

化ダイヤを適用することを試みた。運行計画ダイヤとダイヤ乱れ時に運転整理を試みた運転整理ダイヤをそれぞれ図 9-2, 9-3 に示す。ここで図 9-3 では旅客流動を考慮した運転整理ダイヤになっている。

9.2.2. 電力可視化ダイヤへの適用と瞬間電力

運行管理に電力の視点を入れるために図 9-1 の運転曲線を利用し、図 9-2、9-3 のダイヤをベースとした電力可視化ダイヤを作成した。図 9-4、9-5 にそのダイヤを示す。ここでは、図 9-2、9-3 それぞれの駅間距離を各駅 1km、走行時分を 1/5 倍にしているが、混合整数計画法によって得られる解に影響しないことを確認している。赤色の濃さは消費電力の大きさを、青色の濃さは回生電力の大きさを示している。また、時間ごとに電力の大きさを示した図を図 9-6、9-7 に示す。これらの図にはダイヤ乱れの原因となった最初の遅延列車については考慮していない。

9.2.3. 運転整理時の電力可視化ダイヤでわかること

まず図 9-4 と図 9-6 を見ると、最大電力は周期的に現れている。これは図 9-2 の運行計画ダイヤがパターンダイヤであることに起因している。

次に図 9-5 と図 9-7 を見ると、列車の出発のタイミングが重なっているところで電力ピークが現れている。つまり、力行のタイミングが重なる車両の数がピークを考察する上で重要である。図 9-3 では同時刻に出発しているだけの情報しか得られないが図 9-5 のように電力を可視化することで電力ピークの立ち上がりが直感的に把握できるようになった。

ここで電力ピークの大きさを図 9-6 と図 9-7 で比較すると、消費電力は運転整理ダイヤの方が計画ダイヤより 50%大きく、回生電力の大きさも運転整理ダイヤの方が 33%大きくなっている。

次に図 9-5、9-7 の A の領域に示される、運転整理によりダイヤが詰まっている 500-700 秒近辺を見ると、電力の変動が大きい。これは運転整理により列車の運行間隔が詰まり、電力の消費と回生が頻繁に行われていることを意味している。

最後に、図 9-6、9-7 の B の領域に示される負の電力域を見ると、これらは本来回生電力として利用できる電力が失われている結果を表しており、つまりはこの時間では電空協調ブレーキでは回生絞り込みが行われ、機械ブレーキが立ち上がっている。よって、この領域の電力を減らすことが出来れば本論文の目的の一つである省エネルギー化も達成できる。

9.3. 第 9 章まとめ

本章では電力を可視化することで電力ピークが重なっていることを視覚的に示し、運転整理ダイヤが計画ダイヤに比べてピークが 50%高くなる原因に力行のタイミングが重なる力行車両の数があることを明らかにした。また、回生車についても同様の理由により回生電力ピークが運転整理ダイヤでは 33%高くなっていることを明らかにした。

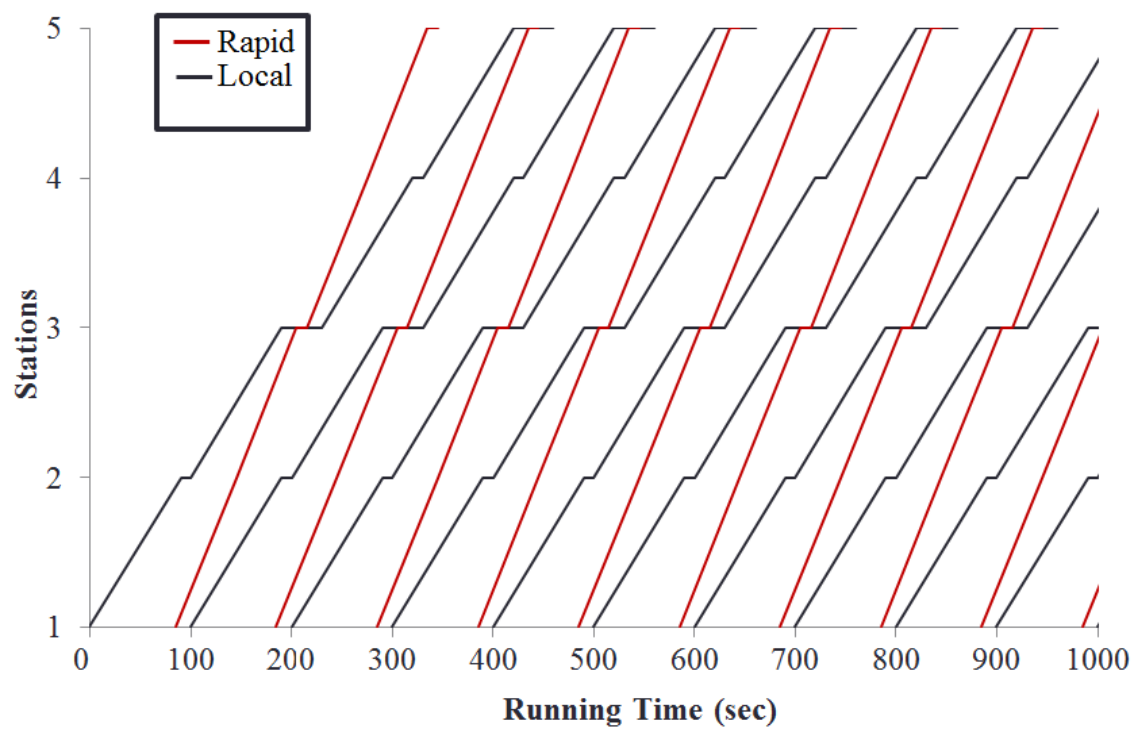


図 9-2 運行計画ダイヤ

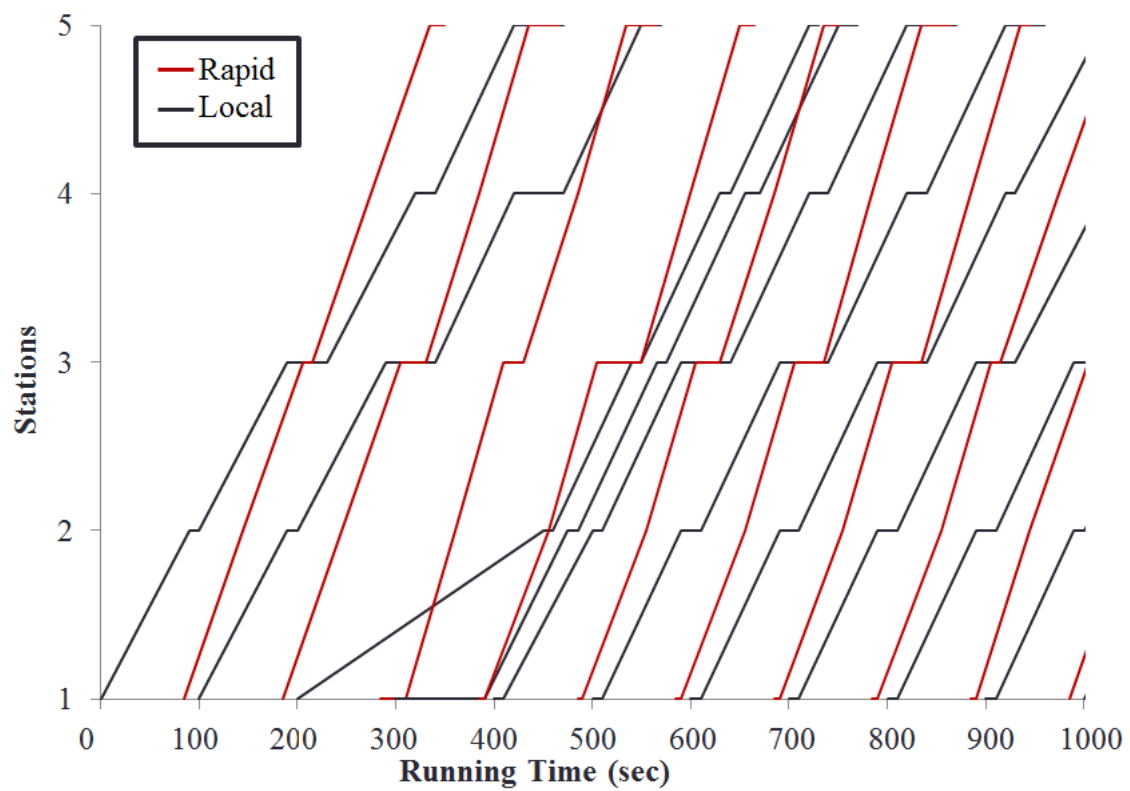


図 9-3 旅客流動を考慮した運転整理ダイヤ

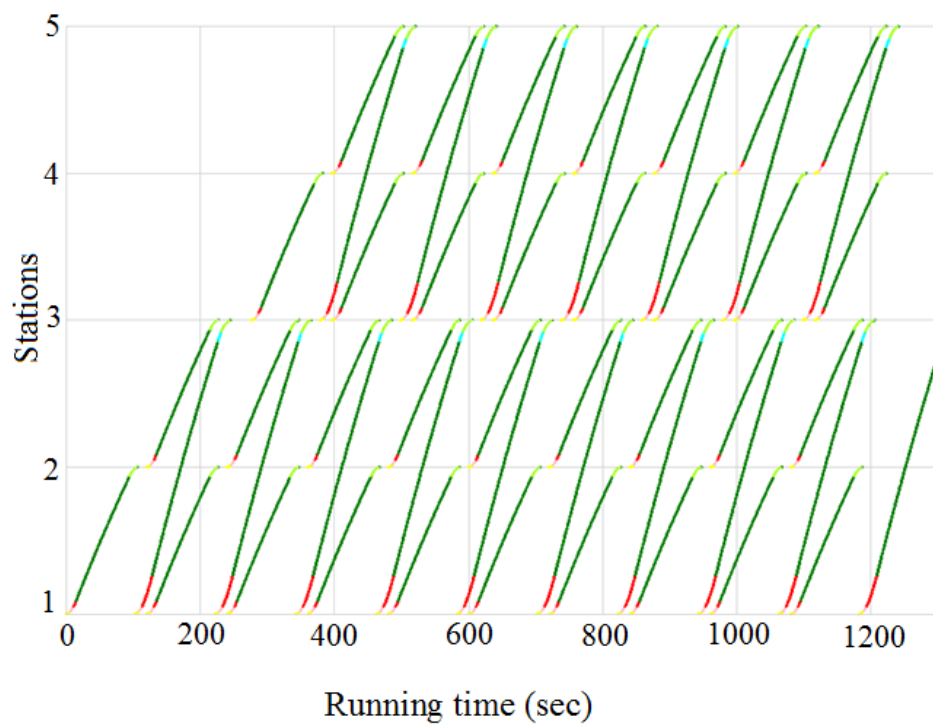


図 9-4 運行計画ダイヤの電力可視化

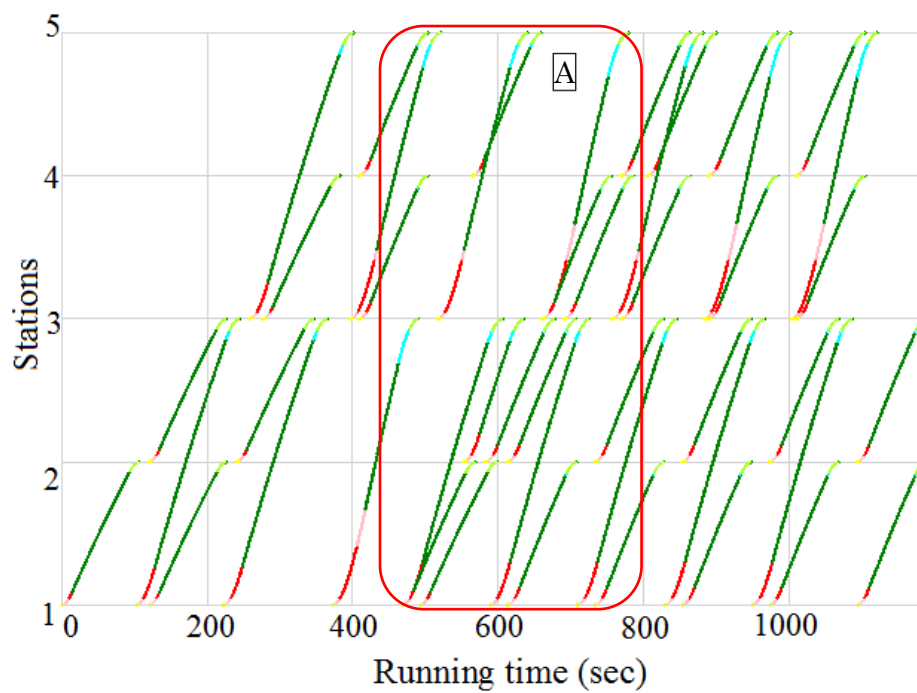


図 9-5 運転整理ダイヤの電力可視化

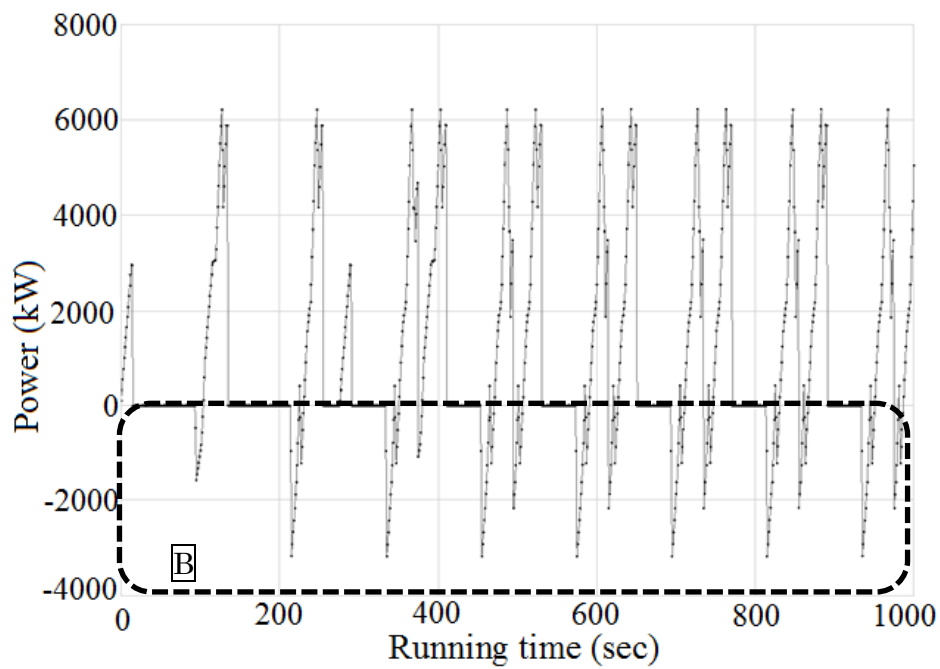
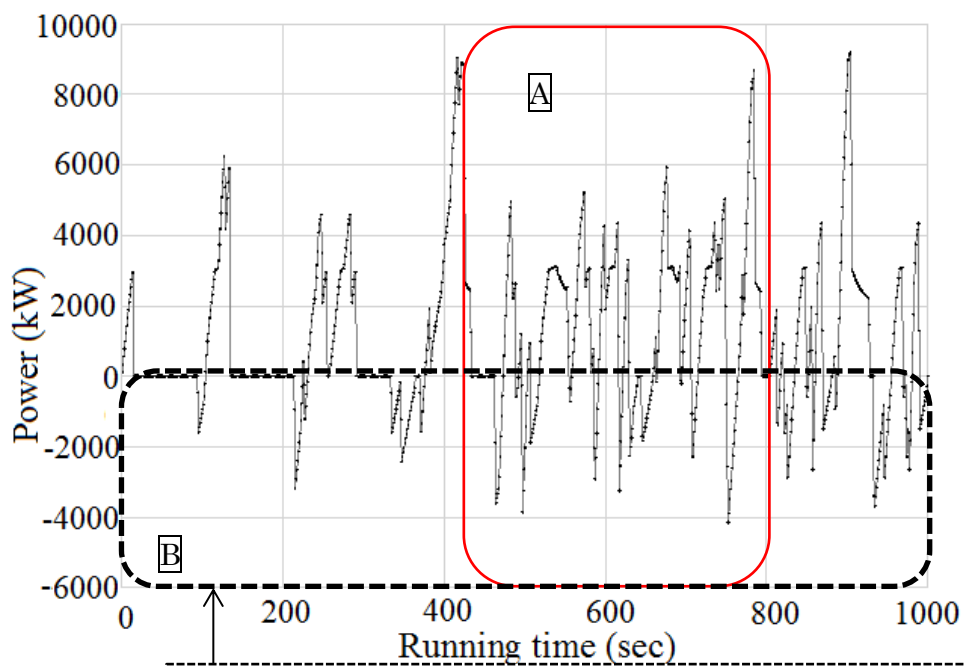


図 9-6 運行計画ダイヤの電力



The power in this rectangle has to be absorbed as mechanical braking heat loss if there are no active regenerating substations.

図 9-7 運転整理ダイヤの電力

第9章 参考文献

- (1) 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会編 “鉄道ダイヤ回復の技術” オーム社 平成 22 年 8 月
- (2) 森 拓哉、古関 隆章、“混合整数計画法を用いた方向別複々線の運転整理支援”、交通・電気鉄道/フィジカルセンサ合同研究会, 2013 年 3 月

10. 結論

本論文で得られた知見は次のとおりである。

10.1. 直流電気鉄道の力学・饋電回路モデルの構築と最適化

複雑な体系を成す鉄道の走行を計算するためのモデル構築法をまとめ、一般的な回電電動機車両だけでなくリニアモータ車両にも適用範囲を広げたシミュレータを開発した。これにより実路線の情報(曲線や勾配など)を反映した列車の運転曲線ならびに消費エネルギーが計算できるようになった。また駅間乗車人数の変動に応じて車両性能を変化させるアルゴリズムも実装し運行管理を見据えた数値解析ができるようにしている。また、数値解析の高速化と最適点の求解法についても考察した。

10.2. 省エネルギー運転手法の優位性の分析

過去の運転曲線の最適化研究の成果として知られている最大力行・惰行・最大制動の最大制動の部分に着目し、運行管理内で走行時分を守った列車の省エネルギーな走り方を 2 つ挙げ、複数の条件下で比較分析を行った。そして、一般的に加速に必要なエネルギーを減らすより回生ブレーキを最大限活用する走りの方が省エネルギーに有効であるという知見を得た。しかし、回生失効率が高い、走行時分が短い、走行抵抗が大きいという 3 つの状況が重なる場合にはノッチオフ速度を下げる運転が望まれることも明らかにした。

10.3. 現車試験による省エネルギー効果の検証

10.2 の結論に基づき、回生ブレーキの有効活用を目的とした高速域で積極的に回生ブレーキを用いる考え方を原則に電力制限回生ブレーキを考案し、それを営業路線にて現車試験を行い、効果の検証と問題点の抽出を行った。この検証にあたって最大限に回生ブレーキを活用するために、運転士に運転方法をアシストする運転支援装置を開発した。

これにより単調な制動区間での支援運転では回生率が 28.71% 上昇し、さらに実験的に明らかになった操作遅延による影響を解決する先読み手法を実装した結果、回生率は 37.51% 上昇し、省エネルギーに有効であることを確認した。

しかし、複雑な制動区間においては支援の効果が限定的になることが数値解析の結果で明らかになった。またこの区間において、現車試験では制動パワーが 10.3% 抑えられているものの、周囲の列車状況により回生失効が発生し、周囲の列車状況によっては最大限の回生ブレーキ性能が発揮できないということも判明した。したがって 1 列車で得られる省エネルギー効果には限界があることを把握した。

10.4. 列車群の知的管理の必要性和電力可視化の提案

1 列車のベストエフォートでは省エネルギー化に限界があることが 10.3 で述べた現車試

験で判明したため、列車群の知的管理による回生電力の有効活用に向けた省エネルギー化の検討を行い、まずその基礎検討として電力流の分析を行うこととした。まず運行管理を見据えて電力可視化を行い、計画ダイヤと運転整理ダイヤでその電力流の傾向分析を行うため列車の消費する電力を数値計算した。さらに列車群での電力流の分析のためある饋電区間を走る列車群の電力可視化ダイヤを作成し、変電所の出力電力を算出した。この分析を計画ダイヤと運転整理ダイヤそれぞれで行ったところ、運転整理ダイヤでは計画ダイヤに比べて 25%電力ピークが大きくなっていることが明らかにし、その原因が車両が力行するタイミングが重なっているためであることを突き止めた。さらに、列車群における回生失効の電力大きさも明らかにした。

以上、本論文では 1 列車では回生ブレーキを最大限活用する手法が省エネルギーに有効であるとの数値解析結果を得て、現車試験にてその理論が正しいことを確認した。しかし、1 列車でのベストエフォートには限界があり、今後さらに省エネルギー化を進めるには列車群の知的管理が必要であるとの知見を得た。

11. 今後の課題

11.1. 定速度運転モデルの検討

本論文では列車運転のモデルを力行・惰行・制動のパターンで検討したが、このモデルの他に定速度運転のモデルを加えて省エネルギー運転法の数値解析を行う。これは現車試験において速度制限や走行時分の制約を考慮した省エネルギー運転法の解析を行うために必要である。また、力行の時間が長くなることを考えれば回生絞り込みの頻度は減るはずであり、瞬間電力の変動もよりなだらかになるものと思われる。

11.2. 列車群制御における電力・電力量分析

本論文では 1 編成の電力・電力量を計算し、その結果から力学モデルである饋電区間の電力を分析したが、今後は各編成で回路モデルを考え、複数の編成が同時に走った場合の電力の流れを分析する。ここでは特に架線電圧の変動に注目し、架線電圧による車両の力学的加減速度の変化を反映した数値計算を行う。これにより一饋電区間での回生失効抑制を最小にする列車群の電力制御手法を提案する。

11.3. 電気設備の活用による回生エネルギーの有効活用法

本論文では低コストなソフトウェア的手法に絞って研究を進めたが、今後は電気設備のモデルを数値計算に組み込み、電気設備の利用計画や効果的な設置法、設備仕様などを提案する。具体例として回生変電所などがあるが、特に蓄電池の利用に関して、蓄電池を地上・車上どちらに設置すべきなのか、また地上に設置する場合どこに置くと省エネルギー効果が大きいのかを解析したい。このとき、電力の大きさに寄って化学電池が良いのか、コンデンサが良いのかも選択肢に入る見込みであるため、エネルギーの評価だけでなく蓄電池の場合は対コストでも評価していきたい。

11.4. 運転支援法と回生負荷推定について

本論文では、余裕時分にまだ数秒の余裕が見られるため、ノッチオフ速度を変える力行支援も入れればより全体で見て省エネルギー効果に寄与するものと考ええる。また、架線電圧情報による回生負荷推定に基づく運転支援もあり得る。この回生負荷推定は運転支援だけでなく列車群電力管理における実証試験にも有効であるとの見識から 11.2 でも述べた架線電圧に注目した数値解析と現車試験の結果をすりあわせながら電力制御のタイムオーダーを決めたい。

11.5. ATO への応用と列車群の知的管理

ATO では人間の操作が運転に介入しないため高度な車両制御が可能となる。したがって回生ブレーキを積極的に活用する電力制限回生ブレーキの考え方を ATO 路線に導入したい。

特に ATO 路線は周囲の列車状況を比較的把握しやすいことから列車群知的管理における電力制御のモデルとして利用したい。

この列車群知的管理ではダイヤ改正も含めて考えたい。本論文で等増分消費エネルギー則への補機電力の影響の分析を終えていることから、駅間走行時分配分最適化についても考えていく。

また ATO 以外でも、列車が相互に運行状況を共有すれば、回生エネルギーの有効活用に向けた新たな運行管理手法が確立できる。そのために情報通信機器を活用した列車群の走行状況管理手法を考案し、11.4 で述べた列車群電力制御のタイムオーダーを検証したい。

11.6. Cyber-Physical-Systems

現在、IC カードや情報端末が急速に普及しており、利用者は列車の運行情報を手早く入手でき、一方事業者は乗客の目的地までの需要を把握しやすい。したがって運転整理の場面においては利用客の目的地情報に応じた選択停車列車の運用が考えられる。この選択停車列車は力行と制動の回数を減らすことで省エネルギーに有効であり、列車群の知的管理ができれば力行のタイミングもずらせるためピークカットを実現できると考えている。また、運転整理の評価関数に旅客流動とエネルギーを目的関数とすることも考えられる。

研究実績

国際会議における発表

1. (査読有,発表申し込み受理) ○Shoichiro WATANABE, Takafumi KOSEKI(The University of Tokyo), “Train Group Control for Energy-saving DC-Electric Railway Operation” , IPEC-Hiroshima2014,2014-3, No.1265, Hiroshima
2. (査読有,発表申し込み受理)○Duc Doan Van, Shoichiro Watanabe, Takafumi Koseki, “A Design of Optimal Running Curve for Train Operation Based on a Novel Parameterization Method Aiming to Minimize the Total Energy Consumption” ,COMPRAIL 2014,24 -26 June, Italy

論文誌・国内学会・シンポジウム等における発表

1. (査読有,電気学会論文誌) ○渡邊翔一郎, 楊哲, 古関隆章(東京大学), 近藤圭一郎(千葉大学), 水間毅(交通安全環境研究所), 濱崎康宏(新京成電鉄), “現車試験による電力制限ブレーキの性能評価-省電力・省エネルギー運転支援効果の実証-”, 日本電気学会論文誌 2013 年 11 月, 査読中
2. (査読無,口頭) ○渡邊翔一郎, 楊哲, 古関隆章 (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 濱崎康宏 (新京成電鉄), “直流電気鉄道の電力制限ブレーキ支援現車試験ー省電力効果の実証と問題点の解決法ー”, 電気学会産業応用部門全国大会, 5-34, 2013 年 8 月, 山口
3. (査読無,口頭) ○楊哲, 渡邊翔一郎, 古関隆章 (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 濱崎康宏 (新京成電鉄), “直流電気鉄道の省電力運転のためのブレーキ力制御と運転支援の提案”, 日本機械学会第 19 回鉄道技術連合シンポジウム 2012 年 12 月, No.3416,東京
4. (査読無,口頭) ○楊哲, 渡邊翔一郎, 古関隆章 (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 濱崎康宏 (新京成電鉄), ” 回生有効活用で省エネルギーを図るブレーキ制御とその支援実証研究”, 交通・電気鉄道・フィジカルセンサ合同研究会, TER-13-006, PHS-13-010,2013 年 3 月,下呂
5. (査読無,口頭)○渡邊翔一郎, 楊哲,古関隆章, “省エネルギー運転法の相違による消費エネルギーと走行時分変化の傾向分析”, 交通・電気鉄道・フィジカルセンサ合同研究会, TER-13-005, PHS-13-009, p.25 ,2013 年 3 月,下呂
6. (査読無,口頭) ○渡邊翔一郎, 古関隆章, “直流電気鉄道の省エネルギー運転における電力制限回生ブレーキの効果と回生率の影響評価”, 平成 25 年電気学会全国大会,221-A4-5-114,2013 年 3 月,名古屋
7. (査読無,口頭) ○渡邊翔一郎, 古関隆章, “省エネルギー運転法の相違による消費エネルギーと走行時分変化の傾向分析”, 第 6 回鉄道分野の新技术に関するシンポ

- ジウム(NU - Rail 2013),一般講演-4,2013 年 3 月,東京
8. (査読無,口頭) ○渡邊翔一郎, 森拓哉,古関隆章, “省エネルギー運行管理のための運転法の比較分析と列車群電力可視化”, 交通・電気鉄道研究会, TER-13-017, 2013 年 5 月, 東京
 9. (査読有,口頭) ○渡邊翔一郎, Doan Van Duc, 古関隆章 (東京大学), 宮武昌史 (上智大学), “直流電気鉄道の省エネルギー化を目的とした運転曲線の最適化と計算手法の比較分析”, 第 50 回鉄道サイバネ・シンポジウム学生セッション, 2013 年 11 月, 池袋
 10. (査読無,口頭)○古関隆章, 渡邊翔一郎,Ninh Van Cuong (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 磯部 栄介 (日本地下鉄協会) “運転支援におけるブレーキ操作遅れ時間の補償と ATO による電力制限制動活用の提案”, リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会, LD-13-060,TER-13-041, 2013 年 8 月,一ノ関
 11. (査読無,口頭)○Ninh Van Cuong, 渡邊翔一郎,古関隆章 (東京大学), “リニア駆動鉄道の省エネルギー運転のための自動列車運転システム設計の基礎検討”, リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会, LD-13-059, TER-13-040, 2013 年 8 月,一ノ関
 12. (査読無,口頭) ○渡邊翔一郎, 古関隆章(東京大学), 磯部栄介(日本地下鉄協会) “省エネルギー運転における補機の影響評価”, 交通・電気鉄道研究会, TER-13-070, 2013 年 11 月, 広島
 13. (査読無,ポスター) ○渡邊翔一郎, 楊哲, 古関隆章 (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 近藤圭一郎(千葉大学), 濱崎康宏 (新京成電鉄), “操作遅延を考慮した省エネルギー運転支援の現車試験成果と課題”, 日本電気学会第 20 回鉄道技術連合シンポジウム 2013 年 12 月, No.S9-11,東京
 14. (査読無,口頭) ○Ninh Van Cuong, 渡邊翔一郎, 古関隆章 (東京大学), “A Proposal of Simultaneous Monitoring of Total Energy and Peak Braking Power for the Design of Energy-saving ATO Running-curve”, 日本電気学会第 20 回鉄道技術連合シンポジウム 2013 年 12 月, No. S3-4-6,東京

表彰・社会貢献

1. 優秀発表賞 (査読有,ポスター) ○渡邊翔一郎, 楊哲, 古関隆章 (東京大学), 水間毅 (交通環境安全研究所), 近藤圭一郎(千葉大学), 濱崎康宏 (新京成電鉄), “操作遅延を考慮した省エネルギー運転支援の現車試験成果と課題”, 日本電気学会第 20 回鉄道技術連合シンポジウム 2013 年 12 月, No.S9-11
2. エコレールラインプロジェクト WG 委員(委員会委員兼任) 国土交通省・環境省連携事業調査委託・(一社)日本地下鉄協会

謝 辞

本論文を進めるにあたり、多くの方々からご助言とご助力を賜りました。

指導教員で当研究室教授の古関隆章先生には基本的なところから丁寧にご指導いただきました。議論の場では的を射た指摘を賜り、論文添削では私の原稿を真っ赤に染め上げていただきました。私はこれらを通して研究者に求められる力と志を教わり、また議論の度に先生の温情も感じることができました。京都からひょこんと現れた私がこうして謝辞を書けるまでに研究を進められたのは一重に先生のおかげです。深謝申し上げます。

共同研究先の西日本旅客鉄道株式会社の皆様には現場見学と会議の場で大変お世話になりました。杉田様には会議の場だけでなくメールでも技術的質問に答えていただき、そして現場を見学させていただきましたおかげで迅速に研究を進めることができました。感謝申し上げます。

共同研究先の鉄道総合技術研究所の皆様には会議の場で大変お世話になりました。議論の場での深い知識に裏付けされた鋭いコメントにはいつも驚かされるばかりでした。ありがとうございました。

共同研究先の千葉工業大学教授の富井規雄先生、工学院大学准教授の高木亮先生、上智大学准教授の宮武昌史先生には学生 WG でもお世話になりました。発表の隅々までコメントしていただき、また私が質問しても丁寧にご教授くださいました。特に技術的なアドバイスは私にとって大きな糧になり、WG で大学に伺った後の帰路はいつも充実感がありました。御礼申し上げます。

共同研究先の交通安全環境研究所の水間様、長谷川様、林田様、竹内様、工藤様、井上様には JRTT プロジェクトで大変お世話になりました。会議での鋭く深い質疑応答には驚きを通り越して憧れを持っておりました。そして、この会議で「現場を知る」ことの重要性を説いていただきました。御礼申し上げます。

共同研究先の千葉大学准教授の近藤圭一郎先生には大変愛情あるご指導を賜りました。会議の場での議論でもお世話になりましたし、共著をお願いした折も快諾していただきました。加えて、お忙しい中メールで論文原稿にコメントくださり感謝いたしております。

JRTT プロジェクトでは新京成電鉄株式会社の濱崎様に大変お世話になりました。現場で車両機器について解説していただき、質問にも詳しくお答えいただきまして感謝しております。

同じく JRTT プロジェクトではセントラルエンジニアリングの阿部様、小野様にお世話になりました。初心者の方に詳しく測定器のことを教えて下さり、時にプログラミングのアドバイスもいただき感謝しております。

なお本論文は（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」平成 22 年度採択課題(2010-04)「持続可能な低コスト・省エネルギー鉄道のためのパワーマネージメント」の一環として行われました。（独）鉄道建設・運輸施設整備支援

機構の御支援に感謝申し上げます。

日本地下鉄協会・日立製作所の磯部様にはエコレールラインプロジェクトに参加する貴重な機会をいただき感謝しております。濃密な会議に参加して資料を拝見する度に自身の日々の研究に磨きをかけるきっかけになりました。

当研究室の技術職員の高田様には研究に必要な機材を存分に準備していただき、また学生実験や現車実験でご助力いただき、時に差し入れをいただき日々の生活のサポートをしていただきました。ありがとうございました。

秘書の松崎由香子様、尾崎敦子様には研究室でいつも温かく見守って下さり、時に励まし、差し入れもいただいて研究体力を維持することができました。ありがとうございました。

博士課程の Hong さんにはいつも穏やかに相談に乗っていただき、Shin さんには堪能な語学力と知識にいつも支えていただきました。ありがとうございました。

修士課程同期の隆嗣くん、Cuong くんにはお互い支えあい、こうして修論に辿りつけて嬉しく思っております。研究室ではいつも本当に書ききれないくらいいろんなことを支えてくださりありがとうございました。

修士課程後輩の Duc さん、Travis くん、森くん、Zhao さん、Luo さんにはいつも相談に乗ってもらったり手助けしてくれたり、時には楽しい企画を準備してくれてありがとうございました。これからの活躍を祈念しております。

卒論生の大橋くんと松岡くんには他愛無い雑談から鉄道の豆知識まで話し相手になってくれてありがとうございました。勢いある後輩に刺激されて私もうがなばることができました。

ここには書ききれませんでしたが、母校京都工芸繊維大学でエールを送ってくださった先生方、学友の皆様、学会でお世話になった皆様、研究会で出会った学友の皆様、共同研究先でお世話になった学友の皆様に感謝申し上げます。

親愛なる家族へ

ずっと助けてくれて、心配してくれて、励ましてくれて、叱ってくれて、相談に乗ってくれて、吠えてくれて、温かく支えてくれてありがとうございました。感謝申し上げます。

これからも鉄道技術を通じて、日本の科学技術を支える研究者になれるよう日々精進して参ります。

渡邊 翔一郎