

東京大学 修士論文

回生有効活用による省エネルギーのための ブレーキ制御とその支援の実証研究

Smart Braking Control for Energy-saving Train Operation
— Experimental Implementing of Driver Assistance —

指導教員

古関 隆章 准教授

東京大学大学院 工学系研究科
電気系工学専攻 修士課程 37-116518

楊 哲

2013 年 2 月 6 日

内容梗概

電気鉄道車両が制動する時主電動機を用いて発電し、回収したエネルギーで付近の加速している電車、もしくは車両の冷房・暖房などの補機に提供する回生ブレーキは、省エネルギー対策の一つとして近年各鉄道会社に普及しつつある。しかし、このような機能の搭載する電車であっても、主電動機の仕様や架線電力負荷などの制限で回生ブレーキが使えない回生失効が起こり、列車のブレーキ力を補足するために機械ブレーキを立ち上げざるを得なく、当初期待されるエネルギー回収と機械ブレーキの抑制を十分果たしていない状況にあった。

本研究では、回生ブレーキの有効活用を目的とし、ブレーキパワー上限の制限、及びそれに基づいた走行余裕時間を活かすブレーキ操作支援を提案する。そして実在路線での運転支援実験を通じ、省エネルギーと機械ブレーキの削減効果を実証する。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	電気鉄道車両のブレーキシステムの構成	3
2.1	機械ブレーキ	3
2.2	電気ブレーキ	5
2.3	電空併用ブレーキ	6
第 3 章	ブレーキ力制御及び運転支援の提案	9
3.1	回生失効と今までの対策	9
3.2	省エネルギー運転方法	10
3.2.1	ブレーキパターンの提案	10
3.2.2	緩いブレーキの制限	11
3.3	運転支援の提案	12
3.3.1	運転情報の収集	13
3.3.2	支援意思の決定	13
3.3.3	ブレーキの操作の指令支援	16
第 4 章	運転支援による運転実験	18
4.1	実験概略	18
4.2	データ解析	20
4.2.1	データ分析対象	20
4.2.2	データ解析に使う物理量	22
4.2.3	駅間 I	23
4.2.4	駅間 II	28
4.2.5	駅間 III	32
4.2.6	駅間 IV	36
4.3	支援効果のまとめ	40
第 5 章	実験問題点の対策提案	47
5.1	無駄時間への対策	47
5.2	支援開始点の速度への対策	48
5.3	二段制動の改良	49
5.4	現車実験による実証	51

第 6 章	結論と今後の課題.....	52
6.1	結論.....	52
6.2	今後の課題.....	53
参考文献	55
発表文献	56
謝辞	57

第1章 序論

1.1 研究背景

鉄道はほかの交通機関と比べて環境に優しい乗り物である。とくにエネルギーや資源のリサイクルの問題が関心を募る近年では、鉄道業界に注目が集まっている。Fig. 1.1 に示すように、1 人を 1km 運送するときに排出する CO₂ 量を考えると、乗用車、バス、飛行機、鉄道の 4 つの交通機関では、鉄道の二酸化炭素の排出量が 18g で、自動車の 169g の僅か 1/9 であり、ほかの交通機関よりも大きく下回っている。また、Fig. 1.2 に示すように、鉄道の輸送量は交通機関の全体の 3 割近くを占め、国民の日常生活・経済活動を支える移動手段として、社会の低炭素化に大きく貢献している。

人口減少、少子高齢化、財政制約に加え、震災を契機としたエネルギー制約の課題の前に、鉄道事業界が継続可能な発展を実現し、国民に安定な運行サービスを提供するために、再生可能エネルギーの導入や、エネルギーを効率的に使用するための省エネ設備の導入など、鉄道の駅を含む線路を丸ごと省電力化・低炭素化を積極的に取り組んでいる。また鉄道は一日約 6 千万人にも利用されており、鉄道での省電力化・低炭素化の取組が社会の意識の高まりを促す効果が大きいと期待されている。

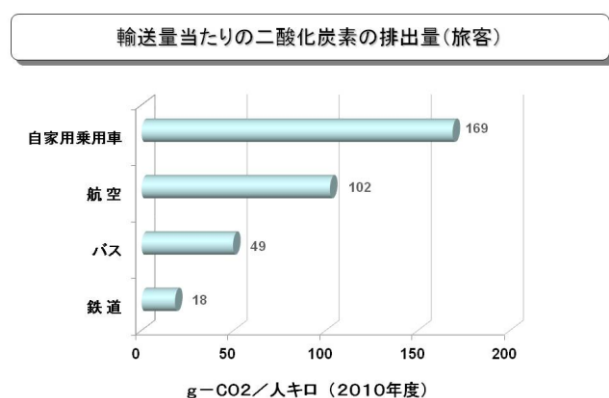


Fig. 1.1: 輸送機関別の輸送量あたりの二酸化炭素排出量 [1]

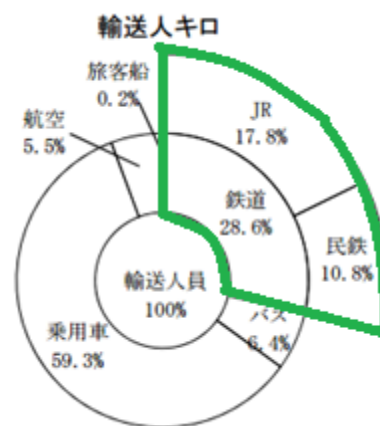


Fig. 1.2: 2009 年輸送機関別の輸送量 [2]

鉄道の省エネルギー技術として注目されている回生ブレーキは、電車が制動する時に主電動機を用い発電し、従来の機械ブレーキにより捨てられていたエネルギーを電力に変換して同一線区の他の力行電車もしくは車上補機に提供するシステムである。回生ブレーキ電車は日本で 1968 年に初めて量産化されて以来普及しつつあり、近年特に環境への負担を低減する社会意識の高まりとともに各鉄道会社に積極的に導入され、現在は電車全体の 75.7%も占めている。回生ブレーキの活用を通じて、省エネルギー効果・機械ブレーキの使用による部品摩耗の低減・電車操作性能の向上による乗り心地の改善などを図っている。

しかし、回生ブレーキは架線電圧が極めて高い場合や付近に回生電力を消費する電車がいない場合にブレーキ力が低下してしまうので、機械ブレーキと併用することになる。その結果、エネルギーの浪費に加えて、機械の摩損に伴う車両保全のコスト上昇や電空併用ブレーキの過渡現象による乗り心地の悪化が生じる。そこで、如何に機械ブレーキの使用量を抑え、回生ブレーキの利用率を高めるかは、既に普及してきた回生ブレーキのフル活用にとって極めて重要である。これに対し、近年では、回生電力を吸収する機能を持つ変電所の設置、車上や地上に二次電池、二重層キャパシタ、フライホイールなどの電力貯蔵装置の導入が検討されている [3] [4]。ただし、地上・車上の電力設備の本格的な変更には膨大な資金と時間が必要なため、鉄道会社にとって短期間内に採算性があるとは言い難い。一方、電力回生設備は従来のもので、運転方法を工夫してブレーキパターンを見直せば、経済的な回生ブレーキ有効活用が可能である [5]。ただし、このような「回生が効きやすいブレーキパターン」を実際の電車運転に应用するには運転士に対して適切な支援が必要だが、それを実用する課題がまだ未解決である。

1.2 研究目的

本論文は、電車の回生ブレーキを活用するためのブレーキ力制限のための運転支援に着目し、従来で理論だけに存在するブレーキパターンを運転士のブレーキ操作に応用することで、列車運転の省エネルギー効果を高めることを目指す。そのために、電車の駅間余裕走行時分を考慮した支援方法を提案し、電車が安全かつ定時で駅に到着する前提で、回生ブレーキの活用を実現する。また、現車実験を通じ、提案理論の有効性を確認し、路線の多様な状況向けの支援手法を提案する。ただし、本論文の研究範囲は、支援に要するハードウェアやインターフェイスなどに触れず、リアルタイムの意思決定アルゴリズムと実用的な走行パターンに着目し、ソフトウェアの面から電車運転支援の課題を取り組むことである。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章. 序論 研究背景から回生ブレーキの位置付けや従来に行われた検討をまとめ、本論文の研究課題を示す。

第 2 章. ブレーキシステム 本論文で研究対象とする電気鉄道車両の機械・発電・回生ブレーキシステムを紹介する。

第 3 章. 支援運転提案 駅間走行余裕時分を活かす回生ブレーキを活用する方法に着目し、リアルタイムの運転支援のための支援手法を紹介する。

第 4 章. 実験と分析 提案した運転支援手法に基づき現車実験を行い、その実績データから支援手法の有効性を確認し、支援における効果及び問題点をまとめる。

第 5 章. 運転支援の問題点の解決策 実験からまとめた問題点に対して解決策を提案し、運転支援の機能をよりうまく発揮させることを試みる。

第 6 章. 結論 本論文から得られた結果をまとめる。

第2章 電気鉄道車両のブレーキシステムの構成

本章では、電気鉄道車両に一般的に用いられているブレーキシステムを紹介する。

Fig. 2.1 に示すように、ブレーキ力発生機構と動作原理により、鉄道車両のブレーキは様々な種類がある [6, 7]。その中で車輪とレールの粘着力をブレーキに利用する粘着ブレーキが主流で、機械式と電気式の二種類に分けている。また、機械式は主に圧縮空気を利用してブレーキ装置を動かすため、空気式とも呼ばれている。

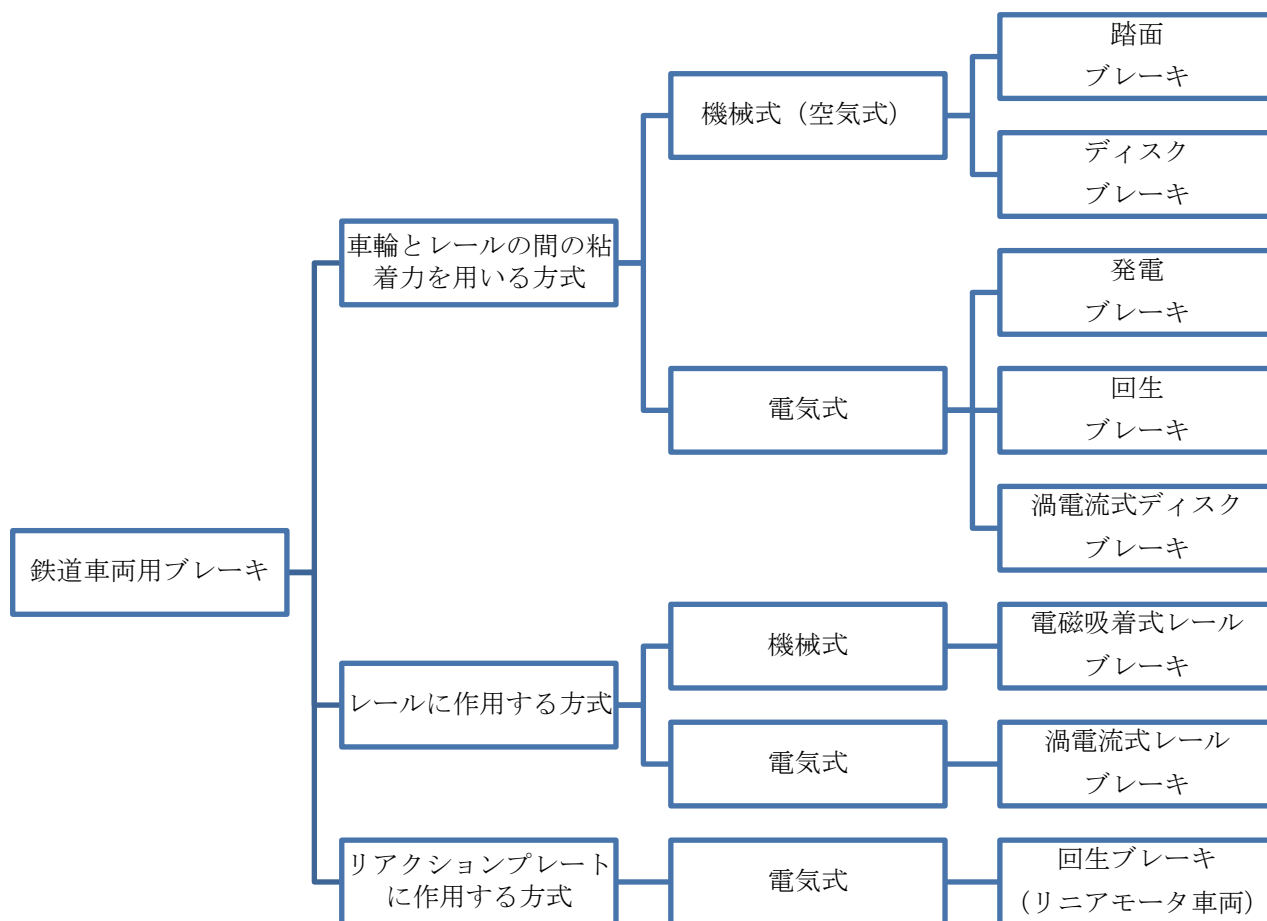


Fig. 2.1: 電気車におけるブレーキの種類

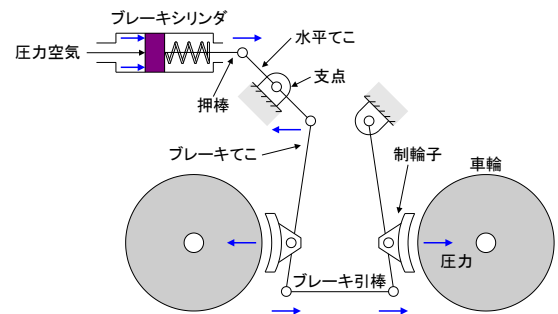
2.1 機械ブレーキ

踏面ブレーキ 踏面ブレーキは、Fig. 2.2 に示すように、制輪子を車輪の踏面を押し付け、その間の摩擦力をブレーキに利用するものである。この方式は初期から鉄道車両に使われ、様々な改良を重ね現在でも広く使用されている。車輪の削正により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、最大粘着力の向上、レール回路に伝達する電気信号の動作を確保するなどの利点がある [7]。しかし、

摩擦面が車輪兼用であり、あまり高い熱負荷を与えると割れを生じる恐れがある。さらに、制輪子と車輪踏面の摩擦により、車輪の寿命を縮める問題と、制輪子の交換に手間がかかる欠点がある。その他、制輪子の摩耗により鉄粉が大量に飛び散り、摩擦騒音が大きいなどの環境問題もなる。踏面ブレーキの構造は、一つの車輪に一個だけ設ける場合と、二個の制輪子を用意して両側から挟む場合があり、前者を「踏面シングルブレーキ」、後者を「踏面クラスプブレーキ」と呼ぶ。踏面クラスプブレーキの方が制動力が高くなるが、ブレーキの機構が複雑になり、その分だけ台車が重くなる。踏面シングルブレーキの方が台車が軽く、制輪子の数も減り保守が容易になるため、現在の新造車両に一般的に採用されている [6]。



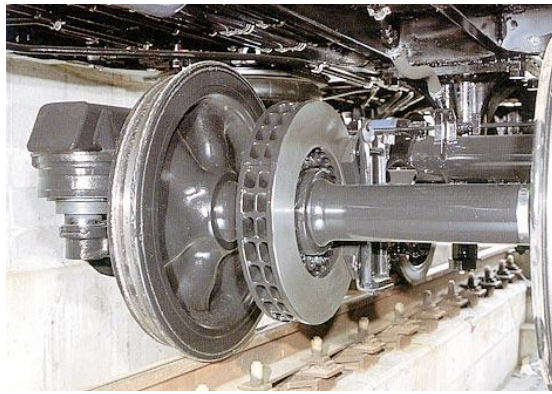
(a) 車輪と制輪子



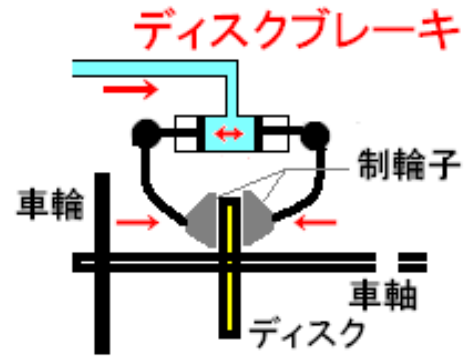
(b) ブレーキ構造

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、Fig. 2.3 に示すように、摩擦円盤、すなわちブレーキディスクを車輪、車軸、推進軸などに固定し、これに制輪子押し付けてその摩擦力でブレーキ力を得る方式である。踏面ブレーキと違って車輪の直径が削正により小さくなると、制輪子と摩擦円盤の摩擦係数と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変形の恐れはなく、踏面ブレーキより制動力が高い利点があり、新幹線のような高いブレーキ力を要求する車両に使用されている。一方、在来線の車両の大半は、モータを持たない車両のみディスクブレーキを設置する。その理由はモータを持たない車両は電気ブレーキを使えないためより高い機械ブレーキ力が必要 [8]なことと、モータがないため車輪と別に設置するブレーキディスクを設けるスペースが必要なことという二点である。なお、新幹線のブレーキディスクは車輪と一体化しておりその問題がないが、それでも製造コストは在来線車両より高くなってしまっている。



(a) 車輪とディスクブレーキ



(b) ディスクブレーキ構造

Fig. 2.3: ディスクブレーキ

2.2 電気ブレーキ

電気ブレーキは、主電動機を発電機として働かせ、電車の運転エネルギーを電気エネルギーに変換する際の電機子逆回転力を車軸に働かせてブレーキ作用を行うものである。電気ブレーキは制輪子と車輪間の摩擦係数の影響を受けないため、広い範囲の速度に対しほぼ一定なブレーキ力が得られる。また、機械ブレーキに比べて操作が簡単で、動作も早く空走時間が短いという特長がある。したがって、積極的に電気ブレーキを使用することで、機械ブレーキ使用量を抑え、車輪の保守や制輪子の消費量を大幅に節約することができる。

電気ブレーキは、発電された電気エネルギーの使い方によって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。発電ブレーキは外部の負荷の有無にかかわらず安定なブレーキ性能が得られて信頼性が高いが、電気エネルギーを再利用することができない面もある。

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に送り返し、他の力行中の電車に供給することでエネルギーの再利用を図る方式であり、熱エネルギーとして無駄に捨てる発電ブレーキより省エネルギー効果が期待されている。

回生ブレーキを働かせるには外部の負荷が必要である。一般的にその負荷は同一供給電車線路内に存在する他の力行編成や、自編成或いは他編成の補助機器となる。それらがないと、架線電圧が上昇し、機器保護のために回路が遮断されたり、回生電流が絞りこまれたりする。これによる回生ブレーキ出力の低下、もしくは全く使えない時に生ずる動作が、回生絞込み・回生失効と呼ばれる。都心部の列車密度が高い路線においては力行や補機負荷が多いため回生失効がほとんど起こらないが、列車密度がそれほど多くない線路や閑散時間では回生絞込みがしばしば行われ、設計性能通りの電気ブレーキ力が得られない場合が多い。近年では、線路内回生インバータと各種の電力貯蔵装置の設置が進んでいて、回生失効の防止と回生エネルギーの活用を図っている。

最近の直流電気鉄道車両の駆動システムでは、VVVF インバータで制御する誘導機が一般的に使用されている。そのトルクは Eq. (2.1) に示すように、モータ印加電圧 V の二乗とすべり周波数 f_s に比例し、高速域ではインバータ周波数 f の二乗に反比例する。Fig. 2.4 はインバータ周波数を横軸に、諸

量の変化を表すものである。ただし、すべり周波数が一定であれば、列車速度とインバータ周波数は比例するため、その横軸は速度と考えてもほぼ差し支えない。トルクの特性に着目して、低速から**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の反比例する**特性領域**に分けられる。**定トルク領域**は、電圧をインバータ周波数に比例させ、すべり周波数を一定にして、トルクを一定に制御する領域である。また、電圧が上限に達してから、すべり周波数をインバータ周波数の二乗に比例させて、トルクを一定に保つ領域を設ける場合が多い。続いて**定電力領域**は、電圧が一定になったあとでトルクの低下を抑えるために、すべり周波数をインバータ周波数に比例させる制御を行う領域であり、モータ出力が最大値に達する領域でもある。最後に一番高速側の**特性領域**では、電圧が最大値に達したとともに、すべり周波数も停動トルクの制限で上限に達していて、制御する要素がなく、トルクはインバータ周波数の二乗の反比例に低下する。

$$T = K \left(\frac{V}{f} \right)^2 f_s \quad (2.1)$$

Fig. 2.4 は力行の場合を想定したが、制動の場合ではすべり周波数が負になり、インバータ周波数が高速側から低下する以外で基本的に同じである。ただ一般的にパンタ点での電圧が力行時より高いため、制動時の特性が力行時よりもトルクが大きくなる。また、制動時の方がすべり周波数を大きく取れるため、電気ブレーキの負担割合を増やすように定電力領域を取らないパターンを設定する場合もある。

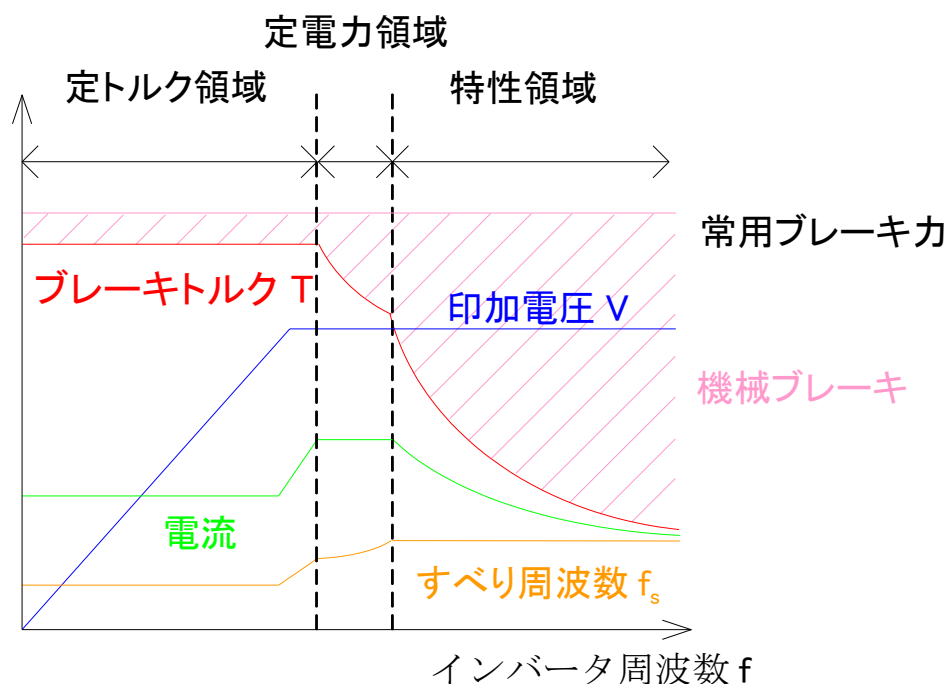


Fig. 2.4: インバータ制御電車の制御パターン

2.3 電空併用ブレーキ

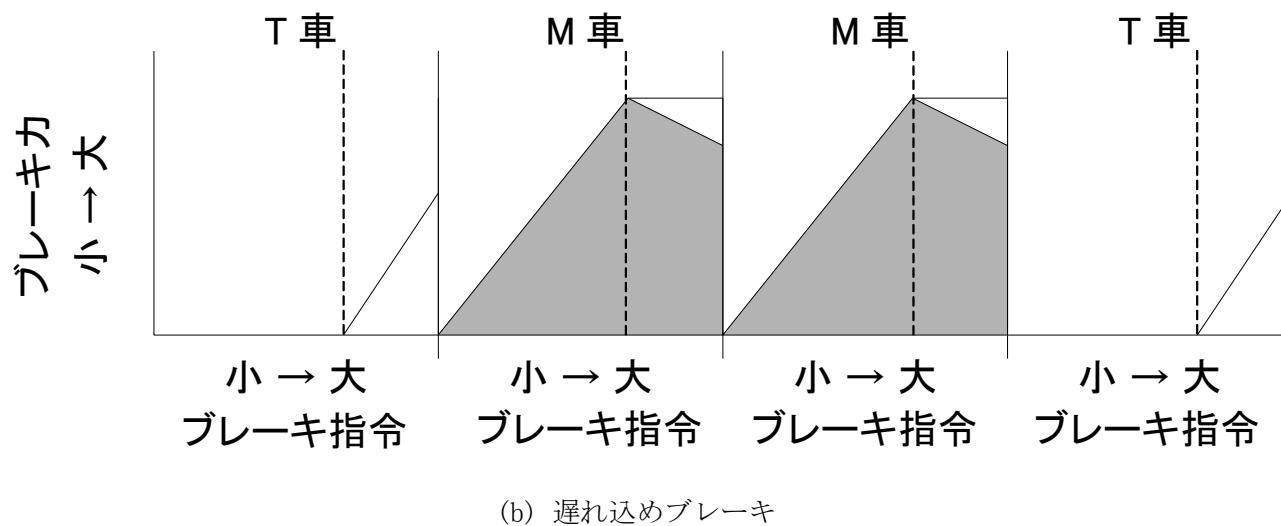
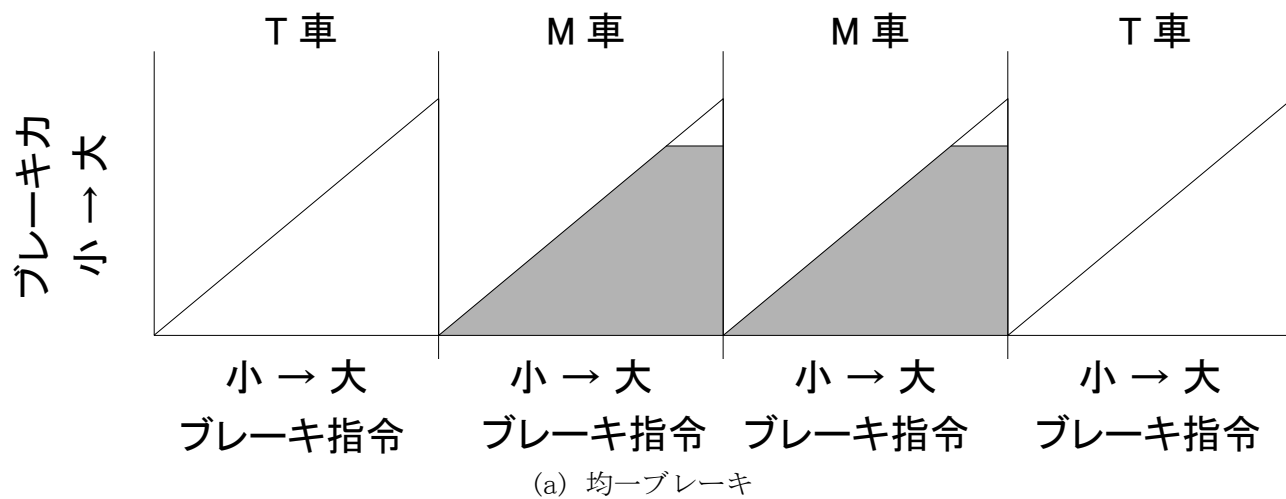
電気ブレーキは低速でのブレーキ力が弱いほか、電気回路などの故障によりブレーキ力を失うことがある。このため電気ブレーキとともに空気ブレーキを併用することが一般的である。電空併用ブレ

ーキとは、電気ブレーキと空気ブレーキを併用し、一つのブレーキ弁ハンドルの操作により、電気指令に介して電気ブレーキと空気ブレーキ両方を制御する。この二つのブレーキシステムの間にはブレーキ力の分配方法によっては、均一ブレーキ制御・遅れ込めブレーキ制御と呼ばれる二種類がある。また、

均一ブレーキ制御 ブレーキ時や推進運転時の座屈脱線防止のため、従来では各車両で均一に制動力を掛けるのが基本となっている。そのための均一ブレーキ制御は編成として負担すべきブレーキ力を、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。ブレーキ指令値が立ち上がる時、Fig. 2.5(a) に示すように付随車（T 車、空気ブレーキ）・電動車（M 車、電気ブレーキ+空気ブレーキ）とも自車分のブレーキ力を負担することになっている。

遅れ込めブレーキ制御 電気ブレーキを使うと制輪子の消耗を減らしてメンテナンスのコストを削減でき、回生ブレーキの場合はエネルギーの有効活用にもつながるため、できるだけ電気ブレーキを使いたいという要求がある。このために、Fig. 2.5(b) に示すように、編成が必要とするブレーキ指令値に対し、M 車の電気ブレーキ出力及びレールとの粘着力に余裕があり、かつ車両間の連結器の圧縮荷重や引張荷重が制限値以内の場合において、M 車が T 車のブレーキまで分担することが行われる。ブレーキ指令値が大きい場合や速度が高く電気ブレーキ力が低下する場合には、前述の制限の範囲内で空気ブレーキで補足する。それにより遅れ込め制御の採用は、列車運転の安全性に損なわずに、機械ブレーキを抑え、より多くのエネルギーを回収することができる。

回生ブレーキの動作は架線電力負荷に左右されやすいため、ブレーキ指令を送っても必ず対等のブレーキ力が立ち上がるには限らない欠点がある。そのためにブレーキを立ち上がる時、まず歴史的に実績がある機械ブレーキを立ちあげ、ある程度のブレーキ力を確保する。機械ブレーキを一旦立ち上げた後回生ブレーキを立ちあげ、そのブレーキ力のフィードバックで機械ブレーキを弱め、合計ブレーキ力が指令通りに制御する。このような制御は初込めブレーキ制御と呼ばれ、列車をより確実にブレーキする仕組みである。ただし、初込めブレーキでは電気ブレーキより機械ブレーキを優先するので、エネルギーの面でも機械の摩耗でも好ましい制御ではない。初込めブレーキは主にブレーキ指令値を変更する時に行うため、ブレーキ力の変更を少なくすることで、初込めブレーキの使用を抑えることができる。



■ 電気ブレーキ □ 空気ブレーキ

Fig. 2.5: 編成における遅れ込め制御ブレーキ力分担の方法

第3章 ブレーキ力制御及び運転支援の提案

3.1 回生失効と今までの対策

現在、第1章に紹介した回生ブレーキの搭載する電車が電車全体の75.7%も占めている。それらを活用することが出来れば、制輪子の消耗・車輪の保守を低減し、省エネルギー効果が大きく期待できる。

ただし、前述のように回生ブレーキが外部負荷状況によってうまく作動できないことがある。Fig. 3.1 は、筆者がいた研究グループが千葉県新京成線で閑散時間に記録したブレーキ操作である。図中の A 所を示すように、ブレーキ指令値が小さい時、電車に所要なブレーキ力が小さく、架線電圧も回生絞込み開始電圧（1650V）より下回っているため、遅れ込め制御で回生ブレーキがすべてのブレーキ力を分担することができるが、図中の B 所のようにブレーキ指令値が大きくなると、架線電圧が1650V を超え回生絞込みが行われ、電気ブレーキのブレーキ力が大きく絞込みめられた。回生絞込み制御を行う基準が架線電圧であるが、その原因は回生車が回生している電力が大きすぎ、周辺の力行電車が吸収しきれないことである。その場合、電気機器を保護するため回生ブレーキの出力が抑えられる一方、機械ブレーキが立ち上がり不足するブレーキ力を補完する。

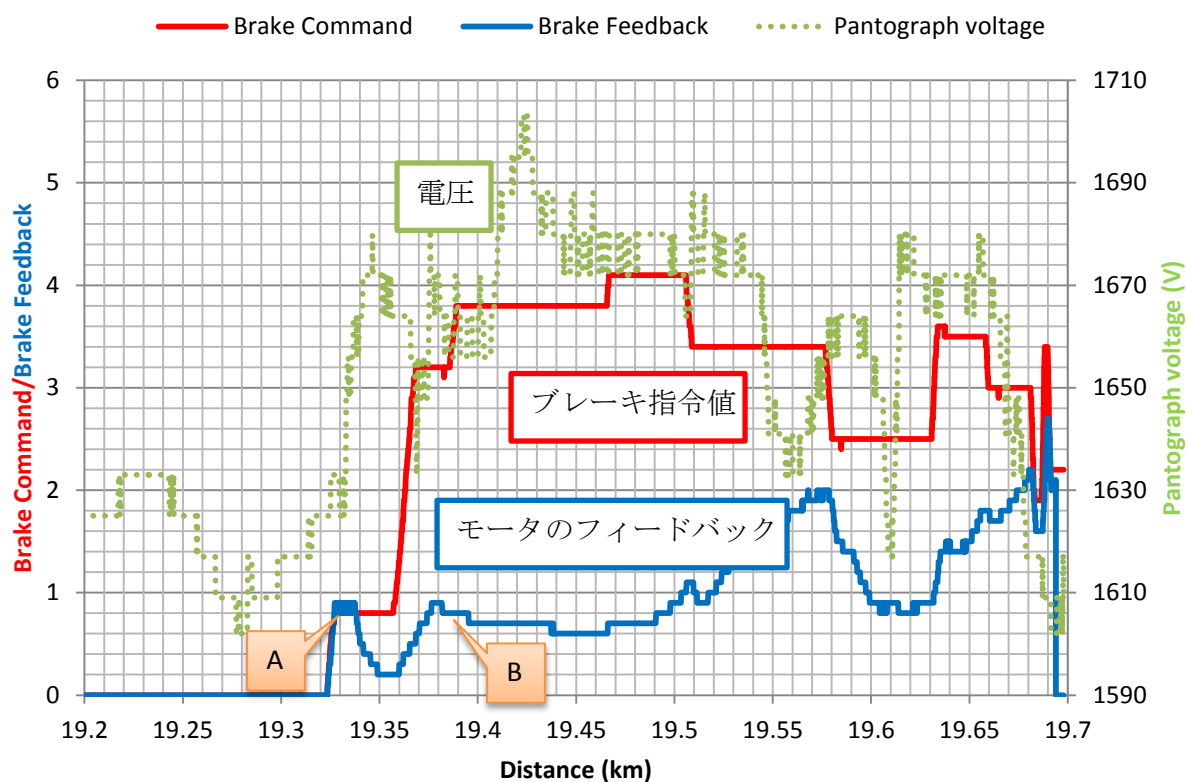


Fig. 3.1: ブレーキ操作記録値@2012. 03

上記の現象が列車密度が多い都市部ではほぼ起こらないが、都市郊外の線路で閑散時間帯にはしばしば起こっている。これに対し、近年では、回生電力を吸収する機能を持つ変電所の設置、車上や地上に、二次電池、二重層キャパシタ、フライホイールなどの電力貯蔵装置の導入が検討されている。

その他に、電車の架線電圧リミットを可能な限り高く設定することや、回生電流から負荷を推測することなど、車両の絞込み制御が改良される電車も実用されてきた [9]。それらは回生ブレーキの活用に貢献するが、いずれも給電システムもしくは車両部分にハードウェアの変更が要求され、経済的な負担が大きく、現在の鉄道事業者の業績 [10] から考えると必ず採算性があることではない。一方筆者らは、新たな設備を設置しなくても、運転方法に工夫し、回生機能を有効に利用することができると考えている。

3.2 省エネルギー運転方法

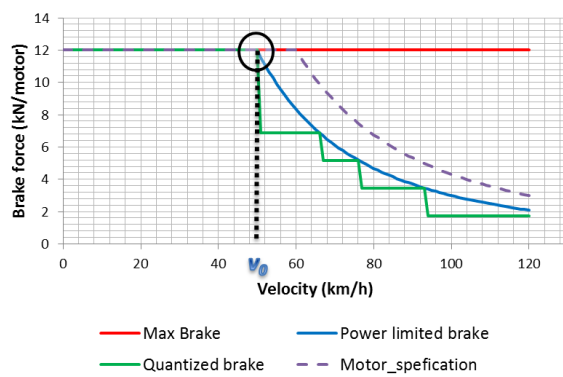
省エネルギー運転は、最大加速、定速運転、惰行、最大減速を組み合わせたものが良いということは既に知られている。現在実務における運転もそれが基本形になっている。ただし、回生機能が備える車両の場合では、一定の最大ブレーキ力を高速時から発生させることは、回生制動の有効活用の観点から好ましくない。その理由は二点ある。一点目は電車のモータが高速域だと弱め界磁となるため、トルクの出力が低下し、大きなブレーキ指令値に従うことができない。二点目は高速域に強いブレーキをかけると回生パワーが大きいと、周辺の架線負荷で消費しきれず、回生絞込み制御で回生パワーが抑えられる確率が高い。いずれの場合でも回生ブレーキの発生トルクが足りないため、不足するブレーキ力が機械ブレーキで補うことになり、電車の走行エネルギーを有効に回収することができなくなる。したがって、現行の運転方法を見直し、高速時のブレーキ力を抑制することで、回生絞込み・回生失効を誘発せずに回生ブレーキを活用することができる。適切な運転支援により運転パターンの変更が出来れば、追加的なハードウェア変更も少なく、鉄道事業者にとっては採算性の高い省保守・省エネルギー案である。

3.2.1 ブレーキパターンの提案

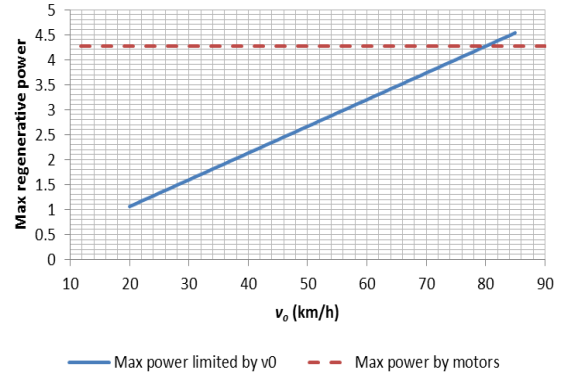
筆者らが提案する「パワー制限ブレーキパターン」 [11] を Fig. 3.2(a) に示す。赤線は従来しばしば用いられてきた「最大ブレーキパターン」で、速度に関わらず一定なブレーキ力を出することができる。このパターンを応用すると、電車を短時間短距離で止めることができ、操作も簡単なため、広く使われてきた。青線は「パワー制限ブレーキパターン」で、低速域で一定なブレーキ力を出す一方で、電動機／発電機性能に合わせ高速域で速度の二乗に反比例し低下する。すなわちこれにより、電動機の弱め界磁領域（高速域）での機械ブレーキ使用を抑制できる。緑線は「離散化パワー制限ブレーキパターン」で、最大ブレーキ力を N 等分し、パワー制限パターンの内側に合わせた階段状のブレーキパターンとなっている。ある速度範囲で一定な制動力指令を出すため、適切な支援があれば、運転士が実行できるブレーキパターンと考えられる。ただし、運転士がブレーキハンドルを操作する時間が要するため、連続する二つの指令の間に時間の余裕を考慮する必要がある。したがって、Fig. 3.2(a) の 50–70km/h 速度域のように、ブレーキ力が比較的に大きくて、速度の変化に伴い制動力指令の変更回数が多い部分では、一つのブレーキ指令にまとめる。これにより、制動力指令が連発せず、運転士がうまく操作できるほか、ブレーキ力変更回数が少なくなり、初込めブレーキを抑制することもできると考えている。

（離散化）パワー制限ブレーキパターンにおいての v_0 は制動力が低下し始める速度である。Fig. 3.2(b) に示すように、 v_0 を小さくすれば「制限」が強くなり、パワー最大値 $P_{\max} = F_{\max} \times v_0$ が小さ

くなる。その逆、 v_0 を大きくすれば「制限」が弱くなり、最大パワーが大きくなる。従って、 v_0 を小さくし、弱いブレーキをかければ、大きな電力を出すことを避け、回生失効や回生絞込みを低減することができる。このようにしても周囲状況が悪く架線電圧が上昇する時に回生絞込みを完全に回避することはできないが、周辺の電車との細かい情報交換ができない一般的な条件において、回生制動の最大活用を可能とする方法である。



(a) 異なるブレーキパターン



(b) 最大ブレーキパワー

Fig. 3.2: パワー制限ブレーキパターン

3.2.2 緩いブレーキの制限

電車の運転においては、安全性と定時性が最優先である。先述の省エネルギーを実現するため v_0 を小さくし弱いブレーキをかけると、制動距離と制動時間が伸び、オーバーランもしくは到着遅れの恐れが出る。したがって、安全性と定時性を守りながらどのように省エネルギー効果を最大限引き出すかを考える必要がある。

Fig. 3.3 のような一般的な基準運転曲線を考える。電車が A 駅から発車し、13.70km のところに目標速度を達成し惰行に入る。13.80km から制動し、B 駅に停止する。

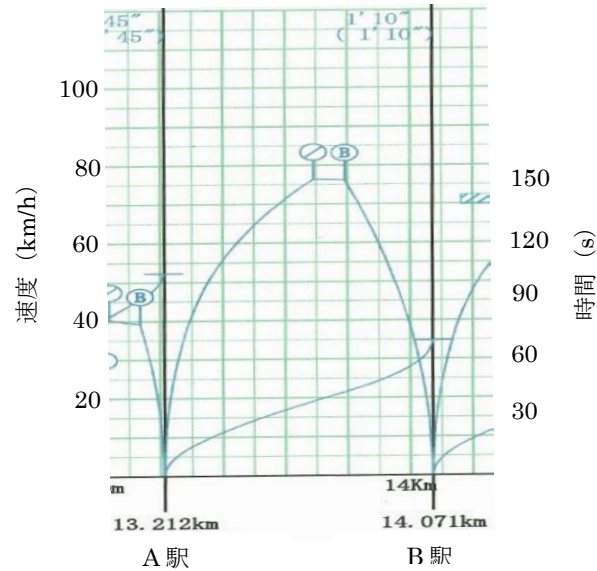


Fig. 3.3: 運転曲線

この区間の基準運転時分は 1 分 10 秒であるが、これは電車の最低性能で走ると想定した運転時分である。饋電線電圧が極めて低い場合を除けば、電車はこれより早く走ることができる。以前のある現車実験の結果によると、基準運転時分が 100 秒の区間での実際の運転時分は 90 秒だった。そのため、運転時分を守る前提で、基準運転曲線より早く走った余裕時間を、省エネルギー運転に利用することが考えられる。

従来、電車が次駅にオーバーランしないために、惰行距離を縮め、早めに比較的強いブレーキに入るのが一般的であった。これに対し Fig. 3.2 で提唱したパワー制限ブレーキでは高速で早めに緩いブレーキ動作に入り、その後徐々にブレーキ力を増してゆく。制動にかかる時間が増えるが、走行の前半に時間余裕があれば全体の走行時分を守ることができる。

以上のように、基準運転より余った時間余裕を生かすパワー制限ブレーキは、安全性、定時性、省エネルギー効果の間にバランスを取る、エコ的な電車運転手段である。

3.3 運転支援の提案

3.2 に論じたパワー制限ブレーキは電車速度により制動力が違い従来より操作が難しく、また運転余裕時間によってブレーキのかけ方が違うため、運転士に対する適切な支援が重要である。また、有人運転への支援が出来れば、将来 AT0 が搭載した車両に直接に電車をコントロールすることも可能である。したがって 3.3 では、余裕時分を活かすパワー制限ブレーキパターンのための運転支援を提案する。

運転支援は、電車運転情報の収集（インプット）、支援意思の決定（情報処理）、ブレーキの操作支援（アウトプット）、という三つのステップから組み合わせている。以下は、この三つの部分を紹介し、特に「支援意思の決定」という、支援システムの中核となる部分を特に詳細に述べる。

3.3.1 運転情報の収集

運転支援は情報の収集から始まる。運転情報の収集とは、電車の速度、位置、走行時間、架線電圧、回生電流などの情報を収集することである。その手段としては、Fig. 3.4 に示すように、GPS、車上搭載の記録装置、地上子などの方式がある。GPS の場合では電車速度、位置など簡単な情報が取れる。一方、車上記録装置の場合では列車の制御系統まで触れるができるため、運転士の操作指令、モータ電流・トルク、架線電圧、回生電流、応荷重など、電車の走行状態を反映するなど様々な情報を収集することができる。また、モータの発生パルスと地上子の位置情報を組み合わせて利用することで、電車の速度と位置をより精確に計算できるほか、地下鉄では働かず、露天条件という GPS の利用制約も克服できる。

支援システムの意思決定に有効な情報とは、電車の将来の運転状態を比較的正確に推測し、かつブレーキ動作に入る前に収集できる情報である。したがって、ブレーキ動作以前の力行、或いは惰行の二つ運転状態の中では、架線電圧の影響を受けない惰行時に意思決定を行うほうが好ましい。

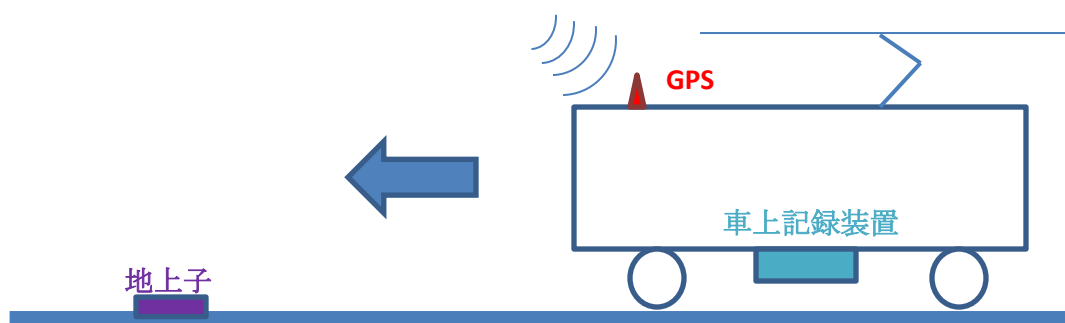


Fig. 3.4: 情報収集機器の設置

3.3.2 支援意思の決定

運転情報の収集がおわった後は、運転支援が支援意思の決定に移行する。支援意思の決定とは、既に収集した電車の走行情報に基づき、基準運転時分以内で駅に到着し、かつオーバーランなしに停止するとの前提で、最も緩いブレーキパターンを決定することである。

3.3.2.1 運転曲線の計算

運転支援するために、列車の質量・長さ・動力特性、路線の勾配・カーブ・速度制限などに合わせて運転状況を精確にシミュレーションする必要がある。Fig. 3.5 にはブレーキ時の運転曲線を作成する際のブロック線図を示す。数値計算は運転士のブレーキノッチ入力から、車両のブレーキ特性に合わせてブレーキ力を決める。さらに電車が受ける抵抗として、走行抵抗、トンネル抵抗、勾配抵抗及び曲線抵抗を想定し、速度と距離に合わせて決める。これらの合力を実際に列車に作用する力とし、そこから加減速度、速度及び距離を順番に計算する。

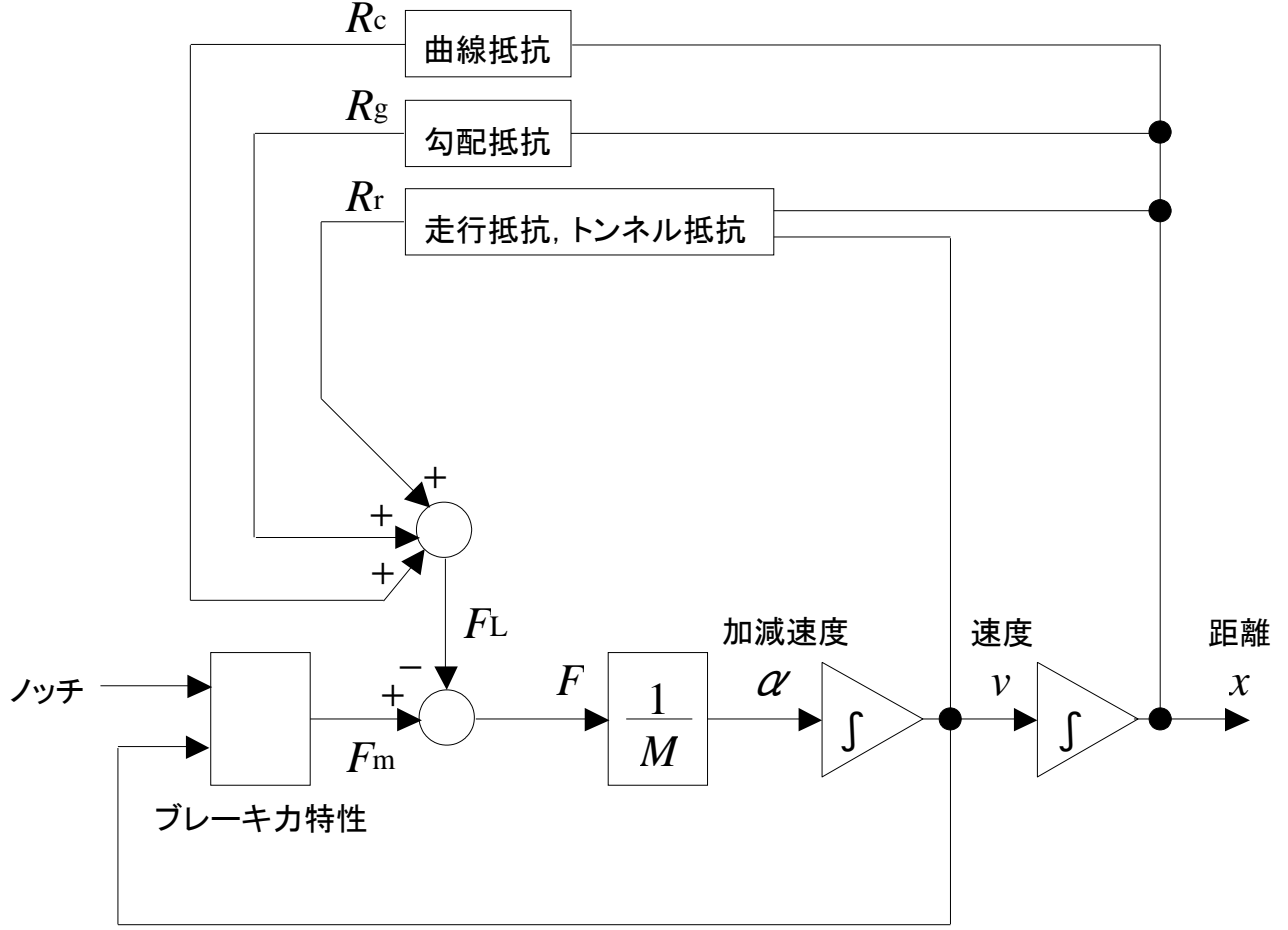


Fig. 3.5: 運転曲線の計算のブロック線図

走行抵抗 走行抵抗は車軸と軸受の摩擦抵抗、車輪とレールの摩擦抵抗、車両の揺れに生ずる摩擦抵抗及び空気抵抗の総和である。様々な物理効果が絡みあって構成し、論理的に求めるのは困難であるため、一般的には現車による実測データから速度の二次式と表される。Eq. (3.1) と Eq. (3.2) は走行抵抗 R_r [N] を示す式 [6] で、Eq. (3.1) は明かり空間、Eq. (3.2) はトンネル空間の走行抵抗である。 v [km/h] は列車速度、 M_M [t] は電動車質量、 M_T [t] は付随車質量、 M [t] は全編成質量、 n は編成両数である。

$$R_{r1} = 9.8[(1.65 + 0.0247v)M_M + (0.78 + 0.0028v)M_T + \{0.028 + 0.0078(n - 1)\}v^2] \quad (3.1)$$

$$R_{r2} = 9.8(2.088 + 0.0394v + 0.00067v^2)M \quad (3.2)$$

勾配抵抗 勾配抵抗は列車が勾配の上にあるとき、重力により勾配の下方に引き下げる力である。列車が勾配を登る時は減速させ、勾配を下る時は加速させる。Eq. (3.3) は勾配抵抗 R_g [N] を示す式 [6] である。 i [%] は勾配の傾斜を表す勾配量、 L [m] は勾配区間にある列車の長さ、 L_t [m] は列車の全長で、列車質量が一様分布するとみなし L の連続関数として表している。

$$R_g = 9.8M \left(\frac{i}{1000} \right) \left(\frac{L}{L_t} \right) \quad (3.3)$$

曲線抵抗 曲線抵抗は列車がカーブを通過するとき、進行方向を変えるために車輪のフランジが外側レールに作用することにより生ずる摩擦抵抗、レールの内側と外側の長さが違うため同軸に固定される車輪がどちらか滑るによる摩擦抵抗の総称である。曲線抵抗は軌間、曲線半径、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、実際には実験結果から誘導した Eq. (3.4) を用いている [6]。 R_c [N] は曲線抵抗、 r [m] は曲線半径、 L [m] は曲線区間にある列車の長さ、 L_t [m] は列車の全長である。

$$R_c = 9.8M \left(\frac{600}{r} \right) \left(\frac{L}{L_t} \right) \quad (3.4)$$

3.3.2.2 支援アルゴリズム

以上の計算式を用いて、時間刻みもしくは位置刻みをとって列車の運転曲線を計算し、計算結果に基いて適切な支援パターンを決めるのは良いが、列車の走行時間を推測する必要があるため、計算量が大きすぎるほか、線路の長さによって計算時間が変動する問題もある。

リアルタイムの支援意思決定では、できるだけ計算時間が少ないアルゴリズムが必要である。これに対する筆者の提案は、リアルタイムのシミュレーションではなく、オフラインであらゆる可能な状況に対し対応すべきブレーキパターンを用意し、容易に検索できる「辞書」として、支援開始点における通過速度と残り時間を index とするテーブルを用意することで、運転支援を行う時に電車の走行状態をこの辞書から選択し、適切なブレーキパターンを速やかに見つけることである。

理論的には、惰行状態におけるあらゆる位置、あらゆる速度、あらゆる残り時間をカバーする辞書を用意し、各ケースにおける最も緩いブレーキの制動パターンを収録すればよいが、もう一つ考慮すべきなのは、データベースのサイズである。リアルタイム支援でデータの通信速度を確保する必要があるため、あまり大きなデータベースでは検索時間も通信時間も長くなり、リアルタイム支援に支障が生じる恐れがある。従って、電車の走行状態を全面的にカバーしつつ、適切に小さな辞書を準備することが鍵となる。

そこで支援開始位置を固定する。すなわち支援開始位置を Fig. 3.6 (a) に示すように複数の既定値にし、電車がその位置を通過する時の速度と残り時間から、最も緩いブレーキパターンを選択する。この方法の優位点は、事前に容易に予測できる電車の惰行区間に支援開始位置を設ければ、電車がその点を惰行で通過することがほぼ確実になることである。また、過去の現車実験でわかった多様な運転状況に柔軟に対応するため、支援開始位置を複数設けることで、電車の加速性能が優れて予定より早く加速終了した場合に、早い段階で支援運転に入ることができ、より多くの残り時間を活かして緩いブレーキパターンを選択することができる。一方、何らかの原因で列車の速度が低下し、余裕時間が少なくなった場合でも、より次駅に近い点に設置した支援開始点で新たな情報に基づき支援ブレーキパターンを更新すれば、到着時分を守ることができる。

電車が決めておいた支援開始点を通過する時の速度と残り時間から、最も緩いブレーキ、つまり v_0 を検索する辞書を Fig. 3.6 (b) に示す。Fig. 3.6 (b) は、電車が支援開始位置を通過する速度を x

軸、残り時間を y 軸に展開して二次元のテーブルを用意し、その上に各 (x, y) に適用する一番小さな v_0 を z 軸にプロットした「辞書」である。速度の展開範囲は基準運転速度 $\pm 10\text{km/h}$ に設定し、運転士個人操作による速度差異をカバーする。「A band」と表示された部分は、ある通過速度に異なる残り時間が与えられた場合に、採用可能な一番小さな v_0 であり、上の辺では残り時間が少なく大きい v_0 を、下の辺では残り時間に余裕があり小さい v_0 を採用する。もしも残り時間が上の辺より少なければ、ぎりぎりまで惰行して最大ブレーキをかけたとしても駅間走行時分を守ることができず遅延を生じてしまう。一方、残り時間が下の辺より多かったとしても、保安上の理由から v_0 を下げるより緩いブレーキ操作は行わない。

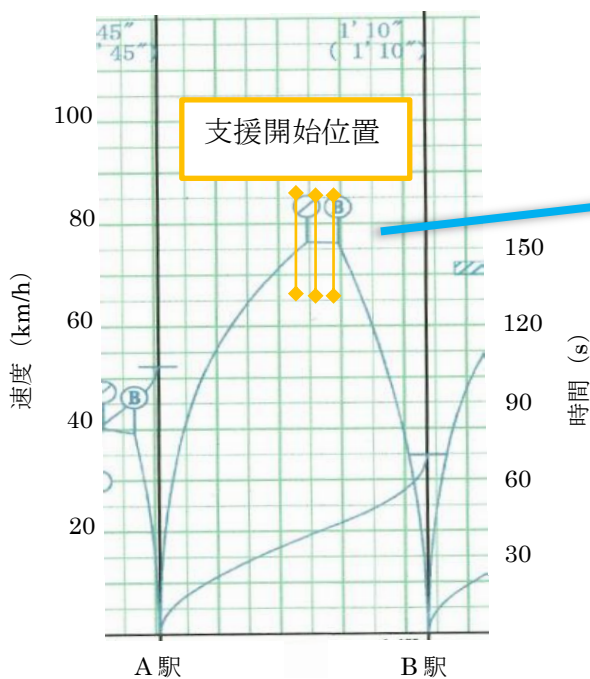
各 v_0 に適するブレーキパターンを作るには、決められたブレーキ出力に従って、次駅から制動曲線を逆引きし、支援開始点での通過速度まで支援運転曲線を作成してもよいが、異なる通過速度に該当する支援指令の違いは制動開始点の位置だけなので、それらの支援指令をすべてに収録することは冗長となる。そこで、支援開始点の各通過速度に合わせて支援指令を用意するのではなく、Fig. 3.6 (c) のように、支援開始点での想定した最大速度まで制動曲線（破線）と支援指令（実線）を用意し、実際の電車運転曲線（点線）を監視しながら、支援曲線（破線）とぶつかる点（A 点）から支援指令（実線）をアクティブにすれば、同じ v_0 に該当するすべての通過速度を一つの制動支援軌道データで対応できる。支援指令をアクティブしてから、指令曲線が平らな区間では一定のブレーキ力指令を、指令曲線が階段の部分では該当のブレーキ力変更指令を運転士に送れば良い。

これにより、辞書とデータベースのサイズを抑えながら必要な支援情報をカバーし、リアルタイムの支援意思決定が可能となる。

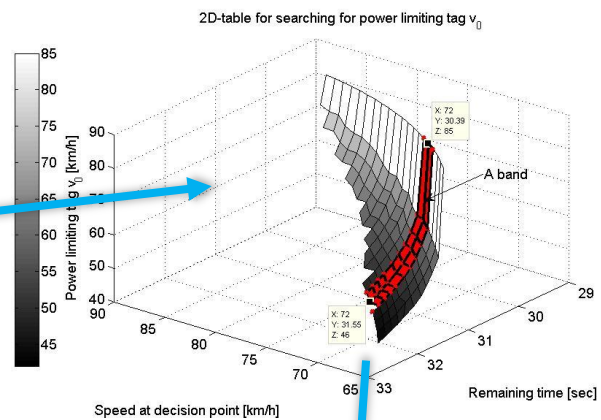
3.3.3 ブレーキの操作の指令支援

本稿におけるブレーキの操作支援とは、決定したブレーキパターンを運転士に伝達することである。運転士に指令に円滑に従ってもらうためには、指令の種類ができるだけ単一で、操作が簡単で、かつ連続する二つの指令の間に時間の余裕を十分に考慮することが重要である。また、保安のために、支援指令の最大ブレーキ力を常用最大ブレーキ力以下に設定し、万が一支援指令で止まらない場合でもより強い制動を可能とする必要がある。

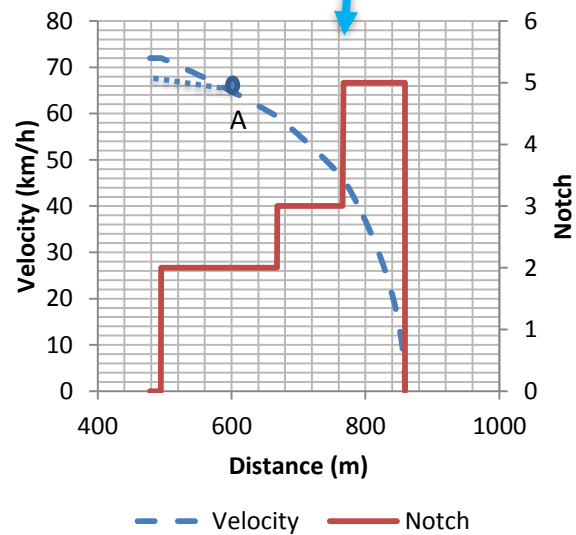
以上のように v_0 を探す二次元の「辞書」と該当のブレーキパターンを含めた v_0 による一次元データベースを独立に用意すれば、実際電車が支援開始位置を通過する時の状態に基づき、リアルタイムに適切なブレーキ指令を出すことが可能となる。そしてこの提案を、回生失効や回生絞り込みをどのくらい抑え、回生エネルギーの最大化と機械ブレーキの低減にどのくらい貢献できるかに基いて、次章の現車実験を通じて評価する。



(a) 支援開始点位置を複数の既定値にする



(b) 通過速度と残り時間からブレーキの緩さを決める「辞書」



(c) ブレーキ開始位置を動的に決める

Fig. 3.6: データベースのスリム化

現車実験に使用した車両は 8000 系で、その性能は Table. 4.1 に示す。

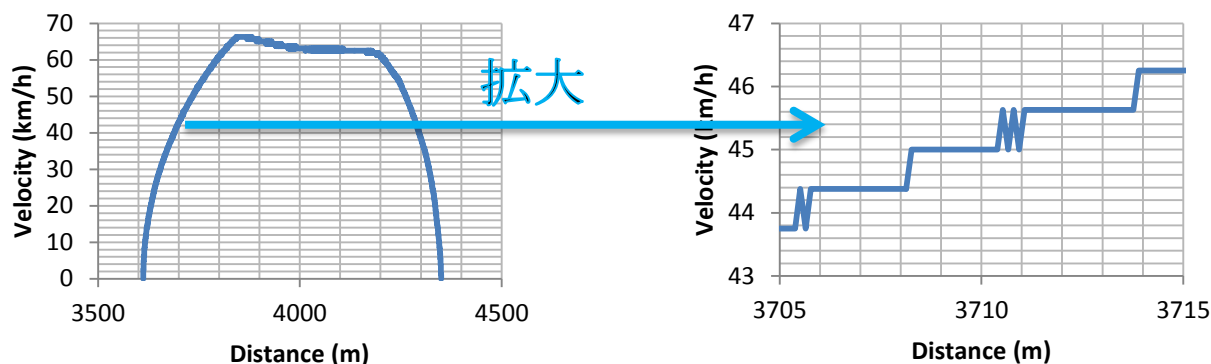
Table. 4.1: 8000 系車両諸元と性能

電気方式	1500V 架空電車線方式
編成形態	6 両編成 (4M2T)
車両質量	M 車 : 空車 35 トン、定員 127 名 42 トン
	T 車 : 空車 30 トン、定員 117 名 36.4 トン
電動機数	4 台 X4 両=16 台
最高運転速度	110km/h
起動加速度	3.0km/h/s
減速度 (常用最大)	4.0km/h/s
減速度 (非常)	4.5km/h/s
電動機種類	三相かご形誘導機

実験の情報を記録する列車運転状態記録装置は、松戸方面から二両目の車両 (M 車) に搭載し、Table. 4.2 に示すように電車の速度、制動指令、モータ周波数、架線電圧電流などを記録している。ただし、Fig. 4.2 のように速度の記録情報に量子化の雑音が入っているため、双一次変換によるローパスフィルターを使って、速度の平滑化、速度→距離、速度→加速度を推算する。

Table. 4.2: 装置の記録項目

項目	記録周期
フィルターキャパシタ電圧	1ms
q 軸電流指令値	1ms
トルク指令値	10ms
変調率	10ms
速度	10ms
応荷重計	10ms
制動指令値	10ms
制動フィードバック値	10ms
架線電圧	10ms
架線電流	10ms
d 軸電流指令値	10ms
モータ周波数	10ms



(a) 記録した運転曲線

(b) 量子化雑音

Fig. 4.2: データ記録の一例

4.2 データ解析


この部分では、各駅間における、支援なし運転と支援あり運転の時のランカーブ、電力、エネルギーの使用状況を分析して、異なる線路状況における支援支援の動作と効果を分析する。

4.2.1 データ分析対象

データ分析では、全区間のデータを羅列するのではなく、様々な線路状況と運転パターンから、汎用的な運転状況を反映できる、典型的な運用を選別して評価する。新京成線では線路状況が複雑で様々な駅間走行パターンが応用されている。その特徴を活かして代表的な運用を選んで分析すれば、実験線路に限らずより一般的な線路状況でもの支援効果を明かすことができる。

したがって、Table. 4.3 に示す4つの駅間を本論文のデータ分析に取り上げる。その中に、最高速度まで許す区間や、駅間が短く十分力行できない区間、急カーブが多く速度制限が厳しい区間など様々な路線状況が含まれている。また区間線路状況に合わせて最大力行ー惰行ーブレーキという一般的な走行パターンのほか、速度制限で二段力行・二段ブレーキなど特別な走行パターンも検討できる。一般的な線路状況と常用の運転方式をカバーできるので、その評価結果は汎用的に有用と考える。

Table. 4.3: データ分析駅間

	区間の特徴	基本運転パターン
駅間 I 前原 ↓ 薬園台	 勾配 上り カーブ 緩い 速度制限 なし 長い駅間距離 長い	線路状況が簡単のため、フル加速して高速運転を行う 力行ー惰行ーブレーキ

駅間 II 習志野 ↓ 北習志野	 <p> 勾配 水平 カーブ 急 速度制限 あり 駅間距離 短い </p>	駅間距離短いため、フル加速せず低速運転を行う 力行－惰行－ブレーキ
駅間 III 新津田沼 ↓ 前原	 <p> 勾配 上り カーブ 急 速度制限 あり 駅間距離 長い </p>	速度制限に合わせて二段力行を行う 力行－惰行－力行－惰行－ブレーキ
駅間 IV 北初富 ↓ くぬぎ山	 <p> 勾配 水平 カーブ 急 速度制限 あり 駅間距離 長い </p>	速度制限に合わせて二段力行及び二段ブレーキを行う 力行－惰行－力行－惰行－ブレーキ－惰行－ブレーキ

* 駅間の半分が上り勾配に占められる場合に「勾配 上り」、上り勾配と下り勾配も半分以下に占められる場合に「勾配 水平」と表記

** 駅間で半径が 300m 以下のカーブがある場合に「カーブ 急」、ない場合に「カーブ 緩い」と表記

*** 駅間距離が 1000m 以上の場合に「駅間距離 長い」、1000m 以下の場合に「駅間距離 短い」と表記

**** 運転パターン「惰行」という表現にはノコギリ運転（惰行による速度低下を補償する最力行操作）に伴って行うことがある

その 4 つの区間での運用を簡単に表現するために、Table. 4.4 に示すように、駅間番号（I、II、III、IV）に支援なしの N（Not assisted）或いは支援ありの A（Assisted）を付けて略記する。

Table. 4.4: 駅間運用の表記

	駅間 I 前原－薬園台	駅間 II 習志野－北習志野	駅間 III 新津田沼－前原	駅間 IV 北初富－くぬぎ山
支援なし	運用 I_N	運用 II_N	運用 III_N	運用 IV_N
支援あり	運用 I_A	運用 II_A	運用 III_A	運用 IV_A

N: Not assisted; A: Assisted

4.2.2 データ解析に使う物理量

ここに、データ解析に使う物理量を紹介する。

速度 速度というのは、車上記録装置の記録した速度データを平滑化したものである。それを縦軸に、距離や時間を横軸にプロットする図はランカーブであり、それにより駅間に走行する列車の加速運転、定速運転、惰行運転、ブレーキなどの状態を、速度の変動を通じて直感的に表すことができる。データ分析に使われる速度には、実績運転記録速度 **VEL REC** (Velocity recorded) と支援計画ランカーブ **VEL PL** (Velocity planed) の二種類あり、前者は電車運転の実績記録であり、後者は駅間線路の状況とパワー制限ブレーキの性能を想定した列車走行シミュレーションから得られた計画速度である。

パワー指令値 パワー指令値というのは、電車が出そうとする力行もしくはブレーキパワーであり、現在の制御系統ではこれをパワー実績値としても扱える。車上記録装置は力行・ブレーキのパワー指令値の相対値しか記録していないため、路線の勾配・カーブを考慮して節 4.1 に計算した加速度に合わせて列車が出すべき力行・ブレーキパワーを計算し、パワー指令値を絶対値に修正した。データ分析に使われるパワー指令値には全体のパワー指令値 **PWR CMD** (Power command) とモータ分のパワー指令値 **PWR CMD M** (Power command motor) の二種類あり、前者は電車が出そうとする力行・ブレーキパワーであり、後者はその前者の中にモータが分担する割合で、力行時は前者と同じく、ブレーキ時は機械ブレーキと併用することにより前者より低下することがある。また上記の実績記録のパワー指令値のほかには、シミュレーションから得た、支援運転のために想定したパワー計画指令値 **PWR PL** (Power planed) がある。

架線電力 架線電力 **PWR PG** (Power Pantograph) というのは、電車が架線から受け取るもしくは送り返す電力であり、車上記録装置に記録した架線電圧とパンタ電流の積と計算する。列車が力行し、架線から電力を取る時は架線電力をプラスに表示する。列車がブレーキし、架線へ電力を返却する時は架線電力をマイナスに表示する。

架線電圧 架線電圧 **V PG** (Voltage pantograph) は電車のパンタ点の電圧である。電車が変電所から電力を受け取る時にパンタは電圧降下の下方にあるため架線電圧が下がり、電車が回生ブレーキを使い架線へ電力を送り返す時は電圧降下の上方にあるため架線電圧が上がる。今回の実験に用いた 8000 系の車両では、架線電圧が 1650V を超えると回生絞込みが行われ、さらに 1750V を超えると回生失効が起こる、すなわちモータが開放される仕組みである。








エネルギー指令値 エネルギー指令値というのはパワー指令値の時間積分で、区間走行中に消費・回生した電力量である。その中に、力行状態でのパワー指令値の積分が**力行エネルギー指令値**、ブレーキ状態での全体/モータ分のパワー指令値積分が**ブレーキエネルギー指令値**／**回生エネルギー指令値**となる。ただし、計画パターンの回生エネルギー指令値は、該当駅間の実績運用で、回生絞込みを誘発した最小な回生パワー指令値を、計画パターンの回生パワー指令値の上限にし、時間積分した値である。これにより実績運用の等価的な架線負荷が加えるとき、計画パターンでの回生エネルギーを反映できる指標だと考えられる。

回生失効率 回生失効率とは列車がブレーキするときに、ブレーキエネルギー指令値から機械ブレーキの分担割合である。遅れ込め制御を搭載する列車の回生失効率が、回生ブレーキのみ使用する場合はゼロ (0%)、機械ブレーキと併用する場合は 0～1 (0～100%)、回生失効で機械ブレーキのみ使用

する場合は 1 (100%) となっている。回生失効率が小さいほど、機械ブレーキが抑制され、列車の走行エネルギー回収効果が大きいということである。

以上をまとめたものを Table. 4.4 に示す。

Table. 4.4: 略語一覧表

略語	日本語	色分け (Fig. 4.3~4.6)
VEL REC (Velocity recorded)	速度実績記録値	
VEL PL (Velocity planed)	速度支援計画値	
PWR CMD (Power command)	パワー指令値全体分	
PWR CMD M (Power command motor)	パワー指令値モータ分	
PWR PL (Power planed)	パワー計画値全体分	
PWR PG (Power pantograph)	架線電力	
V PG (Voltage pantograph)	架線電圧	

以下は、同じ駅間に支援なしと支援あり運用における時上記の評価物理量を、時間軸と距離軸にプロットし、その運転及び支援効果を評価する。よりわかりやすく説明するため、列車運転のある「状態」を 1、2、3 などの番号及び支援なしの N もしくは支援ありの A を付けて表記し、その「状態」ごとにデータを分析する。

4.2.3 駅間 I における実験結果

駅間 I、前原→薬園台区間では駅間距離が 1460m で長く、急勾配もないため高速度で運転することができる。この区間の速度、パワー・電力使用状況は Fig. 4.3 に示す。

状態 1 状態 1 は、列車が前原から発車して、高速度まで加速してからノッチオフし惰行する段階である。具体的には、運用 1_N と 1_A のノッチオフ速度が 84km/h で、力行距離・時間が 480m・36 秒程度である。消費電力が Fig. 2.4 のモータの出力特性にしたがって増加・一定・低下し、架線電圧が 1550V から 1480V まで低下する。

状態 2 状態 2 は、高速に路線を走行する段階である。2_N は勾配を登る時の速度低下を抑えるために弱いノッチを入れて 280m を力行する。一方、2_A は力行せず慣性だけで勾配を登り、顕著な速度低下がある。

状態 3 状態 3 は、停車駅薬園台駅に近づき、ブレーキする段階である。3_N は高速で駅手前 330m まで惰行して強いブレーキをかける。架線回生電力が大きいので、架線電圧はすぐに 1650V を超え、回生絞込みが発生して回生ブレーキパワーが全体ブレーキパワーより大きく下回る。一方 3_A では、駅手前 370m から出しているブレーキ指令に従い、より緩いブレーキをかけるため、ある程度回生絞込みの発生を抑えることができる。ただし、実際のブレーキ指令が支援指令より 4 秒・80m ほど遅れる

ことで列車速度が計画より速いため、運転士が自分の体感で支援指令より強いブレーキをかけている。それにより架線回生電力が大きいため、回生絞込みが発生する。

状態 4 状態 4 は、薬園台駅に到着する段階である。4_N は 2_N の高速走行と 3_N の急ブレーキ操作により、走行時間が 86 秒で短いである。それに対して 4_A は 2_N の惰行と 3_A の緩いブレーキ操作により、走行時間が 89 秒、4_N より 3 秒を伸びる。また、4_A より手前から緩いブレーキをかける計画パターンでは、予測走行時間が 92 秒である。いずれの走行時間でも基準運転時分の 100 秒に収まり、通常の運転に支障を生じないことがわかる。

エネルギー 運用 I_N と I_A のエネルギー使用状況は Table. 4.5 に示す。運用 I_N がノコギリ運転を行い高速に走行するため、惰行を利用する運用 I_A より力行エネルギー指令値もブレーキエネルギー指令値も大きい。ブレーキする時、運用 I_N が急ブレーキを使うため、回生電力が大きく架線電圧上昇により回生失効が発生し、回生失効率が高い。一方、運用 I_A では、支援指令のもとに回生絞込みをある程度抑制できるが、無駄時間のため列車が計画パターンよりはずれ、最後に強いブレーキになることで回生失効率が高いことがわかる。計画パターンでは、シミュレートしたブレーキエネルギー指令値が I_A の実績値と一致しており、支援計画の正確さが確認できる。また計画パターンの回生失効率がほぼゼロであることから、支援パターンをうまく実行すれば、I_A での回生失効率がまだまだ下げられると考えている。

Table. 4.5 駅間 I のエネルギー使用状況

	運用 I_N	運用 I_A	計画支援パターン
走行時間 ①	86s	89s	92s
制動距離 ②	330m	290m	370m
力行エネルギー指令値 ③	21.85kWh	17.71kWh	N.A.
ブレーキエネルギー指令値 ④	-15.07kWh	-11.31kWh	-11.66kWh
回生エネルギー指令値 ⑤	-7.13kWh	-5.99kWh	-11.54kWh
回生失効率 ⑥ = (④-⑤) / ④ × 100%	52.65%	47.06%	1.03%

Table. 4.5 の①～⑥について、以下のことがわかる。

- ① 全体が基準運転時分 100s に収まる。
- ② 一見すると I_A より I_N の方は制動距離が長い、I_A が I_N より走行速度が低いため、減速分の制動距離では I_A の方が長い。ただし計画より I_A は遅れる。
- ③ I_N はノコギリ運転を行うため、I_A より力行エネルギー指令値が大きい。
- ④ ③と同じ理由で I_N が I_A をよりブレーキエネルギー指令値が大きい。また、I_A はその支援計画が一致することから、計画の精確さが確認できる。
- ⑤ I_N と I_A は回生絞り込みで④より大きく下回る。計画支援パターンでは、ブレーキパワー指令値が小さく、回生絞込みによる影響は少ない。
- ⑥ I_A が支援運転で I_N より少しの改善があるが、無駄時間に適切な対策をし、計画パターン通りに走れるようにすれば、まだ改善の余地がある。

駅間 I まとめ 駅間 I では、高速な運転での支援ブレーキ実験を行った。支援計画パターンでは回生失効率が低い、無駄時間によりブレーキ開始点が計画より遅れるため、運転士が計画より強いブレ

一キをかけることで回生電力が大きく、従来並の回生絞込みが発生する。また、走行時分は基準運転時分に収まる一方で、より強いブレーキを使ったため計画時分より短くなった。

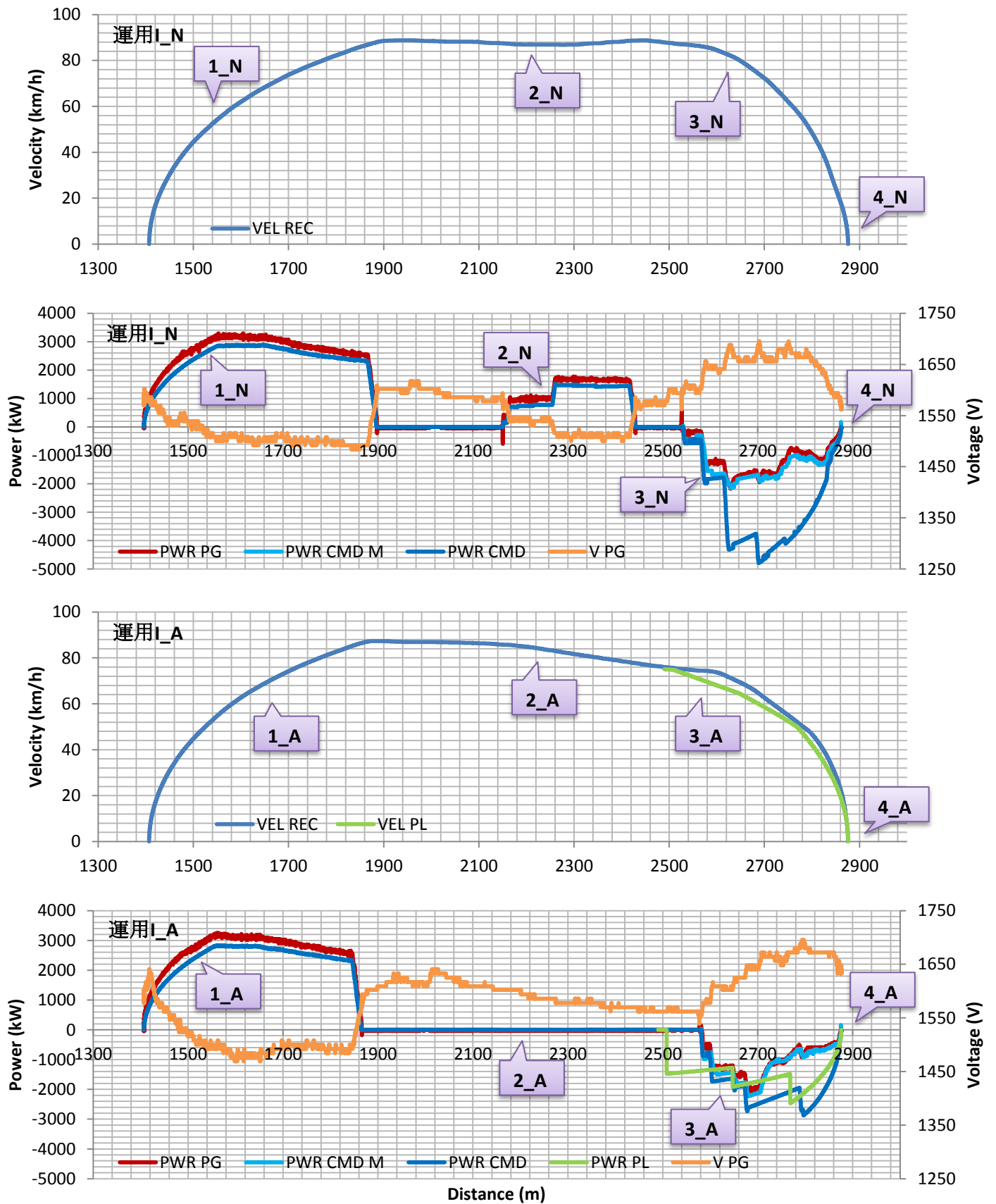


Fig. 4.3 (a) 運用 I_N と I_A のランカーブ、電力使用状況（距離軸）

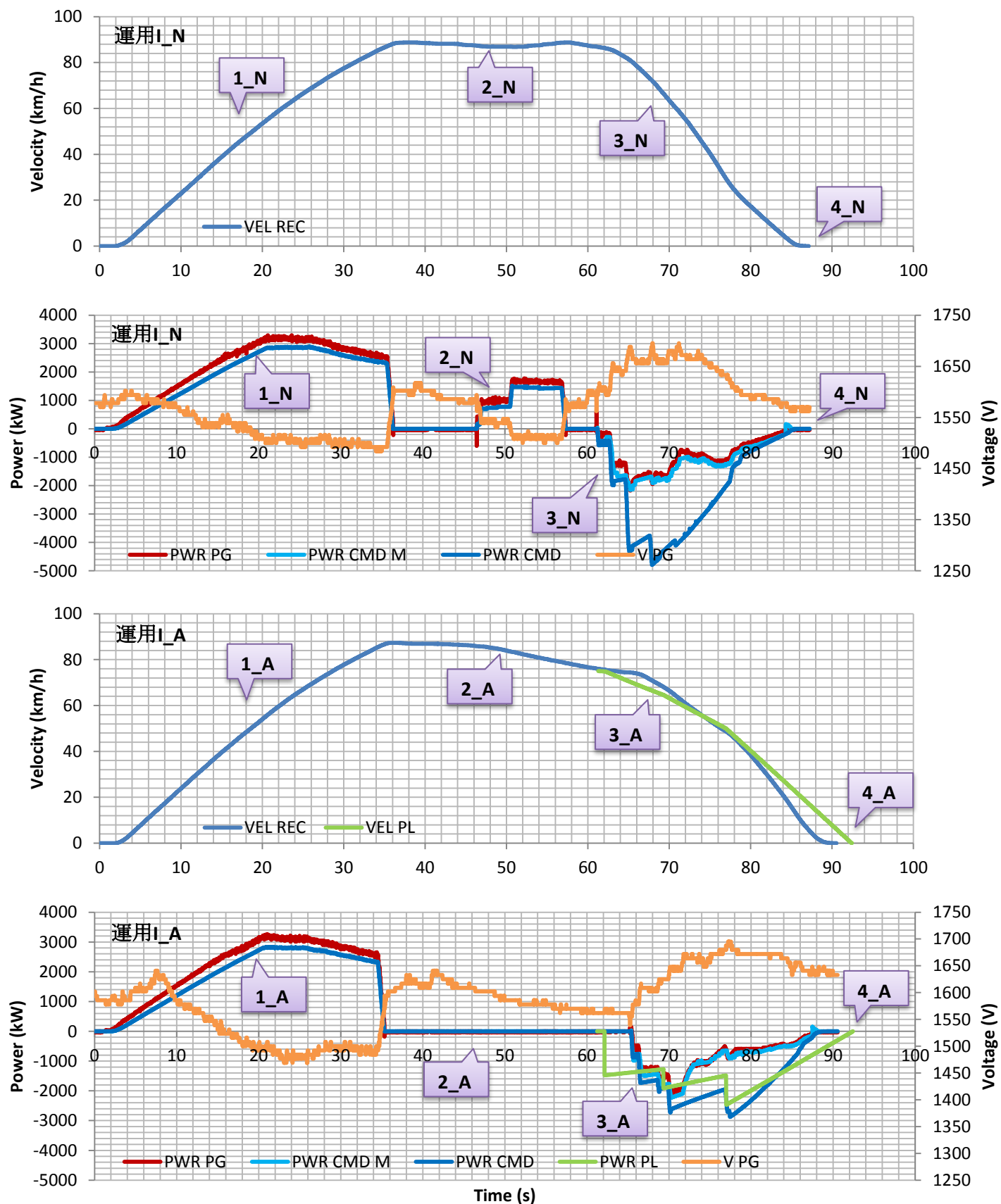


Fig. 4.3 (b) 運用 I_N と I_A のランカーブ、電力使用状況 (時間軸)

4.2.4 駅間 II における実験結果

駅間 II、習志野→北習志野区間では駅間距離が 740m で短く、かつ急勾配で速度制限が設けられているため、フル加速せず低速運転することになる。この区間の速度、パワー・電力使用状況を Fig. 4.4 に示す。

状態 1 状態 1 は、習志野から発車し速度制限まで加速し、ノッチオフし惰行し始める段階である。1_N のノッチオフ速度が 1_A よりやや高い。ただ、力行パワー指令値からわかるように、1_N も 1_A もモータの特性領域まで加速していない。

状態 2 状態 2 は、列車が到着駅北習志野の近くまで惰行し、ブレーキし始める段階である。2_N は駅手前 200m まで惰行し、強いブレーキをかける。それにより発生する架線回生電力が大きい、この列車の近くに存在する電力負荷により架線電圧の上昇が抑制され、回生絞込みが発生しなく回生ブレーキがフルに稼働している。一方 2_A では、駅手前 470m から出した支援指令にしたがって緩いブレーキをかける。ブレーキをかけ始める時は架線電圧が 1640V の軽負荷状態であるにもかかわらず、支援指令にしたがいブレーキパワーを制限することで、回生絞込みを誘発せずに、回生エネルギーを架線へ送り返すことが確認できる。また、II_A が支援指令の元でブレーキ力の変更を抑え、II_N より初込めブレーキに受ける影響が少なく、回生パワー指令値がよりブレーキパワー指令値に密着する。そのほかに 2_A では、実績のブレーキ指令が支援計画より遅れるにもかかわらず、運転士が支援指令よりやや大きいブレーキ力を出すため、列車の速度が予定以上に低下する。それによりホームの手前に停止しないように、運転士が停止の直前に 15m ほどの惰行を挿入することがわかる。

状態 3 状態 3 は、列車が北習志野に到着する段階である。ノッチオフ速度がやや高い、急ブレーキを使う 3_N では運転時分が 61s で短い。3_A では、支援予測時間が 69s であるが、実際運転の最後に挿入した低速惰行のため、時間が伸びてしまい 76s で、基準運転時分の 70s より長い。

エネルギー II_N、II_A、計画支援のエネルギー使用状況を Table. 4.6 に示す。II_N ノッチオフ速度が高いためその力行エネルギー指令値、ブレーキエネルギー指令値、回生エネルギー指令値が、早めにノッチオフする II_A より大きいことがわかる。一方回生失効率では、運用 II_N は回生するとき電力負荷があるため回生失効率が 11.6%ほど低い水準にとどまる一方、運用 II_A が 3980m のところに架線負荷が軽く電圧が 1640V まで上昇するが、支援指令のもとで回生パワーを抑えることで回生絞込みを回避する上、ブレーキ力の変更を少なくすることで初込めブレーキを抑制し、回生失効率が II_N よりも下回ることがわかる。また、計画パターンより初込ブレーキの影響で回生失効率が少々高いが、納得できる範囲だと考えている。

駅間 II まとめ 駅間 II では、駅間 I よりやや低い速度の運転での支援ブレーキ実験を行った。支援開始時に発生した無駄時間に関わらず、計画ブレーキパターンが弱いため、運転士が多少ブレーキ力を強めても回生失効を起こさなくて済む。また、ブレーキ力の変更回数を少なくすることで初込めブレーキも抑えられる。これにより、II_A の回生失効率が重負荷回生条件に恵まれた II_N よりも小さく、計画並に達成する。ただし走行時分に関しては、計画パターンより減速しすぎて低速惰行を挿入したため、走行時間が基準運転時分よりも長くなってしまった。

Table. 4.6: 区間 II のエネルギー使用状況

	運用 II_N	運用 II_A	計画支援パターン
走行時間 ①	61s	76s	69s
制動距離 ②	200s	380m	470m
力行エネルギー指令値 ③	10.38kWh	9.43kWh	N.A.
ブレーキエネルギー指令値 ④	-8.61kWh	-7.77kWh	-7.72kWh
回生エネルギー指令値 ⑤	-8.09kWh	-7.68kWh	-7.72kWh
回生失効率 ⑥ = (④-⑤) / ④ × 100%	6.10%	1.15%	0.00%

Table. 4.6 の①～⑥について、以下ことがわかる。

- ① II_N が基準運転時分 70s に収まる。II_A の計画パターンも 70s に収まるが、II_A の実績はブレーキしすぎて低速時に惰行を挿入したため、走行時分が基準より長い。
- ② II_A が II_N より制動距離が長い、計画より遅れる。
- ③ II_A のノッチオフ速度が低いため、II_N より力行エネルギー指令値が小さい。
- ④ ③と同じ理由で II_A が II_N よりブレーキエネルギーが小さい。また、II_A はその支援計画が一致することから、計画計算の精確さが確認できる。
- ⑤ 回生絞り込みが発生していないが、初込めブレーキにより④より小さくなる。ただし、計画パターンでは初込めブレーキを考慮しないため④と同じ。
- ⑥ 支援による II_A は、II_N よりブレーキ力変更回数が少ないため初込めブレーキが抑えられ、回生失効率が小さく、計画パターン並に達成する。

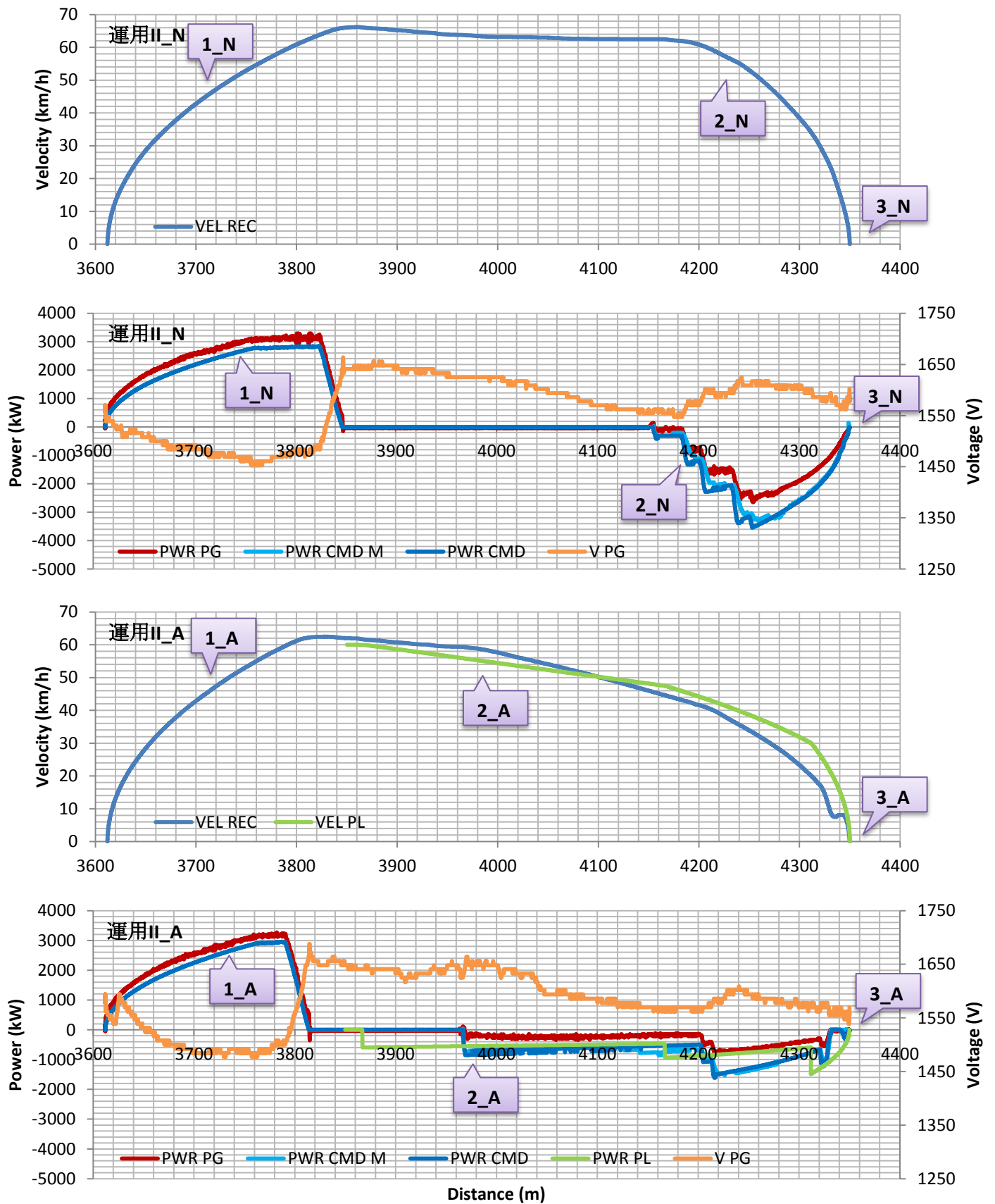


Fig. 4.4 (a) 運用 II_N と II_A のランカーブ、電力使用状況 (位置軸)

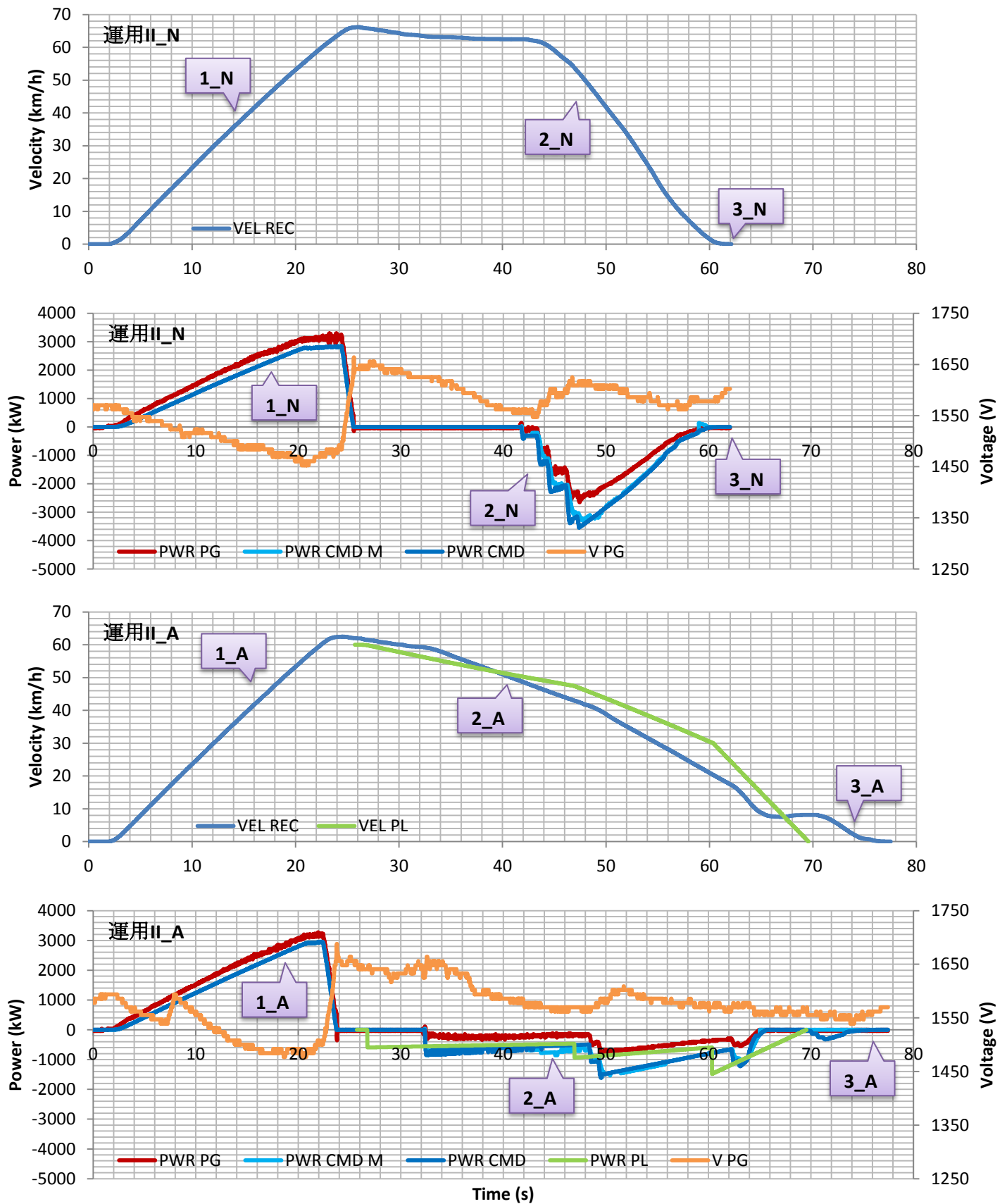


Fig. 4.4 (b) 運用 II_N と II_A のランカーブ、電力使用状況 (時間軸)

4.2.5 駅間 III における実験結果

駅間 III、新津田沼－前原駅間では、急カーブで速度制限が設けられているため、二段力行の運転パターンになっている。また、上り勾配があるため列車の速度が落ちやすい。この区間の速度、パワー・電力使用状況を Fig. 4.5 に示す。

状態 1 状態 1 は、列車が新津田沼から発車して、40km/h の速度制限に達してからノッチオフして惰行に入る段階である。1_N が 8s で加速済みだが、より力行パワーが小さい 1_A が 14s も費やす。両者の架線電圧について、力行パワーが大きい 1_N が 1550V、1_A より 40V 低い位まで下がっている。

状態 2 状態 2 は、速度制限の下に運転する段階である。2_N は勾配を登る時の速度低下を抑えるため、途中に制限速度まで加速するノコギリ運転を行う。一方、2_A は再力行しておらず、ずっと惰行している。

状態 3 状態 3 は、速度制限が弱まる区間に入る段階である。編成の最後の車両が 40km/h の速度制限区間を走りぬいたあと、列車が再び力行し、制限速度 70km/h まで加速する。1_N も 1_A もこの状態での力行パワーが大きく、電圧降下も大きいことが確認できる。

状態 4 状態 4 は、速度制限の下に運転する段階である。惰行中の速度低下を抑えるため 1_N は 2_N のようにノコギリ運転を行う。ただし力行パワーが弱く、電圧降下も少ない。一方、1_A はノコギリ運転を行わずに惰行しつづける。

状態 5 状態 5 は、停車駅前原に近づきブレーキの段階である。1_N は停車駅手前 230m まで高速に惰行して強いブレーキをかける。ブレーキかけ始める 4 秒まででは、モータ分のブレーキパワー指令値が全体のパワー指令値を追いかけていたが、架線電圧が 1650V を超える時点から電気回路を保護するために列車の制御系統が回生絞込みを行い、モータ分のブレーキパワー指令値が抑えられる。この時に不足するブレーキ力が機械ブレーキの立ち上げで補完しているものと考えている。一方 1_A では、1020m から支援装置が出したブレーキ指令にしたがって、停車駅手前 260m、1_N より 30m 手前からブレーキかけ始める。支援指令のもとに、運転士が高速域に弱いブレーキ、低速域に強いブレーキを掛け、ブレーキパワー指令値を抑えることで、架線電圧が 1650V を下回り回生絞込みが発生せず、モータ分のブレーキパワー指令値がずっと全体のパワー指令値を追いかけている。ただし、ブレーキ開始位置が計画支援より 120m、6s ほど遅れるため列車速度が計画より速いので、オーバラン防止のために運転士が停車位置の直前に支援指令より強いブレーキをかけている。これにより少し回生絞込みが発生することがわかる。

状態 6 状態 6 は、前原に到着する状態である。全体的に高速で運転し、かつ強いブレーキで停車する 1_N の走行時分が 106s である。それに対して、惰行を利用して走行し、弱いブレーキで停車する 1_A の走行時分が 113s、1_N より 7 秒長引く。また、計画支援より強いブレーキを用いたため、1_A が計画支援の予測走行時分 116s より短いことが確認できる。ただし、上記の走行時分のいずれも基準運転時分の 120s に収まれ、運営上の時間問題をもたらさないと考えられる。

エネルギー III_N、III_A、計画支援のエネルギー使用状況を Table. 4.7 に示す。III_N はノコギリ運転で高速で走行するため、その力行エネルギー指令値、ブレーキエネルギー指令値、回生エネルギー指令値が、惰行で走行する III_A より大きく、エネルギーのやり取りが大きいことがわかる。一方回生失効率では、III_A は停止直前の回生絞り込みのため、計画パターンより回生失効率が高いが、

高速域に回生パワーを制御することで、回生失効率が支援なしの III_N の 1/3 しかなく、エネルギー回収効果を大幅に上げることが確認できる。

Table. 4.7: 駅間 III のエネルギー使用状況

	運用 III_N	運用 III_A	計画支援パターン
走行時間 ①	106s	113s	116s
制動距離 ②	230m	260m	380m
力行エネルギー指令値 ④	16.54kWh	13.00kWh	N.A.
ブレーキエネルギー指令値 ⑥	-9.48kWh	-6.21kWh	-6.28kWh
回生エネルギー指令値 ⑦	-5.60kWh	-5.45kWh	-6.28kWh
回生失効率 ⑧ = (⑥-⑦) / ⑥ × 100%	40.95%	12.24%	0.13%

Table. 4.7 の①～⑥について、以下のことがわかる。

- ① 全体が基準運転時分 120s に収まる。
- ② III_A は III_N より制動距離を伸ばしたが、計画パターンより 120m ほど遅れる。
- ③ III_A は惰行を利用するため、ノコギリ運転を行う III_N より力行エネルギー指令値が小さい。
- ④ ブレーキ開始速度は III_N より III_A の方が低いため、ブレーキエネルギーが小さい。また、III_A の支援計画と実績記録は一致することが確認できる。
- ⑤ 回生絞り込みで④より小さいである。計画支援パターンのブレーキパワー指令値は回生絞り込み発生閾値を下回るから、⑦と⑥が同じである。
- ⑥ III_A が III_N より大幅に改善することが確認できる。また計画パターンの数値を見ると、さらに改善できる余地がある。無駄時間の影響を解消し、停止直前の回生絞り込みをなくすることで回生失効率がさらに下がると考えられる。

駅間 III まとめ 駅間 III では、速度制限による二段力行の運転パターンにおける支援実験を行った。二段力行による走行時分の不確定性要素があるが、余裕時分に基づいた運転支援が正しく基準運転時分を守る支援パターンを出すことを確認できた。また、支援における無駄時間により実績ブレーキパターンが計画パターンより強く、ブレーキパワーも大きい、従来より緩いブレーキをかけているため、回生絞り込みを抑え回生失効率を小さく抑えることができた。

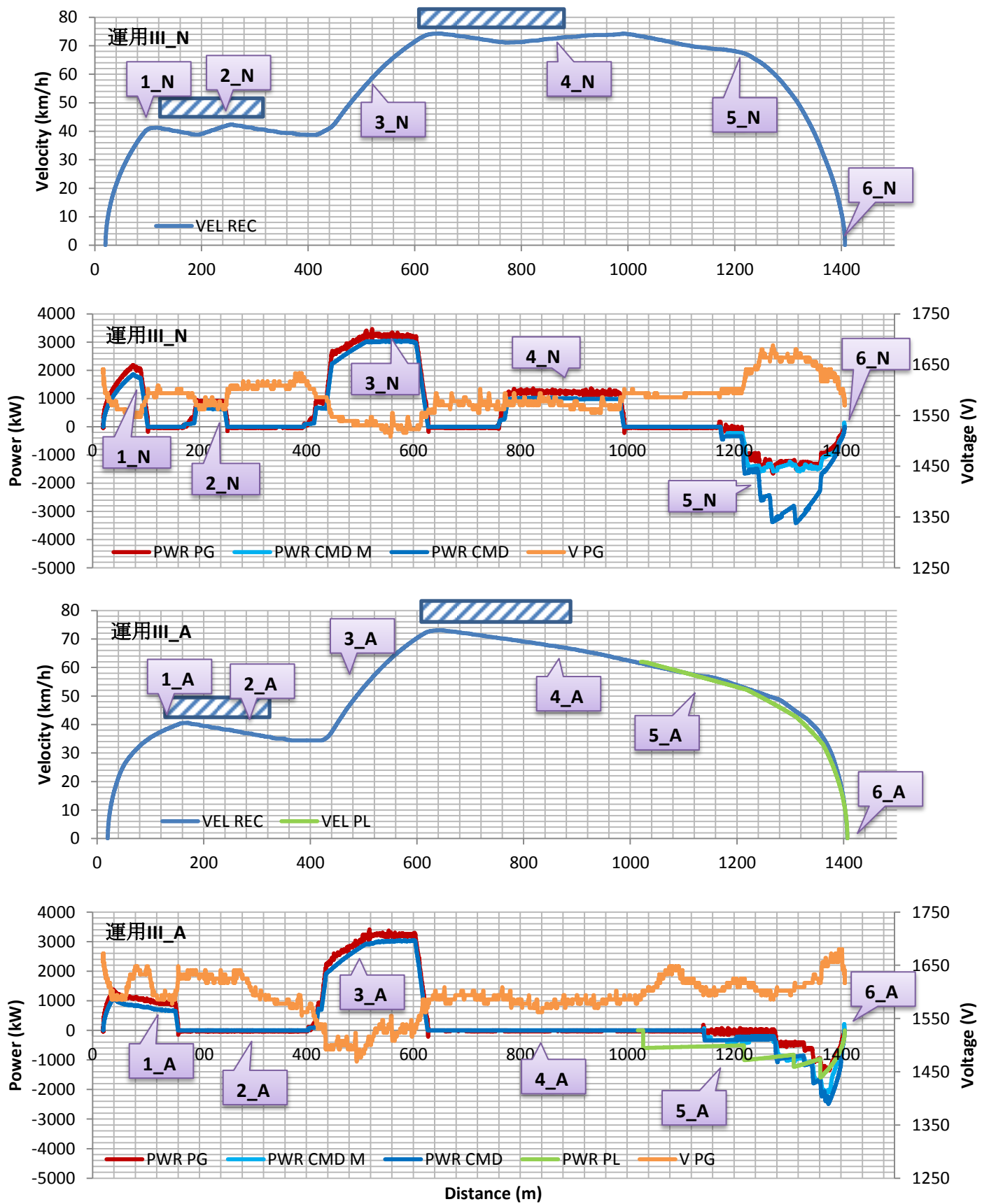


Fig. 4.5 (a): 運用 III_N と III_A のランカーブ、電力使用状況（距離軸）

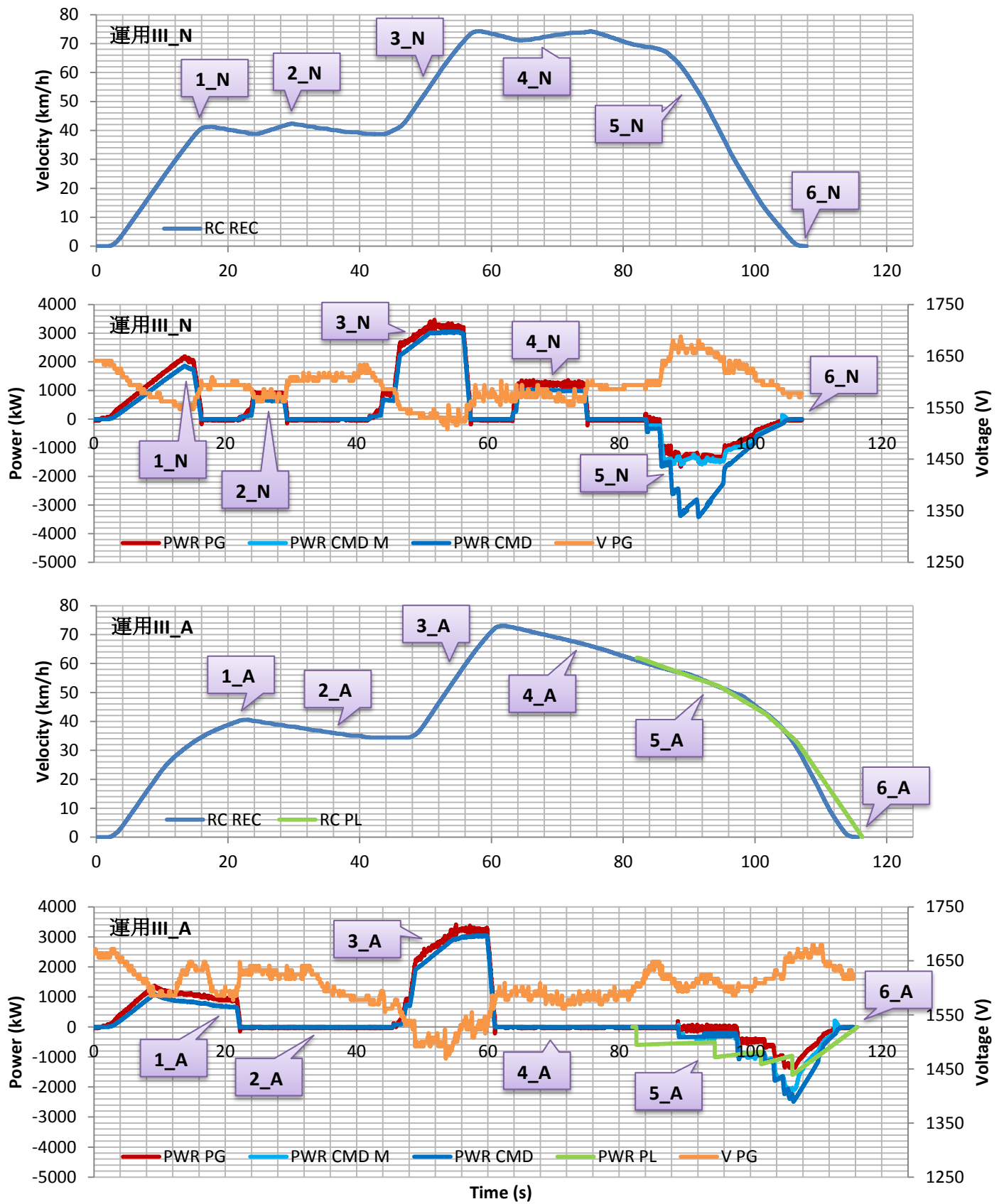


Fig. 4.5 (b): 運用 III_N と III_A のランカーブ、電力使用状況 (時間軸)

4.2.6 駅間 IV における実験結果

駅間 IV、北初富ーくぬぎ山区間では、急カーブが多く複数の速度制限が設けられているため、二段制動、二段ブレーキを採用することになる。この区間の速度、パワー・電力使用状況を Fig. 4.6 に示す。

状態 1 状態 1 は、北初富から発車し、速度制限まで加速してからノッチオフする段階である。1_N の場合は架線電圧が低く、また力行する際に架線電圧が 1300V 以下まで落ちることがある。そのためモータの出力特性が影響され、架線電圧がそこまで落ちていない I_A より早々特性領域に入ってしまうことがわかる。

状態 2 状態 2 は、列車全編成が速度制限区間を経過した後、最高速度まで再力行する段階である。2_N も 2_A も架線電圧が大幅に低下する。また、2_N の最力行の終わる直前に架線電圧が 1350V まで上がるとともにモータの力行パワーが上昇し、力行性能が少し回復したことがわかる。

状態 3 状態 3 は、列車が急カーブに近づき、制限速度まで減速する状態である。3_N では速度制限より 320m 手前の位置まで惰行し、強いブレーキを用いて減速し始める。ブレーキパワー指令値が最大 4800kW も達し、大きい架線回生電力により架線電圧が一気に上昇し、電気回路の保護のためモータの回生パワー指令値が絞られる。3_A では、速度制限区間より 440m 手前から指令値が出しているが、実際のブレーキ操作がそれより 4 秒・100m も遅れているため、運転士がやむを得ず計画より強いブレーキをかけている。ブレーキパワー指令値が計画より二倍あまりにも上回り、ブレーキ力制御が失敗し、回生絞込みでモータの回生パワーが絞られる。また、3_N も 3_A も速度制限区間まで 80m の余裕を持って減速終了し、運転士の心理負荷による「過保護」的な判断だと思われる。

状態 4 状態 4 は、列車が到着駅くぬぎ山に近づきブレーキする状態である。4_N はギリギリまで惰行して急ブレーキをかけるため架線回生パワーが大きく、回生絞込みが発生している。4_A では、運転士がまた支援指令を受けていない状態で、自分の感覚にしたがって列車をブレーキする。列車速度が 4_N より低くて回生電力も大きくないので、回生絞込みは発生していない。ここには、4_A に運転士が自分の感覚を優先する理由として二点が挙げられる。一つ目は列車が計画パターンより速く走っているため、必要なブレーキ距離は計画以上長いことである。運転士が実際のランカーブを見ていないが、自分の体感で列車のオーバーランの不安を感じているからブレーキをかけているものと考えられる。二つ目は、運転士が直接に惰行からブレーキノッチ 5 まで入れるのに心理的な抵抗があり、かつ乗り心地にも気を配っているため、ノッチ 2 や 3 の過渡ノッチを入れるために早めにブレーキをかけ始める。

状態 5 状態 5 は、列車が停車駅に到着する状態である。惰行距離を伸ばし強いブレーキをかける 5_N の走行時間は 114s である。惰行距離を縮み緩いブレーキを使う 5_A は 118s で 5_N より長いが、支援指令より強いブレーキを使ったため、計画時間 124s より短い。ただし、上記のいずれも基準運転時分の 125s に収まることが確認できる。

エネルギー IV_N、IV_A、計画支援のエネルギー使用状況を Table. 4.8 に示す。力行エネルギー指令値とブレーキエネルギー指令値では、IV_N と IV_A のノッチオフ速度がほぼ同じであるため、両方が同じレベルである。一方回生エネルギー指令値では、支援ありの IV_A が逆に支援なしの IV_N より少ない。その原因は IV_A は指令実行が遅れて IV_N と同じように強いブレーキになり回生絞込みが発

生する上に、当時の架線電圧は IV_A が IV_N より高く回生絞込みがより深刻になるからである。また回生失効率も IV_A が IV_N より大きく、機械ブレーキの分担が大きくなることがわかる。

Table. 4.8: 駅間 IV のエネルギー使用状況

	運用 IV_N	運用 IV_A	計画支援パターン
走行時間 ①	114s	118s	124s
制動距離 ②	400m (二段制動)	420m (二段制動)	460m (二段制動)
力行エネルギー指令値 ④	18.02kWh	17.01kWh	N.A.
ブレーキエネルギー指令値 ⑥	-14.64kWh	-13.84kWh	-14.28kWh
回生エネルギー指令値 ⑦	-10.50kWh	-9.31kWh	-14.28kWh
回生失効率 ⑧ = (⑥-⑦) / ⑥ × 100%	28.30%	32.72%	0.00%

Table. 4.8 の①～⑥について、以下のことがわかる。

- ① 全体が基準運転時分 125s に収まる。
- ② IV_A は IV_N より制動距離が伸びるが、一段目の制動が支援計画より遅れ、二段目の制動が運転士自身の判断で行われる。
- ③ IV_A と IV_N のノッチオフ速度が近いので、力行エネルギー指令値も近い。
- ④ ③と同じ理由で I_A のブレーキエネルギー指令値が I_N に近い。また、IV_A の支援計画が実績と一致する。
- ⑤ 回生絞り込みで④より小さいである。計画パターンでのブレーキパワー指令値が回生絞り込み閾値を下回るため、回生エネルギーはブレーキエネルギーと同じである。
- ⑥ IV_A の回生失効率が IV_N より改善していないことがわかる。無駄時間による遅れと過剰に防衛的なブレーキ操作により、IV_A が IV_N 並のブレーキ力を出していて、支援で狙ったブレーキ力制御ができていない。その二点を改善したら、回生失効率に大幅の改善が予想される。

駅間 IV まとめ 駅間 IV では、速度制限による二段力行及び二段ブレーキの運転パターンにおける支援実験を行った。無駄時間の影響に加え、運転士の過保護的な操作により、ブレーキ力制御ができなかった。また、二段ブレーキの第二段階における「惰行—最大支援ノッチ」という操作が、運転士から心理的な抵抗余裕や乗り心地を損なう恐れがあり、改良する必要があると指摘されている。

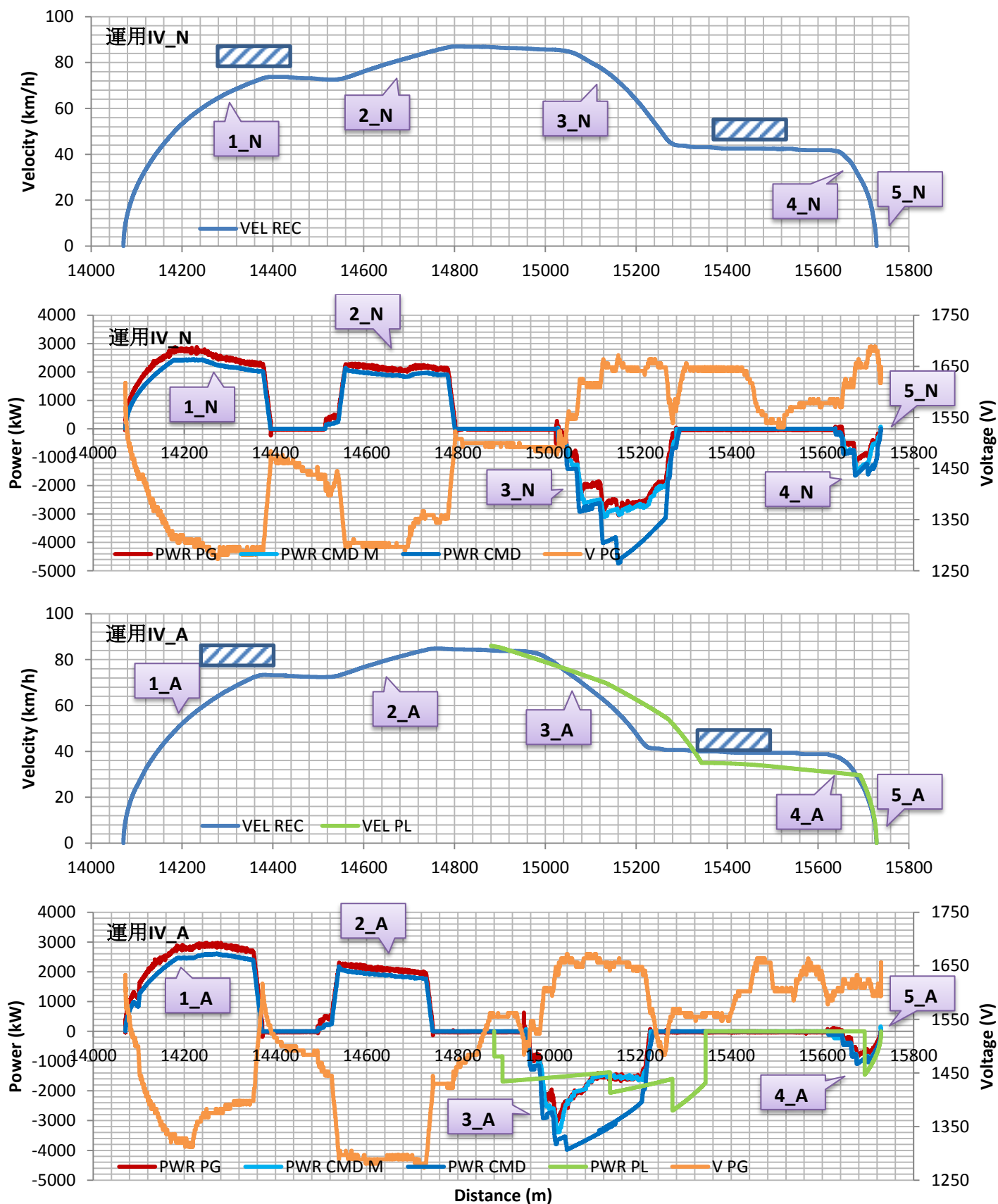


Fig. 4.6 (a) 運用 IV_N と IV_A のランカーブ、電力使用状況 (位置軸)

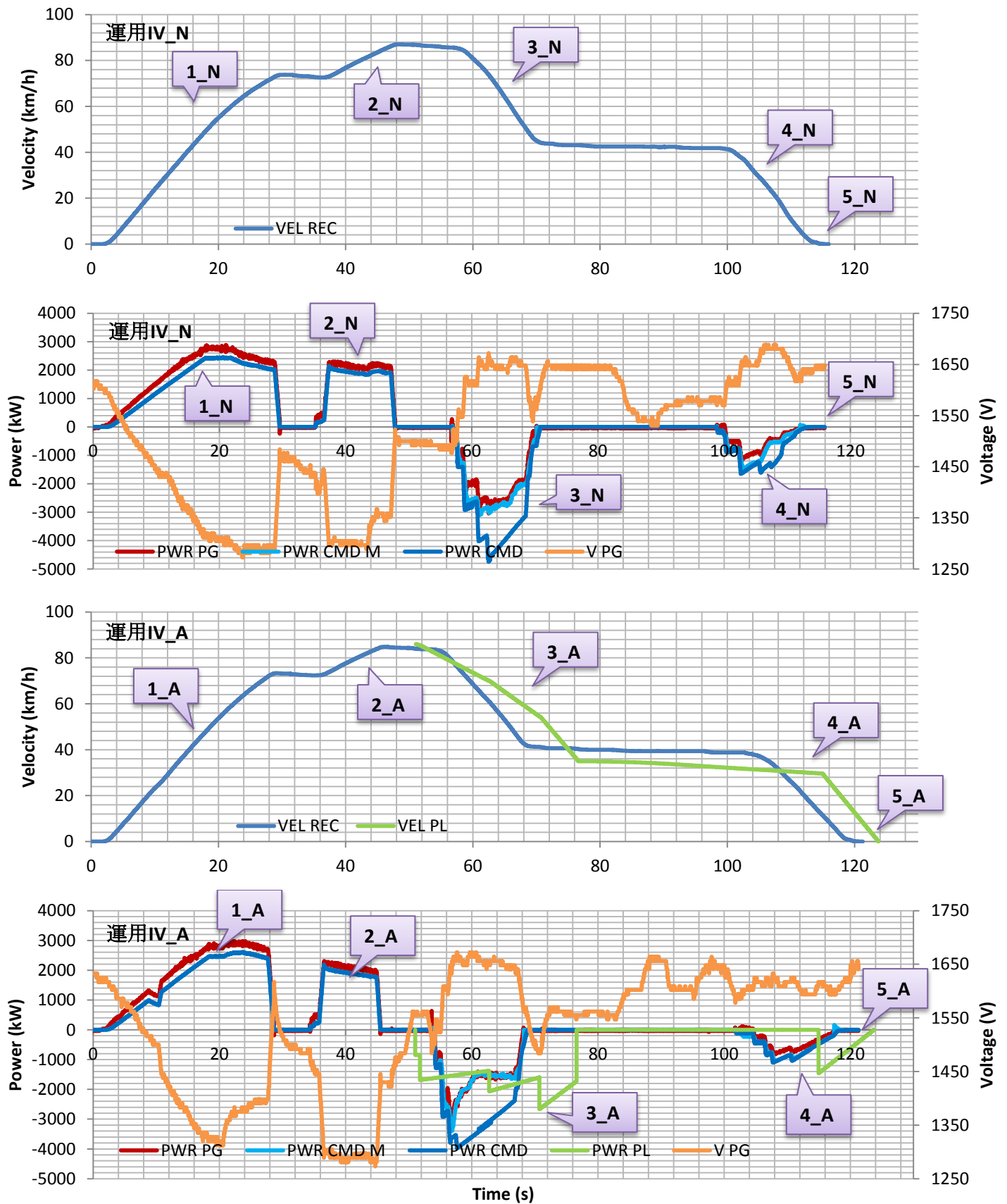


Fig. 4.6 (a) 運用 IV_N と IV_A のランカーブ、電力使用状況 (位置軸)

4.3 支援効果のまとめ

ここに現車実験に通じて実証された支援効果をまとめる。

1. 省エネルギー効果・電力利用率の向上

現車実験において、第3章に提案した「ブレーキ力を制限することで回生絞込みの回避」が確認できた。現段階ではまた支援効果に影響するシステムの無駄時間を別件に検討する必要があるが、無駄時間の影響が小さい運用では Fig. 4.7 に示すように、運転支援がある場合には全体のブレーキ力負担の多くの割合が電動機に担われ、機械ブレーキの使用割合を半分以上に抑え、架線に通じてエネルギーの再利用を達成できた。さらに架線負荷が十分あり回生絞込みが起こらない場合としても、支援の元にブレーキ力の変更を抑えることで、初込めブレーキを抑制し、従来より優れたエネルギー回収効果が実現できた。

列車の走行エネルギー回収効果を高めるほかに、惰行距離を縮めて緩いブレーキに引き換えることで、Fig. 4.8 に示すようにブレーキパワーの最大値を抑えて出力を平均化することができる。それにより回生電力が穏やかになる。将来電力貯蔵システムを設置する場合でも、必要な負荷を軽く見積もり、導入コストを抑えることができる [12]。

2. ブレーキ力制御と定時運転の両立

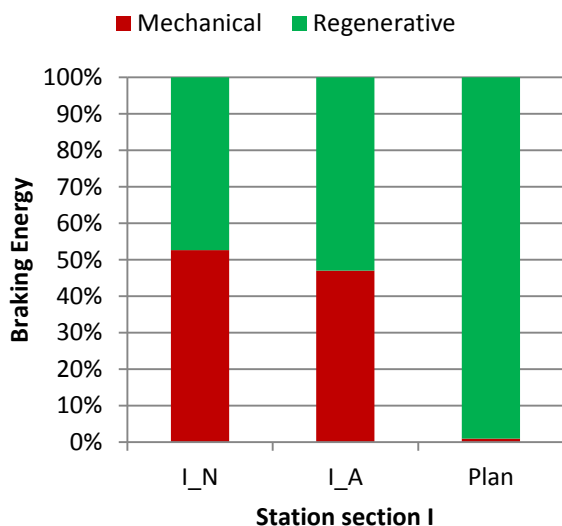
運転支援を通じて、従来に実現できなかった、列車の速度と余裕時分に基づき高速時に弱いブレーキ・低速時に強いブレーキという運転法が実現できた。Fig. 4.9 に示すように、車上装置で必要な情報を収集し、停車駅に定時到着できるブレーキパターンをリアルタイムに選別して支援指令を出力することができる。運転士は従来のように運転に集中し、指令の元に操作すれば定時到着することができる。それによって従来に理論的なブレーキ力制御提案を、従来に運転条件に支障なくプラグインすることができる。

3. 乗り心地の良さ

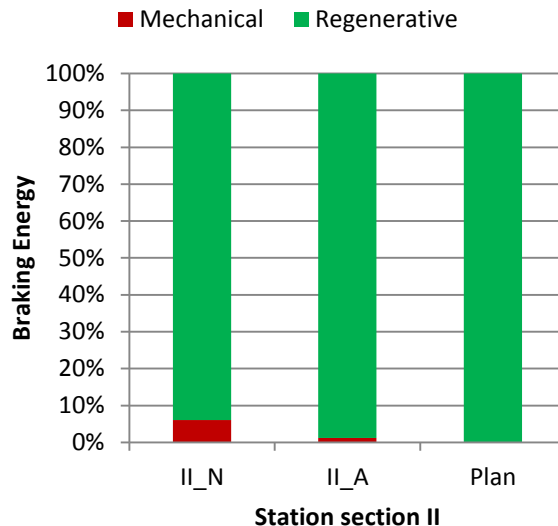
従来のブレーキパターンは「一段緩め」と呼ばれ、高速時に強いブレーキをかけ、速度を落としてからブレーキを緩めて駅の位置に合わせて停車する方式である。このブレーキパターンだと、初めのブレーキ力を大きく出したり、駅の位置に合わせてブレーキ力調整したりするので乗り心地を悪化させる可能性がある。支援運転においては、ブレーキ距離を伸ばし緩いブレーキをかけるため、従来よりブレーキ力が小さく、旅客に与える減速度ジャークによる負担を低減できる。また、ブレーキ力の階段状にあがり、急なブレーキ力変化がなく、ブレーキ力の変更回数が少ないため、さらに乗り心地を良くすることができる。

4. 自動運転（ATO）への応用

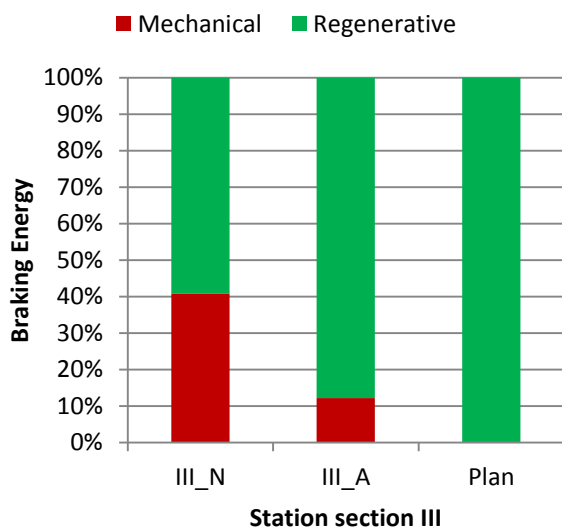
現在では運転士が列車を操作するのが一般的だが、新交通や地下鉄を始め、自動運転の導入が進められている [13] [14]。実験において Fig. 4.10 のように、運転支援機能がリアルタイムに勾配・カーブなどの路線状況を考慮して正しい支援指令を運転士に送ることから、自動運転の場合では指令を駆動装置に入力すれば動作可能と考えられる。また、自動運転では人機インターフェースの遅延がなく、純電気信号で列車を制御することができるため、より高い精度で計画ブレーキパターンにしたがって停車できると考えられる。



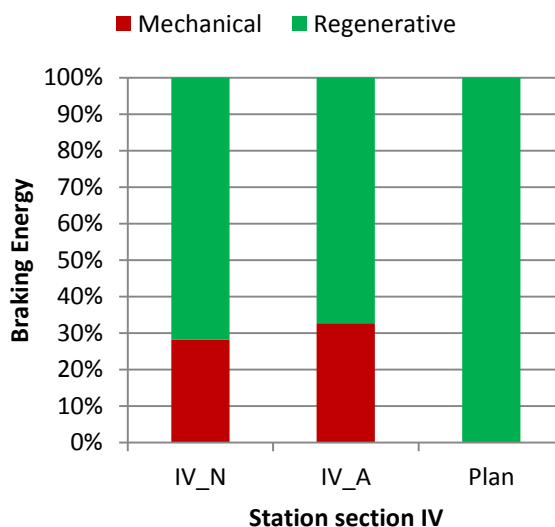
I_A は無駄時間の遅れで急ブレーキとなり、回生ブレーキの担うブレーキエネルギー割合は従来の I_N ままである。



I_N は重負荷回生で回生失効率が低い、I_A は軽負荷回生にもかかわらず、支援により回生絞り込みを防止する上に、ブレーキ力の変更を抑えことで初込めブレーキを抑制し、回生失効率が I_N よりも下回る。

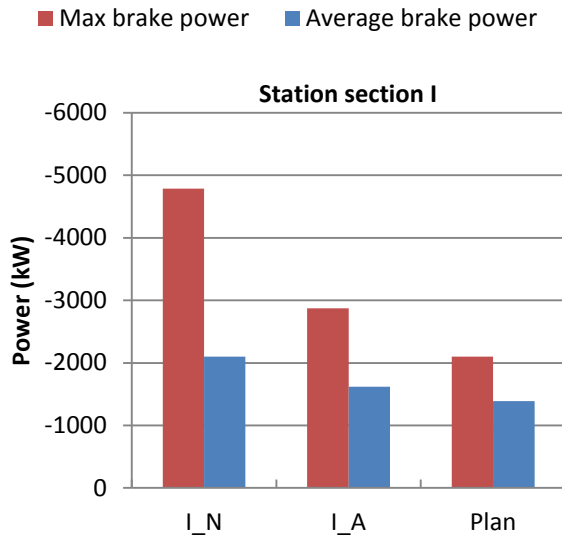


III_A は支援運転により、ブレーキエネルギーの回生ブレーキ担う割合が III_N より大幅に上昇する。そして無駄時間を抑えれば回生失効率がさらに下がると考えている。

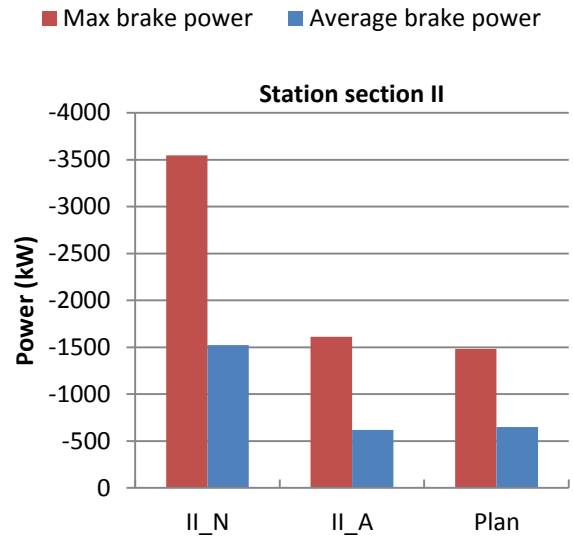


IV_A は、無駄時間及び速度制限に対する過保護な運転パターンの影響で、IV_N と同じく強いブレーキとなり、回生エネルギーはの割合は従来のままである。

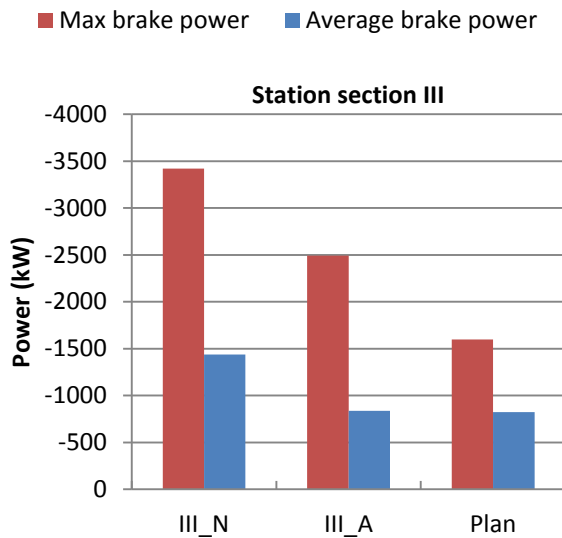
Fig. 4.7: 機械・回生ブレーキのブレーキエネルギーの分担状況



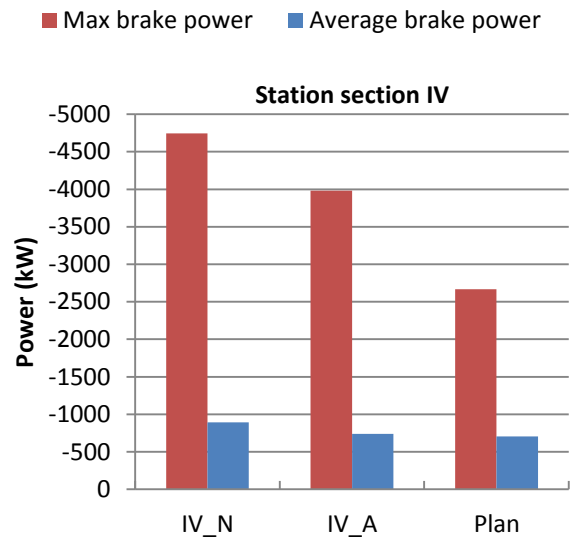
I_A は無駄時間のため、計画パターンよりブレーキパワー最大値も平均値も高い。ただし、支援なしの I_N よりブレーキ最大パワーが大きく抑えられることがわかる。



II_A は計画外に挿入した低速惰行のため、計画パターンよりブレーキパワー平均値が小さい。また、II_A のブレーキパワー最大値が II_N の半分以上に抑えられる。

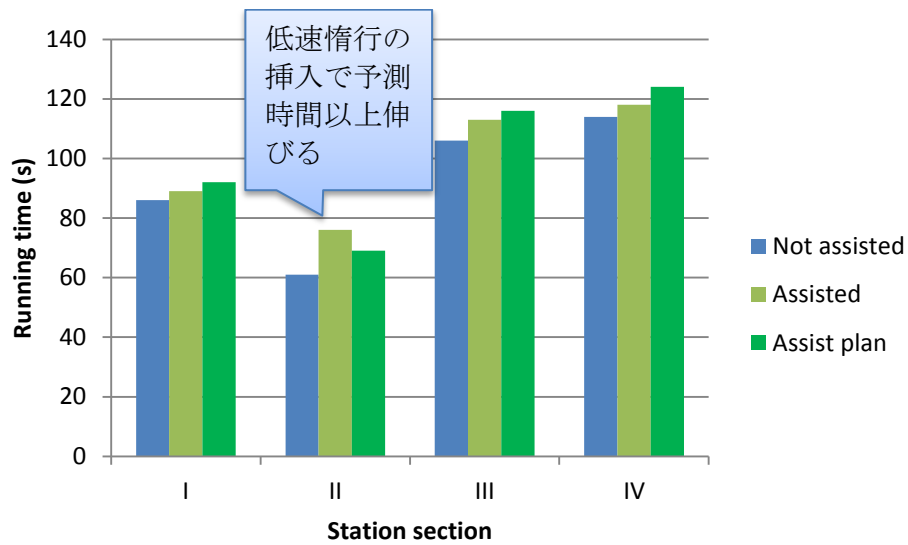


III_A では、無駄時間の発生でブレーキの実行が遅れ、オーバーランの不安を感じた運転士が計画パターンより強いブレーキを入れたため、ブレーキパワー最大値が計画より高い。ただし、全体から見るとブレーキを緩めることができ、ブレーキパワー最大値が III_N より大幅に低下する。



IV_A は無駄時間の発生と二段制動に対する未熟な支援で、ブレーキ力制御が成功していなくて、ブレーキ最大値が従来のものである。また、二段制動間の惰行の影響で、ブレーキパワー平均値が小さく見える。

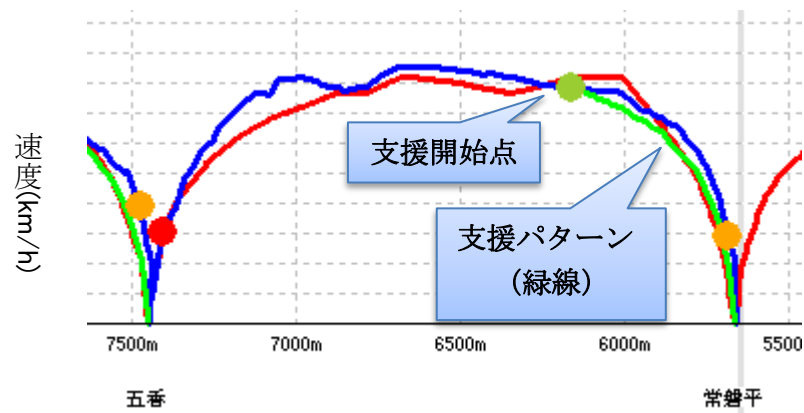
Fig. 4.8: 各運用のブレーキパワー最大値・平均値



支援のない運転では運転時分が短く、運転士が到着時間に余裕を持つ運転する。

支援があるとき、支援システムは列車の走行状態に基づき基準運転時分を活用するブレーキパターンを用意することができ、運転士それに基づき緩いブレーキをかけても基準時分を守ることができる。過保護な減速により低速惰行を挿入した II_A を除けば、全体が計画運転時分に収まることが確認できる。

Fig. 4.9: 駅間走行時分



リアルタイムの運転支援が可能

Fig. 4.10: 運転支援の車上装置動作 (例)

ただし、2012 年 10 月実験で得た結果から、さらに下記の問題点への対策を取る必要があることがわかる。

1. 支援における無駄時間

支援における無駄時間というのは、列車の走行状態に適用な指令信号を列車の駆動装置まで伝達する際の遅延時間である。無駄時間には様々の遅延要素が含まれていて、GPS の計測と車上装置の動作の遅延や、運転士の反応と操作時間、運転台のブレーキハンドルから列車駆動装置まで信号を伝達・処理・実行に要する時間などがある。Table. 4.9 には駅間 I-IV の無駄時間とそれによる空走距離で、駅間距離が短い在来線にとっては大きな数値だと考えられる。計画ブレーキパターンより過走することは支援効果の悪化に直接につながるため、より安定的な運転支援効果を得るためには無駄時間の対策をとる必要がある。

Table. 4.9: 支援で計測された無駄時間・空走距離

駅間	無駄時間	空走距離
I	4s	80m
II	5s	100m
III	6s	110m
IV	4s	70m

2. 支援開始点で予定外の列車速度

実験のために準備したデータベースは、支援開始点の基準運転速度を中心にプラス・マイナス 10km/h で計 20km/h の範囲を、列車が支援開始点を通過する可能な速度と想定している。ただし実際運転するとき、Fig. 4.11 に示すように踏切や信号などで列車速度が基準より大幅に低下することがある。そういう場合に支援を行うには、データベースでの支援速度範囲を広げる必要がある。

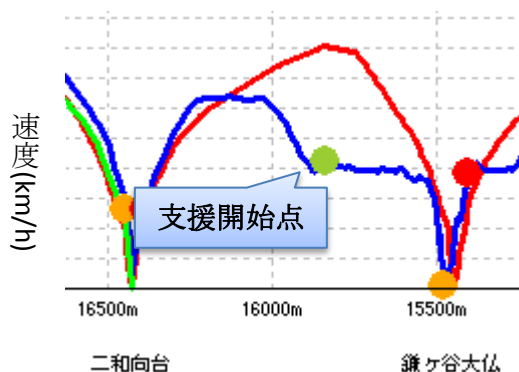
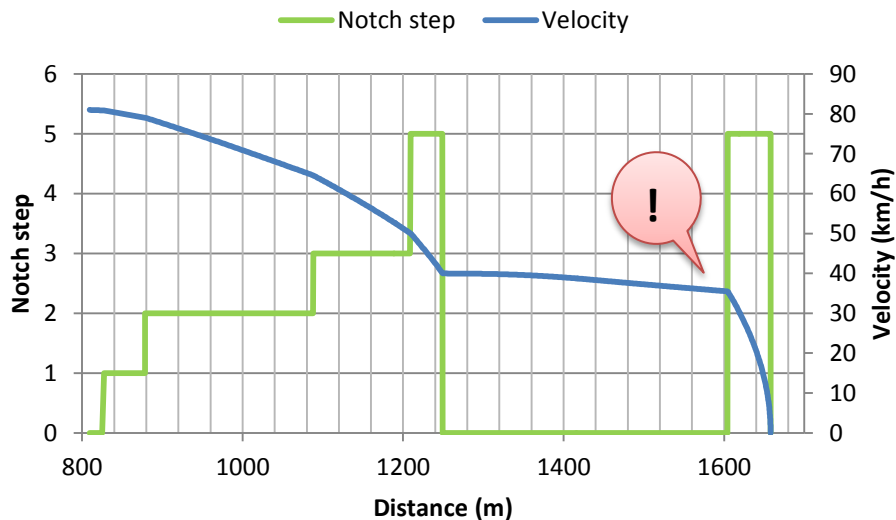


Fig. 4.11: 支援開始時の列車速度（青線）が想定（赤線）より大幅低下（車上装置動作例）

3. 二段制動の不評判

実験に使用するブレーキパターンは、Fig. 4.12 に示すように、高速時にブレーキ力を階段状に強めることがあるが、低速時は強いブレーキしか想定していない。それにより二段制動がある駅間では、低速の惰行状態から一気にブレーキを強めるという支援指令がある。これは運転士の心理的な負担から生ずる強い不安・不満であり、乗客の乗り心地を悪化させる可能性もある。これにより二段制動の操作方法を改良する必要がある。



低速時に一気に最大ブレーキをかけることが問題となる

Fig. 4.12: 二段制動の支援パターン

以上、現車実験を通じ、提案したブレーキ力制御及び運転支援アルゴリズムが、多様な駅間走行に応用できることを証明した。運転支援が列車の状態から適切なブレーキパターンで支援するため、従来では難しいとされる運転法が容易になっている。緩いブレーキパターンを採用することで、列車の回生失効率を低減して走行エネルギーの回収効果を上げることと、電力貯蔵システムが設けられる場合にブレーキパワーを抑制することで系統の負担を低減することができる。一方、本研究で明らかになった支援の無駄時間などの問題点の対策をすれば、支援効果を一層上げられると考えられる。

第5章 実験問題点の対策提案

第5章では、第4章の現車実験でまとめた支援アルゴリズムと支援手法の問題点に対する対策を提案する。

5.1 無駄時間への対策

支援における無駄時間というのは、列車の走行状態に適用する指令信号を列車の駆動装置まで伝達する際の遅延時間である。それへの対策は、ハードウェアとソフトウェア両方がある。ハードウェアの対策は、列車走行状態を測定する時間や、列車制御装置の信号伝達時間を縮めるなどがある。ただしこれは本論文の議論範囲を超えるため、ここでは議論しない。一方、ソフトウェアの対策は、列車の反応時間に応じて支援指令を先読み機能を支援アルゴリズムに取り組むことである。

従来の支援アルゴリズムでは、列車の今現在の走行状態に基づいて指令を出しているが、制御指令に対する列車の反応には遅れがあるため、計画ブレーキパターンをうまく実行できない。制御指令に対する加減速度や応答の遅れに解消するために、ちょっと先の未来状況を予測して、その予測結果から今入力すべき指令を決定することが必要である。

したがって、Fig. 5.1 に示すように、現在と一秒前の速度差から現在の加速度 a を求める。そして、車両の加速度を一定 ($=a$) とし、近未来の速度と位置を予測する。

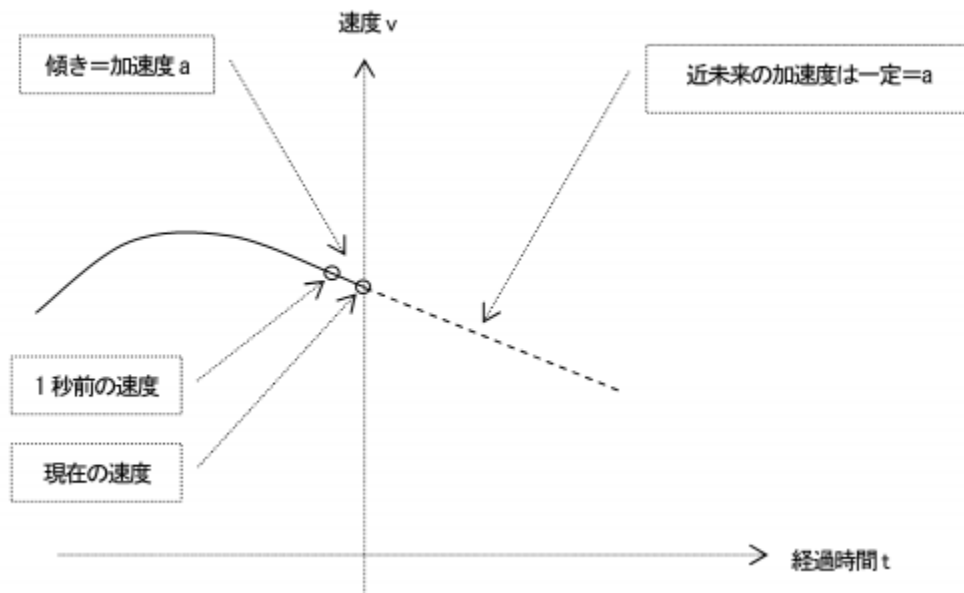


Fig. 5.1: 近未来の加速度を求める (セントラルエンジニアリング株式会社により)

現在の速度を v_0 とすると、現在から t 秒後の速度 v は Eq. 5.1 に示す。Eq. 5.1 を時間積分すると、現在から t 秒経過後の相対位置 x は Eq. 5.2 に示す。

$$v = v_0 + at \quad (5.1)$$

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (5.2)$$

Eq. 5.1、Eq. 5.2 により、先読み閾値 T 秒経過後の速度と位置を求め、Fig. 5.2 に示すように計画支援パターンに従って支援すれば、無駄時間を補償することができる。

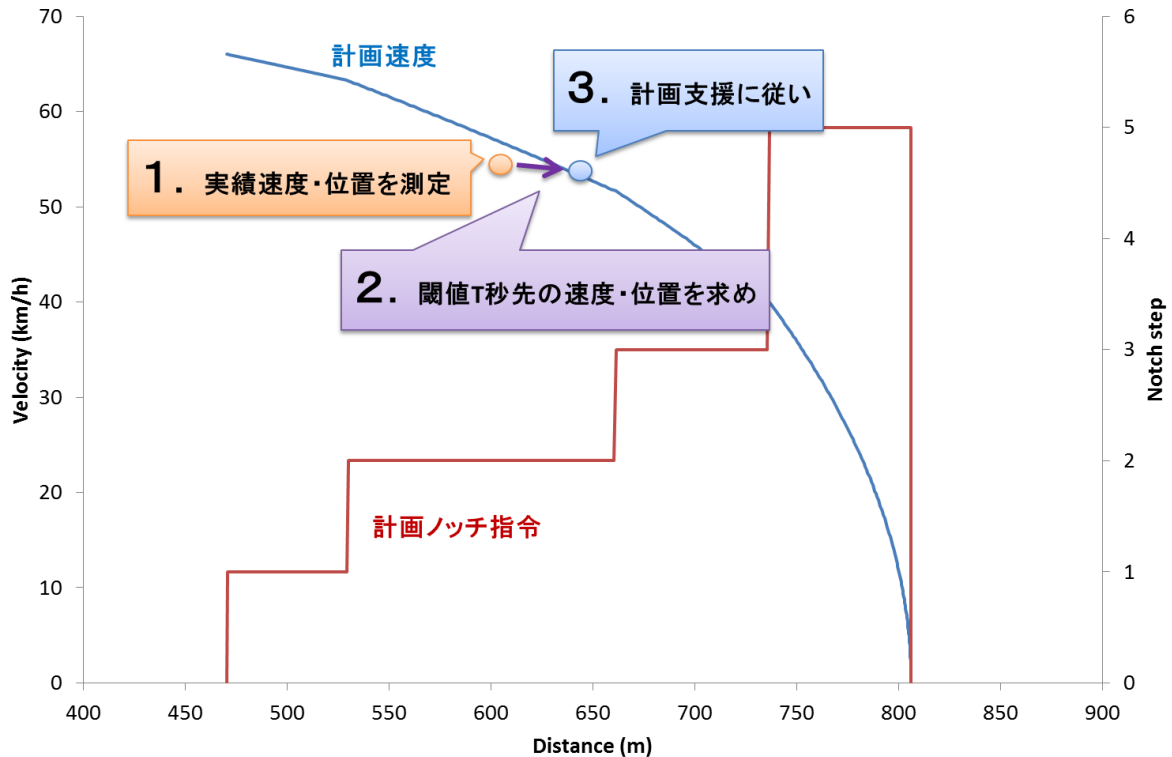
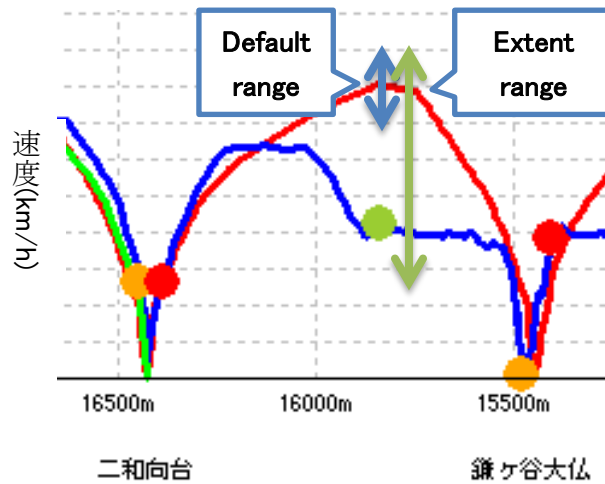


Fig. 5.2: 支援指令の先読み機能

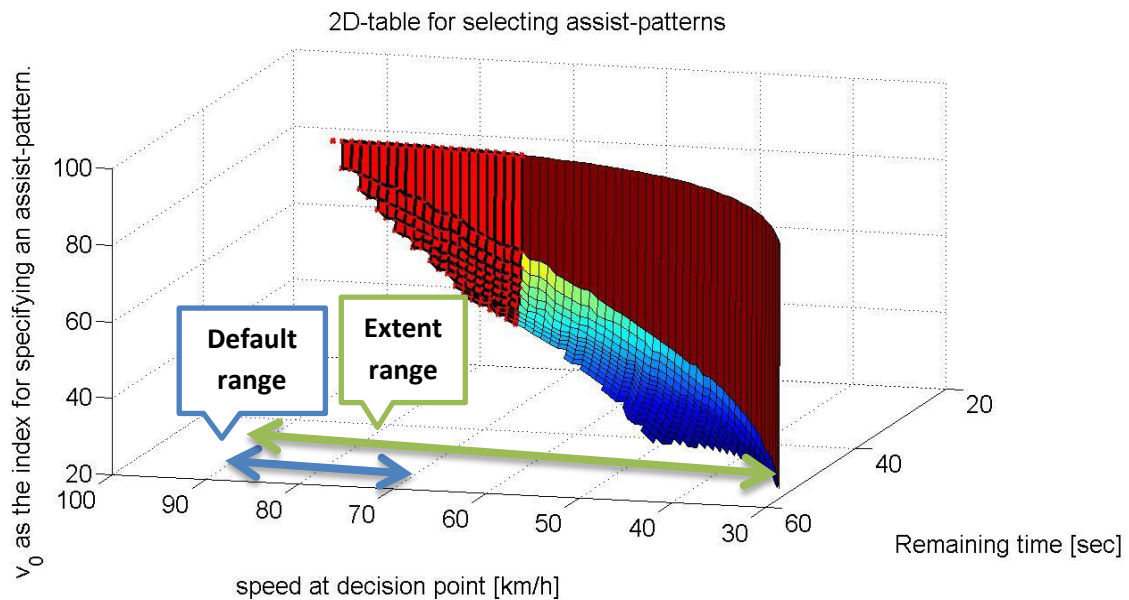
5.2 支援開始点の速度への対策

運転士は列車を運転するとき、列車速度を基準運転速度の近傍にコントロールすることから、支援開始位置の通過速度が基準速度よりプラス・マイナス 10km/h の範囲に収まると想定したが、線路の踏切や信号などで、列車速度が基準速度より大幅に低下することもあるので、運転支援に支障を生じた。そこで、踏切や信号などの位置での支援開始点の速度検索範囲を、可能な速度低下までカバーできるように拡張する必要がある。

そこで、支援開始点が信号や踏切の付近であれば、Fig. 5.3 に示すようにその速度検索範囲を基準速度から信号の通過速度まで用意する。そうすると列車速度が基準速度より大幅に低下する場合でも、適用するブレーキパターンを見つけることができる。



(a) 信号などの制限があるとき、支援開始点での通過速度範囲



(b) 上記の速度範囲に合わせて拡張する検索辞書

Fig. 5.3: 支援開始点の速度範囲拡張

5.3 二段制動の改良

二段制動というのは、Fig. 5.4 に示すように、速度制限区間前の減速操作と駅前のブレーキ操作が組み合わせた操作である。二度の制動の間には列車を惰行させるために、ブレーキを一旦抜く必要がある。

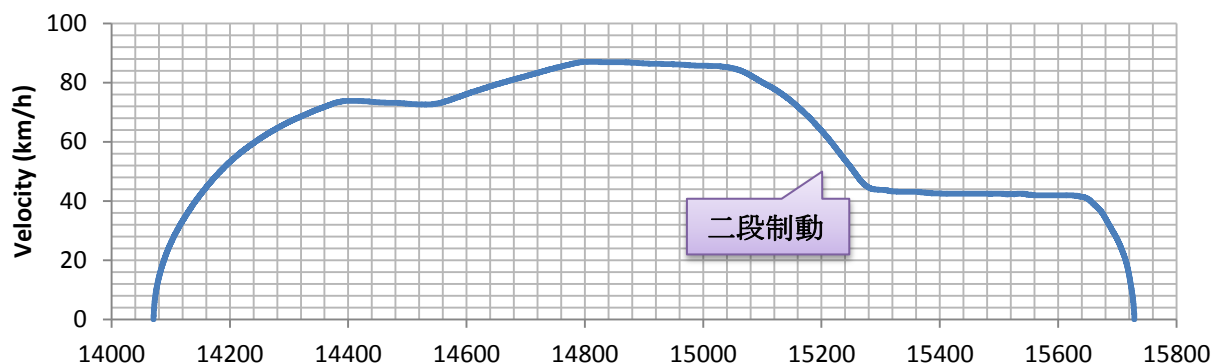


Fig. 5.3: 二段制動パターン

提案したブレーキパターンでは、Fig. 3.1 に示すように高速域ではブレーキ力を段階的に上げるが、低速域では強いブレーキをかける方針である。それにより二段制動の場合では惰行からいきなり強いブレーキをかける指令があり、運転士に心理負担を負わせるほか、乗り心地を悪化する可能性もある。

そこに提案するのは、第二段階のブレーキ力を調整することである。低速時にブレーキを立ち上げるときは Fig. 4.11 のように最大ブレーキをかけるのではなく、Fig. 5.4 のように中間程度のブレーキ力で行う。

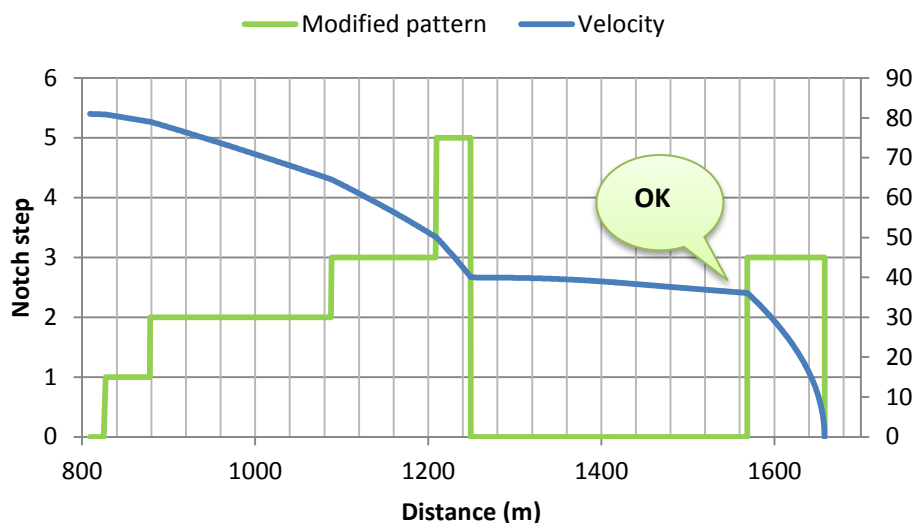


Fig. 5.4: 二段制動の改良

このようにブレーキ距離を伸ばし弱いブレーキをかけることで、運転士の心理負担を低減し、少々過走しても修正する余裕ができる。また、惰行状態から立ち上がったブレーキ力が小さいので、乗り心地を良くすることができる。さらに、低速でのブレーキ力変更がないため操作を単一にできるほか、初込めブレーキもおさえられエネルギー回収の面でもメリットがある。そのほか、惰行時間がある関

値に下回る場合に惰行操作を無視してブレーキ指令を続け、細かい調整を運転士に任せるのも、運転士にとってより扱いやすい運転パターンとなるであろう。

5.4 現車実験による実証

以上の改良案に基づき、支援アルゴリズムを更新して支援装置に実装し、2013年2月下旬に現車実験を行う予定である。それにより実験に支障を生じた問題点を解決することで、より支援運転を徹底して、省エネルギー効果を引き出すことを目指している。

第6章 結論と今後の課題

6.1 結論

本論文の成果を、以下のようにまとめる。

本論文では、省エネルギーのための回生ブレーキの位置づけやこれまでの研究経緯をまとめ、ブレーキ力制御及びそのための運転支援という課題に取り組んだ。

ブレーキ力制御は、列車を制動する時に速度に応じてブレーキ力を制御し、回生電力を抑える操作である。これにより、従来の回生電力が過大なために起きていた回生失効や回生絞り込みが抑えられ、回生電力をより確実に架線へ送り返すことが可能となる。ただし、ブレーキ力制御により制動時間と制動距離が長くなり、操作が従来より複雑になるため、運転士に適切な支援が必要である。

この問題を解決するために、本論文はブレーキ力制御のための運転支援を提案した。列車の走行余裕時分に基いてブレーキ力制御を行い、列車を定時に駅に到着させることを可能としている。リアルタイムの支援性能を確保するために、支援開始位置を固定して、その位置での列車通過速度と余裕時分に適用するブレーキ力制御を速やかに決定することを実現した。また、支援開始位置を複数設けることで、多様な列車運転状態に柔軟に対応することができる。さらに、リアルタイム通信の安定性を確保するために、ブレーキ開始位置を動的に決めさせ、データベースの軽量化を実現した。

実在路線で現車実験を通じ支援効果を実証した。その実験結果から、以下の支援効果が確認でき、ブレーキ力制御とそのための運転支援の有効性が実証された。

- ① 支援システムが列車出力特性、路線状況、運転時分にに応じて、適切なブレーキ力制御を決定し、運転士に支援指令を出すこと
- ② 運転士がその指令に従って運転できること
- ③ 支援運転のブレーキパワーが抑えられることで、大きな回生電力を回避できること
- ④ 指令に従った運転は軽負荷回生に強く、回生ブレーキの利用割合が従来より大きく、省エネルギー効果と機械ブレーキの利用の抑制が確認できること
- ⑤ ブレーキ力変更回数を少なくすることで初込めブレーキを抑制し、省エネルギー性を一層高められること
- ⑥ 支援に従って列車が定時的に到着できること
- ⑦ 減速度を抑えることで乗り心地を改善できること

ただし実験から以下の問題点がわかった。運転支援をよりうまく行うためには以下の問題を解決する必要がある。

- ① 支援指令が実行する際に無駄時間が発生し、指令の実行が遅れること
- ② 実績速度が踏切などの影響で基準速度より大幅に低下すること
- ③ 二段ブレーキパターンの設定が運転士の習慣に合わないこと

運転支援の問題点の対策として、以下のような案を提案した。それにより実験中の問題を解決し、支援効果をさらに上げることを目指す。

- ① 支援指令の出力に先読み機能を導入すること
- ② 速度低下がある区間で速度支援範囲を拡張すること
- ③ 二段制動のある区間では、運転士が余裕を持って操作できるように、ブレーキパターンを改良すること

以上により、本論文では直流電気鉄道の回生ブレーキを活用するブレーキ力制御及びそのための支援方法を提案した。実路線での現車実験を通じて、列車の運転状況に合わせるリアルタイムの支援機能の正常動作、及び回生エネルギーをより多く回収する省エネルギー効果を確認し、提案の有効性を確認した。そして実験から新たにわかった問題点に対策を行い、支援効果を一層上げる可能性を具体的に示すことができた。

6.2 今後の課題

1. 支援運転をより順調に動かすこと

まずは実験の問題点を解決するための、本論文が提案した対策を支援システムに搭載し、実験を行う必要がある。支援機能を上げることで、定時到着を徹底し、省エネルギー効果を向上させる。

2. 力行・制動を含めた一括支援

本論文では、電気鉄道車両の駅間走行において、力行終了した走行の後半の操作に着目し、走行余裕時分を緩いブレーキを使ってエネルギーの回収効果を高めることを実現した。電車の力行が終わった時点で余裕時間を活かすことが省エネルギーになるのは間違っていないが、力行時にノッチオフ速度を下げて余裕時間を活かしてダラダラ惰行するのも、省エネルギー運転の一つの方法である。JR 西日本によると、現在その管内にある線路ではノッチオフ速度を下げる省エネルギー運転を試みているそうである。

緩いブレーキに使うと回生失効を抑えてエネルギーがより多く戻り、力行ノッチオフ速度を下げる消費エネルギーが少なくなるので、どちらもそれなりの価値があるだが、どのように余裕時分の範囲内でそれらの運転法を選択し、より大きな省エネルギー効果を引き出すかの定量分析は未解決である。

上記の二つの方法をまじめに検討すると、余裕時分の長さ、カーブ・勾配による速度制限、短い駅間・長い駅間に対する異なる運転パターンなど、双方の効果に影響する要素が様々ある。これら複雑に絡め合う要素を考えて最適解を求めるのは非常に難しいことであるが、現実問題として、線路の状況に合わせて納得できる省エネルギー効果を持つ、運転士にも納得できる運転パターンを提示できれば、さらに実務的価値の高い合理的な研究になると考えている。

参考文献

- [1] 国土交通省. (2010) 総合政策. [Online]. http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
- [2] 国土交通省. (2009) 鉄道関係統計データ. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/000232677.pdf>
- [3] 小倉 秀文, 正月 一郎, "電力源モデルを用いた回生電力シミュレーション," *JR East Technical Review*, vol. 40, pp. 33-36, 2012.
- [4] 高橋 弘隆, 青木 克成, 真岡 明洋, 金 永翊, "回生電力貯蔵装置の導入事例と今後の展望," *日立評論*, vol. 94, no. 6, pp. 468-469, June 2012.
- [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," in *電気学会 交通・電気鉄道/ITS 合同研究会*, TER-02-12/ITS-02-2, 2002.
- [6] 電気学会, *最新 電気鉄道工学*.: コロナ社, 2000.
- [7] 雅行 松本, *電気鉄道*.: 森北出版社株式会社, 1999.
- [8] 井上孝司, *地下鉄が一番わかる*.: 技術評論社, 2009.
- [9] 生方 伸幸, 深澤 真吾, 山下 良範, 金子 健太, "省エネ最適車両システムへの取り組み," *サイバネティクス*, vol. 17, no. 2, pp. 63-67, 2012.
- [10] 国土交通省総合政策局公共交通政策部. (2012, Oct.) 地域公共交通の確保・維持に向けた国の取り組みについて. [Online]. <http://www.tb.mlit.go.jp/kinki/kansai/program/link/houkoku.pdf>
- [11] 古関 隆章, 楊 哲, 久富 浩平, 水 間毅, "直流電気鉄道回生エネルギー有効活用のための運転支援と高度なブレーキ力制御," in *リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会*, 仙台, 2012, pp. 59-64.
- [12] 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," in *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.
- [13] 大矢 純子, 鎌田 恵一, 中澤 弘二, "省エネルギーと定刻運転を目指す自動列車運転システム," *東芝レビュー*, vol. 61, no. 09, pp. 33-36, 2006.
- [14] 大矢 純子, 射場 智, 中澤 弘二, "地下鉄向け自動列車運転システム," *東芝レビュー*, vol. 63, no. 12, pp. 41-45, 2008.

発表文献

- (1) 古関 隆章, **楊 哲**, 久富 浩平, 水間 毅, “直流電気鉄道回生エネルギー有効活用のための運転支援と高度なブレーキ力制御”, *電気学会研究会資料*, 2012.07, pp59-64
- (2) Takafumi Koseki, Yuto Takahashi, **Zhe Yang**, “Energy-Saving Operation of an Electric Train at Multiple Service Section Based on Sensitivity Analysis of Energy Consumption to Running Time”, *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sapporo, 2012.10
- (3) **楊 哲**, 渡邊 翔一郎, 古関 隆章, 水間 毅, 濱崎 康宏, “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”, *鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL)*, 仙台, 2012.12, No.3416
- (4) 古関 隆章, **楊 哲**, 近藤 圭一郎, 濱崎 康宏, 水間 毅, 長谷川 智紀, “回生エネルギー有効活用のための高度な運転法”, *鉄道車両と技術*, Vol.196, No.1, 2012.12
- (5) **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 (発表予定)
- (6) 渡邊 翔一郎, **楊 哲**, 古関 隆章, “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*, 岐阜, 2013.03 (発表予定)

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のお世話になりました。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 2 年間お世話になり、研究の進め方・技術者としてのあり方に関して丁寧かつ的確なご指導をして頂きました。また、熱心な議論及び人間として優しく気を遣っていただき、ここまで研究をすすめることができ、精神的にも大きく成長できました。今後も御自愛されながらも、ご活躍されますことをお祈りいたします。

本研究では交通安全環境研究所及び新京成電鉄株式会社の皆様には多大なるご尽力をいただきました。特に交通安全環境研究所の水間毅様、林田守正様、長谷川智紀様、工藤希様、竹内俊裕様、井上瑞穂様、新京成電鉄の久富浩平様、濱崎康宏様には日頃より多くのご助言とご協力をいただきましたことを深く感謝申し上げ、ここにご謝意を申し上げます。（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構（JRTT）の御支援に感謝を申し上げます。

千葉大学の近藤圭一郎先生には JRTT 学生 WG で非常にお世話になりました。先生ご自身とてもお忙しいにもかかわらず、熱い議論に付き合ってくれ、とても勉強になりました。千葉大学の斎藤達仁さんにも、JRTT 学生 WG での打ち合わせに色々なところにご指摘していただき、謝意を申し上げます。

曾根悟東京大学名誉教授、千葉工業大学の富井規雄教授、工学院大学の高木亮准教授、上智大学の宮武昌史准教授には運転整理の共同研究の様々な場面においてご指導いただき、大変お世話になりました。

西日本旅客鉄道会社の杉田憲亮様、井関一隆様には、鉄道事業者の立場から、私の乏しい知識に対して非常に現実的なご意見を数多く頂きました。また、JR 西日本管内を見学させていただき、鉄道の魅力を示して頂きまして、深くお礼申し上げます。

古関研究室の皆様にも、大変お世話になりました。研究室の先輩方から研究の面ではもちろん、生活面でも暖かく見守って頂きました。ポスドクのパレリオさんは、鋭い目で私の研究の問題を指摘して頂き、研究者としてのあり方を教えて下さいました。博士課程 2 年の申さんは三年前メールのやり取りで入学試験や注意事項などの説明から、授業や研究色々な面でずっと気を配ってくれて、とても心強かったです。去年にご卒業された原さんからは研究の専門的な部分で指導たくさん賜り、研究を順調に展開することができました。修士課程 2 年の山元さんには、電動機の知識を教えていただき、花火大会など色々面白い所に連れていってくれて嬉しかったです。修士課程 2 年の河邊さんは、様々な雑談を交わして色々楽しいことを教えてくれて、いつも研究室の雰囲気を盛り上げてくれました。修士課程 1 年の渡邊さんには、実験分析に積極的に協力してもらって、鉄道研究の跡継ぎとしても着実な研究を展開してくれるので、とても感心でした。修士課程 1 年の渡辺さんは、いつも懇親会を手配してくれて、いつも美味しい店に案内してくれてありがとうございます。修士課程 1 年の Cuongさんは、リニア地下鉄分野に研究を進んでくれてまして、今までの研究成果を活かして良い成果を上げてください。修士課程 1 年の Ducさんは、自分の発想でオリジナリティな研究を展開してくれまして、新たな研究分岐を立ち上げることを期待します。また卒論生の森さんと研究生の趙さんは、色々な話題で話を盛り上げてくれてまして良かったです。来年の修士過程に向けて頑張ってください。

秘書の松崎様には、事務上の手続きだけでなく、お菓子を作って頂き、面白い話をいっぱい聞かせて下さいました。どうも有難うございます。

最後に、これまであらゆる面で私を支え続けてくれた家族や友人に感謝の意を申し上げ、ここで筆を置きたいと思います。

2013年2月6日

楊哲