

リニア駆動鉄道の主回路消費電力量を最小化する運転曲線最適化

渡邊 翔一郎* 古関 隆章 (東京大学)

松浦 豪 宮武 昌史 (上智大学)

磯部 栄介 (日本地下鉄協会)

Optimization of Running Curves to Minimize Energy Consumption in Linear-Motor Railway System

Shoichiro Watanabe*, Takafumi Koseki, (The University of Tokyo)

Go Matsuura, Masafumi Miyatake, (Sophia University)

Eisuke Isobe (Japan Subway Association)

The most striking characteristics of linear-motor railway system is the structure consists of primary and secondary of linear induction motor. A primary motor is installed in rolling stock and secondary motor is installed on track. The magnetic attractive force produced by linear induction motor has an effect on running resistance since this force is the same direction as the gravitational force and rolling stocks gain weight virtually from the track side of view. In addition, the efficiency of linear induction motor has a different characteristics compared with rotation motor. The purpose of this study is to analyze these effects and design the optimal running curve to minimize the energy consumption using a dynamic programming.

キーワード：リニア地下鉄，最適化問題，省エネルギー，電力制限ブレーキ，リニアモータ，磁気吸引力
(Linear metro, Optimization problem, Energy-Saving, Power-Limiting brake, Linear motor, Magnetic attractive force)

1. 背景

〈1・1〉 電気鉄道と環境問題 近年は環境問題への意識が高まり，低炭素社会や持続可能社会の構築が期待されている。我が国は喫緊の課題としてエネルギー問題を抱えており，この問題を解決しつつ，より豊かな生活を目指さなくてはならない。我が国の消費エネルギーを部門別に見ると図 1 のようになっている⁽¹⁾。2000 年頃をピークに消費エネルギーは減少しているが，図 2 の我が国の最終消費エネルギーの構成比を見ると運輸部門は産業部門に次いでエネルギーを消費する部門である⁽¹⁾。運輸部門には自動車，鉄道，バスなど各種交通機関が含まれているが，図 3 に示す通り鉄道は人キロあたりの CO₂ 排出量が少なく，鉄道へのモーダルシフトが進めば運輸部門の消費エネルギー量を低減できることが推察される⁽²⁾。したがって欧州ではモーダルシフトを推進するプロジェクト⁽³⁾や，鉄道そのものを省エネルギー化するプロジェクト⁽⁴⁾，低炭素化プロジェクト⁽⁵⁾が進行している。

〈1・2〉 リニア駆動鉄道の歴史 近年の都市鉄道開発においてはリニア駆動鉄道が注目されている。リニア駆動鉄道は地下鉄として敷設するに建設コストが比較的小さ

く，都市計画において自由度が大きいことから近年普及が進んでいる。リニア駆動鉄道は 1985 年にカナダ・トロントのスカボロ線が開業したことを皮切りに，我が国においても同年に大阪南港での実用化試験を経て 1990 年に大阪市長堀鶴見緑地線が開業，そして本年に仙台市で東西線が開業した⁽⁶⁾。現在リニア地下鉄は国内で 7 路線運行されている。

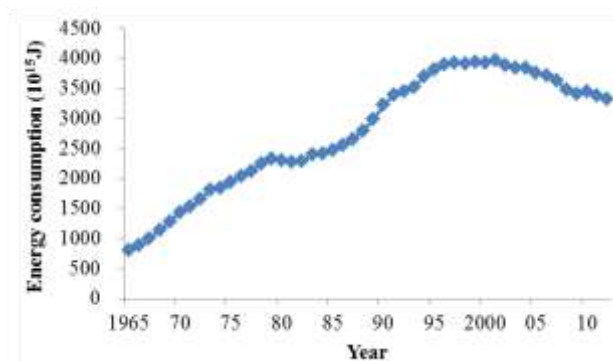


図 1 我が国の運輸部門の消費エネルギー
Fig. 1. Energy consumption of transportation in Japan.

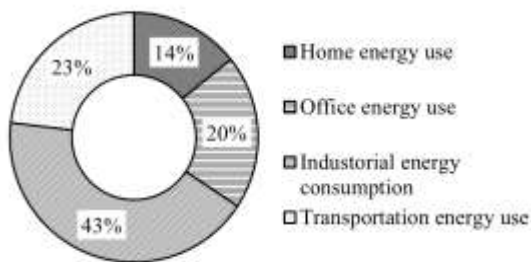


図2 我が国の最終エネルギー消費の構成比(2012年)
Fig. 2. Composition ratio of final energy consumption in Japan in 2012.

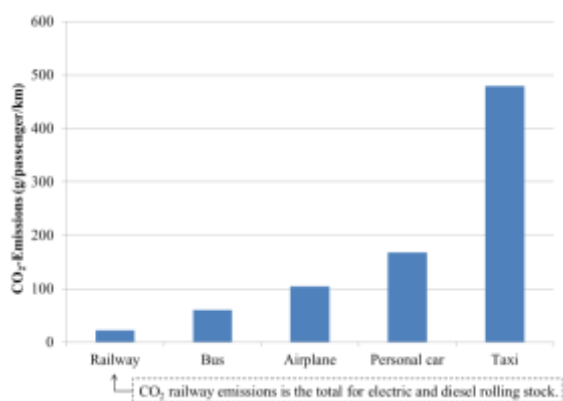


図3 我が国の輸送機関別の人キロあたりのCO₂排出量(2012年)

Fig. 3. CO₂ emissions of various types of transportation systems based on the primary energy source in Japan in 2012.

〈1・3〉 リニア駆動地下鉄の特殊性 リニア駆動地下鉄は列車の推力が非粘着で得られるためトンネル断面を小さくでき、急勾配や急曲線でも走行可能である。これらの特性により都市計画に自由度を与え、さらに旅客の乗り降りに便利な駅の建設や道路直下の線路敷設を可能にしている。

しかし、リニア駆動地下鉄は、回転型電動機で引張力を得る地下鉄車両と比べて車両特性が大きく異なる。リニア駆動地下鉄は車両側に搭載されているリニア誘導モータ(一次側)とレール間に敷設されたリアクションレール(RP, 二次側)との間に発生する推力を得て走行するが、このとき進行方向だけでなく鉛直方向にも吸引力が発生する。列車の消費エネルギーは運転曲線を描くことにより求められる⁽⁷⁾が、このとき必要になる推力やリニアモータ効率、リニアモータとリアクションプレートの間の空隙やリアクションプレートの素材に大きく影響される。さらに吸引力に起因する走行抵抗の影響する感度の分析も必要となる。

〈1・4〉 リニア駆動地下鉄の研究動向 リニア駆動地下鉄は 1.2 で述べたように鉄道では比較的近年に開発された駆動方式である。リニア駆動鉄道を直接の対象とした研究は 1994 年に藤井ら⁽⁸⁾が取り組み、近年では数は少ないもの

の、リニアモータの縁効果を陽に考慮した三次元解析による特性把握⁽⁹⁾や回生ブレーキの改善手法⁽¹⁰⁾が報告されている。

〈1・5〉 本研究の目的 本研究では経験的な知見の蓄積が少ないリニア駆動地下鉄を対象に、リニアモータ効率と磁気吸引力に起因する走行抵抗を考慮して消費電力量を最小にする運転曲線を、運転理論に基づく数値計算により導出する。消費電力量を最小化するにあたり、動的計画法を運転曲線導出の手段として活用する。

2. リニア駆動地下鉄の運転理論

〈2・1〉 リニア駆動地下鉄の特殊性 リニア駆動地下鉄の駆動系について説明する。リニア駆動地下鉄は図 4 のように列車の重量と案内を車輪で、推進力を台車下のリニア誘導電動機(Linear Induction Motor, LIM)で得て走行する。リニア駆動鉄道は、リニア誘導電動機の一次側(Primary of linear induction motor)が台車(車両側)、二次側(Secondary of linear induction motor, Reaction rail)が軌道(レール側)に敷設されており、リニア誘導電動機の一次側とリニア誘導電動機の二次側との間には空隙がある。誘導電動機の一次側に電流が流れると一次側と二次側の間に磁気吸引力が発生する。回転型モータの場合は回転軸を対象に磁気吸引力が相殺されるため振動はあってもモータ外部に影響する要素は小さい。一方でリニアモータの場合はそのような相殺がないため、列車が力行もしくは回生制動している時に磁気吸引力が発生し、軌道側から見ると停車時と比べて列車の車重が増加しているように見える。したがって列車の運転曲線を数値計算する時には従来の広く知られている回転型モータ車両の走行抵抗式および運転理論⁽¹¹⁾を単純に適用できない。

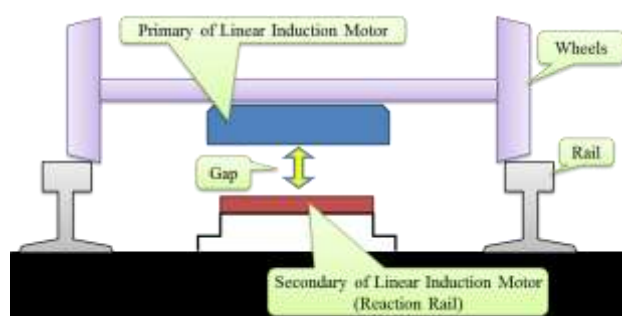


図4 リニア地下鉄の電動機の一次側と二次側の構造
Fig.4. The structure of primary and secondary of linear induction motor in linear metro.

〈2・2〉 リニア駆動地下鉄の走行抵抗 リニア駆動地下鉄の走行抵抗を考える場合、先述のリニアモータの磁気吸引力の影響だけでなくリニア駆動地下鉄の建設背景にあるトンネル断面も考慮しなければならない。地下鉄の場合にはトンネル断面積と車両断面積の比から走行抵抗のパラ

メータを決定するが、リニア地下鉄は一般的な地下鉄よりトンネル断面が小さい。

次に、前節でも述べたとおりリニア誘導電動機の一次側と二次側との間に吸引力が生じると、軌道から車両を見た時に車両重量が増えているように見える。したがって力行や減速のようなリニア誘導電動機の一次側に電流が流れている時は車両重量が増えているとみなして計算する。しかし、リニア誘導電動機の特長上、列車速度が v/f 終端速度を上回ると弱め界磁に入るため磁気吸引力が低下する。一般にリニアモータの制御において、インバータで電流とすべりを同時に制御して動作効率の高い点を維持する。しかし、すべりを小さくすると磁気吸引力が増加し、リニアモータの二次側のリアクションプレートの締結部への負担が増加するため、磁気吸引力の大きさには制限が設けられている。このような背景を考慮しつつ、数値計算では v/f 終端速度を上回って以降は列車の速度に反比例して車両重量が本来の重量に近づくよう条件設定が必要となる。

これらの事を考慮すると、本研究で扱う走行抵抗 $Rr3$ は式(1)ようになる。左項がトンネル断面と車両断面の比に依存する項、右項がリニア誘導電動機の吸引力に依存する項である。

式(1)を従来の鉄道車両の走行抵抗 Rr [N]と比較すると図5ようになる。式(2)に示す $Rr1$ は明かり区間の従来車両の走行抵抗[N], 式(3)に示す $Rr2$ はトンネル区間の従来車両の走行抵抗[N], 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⁽¹²⁾。ここでは車両を1M1Tの2両編成, v/f 終端速度を50km/hと仮定し、出発抵抗に係る速度6km/h以下の部分は除外している。式(1)が図6(A)に、式(3)が図6(B)に対応する。この式(1)に基づき、図7に示すブロック線図⁽¹³⁾の流れで列車の運動を計算し、ある駅間での運転曲線と消費電力量を算出する。

$$R_{r3} = \underbrace{(2.07 + 0.039v + 0.00021v^2)}_{\text{Tunnel parameters}} \times 9.8 \times M \times \left[1 + 0.2 \left(\frac{v}{v_f} \right)^2 \right] \underbrace{\quad}_{\text{Additional vertical magnetic attractive force from LIM}} \quad \dots\dots(1)$$

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

$$R_{r2} = 9.8(2.088 + 0.0394v + 0.00067v^2)M \quad \dots\dots(3)$$

〈2・3〉 リニア駆動鉄道のモータ効率 研究報告⁽¹⁴⁾によれば、リニア駆動鉄道のモータ効率は空隙と電流、すべりに依存することがわかっている。これらを考慮して速度対効率特性を考えると、従来の回転型モータ駆動の鉄道

と比べて大きく異なるのは距離に応じてリニアモータの二次側の材質が変化して効率が変化すること、曲線部の制限速度でリニアモータの効率が飽和しないことである。この違いも従来の運転理論の適用を困難にしている一因である。

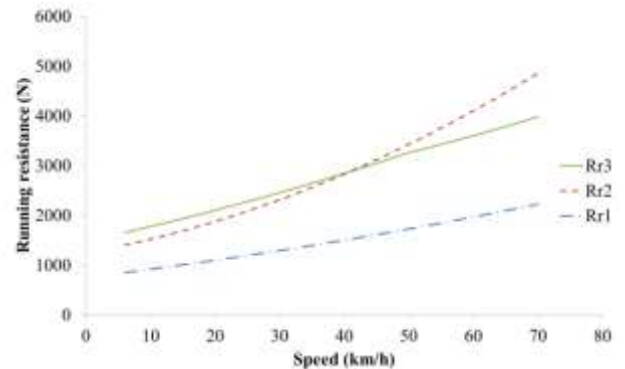


図5 ある仮定における路線環境ごとの走行抵抗の比較
Fig.5. Comparison of running resistance in each of railway profiles assuming a typical case.

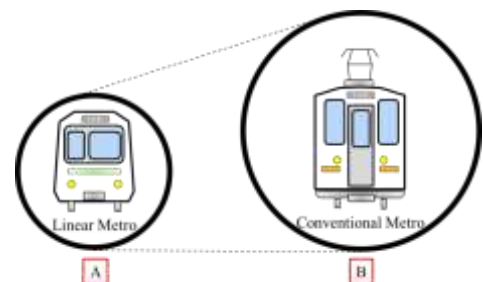


図6 リニア駆動地下鉄と従来地下鉄のトンネル断面
Fig.6. Tunnel cross-section of linear metro and conventional metro.

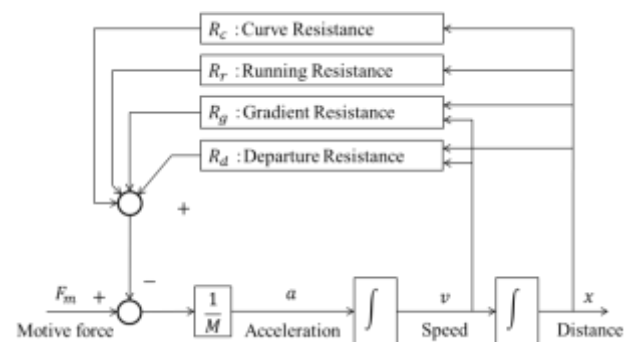


図7 運転曲線作図のためのブロック線図
Fig.7. Brock diagram for designing running curve.

3. 消費電力量を最小化する数理最適化問題

〈3・1〉 鉄道研究における数理最適化問題の研究動向 鉄道研究では運行計画⁽¹⁵⁻¹⁷⁾や変電所容量⁽¹⁸⁾、運転曲線⁽¹⁹⁾に

ついて数値最適化問題が扱われている。

最適化問題については最適性の保証と計算機による求解速度に焦点が当てられ、たとえば運行計画では計算の時間制約が緩いため最適解を求めるところに重点を置く傾向にあり、文献(15)では混合整数計画法が用いられている。文献(16)では消費エネルギーと旅客の旅行時間を目的関数として評価・最適化が扱われているが、最適化結果をフィードバックして制約条件に違反がないかを見る工夫がある。また文献(17)ではオランダのダイヤの設計プロセスにおいてエネルギー効率性が考慮されていないことを背景に列車の走り方とダイヤ外乱の最適設計法が提案されている。

一方で近年導入が進んでいる蓄電池を変電所や車両に設置する研究を見ても、文献(18)のように変電所にキャパシタとハイブリッドの容量を最適化し、大きな電力も安定して蓄える研究が進められている。

本研究で扱う最適化問題は消費電力量を最小にすることであるが、これは消費電力量を最小にする運転曲線を求めることと同義である。先行研究を見ると文献(19)では消費電力量と走行時分の関係に注目して、そのバランスが保てる最適点を遺伝アルゴリズムで求めている。これらのように、鉄道研究において数値最適化は広く扱われているが、本研究は運転曲線を最適化するという目的から、数ある最適化手法の中から変分法と動的計画法に注目した。

変分法⁽²⁰⁾では消費電力量を汎関数で表現するために変関数を用意するが、これらの関数は連続でなければならない。列車の運動力学を計算しようとする時、列車の引張力や走行抵抗に非線形な速度依存性が含まれる⁽²¹⁾。そのため多項式関数等に近似し、許容関数になることに留意しつつ停留させる。しかし、鉄道の運動力学は架線電圧の変動も考慮すると饋電回路計算も含み、列車の運動方程式を連続関数に落としこむことが難しい。そこで本研究では次節に述べる動的計画法を用いることにした。

〈3・2〉 動的計画法による運転曲線の最適化 変分法による最適化では非線形最適化問題として扱うことで解析が複雑になる。本研究で扱う動的計画法は離散入力や不連続関数を含むような条件でも扱うことができ、R. Bellmanの最適性条件⁽²²⁾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。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⁽²³⁾」ことである。次の計算アルゴリズム⁽²⁴⁾にて、図8のように計算する。

(f) 運転曲線の空間を状態空間とし、これを格子状に分割しする。最適化問題を N 個の位相面を持つ N 段階決定問題へと変換する

(i) 列車の状態を k 番目の位相面で格子点 S と仮定する。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} を読む。拘束条件を考慮したペナルティを足してラベル J_k を求める。

(f) J_k の最適な入力と、そのときの J_k をラベルとして S に貼る。この作業を位相面すべての格子で行う。

(e) 時間を遡って一つ前の位相面へ移り、(i)(f)の計算を行う。これを $k=0$ まで繰り返し行う。

(d) $k=0$ から $k=N$ に向かって、図9のように順に最適なラベルをたどり、経路をつなぐと最適化結果が得られる。

本研究のように、リニア駆動鉄道で地下鉄の場合は曲線部が多いことから速度制限が多く設定される。これらは拘束条件として扱うが、動的計画法にとってこれらの拘束条件は状態空間を縮小する方向に働くため、計算すべき格子点の数を減らすことができる。つまり計算量を削減できることから、変分法より有利に最適化計算を進められる。

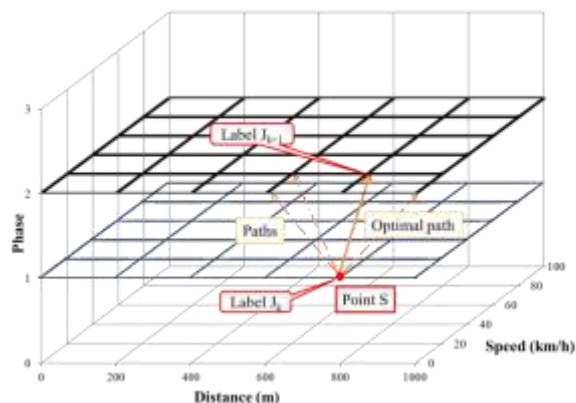


図8 各位相面における最適軌道探索

Fig.8. Optimal paths in each phases.

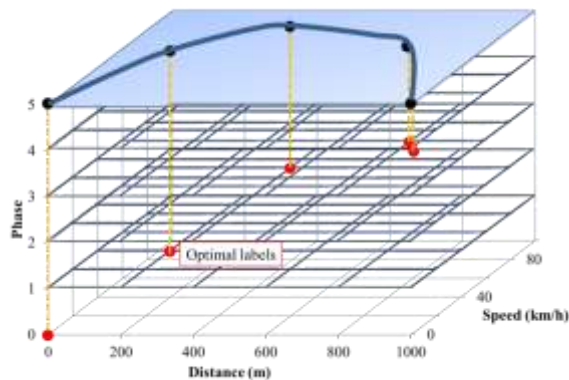


図9 最適ラベルの選択による運転曲線の求解

Fig.9. Method for resolving problems in choosing optimal paths.

4. 運転曲線の最適化計算

〈4・1〉 最適化の意義と条件設定 リニア駆動鉄道特有の走行抵抗とリニア地下鉄特有の急曲線は運転曲線の計算において拘束条件が複雑となる。したがってリニア駆動地下鉄道の消費電力量を最小化する運転曲線は従来の運転理論に基づく知見では解決できない。特に従来の知見では

速度制限下で定速運転をするべきか、惰行運転をするべきかの判断ができない。

そこで本研究では実路線の条件に基づく下記2つの条件を設定し、最適化問題を扱うこととした。

CaseA：駅間の前半部に速度制限が設けられている場合

CaseB：駅間の後半部に速度制限が設けられている場合

また本研究では走行抵抗の感度解析に重点を置くため、曲線抵抗や勾配抵抗は計算から意図的に除外している。

〈4・2〉 駅間の前半部に速度制限が設けられている場合の最適化結果(CaseA)

図10に設けられている速度制限と最適化した運転曲線を示す。この結果では基準運転時分で駅間を走行しようとするとき速度制限下では定速運転を行い、速度制限が設けられていない区間では惰行運転を行うべきとの知見が得られる。図11に対距離の消費電力量を示す。速度制限は45km/hが設定されており、この速度を維持するのに必要な電力量は約0.25kWhと読み取れる。

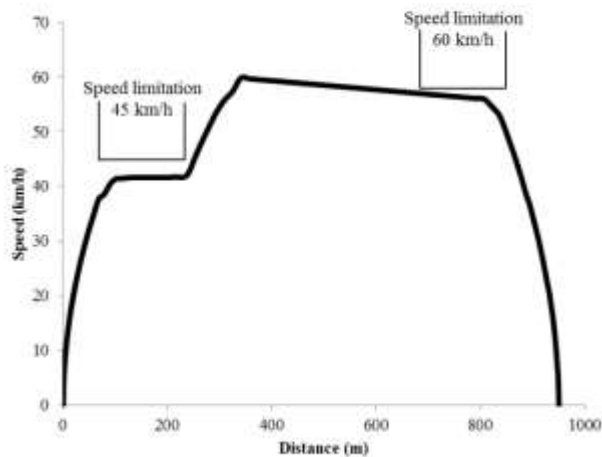


図10 前半部に速度制限が設けられている場合の消費電力量を最小化する運転曲線

Fig.10. Result of running curve to minimize energy consumption in case of containing speed limitation in acceleration section.

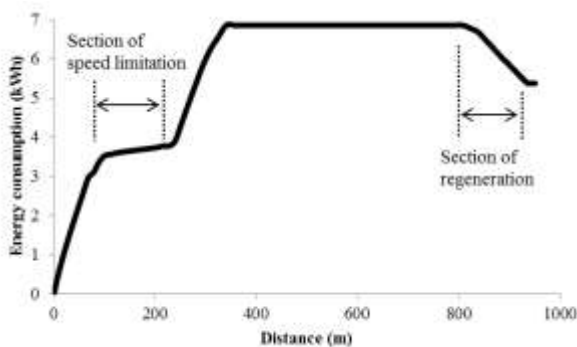


図11 前半部に速度制限が設けられている場合の消費電力量

Fig.11. Result of energy consumption in case of containing speed limitation in acceleration section.

〈4・3〉 駅間の後半部に速度制限が設けられている場合の最適化結果(CaseB)

図12に設けられている速度制限と最適化した運転曲線を示す。基準運転時分で駅間を走行しようとするとき駅出発後の最初のノッチオフから惰行で走行する結果が得られた。この結果では、速度制限下の運転を定速運転にすべきか惰行運転にすべきかを判断できないが、最高速度も調整することにより無駄な加減速なく速度制限の制約条件を満たしつつも走行できることがわかった。図13に対距離の消費電力量を示す。典型的な力行・惰行・制動による運転曲線であったため、駅出発時と停車時以外に無駄な加減速がなく、図11とは対照的に途中の消費電力量に変化のない結果となっている。

以上の結果をまとめると表1のようになる。走行時分は基準運転時分に合致するようにしている。

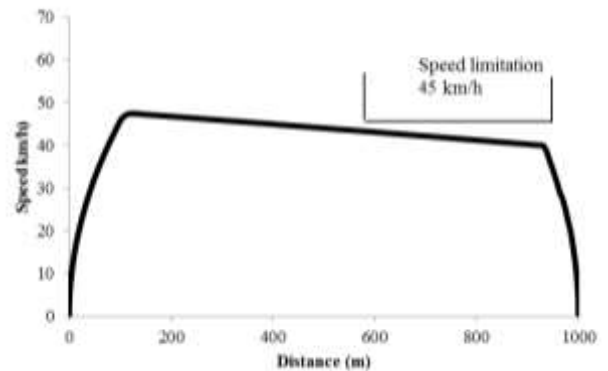


図12 後半部に速度制限が設けられている場合の消費電力量を最小化する運転曲線

Fig.12. Result of running curve to minimize energy consumption in case of containing speed limitation in braking section.

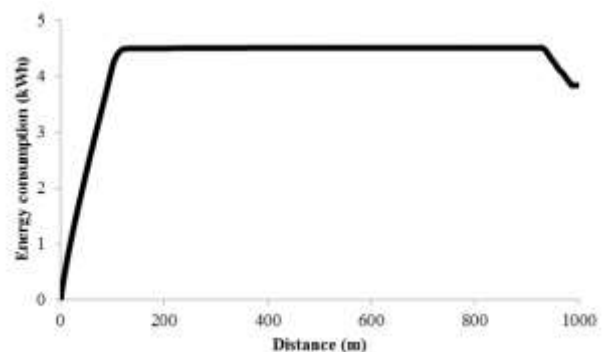


図13 後半部に速度制限が設けられている場合の消費電力量

Fig.13. Result of energy consumption in case of containing speed limitation in braking section.

表 1 各運転曲線の計算条件および結果

Table 1. Results of distance, running time and energy consumption in each of running curves.

	Distance	Running time	Energy consumption
Case A	950 m	86 sec	5.38 kWh
Case B	1000 m	96 sec	3.83 kWh

5. 結論と今後の課題

5.1) 結論 本研究ではリニアモータ特有の走行抵抗特性とモータ効率特性ならびにリニアメトロ特有の急曲線による速度制限を考慮した運転曲線の最適化問題を扱った。最適化問題を求解するにあたり、先行の鉄道研究で扱われている最適化手法の中から速度制限を計算に有利な条件として扱うことのできる動的計画法を選び、その手段とした。最適化問題では駅間の前半部に速度制限が設けられている場合と後半部に設けられている場合の 2 つを準備して最適化計算を行った。基準運転時分で駅間を走行する場合には、速度制限下では定速運転を行い、速度制限が設けられていない部分では積極的に惰行を取り入れること、無駄な加減速を減らすべきとの知見を得た。

5.2) 今後の課題 図 12 に示す Case B のように、基準運転時分で駅間を走行する場合に定速度運転を必要としない結果だけでは、一般論としてまとめるに考察が不十分である。つまり図 12 のような速度制限の条件下で基準運転時分が表 1 の設定よりも小さい場合の最適化計算が必要となる。今後は基準運転時分を意図的に短くして最適化問題を解き、速度制限下での制動の振る舞いや運転パターンを考察すればよい。

さらに、本研究で得られた知見を活かし、実路線の条件に当てはめた場合の運転曲線を考察することも必要である。

文 献

(1) 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」
 (2) T. Koseki: "Technical trends of railway traction in the world", Proc. Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, pp.2836-2831(2010)
 (3) Shift2Rail [Online]. available: <http://www.shift2rail.org/>
 (4) Railenergy [Online]. available: <http://www.railenergy.org/>
 (5) C. Chéron, M. Walter, J. Sandor, and E. Wiebe: "ERRAC-European railway energy roadmap: towards 2030", Proc. World Conference on Railway Research(2011)
 (6) (一社)日本地下鉄協会/編集, 世界の地下鉄 ビジュアルガイドブック, ぎょうせい (2015/10/16)
 (7) 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
 (8) 藤井信男, 平田征生, 河村憲太郎, & 西村晃一郎. (1994). リニアモータ電車の高性能推進方式についての検討. 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 114(9), 910-917.
 (9) Yamamoto, Yuta, N. V. Cuong, and Takafumi Koseki. "Performance improvement and power-saving of linear induction motors for urban rail-guided transport considering their lateral

edge effect." Conference of Elec. Eng., Tokyo, Japan, 2012.
 (10) Van Cuong, N. I. N. H., 渡邊翔一郎, and 古関隆章. "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." [D] 産業応用部門 リニアドライブ研究会 (2013).
 (11) 電気学会電気鉄道における教育調査専門委員会 (編集), 最新 電気鉄道工学, コロナ社 (2000)
 (12) 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
 (13) 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
 (14) 堀内俊夫. "街作りで脚光を浴びる新交通システム II リニア地下鉄 東京都営地下鉄 12 号線." 電気学会誌 119.3 (1999): 144-147.
 (15) 森拓哉, 渡邊翔一郎, 古関隆章(東京大学), "数値計画法に基づく全列車各駅停車の路線に優等列車を取り入れることによる旅客総旅行時間の最小化", 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌) 135.12 (2015): 1153-1159.
 (16) Silvia Umiliacchi, Gemma Nicholson, David Kirkwood, Ning Zhao, Felix Schmid, Clive Roberts (Birmingham Centre for Railway Research and Education, University of Birmingham), "An Integrated Methodology Using Micro- and Macro-Simulation, Performance Evaluation and Optimisation to Design Energy-Efficient Timetables", The 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015), 2015-3, No.003, Chiba, Japan
 (17) Gerben M. Scheepmaker^{1,2}, Rob M.P. Goverde¹ (¹Department of Transport and Planning, Delft University of Technology, DELFT, The Netherlands, ²Department of Logistics, Netherlands Railways (NS), UTRECHT, The Netherlands), "Running time supplements: energy-efficient train control versus robust timetables", The 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015), 2015-3, No.006, Chiba, Japan
 (18) H. Lee, J. Song, H. Lee, C. Lee, and G. Jang: "CAPACITY OPTIMIZATION OF THE SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE ON DC RAILWAY SYSTEM USING A RAILWAY POWERFLOW ALGORITHM", International Journal of Innovative Computing, Information & Control: IJICIC, Vol.7, No.5b; SI, pp.2739-2753; 2753 (2011)
 (19) Y. V. Bocharnikov, A. M. Tobias, C. Roberts, S. Hillmansen, and C. J. Goodman: "Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways", IET Electric Power Applications, Vol.1, No.5, pp.675-682(2007-09)
 (20) 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
 (21) V. Doan, S. Watanabe, and T. Koseki: "The design of an optimal running curve for train operation based on a novel parameterization method aiming to minimize the total energy consumption", Computers in Railways XIV: Railway Engineering Design and Optimization, Vol.135, pp.175(2014)
 (22) R.Bellman, R.Kalaba: "Dynamic programming and modern control theory", academic Press 1964
 (23) 動的計画法 杉山昌平 日科技連出版社, 1976
 (24) H. Ko, T. Koseki, and M. Miyatake: "Numerical study on dynamic programming applied to optimization of running profile of a train", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.125, pp.1084-1092 (2005)