

高速鉄道路線における省エネルギー列車ダイヤの検討

片山 拓海* 宮武 昌史 (上智大学)

Study of Energy-saving Train Schedules on High-speed Rail lines

Takumi Katayama*, Masafumi Miyatake (Sophia University)

This paper describes a train schedule for energy saving on a high-speed rail line. The "Equal Incremental Energy Consumption Rule," which leads to a schedule with minimum energy consumption, was applied to high-speed rail. Case studies were conducted on a variety of train types as well as station distances and gradient characteristics, and the effectiveness of the rule was verified.

キーワード：高速鉄道，列車ダイヤ，最適化，省エネルギー
(high-speed rail, train schedule, optimization, energy saving)

1. はじめに

電気鉄道は様々な交通機関の中でも、少ない消費エネルギーで多くの旅客を輸送できるエネルギー効率の高い交通機関であるが⁽¹⁾、鉄道会社は CO2 排出量削減のために、さらなる省エネルギー化を進めている。

鉄道における省エネルギー手法には車両の軽量化や走行機器における PMSM (永久磁石同期電動機) や SiC (炭化ケイ素) 半導体を用いたインバータの導入、蓄電池を搭載した車両の開発などといったハードウェア技術、列車ダイヤや運転方法の最適化などといったソフトウェア技術がある。ハードウェア技術は、省エネルギー化の効果は大きい一方で設備投資や車両開発にコストや年月がかかるといった欠点があるが、ソフトウェア技術はコストが少なく、導入が決まれば一気に導入が可能であるため、時間をかけずに省エネルギー化を行うことができる。

列車ダイヤの最適化手法は大きく分けて 2 つの手法があり、列車の力行(加速)と制動(ブレーキ)のタイミングが同期するようにダイヤを調整して回生電力を有効活用することで総消費電力量を削減する手法と、遅延回復のために基準運転時分(列車の性能を最大に発揮して走行した際の駅間の所要時分をダイヤの作成単位に切り上げたもの)に付加される余裕時分を各駅間の走行時分に適切に配分して消費電力量を削減する手法がある。前者の手法は複数列車の挙動を同時に考えなければならず複雑であり、列車本数などが変化した場合に再最適化を行う場合、また始めから考える必要があり柔軟性に欠ける。しかし後者の手法は基本的に 1 列車ごとに最適化を行うため、最適化を行った後、列車本数などが変化したとしても比較的容易にダイヤの再最適化が可能であり、柔軟性が高い手法といえる。近年、日本では高速鉄道路線の建設が続々と進んでおり、高速鉄道路線は路線

長が長く、最高速度も在来線では 100km/h 程度なのに対し、高速鉄道路線では 320km/h (東北新幹線) とかなりの差があり、在来線と比較すると消費エネルギーは大きくなるため高速鉄道路線における省エネルギー化は今後重要であると考えられるが、後者の手法の研究は高速鉄道路線ではなく在来線を対象としているもの⁽²⁾⁽³⁾がほとんどであった。

そこで本研究では高速鉄道路線を対象とした列車ダイヤの最適化を行った。具体的には、先行研究⁽²⁾の列車ダイヤ最適化手法を高速鉄道路線に適用することにより、その有効性についての検証と高速鉄道路線における省エネルギーな列車ダイヤの条件について検討した。

2. 列車ダイヤ最適化手法

本研究では「等増分消費エネルギー則」を用いて列車ダイヤの最適化を行う。「等増分消費エネルギー則」とは、宮武⁽⁴⁾が提唱した列車ダイヤの最適化理論である。

横軸に走行時分、縦軸に消費電力量をとったグラフは、図 1 に示すような下に凸の曲線となる。本論文では、この曲線を $W(T)$ 曲線と呼ぶ。 $W(T)$ 曲線は、車両性能や駅間の線路条件 (距離・勾配・速度制限など) によって異なる。

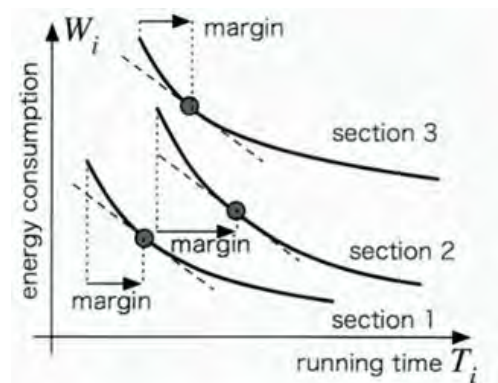


図 1 走行時分と消費エネルギー量の関係⁽²⁾

ここで N 個の駅を含む路線について 1 列車の最適化を考える。駅間 i の走行時分を T_i とすると、駅間 i の消費電力量は T_i の関数 $W_i(T_i)$ で表される。ある列車の総走行時分の総和を T_s で一定とすると、総消費エネルギーの最小化は次の非線形数理計画問題として表される。

$$\min J(T_1 \sim T_N) = \sum_{i=1}^N W_i(T_i) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^N T_i = T_s \dots\dots\dots (2)$$

制約条件が等号制約であることから、これをラグランジュの未定乗数法で解くと、

$$L(T_1 \sim T_N) = \sum_{i=1}^N W_i(T_i) + \lambda(\sum_{i=1}^N T_i - T_s) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial T_1} = \frac{\partial W_1}{\partial T_1} + \lambda = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial T_2} = \frac{\partial W_2}{\partial T_2} + \lambda = 0, \quad \dots,$$

$$\frac{\partial L}{\partial T_N} = \frac{\partial W_N}{\partial T_N} + \lambda = 0, \quad \sum_{i=1}^N T_i - T_s = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、

$$\frac{\partial W_1}{\partial T_1} = \frac{\partial W_2}{\partial T_2} = \dots = \frac{\partial W_N}{\partial T_N} \dots\dots\dots (5)$$

となり、各駅間の $W(T)$ 曲線において、各駅間の走行時分の点における接線の傾きが等しい場合に消費エネルギーが最小となるような最適な走行時分となることが分かる。

3. ケーススタディ

〈3・1〉 列車走行シミュレーション 等増分消費エネルギー則適用に必要な $W(T)$ 曲線を得るために、列車走行シミュレーションを行う。実在路線を参考に作成した路線モデルを図 2 に示す。路線は A~M までの 13 駅と 12 の駅間から成り、速度制限や勾配も一部駅間に存在する。速度制限のない区間の最高速度は 275km/h とした。また実在車両のデータをもとに設定した、走行シミュレーションで用いた車両のパラメータを表 1 に示す。

列車走行シミュレーションは A~M 全駅に停車する普通列車と、図 2 において二重丸(◎)で示した駅にのみ停車する快速列車で行った。シミュレーションによって得られた、それぞれの列車における $W(T)$ 曲線を図 3, 4 に示す。

表 1 列車モデル

起動加速度[km/h/s]	2.6
減速度[km/h/s]	2.7
列車重量[ton]	713
編成両数[両]	16
編成長[m]	404.7
補機消費電力[kW]	500
定員[名]	1323
乗車率[%]	100
平均体重[kg]	60

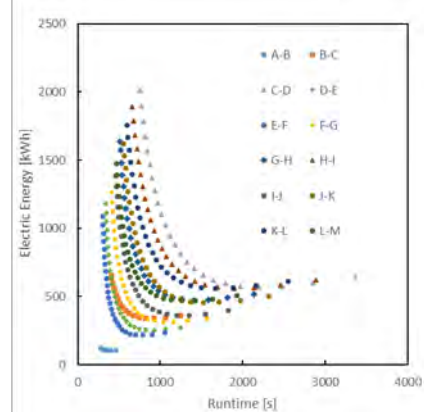


図 3 W(T) 曲線 (普通列車)

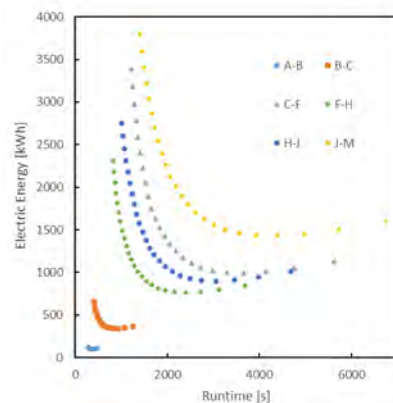


図 4 W(T) 曲線 (快速列車)

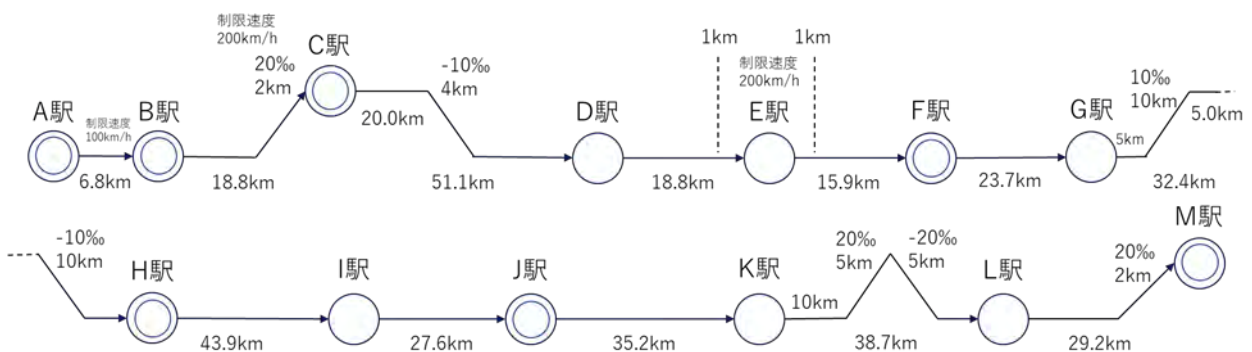


図 2 路線モデル

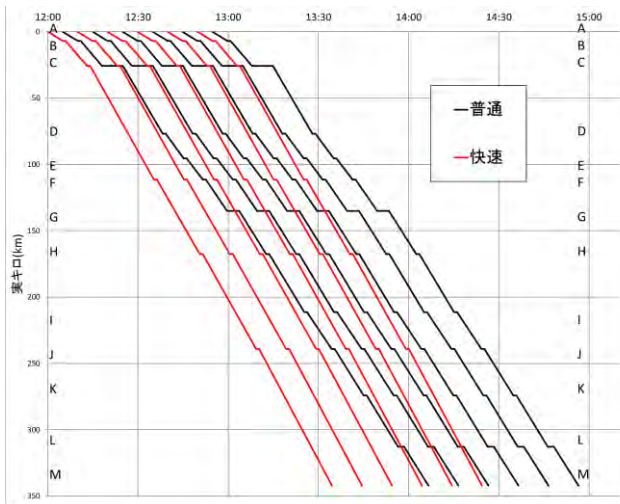


図 5 Case1. 初期ダイヤ

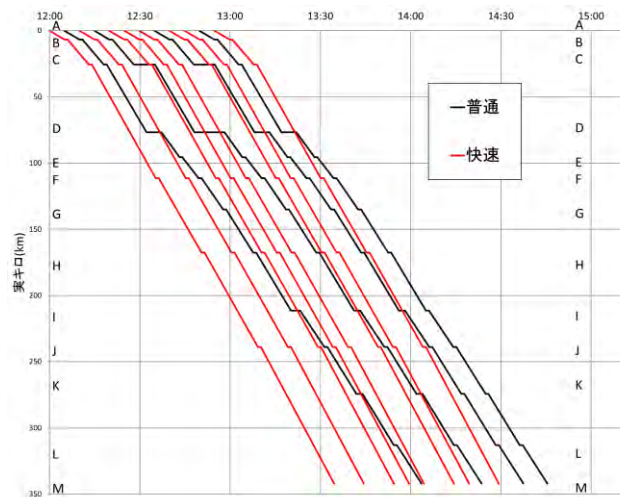


図 6 Case2. 初期ダイヤ

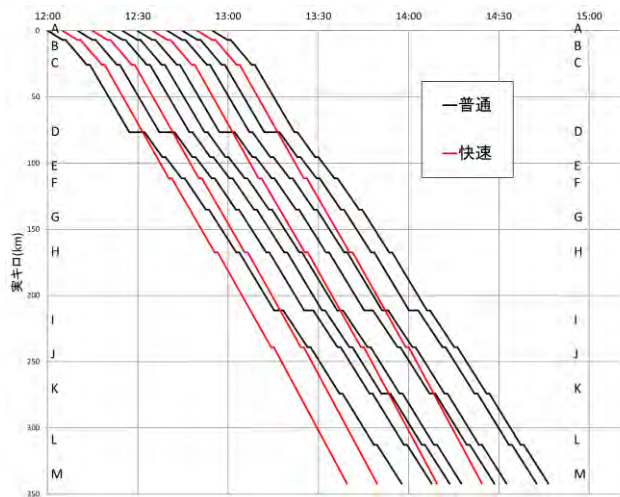


図 7 Case3. 初期ダイヤ

〈3・2〉 ダイヤ最適化シミュレーション

前項の

走行シミュレーションにおいて得られた各駅間走行時分をもとに、以下の 3 つのケースについて初期ダイヤを作成した。

Case1. 普通列車と快速列車が 1:1 の割合で混在

Case2. 普通列車と快速列車が 1:2 の割合で混在

Case3. 普通列車と快速列車が 2:1 の割合で混在

各ケースにおける初期ダイヤを図 5～7 に示す。それぞれにおいて初期条件として各駅間走行時分には余裕時分を一律 5%付与しており、駅停車時間は最低 1 分とし待避を行う駅では停車時分を増加している。

各ケースにおいて等増分消費エネルギー則を適用し消費エネルギーが最小となるようにダイヤの最適化を行った。最適化前後における消費エネルギー変化を表 2、それぞれのケースにおける列車ごとの駅間走行時分の変化を図 8～13 に示す。

表 2 最適化前後における消費エネルギー変化

	消費エネルギーW[kWh]		
	初期ダイヤ	最適ダイヤ	変化量
Case1	153884.0	140959.7	-8.4%
Case2	149803.9	140658.4	-6.1%
Case3	157964.1	141259.0	-10.6%

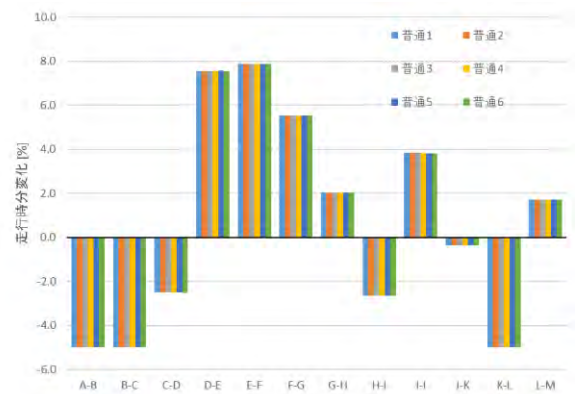


図 8 Case1 における普通列車の走行時分変化



図 9 Case1 における快速列車の走行時分変化

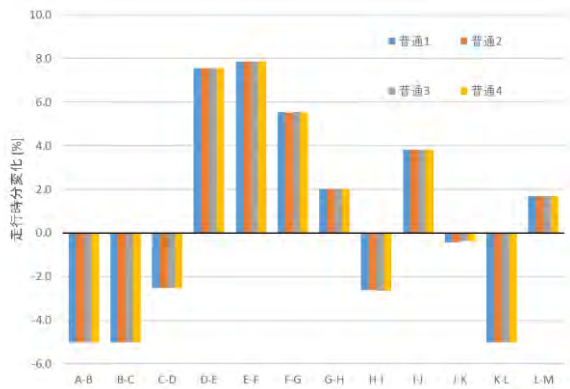


図 10 Case2 における普通列車の走行時分変化

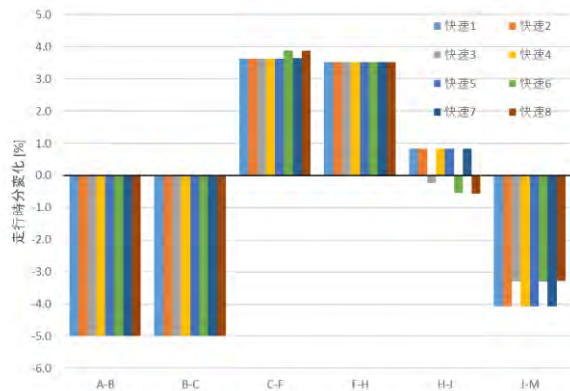


図 11 Case2 における快速列車の走行時分変化

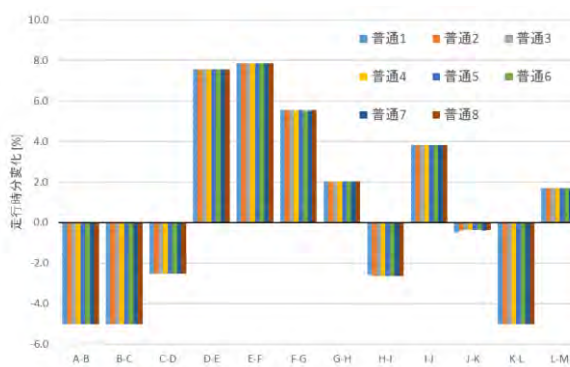


図 12 Case3 における普通列車の走行時分変化

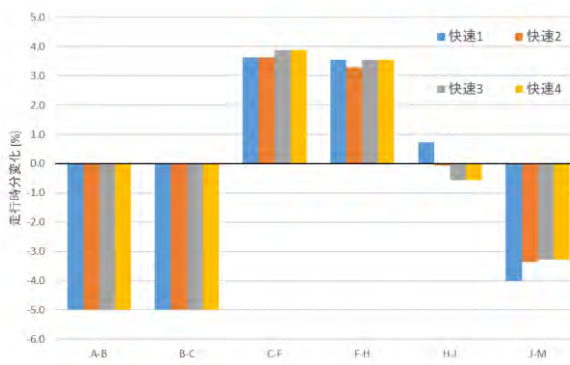


図 13 Case3 における快速列車の走行時分結果

表 2 より高速鉄道路線でも等増分消費エネルギー則の有効性が示された。またダイヤ最適化による省エネルギー効果は快速列車よりも普通列車が多い Case3 が最も大きい結果となった。走行時分については全てのケースにおいて駅間が極端に短い A~B、B~C と駅間が長めの区間の余裕を減らし他の区間に配分するという傾向が見られた。また Case2,3 の快速列車において、前を走る普通列車の制約から、同じ区間でも走行時分を減らす列車と増やす列車が存在するのが興味深い結果となった。

4. まとめ

本研究では等増分消費エネルギー則を高速鉄道路線に適用することでダイヤの最適化を行い、その有効性と省エネルギーな列車ダイヤの条件について検討した。ダイヤの最適化によって普通列車と快速列車が混在するダイヤにおいて 10.6%の省エネルギー効果が確認できた。快速列車よりも普通列車が多いダイヤの方が最適化による省エネルギー効果が高いこと、余裕時分は駅間が長い区間ではなく、短い区間に配分する方が省エネルギーなダイヤであるといえる。

今後は、さらに種別を追加した 3 種別混在ダイヤにおける省エネルギーな最適ダイヤ、等増分消費エネルギー則の課題として挙げられる、余裕時分を減らすことによるダイヤの頑健性への影響の検討を進めていきたい。

文 献

- (1) 資源エネルギー庁:「令和 2 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2021)」, p.97 (2021)
- (2) 宮武昌史:「数理計画モデルによる省エネ列車ダイヤの生成法」、J-RAIL2011、pp.585-588 (2011)
- (3) S. Su, X. Li, T. Tang and Z. Gao, "A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-Efficient Operation Strategy," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Volume. 14, Issue. 2 (2013)