

自動運転による高速な分割・併合を活用した 新たな多種別列車運行の提案

岸川 知樹* 和田 健太郎 (筑波大学)

Proposition of a novel railway operation scheme providing multiple train types
with a fast coupling/decoupling technology
Tomoki Kishikawa*, Kentaro Wada, (University of Tsukuba)

A novel train operation scheme that includes express/local services in a single train using fast coupling technology is proposed herein. Specifically, as a typical train operation based on the aforementioned concept, we propose a scheme that generates a new local train from an express train at every express station in the outbound direction and, conversely, couples these local trains with an express train at those stations in the inbound direction. First, we construct a continuous approximation model to determine the optimal operation pattern. Subsequently, we examine the characteristics of the proposed scheme by solving the model analytically. Finally, we compare the proposed scheme with a conventional express/local operation and demonstrate that the proposed scheme has superiority from both the perspectives of agencies and passengers.

キーワード：列車運行，高速連結，自動運転，連続近似
(railway operation, fast coupling, automated driving, continuous approximation)

1. はじめに

現状の鉄道においては、TASC (Train Automatic Stop-position Controller) や、ATO (Automated Train Operation) 等の装置が登場しており、信号や路線状況に応じた自動運転が実現されている。また、保安装置についても JR 東日本の ATACS (Advanced Train Administration and Communication's System) ⁽¹⁾等の登場により、列車間距離の短縮が可能となってきた。

今後これらの技術がより進歩すれば、列車同士の分割・併合にかかる時間・コストの大幅な削減が期待される。その結果、編成の車両数を柔軟に変更すること、つまり、需要に応じたよりきめ細やかな運行が可能となると考えられる。

こうした柔軟な車両数の変更により解決できる可能性がある課題として、都心と郊外を結ぶ長距離路線における郊外部でのサービスレベルの低下が挙げられる。このような路線では、速達性確保のために急行列車が有用であるが、郊外では需要が薄く運行コストとのトレードオフが働くため、運行頻度を下げる、あるいは、実質的に急行が各駅停車となる区間を導入するなどの運行が行われている。

以上の課題を解決するように工夫された運行スキームは現実に様々見られるが、現在の技術では実現の難しい、編成を柔軟に変える運行スキームについては、従来ほとんど考えられてきていない。(著者らが知る限り) 唯一の例外は、

仮想的な連結によって列車同士を同期させる「ソフト連結」という技術の実現を前提とした、森谷・曾根(1993)⁽²⁾の提案である。しかし、現在に至るまでこのような仮想的な連結を行う技術は実現されておらず、また、それを前提とした運行スキームの包括的な研究もなされていない。

本研究では、停車中の列車に対する高速な車両連結(解結)技術が確立され、より柔軟に車両編成数を変えることができる状況を前提として、新たな高頻度鉄道運行スキームを提案する。具体的には、郊外方向では急行列車が駅に停車する度に新たな各駅停車列車を生成(分割)する、そしてその反対に、都心方向では多数の各駅停車列車が急行停車駅で1本の急行列車に連結される運行スキームを考える。この提案スキームを表現する連続体近⁽³⁾に基づく数理モデルを構築し、従来型運行スキームとの比較を通して、提案スキームの特徴や優位性を明らかにする。

2. モデル

(2-1) 状況設定 本稿では、都心(CBD: Central Business District)と郊外を結ぶ総路線長 L の複線の鉄道路線を想定する。駅は(ほぼ)等間隔に存在しており、その間隔は s_0 とする。乗客は沿線に一樣に分布しており、その主なODパターンは、CBD以外の郊外の駅からCBD駅への多起点1終点のもの(朝の通勤)、および、その反対の1起点多終点のもの(夕方の帰宅)であるとする。前者の単位距離・

時間当たりの発生乗客流率, 後者の単位距離・時間当たりの集中乗客流率は, 定数 λ [pax/km-h]で表す.

列車種別は, 急行と各駅停車の 2 種類であるとし, 急行列車は等間隔 s_1 で配置された一部の駅 (以下, 「急行駅」と呼ぶ) にのみ停車すると仮定する. 以上のような仮定の下, 2 つの運行スキームを考える. 1 つは第 1 章で簡単に触れた提案運行スキームであり, もう 1 つは従来型の急行・各駅停車運行スキームである (e.g., Daganzo and Ouyang (2019)⁽³⁾). 完全な自動運転が実現されているものとし, いずれの運行スキームでも乗務員は不要であるとする. さらに, 急行が各駅停車を追い越すことのできる設備は, 急行駅にのみ存在するものとする.

提案スキームにおいては, 一定の車頭時隔 H で列車が運転されるものとし, CBD 駅での車両数を n 両とする. 下り方向の列車は, CBD 駅を含む急行駅で急行列車から新しい各駅停車を生成 (分割) する (図 1 参照). 各駅停車は次の急行駅までを往復して, 上りの急行列車に連結する. 均一な需要の仮定の下では, 各駅停車の車両数は一定, すなわち, $n/(L/s_1 + 1)$ であるべきである. また, 下りの急行駅ではまず急行が発車し, その後に各駅停車が発車すると仮定する.

従来型スキームにおいては, n 両編成の各駅停車と急行列車が, それぞれ車頭時隔 H_0 と H_1 で全線を (分割・併合せずに) 運行する. Daganzo and Ouyang (2019)⁽³⁾と同様に, 非同期運行を仮定し, 急行と各駅停車は待合わせを行わない.

〈2・2〉 社会的コスト最小化問題 以上の仮定の下, 社会的コストを最小化する最適運行パターン (急行駅間隔 s_1 , 車頭時隔 $H \equiv H$ or (H_0, H_1)) について分析する.

$$\min_{s_1, H} SC = \bar{T} + \frac{\$ \beta}{2\lambda} \quad \text{s.t. 容量制約} \dots \dots \dots (1)$$

ここに, \bar{T} は乗客の平均旅行時間, $\$$ は単位時間当たりのエー

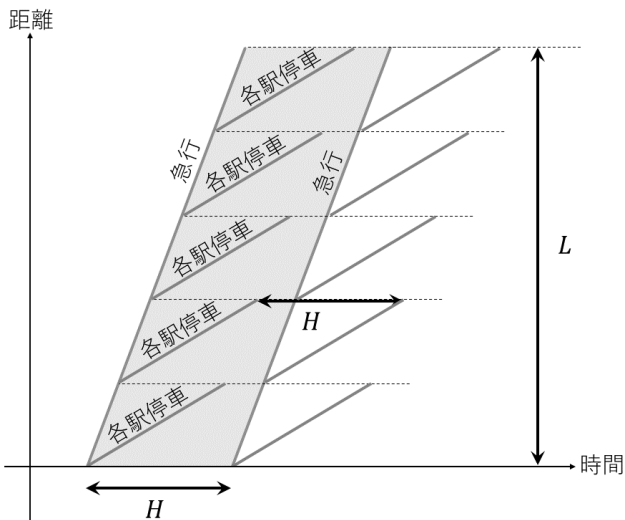


図 1 提案運行スキームの単位ユニット

ージェンシーコストである.

(1) 平均旅行時間 提案スキームでは, 平均旅行時間 \bar{T} は $L/2$ を旅行する時間として次式のように定式化される.

$$\bar{T} = \frac{H}{2} + \frac{t_s}{2} \left(\frac{L}{s_1} + \frac{s_1}{s_0} \right) + \frac{t_c L}{4s_1} + T_{c,p} \dots \dots \dots (2)$$

第 1 項は, 出発駅での待ち時間, 第 2 項・第 3 項は, 乗車時間を表しており, 駅停車時間 (t_s は駅毎の停車時間), 上り方向の急行駅における併合に要する時間 (t_c は併合毎の時間) からなる. 第 4 項は, 次式のような決定変数によらない定数を表す.

$$T_{c,p} = \frac{s_0}{4v_w} + \frac{L}{2v_{max}} + \frac{t_b}{2} - \frac{1}{2} \left(t_s + \frac{t_c}{2} \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここに, v_w は歩行速度, v_{max} は最高巡航速度, t_b は分割・併合 1 回当たりにかかる安全余裕時分である. 第 1 項は, 平均歩行時間である. 第 2 項は, 最高速度旅行時間, 第 3 項は, 分割・併合に係る安全余裕時分, 第 4 項は, 乗車時間の調整項である.

同様に, 従来型スキームについても平均旅行時間を次式のように定式化できる.

$$\bar{T} = \frac{1}{2} (H_0 + H_1) + \frac{t_s}{2} \left(\frac{L}{s_1} + \frac{s_1}{s_0} \right) + T_{c,e} \dots \dots \dots (4)$$

第 1 項は, 出発駅・乗換駅での待ち時間である. 第 2 項は, 乗車時間のうち, 駅停車時間を表している. 第 3 項は次式のように表される.

$$T_{c,e} = \frac{s_0}{4v_w} + \frac{L}{2v_{max}} + \Delta - \frac{1}{2} t_s \dots \dots \dots (5)$$

第 1・2・4 項は式 (3) とまったく同様である. 第 3 項 Δ は, 乗換抵抗を表す.

(2) エージェンシーコスト いずれの運行スキームにおいても, 一定時間 (車頭時隔) と路線長のタイル (以下, 単位ユニットと呼ぶ) の繰り返しとして列車の運行を表現できる. 例えば, 提案運行スキーム下の下り列車については, 図 1 の時空間図の網掛け部分が単位ユニットであり, この繰り返しとして列車の運行を表現できる. したがって, 単位時間当たりのエージェンシーコストは, 単位ユニットにかかるコストを車頭時隔で除すことで定式化できる. 通常, エージェンシーコストは, 人件費, 運転費, 施設のコストから構成される⁽³⁾が, ここでは完全自動運転を想定しているため, 後者 2 つのコストを考慮する.

提案運行スキームのエージェンシーコストは, 次式のように表される.

$$\$ = \frac{1}{H} c_a n \left(2 - \frac{1-s_1/L}{1+s_1/L} \right) L + I_c \dots \dots \dots (6)$$

第 1 項は, 運行費であり, 距離と車両数に比例して運行費が発生すると仮定し, その割合を c_a [yen/car-km] と表す. 第 2 項は施設にかかるコスト

であり、駅と線路にかかるコストから構成される。同様に、従来型運行スキームのエージェンシーコストは、次式のように定式化される。

$$\$ = 2\left(\frac{1}{H_0} + \frac{1}{H_1}\right)c_a nL + I_c \dots\dots\dots (7)$$

(3) 容量制約 鉄道システムの重要な容量制約として線路容量制約と車両容量制約が挙げられる。前者は、複線において、限られた追越し設備(本研究では急行駅)で急行列車が普通列車を追い越せることを保証するものである。後者は、最も混雑する区間の需要が車両容量を超えないことを保証するものである。一般に前者の制約の方が後者よりも影響が大きく、また、追越し設備は新たに設置するコストが大きいため、ここでは、前者のみを考慮する。

各駅停車と急行列車の運行速度をそれぞれ $v_0(s_1)$, $v_1(s_1)$ とし、急行駅間隔 s_1 の関数であるとする。これを用いて、急行列車が急行駅間で各駅停車を追い越さないために必要な時間間隔が、次式で表される。

$$s_1 \left(\frac{1}{v_0(s_1)} - \frac{1}{v_1(s_1)} \right) + t_b (+ t_c) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 t_b は両スキーム共通の安全余裕時分である。連結に必要な安全余裕 t_c は提案スキームにのみ組み込まれている。この式に運行速度を代入することで線路容量制約は次式のように表される。

$$H \geq t_s \left(\frac{s_1}{s_0} - 1 \right) + t_b + t_c \dots\dots\dots (9)$$

$$H_0, H_1 \geq t_s \left(\frac{s_1}{s_0} - 1 \right) + t_b \dots\dots\dots (10)$$

これらの式から、同じ急行停車駅間隔 s_1 であれば、従来型スキーム(式(10))の方が提案スキーム(式(9))よりも容量が大きい(最小車頭時隔が小さい)ことがわかる。

3. 最適運行状態

本章では、社会的費用最小化問題を解析的に解くことで、両スキームの最適運行状態を導出し、それらを比較する。まず、線路容量制約に拘束されない状況を想定する(これは、需要が比較的少ない場合や、複々線の場合に合致する)。続いて、ラッシュアワーの状況と合致すると考えられる線路容量制約に拘束される場合の最適パターンを示す。

〈3.1〉 制約条件に拘束されない場合 ここでは、線路容量制約に拘束されない場合を考える。提案スキームの社会的費用最小化問題は、シンプルな形の解を持たないが、目的関数の下界をとることでシンプルな形の近似解を得ることができる。具体的にはまず、式(4)の第1項をマクローリン級数の1次までを用いて近似する： $\left(2 - \frac{1-s_1/L}{1+s_1/L}\right) \approx 1 + \frac{2s_1}{L}$

この近似は、 $s_1/L \ll 1$ のとき、すなわち、路線長が十分に長い時に成り立つ。その後、決定変数 s_1 , H の交絡項を除くことで下界を求め、最小化する。この問題は EOQ 問題 (the economic order quantity problem) (3) に帰着され、近似解は以下のように求められる。

$$s_1^* \approx \sqrt{\left(1 + \frac{t_c}{2t_s}\right)s_0L}, H^* \approx \sqrt{\frac{c_a n}{\lambda \beta}} \dots\dots\dots (11)$$

これらの式から最適な急行駅間隔 s_1^* は需要に依存せず、連結の安全時間 t_c の平方根に比例して増加することが分かる。また、最適な車頭時隔の式は、Mohring (1972) (4) が提案した古典的な平方根の式であることが分かる。これらのパラメータを代入することで、最適な平均旅行時間と単位時間あたりのエージェンシーコスト(下界)が次式のように求められる。

$$\bar{T}(s_1^*, H^*) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c_a n}{\lambda \beta}} + t_s \sqrt{\left(1 + \frac{t_c}{2t_s}\right) \frac{L}{s_0}} + T_{c,p} \dots\dots\dots (12)$$

$$\$(s_1^*, H^*) \approx \frac{L}{2} \sqrt{c_a n \lambda \beta} + I_c \dots\dots\dots (13)$$

一方、従来型スキームの社会的費用最小化問題は、各変数の EOQ 問題を解くことで厳密解が求められる。

$$s_1^* = \sqrt{s_0L}, H_0^* = H_1^* = \sqrt{\frac{2c_a n}{\lambda \beta}} \dots\dots\dots (14)$$

$$\bar{T}(s_1^*, H_0^*, H_1^*) = \sqrt{\frac{2c_a n}{\lambda \beta}} + t_s \sqrt{\frac{L}{s_0}} + T_{c,e} \dots\dots\dots (15)$$

$$\$(s_1^*, H_0^*, H_1^*) = 2\sqrt{2L} \sqrt{c_a n \lambda \beta} + I_c \dots\dots\dots (16)$$

続いて、2つの運行スキームを比較する。式(11)と式(14)から、提案スキームの最適車頭時隔は従来型スキームの $1/\sqrt{2}$ 倍に削減されていることがわかる。これは、提案スキームが車両数を柔軟な変化させることで台キロを削減していること、急行と各駅停車という2つの種別を1編成の列車に統合することから実現されている。将来的に、連結時間 t_c が、駅停車時間 t_s と同等かそれ以下になった状況を考えると、提案スキームの最適急行駅間隔は従来型スキームに比べて若干増加することが分かる。また、提案スキームは、車頭時隔が小さくなり、乗換えなく旅行できるようになる特性から、旅行時間が短くなっている。このように従来型運行スキームと比較してサービスレベルが向上しても、提案スキーム

表 1 パラメータ設定

L [km]	60	Δ [s]	60
s_0 [km]	3	c_a [yen/car-km]	80
v_w [km/h]	3	β [yen/h]	2000
v_{max} [km/h]	120	I_c [yen/h]	424×10^3
t_s [s]	80	n [car]	10
t_c [s]	30	λ [pax/km-h]	60
t_b [s]	90		

のエネルギーコストは従来型スキームの約 $1/2\sqrt{2}$ 倍に削減される。

表 1 のパラメータ設定に基づく数値例を示す。このとき、提案スキームの最適運行状態は次のように表される。

$$s_1^* = 14.6 \text{ [km]}, H^* = 4.9 \text{ [min]}$$

$$\bar{T}(s_1^*, H^*) = 38.9 \text{ [min]}, \frac{\$ (s_1^*, H^*) / \beta}{2\lambda L} = 4.2 \text{ [min/pax]}$$

.....(17)

この最適値は式(11)によって計算されているが、最適値を式(6)で表される元の目的関数に代入することで、上界を求めることができる。乗客 1 人当たりのエネルギーコストの上界の値は、式(17)の下界との差が 1.0 [min/pax] である。この値は、平均旅行時間や社会コストと比較して僅少であり、エネルギーコスト/社会コストのかなりタイトな上界/下界が得られている。一方、従来型スキームの最適運行パターンは次式のように表される。

$$s_1^* = 13.4 \text{ [km]}, H_0^* = H_1^* = 6.9 \text{ [min]}$$

$$\bar{T}(s_1^*, H^*) = 43.2 \text{ [min]}, \frac{\$ (s_1^*, H^*) / \beta}{2\lambda L} = 8.7 \text{ [min/pax]}(18)$$

〈3・2〉 制約条件に拘束される場合 続いて、線路容量制約に拘束される場合を考える。この制約付き社会的費用最小化問題は、ラグランジュの未定乗数法によって解くことができる。しかし、現実の運行において急行駅間隔は、簡単に変更できないため、最適解を現実的に即座に適用できない場合があると考えられる。また、制約条件に拘束されない場合の最適急行駅間隔 s_1^* は需要に依存しないため、制約に拘束されない場合の解が実行不可能である場合（すなわち、需要が大きい場合）には、固定された s_1^* に対して線路容量制約を満たすように車頭時隔を調整することが合理的である。そこで、式(11)、式(14)に式(9)、(10)を代入することで、最適車頭時隔を次式のように得ることができる。

$$\tilde{H} = t_s \left(\sqrt{\left(1 + \frac{t_c}{2t_s}\right) \frac{L}{s_0}} - 1 \right) + t_b + t_c \text{(19)}$$

$$\tilde{H}_0 = \tilde{H}_1 = t_s \left(\sqrt{\frac{L}{s_0}} - 1 \right) + t_b \text{(20)}$$

上式を比較すると、式(19)の第 3 項の影響に加えて、急行停車駅間隔が大きくなっているため、提案スキームは、従来型運行スキームと比較して車頭時隔が大きくなっていることがわかる。

3.1 節での議論から、 (s_1^*, \tilde{H}) と $(s_1^*, \tilde{H}_0, \tilde{H}_1)$ を採用した場合、提案スキームのエネルギーコストは、従来型スキームより大幅に小さくなる事が分かる。平均旅行時間については、 (s_1^*, \tilde{H}) と $(s_1^*, \tilde{H}_0, \tilde{H}_1)$ をそれぞれ式(2)と式(4)に代入することで、次式が得られる。

$$\bar{T}(s_1^*, \tilde{H}) = \frac{3}{2} t_s \sqrt{\left(1 + \frac{t_c}{2t_s}\right) \frac{L}{s_0}} + \frac{1}{2} (t_b + t_c - t_s) + T_{c,p} \text{ (21)}$$

$$\bar{T}(s_1^*, \tilde{H}_0, \tilde{H}_1) = 2t_s \sqrt{\frac{L}{s_0}} + (t_b - t_s) + T_{c,e} \text{(22)}$$

これらの式から、連結時間 t_c が駅停車時間 t_s と同程度であれば、従来型スキームと比較して提案スキームの平均旅行時間は（わずかに）短くなる可能性がある。以上の結果をまとめると、提案スキームは、線路容量が小さくなるが、連結時間が十分に短ければ、従来型スキームよりもエネルギーと乗客双方の観点から望ましい特性を持つと考えられる。

4. おわりに

本研究では、鉄道の完全自動運転が実現し、列車同士の高速度な分割・併合が可能となる状況を想定し、急行の速達サービスと各駅停車のフィーダーサービスを 1 本の列車に内包する新たな鉄道運行スキームを提案した。具体的には、提案運行スキーム下における乗客・エネルギーのコストをモデル化し、社会的コストを最小化する運行パターンを解析的に導出した。そして、いくつかの観点から従来型運行スキームとの比較を行った。その結果、提案運行スキームについて、次のことが分かった。

- (1) 線路容量制約に拘束されない場合（すなわち、需要が比較的少ない場合）、従来型運行スキームと比較して提案運行スキームの社会的コストは小さくなり、最適車頭時隔は小さくなる。
- (2) 線路容量での運行が最適となる場合（需要が多い場合）、従来型運行スキームと比較して、提案運行スキームの最適車頭時隔は大きくなる。この場合でも、一般的な状況においては、提案運行スキームのエネルギーコスト・旅行時間コストはともに低くなると考えられる。

文 献

- (1) 馬場裕一・立石幸也・森健司：「無線による列車制御システム (ATACS)」, Technical review, JR East, Vol.5, pp.31-38, 2003.
- (2) 森谷修・曾根悟：「ソフト連結」, 計測と制御, Vol. 32, No.7, pp.600-603 (1993)
- (3) Daganzo, C.F. and Ouyang, Y.: “Public Transportation Systems: Principle of System Design, Operations Planning and Real Time Control”, World Scientific Publishing Company, Singapore. (2019)
- (4) Mohring, H. : “Optimization and scale economies in urban bus transportation”, The American Economic Review, Vol.62. No.4, pp.591-604 (1972)