

高速な連結・解結を前提とした 新たな高頻度鉄道運行スキーム

岸川 知樹¹・和田 健太郎²

¹非会員 筑波大学 理工学群 社会工学類 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1 丁目 1-1)
E-mail: s1811224@sk.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1 丁目 1-1)
E-mail: wadaken@sk.tsukuba.ac.jp (Corresponding Author)

鉄道における保安装置・自動運転の性能向上により、今後極めて高速に車両同士の連結・解結が可能となることが期待される。本研究では、高速車両連結（解結）技術、つまり、柔軟に車両編成数を変えることができるシステムを前提として、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（切り離し）する、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似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。

Key Words: railway operation, fast coupling, automated driving, continuum approximation

1. はじめに

現状の鉄道においては、既に 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) 等の登場¹⁾により、列車間距離の短縮が可能となってきている。この技術に関して、吉枝ら²⁾は、移動閉塞を用いた際、現実の路線において高頻度運行が実現されうるのか検証している。

今後これらの技術がより進歩すれば、連結にかかる時間・コストが大幅に削減されることが期待される。具体的には、自動運転によって連結に係る安全性担保が容易になり、高度な保安装置によって列車間距離を縮められるようになれば、連結までにかかる時間が短縮されるであろう。そしてこの連結の高速化により、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。なお、このような運行は、東京大学交通ラボ³⁾に挙げられている列車ダイヤの典型的

なパターンのうち、「緩急結合型ダイヤ」を異なる列車密度で地域毎に結合したものとみなせる。

また別に解決しうる課題としては、限られた線路容量の活用の問題が挙げられる。例えば、限られた線路容量の中で異なる種別の列車本数をそれぞれの需要に合わせて決定する場合、運行頻度のアンバランスが起きてしまうことがある。具体的な状況を考えてみると、都心部において急行停車駅以外にも大きな需要が発生しているような場合、各駅停車の運行頻度を確保する必要性が高まり、その分路線全体としては、急行の運行頻度の制約となりうる。このような線路容量の低下に対応する運行スキームとしては、「選択停車³⁾」と呼ばれる運行方式がある。選択停車とは、千鳥停車とも呼ばれる運行スキームであり、列車種別間で停車駅を分散させることで種別間での速度差を小さくし、線路容量の低下を防ぎながら速達性を担保するものである。

以上のように、鉄道サービスにおける課題を解決するよう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⁴⁾らの提案である。これは、仮想的に連結された編成の一部分だけを途中駅に止めることにより、停車駅設定を柔軟に変更する運行スキームであり、サービスレベルが格段に向上する可能性が示されている。また、以上の提案を受け、Kakuhama and Takagi⁵⁾では、ソフト連結の技

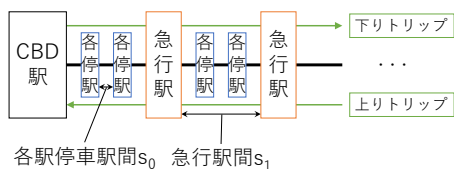


図-1 対象路線のイメージ

術によって列車同士の車頭時隔がどの程度にまで削減できるか検討されている。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（切り離し）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似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。

本研究で分析手法として採用する連続体近似アプローチは、Newell⁶⁾に端緒を発し、公共交通や物流システムにおけるスケジューリングや施設立地、輸送の最適化に関わる文脈でこれまで多くの研究が蓄積されてきている⁷⁾。これらに共通する1つの特徴は、本来離散的である車両数や施設・駅数といった変数を連続量として近似的に扱う点である。これにより、定式化するモデルが厳密に解くことが難しい離散/組合せ最適化問題となることを回避する。さらに、一定程度の状況の理想化を行い、解析的に問題を解く、あるいは、分析することで、個別・具体の詳細状況に依存しない対象システムの特性を明らかにすることがこのアプローチの目的であり、有用な点である。なお、連続体近似モデルによる公共交通設計の包括的な分析としては、Daganzo & Ouyang⁸⁾、鉄道運行スキーム（千鳥停車）に適用した類似の研究として、Freys et al.⁹⁾が挙げられる。

2. 状況設定

本稿では、図-1に示す、都心(CBD: Central Business District)と郊外を結ぶ総路線長 L の鉄道路線を考える。CBDに向かう方向を「上り」方向、CBDから離れる方向を「下り」方向と呼ぶ。駅は路線に（ほぼ）等間隔で存在しており、その距離は s_0 とする。

乗客は路線沿いに一様に分布しており、この路線にお

ける主要なトリップは、CBD駅以外の郊外駅からCBD駅に向かう多起点1終点のトリップ（朝の通勤）、および、その逆の1起点多終点（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、一定値 λ [pax/(km・h)]で表す。なお、これ以外を起終点とする需要は小さいものと考え、以降では扱わない。

3. 従来型の運行スキームの定式化

本章ではまず、各駅停車と急行から構成される従来型の運行スキームを考え、乗客の平均旅行時間、鉄道を運営するエージェンシーのコストを定式化する。急行列車が停車する駅間隔は $s_1 > s_0$ とし、各駅停車・急行の車頭時隔がそれぞれ H_0, H_1 でサービスが提供されているとする。さらに、CBD駅付近でのサービスレベルを向上させる（i.e., 車頭時隔を短く保つ）ために、各駅停車は路線の終点より手前の $l_1 < L$ の地点において折り返すものとする。一方、 l_1 より先の区間においては、急行列車が各駅停車になる（i.e., 駅間が s_0 になる）ことでサービスを担保する。

(1) 平均旅行時間

以上の仮定に基づいて、旅行距離に応じた乗客の平均旅行時間を定式化する。

a) 旅行距離が l_1 未満の場合

旅行距離が比較的短い場合、急行・各駅停車間の乗換えをすることなく、各駅停車のみで旅行する方が旅行時間が短くなり得る。この条件について考えるため、まず各駅停車で旅行する場合の旅行時間を求める。具体的には、Daganzo & Ouyang⁸⁾と同様に、旅行距離 l の乗客の平均旅行時間は次のように定式化できる。

$$T_l(l) = \frac{H_0}{2} + \frac{s_0}{4v_w} + \frac{l}{v_{\max}} + t_s \frac{l}{s_0} \quad (1)$$

第1項は、乗車駅において費やす平均待ち時間である。 H_0 が十分短いとすれば、乗客はランダムに駅に到着すると考えられるため、待ち時間の平均値は、 $H_0/2$ となる。第2項は、自宅から最寄り駅への平均アクセス時間である。需要が駅間に一様に分布しているとすれば、最寄り駅までの平均距離は $s_0/4$ であり、それを歩行速度 v_w で除することで求められる。第3項は最高巡航速度 v_{\max} で距離 l を走るのにかかる時間である。第4項は、停車駅において追加的にかかる時間（減速、加速、停車）である。距離 l を旅行する際に各駅停車が停車する駅数は、平均 l/s_0 であり、これに駅当たりの（加速・減速を含む）停車時間 t_s を掛け合わせれば追加的にかかる時間が得られる。

続いて、急行列車と各駅停車を乗り継ぐ場合の旅行

時間を考える。これは、式(1)の要素に乗り換えのペナルティを追加した形で、次のように定式化される。

$$T_e(l) = \frac{H_0 + H_1}{2} + \frac{s_0}{4v_w} + \frac{l}{v_{\max}} + t_s \left(\frac{l}{s_0} + \left(1 - \frac{s_1}{s_0} \right) \left\lfloor \frac{l}{s_1} \right\rfloor \right) + \Delta \quad (2)$$

第1項は、乗車駅での平均待ち時間と、乗換駅における平均待ち合わせ時間を足し合わせたものである。例えば、下り方向であれば、乗車駅で平均 $H_1/2$ の急行待ち時間がかかり、また、乗換駅で各駅停車にランダムに接続するとすると $H_0/2$ の平均待ち合わせ時間を被る（上り方向はこの逆である）。第2項・第3項は、先と全く同じである。第4項は、停車駅において追加的にかかる時間である。最も目的地に近い急行停車駅で急行から各駅停車に乗換えるとすれば、急行で旅行する距離は $\lfloor l/s_1 \rfloor s_1$ であり、残りの距離 $l - \lfloor l/s_1 \rfloor s_1$ が各駅停車で平均的に旅行する距離になる。つまり、距離 l を移動する際に停車する駅数は、各駅停車駅 $(l - \lfloor l/s_1 \rfloor s_1)/s_0$ 個、急行駅 $\lfloor l/s_1 \rfloor$ 個となり、これらに t_s を掛け合わせれば追加的にかかる時間が得られる。最後の第5項は、乗換ペナルティであり、乗換時間、乗換抵抗、車両同士の距離を保つのに必要な時間が含まれる。

いま、乗客が平均旅行時間（過去の経験）を基に旅行パターンを選択するとすると、 $l < l_1$ での平均旅行時間 $T(l)$ は、以下ようになる。

$$T(l) = \min\{T_l(l), T_e(l)\} \quad (3)$$

この切り替わり距離 l_2 を考えるために、旅行時間差 $\Delta T(l) (= T_l(l) - T_e(l))$ をとると、

$$\Delta T(l) = t_s \left\lfloor \frac{l}{s_1} \right\rfloor \left(\frac{s_1}{s_0} - 1 \right) - \frac{H_1}{2} - \Delta. \quad (4)$$

であり、 $\Delta T(l)$ は、 $[ks_1, (k+1)s_1]$ (k : 自然数) の区間では値の変わらない、 l についての増加関数となる。従って、初めて $T_e(l) \geq T_l(l)$ を満たす距離 l_2 が、 $l_2 = \alpha s_1$ (α : 自然数) の形で与えられる。

なお、式(2)は切り捨て処理が入っており、扱いが複雑である。従って、第4項を近似した下記の平均旅行時間を以降の解析では用いる。すなわち、

$$\tilde{T}_e(l) = \frac{H_0 + H_1}{2} + \frac{s_0}{4v_w} + \frac{l}{v_{\max}} + t_s \left(\frac{l}{s_1} - \frac{1}{2} + \frac{s_1}{2s_0} \right) + \Delta \quad (5)$$

$$T(l) = \begin{cases} T_l(l) & \text{if } l < \alpha s_1 \\ \tilde{T}_e(l) & \text{if } \alpha s_1 \leq l < l_1 \end{cases} \quad (6)$$

近似の意味は以下の通りである。最も目的地に近い急行停車駅で急行から各駅停車へ乗換えるとすれば、各駅停車で走行する距離は l, s_1 の値に応じて $0 \sim s_1$ で変

動することになる。ここでは、その平均値 $s_1/2$ を各駅停車で走行する距離の近似値として採用している。つまり、距離 l を移動する際に停車する駅数は、各駅停車駅 $s_1/(2s_0)$ 個、急行駅 $(l - s_1/2)/s_1$ 個となり、駅当たりの停車時間 t_s を掛け合わせて追加的にかかる時間を求めている。この近似によって、最大 $s_1/(2s_0)$ の誤差が生じるが、路線全体に渡った平均旅行時間を考える際には、この誤差は打消し合うので、全体の分析には大きな影響を与えないと考えられる。

b) 旅行距離が l_1 以上の場合

各駅停車折り返し距離 l_1 の先を出発地/目的地とする乗客は、必ず CBD 駅で急行列車に乗ることになる。このとき、旅行距離 $l \geq l_1$ を持つ乗客の平均旅行時間は次式のように与えられる。

$$T(l) = \frac{H_1}{2} + \frac{s_0}{4v_w} + \frac{l}{v_{\max}} + t_s \left(\frac{l_1}{s_1} + \frac{l - l_1}{s_0} \right) \quad (7)$$

第1-3項はこれまでの分析と同様である。第4項は次のように与えられる。列車は急行として l_1 走行した後、各駅停車として $l - l_1$ 走行するので、この間に存在する平均の停車駅数は $l_1/s_1 + (l - l_1)/s_0$ である。従って、これに t_s を掛け合わせればよい。なお、この乗客は乗り換え不要である（i.e., 地点 l_1 で列車が急行から各駅停車に変わる）ため、乗換ペナルティ Δ はかからない。

c) 路線平均

以降の分析において、路線全体のサービスレベルとして、路線全体の平均旅行時間 \bar{T} を用いる。これは、

$$\bar{T} = \frac{1}{L} \int_0^L T(l) dl \quad (8)$$

と定義されるが、その具体的な計算にあたっては、平均旅行時間の関数形が変わる $[0, \alpha s_1]$, $[\alpha s_1, l_1]$, $[l_1, L]$ に分けて積分する必要がある。なお、式(1), (5), (7) は旅行距離 l の一次関数であるので、結局、路線全体の平均旅行時間は、以下の形に帰着する。

$$\bar{T} = \frac{\alpha s_1}{L} T\left(\frac{\alpha s_1}{2}\right) + \frac{(l_1 - \alpha s_1)}{L} T\left(\frac{\alpha s_1 + l_1}{2}\right) + \frac{(L - l_1)}{L} T\left(\frac{l_1 + L}{2}\right) \quad (9)$$

(2) エージェンシーコスト

続いて、Daganzo & Ouyang⁸⁾ に基づき、鉄道を運営するエージェンシーのコスト（人件費、車両・施設費）について定義する。より具体的には、人件費・車両費を運行費とし、急行と各駅停車のそれぞれについて定式化する。また、施設費を求め、それぞれを単位時間当たりの値とし、足し合わせることで、単位時間当たりのエージェンシーコストを求める。

急行の運行費を求めるにあたり、図-2の上図の橙色網掛けの部分のような、急行の車頭時隔 H_1 、路線長 L

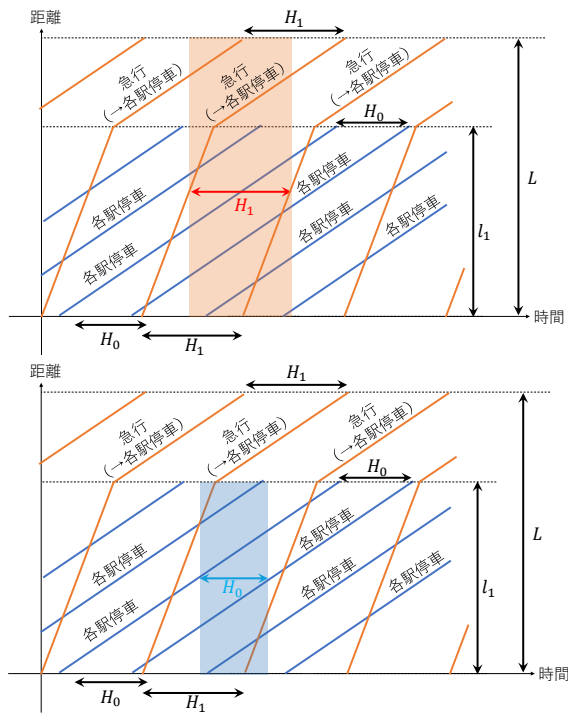


図-2 従来型運行スキームの単位ユニット

の時空間の単位ユニットについて考える。この単位ユニットには上り・下り各1本分の急行列車が存在することになる。人件費は、1編成・時間当たりの人件費を c_t [yen/h] とすると、次のように与えられる。

$$2c_t \left(\frac{L}{v_{\max}} + \left(\frac{L-l_1}{s_0} + \frac{l_1}{s_1} \right) t_s \right). \quad (10)$$

括弧内は上り下り各1編成の急行が、最高巡航速度で路線全体を走行する時間と停車に際して追加的にかかる時間を表している。車両費は、1車両・距離(台キロ)当たりの車両費を c_a [yen/(veh·km)] とすると、単位ユニット内で2編成が距離 L を走ることになるので、

$$2c_a n_1 L \quad (11)$$

と表される。ここで、 n_1 は急行1編成当たりの車両数を表す。最後に、単位時間当たりの運行費を求める。これは、上記の2つのコストを足し、ユニット時間幅 H_1 で割ればよい。つまり、

$$\$e = \frac{1}{H_1} \left(2c_t \left(\frac{L}{v_{\max}} + \left(\frac{L-l_1}{s_0} + \frac{l_1}{s_1} \right) t_s \right) + 2c_a n_1 L \right). \quad (12)$$

続いて各駅停車の運行費について考える。ここでは、単位ユニットを、図-2の下図の青色網掛け部分のような、各駅停車の車頭時隔 H_0 、各駅停車の運行距離 l_1 の部分とする。このとき、先ほどと同様に単位ユニット内での運行費を求め、そのユニット幅 H_0 で割れば、単位時間当たりの運行費は

$$\$i = \frac{1}{H_0} \left(2c_t \left(\frac{l_1}{v_{\max}} + \frac{l_1}{s_0} t_s \right) + 2c_a n_0 l_1 \right). \quad (13)$$

ただし、 n_0 は各駅停車1編成当たりの車両数である。

施設費は、駅・線路にかかるコストからなる。路線全体の駅数は L/s_0 、線路長は L であるので、それぞれ時間、駅/距離当たりの係数 c_r [yen/(station·h)]、 c_g [yen/(km·h)] をかければ、単位時間当たりの施設費は以下のように与えられる。

$$\$f = c_r \frac{L}{s_0} + c_g L \quad (14)$$

まとめると、単位時間当たりのエージェンシーの総コストは以下となる。

$$\begin{aligned} \$ &= \$e + \$i + \$f \\ &= \frac{2}{H_1} \left(c_t \left(\frac{L}{v_{\max}} + \left(\frac{L-l_1}{s_0} + \frac{l_1}{s_1} \right) t_s \right) + c_a n_1 L \right) \\ &\quad + \frac{2l_1}{H_0} \left(c_t \left(\frac{1}{v_{\max}} + \frac{t_s}{s_0} \right) + c_a n_0 \right) + c_r \frac{L}{s_0} + c_g L \end{aligned} \quad (15)$$

4. 提案運行スキームの定式化

本章では、本研究で提案する新たな鉄道運行スキームについて平均旅行時間、エージェンシーコストを定式化する。提案運行スキームでは、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(分離)する、あるいはその反対に、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。より具体的な運行の仮定は以下の通りである。

- 列車の車頭時隔を H とする。
- 急行停車駅において切り離し・連結を行う。
- 下り線で切り離された各駅停車は切り離し駅間を往復し、再び上り線の急行列車に連結される。
- 切り離し後は急行列車が先に駅を出発する。
- 1回の切り離しで切り離す車両数は一定とする。

(1) 平均旅行時間

鉄道旅行距離 l を持つ乗客の平均旅行時間を定式化する。ただし、提案スキームでは上り・下り方向で全く対称ではないため、各々を定式化しその平均値として平均旅行時間を求める。

上り方向 (inbound) の平均旅行時間は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} T_1(l) &= \frac{H}{2} + \frac{s_0}{4v_w} + \frac{l}{v_{\max}} + t_s \left(\frac{l}{s_1} - \frac{1}{2} + \frac{s_1}{2s_0} \right) \\ &\quad + T_1^r \left(\frac{l}{s_1} - \frac{1}{2} \right) + T_1^l \end{aligned} \quad (16)$$

第1項は乗車駅における平均待ち時間である。第2項-第4項は、従来型のスキームと全く同じである。提案スキームでは各駅停車から急行への乗換えが必要ない

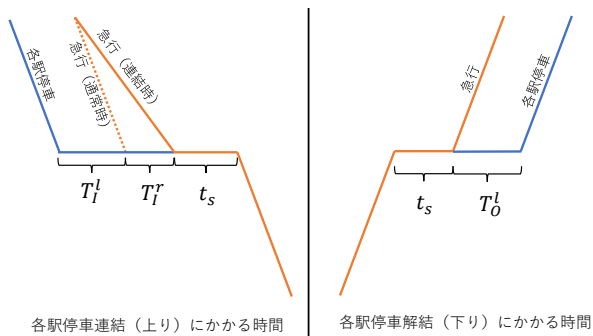


図-3 連結・解結に費やす時間

(解結・連結により達成される)ため、乗換駅における待ち時間および乗換ペナルティは発生しない。しかし、第5項、第6項で表される各駅停車が急行に連結する際にかかる追加的な時間が発生する。具体的には、第5項の T_1^r は、急行が各駅停車に安全に接近するため追加的にかかる時間と連結の安全確認時間を合わせた時間を表し(図-3のダイアグラムを参照)、急行駅数回分だけその時間がかかる。第6項の T_1^l は、車両同士の距離を保つために必要な時間である。

同様に下り方向(outbound)の平均旅行時間は次のように与えられる。

$$T_O(l) = \frac{H}{2} + \frac{s_0}{4v_w} + \frac{l}{v_{\max}} + t_s \left(\frac{l}{s_1} - \frac{1}{2} + \frac{s_1}{2s_0} \right) + T_O^l \quad (17)$$

第1項-第4項は上り方向と全く同じである。第5項は、切り離しに追加的にかかる時間である。すなわち、切り離した後急行が十分駅から離れ、各駅停車が発車できるまでの時間を $T_O^l (< T_1^l)$ とする。乗客は目的地に最も近い急行停車駅でこの切り離しを経験するため、各トリップ当たり1回追加時間がかかることになる。なお、実際に切り離しにかかる時間(安全確認等)は連結に比べて非常に短く、通常の停車時間内に行われるものとし(実際、現在技術でも1分以内の切り離しが可能である)、急行列車の所要時間は増加しないものとする。

以上、式(16)と式(17)を平均化すると、提案運行スキームによる平均旅行時間は最終的に以下となる。

$$T(l) = \frac{H}{2} + \frac{s_0}{4v_w} + \frac{l}{v_{\max}} + t_s \left(\frac{l}{s_1} - \frac{1}{2} + \frac{s_1}{2s_0} \right) + \frac{T_1^r}{2} \left(\frac{l}{s_1} - \frac{1}{2} \right) + \frac{T_1^l + T_O^l}{2} \quad (18)$$

(2) エージェンシーコスト

提案運行スキームでは、車頭時隔 H 、路線長 L の単位ユニットに、急行列車が1編成、切り離された各駅停車が L/s_1 編成存在する(図-4の緑色網掛け部)。ここで、下りの始発(CBD)駅で n_2 両編成であった急行列車は、始発駅も含め L/s_1 回の切り離しを行い終点駅に

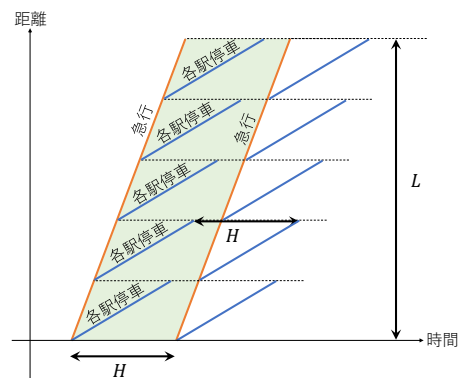


図-4 提案運行スキームの単位ユニット

到着するため、終点駅における急行列車および各急行停車駅間に存在する各駅停車の車両数が等しくなる切り離し車両数は、以下ようになる。

$$\frac{n_2}{L/s_1 + 1} \quad (19)$$

以降は、この切り離し車両数を仮定して分析を行う。

ここではまず、 $(k-1) \sim k$ 番目の急行停車駅間における人件費・車両費を考えよう。急行・各駅停車の計2編成が s_1 を移動し、停車駅数は、それぞれ、1個、 s_1/s_0 個である。また、上りで連結、下りで切り離しがそれぞれ1回行われ、各駅停車の折返し位置では平均 $H/2$ の調整時間が発生する(i.e., 各駅停車が再び急行に連結するため)。従って、上り・下りを合わせた人件費は、以下ようになる。

$$4c_t \frac{s_1}{v_{\max}} + 2c_t t_s \left(1 + \frac{s_1}{s_0} \right) + c_t \left(T_1^r + T_1^l + T_O^l + \frac{H}{2} \right) \quad (20)$$

続いて、車両費について考える。各駅停車の車両数は式(19)で与えられ、急行列車は(始発駅も含んで) k 回各駅停車を切り離しているため、その車両数は $n_2 - kn_2/(L/s_1 + 1)$ となる。従って、上り・下りを合わせた車両費は、

$$2c_a n_2 \left(1 - \frac{k-1}{L/s_1 + 1} \right) s_1 \quad (21)$$

以上のコストを $k=1, \dots, L/s_1$ に渡って足し上げ、また、単位時間当たりのコストに換算し、(従来型の運行スキームと全く同じである)施設費を合わせれば、提案運行スキームにおける単位時間当たりのエージェンシーコストは、以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \$ = \frac{1}{H} & \left\{ 4c_t \frac{L}{v_{\max}} + 2c_t \frac{L}{s_0} t_s + c_t \frac{L}{s_1} \left(2t_s + T_1^r + T_1^l + T_O^l \right) \right. \\ & \left. + c_a n_2 \left(2 - \frac{L-s_1}{L+s_1} \right) L \right\} + c_t \frac{L}{2s_1} + c_r \frac{L}{s_0} + c_g L \quad (22) \end{aligned}$$

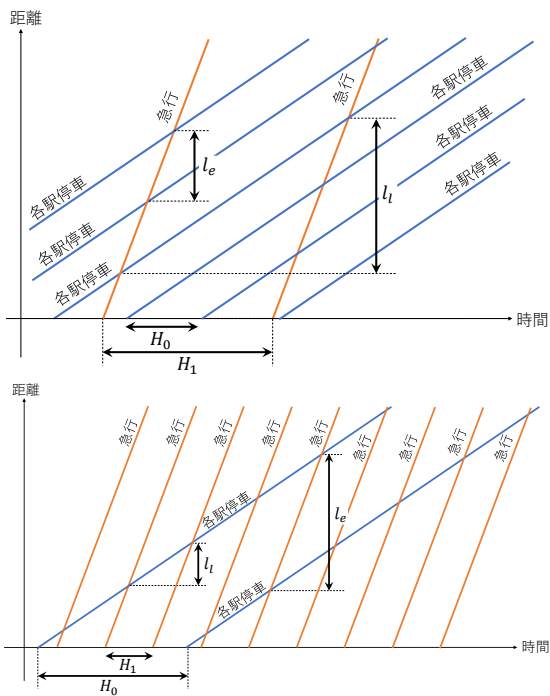


図-5 平均追い越し距離の概念図（上図：各駅停車の車頭時隔が短い場合，下図：急行の車頭時隔が短い場合）

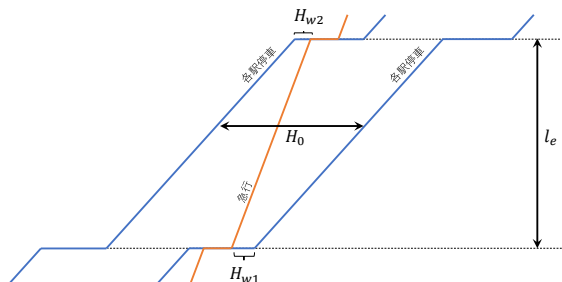


図-6 平均追い越し距離 l_e の詳細

5. 線路容量制約

ここまでの定式化では、線路容量について考えてこなかったが、現実の鉄道においては大きな物理制約である。本章では、急行・各駅停車の追越しの関係をモデル化し、急行停車駅での追越しを実現しうる最小車頭時隔として、容量制約を与える。

急行が各駅停車に追いついてから次の各駅停車に追いつくまでに列車が進む平均距離 l_e について考える（図-5）。この距離は、急行と各駅停車の速度差と急行の車頭時隔によって決定され（図-6を参照）、次式のように与えられる。

$$l_e = \{H_0 - (H_{w1} + H_{w2})\} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_0} \right)^{-1} \quad (23)$$

ここで、 v_1, v_0 は急行・各駅停車の（サービス）速度である。 H_{w1} は各駅停車が急行に追い越された後、急行

と十分な間隔を保つために必要な待ち時間であり、従来・提案スキームともに T_0^l である。一方、 H_{w2} は急行が各駅停車に追いつく際に、先行の急行との間隔を保つための時間を表している。これは、従来スキームでは、 T_1^l であるが、提案スキームでは連結時間が加わるため、 $T_1^l + T_1^r$ となる。なお、列車のサービス速度は、ある1つの急行駅間に着目すれば、

$$v_0 \approx \frac{s_1}{\frac{s_1}{v_{\max}} + t_s \frac{s_1}{s_0}}, \quad v_1 \approx \frac{s_1}{\frac{s_1}{v_{\max}} + t_s} \quad (24)$$

と近似的に与えられる。

同様に各駅停車が急行に追い越されてから次の急行に追いつかれるまでの平均距離 l_l は、

$$l_l = \{H_1 - (H_{w1} + H_{w2})\} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_0} \right)^{-1} \quad (25)$$

と与えられる。

以上、急行停車駅で追い越しを実現するためには、平均追い越し距離 l_e, l_l の双方が急行駅間距離 s_1 以上でなければならない（そうでなければ、急行駅間で追い越しの必要性が生じる）。従って、

$$\min. \{l_e, l_l\} \geq s_1 \quad (26)$$

が制約条件として与えられる。図-5や式(23)、(25)からわかるように、急行と各駅停車の車頭時隔 H_0, H_1 のどちらの方がより小さいかによって、 l_e, l_l のどちらが制約条件として支配的になるかが決まってくる。また、ここでは式(26)の右辺を急行停車駅間隔としているが、一般的には、追い越し設備のある駅間隔とすればよい。

この定式化より、追加的にかかる連結時間 T_1^r の分 H_{w2} が大きくなり、従来運行スキームよりも提案スキームの方が容量制約が厳しい（i.e., 同じ追い越し距離を実現するのにより長い車頭時隔が必要である）ことがわかる。従って、この線路容量差が十分小さくなることが、本稿の提案するスキームが実現するための最低条件である。一方、連結時間 T_1^r が車頭時隔と同程度になると、必要となる追い越し距離が l_e, l_l がほぼゼロとなり、急行停車駅間隔を設定することは不可能となる。

6. 分析

以上で定式化したモデルを用いて、従来型運行スキームと提案運行スキームそれぞれの特性を分析した上で、両者の比較を行う。より具体的には、計画変数であると考えられる車頭時隔、急行停車駅間隔等について、平均旅行時間、エージェンシーコストがどのように変化するかを解析的・数値的に見ていく。またここでは、時間に換算した乗客1人当たりの社会的コストを以下のように定義し、

$$SC \equiv \bar{T} + \frac{\$/\beta}{2\lambda L} \quad (27)$$

表-1 パラメータ設定

パラメータ	値	パラメータ	値
L [km]	60	c_t [yen/h]	3000
s_0 [km]	3	c_a [yen/(veh-km)]	80
v_w [km/h]	3	c_r [yen/(station-h)]	15200
v_{max} [km/h]	120	c_g [yen/(km-h)]	2000
t_s [sec]	80	β [yen/h]	2000
T_l^1 [sec]	60	n_0 [cars]	10
T_l^r [sec]	30	n_1 [cars]	10
T_o^r [sec]	30	n_2 [cars]	10
Δ [sec]	60		

この変化についても考察する。ここで、 β は乗客の時間価値であり、 $2\lambda L$ は単位時間当たりを上り・下りの双方向に発生する需要の合計を表している。

なお、以下で数値計算を行う際に用いるパラメータの値は表-1の通りである。コストの係数については、国土交通省公開の JR 旅客会社の基準単価・基準コスト¹⁰⁾における JR 東日本の基準単価、および、近藤らの「鉄道車両の消費エネルギー簡易計算法」¹¹⁾を参考とし、連結・解結に費やす時間については、Kakuhama and Takagi⁵⁾を参考とした。表-1に記載のないパラメータについては、特に言及していない限り（パラメータを動かしていない限り）、 $s_1 = 9$ [km], $l_1 = 45$ [km], $\alpha = 3$, $H_0 = H_1 = 600$ [s], $H = 300$ [s]として計算してある。また、需要については、 $\lambda L = 3600$ [pax/h]を「需要小」、 $\lambda L = 18000$ [pax/h]を「需要大」と呼ぶこととする。

(1) 従来型運行スキーム

a) 車頭時隔の影響

まず、各駅停車と急行の車頭時隔 H_0, H_1 の変化が、従来型運行スキームのサービス、コストにどのような影響を与えるのか考察していく。旅行時間については、式(1),(5),(7)がいずれも H_0, H_1 に比例して長くなる。一方、エージェンシーコストは式(15)から車頭時隔に反比例して小さくなる。このことから、社会的コストはこれらのトレードオフを反映した最小値を持つ曲面になることが予想される。実際、社会的コストは車頭時隔に関する凸関数となっており、一階条件を解くことによって、その最適値が以下のように求められる。

$$H_0^* = \left[\frac{2}{\lambda\beta} \left(c_t \frac{1}{v_{max}} + c_t t_s \frac{1}{s_0} + c_a n_0 \right) \right]^{1/2} \quad (28)$$

$$H_1^* = \left[\frac{2}{\lambda\beta(L - \alpha s_1)} \left\{ c_t \left(\frac{L}{v_{max}} + \left(\frac{L - l_1}{s_0} + \frac{l_1}{s_1} \right) t_s \right) + c_a n_1 L \right\} \right]^{1/2} \quad (29)$$

このように最適値が現れることは、図-7の数値計算結果からも見て取れる。需要大のときの最適車頭時隔は、

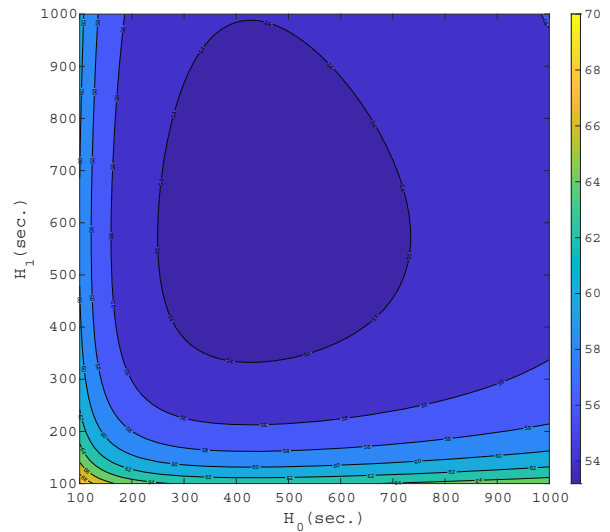
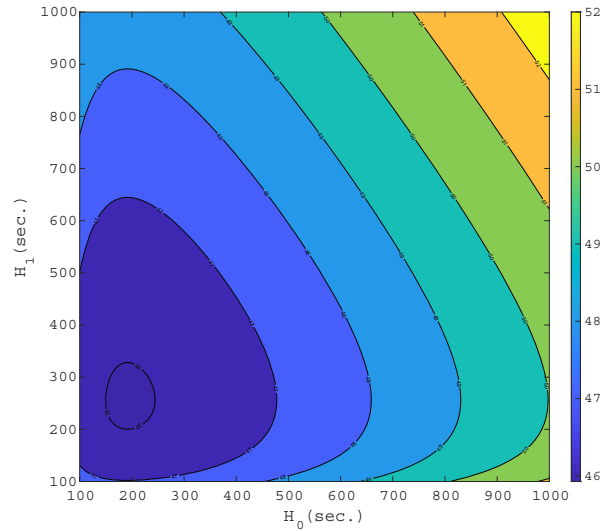


図-7 従来型運行スキームにおける車頭時隔 H_0, H_1 と社会的コストの関係（上図：需要大，下図：需要小）

$H_0^* \approx 190$ [s], $H_1^* \approx 260$ [s]（解析解は、 $H_0^* = 191$ [s], $H_1^* = 256$ [s]）であり、各駅停車のほうが短くなっている。これは、各駅停車の待ち時間が、旅行距離 $l \leq l_1$ の旅客全員が経験するものであり、急行の待ち時間よりも大きな影響を持っているためであると考えられる。

また、需要の大小による車頭時隔の最適値について考えると、式(28), (29)の形からも分かるように需要が大きくなるほど、短い車頭時隔が最適となることがわかる。しかし、この最適は線路容量制約を考慮せず算出されたものであり、需要が大きい場合には最適な頻度での運行が feasible ではなくなる可能性がある。現に今回の設定での線路容量制約は $H_0, H_1 \geq 250$ [s] であり、需要大の場合は制約条件を満たすことができない。

H_0, H_1 それぞれの変化によって社会的コストがどの程度変化しているかを見ると、双方ほぼ同じであることが分かる。しかし、需要の多寡によって社会的コストの変化の絶対値の割合は変わってきている。これは需要が大きいほど、乗客1人あたりが負担すべきエー

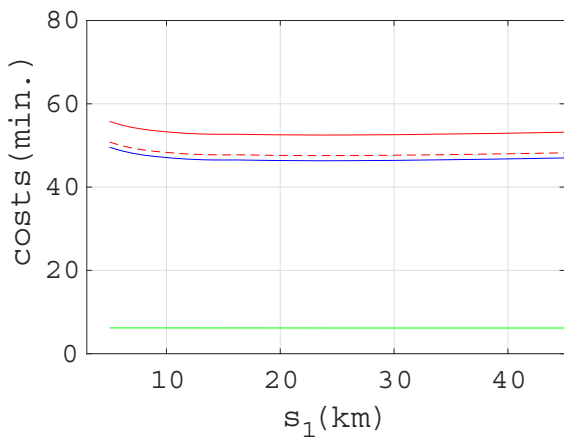


図-8 従来型運行スキームにおける急行停車駅間隔 s_1 と各コストの関係（青線：旅行時間，緑線：エージェンシーコスト，赤実線：社会的コスト（需要小），赤破線：社会的コスト（需要大））

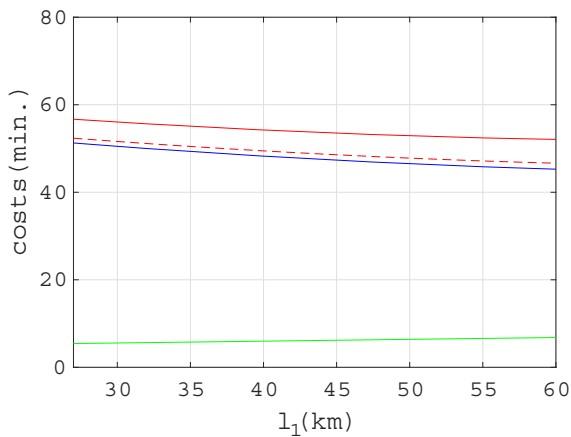


図-9 従来型運行スキームにおける各駅停車折り返し位置 l_1 と各コストの関係（青線：旅行時間，緑線：エージェンシーコスト，赤実線：社会的コスト（需要小），赤破線：社会的コスト（需要大））

ジェンシーコストが減少し，旅行時間が支配的になることに起因している．つまり，需要が大きいほど最適値以上の社会的コストの増加幅が大きくなっている．

b) 急行駅間隔の影響

急行停車駅間隔 s_1 の変化と，各コストとの関係を図-8に示す．なお， l_2 の値は， s_1 の値に応じて変えており， l_2 が各駅停車折り返し位置 l_1 の値を超える場合については考えていない．

s_1 が変わっても，エージェンシーコストについては，人件費がわずかに変わるのみであるため，ほとんど変化していないことが分かる．一方で，乗客の旅行時間は凸関数になっている．これは， s_1 に反比例する急行停車駅減少と， s_1 に比例する各駅停車旅行距離増加のトレードオフが現れるためである．社会的コストは，エージェンシーコストがほとんど変化しないことから，旅行時間とほぼ同じ挙動を示している．

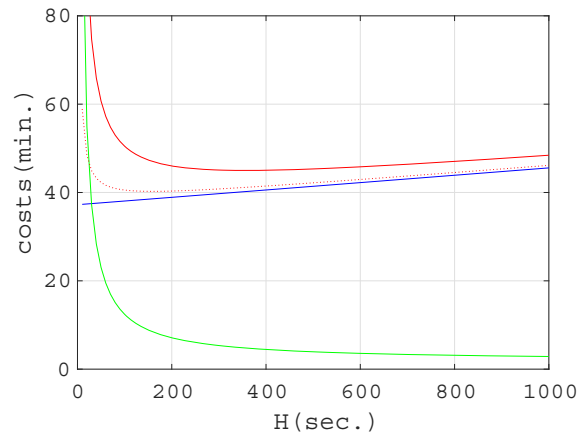


図-10 提案運行スキームにおける車頭時隔 H と各コストの関係（青線：旅行時間，緑線：エージェンシーコスト，赤実線：社会的コスト（需要小），赤破線：社会的コスト（需要大））

c) 折り返し位置の影響

本稿で取り上げた従来型の運行スキームにおいては，各駅停車の折り返し位置 l_1 も計画変数として考えられる．そこで， l_1 が各コストにどのような影響を与えるのかを調べた数値計算の結果を図-9に示す．

まず，旅行時間については l_1 の増加にともなって単調に減少している．このことから，列車の途中駅折り返しが乗客にとって望ましくなく，折り返すにしてもなるべく遠い駅までサービスを提供することを望むことが分かる．一方，式(9)からも明らかであるが，エージェンシーコストについては l_1 の増加にともなって増加する．しかし，エージェンシーコストの減少は，旅行時間の増加を打ち消すほどのものではない．従って，社会的コストも旅行時間の影響を強く受けて l_1 の増加とともに減少していく．

これらの結果は，途中駅で列車が折り返すスキームは社会的には望ましくないものの，エージェンシーコストの観点からは好ましいものであるために，現実の路線において採用されている可能性を示唆している．

(2) 提案運行スキーム

提案スキームにおける全乗客の平均旅行時間は，旅行距離 $L/2$ を持つ乗客の旅行時間に等しいので， $\bar{T} = T(L/2)$ である．以降では，この値を代表的な旅行時間と考えて分析を進めていく．

a) 車頭時隔の影響

式(18)，(22)から分かるように，車頭時隔 H の増加に伴って旅行時間は増加し，エージェンシーコストは減少する．これらのトレードオフから社会的コストは H についての凸関数となり，一階条件から最適値は，

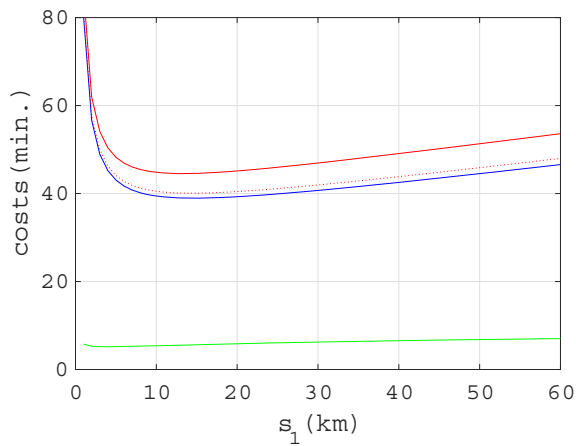


図-11 提案運行スキームにおける急行停車駅間隔 s_1 と各コストの関係 (青線: 旅行時間, 緑線: エージェンシーコスト, 赤実線: 社会的コスト (需要小), 赤破線: 社会的コスト (需要大))

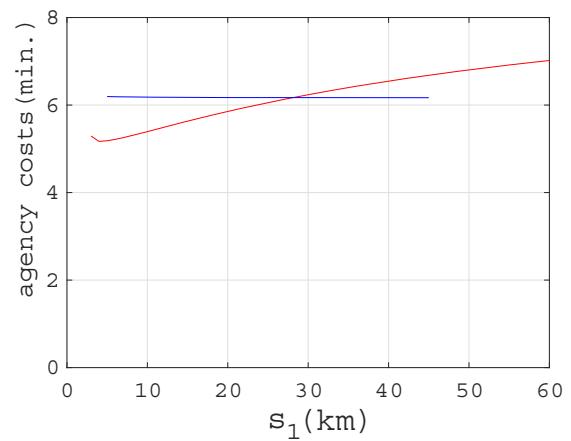


図-12 両スキームにおける急行駅間隔とエージェンシーコストの関係 (青線: 従来型, 赤線: 提案)

$$H^* = \left[\frac{1}{\lambda\beta} \left\{ 4c_t \frac{1}{v_{\max}} + 2c_t \left(\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_1} \right) t_s + c_t \frac{1}{s_1} (T_I^r + T_I^l + T_O^l) + c_a n_2 \left(2 - \frac{L - s_1}{L + s_1} \right) \right\} \right]^{1/2} \quad (30)$$

と与えられる。この値を需要小, 需要大の条件のもとで計算した値は, それぞれ, $H^* = 416, 186$ [s] である。一方, 線路容量制約は $H \geq 280$ [s] であるため, やはり需要が大きくなると最適頻度での運行が feasible でなくなる可能性が考えられる。

H による各コストの変化について数値的に計算した結果を図-10に示す。従来型スキームと同様に, エージェンシーコストは H に反比例して減少し, 旅行時間は H に比例して増加している。また, 社会的コストには, これら2つのコストのトレードオフの関係が現れており, 凸の形になっている。需要が大きくなると旅行時間が支配的となるため, より小さい H で旅行時間に漸近していくこととなり, 最適値も小さくなること分かる。

b) 急行停車駅間隔の影響

急行停車駅間隔 s_1 と各コストの関係を図-11に示す。旅行時間については, 従来型スキームと同様のトレードオフが働く。また, 乗客1人当たりのエージェンシーコストは旅行時間と比較すると小さな割合であるので, 旅行時間の変化と比べると変化が小さくなっていることも従来型スキームと同様である。ただし, エージェンシーコストの変化のみに着目した場合, 従来型スキームと質的な差が出ている (図-12)。具体的には, s_1 の増加によって急行の速度が上がり人件費が下がる効果と, 切り離し頻度が落ちることで1編成あたりの両数が増加し車両費が増加する効果のトレードオフの関係によって, 凸なグラフになっている。このことは, 連結・切り離しを頻繁に行う本提案スキームの特性を表

表-2 車頭時隔の最適値

需要 \ 車頭時隔	H_0^*	H_1^*	H^*
$\lambda L = 3600$ [pax/h]	428	573	416
$\lambda L = 18000$ [pax/h]	191	256	186

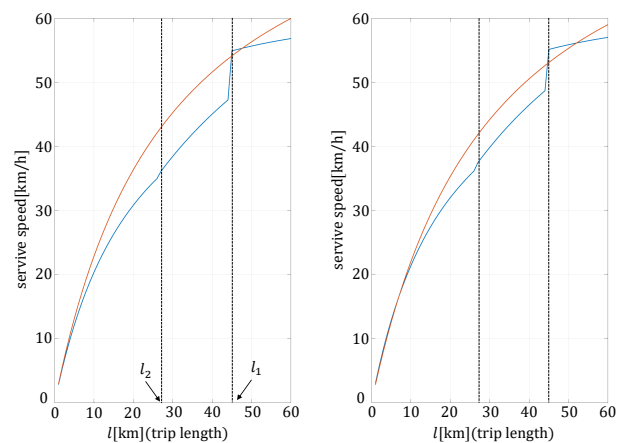


図-13 乗客の旅行距離に対する従来型スキームと提案スキームのサービス速度 (左図: $H_0 = H_1 = 600$ [s], $H = 300$ [s], 右図: 各車頭時隔が最適値, 青線: 従来型, 赤線: 提案)

しているといえる。

(3) 従来型スキームと提案スキームの比較

ここまででは, 従来型スキームと提案スキームにおける計画変数が, 本稿で定式化したコストに与える影響を個別に見てきた。その結果, 急行駅間隔 s_1 がエージェンシーコストに与える影響を除けば, 定性的には大きな違いはないことが分かった。そこで, 本節では, より詳細に両スキームの比較分析を行い, 提案スキームの特性を明らかにしていく。

まず, 最適車頭時隔について考察していく。表-2は需要レベル別の最適車頭時隔を, 従来・提案スキームのそれぞれで計算しまとめたものである。この表より, 提案

スキームの最適車頭時隔は、従来型スキームの急行・各駅停車と比べて小さくなっていることがわかる。この理由を理解するために、最適車頭時隔の解析式(28),(29),(30)の形を見ると、いずれも、括弧内がエージェンシーコストに由来する項、括弧外が需要に関係する項になっている。つまり、同じ需要条件下での最適車頭時隔の差は、エージェンシーコスト構造の違い由来すると考えることができる。以上より、提案スキームは、エージェンシーコストが小さい分、最適車頭時隔が短いと結論づけることができる。ただし、先にも述べたように、提案スキームは従来型スキームより線路容量が小さいため、特に需要が大きい場合には最適車頭時隔が実現できない可能性はある。

さらに重要な点は、提案スキーム導入によるエージェンシーコストの削減が、サービスレベルの向上と両立していることである。図-13は、列車の頻度が同一となる車頭時隔と最適車頭時隔のそれぞれにおいて従来型スキームと提案スキームの旅行距離別サービス速度を表したものである。これは、これまで平均値のみでとらえていたサービスレベルを個別の乗客ごとに考えることに相当する。ここから提案スキームは全体的に高いサービス速度を実現していることが分かる。特に従来型スキームでは各駅停車と急行間で乗り換えを必要としていた、 $l_2 < l < l_1$ の旅行距離を持つ乗客に提供されるサービス速度が向上している。また、急行列車が各駅停車になってしまう終点近くを出発地/目的地とする乗客 (i.e., $l > l_1$ の旅行距離を持つ乗客) に対しても、特にサービス速度が上がっている。これらは、乗換が不要である、また、郊外までサービスレベルを落とさないという提案スキームの特性が現れた結果であるといえる。なお、従来型スキーム特有のエージェンシーコスト削減策である折返し運行の導入・調整では、5章(1)のc)で見たように、これらは両立しない。

7. おわりに

本研究では、鉄道における保安装置・自動運転の性能向上により高速に車両同士が連結・解結が可能となることを前提に、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、新たな列車運行スキームを提案した。多起点1終点/1起点多終点需要を対象として、提案スキームおよび従来型の運行スキームの平均旅行時間およびエージェンシーコストを表現する連続体近似モデルを構築し、モデル構造の違いや数値計算による比較を行った。その結果、提案運行スキームは以下の優位性を持つことがわかった。

表-3 変数・パラメータ一覧

パラメータ	意味
s_0 [km]	各駅停車駅間隔
s_1 [km]	急行停車駅間隔
H [sec]	車頭時隔
H_0 [sec]	各駅停車の車頭時隔
H_1 [sec]	急行の車頭時隔
α [station]	乗換発生の閾値
l_2 [km]	乗換発生の閾値
l_1 [km]	各駅停車の折返し地点
λ [pax/km · h]	発生・集中乗客流率
β [yen/h]	時間価値
v_{max} [km/h]	最高巡航速度
v_w [sec]	歩行速度
t_s [sec/station]	停車時間 (加速・減速を含む)
T_0^l [sec]	切離しに追加的にかかる時間
T_1^l [sec]	連結に追加的にかかる時間
T_l^l [sec]	車両同士の間隔を保つための時間
Δ [sec]	乗換ペナルティ
c_a [yen/(veh · km)]	車両費
c_t [yen/h]	人件費
c_r [yen/(station · h)]	駅務費
c_g [yen/(km · h)]	線路費
n_0 [cars]	各駅停車の車両数
n_1 [cars]	急行の車両数
n_2 [cars]	CBD 駅における車両数

- 車両の走行台キロを小さくする分、一般的にエージェンシーコストが従来型のスキームよりも小さくなる。この削減効果は、最適車頭時隔を小さくすることに寄与する。
- 従来、乗換が必要であった乗客や郊外に至るまで、全体のサービス速度を向上させることができる。

そして、通常相反するこれらのエージェンシー・乗客双方のコスト削減が両立することが、提案スキーム導入の最も重要な特徴である。

今後の課題については、大きく需要面と運行面が考えられる。前者については、需要の空間的な異質性や多起点多終点の需要を考慮した分析、提案スキームの導入による需要変動も組み込んだ拡張等が考えられる。一方、後者については、今回捨象した様々な要素をより現実的にしていく必要があるだろう。例えば、現実の路線・設備状況 (e.g., カーブ, ポイント, 信号設備) の考慮、乗降客数に応じた停車時間の伸長の考慮、乗車車両と目的地が連動することによる乗客行動の変化等が挙げられる。これらをすべて連続体近似モデルで扱うことは難しいと考えられるため、具体的な路線を想定したケーススタディも今後の重要な課題である。

謝辞: 本稿の修正にあたっては匿名の査読者からの有益なコメントを参考とした。ここに記し、感謝の意を表します。

付録 I 変数・パラメーター一覧

本稿の変数・パラメーター一覧を表-3に示す。

参考文献

- 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), *JR East Technical Review*, Vol.5, pp.31–38, 2003.
- 2) 吉枝春樹, 小林渉, 岩倉成志: 移動閉そく信号制御による都市鉄道の超高頻度運転の可能性—田園都市線と半蔵門線のケーススタディー—, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.2, pp.43–62, 2020.
- 3) 東京大学交通ラボ: それは足からはじまった—モビリティの科学, 技報堂出版, 2000.
- 4) 森谷修, 曾根悟: ソフト連結, 計測と制御, Vol.32, No.7, pp.600–603, 1993.
- 5) Kakuham, F. and Takagi, R.: Ultra-high frequency train operation using the soft coupling technique Headway evaluations, *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol.181, pp.133–141, 2018.
- 6) Newell, G. F.: Scheduling, location, transportation, and continuum mechanics: Some simple approximations to optimization problems, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol.25, No.3, pp.346–360, 1973.
- 7) Ansari, S., Başdere, M., Li, X., Ouyang, Y. and Smilowitz, K.: Advancements in continuous approximation models for logistics and transportation systems: 1996–2016, *Transportation Research Part B*, Vol.107, pp.229–252, 2018.
- 8) Daganzo, C. F. and Ouyang, Y.: *Public Transportation Systems: Principle of System Design, Operations Planning and Real-Time Control*, World Scientific, 2019.
- 9) Freyss, M., Giesen, R. and Muñoz, J. C.: Continuous approximation for skip-stop operation in rail transit, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol.80, pp.186–210, 2013.
- 10) 国土交通省: JR 旅客会社, 大手民鉄及び地下鉄事業者の基準単価・基準コスト等の公表について, https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk6_000029.html, 2020 (2021年6月18日閲覧)
- 11) 近藤稔, 小川知行, 村上浩一: 鉄道車両の消費エネルギー簡易計算法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.8, pp.41–46, 2011.

(Received June 18, 2021)

(Accepted December 28, 2021)

A NOVEL OPERATION SCHEME FOR HIGH-FREQUENT RAILWAY WITH A FAST TRAIN COUPLING TECHNOLOGY

Tomoki KISHIKAWA and Kentaro WADA

This paper proposes a novel train operation scheme for high-frequency railway systems with the fast train coupling technology that makes a possible to change the number of vehicles for each train flexibly. Specifically, the proposed scheme generates a new local train from an express train at every stop station in the outbound direction, and conversely, in the inbound direction, couples these local trains with an express train at those stations. We construct a simple continuum approximation model to describe the proposed scheme, and compare it with a conventional scheme, and clarify the features and advantages of the proposed scheme.