

超高頻度運行鉄道路線向け車両性能の最適化に関する基礎検討

○ [電] 渡辺 賢央 (工学院大学) [電] 高木 亮 (工学院大学)

Preliminary Results of the Optimisation of the Accelerating Performance of the Railway Vehicles for Ultra-High Frequency Operation

○ Masao Watanabe and Ryo Takagi (Kogakuin University)

The ultra-high frequency operation of trains, as has been proposed by the authors, would almost inevitably require increase in buffer times so that the operation can be kept robust and resilient. A promising method to realise this is to optimise the accelerating performance of the vehicles, which in many cases is expected to result in its improvement. However, while there are many attempts of optimising the operation of a train with vehicle accelerating performance as one of the given conditions, few literatures have been found on the optimisation of the railway vehicles' accelerating performance. This paper is therefore concerned with the optimisation of such performance, where preliminary calculation results are shown and discussed.

キーワード : 鉄道, 超高頻度運行, 車両性能, 最適化, 頑健性

Key Words : Railway, Ultra-High Frequency Timetables, Performance of Railway Vehicles, Optimization, Resilience

1. はじめに

都市鉄道において慢性的にみられる混雑を解消し、旅客不効用を低減させるため、都市鉄道における輸送力の抜本的解決が必要とされている。解決方法として、通過列車主体ダイヤの導入が効果的であることは既に知られている。筆者らは通過列車主体の高頻度運行列車ダイヤが、旅客不効用低減だけでなく、乗務員や車両の削減や省エネにも寄与することを示した¹⁾。

しかし、このような超高頻度運行下においては、列車ダイヤの頑健性が低下し、日常的に頻発する小遅延の影響が許容できなくなることが懸念される。筆者らは加減速度性能を高い車両に変更することで頑健性を向上させる方法を検討し、その有効性をある程度示すことができた²⁾が、同時にこの方法は饋電システムに対する負荷が大きいことが明らかになった。また、加減速度性能の向上は車両数あたりの所要コストの無視できない増加を招くうえ、路線条件などによっては車両性能の向上が列車の小遅延に対し常に十分な効果が得られるわけではないことも、自明であろう。このため、超高頻度運行向けの車両性能の最適化が望まれるといえる。

しかし、過去に、車両性能を所与として列車ダイヤや運転曲線の最適化を行った研究は多く見られる³⁾⁴⁾が、実現したい列車ダイヤを元に車両性能の最適化を試みた例はあまり多くない。

そこで、本論文では超高頻度運行向けの鉄道車両の加速

性能の最適化について基礎的な議論を行い、簡易なモデルを用い数値検証を行ったので報告する。

2. 超高頻度運行

2.1 超高頻度運行とは

本論文において、超高頻度列車運行とは複線路線において片方向1時間当たり50本~60本の列車が運行するような運行のことを言う。現状の都市鉄道においては、様々なシステムの制約があることや、全列車が各駅に停車するダイヤパターンである平行ダイヤと称されたダイヤパターンを適用していることが多く、ラッシュ時間帯における最大の運行本数は片方向1時間あたり30本程度にとどまっている。

2.2 超高頻度運行下における列車ダイヤの頑健性

列車ダイヤの頑健性とは、列車ダイヤにおいて日常頻発するような小遅延や遅延伝搬の起こりにくさのこととされており、英語では **resilience** 等と呼ばれている。一般的に列車の運行頻度が高くなるほど列車ダイヤの頑健性が低くなることはよく知られている。これは、列車の頻度が高くなるに従い、列車のわずかな遅れがより多くの列車に影響を与えてしまうからである。列車ダイヤの頑健性を高める方法として、列車ダイヤ上に適切に余裕時分を配分する方法が広く一般に用いられているが、当然ながら列車の運行速度が低下し、旅客不効用が増加してしまう。また、超高頻度運行下では、列車を高頻度かつ高密度で運行させる必

要があるが、駅間走行時分や駅停車時分を延伸することによる余裕時分の増加は列車運行頻度の低下につながる可能性があり、好ましくない。そこで、これら時分の延伸による余裕時分の増加手法ではなく、車両の加減速性能向上により頑健性を向上させる方法が考えられる。

3. 超高頻度運行鉄道路線向け車両性能の最適化

3.1 車両性能の最適化に用いる評価指標

(1) トレインアワー

トレインアワーとは、列車の運転している総時間のことであり、所定の停車・折り返し・退避時間等を含めた時間のことである。トレインアワーは列車ダイヤの実現に必要な編成数や乗務員の人件費などを評価するのに用いられる指標である。今回、列車ダイヤ上に存在する全編成についてトレインアワーを合計した総トレインアワーを列車ダイヤの周期で割った正規化トレインアワーを評価指標の一つとして用いる。

$$T_n = \frac{T}{N} \quad (1)$$

T_n : 正規化トレインアワー [本]

T : トレインアワー [本・h], N : ダイヤ周期 [h]

(2) 車両コスト

車両のコストは駆動に関わる装置の価格、車体の価格を仮定し、それぞれ以下のような関数を設定した。モータの価格は出力に応じて1 kWあたり10,000円、インバータ制御装置価格は1インバータあたり4台のモータを制御する(1C4M)と仮定し、1台あたり10,000,000円、歯車装置が1個あたり1,500,000円、T車車体が1両あたり70,000,000円、M車車体が1両あたり75,000,000円、Tc車車体が1両あたり80,000,000円などと仮定した。

$$C_{MM} = P_{MM} \times 10,000 \quad (2)$$

$$C_{INV} = \frac{M}{4} \times 10,000,000 \quad (3)$$

$$C_{GR} = M \times 1,500,000 \quad (4)$$

C_{MM} : モータ価格 [円], P_{MM} : 全電動機出力 [kW/編成]

C_{INV} : インバータ価格 [円], M : モータ台数 [台]

C_{GR} : 歯車装置価格 [円]

$$C_T = T_{car} \times 70,000,000 \quad (5)$$

$$C_M = M_{car} \times 75,000,000 \quad (6)$$

$$C_{TC} = T_{c_{car}} \times 80,000,000 \quad (7)$$

C_T : T車車体価格 [円], T_{car} : T車両数 [両]

C_M : M車車体価格 [円], M_{car} : M車両数 [両]

C_{TC} : Tc車車体価格 [円], $T_{c_{car}}$: Tc車両数 [両]

とすると、編成全体のコストを以下のような式で表せる。

$$C_F = C_{MM} + C_{INV} + C_{GR} + C_T + C_M + C_{TC} \quad (8)$$

(3) 目的関数

今回、与えられた列車ダイヤの正規化トレインアワーおよび車両コストを乗算することで、与えられた列車ダイヤを実現するために必要な車両のコストを目的関数として用いた。式を以下に示す。

$$T_n \times C_F \quad (9)$$

3.2 モデル路線を用いた数値検証

仮想的な路線および列車ダイヤを設定し、数値検証を行い評価関数の有効性検証を行った。各駅間1.5 km、全長6 kmの全6駅からなる簡易的な条件のモデル路線において、現状のラッシュ時間帯の列車ダイヤを想定し、2分間隔の平行ダイヤ、途中駅停車時分30秒、折り返し時分90秒の周期ダイヤとし、表1に示すような複数の車両性能を仮定し、作成した評価関数を用いて列車ダイヤを実現するために必要な車両性能を最適化できるか検証を行った。なお、車両性能条件として、定トルク領域終端速度については、各MT比における粘着限界を超えないような値とした。また、編成質量313 t(6M4T)、316 t(7M3T)、荷重は250%とした。

表1 車両性能条件

起動 加速度 [km/h/s]	MT比	定トルク領域 終端速度 [km/h]	全電動機出力 [kW/編成]
3.0	6M4T	10~30	1385~4155
3.0	7M3T	10~100	1401~14010
3.5	6M4T	5~10	805~1882
3.5	7M3T	5~100	814~16279

表2 各定トルク領域終端速度における駅間走行時分と正規化トレインアワー

定トルク領域終端速度 [km/h]		20	40	60	80	100
起動加速度 3.0 [km/h/s]	駅間 走行時分 [s]	98.43	87.96	85.55	85.02	84.96
	正規化 カーアワー [本]	38.25	35.46	34.81	34.67	34.66
起動加速度 3.5 [km/h/s]	駅間 走行時分 [s]	94.56	85.15	83.08	82.62	82.57
	正規化 カーアワー [本]	37.21	34.71	34.16	34.03	34.02

表2に設定した車両性能条件毎の駅間走行時分と正規化カーアワーを示す。

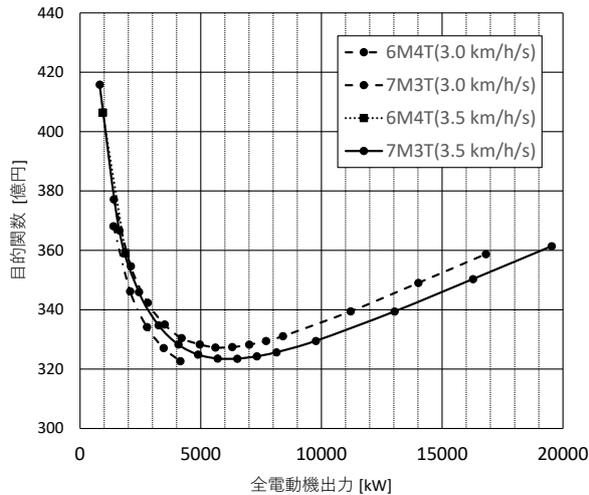


図1 目的関数と全電動機出力の関係

図1に、目的関数と全電動機出力の関係を示す。列車のパワーを大きくすることで、実現したい列車ダイヤに必要な車両コストがどう変化するかを示した図となる。編成全体の全電動機出力を小さい値から少しずつ大きくしていくと、加減速性能向上により駅間走行時分が短縮されてカーアワーが小さくなることから、目的関数の値はまず減少する。しかし、全電動機出力の向上による駅間走行時分の短縮効果は最高速度・駅間距離に依存するものの、出力が大きくなるにつれて小さくなっていくため、車両の性能が高まるにつれて車両のコストの増大により目的関数の値が増える傾向に変化する。こうしたことから、目的関数を最小とする出力値が存在することになる。

今回のモデルにおいては6M4T(起動加速度3.0 km/h/s)の編成で粘着限界を超えない範囲で最大となる定トルク領域終端速度35km/hでの値が最小となった。車両の性能を最大限に生かした状態であるため、車両性能側での余裕はほとんど無い状態である。2番目に目的関数が小さくなる点は、7M3T(起動加速度3.5 km/h/s)の編成で定トルク領域終端速度40km/hであった。

4. まとめ

今回、従来列車ダイヤ策定時に所与とされていた車両性能について、実現したい列車ダイヤから最適化を行う方法について、簡易なモデルを用いて基礎検討を行った。車両コストに関する目的関数を作成し、車両性能の最適化を行えることを示した。

今回は、基礎検討として比較的短い駅間を走行するようなモデルで検証を行ったが、長い駅間を走行する通過列車主体ダイヤを適用した場合での検討や車両性能の向上から生まれるダイヤ上の余裕を考慮した定式化は行えていな

い。また、単純に車両性能と所要時間、トレインアワーの観点から最適化を行ったに過ぎず、超高頻度運行における頑健性それ自体の評価はなされていない。このため、今後さらなる検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 渡辺 賢央, 高木 亮:「高頻度運転における通過列車主体ダイヤの饋電特性への影響」, 電学論 D, 135, 10, pp.1009-1016 (2015)
- 2) 渡辺 賢央, 高木 亮:「超高頻度運行路線における遅延時の高性能車両の運用と主回路電力制御による変電所ピーク抑制手法の検討」, 電気学会産業応用部門大会, No.5-81 (2019)
- 3) 高 英聖, 古関 隆章, 宮武 昌史, 「動的計画法を用いた列車運転曲線最適化問題の求解法」, 電学論 D, 125, 12, pp.1084-1092 (2005)
- 4) 渡邊 翔一郎, 古関 隆章, 野田 慶親, 宮武 昌史 「リニア駆動鉄道の最適省エネルギー運転曲線」, 電学論 D, 137, 1, pp.44-52 (2017)