

移動閉塞適用路線での高頻度列車ダイヤの頑健性に 同期制御と列車大出力化が及ぼす影響

渡辺 賢央* 高木 亮 (工学院大学)

Effects of synchronous control and higher train power on the robustness of high frequency train schedules on lines with moving blockage signalling systems.

Masao Watanabe*, Ryo Takagi, (Kogakuin University)

It is expected that the increasing introduction of moving block signalling systems will also help to further increase the frequency of trains. In addition to this, the authors have proposed synchronisation control to maximise the effect of the moving block signalling system, and the temporary increase of train power to increase the recovery margin. However, there is insufficient knowledge on the impact of these methods on the robustness of train timetables. This paper quantitatively assesses the contribution of these proposals by the authors to the robustness of train schedules on routes where mobile blockage is applied.

キーワード：高頻度運転，列車ダイヤ，頑健性，移動閉塞，同期制御，車両性能

(High frequency train operation, train timetable, robustness, moving brock signalling systems, synchronization control, railway vehicle performance)

1. はじめに

移動閉塞システムは，導入が進むにつれ列車の一層の高頻度化にも役立つと期待されている。これに加え筆者らは，移動閉塞の効果を最大化する同期制御^[1]や，回復余力を高めるための車両の一時的な大出力化^[2]などを提案してきた。しかし，こうした手法による列車ダイヤの頑健性の変化については十分な知見がない。本稿では，移動閉塞を適用した路線における筆者らによるこれらの提案が列車ダイヤの頑健性にどのように寄与するかを定量的に評価する。

2. 移動閉塞と同期制御

(2・1) 移動閉塞システム

従来，線路を複数の閉塞区間に区切り，1閉塞に対し1列車しか進入させないことにより複数列車の衝突を防止する固定閉塞システムと呼ばれる信号システムが用いられてきた。これに対し，移動閉塞システムでは，線路上に固定された閉塞区間という概念では存在せず，後続列車が進行できる距離が先行列車の動きに合わせ，連続的に変化するような信号システムである。例えば，同一線路上を同一方向に向かって走行している先行列車 A と，その直後を走行する後続列車 B がいるとしたとき，列車 A と列車 B の間隔は次式(1)で与えられる最小値 d_{min} [m] を下回らないように制御する。

$$d_{min} = d_M + d_{BB}(x_{BH}(t), v_B(t)) \leq x_{AT}(t) - x_{BH}(t) \quad (1)$$

ここで， d_M [m] は列車の余裕距離， d_{BB} [m] は列車 B のブレーキ距離， x_{AT} [m] は列車 A の最後尾位置， x_{BH} [m] は列車 B の先頭位置である。 d_{BB} は x_{BH} および列車 B の速度 v_B [m/s] の関数であり， x_{AT} ， x_{BH} および v_B はいずれも時間 t [s] の関数である。

(2・2) 同期制御

同期制御とは，移動閉塞システムにおいて，2.1節で述べた先行列車 A の最後尾位置 x_{AT} [m] と後続列車 B の先頭位置 x_{BH} [m] の間隔を(1)式で与えられる最小距離 d_{min} [m] で維持する，すなわち， $x_{AT}(t) - x_{BH}(t) = d_{min}$ を維持するように後続列車 B を制御する制御方法のことをいう。

同期制御中の後続列車 B の減速度は $v_B \neq 0$ の場合に(2)式のようになる：

$$\beta_B = \beta_s \frac{v_B(t) - v_A(t)}{v_B(t)} \quad (2)$$

ここで， β_B [m/s²] は後続列車 B の減速度， $v_A(t)$ [m/s] は時刻 t における先行列車 A の速度， $v_B(t)$ [m/s] は同じく後続列車 B の速度， β_s [m/s²] は当該路線における最高速度から列車が停止するまでの減速度（なお，速度によらず一定とする）である。

上記の特殊な場合として，停止中の複数の列車が同時起動する場合，前から i 番目の列車を列車 i とし，その加速度 α_i [m/s²] を(3)式のように定義したとき，列車 i の後続の列

車 $i+1$ の加速度 α_{i+1} [m/s^2] は(4)式で表される。

$$\alpha_i \equiv k_i \beta_s \cdot \cdot \cdot (3)$$

$$\alpha_{i+1} = \frac{-\beta_s + \sqrt{\beta_s^2 + 4\alpha_i \beta_s}}{2} = \beta_s \frac{-1 + \sqrt{1 + 4k_i}}{2} \cdot \cdot \cdot (4)$$

今回、この式を用いて各列車の加速度を計算し、その加速度と経過時間の積から各列車の速度を算出した。

3. 高頻度列車ダイヤの特徴と頑健性維持手法

高頻度列車ダイヤの特徴として、列車密度が高く、列車ダイヤ上の余裕時分が僅少であること、それに伴い、一度列車の遅れが発生すると多数の後続列車に対し遅延が波及してしまうという特徴を有する。これらの理由から、一般に都市鉄道の輸送サービス高度化に資する列車運行の高頻度化は、列車運行の頑健性・強靱性の低下を招くことが指摘されている。筆者らは、その解決策として車両性能の一時的な大幅向上による余裕の積み増しによって列車ダイヤの頑健性を維持する手法について提案している。

4. シミュレーションおよび考察

シミュレーション条件を以下に示す。

路線条件は路線長 22.3 km、駅間距離は 1.2~1.9 km の間で均一ではないものとし、駅 1~駅 15 の全 15 駅を有する複線路線で、最高運転速度は 100 km/h などとした。

列車ダイヤは全列車が各駅に停車する平行ダイヤを用いた。各駅間の走行時分は最小運転時分+余裕時分(各駅間の最小運転時分の 2%)として時間を設定した。また、移動閉塞システムにおける余裕距離は 20 m、加減速度はともに 3 km/h/s、最小運転時隔は 95 s である。

今回、シミュレーション時間のうちある 30 分間でランダムに全列車に対して 10~90 秒の遅延が発生するように設定を行った。信号システムは移動閉塞システムとし、同期制御も行うこととした。また、列車の駅出発時点の遅延時間に応じて列車の出力を最大で 2 倍まで変化させることのできる車両性能を持つ車両を用いた場合、車両性能を変化させない場合と比較して遅延の収束変化、および、列車の運転時隔についても、最小の 95 s~120 s の間で変化させ、頑健性への影響について検証を行った。

図 1 に各シチュエーションにおける全列車の遅延時間の推移を示す。今回、遅延の発生状況がランダムに決定されていることから、全体の遅延時分のピーク値に差異があるが、遅延時に列車出力を増大させているパターンでは、させないパターンに比べ遅延の収束までにかかる時間が減少し、頑健性が向上に寄与していることがわかる。ただし、最小運転時隔における列車のパワー増大効果は同期制御により加速度が抑制されることから。運転間隔に余裕のあるパターンと比較するとその差はわずかであった。

4. まとめ

今回、移動閉塞システムをと同期制御を適用した路線において、同期制御による列車間隔の短縮ならびに列車遅延

時における車両の一時的な大出力化効果が列車ダイヤに及ぼす影響について評価を行った。同期制御下においては、同期制御の効果が大きく、列車大出力化の効果はが少なくなるが、運転時隔に余裕があるところでは、大きな効果が得られる。今後の課題として、固定閉塞下での運転操縦との差異についても検討を行うことがあげられる。

文 献

- [1] Takagi, R., "Synchronisation control of trains on the railway track controlled by the moving block signalling system", *IET Electr. Syst. Transp.*, 2, 3, pp. 130-138 (2012)
- [2] 渡辺賢央ほか, 「超高頻度運行の頑健性改善のための列車大出力化の饋電系統への影響の簡易評価移動閉塞における列車群再起動が電力供給に与える影響の検討」, 令 4 電気学会全大 (2022)