

運転時隔と信号機建植条件を考慮した 閉そく割り提案手法

熊澤 一将* 北野 隆康** 坂口 隆* 田中 峻一*

Signal Arrangement Proposal Method Considering Train Headway and Signal Arrangement Condition

Kazumasa KUMAZAWA Takayasu KITANO Takashi SAKAGUCHI Shunichi TANAKA

In order to construct new tracks or to change track arrangements in stations, it is necessary to determine signal positions (signal arrangement) taking train operation and construction costs into consideration. To obtain the signal arrangement that satisfies the desired train operation, it is essential to consider train headway. The signal arrangement is determined based on the experience of persons in charge who have knowledge of signalling system and train operation, and requires a lot of time. In this paper, we propose a signal arrangement proposal method that satisfies required train headway based on the concept of train headway calculation method.

キーワード：閉そく割り，運転曲線，運転時隔，自動閉そく式，信号現示，新路線検討

1. はじめに

自動閉そく区間では，閉そく端に設けられた信号機の現示によって列車が運転されるため，信号機配置と信号現示の遷移との関係を表す「閉そく割り」の設定によって，列車の運転間隔（運転時隔）が変化する。このため，新路線建設や新駅設置を含む線路改良施策を検討する際には，目標とする運転時隔を満たす閉そく割りの検討が不可欠となる。閉そく割り検討では，信号機配置案を基に信号現示の遷移を表す信号現示システムを作成し，それを基に運転時隔を求めて評価する，作業を運転時隔の目標値を満たすまで繰り返す。さらに，信号現示システムを作成では，すべての信号現示の遷移に対して減速距離を計算し，その結果を基に信号機配置案の調整を繰り返す必要がある¹⁾。信号保安と列車運行の双方の知識を必要とする閉そく割り検討は，運転設備担当者の経験に基づいて実施されており，上記のとおり多くの繰返し作業を含むことから多大な労力と時間を要するため，システムによる支援が求められていた。

そこで，本研究では閉そく割り検討を支援するシステムの実現を目的とする。支援システムには，作成した閉そく割り案に対して信号現示システムと運転時隔の観点から評価可能とすること，目標運転時隔を満たす閉そく割り案を自動提案することが求められる。まず，閉そく割り案の評価では，閉そく割り案を入力として，信号現示システムの評価としてすべての信号現示の遷移に対する減速距離が閉そく長以内であること，運転時隔の評価としてすべての信号機における運転時隔が目標運転時隔を満たす

ことを評価可能とする必要がある。そして，閉そく割り案の提案では，線路条件（こう配や速度制限，既存の信号機配置など）や運行条件（対象区間を走行する列車の運転曲線など）を入力とし，信号機配置と信号現示の遷移を調整して閉そく割りの評価を繰返し，目標とする運転時隔を満たす閉そく割り案を作成する必要がある。本研究では，閉そく割り検討において多くの時間を要する閉そく割り案の提案に焦点をあて，運転時隔の算出方法を基にして目標運転時隔を満たす閉そく割り提案手法を構築する。そして，既開発の閉そく割り評価システム²⁾に提案手法を実装し，実在の線区をモデルとした路線における閉そく割り検討に適用し，既存の閉そく割り手法と比較し，提案手法の有効性を確認した結果を報告する。

2. 閉そく割り検討の概要

2.1 閉そく割り検討の手順調

一般的に閉そく割り検討の手順は，①各信号機位置の仮決定後に信号機間の信号現示の遷移を示した信号現示システム（図1）を作成，②信号現示システムと運転曲線などを基に運転時隔を算出，③閉そく割りの評価から構成される。閉そく割り検討は上記①から③の手順を繰返し，検討対象区間に設定された目標運転時隔を満たす閉そく割りを決定する。また，閉そく割りの決定においては，

信号現示系統	G YG Y YY R	G YG Y YY R	G YG Y YY R	G YG Y YY R	G YG Y YY R
	D3		D1		場内1R
信号機位置[m]	3k210m	565	4k356m	400	4k826m
確認距離[m]		571	575	450	
閉そく長[m]					

図1 信号現示系統の例

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

** 信号・情報技術研究部 列車制御研究室

目標運転時隔だけでなく、必要となる信号機数も考慮する。工事費などの観点から信号機数は少ない方が望ましい。以下に①および②の手順の一例を示す。

2.1.1 信号現示系統の作成

信号現示系統は、図2に示す信号現示系に基づき変化する。信号現示系統は、基本的にG(進行信号)からY(注意信号)、そしてR(停止信号)への遷移で構成されるが、減速距離の不足などによって、YG(減速信号)やYY(警戒信号)が追加される。また、GやY、Rといった信号現示は、指示速度が設定されている(例えば、Yではあれば45km/h等)。信号現示系統の作成では、図1に示すとおり、閉そく終端となる信号機の信号現示から、閉そく始端となる信号機の信号現示への遷移を決定していく¹⁾。信号現示の遷移は、各信号現示間の減速距離 S が閉そく長 L 以下となることで設定可能となる。例えば、下り第1閉そく信号機D1と場内信号機1R間の閉そく長が450mであり、YからRの減速距離が250mであった場合、場内信号機1RのRから下り第1閉そく信号機D1のYへの遷移を設定できる。減速距離 S の算出式の一例を式(1)に示す³⁾。 V_0 と V_1 は減速初速度と終速度、 β は減速度、 θ はこう配量、 K は慣性係数であり、必要に応じて空走距離を考慮する。信号現示の遷移に対応する減速距離が閉そく長を超える場合はその信号現示の遷移を設定できないため、信号機位置や信号現示の遷移を修正する必要がある。

$$S = \frac{V_0^2 - V_1^2}{7.2 \times \left(\beta \pm \frac{\theta}{K} \right)} \quad (1)$$

この作業を各信号機間に対して実施し、信号現示系統を作成する。

2.1.2 運転時隔の計算方法

運転時隔は列車の運転曲線と信号現示系統から、図3に示すとおり、信号機ごとに算出する⁴⁾。運転時隔算出対象となる信号機Aを先行列車が通過してから、信号機Aに進行現示を現示するために必要な位置を通過完了までの時間を T_1 とする。この位置は信号機AがGとなる信号現示系をたどることによって求められ、この場合は信号機Cとなる。また、続行列車が下位現示(図3ではY)を見てブレーキ扱いしない最小距離分だけ信号機Aから離れた点を接近可能点と呼び、この点から信号機Aを通過するまでの時間を T_2 とする。これら T_1 と T_2 の和が信号機Aにおける運転時隔となる。場合により、これ

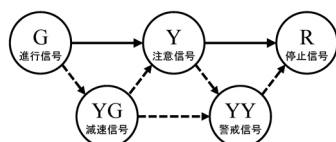


図2 信号現示系の遷移

には運転士によるブレーキ手配時分や信号条件により生じる時素、連動条件による時素などが加わることもある。

閉そく割り検討では作成した信号現示系統を基に算出した各信号機における運転時隔が目標運転時隔以下になったとき、1つの閉そく割り案が得られたことになる。

2.2 閉そく割りの評価

閉そく割り検討では、2.1節で示した手順を行う上で、閉そく割りの評価が必要となる。閉そく割りの評価では作成した閉そく割り案に対して、信号現示系統の成立と運転時隔の充足を確認しなくてはならない。このために、以下の機能を有する評価システムが必要となる。

(1) 信号現示系統の評価機能

各信号現示の遷移に対する減速距離が閉そく長以下であることを確認する。この際、閉そく割り検討区間を走行する複数の車種に応じた運転曲線を作成し、各信号現示の遷移に対する減速距離の最大値を算出する必要がある。

(2) 運転時隔の評価機能

信号機ごとに運転時隔を算出し、それぞれの値が目標と運転時隔を満たすことを確認する。

上記機能を有するシステムは一部の鉄道事業者で活用されており⁵⁾、著者らも複数車種における減速距離の違いを考慮した閉そく割り評価システム²⁾を開発している。

2.3 閉そく割りにおける留意点

信号機本数を少ない閉そく割り案を作成するためには、信号現示系を $G \rightarrow Y \rightarrow R$ としてYYやYGを設定しない方が望ましい。しかし、地上設備の関係上、減速距離に関わらずYYを設定しなければならない場合がある⁶⁾。具体的には以下の箇所に信号機を設定した場合、その外方の信号機にYYを設定する必要がある。閉そく割り検討では、可能な限り、これらの箇所を避けて信号機位置を決定する。

- (1) 対象信号機から分岐器の距離が100m未満の箇所
- (2) 対象信号機から列車の停止区域(プラットフォーム

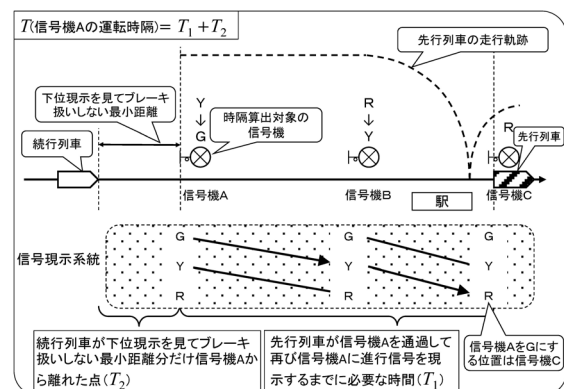


図3 運転時隔の算出

等)までの距離が100m未満の箇所

3. 閉そく割り提案手法の構築に向けた検討

閉そく割り検討は、信号機配置案の作成から開始する。既存の信号機配置が存在する場合は、設定されている信号現示系統を基本に検討を進めることが多い。しかし、新路線建設等で既存の信号機配置が存在しない場合は、各信号機の信号現示が進行信号と注意信号、停止信号の3つで構成されるように信号機配置案を検討し、2.1.1項で示す信号現示系統を作成しつつ、信号機位置を調整していく。この場合、信号機配置の自由度が高く閉そく割り案も複数作成可能となるため、目標運転時隔を満たす閉そく割り作成まで多くの時間を要する。そこで、本研究では既存の信号機配置がない場合に焦点を当てる。

3.1 閉そく割り提案における課題

2.2節で示した閉そく割りの評価のみでは閉そく割り案を作成する作業を効率化できるものではないため、目標とする運転時隔を満たす閉そく割りを提案する手法が開発されている。閉そく割り手法には、距離を基準とした閉そく割り手法と、列車の走行時分を基準とした閉そく割り手法が存在する。先行研究では距離を基準とした閉そく割が多い。例えば文献7は駅間の閉そく割りを対象とした手法ではないが、駅構内の閉そく区間を距離で細分化することで目標とする運転時隔を満たす閉そく割りを算出する手法が提案されている。駅間の閉そく割りを対象とした手法としては、列車の進む方向に向かって信号現示系統に応じた減速可能範囲に信号機位置を建植する手法⁸⁾や駅間の距離に応じて閉そくを等分する手法⁹⁾が提案されている。

いずれの手法も、距離を基準として閉そく割りを作成した後、運転時隔を計算して目標とする運転時隔の充足を確認するため、各閉そく区間における走行時分のばらつきによって各信号機の運転時隔が不均一となる可能性がある。そのため、必要とする閉そく数、つまり信号機数が増えるという課題がある。これに対し、文献10では、運転時隔は実務の分析によると運転時分から算出されるため、時間を基準とすることで適切な閉そく割りを効率的に探索できると示されている。

3.2 運転時隔と信号機建植条件を考慮した閉そく割り提案手法の検討

2章で示したとおり、閉そく割り検討では目標運転時隔の充足は必須であり、運転時隔は時間曲線と信号現示系統から算出される。目標運転時隔の充足を主眼にすると、文献1で提案されている時間を基準とした閉そく割り手法(図4)は、各閉そく区間の走行時分が均一にな

るため、運転時隔の観点から有効な手法と考えられる。一方で、2.1.1項で示した信号現示の遷移に対する減速距離の充足は、閉そく割りを成立させる上での必須条件となる。そこで、本研究では、この走行時分と信号現示系統を結び、2.1.2項で示した運転時隔計算方法を分析し、目標運転時隔を満たす信号機位置の探索方法を構築する。

また、より実用的な閉そく割りを提案するため、提案手法の構築において2.3節でまとめた信号機建植における留意事項も考慮する。

4. 閉そく割り提案手法の構築

3.2節の検討を基に閉そく割り提案手法を構築する。この提案手法では、閉そく割り対象区間内の線路条件(こう配や速度制限、既存の信号機配置など)と運転時隔の対象となる先行列車と続行列車の運転曲線、目標運転時隔 T を入力として、目標運転時隔を満たす閉そく割りを算出する。

4.1 閉そく割り提案手法の構成

本研究で構築する提案手法は、2章で得られた知見等を基に、以下の考えを基本として閉そく割りを探索する。

- ・目標運転時隔の充足が閉そく割りの必須条件である。従って、目標運転時隔を満たす位置を探索した上で、信号機を設定する。
- ・信号機本数を少なくするためには信号現示系を3現示で構成することが望ましい。従って、3現示を基本として閉そく割りを探索する。
- ・減速距離に関わらず、YYを設定しなければならない箇所が存在する。従って、YYが必須となる区間を信号機建植禁止区間として、信号機位置を探索する。

本手法では、停車場の出発信号機から停車場の場内信号機までの信号機配置案の提案を前提とする。また、閉

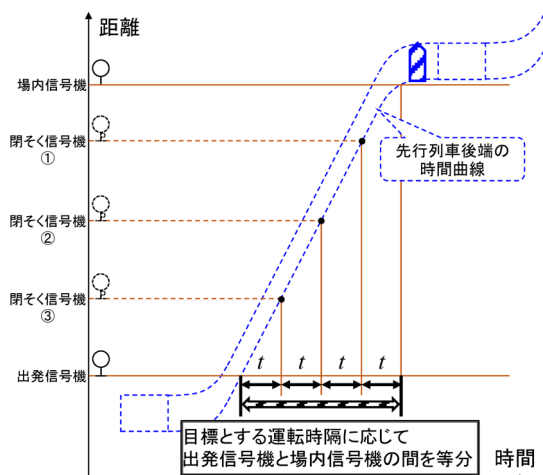
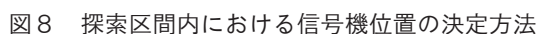


図4 時間を基準とした閉そく割り手法



(4) 基準信号機の更新

(5) 始端信号機の処理

5. 提案手法の検証

5.1 閉そく割りの探索条件

- ・目標運転時隔：閉そく割り検討が必要となり、比較的列車間隔が短い2分30秒とする。
- ・探索対象の信号機：駅Dの場合内信号機(6RA)から駅Cの出発信号機(2R)間の信号機を探索する。ただし、対象区間外の信号機配置は所与とする。
- ・運転時隔計算条件：図9に示す運転曲線を適用する。
- ・信号現示系統評価条件：性能が異なる以下の2車種を対象に減速距離を算出する。

- ✓車種①…対象区間内で停車しない。最高速度 75km/h, ブレーキ減速度 1.7km/h/s, 空走時分 8 秒である貨物列車。
- ✓車種②…対象区間内で停車しない。最高速度 100km/h, ブレーキ減速度 2.5km/h/s, 空走時分 1 秒である電車列車。

- ・信号機建植禁止区間：駅 D と駅 C の停車区域と分岐器の位置から 100m 未満の範囲を建植禁止区間とする。

提案手法にて探索した閉そく割り結果を、既存手法による閉そく割り結果と併せて表1に示す。既存の閉そく割り手法は、一般的な距離を基準とした手法であり、信号機建植禁止区間を考慮して出発信号機および場内信号機を停車位置および駅構内に最も近い位置に建植し、目標運転時隔を満たすまで駅間を距離で等分して信号機を設定している。提案手法の適用により、既存の閉そく



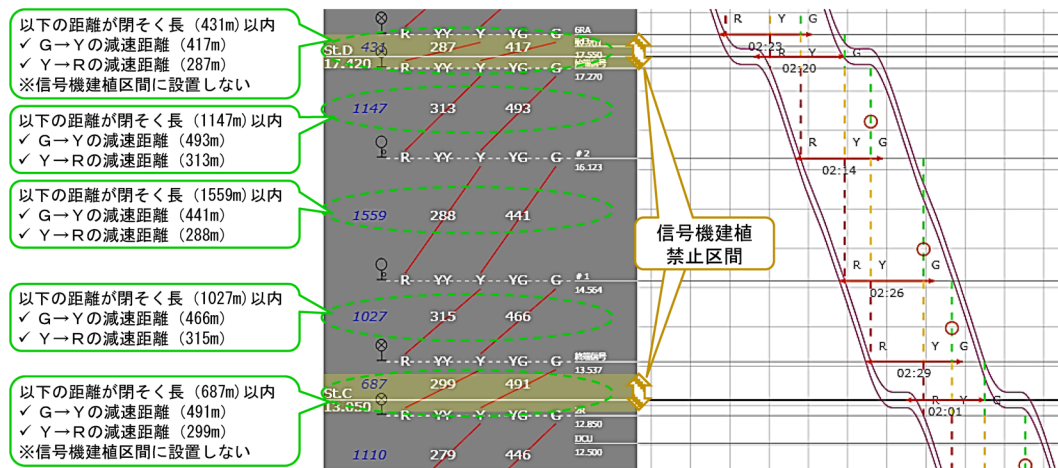


図 10 提案結果に対する減速距離の評価

割り手法と比較して信号機が1基少なく、目標運転時隔である2分30秒を満たす閉そく割りを提案できることを確認した。また、提案結果は図10に示すとおり、各信号現示遷移に対する減速距離を充足することを確認した。以上より、提案手法により探索条件を満たす解が得られたといえる。

検証において、閉そく割り探索に要した時間は5秒前後であった。運転設備担当者は閉そく割りを求めるために、検討の規模にも依るが数日程度を要することが多い。従って、本手法の活用により、閉そく割り検討業務に要する時間の短縮が見込めると考える。

6. まとめ

本研究では、閉そく割り検討の手順および信号機建植位置と運転時隔の関係を基に、目標運転時隔を入力とし、目標値を満たす閉そく割りを提案する手法を構築した。さらに、既開発の閉そく割り評価システムに提案手法を実装し、モデル路線の1駅間に対する閉そく割り検討に適用し、数秒で目標運転時隔を満たす信号機配置案を提案できることを確認した。これらの成果から、閉そく割り検討に要する時間を短縮できる見込みを得た。

本研究で示した閉そく割り提案手法は、モデル路線に

おいて良好な結果が得られたが、実用化に向けては様々な閉そく割り条件において検証する必要がある。今後、本研究で提案した手法の検証を行いながら、実用システムへと発展させていく予定である。

文 献

- 1) 吉武勇：鉄道における運転保安，（一社）日本運転協会，2008
- 2) Kumazawa, K., Kitano, T., and Sakaguchi, T., et al. “Development of the Signal Arrangement Evaluation System,” WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 199, pp.29-41, 2020.
- 3) 運転理論研究会：運転理論（再改訂版），（一社）日本運転協会，2010
- 4) 熊澤一将：自動閉そく区間における運転時分と運転時隔の変動に関する検討，J-RAIL2016, S5-3-2, pp.595-598, 2016
- 5) 足立武士，小岩英二，田守利光，河内正雄，上野高明：信号閉そく割り支援システムの開発と運用，鉄道サイバネ・シンポジウム論文集，vol.33, pp.7-10, 1996
- 6) 電気関係技術基準調査研究会 編：解説 鉄道に関する技術基準（電気編），（一社）日本鉄道電気技術協会，2014
- 7) 奥田隆，高重哲夫：運転時隔短縮評価シミュレータの開発，鉄道総研報告，Vol.7, No.6, pp.9-16, 1993
- 8) 三菱電機株式会社：列車運行計画装置，特開平8-127344, 1996-05-21
- 9) 株式会社東芝，東芝デジタルソリューションズ株式会社：信号機建植位置決定システムおよび信号機建植位置決定方法，特許第6505645号，2019-04-05
- 10) 熊澤一将，加藤怜，田中峻一，北野隆康：閉そく割り提案方法の構築に向けた検討，平成31年電気学会全国大会講演論文集，講演番号5-265, pp.444, 2019

表 1 閉そく割り提案結果の比較

既存の閉そく割り			提案結果		
信号機位置 (キロ程[km])	信号機名称	各信号機における 運転時隔	信号機位置 (キロ程[km])	信号機名称	各信号機における 運転時隔
18.740	U1	2:13	18.740	U1	2:13
17.701	6RA	2:59	17.701	6RA	2:23
駅D			駅D		
17.270	2R	1:49	17.270	始端信号	2:20
16.298	U3	1:48	16.123	#2	2:14
15.326	U2	1:42	14.564	#1	2:26
14.354	U1	2:17	削減		
13.381	7RA	2:24	13.537	終端信号	2:29
駅C			駅C		
12.850	2R	2:01	12.850	2R	2:01
11.740	U6	2:18	11.740	U6	2:18