

列車自動運転をともなう運転整理MIPモデルの 移動閉塞下への適用

川添 宏介^{1,a)} 山内 拓人¹ 鄭 顕志¹ 富井 規雄² 本位田 真一¹

受付日 2021年5月31日, 採録日 2021年12月3日

概要: 鉄道では, 事故, 混雑などのため列車に遅延が生じた際, 影響を最小限に抑えるため運行ダイヤが組み直される. この運転整理という作業の自動化を目指す研究が広くなされている. 本研究はなかでも, 移動閉塞および自動運転という新しい2システムを考慮した運転整理の自動化に注目し, これを混合整数計画法(MIP)のモデルとして定式化することを目的とする. この目的達成のため本研究では, 自動運転のみを考慮した既存のMIPモデルをベースモデルとし, その一部の制約式を置き換えることで移動閉塞も考慮するように拡張することを提案する. また遅延シナリオを想定し, 拡張したモデルから得たダイヤをベースモデルによるダイヤと比較した. これにより, 移動閉塞をモデルに導入した利点にとまなう, 遅延および旅客影響の減少効果を検証した.

キーワード: 鉄道の運転整理, 混合整数計画法, 鉄道の自動運転, 移動閉塞

Applying MIP Train Traffic Rescheduling Model with Automatic Train Control to Moving Block Systems

KOSUKE KAWAZOE^{1,a)} TAKUTO YAMAUCHI¹ KENJI TEI¹ NORIO TOMII² SHINICHI HONIDEN¹

Received: May 31, 2021, Accepted: December 3, 2021

Abstract: When delays of trains occurred due to an accident or congestion, diagram is rescheduled to minimize effects of them. This process is called train rescheduling, and now there are many researches to automatize it. This research focuses on autonomous train rescheduling considering both of two new systems, which are moving block and autonomous train operation (ATO). The purpose of research is to realize this by approach with formalization as a mixed integer programming (MIP) model. To achieve this purpose, this research proposes the extension of a existing base MIP model considering only ATO to also consider moving block by replacing some constraints. This research also implements the extended model and compares its solution with the base model for assumed delay scenarios. By this comparison, this research verify the effects with advantages of introducing moving block to the base model.

Keywords: train rescheduling, mixed integer programming, autonomous train operation, moving block

1. まえがき

鉄道の運行においては, 大きいものでは事故, 小さいものでは混雑などにより列車に遅延が生じることがしばしばある. これらの遅延の影響を最小限に抑えるために, 時刻

表どおりの運行スケジュール(以下, ダイヤと呼ぶ)とは異なる, 最適なダイヤを組み直す作業がなされる [1], [2]. この作業は運転整理 [2] と呼ばれ, 鉄道業界では以前から自動化が求められており, 世界中で実用に向けた研究がなされている. なかでも近年は, 移動閉塞 (Moving Block) [3], [4] や自動運転 [5] といった, 新しい鉄道システムを考慮した運転整理自動化の研究が進められている.

本研究では, 移動閉塞および自動運転の2システムを同時に想定するような運転整理に注目する. そのような運転整理を, 混合整数計画問題 (Mixed Integer Programming,

¹ 早稲田大学理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University,
Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

² 日本大学総合科学研究所
University Research Center, Nihon University, Chiyoda,
Tokyo 102-8275, Japan

a) kosuke.kawazoe@asagi.waseda.jp

MIP) モデルとして定式化することで、最適な整理ダイヤを得るとするのが本研究の目的である。MIP を用いた、移動閉塞や自動運転それぞれを考慮する運転整理の研究 [1], [15] は存在するが、それらは 2 システムを同時には扱っていない。この研究の新規性は、移動閉塞および自動運転の 2 システムを同時に考慮した路線の運転整理を MIP で解けるようになることである。また、これら 2 システムの両方を導入した路線は、今後増えていきかつ運転整理において正確性が求められるような路線であると考えられる。この研究の有効性は、そのような路線において、遅延の総和や旅客影響の指標を確実に最小化する列車ダイヤを得られることである。

本研究では、自動運転のみを考慮した既存の運転整理 MIP モデル [1] をベースとし、移動閉塞を扱えるように拡張することで定式化を行う。具体的には、文献 [1] の一部の制約条件を、想定した移動閉塞による列車間距離を詰めた運転に適用できるように書き換えることを提案する。また、定式化した MIP モデルを、MIP ソルバの CPLEX (IBM 社) に入力する実験を行った。その結果得られたダイヤを既存モデルから得られたダイヤと比較したところ、遅延の総和はおおよそ半減し、さらに一部のシナリオでは旅客への影響についても減少効果が得られた。これらの効果は提案した制約式の書き換えによるものであると検証できた。

本論文は以下のとおり構成される。まず 2 章で、背景として本研究のドメインである運転整理自動化と、その適用範囲である移動閉塞について述べる。運転整理自動化の節ではその先行研究と、本研究で採用する MIP の手法についても述べる。その後 3 章で本研究の目的、4 章で提案を説明するための記法と前提条件について述べる。そして 5 章で、提案本体である、既存モデルの制約条件式に代わる新たな式の立式を説明する。また 6 章では、5 章で提案、立式した新たな制約条件式を含む、既存モデルを拡張した MIP モデルの作成について述べる。続く 7 章では、その新たな MIP モデルと既存モデルをそれぞれ実装し、想定した遅延シナリオを入力して CPLEX 上で実行するという比較評価実験について述べる。それらの結果から、新たなモデルの効果を議論する。8 章で提案の関連研究を紹介し、最後に 9 章で本論文の結論および今後の課題を述べる。

2. 背景

2.1 鉄道の運転整理自動化

2.1.1 運転整理とその自動化研究の現状

1 章で述べた鉄道の運転整理は、現在多くの部分が専門家らの人力でなされている。しかし、遅延や旅客への影響を最小限に抑えるような全列車の挙動を人力で素早く判断することには限界がある。そのため、この運転整理の自動化を目指した研究が行われている。この節では、これらの先行研究を 2 つの分類に沿って紹介する。

表 1 移動閉塞、自動運転を考慮した運転整理の研究

Table 1 Previous research of rescheduling with new systems.

論文	[1]	[8]	[13]	[14]	[15]
移動閉塞	×	○	○	○	○
自動運転	○	○	○	○	×
手法	MIP	遺伝	SIMONE	Integrated	MIP

まず、代替ダイヤを求める手法による分類である。そのうち探索を用いる主流の手法として、メタヒューリスティックスを用いる手法と、混合整数計画法、MIP (Mixed Integer Programming) を用いる手法の 2 つがある [6]。前者は、たとえば貪欲法 [7] や遺伝アルゴリズム [8] などを用いるものである。これらは、目的の指標を最小化するダイヤを必ず得られるとは限らないという欠点がある [9]。一方で後者の MIP を用いる手法は、運転整理を MIP モデルとして定式化するものであり、目的の指標を最小化するダイヤを必ず得られる [9] (2.1.2 項で詳述する)。この 2 つ以外に、代数グラフを利用する研究もある [6], [10]。しかし代数グラフの手法では、求めたい変数の値が考慮される順序も考慮する必要があり、同規模の問題では MIP より計算時間が長くなってしまふ。また近年ではこれら探索を用いる手法に加えて、機械学習を利用したデータ駆動型の運転整理 [11] や、強化学習 [12] を用いる研究もなされている。ただ機械学習や強化学習は、メタヒューリスティックス同様、目的の指標を最小化するダイヤを必ず得られるとは限らない。さらに、鉄道の運転整理専用のシミュレーションソフト開発 (SIMONE [13]) も行われているが、こちらもアルゴリズムとしてはメタヒューリスティックスが用いられており最適性が保証されていない。

以上より、MIP は、代数グラフと比較すると計算時間が短く、かつメタヒューリスティックスを含むその他の手法と比べると目的の指標に対する最適性が保障されるという長所を持つ。これらの長所は、今回の研究で想定する、移動閉塞や自動運転が導入されやすいような過密ダイヤの路線の運転整理には重要であると考えられる。したがって、これらの手法の中でも本研究では MIP を用いた手法に注目する。

次に、新しい鉄道システムの考慮による分類である。近年、新しい鉄道システムを考慮した運転整理自動化の研究が進んでいる。このうち、4.2 節で述べる移動閉塞と、自動運転の 2 システムを考慮した運転整理の先行研究を、表 1 を用いて比較する。表 1 のうち、文献 [8], [13], [14] については、2 システム両方を考慮している。これらの研究は、自動運転かつ移動閉塞を搭載した運行システムである CBTC [3] (2.2 節で詳述) を想定している。しかしこれらは、求解手法にそれぞれ遺伝アルゴリズム [8]、前述の SIMONE [13]、および条件分岐を用いた独自の決定アルゴリズム [14] を使用している。一方、MIP を用いた手法

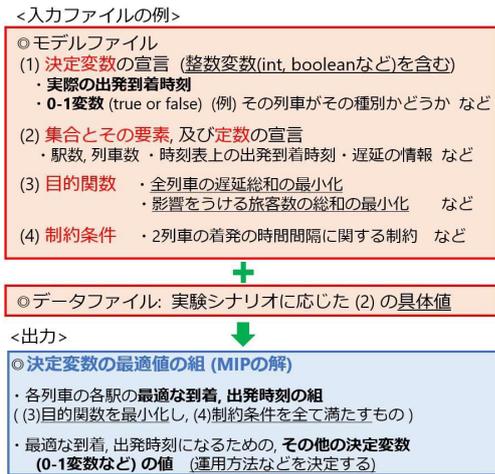


図 1 MIP ソルバを用いた運転整理の入出力

Fig. 1 Input/output of train rescheduling with a MIP Solver.

は、このように移動閉塞と自動運転の2システム両方を想定した運転整理には適用されていない。ただ、自動運転のみ [1], 移動閉塞のみ [15] をそれぞれ考慮した運転整理については、MIP モデルとして定式化が行われている。

2.1.2 MIP ソルバを用いた自動運転整理

2.1.1 項で述べた、混合整数計画法、MIP を用いた手法による運転整理について述べる。本研究では、この手法による運転整理自動化を扱う。MIP とは、整数変数を含む制約充足問題のことを指す。MIP のモデルは図 1 に示す要素から構成される。これらの要素により定式化された MIP モデルを、MIP ソルバ (MIP の解を求めるソフトウェア) に入力する。すると、図 1 のとおり、制約条件をすべて満たすような決定変数の解が出力される。MIP ソルバでは分枝限定法を利用し全探索を行うため、出力は必ず、とりうる解のうち目的関数の値が最小 (最大) となる解である。以下、このような解を最適解と呼ぶ。

この MIP モデルを鉄道の運転整理に適用する場合、各要素にあたるものを、図 1 であげている。図 1 の場合、入力した列車運行上の制約をすべて満たし、かつ目的関数である遅延の総和が確実に最小になるような各列車、各駅での到着・出発時刻が解として出力される。

2.2 移動閉塞

この節では、鉄道の新しい保安システムである、移動閉塞というシステムについて述べる。従来の鉄道保安システム (固定閉塞) では、路線を閉塞と呼ばれる固定区間に分割する。そして信号を用いて、各閉塞に入る列車を1つまでとすることで列車どうしの衝突を防ぐ。一方、それに替わる移動閉塞では、固定された閉塞を撤廃し、無線通信を用いて得た前方の列車情報により衝突を防ぐ。移動閉塞を用いた規格として、主に欧州の地下鉄路線で普及しつつある CBTC (Communication-Based Train Control) [3] や、(株) JR 東日本が開発する ATACS (Advanced Train

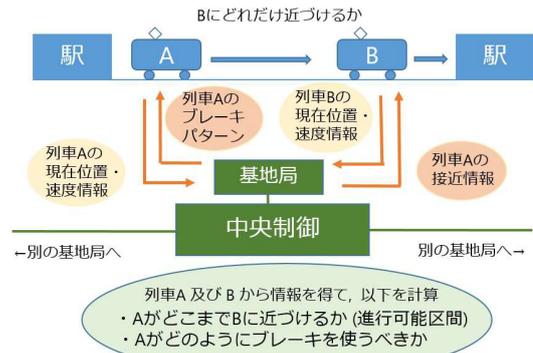


図 2 CBTC における無線通信の一例

Fig. 2 An example of radio communications on CBTC.

Administration and Communications System) [4] がある。CBTC [3] の規格における、この通信の様子を図 2 に示す。各列車は基地局を通じた中央制御との無線通信により、前方の列車にどのくらい接近できるかの情報を得る。たとえば図 2 の列車 A および B は、中央制御に各々の位置や速度情報を逐次送信する。中央制御はそれらの情報から、A と B がどこまで接近できるか、および B に対して安全な A のブレーキのかけ方を計算する。これらの計算結果が A に逐次送り返され、A が B に接近しすぎると A に自動ブレーキがかかり衝突が防がれる。

固定閉塞ではオンラインで列車の位置情報を把握できないため、ブレーキ距離に余裕を持たせるという理由から閉塞区間を長めに設定する必要があった。一方で移動閉塞では、無線によって列車の位置情報を把握し、前方の列車に衝突しないための安全な距離をリアルタイムで検出できる。したがって安全を確保したまま従来の固定閉塞の1閉塞区間の長さよりも短い車間距離での運行が可能となる。すなわち移動閉塞の導入は、固定閉塞より列車間距離を詰めた運転整理を可能にし、とくに数分程度の小さい遅延の減少と早期解消に有効とされている [4]。

3. 研究の目的

本研究の目的は、移動閉塞と自動運転両方を考慮した運転整理を、MIP モデルとして定式化することである。この研究の新規性は、2.1.1 項で述べたとおり、MIP を用いた手法が、これら2システム両方を想定している運転整理にはまだ適用されていないことである。一方で、たとえば2.2 節で述べた CBTC のシステムには、自動運転機能を搭載した規格があり [3], これらを導入する路線が近年拡大している [8], [13], [16]。また、同節で述べた ATACS [4] でも車上の自動列車運転装置 (ATO) の利用が想定されている [17]。これらから移動閉塞と自動運転の両方を導入した路線は今後国内外で増えていくと考える。さらに、移動閉塞は数分の小さな遅延に対して減少効果があるが、この小さな遅延をより短くするには運転整理のアルゴリズム自体

表 2 記法

Table 2 Symbols for description.

集合	$i \in M$	駅集合 $M = \{1, 2, \dots, M \}$ と駅 i
及び	$j \in N$	列車集合 $N = \{1, 2, \dots, N \}$ と列車 j
要素	$k \in K$	区間集合 $K = \{1, 2, \dots, M - 1\}$ と区間 k
	$l \in P$	運転レベル集合 $P = \{1, 2, \dots, P \}$ とレベル l
決定	$ta_{i,j}$	駅 i への、列車 j の実際の到着時刻 (s)
変数	$td_{i,j}$	駅 i の、列車 j の実際の出発時刻 (s)
	$\varepsilon_{k,j}^l$	区間 k 、列車 j の運転レベルは l か (0-1)
定数	$R_{k,j}^l$	区間 k の、運転レベル l での走行時間 (s)
	x_k	区間 k の長さ (m)
	$V_{k,l}^{max}$	区間 k 、運転レベル l での最高速度 (m/s)
	r_{ac}	ATO の速度パターンによる列車加速度 (m/s ²)
	r_{mbs}	移動閉塞ブレーキによる列車減速度 (m/s ²)
	L_s	前の列車に対する移動閉塞の停止限界 (m)
	L_t	列車の長さ (m)

に正確性が求められる [15]. 以上より、この研究の有効性は、今後増えていきかつ正確性が重視される、2 システム両方を導入した路線に対して、2.1.2 項の要領で確実に最適な運転整理ダイヤを求められることである。

この目的のための手法として本研究では、自動運転のみを考慮した既存の運転整理 MIP モデル [1] を、移動閉塞を想定した路線に適用することを考える。ここで、文献 [1] そのままの移動閉塞への適用では、移動閉塞の導入目的を果たせないという問題がある。この理由は、2.2 節のとおり、移動閉塞は列車間距離を詰めた運転による遅延減少効果を期待する目的で導入している。一方で文献 [1] の前提条件では、従来の固定閉塞によりそもそも列車間距離は狭まらないためである。よって本研究では、想定した移動閉塞に基づいて列車間距離を詰めた運転を認めるように、文献 [1] の一部の制約条件式を作り変えることを提案する。これにより、文献 [1] を、自動運転を考慮しつつ移動閉塞下にも適用できる運転整理 MIP モデルへと拡張する。以下、本研究で拡張したモデルを提案モデルと呼ぶ。

4. 前提条件

まず、以降の前提条件および提案の記述に用いる集合と要素、MIP の決定変数、および定数を、表 2 に記す。これらを用いてこの章では、提案モデルにおいて想定する路線 (4.1 節)、自動運転 (4.1.1 項) および移動閉塞 (4.2 節) の各前提条件について記す。

4.1 路線

提案モデルで想定する鉄道路線は、文献 [1] と同定義の大都市地下鉄路線とする。想定する路線の様子を図 3 に示す。図 3 および表 2 のとおり、路線は M 個の駅とその各駅間である $M - 1$ 個の区間で構成される。駅 i と駅 $i + 1$ の間を区間 k とする。すなわち、 $i = k$ である。また提案モデルの想定時間内に走る列車の編成数を N 個とおき、全

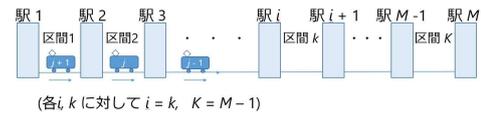


図 3 想定する路線

Fig. 3 Assumed railway line.

列車が駅 1 を起点、駅 N を終点とする片道運行である。なお、全駅にホームは 1 個であり、全区間単線とする。したがって、駅や区間内での列車どうしの待ち合わせや追い越しはいっさい考えないものとする。

4.1.1 自動運転 (ATO)

想定する全列車に搭載される自動運転のシステムは、文献 [1] に基づく自動列車運転装置、ATO (Automatic Train Operation) とする。提案モデル上の ATO は、文献 [1] の定義、および移動閉塞を考慮するためにこの項で新たに追加する定義からなる。まず文献 [1] に基づく定義を記す。全列車の ATO には共通して、各区間をどのような速度で走るか (速度パターン) があらかじめプログラムされている。速度パターンは各区間 P 通りあり、各パターンを以下、運転レベルと呼ぶ。運転レベル l の値が小さいほど出発から次駅到着までの走行時間は短い。各列車は、各区間につき 1 つ入力される運転レベルに従い、その区間を自動走行する。

提案モデルでは、これに加えて、以下の定義を追加する。まず、運転レベルによる走行中、列車には 4.2 節で定義する移動閉塞による自動ブレーキが作動することを想定する。その際は選択した運転レベルに従う走行から外れて減速、停止する。また、各運転レベルの速度パターンにおける具体的な速度変化についても以下のように定義する。これは、4.2 節で移動閉塞の挙動を定義しやすくするためである。まず、ATO の運転レベルごとの走行時は、列車は駅を出発後一定の加速度 r_{ac} で最高速度まで加速する。運転レベルにより異なるのは、各区間の最高速度 $V_{k,l}^{max}$ とする。 l の値が小さい方が、 $V_{k,l}^{max}$ の値が高い。列車は $V_{k,l}^{max}$ まで加速後、移動閉塞ブレーキが作動しない限り、駅に接近し減速を開始するまで最高速度で走行を続ける。

4.2 移動閉塞の想定

提案モデルの移動閉塞では、2.2 節で述べた CBTC [3] や ATACS [4] のように、列車が前方の列車に接近すると衝突を防ぐため自動ブレーキがかかることを想定する。このとき列車は前方の列車の最後尾から安全な距離を保って停止する。本研究のモデルにおける移動閉塞では、このように列車が接近し自動ブレーキが働くパターンを、以下の 2 つ想定する。

- (1) 図 4 のように、ATO の運転レベルごとの運転中、前方の列車が次の駅に停車していたときを想定する。このとき、次の駅から L_s 手前まで接近して停止する

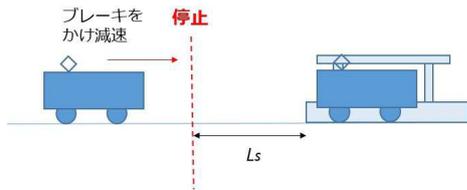


図 4 移動閉塞による列車の接近とブレーキパターン (1)

Fig. 4 Pattern (1) approach and break by moving block.

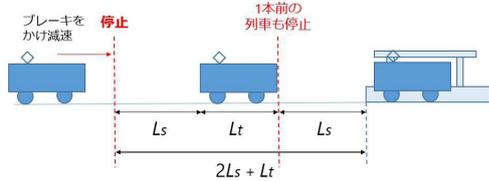


図 5 移動閉塞による列車の接近とブレーキパターン (2)

Fig. 5 Pattern (2) approach and break by moving block.

ように自動ブレーキが働く。

(2) 図 5 のように、ATO 通りに運転中、1 本前の列車が 2 本前の列車との衝突を防ぐべく (1) の要領で減速したときを想定する。このとき、(1) よりさらに $L_s + L_t$ (列車長) 後方で停止するように自動ブレーキが働く。結果列車は次の駅から $2L_s + L_t$ 手前で停止する。

上記のパターンで働く自動ブレーキの減速度は、停止するまで r_{mbs} で一定とする。なお、前方の列車が駅に停車中の場合、一定距離 L_s 後方までは近づいて停止しておくことで、前方の列車が次駅出発後短時間で次駅に到着できる [18]。上記の想定パターンは、この考えに基づく。このとき L_s は、停車中の前方の列車に対し、ブレーキの制動誤差を考えても安全が確保できる限界の距離である。また、(2) の場合は区間に 2 列車が接近して走る。本研究における移動閉塞の想定では、簡単化のため 1 区間内に接近して走る列車はこの 2 つまでとする。この制約は 5.2 節で制約条件式として立式する。

5. 既存モデルを移動閉塞下の運転へ適用するための代替の制約条件式の立式

本研究における提案は、自動運転を考慮した既存の運転整理 MIP モデル [1] を移動閉塞下に適用できるように、一部の制約条件式を新しい式に置き換えることである。これらの置き換えは、4 章で述べた前提条件に基づく。

5.1 置き換えるべきベースモデルの制約条件式

ベースモデル [1] の制約条件式のうち本研究で置き換えるべき式は、4.2 節で定義した移動閉塞の想定を妨げるような式である。それらは以下の 2 種類に分けられる。

- (1) 列車間隔についての制約条件式。これらの式は、想定した移動閉塞のように列車どうしの接近を認めない。
- (2) 区間の走行時間についての制約条件式。この式は、

ATO による運転以外での走行を認めない。すなわち想定した移動閉塞の自動ブレーキがかかることを認めない。

これらの式を、新たに立式する制約条件式に置き換えることで、定義した移動閉塞を想定できるような運転整理 MIP モデルを作成できる。以降 5.2 節および 5.3 節で、それぞれ上記 (1)、(2) にあてはまる文献 [1] の式を具体的にあげ、それらに代わる式を新たに立式する。

5.2 列車間隔についての制約条件式

文献 [1] の制約条件式のうち、列車間隔に関する制約条件式は以下の 3 式である。

$$td_{i,j} - td_{i,j-1} \geq h_{min}^{sec} \quad (1)$$

$$ta_{i,j} - ta_{i,j-1} \geq h_{min}^{sec} \quad (2)$$

$$ta_{i,j} - td_{i,j-1} \geq h_{min}^{sta} \quad (3)$$

式 (1) は、順に文献 [1] の式 (18), (19), (20) を引用したものである。これらの式はそれぞれ、同駅における 2 列車の出発、2 列車の到着、先行列車出発から後続列車到着、の時刻は一定時間 h_{min}^{sec} , h_{min}^{sta} 以上開ける必要がある、という制約である。言い換えると、それ以上に時間間隔を狭めた列車どうしの接近を認めないことを意味する。これでは、4.2 節で定義した、列車どうしが接近する移動閉塞の想定ができない。したがってこれら 3 つの制約を、以下のように右辺を 0 とし、着発順序のみの制約に緩和させる。これにより各列車は、列車どうしの接近も想定した走行時間の制約 (次の 5.3 節で立式) に従って走行できる。

$$td_{i,j} > td_{i,j-1} \quad (4)$$

$$ta_{i,j} > ta_{i,j-1} \quad (5)$$

$$ta_{i,j} > td_{i,j-1} \quad (6)$$

さらに、4.2 節で、1 区間に入る列車は 2 つまでと定義した。したがって、2 本前の列車が次の駅に到着するまで、列車は駅を出発しないという制約を追加する。

$$td_{i,j} > ta_{i,j-2} \quad (7)$$

5.3 走行時間についての制約条件式

文献 [1] の制約条件式のうち、列車の各区間の走行時間に関する制約条件式は以下の式である。

$$ta_{i+1,j} - td_{i,j} = \varepsilon_{k,j}^l R_{k,j}^l \quad (8)$$

この式は、列車の各区間の走行時間は、選択した運転レベルでの ATO の走行時間に必ず等しくなるという制約を表す。ところが、4.2 節で定義した移動閉塞自動ブレーキは運転レベルから外れて減速するため、区間の走行時間は ATO 通りの走行時よりも長くなる。この想定は式 (8) には適用できない。したがって、この式の代わりに、列車ど

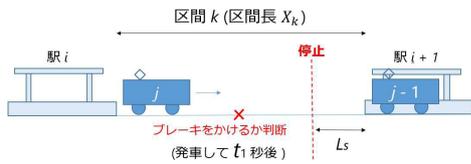


図 6 (A) における区間 k での列車の位置関係
Fig. 6 Trains' positions at section k in (A).

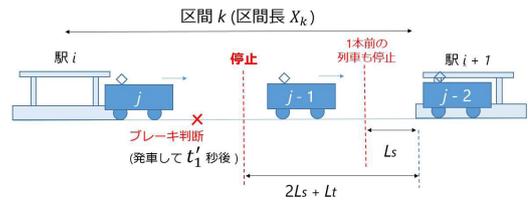


図 8 (B) における区間 k での列車の位置関係
Fig. 8 Trains' positions at section k in (B).

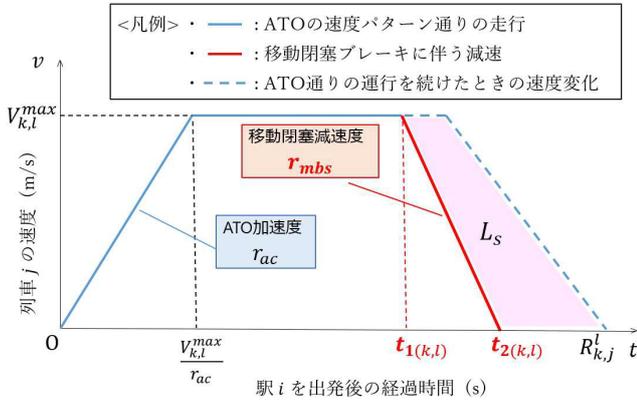


図 7 (A) における区間 k での列車 j の速度変化
Fig. 7 Train j 's velocity graph at section k in (A).

うしの接近の有無、またブレーキの有無で分岐を作成する。各列車の各区間の走行は、前方の列車と同時に同区間を接近して走るかで、次の 2 パターンに分岐できる。パターン (A) における制約条件式の立式を次の 5.3.1 項で記述し、同様にパターン (B) について 5.3.2 項で記述する。

(A) 1 本前の列車が次の駅 $i+1$ に到着してから、駅 i を出発する ($td_{i,j} \geq ta_{i+1,j-1}$)。このとき、区間 k を走る列車は 1 つである。

(B) 1 本前の列車が次の駅 $i+1$ に到着する前に、駅 i を出発する ($td_{i,j} < ta_{i+1,j-1}$)。このとき、1 つの区間 k に 2 つの列車が接近して走る。

5.3.1 パターン (A) における制約の立式

(A) のとき、1 本前の列車 $j-1$ が次の駅 $i+1$ にまだ停車しているかどうかで、さらに j に対する制約の分岐を行う。(A) の列車 $j-1$, j の位置関係を図 6 に示す。図 6 のように列車 j は、前の列車 $j-1$ が次の駅 $i+1$ に停車している場合、自動ブレーキにより駅 $i+1$ の L_s 手前まで接近して停止する。これは 4.2 節のパターン (1) で定義したとおりである。4.1.1 項の ATO および 4.2 節の移動閉塞の各定義から、ブレーキ時の列車 j の速度変化は図 7 のようになる。図 7 のとおり、このブレーキをかけるか判断し減速を開始する時刻を $td_{i,j} + t_{1(k,l)}$ とすると、 $t_{1(k,l)}$ は図 7 から以下のように計算できる。

$$t_{1(k,l)} = \frac{V_{k,l}^{max}}{r_{ac}} + \frac{x_k - L_s - \frac{(V_{k,l}^{max})^2}{2r_{mbs}} - \frac{(V_{k,l}^{max})^2}{2r_{ac}}}{V_{k,l}^{max}} \quad (9)$$

すなわち、この $t_{1(k,l)}$ の時点で、

(A1) 前方の列車 $j-1$ がすでに次の駅 $i+1$ を出発して

いる ($td_{i,j} + t_{1(k,l)} \geq td_{i+1,j-1}$) 場合は、列車 j には自動ブレーキは必要ない。このとき j は、置き換える前の制約条件式 (8) のとおり選択した ATO の運転レベル $i+1$ に従って到着できる。一方、

(A2) 前方の列車がまだ次の駅を出発していない ($td_{i,j} + t_{1(k,l)} < td_{i+1,j-1}$) 場合は、列車は図 7 のように減速し、時刻 $td_{i,j} + t_{2(k,l)}$ で停止する。 $t_{2(k,l)}$ は、 $t_{1(k,l)}$ と同様に考えて、以下のように計算できる。

$$t_{2(k,l)} = t_{1(k,l)} + \frac{V_{k,l}^{max}}{r_{mbs}} \quad (10)$$

この場合列車 j は、いったん次の駅 $i+1$ の L_s 手前で停止し、前方の列車 $j-1$ が $i+1$ を出発するまでは再び発車できない。さらに、列車 j が再び発車してから、駅 $i+1$ に到着するまで、距離 L_s を走るための時間がかかる。この時間を一定時間 T_{s1} とすると、これらをまとめて、列車 j が満たすべき制約条件式は以下のように書ける。

$$ta_{i+1,j} \geq \varepsilon_{k,j}^l (\text{Max}(td_{i+1,j-1}, td_{i,j} + t_{2(k,l)}) + T_{s1}) \quad (11)$$

以上をまとめて、(A) ($td_{i,j} \geq ta_{i+1,j-1}$) のときの、列車 j が区間 k の走行時間について満たすべき制約条件式は、式 (9) で求まる $t_{1(k,l)}$ に対し以下のように分岐する。

- (A1) $td_{i,j} + t_{1(k,l)} \geq td_{i+1,j-1}$ のとき、式 (8)
- (A2) $td_{i,j} + t_{1(k,l)} < td_{i+1,j-1}$ のとき、式 (11)

5.3.2 パターン (B) における制約の立式

(B) では、2 列車が 1 区間に走ることになるため、運転レベルの差によって後続列車が前方の列車に追いつくことを防ぐ必要がある。したがって、まず (B) で走行する列車に対しては、その区間では 1 本前の列車以下の運転レベルを選択する、という制約を与える。

$$\forall l' \text{ if } (\varepsilon_{k,j-1}^l = 1 \text{ and } l < l') \text{ then } \varepsilon_{k,j}^{l'} = 0 \quad (12)$$

これを満たすことを前提に、(B) ではさらに、前の列車との位置関係で満たすべき制約の分岐を行う。(B) での 2 本前の列車 $j-2$ と、 $j-1$ および j の 3 列車の位置関係の一例を図 8 に示す。この図 8 のように、 $j-2$ がまだ次の駅に停車しているとき、 $j-1$ が (A2) の要領でブレーキをかけるのに続いて、 j は駅 $i+1$ の手前 $2L_s + L_t$ で停止する (4.2 節のパターン (2) にあたる)。このときの $j-1$, および j の 2 列車の位置変化を図 9 に示す。(A) と同様に

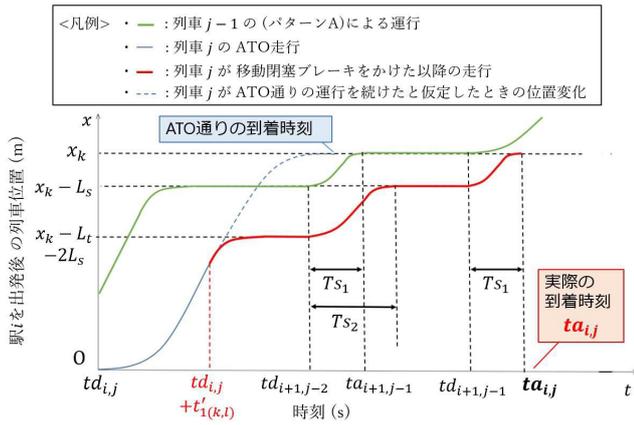


図 9 (B) における区間 k での列車位置変化

Fig. 9 Trains' positions graph at section k in (B).

このブレーキ判断がされる時刻を $td_{i,j} + t'_{1(k,l)}$ とすると、 $t'_{1(k,l)}$ は以下のように計算できる。

$$t'_{1(k,l)} = \frac{x_k - (2L_s + L_t) - \frac{(V_{k,l}^{max})^2}{2r_{mbs}} - \frac{(V_{k,l}^{max})^2}{2r_{ac}}}{V_{k,l}^{max}} + \frac{V_{k,l}^{max}}{r_{ac}} \quad (13)$$

本研究のモデルでは簡単化のため、この $t'_{1(k,l)}$ の時点で、 $j-1$ が次駅 $i+1$ に到着していない場合は必ずブレーキをかけるという制約を与える。すなわち $t'_{1(k,l)}$ の時点で、

(B1) $j-1$ が次の駅 $i+1$ に到着している場合 ($td_{i,j} + t'_{1(k,l)} \geq ta_{i+1,j-1}$) は、ただちにブレーキをかける必要はなく、代わりに (A2) の要領で、時刻 $td_{i,j} + t_{1(k,l)}$ でブレーキをかければよい。このとき列車 j が満たすべき制約条件式は (A2) で満たすべき式 (11) となる。

(B2) $j-1$ が次の駅 $i+1$ に到着していない場合 ($td_{i,j} + t'_{1(k,l)} < ta_{i+1,j-1}$) は、列車 j はただちにブレーキをかけて減速する。このとき図 9 のとおり、駅 $i+1$ の $2L_s + L_t$ 手前で停止して以降、列車 j は次の手順で動くことで、前方の列車との安全な距離を確保しつつ、最短で駅 $i+1$ に到着できる。まず停止後、 $j-2$ が $i+1$ を出発したら、 $j-1$ と同時に発車し、 $i+1$ の L_s 手前まで移動して停止する。この移動には一定時間 Ts_2 を要すると定める。次に (A) の要領で、 $j-1$ が $i+1$ を出発したら、再び発車し、一定時間 Ts_1 かけて $i+1$ に到着する。これらの手順より、このとき列車 j が満たすべき制約条件式は以下のように立式できる。

$$ta_{i+1,j} \geq \varepsilon_{k,j}^l (\text{Max}(td_{i+1,j-2} + Ts_2, td_{i+1,j-1}) + Ts_1) \quad (14)$$

以上をまとめて、(B) ($td_{i,j} < ta_{i+1,j-1}$) のときの列車 j が区間 k で満たすべき制約条件式は、式 (12) に加えて、式 (13) で求まる $t'_{1(k,l)}$ に対し以下のように分岐する。

- (B1) $td_{i,j} + t'_{1(k,l)} \geq ta_{i+1,j-1}$ のとき、式 (11)

- (B2) $td_{i,j} + t'_{1(k,l)} < ta_{i+1,j-1}$ のとき、式 (14)

以上が、新たに立式するすべての制約条件式である。

6. ベースモデルを拡張した新しい運転整理 MIP モデル定式化

この章では、5章で新たに提案した制約条件式を加えることで、新しい運転整理 MIP モデルを設計する方法を述べる。なお、このモデルは文献 [1] の MIP モデルの拡張となる。新しいモデルにより、3章で述べた、移動閉塞および自動運転両システムを考慮した運転整理を最適化できる。

6.1 目的関数

提案モデルにおける目的関数は、以下の2つを考慮する。

- 全列車、全区間での出発、到着遅延の総和 T_{delay}
- 全列車、全駅で、遅延のために列車が混雑し乗りきれなくなる人数の総和 $N_{stranded}$

T_{delay} は、各駅、各列車の $ta_{i,j} + td_{i,j}$ の総和である。 $N_{stranded}$ は、駅のホームに並んだ人数から、列車の定員を超えないように乗り込んだ人数の差を足し合わせることで定義される。これら2つの総和 T_{delay} 、 $N_{stranded}$ からなる、以下の重み付き線形和を、提案モデルの目的関数として定義する。本モデルから求めたいのはこの目的関数を最小化するような列車ダイヤである。

$$f = \alpha T_{delay} + \beta N_{stranded} \quad (15)$$

この目的関数の設定理由は、本モデルから得られる列車ダイヤが、文献 [1] と比較して遅延および旅客影響を小さくするかを7章で検証するためである (7.1 節、研究課題で詳述)。

6.2 モデルを構成する制約条件式

提案モデルを構成する制約条件式は、以下の文献 [1] の制約条件式の一部、および本論文5章で新たに定義した制約条件式の組合せからなる。これらの式により、列車の安全を確保する運行上の制約を満たした最適ダイヤを得られる。

- $N_{stranded}$ を構成する旅客に関する変数の定義式 (文献 [1] の式 (1) から (5))
- 列車の種別、停車時間、定員の制約、および時刻表ダイヤと運転整理後ダイヤの関係式 (文献 [1] の式 (22) から (29))
- 本論文 5.2 節の式 (4) から (7) (新たに緩和、立式した着発順序の制約)
- 本論文 5.3 節の式 (8), (11), (12), (14) とその分岐、およびそれらを表すのに必要な時刻の定義式 (9), (10), (14) (先行列車との位置関係ごとに新たに立式した、区間の走行時間の制約)

なお、提案モデルの実装時 (7.2.1 項参照) は、得られ

る列車ダイヤにおいて各列車が各区間で 5.3 節の (A1), (A2), (B1) および (B2) のどのパターンへ分岐したかが分かるようにした. その方法として, 各列車各区間で分岐を判定する 0-1 変数を実装上のみで定義し, ソルバによるモデルの実行時にこれらの解も出力するようにした.

7. 計算機実験

本章では, 6 章で述べた提案モデルを実装し, MIP ソルバの CPLEX に入力してシミュレーションを実行する. これにより, 7.1 節の研究課題に基づき提案モデルの評価実験を行う. 行った実験の環境と概要を 7.2 節で示し, 7.3 および 7.4 節で実験ごとに内容, 結果および得られる議論を記す.

7.1 研究課題

本研究において検証したい研究課題は以下の 2 つである. 各研究課題の検証は各実験内容に対応している.

研究課題 1 T_{delay} および $N_{stranded}$ が減少するか.

3 章で述べたとおり, 移動閉塞による列車間距離詰めた運転は, とくに数分の小さな遅延に対して減少効果があるとされる. また, それにともない旅客への影響縮小にも効果があると仮説を立てる. これらが提案モデルの実行結果に表れるかどうか検証する. そのために, 目的関数 (式 (15)) を最小化したとき, 提案モデルから得られる T_{delay} および $N_{stranded}$ の値が, 従来の固定閉塞前提のベースモデル [1] から得られる同値より減少するかどうか, 7.3 節実験 1 で検証する.

研究課題 2 モデルの実行時間はどのくらいか.

提案モデルの実行結果において, 最適解の導出にかかる実行時間はどのくらいか, また, 遅延シナリオごとに実行時間の差があるかどうかを 7.4 節実験 2 で検証する.

7.2 実験概要

ここでは, モデルの実装を含む実験の環境, および提案モデルを適用した鉄道路線のデータについて記す.

7.2.1 実験環境

実験には, CPU が Intel Core i7-7500U, 実装 RAM が 8GB, OS が 64 ビット版 Windows10 の計算機を使用した. また, MIP ソルバとして, CPLEX Optimization Studio 12.10.0 Academic Edition (IBM 社) を使用した. 以下 CPLEX と呼ぶ.

またモデルの実装には, CPLEX の入力モデルの記述専用開発されたモデリング言語である OPL 言語を使用した. この OPL を用いて, 提案モデルの各要素 (2.1.2 項 図 1 のモデルファイルの要素 (1) から (4)) を記述したモデルファイルを作成した. また, 実験における比較対象として, ベースモデル [1] の実装も行った. 目的関数は提案

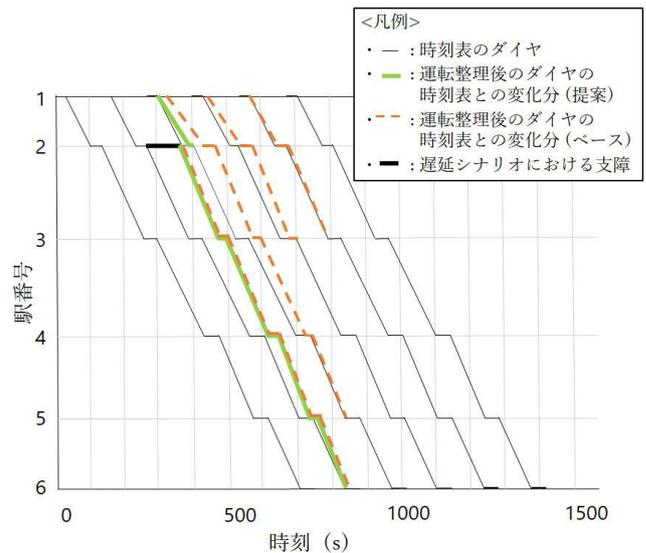


図 10 ケース 3 での時刻表および各モデルから得たダイヤ

Fig. 10 A Diagram of case 3.

表 3 適用路線の停車時間および旅客に関する各値

Table 3 Constant values about dwelling and passengers.

i	1	2	3	4	5	6
$Dw_{i,j}^{max}$ (s)	90	90	105	105	100	100
$S_{i,j}^{min}$ (s)	25	25	40	40	40	35
$Dw_{i,j}$ (s)	30	30	45	45	45	40
$\lambda_{i,j}$	1.90	2.01	1.99	2.04	2.07	0.0
$\omega_{i,j}$	0.0	0.25	0.23	0.08	0.27	1.0

モデルの式 (15) と同様であり, 制約条件式は文献 [1] のままである.

7.2.2 適用した路線データ

本実験でモデルを適用した路線は, 架空の大都市地下鉄路線である. 駅数 $|M|$ と列車数 $|N|$ はともに 6 とした. 区間数は $|k| = |N| - 1 = 5$ となる. ATO の運転レベルの数は全区間において $|L| = 5$ とする. また, 遅延のない通常時 (時刻表どおり) のダイヤは, 連続する 2 列車の出発および到着の間隔を全駅一定の 135 (s) とすることで定める (グラフ化したものは図 10 参照). また全列車全区間, ATO の運転レベルを $l = 2$ として走行する.

以下では, 実験で用いた定数の値を記す. まず, 各駅 i の時刻表どおりのダイヤでの各駅停車時間 $Dw_{i,j}$, 最小および最大許容停車時間 $Dw_{i,j}^{min}$ と $S_{i,j}^{max}$, 旅客到着時間比率 $\lambda_{i,j}$, および対乗客数の降車人数比 $\omega_{i,j}$ を定めた. これらの値を表 3 に示す. 続いて, 列車が区間 k 全体を運転レベル l で走行するときの走行時間 $R_{k,j}^l$ の値, および最高速度 $V_{k,j}^{max}$ の値を表 4 に示す. また, 各区間 i の区間長 x_k の値を表 5 に示す.

最後に全列車, 区間で共通する定数値を以下のように定めた. ATO の加速度 $r_{ac} = 1.0$ を (m/s²), 移動閉塞ブレーキの減速度を $r_{mbs} = 1.20$ (m/s²) とし, 列車間の停止限界距離を $L_s = 120$ (m), 列車長を $L_t = 120$ (m) と

表 4 適用路線における $R_{k,j}^l$ および $V_{k,j}^{max}$ の値 (s)

Table 4 Values of $R_{k,j}^l$ and $V_{k,j}^{max}$ (s).

	k	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$	$l = 5$
$R_{k,j}^l$	1	63	73	83	93	118
	2	105	115	125	135	160
	3	123	133	143	153	178
	4	87	97	107	117	142
	5	78	88	98	108	133
$V_{k,j}^{max}$	1	19.12	14.29	11.78	10.12	7.60
	2	17.97	15.75	14.10	12.80	10.46
	3	15.31	13.83	12.65	11.66	9.80
	4	20.80	17.27	14.96	13.27	10.47
	5	20.75	16.93	14.17	12.43	9.63

表 5 適用路線における区間長 x_k の値 (m)

Table 5 Distances of x_k .

k	1	2	3	4	5
x_k	839.0	1564.0	1649.0	1377.0	1188.0

設定した。また、式 (12)、式 (14) で用いる時間定数の値を、それぞれ $T_{s1} = 20$ (s) および $T_{s2} = 30$ (s) と設定した。さらに、ベースモデルの実装では、本論文の式 (1) から (3) も制約として定義する。それらの式で用いる、 h_{min}^{sec} 、 h_{min}^{sta} は、順に 105 (s)、70 (s) とした。影響される旅客総和 $N_{stranded}$ の計算 (文献 [1] の式 (1) から (5)) に必要な列車定員 P_{cap} の値は 1,440 とした。ダイヤを含む以上のすべての定数のうち、文献 [1] と共通するものは、文献 [1] で用いられた値に基づいている。

以上の値に加えて実験では、実行ごとに遅延シナリオの情報をデータファイルに入力した。このデータファイルと 7.2.1 項で述べたモデルファイルを合わせた実行により、各シナリオに対して目的の列車ダイヤを得た。遅延シナリオの情報は、出発遅れが始まった駅 d_l 、始まった列車 d_t 、および d_l での d_t の出発遅延時間 t_d 、の 3 値の組からなる。

7.3 実験 1

実験 1 では、研究課題 1、ベースモデルと比較した提案モデルにおける T_{delay} および $N_{stranded}$ の値の減少を検証した。CPLEX 上で、ベースモデルと提案モデルをそれぞれ複数の遅延シナリオで実行し、両モデルで目的関数が最小化されたときの T_{delay} および被影響旅客数 $N_{stranded}$ の値をシナリオごとに比較した。

遅延シナリオは、 d_l が始発駅 (1) のときと途中の駅 (2) で同様に効果が得られるか、また d_t が最初の方の列車 (2) か後の方の列車 (4) で効果に差が出るかを確かめるべく、 $(d_l, d_t) = (1, 2), (1, 4), (2, 2), (2, 4)$ の 4 つ用意した。また、この実験では移動閉塞による数分の遅延に対する効果を検証したい。したがって t_d の値は、時刻表どおりでの列車間隔が 135 (s) と短いことも考慮して、共通して 100 (s) と

表 6 実験 1 の各ケースでの目的関数値

Table 6 Objective function values of Ex.1.

ケース No.	β	シナリオ (d_l, d_t, t_d)	T_{delay}		$N_{stranded}$	
			ベース	提案	ベース	提案
1	0	(1,2,100)	979	508	1,039	1,039
2	0	(1,4,100)	942	486	706	706
3	0	(2,2,100)	875	436	1,062	1,062
4	0	(2,4,100)	796	394	706	706
5	1	(1,2,100)	1,203	775	760	723
6	1	(1,4,100)	952	496	685	685
7	1	(2,2,100)	1,145	684	719	757
8	1	(2,4,100)	806	404	685	685

表 7 ケース 3、提案モデルでの (分岐、運転レベル) の組

Table 7 Branches and ATO levels of case 3, proposal.

k	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$
1	A1, 2	A1, 2	A2, 2	A1, 2	A1, 2	A1, 2
2	A1, 2	A1, 1	B2, 1	A1, 2	A1, 2	A1, 2
3	A1, 2	A1, 1	B1, 1	A1, 2	A1, 2	A1, 2
4	A1, 2	A1, 1	A1, 2	A1, 2	A1, 2	A1, 2
5	A1, 2	A1, 1	A1, 2	A1, 2	A1, 2	A1, 2

した。また、目的関数 (式 (15)) に含まれる定数値 (α, β) の値は、 T_{delay} のみを考慮した (α, β) = (1, 0)、 $N_{stranded}$ も同時に考慮した (α, β) = (1, 1) の 2 パターン用いた。上記の各遅延シナリオとこれら (α, β) の値設定を組み合わせ、8 つの実行ケースを作成した。

実験 1 の結果を表 6 に示す。上記の実行ケースごとに、設定した目的関数の値 (式 (15)) が最小化されたとき両モデルから得られる T_{delay} および $N_{stranded}$ の値を比較している。なお、実験 1 で用いたすべての実行ケースについて、両モデルから得られたダイヤおよび変数の解は、各モデルのすべての制約条件式を満たしていることを確認済みである。

7.3.1 実験 1 の結果から得た議論

表 6 から、研究課題 1、提案モデルから得た T_{delay} および $N_{stranded}$ の値が、ベースモデルから得た同値より減少しているか検証し、原因を考察する。初めに、旅客への影響を考慮しないケース ($\beta = 0$) の T_{delay} の値変化について検証する。これらのケースでは、表 6 の全遅延シナリオに共通して、提案モデルから得た T_{delay} はベースモデルから得た同値の 5 割程度に減少した。この減少の要因は、5.3 節で提案したパターン (A2) および (B) への分岐が、ベースモデルよりも列車どうしが接近した運転を可能にしたためだと考える。これを、表 6、ケース 3 での、時刻表のダイヤおよび両モデルから得たダイヤを図示した図 10、および提案モデルから出力された分岐パターンと運転レベルを示した表 7 より説明する。図 10 より、遅延の当該列車 2 の各駅での遅れ方は両モデルで等しいことが分かる。これは表 7 より、両モデルで同様に最高速の運転レベル

1に従う走行を選択したためだと考える。一方で、1本後の列車3は、駅2から4にかけて、提案モデルでの各着発時刻の遅延がベースモデルより30から70秒ほど短くなった。ここで表7より、列車3は、駅2から4に至る区間1から3で、列車間距離を詰める(A2)または(B)に分岐している。この分岐が出発を早めることで、遅延が減少していると考えられる。以上よりこれらのケースでは、新たに想定した移動閉塞にともなう列車間距離を詰めた運転が遅延減少に機能していると考え、 T_{delay} については研究課題1の移動閉塞による減少効果を検証できた。

次に、旅客への影響も考慮するケース($\beta = 1$)について検証する。こちらでも提案モデルの T_{delay} は、ベースモデルでの同値の約5割に減少した。また上記の($\beta = 0$)のケース同様、(A2)や(B)への分岐が見られた。したがって旅客への影響を考慮したとしても、新たに想定した列車どうしの距離を詰めた運転が遅延減少に機能していると考えられる。一方で $N_{stranded}$ の値は、遅延シナリオによって両モデルの比較結果に差が出た。 $d_t = 4$ では、両モデルの値は同じだった。これは、列車3以降では両モデルとも列車に乗りきれない乗客が0であったため、列車4以降の遅延による $N_{stranded}$ への影響がなかったためだと考える。一方で $d_t = 2$ では、提案モデルの値はベースモデルに比べて、 $d_l = 1$ のとき約5%減少、 $d_l = 2$ のとき約5%程度した。まず $d_l = 1$ のとき、提案モデルではベースモデルと比べて、駅4、5で遅延の当該列車2に乘れない人数が減少した。この理由は、提案モデルでは1本前の列車1が、駅4、5の出発を調整し遅らせたことで、列車1の出発から列車2の到着までの時間が短くなり、その間に駅4、5に到着した旅客数が減少したからだと考えられる。ベースモデルで同様のことを行くと、列車間隔を空ける制約から後続の列車2の到着も遅れて遅延が大きくなってしまふ。よってこの措置は提案モデル特有の列車間隔を詰めた運転に基づくといえる。しかし一方 $d_l = 2$ では、駅5で当該列車2に乘れない人数が増加した。この理由は、提案モデルでは1本前の列車1が、遅延を減らすべく駅5をより早く出発したため、列車1の出発から列車2の到着まで時間が長くなり、その間に駅5に到着した旅客数が増加したためだと考える。このように、遅延の減少と旅客への影響の縮小は、しばしばトレードオフの関係となると考える。ただ、そのかわり列車1では早く出発したことで列車の混雑が抑えられた。本研究では、予定どおりの列車に乗りきれない人数 $N_{stranded}$ のみを旅客への影響指標としたが、混雑度もまた旅客の不満となる。したがって、旅客への影響指標を、混雑度なども加味したより複雑なものに改良することを今後の課題としてあげる。その指標を用いれば、より多くのシナリオで提案モデルの旅客への影響に対する効果を検証できるのではないかと考える。

表8 実験2の各ケースでの実行時間(s)

Table 8 Execution time of Ex.2.

ケース No.	β	シナリオ (d_l, d_t, t_d)	t_e	
			ベース	提案
1	0	(1,2,100)	2.1	165.0
2	0	(1,4,100)	0.8	44.9
3	0	(2,2,100)	1.4	88.5
4	0	(2,4,100)	0.7	31.2
5	1	(1,2,100)	0.5	26.8
6	1	(1,4,100)	0.2	33.7
7	1	(2,2,100)	0.7	24.7
8	1	(2,4,100)	0.3	24.3

7.4 実験2

実験2では、研究課題2、モデルの実行時間について調べた。実験1と同じ実行ケースごとに、ベース、提案両モデルを実行し、CPLEXが最適解を求めるまでの実行時間を比較した。なお、実行時間の値は、求解後CPLEXのAPI上に表示されたものを用いる。実験2の結果を、表8に示す。

7.4.1 実験2の結果から得た議論

表8より、研究課題2、CPLEXによる提案モデルの実行時間について議論する。まず全ケースにおいて、ベースモデルの実行時間が1秒前後であったのに対し、提案モデルでは最小でも20秒以上を要した。大きな理由として、最適値を求めるべき変数の個数が、全ケース共通でベースモデルの約1,000に対し、提案モデルでは約7,000と、約7倍大きいことを考える。これは、提案モデルでは分岐の記述に導入した $t_{1(k,j)}$ などの時定数や、6.2節で述べた分岐を示す変数などを実装上含むためである。

次に、ケースごとの実行時間の差を議論する。1点目として表8のとおり、遅延シナリオによらず、 T_{delay} のみを最小化する $\beta = 0$ のときの方が、 $N_{stranded}$ も考慮する $\beta = 1$ のときより実行時間を要した。この理由は、旅客の影響 $N_{stranded}$ を考慮し小さくすることが、ダイヤ決定に対し制約条件の働きを担っており、考慮しない場合ダイヤ決定の自由度が増してしまうためだと考える。また2点目として、 d_l と d_t の値が小さい方が実行時間が長かった。これはより多くの列車と区間で遅れの削減を考慮する必要があるためではないかと考える。ケース1の実行時間が他のケースよりとくに大きいのは、以上の2点で実行時間が長くなるケースの重ね合わせだったためだと考える。

8. 関連研究

本研究の提案に関連しかつ発展させるための技術として、大路線の運転整理を、区間や時間帯で分割したMIPとして解く研究[19]を紹介する。本研究の提案モデルを、駅数や列車数がより大きい現実の路線全体に適用すると、実験2の表8以上に時間がかかることが予想される。しかし、

文献 [19] でサーベイされている技術を用いて、区間や列車で分割した並列処理ができれば、実行時間の巨大化を防いだまま、提案モデルを現実の大規模路線にも適用できるのではないかと考える。

9. あとがき

本研究の目的は、移動閉塞、自動運転 (ATO) という 2 つの新しい鉄道システムの両方を考慮した鉄道の運転整理を、MIP モデルとして定式化することであった。この目的を、ATO のみを考慮した既存モデル [1] を拡張し、移動閉塞にも適用するという手法で達成することを考えた。そのために、定義した列車間距離を詰めた運転を認めるように、移動閉塞の定義に基づいて文献 [1] の一部の制約条件式を書き換えることを提案した。拡張後のモデルを MIP ソルバ上で実行した結果、特定のシナリオに対して遅延の総和や旅客への影響の指標を最小化する列車ダイヤを求めることができた。また、新たに書き換えた制約式の機能による移動閉塞の遅延減少効果を検証できた。さらに一部のシナリオでは、予定していた列車に乗れなかった旅客数を指標として、旅客影響の減少効果も確認できた。

今後の課題としては、旅客への影響の指標を改良し、より多岐にわたるシナリオで提案モデルによる旅客への影響効果が得られるかどうか検証することがあげられる。また、提案モデルの変数の個数を減らし実行時間を短縮するように、実装上の工夫を考案することがあげられる。また、今回想定した移動閉塞に比べて、実用化している CBTC などのシステムの制動はより複雑なものである。この制動を定式化し本研究の提案モデルに組み込むことが実用に向けた課題となる。さらに本研究の発展として、8 章であげた分割 MIP を用いた実路線への適用や、本モデルの入力となる遅延情報の取得・出力データの転送も含めた包括的な自己適応システムとしての運転整理システムの作成などがあげられる。

参考文献

[1] Hou, Z., Dong, H., Gao, S., Nicholson, G., Chen, L. and Roberts, C.: Energy saving metro train timetable rescheduling model considering ato profiles and dynamic passenger flow, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.20, No.7, pp.2774–2785 (2019).

[2] Tamura, K., Sato, K. and Tomii, N.: A Train Timetable Rescheduling MIP Formulation with Additional Inequalities Minimizing Inconvenience to Passengers, *IEICE Trans. Information and Systems (Japanese edition)*, Vol.97, No.3, pp.393–404 (2014).

[3] Pascoe, D.R. and Eichorn, N.T.: What is communication-based train control?, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol.4, No.4, pp.16–21 (2009).

[4] Miyaguchi, N., Uchiyama, D., Inada, I., Baba, Y. and Hiura, I.: The radio-based train control system atacs, *WIT Trans. Built Environment*, Vol.155, pp.175–183

(2014).

[5] Wang, Y., Ning, B., Cao, F., Schutter, D.B. and Van Den Boom, T.: A survey on optimal trajectory planning for train operations, *Proc. 2011 IEEE International Conference on Service Operations*, pp.589–594 (2011).

[6] Fang, W., Yang, S. and Yao, X.: A survey on problem models and solution approaches to rescheduling in railway networks, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.16, No.6, pp.2997–3016 (2015).

[7] He, Z.: Research on Improved Greedy Algorithm for Train Rescheduling, *7th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS 2011)*, pp.1197–1200 (2011).

[8] Pochet, J., Baro, S. and Sandou, G.: Supervision and rescheduling of a mixed CBTC traffic on a suburban railway line, *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT 2016)*, pp.32–38 (2016).

[9] Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., Toth, P., Veeleenturf, L. and Wagenaar, J.: An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.63, pp.15–37 (2014).

[10] Lamorgese, L., Mannino, C., Pacciarelli, D. and Krasemann, T.J.: Train dispatching, *Handbook of Optimization in the Railway Industry*, pp.265–283, Springer (2018).

[11] Wen, C., Huang, P., Li, Z., Lessan, J., Fu, L., Jiang, C. and Xu, X.: Train dispatching management with data-driven approaches: A comprehensive review and appraisal, *IEEE Access*, Vol.7, No.114, pp.547–571 (2019).

[12] Šemrov, D., Marsetič, R., Žura, M., Todorovski, L. and Srđić, A.: Reinforcement learning approach for train rescheduling on a single-track railway, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.86, pp.250–267 (2016).

[13] Pochet, J., Baro, S. and Sandou, G.: Automatic train supervision for a CBTC suburban railway line using multiobjective optimization, *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2017)*, pp.1–6 (2017).

[14] Xun, J., Ning, B., Li, K. and Tang, T.: An optimization approach for real-time headway control of railway traffic, *2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings (ICIRT 2013)*, pp.25–31 (2013).

[15] Xu, P., Corman, F., Peng, Q. and Luan, X.: A train rescheduling model integrating speed management during disruptions of high-speed traffic under a quasi-moving block system, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.104, pp.638–666 (2017).

[16] (株)日本信号：都営大江戸線 無線式列車制御システムを全線一括受注, (株)日本信号ホームページ, 入手先 (https://www.signal.co.jp/spdf/9_190912_oedoCTBC.pdf) (参照 2021-05-25).

[17] (株)三菱電機：運行システム, 入手先 (<https://www.mitsubishielectric.co.jp/society/traffic/products/operation/>) (参照 2021-05-25).

[18] 坂井桂祐, 大西 亘, 古関隆章, 田中和広, 森田隼史, 徳原克俊：高頻度運転時の遅延伝搬を抑制する先行列車最適追従制御, 電気学会研究会資料, No.26, pp.7–12 (2020).

[19] Lamorgese, L., Mannino, C. and Piacentini, M.: Advances and Trends in Optimization with Engineering Applications, pp.65–75 (online), DOI: 10.1137/1.9781611974683.ch6 (2017).



川添 宏介 (学生会員)

2021年早稲田大学基幹理工学部情報理工学科卒業。2021年より同大学理工学術院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻修士課程に所属，本位田・鄭研究室で混合整数計画法による最適化を研究。



山内 拓人

2021年早稲田大学理工学術院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻修士課程卒業。2021年より同専攻博士後期課程に所属，本位田・鄭研究室で自己適応と離散制御器合成について研究。



鄭 顕志 (正会員)

2008年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。同大学助手，助教，国立情報学研究所助教，准教授，早稲田大学研究院准教授/主任研究員を経て，2019年より早稲田大学准教授，現在に至る。現在，国立情報学研究所 GRACE センター特任准教授を兼任。博士（工学）（早稲田大学）。自己適応ソフトウェア，ソフトウェアアーキテクチャ，モデル駆動工学の研究に従事。



富井 規雄

1978年京都大学大学院情報工学専攻修了。日本国有鉄道，(財)鉄道総合技術研究所を経て，千葉工業大学情報工学科教授。2019年より日本大学総合科学研究所教授，鉄道工学リサーチセンター副センター長。著書として、『鉄道ダイヤ回復の技術』，『鉄道ダイヤのつくりかた』（オーム社）等。京都大学博士（情報学）。



本位田 真一 (正会員)

1978年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。(株)東芝を経て，国立情報学研究所教授，同研究所副所長，東京大学大学院情報理工学系研究科教授を歴任，2018年より早稲田大学理工学術院教授，現在に至る。現在，英国 UCL 客員教授ならびに国立情報学研究所 GRACE センター長を兼任。本会フェロー。