

実在する線路配置を考慮した 混合整数計画法に基づく運転整理支援システム

角谷 太郎* 古関 隆章 (東京大学)

A Train Rescheduling Support System Based on Mixed Integer Programming
Applicable to Actual Train Tracks
Taro Kakutani*, Takafumi Koseki, (The University of Tokyo)

When a disruption happens, rescheduling of train operations is conducted by train dispatchers to recover the original operational plan. Under existing circumstances, the task is conducted manually, and a computer-aided rescheduling support system is being required for systematic and efficient train rescheduling. A systematic mathematical programming approach for seeking the “optimal” train rescheduling was presented in previous works, but this system was merely applicable to double track sections. The authors extend the mathematical methodology for applying it to operations at not only double tracks but also quadruple track sections.

キーワード：鉄道，運転整理，数理計画，混合整数計画，線路配置，複々線

(Railway, train rescheduling, mathematical programming, mixed integer programming, railway layout, quadruple track line)

1. はじめに

鉄道は他の交通と比較すると、エネルギー特性、土地利用効率、資源問題、安全性などの特性が目立って優れていると言われている。また、鉄道の大きな特長の一つとして定時運行率の高さが挙げられる。特に日本の鉄道は世界的に見ても高い定時運行性を誇っており、諸外国においては当たり前とされる規模の到着時間の遅れでも日本においては遅延とみなされる。そのため、事故等で列車ダイヤが乱れた場合には速やかに復旧させることが求められる。乱れた列車ダイヤの調整業務を運転整理と呼ぶ⁽¹⁾。

近年は運行管理システムの導入が進み、平常時の運行管理に関しては自動化が進んでいる。その一方で運転整理については、ほぼすべてが人手によって行われており、鉄道事業者にとって大きな負担となっている。また、運転整理の作業は指令員の経験や勘に頼る部分も大きく、後継者への引き継ぎが難しいといった問題点もある。そのため、運転整理案を自動で作成するシステムの導入が強く望まれている⁽²⁾。

本研究の先行研究において、今まであまり扱われていなかった、旅客損失に主眼をおいた運転整理最適化手法が提案された⁽³⁾。これにより、旅客の旅行時間増大量の観点から最適な運転整理案を自動で作成することができた。しか

し、先行研究におけるシステムには実用化に向けてまだまだ課題が残されている。本研究では先行研究の課題の中で、実用化のために第一に行うべきであると思われる現実の路線への対応を目的としてシステムの拡張を行った。

2. 提案する運転整理支援システム

〈2-1〉 システムの構成

本研究における運転整理支援システムでは、本研究の先行研究にて開発されたシステムの構成を用いるものとする。ここでは、列車運行や事故の発生に関する情報収集が完了している状態を仮定しており、それらの情報を入力データとして与える。

まず、運転整理を行わない場合の列車運行シミュレーションを行い、その結果から遅延収束目標時刻を決定する。ここで運転整理を行わない場合とは、計画時の列車走行時分に与えられている余裕（余裕時分）を用いた回転運転のみを行う場合を指す。ここでは、列車運行を数理モデル化し、混合整数計画法と呼ばれる最適化手法を用いてシミュレーションが行われる。遅延収束目標時刻を決定する指針は様々であるため、本研究では運転整理を行わない場合に遅延が収束する時刻を境界時刻とし、その時刻までに遅延が解消される仕様としている。

次に、決定された遅延収束時刻と旅客の情報に基づいて

最適な運転整理案の作成を行う。最適化の指標としてここでは旅客の損失を目的関数として表現し、混合整数計画法を用いることで最適化を行う。

最後に、得られた運行計画を運転整理案として出力する。

〈2・2〉 混合整数計画法

本研究では最適化手法として混合整数計画法を用いる。整数値をとる変数といくつかの等式や不等式の制約のもとで、目的とする関数を最大化または最小化する問題を整数計画問題と呼び、整数値を取る変数と実数値を取る変数が混在する問題を混合整数計画問題と呼ぶ。

混合整数計画問題の解法には様々な手法が存在するが、問題の性質によって得意不得意があり、万能なアルゴリズムは発見されていない。近年では数理計画ソルバと呼ばれる様々な数理計画を解くためのアルゴリズムを搭載されたソフトウェアの開発が進められており、本研究でも定式化した混合整数計画問題を実際に解く部分では、商用の数理計画ソルバ (CPLEX12.2) を用いて求解を行う⁽⁴⁾。

〈2・3〉 最適化の指標

運転整理案の最適性の評価尺度を定めることは非常に困難である。これは、事故の規模や発生時間帯、線区の性格等によって重視する項目が異なることがあるためである。本研究における評価尺度は、鉄道事業者側の都合だけではなく、旅客の視点が考慮されるべきである必要があるが、乱れによる旅客の損失にも旅行時間の増大や乗換の手間、混雑率など、様々な要因が絡んでくる。

本研究では旅客の損失のなかで最も顕著である列車待ち時間を含む旅行時間の増大量に着目し、平常時の旅客移動情報 (OD データ) を用いて最適化を行う。旅行時間の総量を評価値として最小化すると旅客全体での損失は最適化されるが、平常時よりも旅行時間が短くなる旅客と旅行時間が長くなる旅客の間で損得の偏りが生じる恐れがあるため、ここでは、旅行時間の総量ではなく平常時の旅行時間からの増大量を用いる。

3. 問題設定及び制約条件

〈3・1〉 問題設定

〈3・1・1〉 先行研究における路線モデル

先行研究における路線モデルを図 1 に示す。上下方向にそれぞれ 1 つずつ個別の軌道を持つ路線区間 (複線区間) において、普通列車と快速列車の 2 列車種別が混在するダイヤについて考える。上記のダイヤにおいて、何らかの障害によって初期遅延が発生した際に、以降の最適な運転整

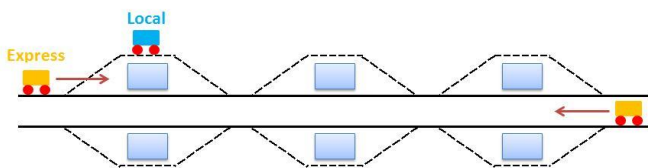


図 1 先行研究における路線モデル

Fig. 1 Previous track model

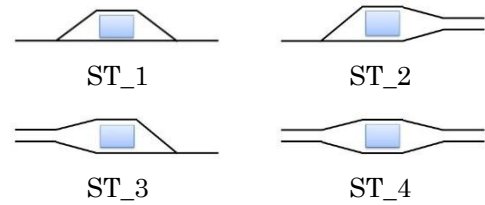


図 2 本研究における拡張モデル

Fig. 2 Models for upgrading the MP-approach

理ダイヤを決定する。最適化の指標に関しては、2.3 節に記したように、旅客の旅行時間増大量の総和の最小化を目指す。運転整理案の作成に当たっては、列車の走行番線・順序を調整する運転整理手法と時隔調整のみを扱っている。

〈3・1・2〉 本研究における拡張モデル

先行研究における問題設定では複線区間のみを対象としていた。しかし、現実の問題には複線区間以外の路線も多く、実用化のためには複雑な路線に対応させるために拡張する必要がある。本研究においては、駅間の線路の本数が 1 本または 2 本の場合に対応できるように、それぞれの駅を図 2 に示す 4 パターンに分けて考える。

〈3・2〉 列車運行に関する制約条件

3.1 節で示した問題設定において、機器や設備の性能上、各列車が満たさなければならない物理的制約条件及び列車運行の運営上の都合により課される論理的制約条件を以下に示す。

【物理的制約】

- ① 列車は各駅間に定められた基準運転時分未満で走行することができない
- ② 列車は各駅間に定められた最小停車時分に満たずに出発することができない
- ③ 列車の各駅での進入・進出の際は、同一線路を走る先行列車との間隔が最小進入・進出時隔でなくてはならない
- ④ 列車は同一番線上で他列車を追い抜くことができない
- ⑤ 列車は同一線路上で他列車を追い抜くことができない
- ⑥ 各駅で同時に停車・通過できる列車数は、着発線数以内でなくてはならない

【論理的制約】

- ⑦ 列車は計画時刻より早く出発してはならない
- ⑧ 列車は同種別の別列車を追い抜いてはならない
- ⑨ 普通列車は快速列車を追い抜いてはならない

〈3・3〉 旅客流動に関する制約条件

旅客流動を数理モデル化するにあたって、以下の近似及び仮定を用いる。

- a) 列車は列車運行に乱れが生じていても、平常時と同時刻に出発駅に出現し、目的駅に向かう
 - b) 旅客は常に目的駅への最速達列車を選択する
 - c) 旅客はある一定の時間ごとにまとまって駅に出現する
- 旅客群の経路選択を定式化するにあたって、満たさなければならない制約を以下に示す。

- i 各旅客群は一つの経路しか選択できない
- ii 各旅客群はそれぞれの出現時刻以降に出発する列車にしか乗車できない
- iii 各旅客群は乗り継ぐ余裕のある列車の組み合わせしか選択できない
- iv 各旅客群の旅行時間は選択した経路の所要時間に依存する

4. 定式化

〈4・1〉 列車運行の定式化

駅sにおける列車jの着発時刻に対応する変数をそれぞれ a_j^s, d_j^s とおく。列車の順序関係を表わすために、各列車間の前後関係に対応する変数 x を以下のように定義する。

$$x_{j,j'}^s := \begin{cases} 1 & \text{駅sにおいて列車j'が列車j以降に発車する} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

また、追い抜きの可否や番線の競合等を表わすため、駅sにおける列車jの番線利用の有無に対応する変数 r を以下のように定義する。

$$r_{j,q}^s := \begin{cases} 1 & \text{駅sにおいて列車jが番線qを使用する} \\ 0 & \text{使用しない} \end{cases}$$

順序関係の定義より、 $x_{j,j'}^s$ が満たすべき条件は式(1), (2)で表される。ここで、S, Tはそれぞれ駅と列車の集合を表す。

$$x_{j,j}^s = 1 \quad (\forall s \in S, \forall j \in T) \quad (1)$$

$$x_{j,j'}^s + x_{j',j}^s = 1 \quad (\forall s \in S, \forall j, j' \in T, j \neq j') \quad (2)$$

同種別の列車間、及び普通列車による快速列車の追い抜き禁止は式(3), (4)で表される。ここで、 T_{rap}, T_{loc} はそれぞれ快速列車と普通列車の集合を表している。また、式(5)によって一度追い抜かれた列車による追い抜きが禁止される。

$$x_{j,j'}^s = 1 \quad (\forall s \in S, \forall j, j' \in T_{rap}, j \leq j') \quad (3)$$

$$x_{j,j'}^s = 1 \quad (\forall s \in S, \forall j \in T, \forall j' \in T_{loc}, j \leq j') \quad (4)$$

$$x_{j',j}^s \geq x_{j,j'}^s \quad (\forall s, s' \in S, \forall j \in T, \forall j' \in T_{loc}, s' = s + 1) \quad (5)$$

次に、駅sにおける列車jの計画着発時刻をそれぞれ A_j^s, D_j^s とすると、列車の早発禁止は式(6)で表わされる。

$$d_j^s \geq D_j^s \quad (\forall s \in S, \forall j \in T) \quad (6)$$

また、快速列車は快速通過駅では停車しない。これは式(7)によって表される。

$$d_j^s = a_j^s \quad (\forall s \in S_{loc}, \forall j \in T_{rap}) \quad (7)$$

駅sと駅s+1間における列車jの基準運転時分を LR_j^s 、駅sにおける列車jの最小停車時分を LI_j^s としたとき、走行時分、停車時分に関する制約は式(8), (9)によって表される。

$$d_j^s - a_j^s \geq LI_j^s \quad (\forall s \in S, \forall j \in T) \quad (8)$$

$$a_{j'}^s - d_j^s \geq LR_j^s \quad (\forall s, s' \in S, \forall j \in T, s' = s + 1) \quad (9)$$

駅の集合Sを図2に従ってST_1~4に分類する。駅sにおける最小進入時隔と最小進出時隔をそれぞれ LI_s^{arr}, LI_s^{dep} としたとき、最小進入時隔に関する制約は式(10), (11), (12)によって表される。

$$a_{j'}^s - a_j^s \geq LI_s^{arr} - M(1 - x_{j,j'}^s) \quad (\forall s, s' \in ST_1 \cup ST_2, \forall j, j' \in T, s' = s + 1, j \neq j') \quad (10)$$

$$a_{j'}^s - a_j^s \geq LI_s^{arr} - M(1 - x_{j,j'}^s) \quad (\forall s, s' \in ST_3 \cup ST_4, \forall j, j' \in T_{loc}, s' = s + 1, j \neq j') \quad (11)$$

$$a_{j'}^s - a_j^s \geq LI_s^{arr} - M(1 - x_{j,j'}^s) \quad (\forall s, s' \in ST_3 \cup ST_4, \forall j, j' \in T_{rap}, s' = s + 1, j \neq j') \quad (12)$$

同様に、最小進出時隔に関する制約は式(13), (14), (15)によって表される。

$$d_{j'}^s - d_j^s \geq LI_s^{dep} - M(1 - x_{j,j'}^s) \quad (\forall s \in ST_1 \cup ST_3, \forall j, j' \in T, j \neq j') \quad (13)$$

$$d_{j'}^s - d_j^s \geq LI_s^{dep} - M(1 - x_{j,j'}^s) \quad (\forall s \in ST_2 \cup ST_4, \forall j, j' \in T_{loc}, j \neq j') \quad (14)$$

$$d_{j'}^s - d_j^s \geq LI_s^{dep} - M(1 - x_{j,j'}^s) \quad (\forall s \in ST_2 \cup ST_4, \forall j, j' \in T_{rap}, j \neq j') \quad (15)$$

駅sの番線集合を Q_s としたとき、各列車の使用する番線は式(16)によって一意に定められる。

$$\sum_{q \in Q_s} r_{j,q}^s = 1 \quad (\forall s \in S, \forall j \in T) \quad (16)$$

駅ST_2, ST_3, ST_4は複々線区間と繋がっているため、これらの駅では各列車は使用する番線によって走行する線路が決定される。このとき、複々線区間の線路上での快速列車による普通列車の追い抜きを可能にするために、列車種別によって使用する番線を固定する必要がある。これは式(17), (18)によって表される。

$$r_{j,1}^s = 1 \quad (\forall s \in ST_2 \cup ST_3 \cup ST_4, \forall j \in T_{rap}) \quad (17)$$

$$r_{j,2}^s = 1 \quad (\forall s \in ST_2 \cup ST_3 \cup ST_4, \forall j \in T_{loc}) \quad (18)$$

また、番線開通時分を LI^{track} としたとき、番線設備上の制約は式(19)によって表される。

$$a_{j'}^s - d_j^s \geq LI^{track} - M(3 - x_{j,j'}^s - r_{j,q}^s - r_{j',q}^s) \quad (\forall s \in S, \forall j, j' \in T, \forall q \in Q_s, j \neq j') \quad (19)$$

運行乱れの情報をモデルに加える。駅sにおいて列車jの計画着発時刻に加わる遅延時分をそれぞれ $SD_{sj}^{arr}, SD_{sj}^{dep}$ とおく

$$a_j^s - A_j^s \geq SD_{sj}^{arr} \quad (\forall s \in S, \forall j \in T) \quad (20)$$

$$d_j^s - D_j^s \geq SD_{sj}^{dep} \quad (\forall s \in S, \forall j \in T) \quad (21)$$

また、遅延が発生するまでは通常ダイヤ通りに運行する。遅延の発生時刻をAccidentTimeとすると、これは式(22), (23)によって表される。

$$\text{if } (\text{AccidentTime} \geq A_j^s) \ a_j^s = A_j^s \quad (\forall s \in S, \forall j \in T) \quad (22)$$

$$\text{if } (\text{AccidentTime} \geq D_j^s) \ d_j^s = D_j^s \quad (\forall s \in S, \forall j \in T) \quad (23)$$

〈4・2〉 旅客流動の定式化

時刻kに現れ、駅o-d間($o, d \in S$)を移動する旅客群を $P_k^{o,d}$ とおく。この旅客群の経路選択に対応する変数を以下のように定義する。

$$z_{k,j}^{o,d} := \begin{cases} 1 & \text{列車jに乗車し、駅dまで直接移動する} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$z_{k,j,j'}^{o,s,d} := \begin{cases} 1 & \text{駅sで列車jからj'に乗り換えて駅dへ移動する} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

また、旅客群の経路選択に応じた、駅o-d間の旅行時間

に対応する変数をそれぞれ $\tau_{k,j}^{o,d}, \tau_{k,j,j'}^{o,s,d}$ とおく。これらは出発駅での列車待ち時間も含むものとする。

ここで、快速列車が停車する駅を大駅、通過する駅を小駅とすると、出発駅と目的駅の組み合わせは小駅→小駅、大駅→大駅、小駅→大駅、大駅→小駅の4通りとなる。以降、これを場合分け α とする場合分け α に基づいて制約iを定式化すると、それぞれ式(24)~(27)のように表すことができる。

$$\sum_{j \in T_{loc}} z_{k,j}^{o,d} = 1 \quad (\forall o, d \in S_{loc}, \forall k \in K : o < d) \quad (24)$$

$$\sum_{j \in T} z_{k,j}^{o,d} = 1 \quad (\forall o, d \in S_{rap}, \forall k \in K : o < d) \quad (25)$$

$$\sum_{j \in T_{loc}} z_{k,j}^{o,d} + \sum_{j' \in T_{rap}} \sum_{s \in S_{rap} : o < s < d} z_{k,j,j'}^{o,s,d} = 1 \quad (\forall o \in S_{loc}, \forall d \in S_{rap}, \forall k \in K : o < d) \quad (26)$$

$$\sum_{j \in T_{loc}} z_{k,j}^{o,d} + \sum_{j' \in T_{rap}} \sum_{s \in S_{rap} : o < s < d} z_{k,j,j'}^{o,s,d} = 1 \quad (\forall o \in S_{rap}, \forall d \in S_{loc}, \forall k \in K : o < d) \quad (27)$$

次に、普通列車のみで移動、快速列車のみで移動、普通列車から快速列車へ乗り継ぎ、快速列車から普通列車へ乗り継ぎ、という4通りのパターンを考える。以降、これを場合分け β とする。場合分け β に基づいて制約iiを定式化すると、それぞれ式(28)~(31)のように表すことができる。

$$d_j^o \geq k z_{k,j}^{o,d} \quad (\forall o, d \in S, \forall j \in T_{loc}, \forall k \in K : o < d) \quad (28)$$

$$d_j^o \geq k z_{k,j}^{o,d} \quad (\forall o, d \in S_{rap}, \forall j \in T_{rap}, \forall k \in K : o < d) \quad (29)$$

$$d_j^o \geq k \sum_{j' \in T_{rap}} \sum_{s \in S_{rap} : o < s < d} z_{k,j,j'}^{o,s,d} \quad (\forall o \in S_{loc}, \forall d \in S_{rap}, \forall j \in T_{loc}, \forall k \in K : o < d) \quad (30)$$

$$d_j^o \geq k \sum_{j' \in T_{loc}} \sum_{s \in S_{rap} : o < s < d} z_{k,j,j'}^{o,s,d} \quad (\forall o \in S_{rap}, \forall d \in S_{loc}, \forall j \in T_{rap}, \forall k \in K : o < d) \quad (31)$$

また、式(32), (33)によって普通列車から快速列車、及び快速列車から普通列車へのそれぞれの乗り継ぎ可能条件iiiが表される。ここで、 Ll^{trans} は乗り継ぎの際に最低限必要な時間である。

$$d_j^s - (a_j^s + Ll^{trans}) \geq -M(1 - z_{k,j,j'}^{o,s,d}) \quad (\forall o \in S_{loc}, \forall s, d \in S_{rap} : o < s < d, \forall j \in T_{loc}, \forall j' \in T_{rap}, \forall k \in K) \quad (32)$$

$$d_j^s - (a_j^s + Ll^{trans}) \geq -M(1 - z_{k,j,j'}^{o,s,d}) \quad (\forall o, s \in S_{rap}, \forall d \in S_{loc} : o < s < d, \forall j \in T_{rap}, \forall j' \in T_{loc}, \forall k \in K) \quad (33)$$

最後に、駅 $o \sim d$ 間の経路選択に応じた旅行時間 $\tau_{k,j}^{o,d}, \tau_{k,j,j'}^{o,s,d}$ に関する制約を示す。 $\tau_{k,j}^{o,d}, \tau_{k,j,j'}^{o,s,d}$ の非負制約は式(34), (35)により表される。また、場合分け β に基づき条件ivを表現すると、それぞれ式(36)~(39)のように表される。

$$\tau_{k,j}^{o,d} \geq 0 \quad (\forall o, d \in S : o < d, \forall j \in T, \forall k \in K) \quad (34)$$

$$\tau_{k,j,j'}^{o,s,d} \geq 0 \quad (\forall o, d \in S : o < d, \forall s \in S_{rap}, \forall j, j' \in T, \forall k \in K) \quad (35)$$

$$\tau_{k,j}^{o,d} \geq (a_j^d - k) - M(1 - z_{k,j}^{o,d}) \quad (\forall o, d \in S, \forall j \in T_{loc}, \forall k \in K : o < d) \quad (36)$$

$$\tau_{k,j}^{o,d} \geq (a_j^d - k) - M(1 - z_{k,j}^{o,d}) \quad (\forall o, d \in S_{rap}, \forall j \in T_{rap}, \forall k \in K : o < d) \quad (37)$$

$$\tau_{k,j,j'}^{o,s,d} \geq (a_{j'}^d - k) - M(1 - z_{k,j,j'}^{o,s,d}) \quad (\forall o, s \in S_{loc}, \forall d \in S_{rap} : o < s < d, \forall j \in T_{loc}, \forall j' \in T_{rap}, \forall k \in K) \quad (38)$$

$$\tau_{k,j,j'}^{o,s,d} \geq (a_{j'}^d - k) - M(1 - z_{k,j,j'}^{o,s,d}) \quad (\forall o, s \in S_{rap}, \forall d \in S_{loc} : o < s < d, \forall j \in T_{rap}, \forall j' \in T_{loc}, \forall k \in K) \quad (39)$$

ここで、 $\tau_{k,j}^{o,d}$ 及び $\tau_{k,j,j'}^{o,s,d}$ の総和を最小化する目的関数を設定することで、各旅客群は最速達経路を選択し、選択された経路の所要時間のみが旅行時間として求まる。また、選択されなかった経路に対応する $\tau_{k,j}^{o,d}$ 及び $\tau_{k,j,j'}^{o,s,d}$ の値は全て0になる。

ただし、本研究における運転整理の指針は旅客の被る損失の最小化なので、旅行時間の増大量の最小化が目的である。そこで、旅行時間の増大量に対応する非負の変数を $e_k^{o,d}$ として新たに定義する。ここで、 $e_k^{o,d}$ が満たすべき制約は式(40)~(44)により表される。式(40)は $e_k^{o,d}$ の非負制約を表す。また、式(41)~(44)はそれぞれ場合分け α に従い、 $e_k^{o,d}$ の定義に基づく下限を表している。

$$e_k^{o,d} \geq 0 \quad (\forall o, d \in S, \forall k \in K : o < d) \quad (40)$$

$$e_k^{o,d} \geq \sum_{j \in T_{loc}} \tau_{k,j}^{o,d} - MT_k^{o,d} \quad (\forall o, d \in S_{loc}, \forall j \in T_{loc}, \forall k \in K : o < d) \quad (41)$$

$$e_k^{o,d} \geq \sum_{j \in T} \tau_{k,j}^{o,d} - MT_k^{o,d} \quad (\forall o, d \in S_{rap}, \forall j \in T, \forall k \in K : o < d) \quad (42)$$

$$e_k^{o,d} \geq \left(\sum_{j \in T_{loc}} \tau_{k,j}^{o,d} + \sum_{s \in S_{rap} : o < s < d} \sum_{j \in T_{loc}} \sum_{j' \in T_{rap}} \tau_{k,j,j'}^{o,s,d} \right) - MT_k^{o,d} \quad (\forall o \in S_{loc}, \forall d \in S_{rap} : o < d, \forall j \in T_{loc}, \forall j' \in T_{rap}, \forall k \in K) \quad (43)$$

$$e_k^{o,d} \geq \left(\sum_{j \in T_{loc}} \tau_{k,j}^{o,d} + \sum_{s \in S_{rap} : o < s < d} \sum_{j \in T_{rap}} \sum_{j' \in T_{loc}} \tau_{k,j,j'}^{o,s,d} \right) - MT_k^{o,d} \quad (\forall o \in S_{rap}, \forall d \in S_{loc} : o < d, \forall j \in T_{rap}, \forall j' \in T_{loc}, \forall k \in K) \quad (44)$$

これより、列車運行に乱れが生じた際の旅客の旅行時間増大量最小化問題は、以下の混合整数計画問題として定式化される。

minimize $\sum_{o,d \in S} \sum_{k \in K} P_k^{o,d} e_k^{o,d}$

subject to 列車運行に関する制約式(1)~(23)
旅客流動に関する制約式(24)~(44)

5. ケーススタディによる有効性の検証

〈5・1〉 運転整理案の検証

仮想的な路線及びダイヤを設定し、数値実験により本研究における拡張手法の有効性について検証を行った。

基本となる駅数 7 列車数 12 の仮想ダイヤを図 3 に示す。黒線が普通列車であり、赤線が快速列車である。快速列車の停車駅は 1, 3, 5, 7 であり、駅 1 の発車時刻が早い列車から順番に列車番号を 1~12 まで与える。

ここで、列車番号 3 の列車の 2 駅への到着に対して 600 秒の遅延を与えた。この際、運転整理を行わなかった場合の列車ダイヤを図 4 に示す。

次に、路線に応じて適切な運転整理案が出力されることを確認するために先行研究との比較を行った。先行研究同様に全区間が複線区間の路線と、比較のために全区間が複々線区間の路線でそれぞれ最適化を行い、最適化後の列車ダイヤをそれぞれ図 5, 6 に示す。

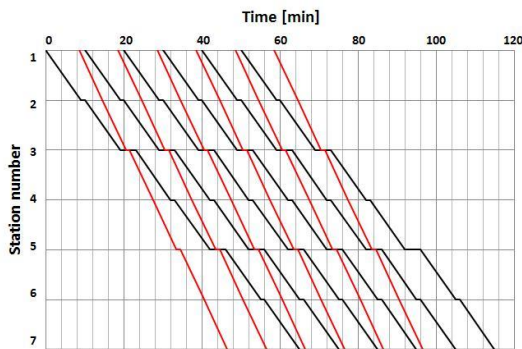


図 3 ケーススタディのための仮想計画ダイヤ

Fig. 3 Initial operation plan for case study

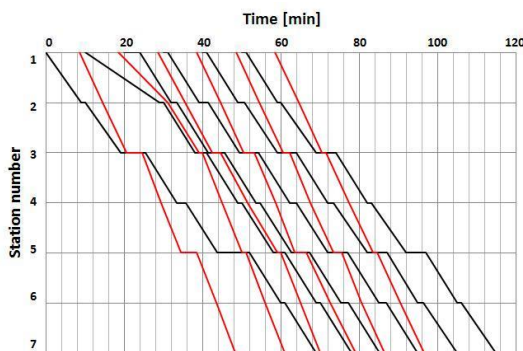


図 4 乱れが生じた直後の列車ダイヤ

Fig. 4 Train diagram immediately after a disruption

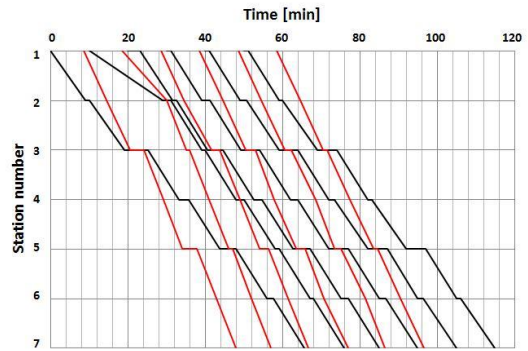


図 5 複線区間における運転整理ダイヤ

Fig. 5 Optimally rescheduled train diagram at a double track section

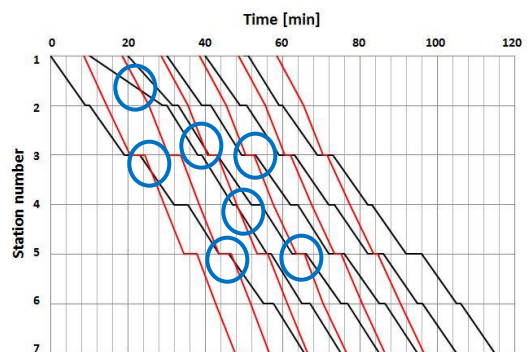


図 6 複々線区間における運転整理ダイヤ

Fig. 6 Optimally rescheduled train diagram at a quadruple track section

複線区間の路線と複々線区間の路線での運転整理手法の違いは以下の 3 点である。

- ① 複々線区間では駅間で快速列車による普通列車の追い抜きが可能となる
- ② 複々線区間から駅に入る場合、他種別列車間では最小進入時隔を考慮する必要がない
- ③ 駅から複々線区間に出る場合、他種別列車間では最小進出時隔を考慮する必要がない

図 4 と図 5 を比較すると、列車 4 が列車 3 を 2 駅で追い抜いているなど、列車順序変更の運転整理が行われていることが確認できる。

また、図 5 を図 6 と比較して、①~③の違いが見られる箇所を青い円で囲んだ。この比較から、路線に応じて適当な運転整理手法を用いた運転整理案が得られることが確認できた。

〈5・2〉 旅客損失の検証

次に、路線モデルに応じて適切な運転整理が行われているのかを確認するために、以下の 7 ケースに関して最適化を行った。

- a) 1~7 駅が全て複線区間
- b) 1~6 駅が複線区間、6~7 駅が複々線区間
- c) 1~5 駅が複線区間、5~7 駅が複々線区間

- d) 1~4 駅が複線区間, 4~7 駅が複々線区間
- e) 1~3 駅が複線区間, 3~7 駅が複々線区間
- f) 1~2 駅が複線区間, 2~7 駅が複々線区間
- g) 1~7 駅が全て複々線区間

列車番号 3 の列車の 2 駅への到着に対して 10 分の遅延を与えた。それぞれのケースでの目的関数値を図 7 に示す。同様に、それぞれのケースで 20 分, 30 分の遅延を与えた際の目的関数値を図 8, 9 に示す。複々線区間においては、複線区間に比べて線路上での追い抜きが可能となるため、取れる運転整理の幅は広がるので、評価値は良くなるはずである。

図 7~9 より、複々線区間の割合が大きくなるにつれて旅客の損失が低減されていることが分かる。また、遅延が大きくなるにつれて、複々線区間が含まれることによる旅客損失低減の度合いは大きくなっている。これは、複々線区間が含まれることによって遅延の伝搬が軽減されているため、遅延が大きくなるにつれて伝搬軽減による効果が顕著になっているためだと思われる。

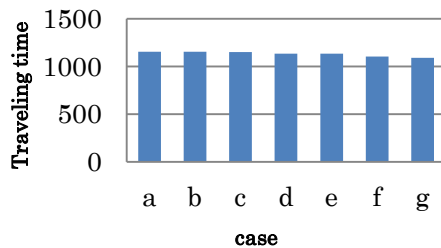


図 7 10 分の遅延を与えた際の旅客損失

Fig. 7 Traveling time increase (10 minutes delay)

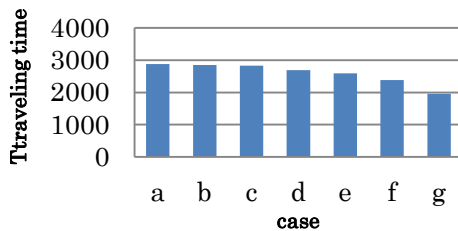


図 8 20 分の遅延を与えた際の旅客損失

Fig. 8 Traveling time increase (20 minutes delay)

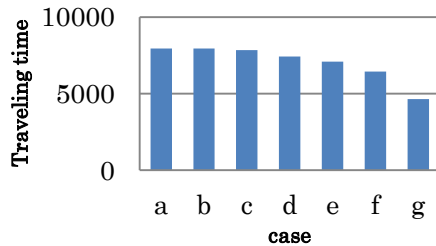


図 9 30 分の遅延を与えた際の旅客損失

Fig. 9 Traveling time increase (30 minutes delay)

6. おわりに

本研究では、先行研究において提案された旅客損失に着眼した運転整理最適化手法を、図 4 に示したパターンの特徴を持つ路線モデルに対応できるように拡張を行った。

具体的には、先行研究にて提案された「旅客損失の定義」「列車運行の定式化」「旅客流動の定式化」のうち、②の列車運行の定式化に関して、複線区間のみを対象としていた路線モデルを、複々線区間を含む場合にも対応できるように拡張した。

次に、仮想の路線モデルを用いて拡張手法の有効性を検証した。拡張手法において、路線モデルが複々線区間の場合には複線区間の場合に比べて運転整理の自由度が増しているおり、旅客損失は低減されることが確認できた。また、旅客損失の低減の度合いは遅延の規模が大きくなるにつれて顕著になっていることが分かった。

更に、7 駅 12 列車における路線モデルで先行研究と比較したところ、計算時間は増大しておらず十分実用的な水準であることが確認できた。

今後取り組むべき課題としては、運転整理手法の増加、探索領域の縮小、乗車率の考慮が挙げられる。本研究で使用するのことができる運転整理手法は、列車の走行番線・順序を調整する運転整理手法と、列車間隔を調整する時隔調整に限られている。よりよい運転整理案を作成するためには、使用できる運転整理手法を増やすための拡張が望まれる。また、本研究の拡張においては計算量の増大はなかったものの、対象とする路線や乱れの規模が大きくなると十分迅速に解を得ることができていない。高速化、効率化のために探索領域を縮小することが望まれる。最後に、本研究では乗車率は考慮されていないが、実際には旅客が列車に乗りきれない、いわゆる積み残しと呼ばれる事象が発生するケースがある。より実用的なシステムとするためにも、積み残しが発生する場合への拡張が望まれる。

本研究を進めるにあたり、「科学的観点から見た列車運行計画の作成・評価に関する研究」に参加された各大学及び西日本旅客鉄道株式会社・鉄道総合技術研究所の関係者の方々に多大なる御支援・御協力を頂いたことを厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1) 富井規雄:「列車ダイヤのみみつ一定時運行のしくみ」, 成山堂書店 (2005)
- (2) (財)鉄道総合技術研究所 運転システム研究室:「鉄道のスケジューリングアルゴリズム」, NTS, pp152-177 (2005)
- (3) K.Chigusa, K.Sato, T.Koseki: "A Passenger-Oriented Optimization of Train Rescheduling Based on Mixed Integer Programming", IEJ Transactions on Industry Applications Vol.132 No.2, pp170-177 (2012) (in Japanese)
千種健二, 佐藤圭介, 古閑隆章:「混合整数計画法に基づく列車運行乱れ時の旅客損失に主眼を置いた運転整理最適化」, 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌, pp170-177 (2012)
- (4) <http://www-06.ibm.com/software/jp/websphere/ilog/optimization/core-products-technologies/cplex/>