

旅客視点の指標に基づく ダイヤ乱れ時の列車順序・間隔整理手法

佐藤 圭介* 平井 力*

Timetable Rescheduling Formulation and Algorithm Minimizing
The Total Increase of Inconvenience to Passengers

Keisuke SATO Chikara HIRAI

This paper presents a timetable rescheduling formulation and an algorithm to minimize the total increase of inconvenience to passengers. When railway operations are disrupted to a certain extent, rail transport management staff members called dispatchers inevitably reschedule the timetable to manage the situation. Rail transport rescheduling is a real-time process and the scale and complexity derived from the scheduling phase make the task more strenuous. Our approach is significant for the passenger-oriented rescheduling since the order of trains affects passenger's behaviour. Rescheduling measures such as reordering of trains are incorporated into one mixed integer programming problem. We have obtained a better solution in terms of the inconvenience at the expense of a minimum delay timetable by introducing flexibility in the delay-minimized timetable.

キーワード：ダイヤ乱れ，運転整理，順序変更，間隔調整，旅客視点，混合整数計画問題

1. はじめに

鉄道事業者はあらかじめ定めた列車ダイヤに従って列車を運行しており，日々の安全かつ安定した輸送の提供に取り組んでいる。しかしながら，事故等によって正常な列車運行が妨げられ，列車ダイヤに乱れが生ずることがある。このようなダイヤ乱れが発生すると，鉄道事業者は指令室と呼ばれる部署を中心に，列車運行を正常な状態に復するため，列車ダイヤに対して一連の変更を加える。この業務は運転整理と呼ばれ¹⁾，時々刻々と変化する状況を勘案し，限られた時間の中での適切な判断が求められる。

運転整理において，列車ダイヤ変更の判断を担当するのが指令員である。ダイヤ乱れによって，列車が止まっている，あるいは遅れながら動いている状態で，リアルタイムに運転整理を実施することは，難易度の高い業務であり，指令員の負担は大きい。

このような背景において，コンピューターによって運転整理の案を自動提案しようという研究開発が国内外で進められており，より高度な内容の提案を目指して，研究が発展してきている。

運転整理という用語は，複数の意味で用いられることがある。広義には，列車の運行に関わる計画全般の変更を指し，列車の運休や時刻の変更で代表される列車ダイヤの変更に加え，列車に割り当てられる車両や，列車を担当する乗務員（運転士，車掌）の運用計画（使用スケ

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

ジュール)の変更も含まれる。一方，狭義には，主に列車ダイヤの変更の部分だけを指す場合がある。

本稿では，狭義の運転整理のうち，列車順序・間隔整理と呼ぶ部分を混合整数計画問題²⁾として定式化³⁾⁴⁾し，簡易な例での数値実験結果を示す。定式化では，ダイヤ乱れによって旅客が被る「不便」を定義し，その増分の最小化を図る。このとき，列車運行と，途中の乗換を含む旅客行動の両方を，1つの混合整数計画問題のモデルとして表現する。

次章では，国内外の関連研究の分類と本研究の位置づけを述べる。第3章では，問題設定および混合整数計画問題としての具体的な定式化を示す。第4章で数値実験の例を示し，第5章で本研究を総括する。

2. 運転整理提案に関する研究開発の分類

運転整理の提案に関する研究開発は国内外で多く実施されているが，対象とするダイヤ乱れの規模や，視点の置き方等により，アプローチやモデルが異なってくる。

2.1 大規模乱れと小規模乱れ

ダイヤ乱れの規模によって，運転整理の具体的な手段は異なる¹⁾。1時間以上にわたる長時間の支障による大規模な乱れが発生した場合には，設備条件にも依存するが，列車の運休や折り返し運転によって早期の回復を図ることがある。

図1に簡単な列車ダイヤ図を示す。横軸は時刻，縦軸

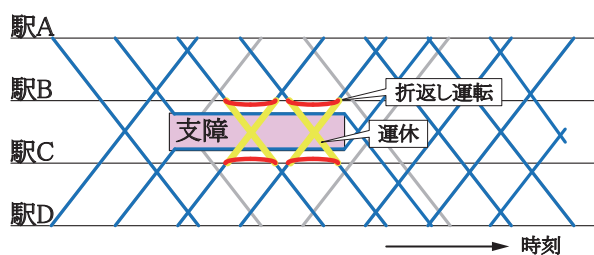


図1 運休と折返し変更を伴う運転整理

は駅の位置を示している。斜めの直線は各列車の運行を表し、ここではスジと呼ぶことにする。

駅B～駅C間で発生した支障に対し、黄色で示したスジは運休、赤い線は折返し運転を表している。この例では、4本の列車を部分的に運休することによって、支障が解消した後の早期の回復を図っている。

どのような規模のダイヤ乱れにも適用できることを目標にした研究⁵⁾もあるが、大規模乱れ時は、海外ではEmergency Timetable⁶⁾、日本でも運転整理パターン^{7) 8)}と呼ばれる考え方を適用するアプローチがある。列車の運休、折り返す駅などを、あらかじめ定めておくことで、概ねの輸送力を迅速に調整することを目指している。これらを適用した後に、列車が出発(発車)する順序(発順序)、列車が駅で使用する番線、列車の出発間隔等が変更される。これら3つの各変更を総称して、列車順序・間隔整理と呼ぶことにする。

運休や折返し運転までは必要としない規模のダイヤ乱れを、ここでは小規模な乱れと呼ぶ。この場合も、運転整理として、列車順序・間隔整理を実施することがある。図2は、駅Aで生じた遅延によって、小規模な乱れが発生した状況を示す。駅Bおよび駅Cにおいて、

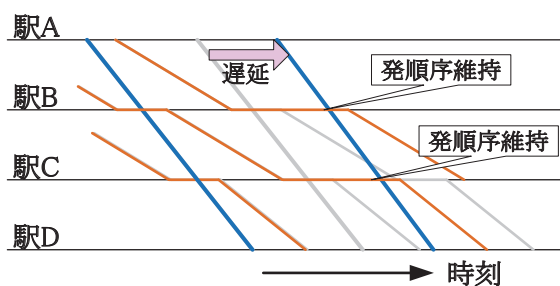


図2 発順序を維持することによる遅延伝搬

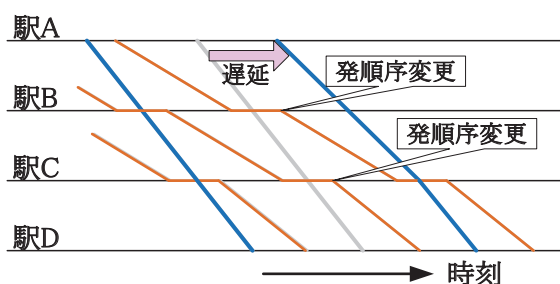


図3 発順序を変更することによる遅延伝搬抑制

あらかじめ定められた発順序を維持しているために、遅延が伝搬している。これに対し、図3に示すように、駅Bおよび駅Cで発順序を変更することで、遅延伝搬を抑えられる場合がある。

2.2 定時性視点と旅客視点

列車順序・間隔整理あるいはそれに近い手段を用いた運転整理提案の研究では、その視点によってモデルが異なってくる。ここで、定時性視点とは、列車の遅延(量)を少なくしようとする試みであり、旅客視点とは、列車が遅れることで旅客が被る何等かの不便(量)を抑えようという試みである。

2006年のサーベイ⁹⁾によると、それまでの研究開発の多くは定時性視点となっている。2014年のサーベイ¹⁰⁾には両視点の運転整理に加え、運用整理(車両・乗務員の計画変更)の研究開発もまとめられている。

ダイヤ乱れ時に、列車間の接続を維持するか否かの決定と、列車ダイヤ変更で旅客の目的地到着時刻遅延の総和最小化を目的とする研究は、Delay Managementと呼ばれ、(混合)整数計画問題としてモデル化されている^{3) 4), 11) ~ 14)}。関連の主な研究^{3) 4), 11) ~ 16)}の特徴を表1に示す。このほか、微視的モデル¹⁷⁾や、オンライン最適化モデル¹⁸⁾による研究もある。

本研究はDelay Managementに関する研究に位置づけられる内容であり、列車順序・間隔整理の最適化を目指すものである。特に、旅客の到着遅延時間を、待ち時間や乗換抵抗を含んだ不便度として拡張し、ダイヤ乱れによる不便度の増分を最小化するモデル^{3) 4)}を提案する。

表1 Delay Managementに関する主な研究の特徴

	列車運行の考慮				旅客行動の考慮
	時刻変更	順序変更	番線変更	折返し変更	列車乗換
Schöbel ¹¹⁾	✓				
Flierら ¹²⁾	✓	✓		✓	
Schöbel ¹³⁾	✓	✓			
Dollevoetら ¹⁴⁾	✓				✓(無制限)
Dollevoetら ¹⁵⁾	✓	✓	✓		
千種ら ¹⁶⁾	✓	✓	✓		✓(1回まで)
Satoら ^{3) 4)}	✓	✓	✓	✓	✓(無制限)

3. 問題設定と定式化

3.1 本研究における仮定

実在する多くの路線の特徴を想定し、本研究では次を仮定する。

- (1) 列車ダイヤ：快速列車と普通列車の2種類がある。
- (2) 路線：図4に示すような配線を対象とする。2本の

線路があり、各線路はどちらか一方の進行方向の列車が走行する（複線）。駅には各方向につき、番線が1つか2つあり、2つある駅では発順序変更と番線変更ができる。列車は終端駅で折り返す。

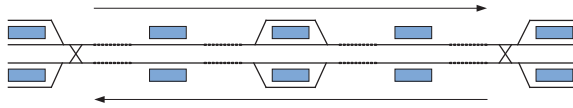


図4 対象とする配線のイメージ

- (3) 旅客行動：旅客はそれぞれが被る「不便」が最小となる利用経路（(出発駅, 乗車列車, 乗換駅, 乗車列車, …, 目的駅）という列）を選択する。ある利用経路で移動する場合に旅客が感じる不便を、次式で考える。
 (乗車時間 [分]) + $\alpha \times$ (駅での待ち時間 [分]) + $\beta \times$ (乗換回数)

これは、文献 19) で述べられている式から、混雑率の項を除いたものである。ここで $\alpha = 1$, $\beta = 0$ とおくと、この式は旅行時間を意味する。

3.2 定式化

ダイヤ乱れ時の列車順序・間隔整理を提案するための定式化^{3) 4)}を示す。ここでは、本研究における定式化の代表的な考え方を、一部の式を用いて述べる。

3.2.1 混合整数計画問題としての定式化

混合整数計画問題としての定式化は、整数または実数をとる変数 x_i , 線形関数 f および g_j , 定数 c_j によって次のように表現される。

目的関数：最大化（または最小化） $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

制約： $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq c_j (j = 1, 2, \dots, m)$

$x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ は整数または実数

各変数がとり得る値のすべての組合せを解空間、各変数の値の組を解、また、各制約をすべて充足する解を実行可能解と呼ぶこととする。実行可能解のうち、目的関数の値を最大化または最小化させる解を見つけることが目的である。1つの解が、1つの運転整理案に対応する。

列車運行や、列車順序・間隔整理の実施を表現するための各変数や制約を以下のように導入する。旅客の不便を最小化する運転整理案とするため、3.1節(3)で導入した式は、3.3節で示す目的関数に反映される。

3.2.2 列車運行に関する定式化部分

列車運行の制約のうち、列車単体に対するものを記述する。最も基本的な制約は、ある列車がある駅で使用される番線は1つということである。これは、変数 u_r^k を列車 r が番線 k を用いる場合は1、そうでない場合には0をとるものと定義すると、(1)式で表現できる。

$$\sum_{k \in K_r^s} u_r^k = 1, \quad \forall b \in B, \forall r \in R_b, \forall s \in S \quad (1)$$

B は列車進行方向の集合 { 上り, 下り } であり、 R を列車の集合として $R_b \subseteq R$ は $b \in B$ の方向に走行する列車の集合、 S は駅集合、 K_b^s は $b \in B$ の方向に進行する列車が $s \in S$ で使用可能な番線集合である。

ある列車と、その折返し列車は、終着駅で同じ番線を使用する。これは、列車 r が番線 k を使用するか否かを示す変数 u_r^k の値と、 r の終着後の折返しとなる列車 $Suc(r)$ が同番線 k を使用するか否かを示す変数 $u_{Suc(r)}^k$ の値が一致するという制約であり、(2)式で表現できる。
 $Term(b)$ は $b \in B$ の方向の終着駅である。

$$u_r^k = u_{Suc(r)}^k, \quad \forall b \in B, \forall r \in R_b, \forall k \in K_b^{Term(b)} \quad (2)$$

提案される運転整理案においては、所定の列車ダイヤで定められた時刻よりも早く到着および出発することはない。一方で、計算効率の観点から、運転整理案において許容する着発時刻の遅れに制限を設ける。ただし、その制限を任意に設けると、実行可能解が存在しなくなる可能性がある。そこで、実行可能解となるような運転整理後の時刻を3.3節に示す手順で求め、得られた時刻に最大許容時間 I_{Max} を加えた時刻までは列車が遅れてもよいものとする。つまり、遅延の最大値を与える。これらを(3)式および(4)式で表現する。

$$A_r^s \leq a_r^s \leq \hat{A}_r^s + I_{Max}, \quad \forall b \in B, \forall r \in R_b, \forall s \in S - \{Start(b)\} \quad (3)$$

$$D_r^s \leq d_r^s \leq \hat{D}_r^s + I_{Max}, \quad \forall b \in B, \forall r \in R_b, \forall s \in S - \{Term(b)\} \quad (4)$$

ここで、 A_r^s と D_r^s は定数で、所定ダイヤにおける $r \in R$ の $s \in S$ における到着時刻および出発時刻である。また、 a_r^s と d_r^s は変数で $r \in R$ の $s \in S$ における到着時刻および出発時刻である。 \hat{A}_r^s と \hat{D}_r^s は定数で実行可能な運転整理案における $r \in R$ の $s \in S$ における到着時刻および出発時刻である。 $Start(b)$ は $b \in B$ の方向の始発駅である。

3.2.3 発順序変更に関する定式化部分

図3に発順序変更による遅延伝搬抑制を示した。これについては、2つの列車の発順序を定める変数を用いて表現する。このときの制約の1つとして、2つの列車の出発の前後関係を与える。つまり、列車が同駅を出発する際に、適切な時間間隔が維持されるという各状態の中から適切な解が選ばれ、結果として、最も望ましい発順序が提案されるという仕組みである。

この制約は、駅 s で列車 r_1 が列車 r_2 よりも先に出発する場合は1、そうでない場合は0をとる変数 x_{r_1, r_2}^s を用いて、(5)式で表現できる。

$$d_{r_1}^s - d_{r_2}^s \geq I_{DD} - M(1 - x_{r_1, r_2}^s), \quad \forall b \in B, \forall (r_1, r_2) \in R_{b \neq}^2, \forall s \in S - \{Term(b)\} \quad (5)$$

特集：輸送計画技術

ここで、 M は十分に大きな数なので、変数 x_{r_1, r_2}^s の値が 1 の場合にだけ有効な制約となる。つまり、 s 駅において、 r_1 が r_2 よりも先に出発する場合、 r_1 が出発してから r_2 が出発するまでの適切な時間間隔 I_{DD}^s が保たれるという制約である。 $R_{b \neq}^2$ は $b \in B$ の方向に走行する異なる 2 本の列車の組の集合である。

3.2.4 番線変更に関する定式化部分

列車が使用する番線の変更を提案する仕組みも、発順序変更と似た考え方となる。ある駅のある番線を異なる列車が使用（占有）する場合には、必ず適切な時間間隔が維持されているという制約を満たした各状態の中から、適切な解が選ばれることになる。番線の使用に関する変数 u_r^k を併せ用いて、(6) 式のように制約を表現できる。

$$\begin{aligned} a_{r_2}^{Next(b,s)} - a_{r_1}^{Next(b,s)} &\geq I_{AD}^{Next(b,s)} - M(3 - x_{r_1, r_2}^s - u_{r_1}^k - u_{r_2}^k), \\ \forall b \in B, \forall (r_1, r_2) \in R_{b \neq}^2, \forall s \in S - \{Term(b)\}, \\ \forall k \in K^{b, Next(b,s)} \end{aligned} \quad (6)$$

ここでも、右辺に M を用いているが、 $x_{r_1, r_2}^s, u_{r_1}^k, u_{r_2}^k$ の 3 つの変数がいずれも 1 をとる場合にだけ有効な制約となる。つまり、 s 駅にて、列車 r_1 が列車 r_2 よりも先に出発するとともに両列車が番線 k を使用する場合、次の駅には r_1 が、適切な時間間隔 $I_{AD}^{Next(b,s)}$ を保って、 r_2 よりも先に到着するという制約となっている。 $Next(b, s)$ は、 $b \in B$ の方向にある $s \in S$ の次駅である。

3.2.5 旅客行動に関する定式化部分

旅客行動の基本的な制約として、旅客が出発駅で乗車する列車は 1 本である。時刻 t に出発駅 o に現れた旅客が、到着駅 d に移動するため、駅 o で列車 r に乗車する場合は 1、そうでない場合は 0 を取る変数 $z_{t,r}^{o,d}$ を用いて、この制約は (7) 式で表現できる。ここで、ある旅客の出発駅 (Origin) と到着駅 (Destination) の組を OD ペアと呼ぶものとして、 $S_{b \neq}^2$ は $b \in B$ の方向に移動する旅客の OD ペアの集合、 T は旅客が出現する離散時刻の散集合とする。

$$\sum_{r \in R_b} z_{t,r}^{o,d} = 1, \quad \forall b \in B, \forall (o, d) \in S_{b \neq}^2, \forall t \in T \quad (7)$$

旅客は自分が出現した時刻より前に出発する列車に乗車しない (できない)。この制約は (8) 式で表現する。これは $d_r^o < t \Rightarrow z_{t,r}^{o,d} = 0$ という因果関係を意味している。

$$\begin{aligned} z_{t,r}^{o,d} &\leq d_r^o / t, \\ \forall b \in B, \forall (o, d) \in S_{b \neq}^2, \forall t \in T, \forall r \in R_b \end{aligned} \quad (8)$$

次節にて、旅客が感じる不便を最小化する運転整理案とするため、3.1 節 (3) で導入した式を具体的に計算する変数 $y_{t,r}^{o,d}$ を用いて目的関数を設定する。

3.3 最適化問題と解の算出手順

これまで、代表的な制約式をいくつか示したが、

他の必要な制約を組み合わせることで、混合整数計画問題としての定式化^{3) 4)} となる。ここで、定式化した問題を解くにあたり、2 段階の計算手順について述べる。

ダイヤ乱れ時が対象となるため、多くの列車は所定の列車ダイヤから遅延する状況が想定される。しかし、計算上、その遅れがどれだけ許容されるかによって、解を見つけるための難易度が変わる。そこで、3.2.2 節でも触れたように、遅延の最大値をあらかじめ与え、解空間をできる限り絞り込んでおくことは、効率的な解の算出につながる。

実際には、遅延の最大値を正確に予測することは困難である。そこで、ここでは、比較的小規模な問題を一度解き、その結果から妥当と考えられる制約を付加することで、本来解くべき問題に対する計算の効率化を図る。

3.3.1 遅延総和最小化問題

第 1 段階では、旅客の不便を考慮しない問題を解く。これは比較的小さな問題となり、遅延の最大値を、妥当と考えられる範囲で容易に求めることができる。この結果を用いることで第 2 段階の問題が解き易くなる。列車運行に関する変数と制約式のみを用いて、より単純な (到着) 遅延総和最小化問題を次のように定義する。ここでは、目的関数と変数だけを記述する。

$$\begin{aligned} \min \sum_{b \in B} \sum_{r \in R_b} \sum_{s \in S - \{Start(b)\}} (a_r^s - A_r^s) \\ u_r^{s,k}, x_{r_1, r_2}^s \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

3.3.2 旅客不便増分総和最小化問題

第 2 段階として、旅客行動に関する変数と制約式を加え、旅客が被る不便を目的関数に反映させることで、旅客不便増分総和最小化問題を次のように定義する。ここでも、目的関数と変数だけを記述する。

$$\begin{aligned} \min \sum_{b \in B} \sum_{(o,d) \in S_{b \neq}^2} \sum_{t \in T} P_t^{o,d} \left(\sum_{r \in R_b} y_{t,r}^{o,d} \right) \\ u_r^{s,k}, x_{r_1, r_2}^s, z_{t,r}^{o,d}, z_{r_1, r_2}^{s,d} \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

ここで、 $P_t^{o,d}$ は時刻 $t \in T$ で出現する OD ペア $(o, d) \in S_{b \neq}^2$ の旅客数、 $z_{r_1, r_2}^{s,d}$ は d へ向かう旅客が乗換可能な駅 s で $r_1 \in R_b$ から $r_2 \in R_b$ に乗り換えるか否かを示す変数である。

3.3.3 計算手順

これらの定式化に基づく計算手順を示す。

(1) ステップ 1：所定ダイヤでの旅客不便計算

- 各 $r \in R, s \in S$ について $a_r^s = A_r^s, d_r^s = D_r^s$ とおく
- 各 $b \in B, (o, d) \in S_{b \neq}^2, t \in T$ について $A_t^{o,d} = 0$ とおく
- 遅延総和最小化問題を解く
- 各 $b \in B, (o, d) \in S_{b \neq}^2, t \in T$ について

- $A_i^{o,d} = \sum_{r \in R_i} v_{i,r}^{o,d}$ とおく
- (2) ステップ2：遅延最小化
- ・ ダイヤ乱れ情報を与える
 - ・ 各 $r \in R, s \in S$ について $\hat{A}_r^s, \hat{D}_r^s = \infty$ とおく
 - ・ 遅延総和最小化問題を解く (第1段階)
- (3) ステップ3：旅客不便増分最小化
- ・ 各 $r \in R, s \in S$ について、遅延総和最小化問題の解から $\hat{A}_r^s = a_r^s, \hat{D}_r^s = d_r^s$ とおく
 - ・ I_{Max} の値を与える
 - ・ 旅客不便増分総和最小化問題を解く (第2段階)

ステップ1では、所定ダイヤにおける旅客の不便 $A_i^{o,d}$ を、ダイヤ乱れの前にはあらかじめ計算する。これには、列車の時刻を所定ダイヤに固定し、不便0からの増分を最小化する問題を解くことで、所定ダイヤ上での旅客の利用経路と不便が求まることを利用する。

ステップ2では、ダイヤ乱れの情報を与えた後、遅延をどの程度回復できるかを知るために、遅延時間の上限を与えずに遅延総和最小化問題を解く。得られた解は、比較的妥当な暫定的な運転整理案として参照できる。

ステップ3では、遅延総和最小化問題の解を(3)式および(4)式の \hat{A}_r^s および \hat{D}_r^s に代入する。それらに最大許容時間 I_{Max} を加えた時刻まで列車を遅らせることを認めて、旅客不便増分総和最小化問題を解く。

4. 数値実験例

ここまで述べてきた定式化を、実在の路線を模擬した仮想的な路線における1往復の運行に適用した例を示す。旅客の不便の式のパラメーターは $\alpha = 1, \beta = 1$ とし、遅延総和最小化問題の解の時刻から、最大許容時間 $I_{Max} = 5$ (分) までは更に遅らせることを認め、旅客の不便の増分が最小となる解を求める。数値実験には、CPUがCore i7-3930K、メモリが16GB、OSは64ビット版Windows 7のPCと、混合整数計画ソルバーとしてGurobi Optimizer 5.5.0を使用した。

図5に所定ダイヤと駅Fで列車102に発生した乱れ(15分)、図6および図7に、混合整数計画問題をソルバーで解いて求めた遅延総和最小ダイヤおよび旅客不便増分総和最小ダイヤを示す⁴⁾。いずれも、横軸が時刻であり、隣接する縦線の間は10分に相当する。縦軸は駅を表し、各横線は対応する各駅に相当する。太い(赤い)スジは快速列車、細い(灰色)スジは普通列車を表す。快速列車は、駅D、駅F、駅Hを通過する。

遅延総和最小ダイヤでは、駅Aで折り返した列車について、列車201、列車103、列車105の3本が続けて出発しており、3本目(列車105)と4本目(列車203)の間隔が大きくなっている。一方で、旅客不便増分総和

最小ダイヤでは、折り返した列車の1本目(列車201)から4本目(列車203)までが、概ね等間隔で駅Aを出発している。これにより、どの時間帯の旅客も、待ち時

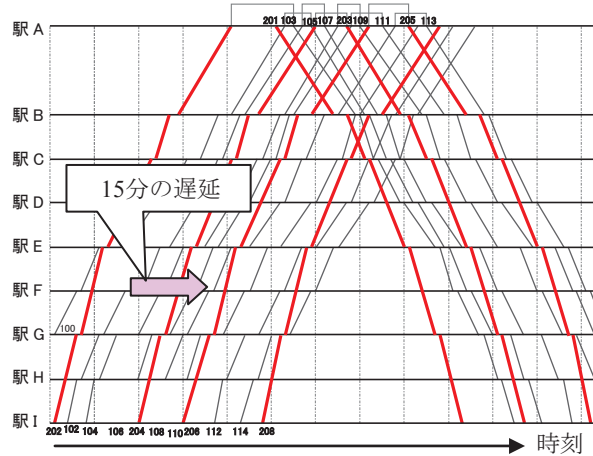


図5 所定ダイヤと乱れ

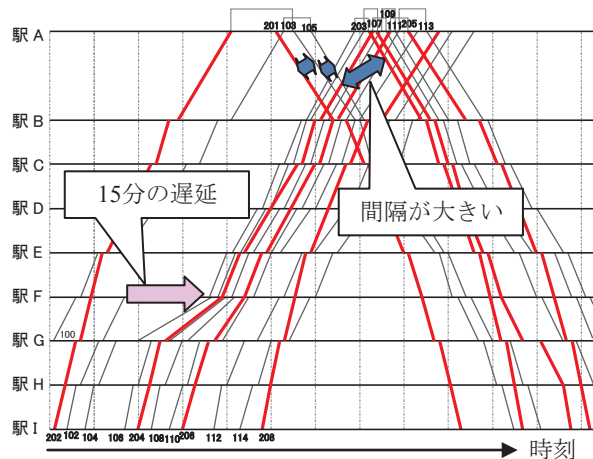


図6 遅延総和最小ダイヤ

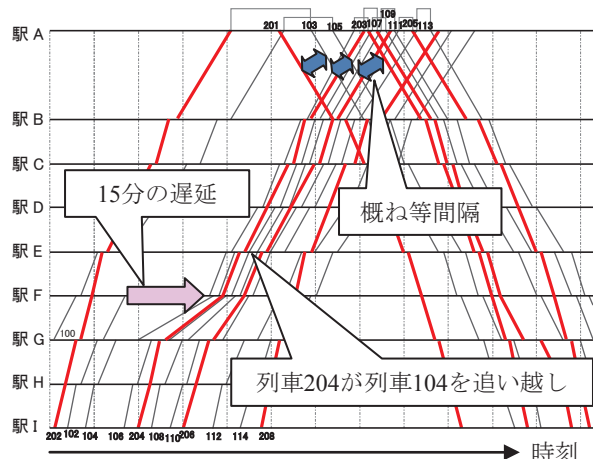


図7 旅客不便増分総和最小ダイヤ

特集：輸送計画技術

間が過度に発生していないと言える。旅客不便増分総和最小ダイヤでは、列車204が、列車104を駅Eで追い抜き、遅延総和最小ダイヤよりも早く終着駅に到着している。これは、快速の旅客数が多く、発順序が優先された結果と考えられる。最適解候補が求まるまでには247秒、最適と証明されるまでに1,722秒の計算時間を要した。

5. おわりに

本稿では、運転整理のうちの列車順序・間隔整理と、列車順序・間隔整理の内容により変化する旅客行動を同時に扱うことで、旅客の不便の増分という目的関数を最小化する混合整数計画問題としての定式化を示した。また、段階を踏んだ計算手順と、仮想路線に対する計算例を示した。このような旅客視点の運転整理のモデル化や、その解法には、工夫の余地がまだ残されており、最適化技術応用分野の中でも、今後の大きな研究対象になり得ると考えられる。

文 献

- 1) 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会(編):鉄道ダイヤ回復の技術, オーム社, 2010
- 2) 日本オペレーションズ・リサーチ学会, OR 事典 Wiki, <http://www.orsj.or.jp/~wiki/wiki/index.php/>
(参照日:2016年6月1日)
- 3) Sato, K., Tamura, K. and Tomii, N., "A MIP-based timetable rescheduling formulation and algorithm minimizing further inconvenience to passengers," *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol. 3, pp. 38-53, 2013.
- 4) 佐藤圭介:旅客が被る不便の増分を最小化する運転整理の定式化, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 60, No. 10, pp. 622-629, 2015
- 5) 富井規雄, 田代善昭, 田部典之, 平井力, 村木国満:利用者の不満を最小にする列車運転整理アルゴリズム, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol. 46, No. SIG 2 (TOM 11), pp. 26-38, 2005
- 6) Corman, F. and D'Ariano, A., "Assessment of advanced dispatching measures for recovering disrupted railway traffic situations," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2289, pp. 1-9, 2012.
- 7) 平井力, 富井規雄, 田代善昭, 近藤繁樹, 藤森淳:運転整理パターン記述言語 R による列車運転整理案作成アルゴリズム, 情報科学技術レターズ FIT2005, Vol. 4, LF-001, pp. 85-88, 2005
- 8) 中村達也, 平井力, 熊澤一将, 石原裕介:臨時折返しを含む整理パターンを活用した運転整理案作成手法, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 12, pp. 5-10, 2011
- 9) Törnquist, J., "Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms," *5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS 2005)*, 2006.
- 10) Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., Toth, P., Veelenturn, L. and Wagenaar, J., "An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling," *Transportation Research Part B*, Vol.63, pp.15-37, 2014.
- 11) Schöbel, A., *Optimization in Public Transportation*, Springer, 2006.
- 12) Filer, H., Numkesser, M. and Schöbel, A., "Integrating rolling stock circulation into the delay management problem," *Technical Report ARRIVAL-TR*, 0132, 2008.
- 13) Schöbel, A., "Capacity constraints in delay management," *Public Transport*, Vol.1, No.2, pp.135-154, 2009.
- 14) Dollevoet, T., Huisman, D., Schmidt, M. and Schöbel, A., "Delay management with rerouting of passengers," *Transportation Science*, Vol. 46, No. 1, pp. 74-89, 2012.
- 15) Dollevoet, T., Corman F., D'Ariano, A. and Huisman, D., "Delay management including capacities of stations," *Transportation Science*, Vol.49, No.2, pp.185-203, 2015.
- 16) 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行時間増大量に主眼を置いた運転整理最適化, 電気学会論文誌 D, Vol.132, No.2, pp.170-177, 2012
- 17) Corman, F., Pacciarelli, D., D'Ariano, A. and Sama, M., "Rescheduling railway traffic taking into account minimization of passengers' discomfort," *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9335, pp. 602-616, 2015.
- 18) Andereg, L., Penna, P. and Widmayer, P., "Online train disposition: To wait or not to wait?" *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5868, pp. 387-398, 2009.
- 19) 国土交通省鉄道局(監修):鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル(2012年改訂版), 運輸政策研究機構, 2012