

速度規制時の車両運用変更提案手法

加藤 怜* 坂口 隆* 佐藤 圭介**

Rolling Stock Rescheduling Algorithm in Speed Restricted Situations

Satoshi KATO Takashi SAKAGUCHI Keisuke SATO

Metrological phenomena such as heavy rain or strong wind cause a lot of train delays. When train dispatchers find that the amount of rainfall or the speed of wind exceeds the regulatory values, they have to reduce the speed of trains. However, such a speed restricted situation can cause serious train traffic disruption. In such a disruption case, train dispatchers have to make a train rescheduling plan. In order to support train dispatchers in their decision-making as soon as possible, we developed a train rescheduling algorithm. The algorithm is based on a multi-commodity network flow model which makes it easy to consider the rolling stock schedule. As a result of the application of the algorithm to the real speed restricted scenarios, we found that the algorithm could produce a train rescheduling plan which includes train cancellation and rolling stock rescheduling in a short time.

キーワード：速度規制，運転整理，車両運用変更，運休，予測ダイヤ，多品種ネットワークフロー

1. はじめに

近年，大雨や強風といった現象が原因となり，列車運行に乱れが生じる事象が増加している。鉄道沿線には雨量計や風速計といった計器類が設置されているが，その測定値があらかじめ定めた規制値を超過した場合，列車運行の安全性を確保するため，列車の速度を規制する，列車の運行を取りやめる，などの対応をとらなければならない。

一方で，列車ダイヤが乱れた際には，指令員により計画ダイヤに変更を加える運転整理が実施される¹⁾。特に，列車の速度が規制される状況においては，適切な運転整理を実施しないと，ダイヤ乱れの規模が大きくなり，結果として旅客の利便性が大きく低下するおそれがある。これまで，指令員の運転整理を支援するための様々な手法が提案されているが，速度規制発生時の運転整理に主眼を置いた研究は少ない。

本稿では，列車速度が規制された状況における指令員の運転整理業務の支援を目的とする。運転整理は，列車運休や車両運用変更などの線区全体に影響のある内容と，列車順序変更や番線変更などの局所的な内容に分かれるが，本稿では主に前者を対象とする。そのうえで，短時間で運転整理内容を提案可能なアルゴリズムを開発し，实在路線データを対象にその性能を検証する。

2. 速度規制時の運転整理

2.1 速度規制時の列車運行

大雨や強風等が原因となり，路線上の特定区間に速度規制が発動されると，その区間の最高速度が低下し，所定よりも通過に時間を要するようになる。以降，速度が規制される区間を「規制区間」，規制の時間幅を「規制時間」と呼ぶ。列車は規制区間を走行すると遅延が生じ，規制区間の長さにもよるが，通過後には大きな遅延となることがある。終着駅までに遅延を回復できず，折返し場面でも回復できない場合は，折返し列車が始発駅から遅延することになる。規制時間が長い場合，その列車も規制区間を走行することになるため，さらに遅延が増大する。速度規制が続く限りこれが繰り返されるため，大規模なダイヤ乱れにつながる。

図1および図2には，列車ダイヤ（計画ダイヤ）の例と，このダイヤに対し，駅B～駅Cの区間に速度規制が生じたときの（規制区間走行時の減速による遅延を考慮した）ダイヤ図を示す。図中の黄色の四角で囲った部分が規制区間および規制時間を意味しており，規制区間を通過する列車3M～7Mは，列車スジの傾きが小さくなっている。つまり，駅間走行時分が長くなり，遅延が発生している状況を表している。

この遅延は折返し列車にも波及し，8M，9Mおよび10Mは折返し時点で遅延を回復できず，始発時点で遅延が生じている。

* 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 運転システム研究室
(現 神奈川大学)

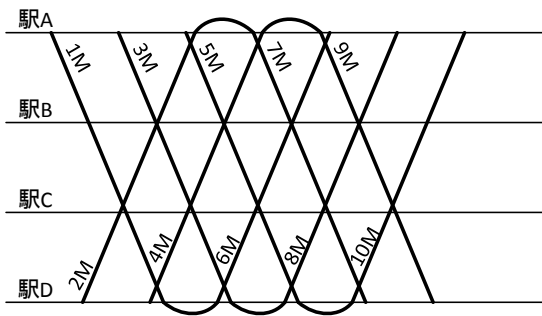


図1 列車ダイヤ（計画ダイヤ）の例

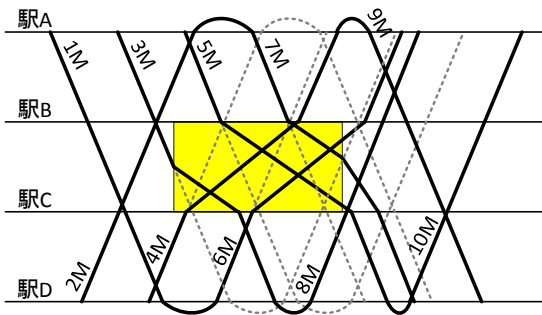


図2 速度規制時のダイヤ

2.2 速度規制時の運転整理に求められる要件

速度規制時の運転整理の支援を検討するにあたり、まずは運転整理に求められる要件を抽出する。そこで、実際に速度規制の発生頻度が高い路線を管轄している指令室において、複数の指令員を対象にヒアリング調査を実施した。その結果、速度規制時の運転整理の特徴について、以下のような内容が挙げられた。

- ①時間帯や区間で異なる旅客需要に応じた輸送力を確保することが必要となる。
- ②運転整理の変更手配は少ない方が好ましい。
- ③線区内の乱れを他の線区に波及させないようにする。
- ④列車の行き先や車両運用を重要視する。
- ⑤速度規制の解除時刻の予測が難しい。
- ⑥不通区間が生じるような他の輸送障害と比べて、運転整理の手段をパターン化することが難しい。
- ⑦折返し遅延は車両・乗務員等のリソース不足が原因となるため、路線上のリソースの使用状況を考慮する必要がある。

この中で、⑤～⑦は速度規制時に特化した内容であるが、①～④は他の輸送障害にも共通する内容となっている。このように、速度規制時には様々な項目を考慮する必要があるが、本研究では汎用性を重視し、線区依存のない内容として、以下の項目を運転整理の要件とした。

- (1) 旅客需要に応じた輸送力を確保する。
- (2) 車両運用を重要視する。

(3) 運転整理手配の数を少なくする。

速度規制時には、限られた車両リソースにより、最大限需要に応じた輸送力を確保することが求められる。すなわち、(1)と(2)は密接に関係し、これらを踏まえた運転整理が必要となる。また、車両運用を考慮することで、計画運用に戻す業務（車両運用戻し）を明示的に考慮することが可能となる。

2.3 本研究が対象とする運転整理

速度規制時に限らず、輸送障害時の運転整理の意思決定は、大きく「全体的な運転整理」と「詳細な運転整理」の2段階に分けられる。全体的な運転整理とは、列車の運休や車両運用変更など、その変更が線区全体に影響を与える内容を指す。詳細な運転整理とは、列車順序の変更や駅での着発線変更など、変更の影響が局所的な内容を指す。一時的な混雑や急病人対応などを原因とした小規模なダイヤ乱れでは、後者の変更のみで遅延の回復が可能だが、人身事故など影響が数十分から1時間以上にわたる場合には、前者の変更も必要となる。

速度規制時については、支障区間の列車の走行は可能であるため、運休やそれに伴う車両運用変更は少ない方が望ましい。しかし、短区間、短時間の速度規制でない限りは、ダイヤ乱れの波及を抑制するために、これらの変更をする場合が多い。そこで本研究では、速度規制時の運転整理の支援のために、全体的な運転整理、特に運休と車両運用変更を対象とする。

2.4 関連研究

これまでも、ダイヤ乱れ時の運転整理を対象とした研究は国内外で数多く行われている²⁾。この中で、運休や車両運用変更を扱っている研究として、特に欧米で主流になっているのが、数理最適化手法の活用（たとえば Veelenturf et al.³⁾ など）であり、国内でも近年に適用例がある（たとえば今田・富井⁴⁾）。国内ではその他に、シミュレーションを活用する手法（たとえば富井ら⁵⁾）、運転整理パターンを活用する手法（たとえば中村ら⁶⁾）など様々なアプローチが提案されている。しかし、その多くが人身事故等の一定時間、一定区間が運行できない状況を対象としており、本研究が想定する速度規制時にはそのままでは適用できない。

一方で、速度規制時に明示的に対象としている研究は少なく、従来研究（たとえば Corman and D'Ariano⁷⁾、加藤・平井⁸⁾ など）でも、数多くの前提条件を設けるなど汎用性に欠けている。2.2節で挙げたように、速度規制時には運転整理の手段をパターン化することが困難であることを踏まえ、本研究では、線区依存の少ないモデル化が可能な数理最適化を活用した手法を提案する。

3. 運休および車両運用変更の提案手法

3.1 提案手法の全体の流れ

本研究で提案する手法の全体の流れを図3に示す。まず、規制区間および規制時間の情報を入力し、そこから現時点より先の初期予測ダイヤを作成する(Step1)。続いて、初期予測ダイヤの情報から、運休および車両運用変更の変更手配を作成し(Step2)、その内容をもとに予測ダイヤを再作成し更新する(Step3)。その後、順序変更や番線変更といったその他の変更手配を必要に応じて追加し、予測ダイヤを更新する(Step4)。本研究では、この処理の流れを実現するための運転整理シミュレータを開発した。

ここで、運転整理の変更手配作成を、Step2とStep4の2段階に分けているのは、2.3節で述べたように、運転整理の意思決定が全体的な運転整理と詳細な運転整理の2段階であることに起因する。本稿の対象は前者のStep2であり、運休および車両運用変更の手配作成手法を提案する。

以下、3.2節で予測ダイヤの作成手法、3.3節および3.4節で運休および車両運用変更の手配作成手法を示す。

3.2 速度規制時の予測ダイヤの作成手法

速度規制時の予測ダイヤについて、本稿では実際の列車運行を想定し、以下の要件を設ける。

- (1) 規制区間走行時は、徐行での運転のため、駅間走行時分が一定時分増加する。
- (2) 規制開始時において、駅間走行中であれば、その駅間の駅間走行時分が一定時分増加する。
- (3) 規制開始時において駅停車時であれば、その駅と次の駅の駅間から駅間走行時分が一定時分増加する。
- (4) 規制区間を走行中に同区間の規制が解除された場合は、同区間を走行し終わるまで速度規制の影響を受ける。

ここで、(4)の要件を設けているのは、実際の列車運行では、徐行運転から通常運転に戻す場合、列車をいったん停車させて指令員が通告を行うという手順を伴うこ

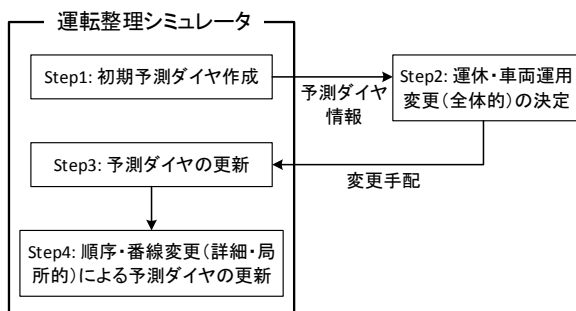


図3 提案手法の全体の流れ

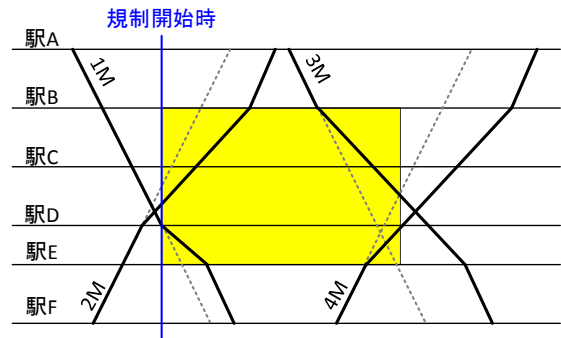


図4 実際場面を想定した予測ダイヤ

とを想定している。そのため、前方の(残りの)規制区間の距離と規制速度にもよるが、多くの場合、徐行のままの運行となるからである。

上記の要件を踏まえた予測ダイヤの例を図4に示す。規制開始時において、1Mは駅Dに停車中のため、駅D～駅E間のみ徐行運転となる。また、2Mは駅D～駅C間を走行中のため、駅D～駅B間で徐行運転となる。一方で、規制終了時には、3M、4Mともに規制区間境界駅の駅B、駅E発時点が規制時間帯に当たっている。いずれもその後の区間で規制時間帯をはずれているものの、規制されていた区間内では継続して徐行運転となる。

本研究では、以上の要件を満たす予測ダイヤを、数理最適化手法を用いて作成する⁹⁾。

3.3 車両運用を表現するためのネットワークモデル

予測ダイヤを作成した後に、その情報をもとに運休および車両運用変更の変更手配を作成する。本研究では、この変更手配を決定する問題を、数理最適化手法の一種である多品種ネットワークフローモデルによる求める¹⁰⁾。多品種ネットワークフローモデルとは、ネットワーク上に複数品種の「もの」を流すことで、最適なものの流れ(このものの流れのことを、フローと呼ぶ)を求めるためのモデルである。ここで、車両編成(より正確には仕業)を品種、車両運用をフローと見なすことで、列車運行をモデル化することが可能である。このモデルは、車両運用に着目するモデルとして有効であり、Tsunoda et al.¹¹⁾などでも用いられている。

このモデルにより、運休および車両運用変更を容易に考慮できるだけでなく、車両運用戻しといった観点も考慮することができる。また、路線全体をモデル上で考慮することで、局所的な手配ではなく路線全体を踏まえた手配を作成することができる。

多品種ネットワークフローモデルを適用するためには、対象となる問題をネットワークで表現する必要がある。本研究では、予測ダイヤの情報(例を図5に示す)に対応し、図6に示すようなネットワークを作成する。白抜きのノードは予測ダイヤの各列車、各駅の到着および

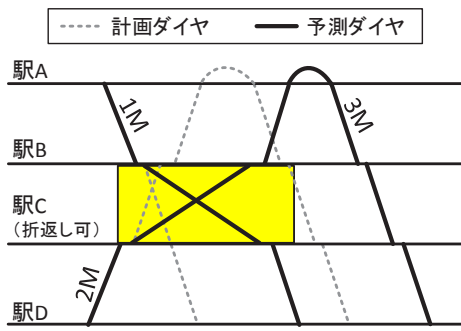


図5 予測ダイヤの例

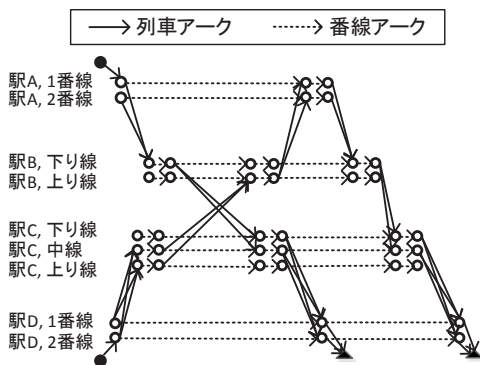


図6 対応するネットワーク

び出発を表し、黒丸は出区を、黒三角は入区を意味する。また、アークはそのノード間で推移が可能であることを意味するが、列車を意味する列車アークと、駅での在線を意味する番線アークがある。白抜きノードは、各駅でその駅にある番線数だけ用意し、進路構成が可能であれば、到着の場合はそのノードに向けて列車アークを張り、出発の場合はそのノードから列車アークを張るようになる。

また、現在時刻から各仕業の現在位置を取得し、そこを出区箇所と見なして当該白抜きノードへ黒丸からアークを張る。さらに、各仕業の計画運用における入区箇所において、黒三角に向けてアークを張る。これにより、各仕業は計画運用上の入区箇所を終了することが保証されるので、運用戻しを考慮可能となる。

図6の例では、たとえば左上の2つの白抜きノードは、それぞれ1Mの駅A出発を意味し、右下へ張られている列車アークは1Mの各番線からの駅A～駅B間走行を意味する。駅Aは終端駅で、1番線、2番線の2つの番線があり、それぞれから下り線に出発可能であることを想定している。

3.4 多品種ネットワークフローとしてのモデル化

このネットワークにおいて、予測ダイヤに対応する車両運用をフローとして表現する。そして、必要に応じてネットワーク上でフローを変化させることで、その変化の結果から運休および車両運用変更の手配を作成する。ネットワーク上で車両のフローを変化させるためには、

評価関数を定める必要がある。本研究では、2.2節で挙げた要件にもとづき、車両運用変更の少なさと、輸送力の確保の2つを反映するような評価関数とする。

まず、車両運用変更の少なさについては、ネットワーク上の各アークを通過したときのコストに反映する。コストは、各仕業の計画運用に該当するアークの場合は0、その他の場合は一律で1とする。これにより、各仕業がなるべく計画運用にもとづき運行することを指向するようになる。なお、(当然ながら)計画運用は仕業ごとに異なるため、ネットワーク上で同じアークでも仕業によりそのコストは異なる。

輸送力の確保については、時間帯別OD (Origin Destination) データを入力とし、このデータを時間幅、区間、方向ごとの需要量(これをデマンド分布と呼ぶ)に変換する。この需要量と、変更後の車両フローにもとづく輸送力を比較し、もし不足するようであればペナルティとして反映し、輸送力確保が優先されるようにする。もし輸送力が上回る場合は、ペナルティは0とする(負の値は設定しない)。

以上の考えにもとづき、運休および車両運用変更の手配作成を数理最適化問題として以下のように定式化する。使用する記号の定義を表1に示す。

$$\text{Min. } \alpha \sum_{k \in K} \sum_{e \in E} c_e^k x_e^k + \beta \sum_{m \in M} y_m \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{e \in \gamma^+(v)} x_e^k - \sum_{e \in \gamma^-(v)} x_e^k = n_v^k, \forall k \in K, \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} x_e^k \leq u_e, \forall e \in E \quad (3)$$

$$y_m \geq d_m - \sum_{k \in K} \sum_{e \in E_m} p^k x_e^k, \forall m \in M \quad (4)$$

$$x_e^{k_1} = x_e^{k_2}, \forall e \in F \quad (5)$$

$$x_e^k \in \{0,1\}, \forall e \in E, \forall k \in K \quad (6)$$

$$y_m \geq 0, \forall m \in M \quad (7)$$

式(1)は目的関数であり、第1項は車両運用変更のコスト、第2項は需要量に対する輸送力のペナルティを示す。 α および β はそれぞれのコストに対する重みであり、状況に応じて設定する。

式(2)～(7)は制約条件である。式(2)はネットワークフローモデルの基本的な制約条件であり、各ノードにおいて、各仕業の流入量と流出量が等しいことを意味する。これは、車両が運用の途中で増加したり減少したりしないことを意味し、車両運用として成立させるための条件となる。式(3)は、各アークの容量上限制約(各列車には計画運用以上の仕業数を充当しない)を意味する。式(4)は、各デマンド分布におけるODに応じた輸送力を確保するための制約条件である。輸送力が不足する場合は y_m が正の値をとり、式(1)でペナルティとして考慮

表1 使用する記号とその意味

記号	意味
K	仕業 k の集合
V	ネットワーク上のノード v の集合
E	ネットワーク上のアーク e の集合
F	計画運用で併結編成が走行するアーク e の集合
$\gamma^+(v)$	ノード v から出るアーク e の集合
$\gamma^-(v)$	ノード v に入るアーク e の集合
M	デマンド分布 m の集合
E_m	デマンド分布 m に含まれる (方向が一致する) アーク e の集合
n_v^k	仕業 k におけるノード v のフロー整合数 (出区なら 1, 入区なら -1, それ以外なら 0)
u_e	アーク e の容量上限 (原則 1, 併結編成の場合 2)
p^k	仕業 k に充当された車両編成の輸送力 (定員により決定)
d_m	デマンド分布 m の需要量
c_e^k	仕業 k がアーク e を流れることによるコスト (計画運用ならば 0, それ以外ならば 1)
k_e^1, k_e^2	計画運用で併結編成が走行するアーク e の 2 つの仕業
x_e^k	仕業 k がアーク e を流れるのであれば 1, さもなければ 0 を表す変数
y_m	デマンド分布 m における需要量に対し不足する輸送力を表す変数

される。式 (5) は、車両の分割併合について、計画運用以外の箇所では認めないことを示す制約条件である。この条件は必ずしも必要ではないが、分割併合は駅係員による対応が必要となる場合が多いため、不要な分割併合を防止するために設けている。式 (6), 式 (7) はいずれも変数の取りうる値の範囲を示す。

式 (1) ~ (7) により表現される数理最適化問題は、汎用の数理最適化ソルバーを用いることで求解が可能である。本研究では、Gurobi Optimizer 7.5¹²⁾ を使用する。

4. 実在路線を対象とした開発手法の検証

4.1 検証方法

以上で示した運休および車両運用計画の手配作成手法の性能を確認するため、実在路線および実際に発生した速度規制事例を対象に検証する。対象路線は、1日あたりの列車本数は 202 本と中規模路線であるが、年間を通して大雨による速度規制の頻度が高い路線である。

対象とする事例の詳細として、規制開始時刻、規制終了時刻、規制影響列車数を表 2 に示す。規制影響列車数

とは、計画ダイヤ上で速度規制の影響を受ける (規制により遅延が生じる) 列車数を表し、この値が大きいかほど速度規制の影響が大きいことを意味する。なお、事例 1, 2 のいずれも大雨を原因とした速度規制であり、また実際に運休が生じた事例である。

計算には、Windows 10 Professional, CPU Core i7-8700K (3.7GHz), メモリ 64GB の計算機を使用した。

4.2 結果と考察

運転整理手法の評価は、運休・車両運用変更の作成手法の計算速度と、提案する運転整理案の品質の 2 つの観点により行う。表 3 には、提案手法の計算性能として、各事例の運休本数、車両運用変更数、計算時間 (秒) を示す。

事例 1 では、運休および車両運用変更が提案された。事例 1 の計算結果として、計画ダイヤおよび運転整理案を含む予測ダイヤを図 7 に示す。この事例は、ダイヤ図の下部がこの地域の中心部であるため、朝ラッシュ時は下方が主要流動となる。ダイヤ上の赤い点線が運休列車を意味するが、折返しを含む列車 2 本が運休となっており、いわゆる「ヤマ切り」をしていることがわかる。このような実際の運転整理でよく用いられる方法が提案されたのは、車両運用を考慮し、運用戻しをモデルに組み込んでいるためといえる。なお、速度規制が生じた時間帯が早朝であるにもかかわらず、8 時頃まで運休を出さないのは、朝ラッシュの最混雑時間帯の輸送力確保を優先し、必要な輸送力が減少する時間帯まで運休を出すことを避けたからと考えられる。

一方、事例 2 では、運休や車両運用変更は提案されていない。これは、規制開始時刻が 20 時以降であるため、車両運用戻しのことを考慮し、終電まで変更なしとすることが望ましいと判断されたと考えられる。

計算時間については、いずれも 30 秒程度であり、実用的にも許容時間内と思われる。しかし、列車本数がさらに多い路線を対象にする場合など、他路線での検証は必要と考えられる。

表2 対象事例の詳細

事例	規制開始時刻	規制終了時刻	規制影響列車数
1	始発以前	6:24	12
2	20:26	23:24	17

表3 運転整理手法の計算性能

事例	運休本数	車両運用変更数	計算時間 (秒)
1	2	3	17.84
2	0	0	30.67

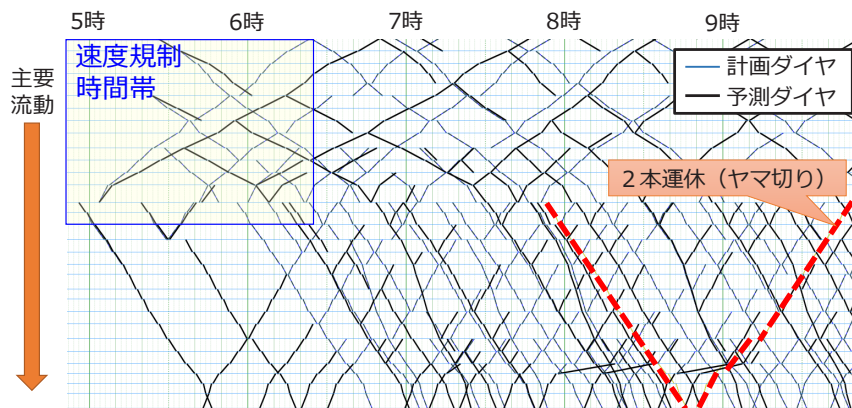


図7 事例1の提案結果

5. まとめと今後の課題

本稿では、大雨や強風等により速度規制が生じた状況における、指令員の迅速な意思決定を支援するための運休および車両運用変更の手配作成手法について述べた。提案手法は車両運用に着目しているため、柔軟な車両運用変更、さらには運用戻しといった点を考慮することができ、また同時に複数の区間で速度規制が生じた場合にも適用可能であるなど、汎用性の高い手法としている。

提案手法を、列車本数が約200本で速度規制が生じる実在路線を対象に、複数の実際の事例にもとづくシナリオを用いて計算したところ、30秒程度で実用的な運転整理案が作成できることを確認した。

ただし、提案手法の有効性を1路線でしか検証ができておらず、手法の汎用性については確認できていない。そのため、複数の路線かつ様々な速度規制シナリオに適用した上で評価する必要がある。また、提案手法では、路線に特有の個別の制約条件は十分に反映しておらず、実場面では許容されないと考えられる変更手配も算出してしまふ恐れがある。よって、実用場面に適用するためには、このような制約条件の追加が求められる。

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) Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., Toth, P., Veelenturf, 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.
- 3) Veelenturf, L. P., Kidd, M. P., Cacchiani, V., Kroon, L. G., and Toth, P., “A railway timetable rescheduling approach for handling large-scale disruptions,” *Transportation Science*, Vol.50, No.3, pp.841-862, 2016.
- 4) 今田京介，富井規雄：途中折り返し運転を考慮した混合整数計画法による運転整理アルゴリズム，電気学会論文誌D，Vol.137，No.6，pp.484-491，2017
- 5) 富井規雄，田代義昭，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 (TOM11)，pp.26-38，2005
- 6) 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
- 7) Corman, F., and D’Ariano, A., “Assessment of advanced dispatching measures for recovering disrupted railway traffic situations,” *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, No.2289, pp.1-9, 2012.
- 8) 加藤 怜，平井力：速度規制による列車遅延時の運休判断支援手法，鉄道総研報告，Vol.30，No.8，pp.17-22，2016
- 9) 加藤 怜，佐藤 圭介，坂口 隆：数理最適化による速度規制時の予測ダイヤ作成手法，電気学会産業応用部門大会，講演番号 5-46，2017
- 10) 加藤 怜，坂口 隆：多品種フローモデルを用いた列車速度規制時の運転整理，日本OR学会春季研究発表会アブストラクト集，pp.82-83，2018
- 11) Tsunoda, M., Imaizumi, J., and Morito, S., “A model for estimating the required number of train units under split-and-merge policy for decision making in railways –A mathematical formulation by integer multi-commodity network flow-,” in proceedings of the *6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015)*, Narashino, Japan, 2015.
- 12) Gurobi Optimizer. <http://www.gurobi.com/> (参照日：2018年9月28日)