

# 速度規制による列車遅延時の運休判断支援手法

加藤 怜\* 平井 力\*

A Method of Determining Train Cancellation for Train Rescheduling under Speed Restricted Situations

Satoshi KATO Chikara HIRAI

When train dispatchers detect heavy rain or strong wind in their railway lines, they have to reduce the speed of trains or to stop trains to keep safe train traffic. Because such operations can make trains delay, they also have to prepare a train rescheduling plan to suppress passengers' discomfort. Although many researchers focus on rescheduling algorithms to support train dispatchers, rescheduling algorithms under speed restricted situations has not been sufficiently discussed. In this paper, we present a simulation-based rescheduling algorithm in which we can take advantage of the information obtained in advance to reduce the computational complexity. Applying the algorithm to the real speed restricted scenarios, we can conclude that the algorithm works to obtain a valid train rescheduling plan in a short time.

キーワード：運転整理，速度規制，運休判断，シミュレーション，アルゴリズム

## 1. はじめに

鉄道沿線において、雨量や風速が定められた値を超過すると、列車運行の安全を保つために、特定区間に対し列車速度が規制されることがある。速度規制の度合いは、大雨や強風の強さだけでなく、鉄道事業者によっても、線区等の設備条件によっても異なるが、一般的には通常に比べて大幅に減速することが多く、ダイヤ乱れを引き起こすことがある。

一方、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行われる。現状では、運転整理業務は指令員の過去の経験および瞬時の判断にもとづいているが、一方で計算機により支援する手法の研究は国内外を問わず数多く行われている<sup>1)2)</sup>。しかし、速度規制時における運転整理手法については、筆者らの知る限りこれまで十分な検討がされていない。

本稿では、速度規制時の運転整理を対象に、運休判断を行う指令員に対する意思決定支援を目的とする。そのために、計算機を用いた運転整理アルゴリズムを開発し、実際の速度規制事例をもとにしたデータを用いて評価計算を行い、アルゴリズムの有効性を検証する。

## 2. 列車速度規制時の運行管理

### 2.1 速度規制時の列車運行

列車に対し速度規制が発動されると、その区間の最高速度が大幅に低下するため、その走行には通常に比べ大幅に時間を要する。以降、速度が規制される区間を「規

制区間」、その規制が発動されている時間を「規制時間」と呼ぶ。規制区間を通過すると遅延が発生するが、終着駅まで遅延したまま走行すると、折返し列車が始発時点で遅延する。その列車が規制区間を通過する間には、更に遅延が増大する。速度規制が続く限りこれが繰り返されるため、規制時間が長くなると、大規模なダイヤ乱れにつながる。

図1に列車ダイヤの例を示す。たとえばB駅～C駅の区間に速度規制が発動されたとする。このとき、減速による増遅延を考慮すると、図2のようなダイヤ図になる。図中の黄色の四角で囲った部分が規制区間および規

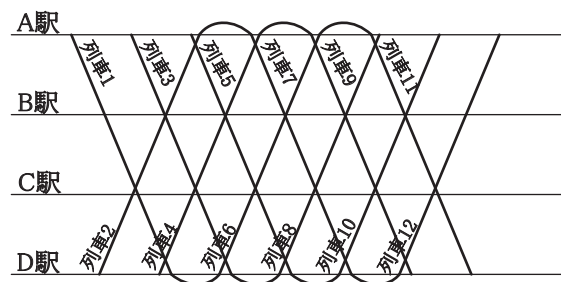


図1 列車ダイヤの例

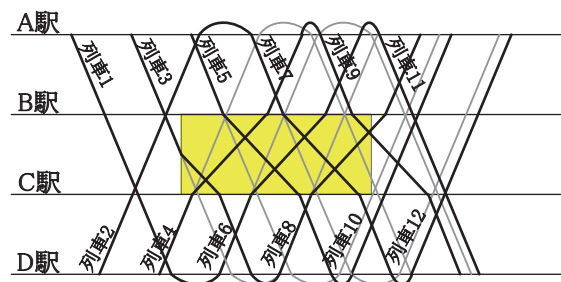


図2 速度規制発生時の列車ダイヤ

\* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

特集：輸送計画技術

制時間を意味しており、規制区間を通過する列車3～列車9は駅間走行時間が長くなるため、列車スジの傾きが大きくなり、遅延が発生する。この遅延は折返し列車にも波及し、列車9～列車12は折返し場面で遅延を回復できず、始発時点で遅延が生じている。

2.2 実際の速度規制発生事例の分析

速度規制時における列車運行を詳細に分析するために、過去の速度規制発生日の実績ダイヤデータを分析した結果、下記のことが明らかになった。

- ・ 速度規制発動後、通告のため付近の列車をいったん抑止する。
- ・ 規制区間を走行する列車に対しては、手前の駅で徐行の通告を行うため停車時間が増加する。
- ・ 運休や運用変更等の手配が生じる場合、乗務員に連絡する必要がある、その調整により増遅延する。

このような理由のため、速度規制時の遅延時分は、規制区間走行分の増遅延分より更に大きくなる。

図3には、速度規制時の増遅延、遅延伝播の仕組みとして、ある列車の遅延発生から他の列車の遅延発生へと遅延が伝播する流れを示している。遅延発生の背景として、速度規制の発動、規制区間の通過、運転整理手配があり、これらにより列車に遅延が発生する。この遅延が、遅延列車の待避や接続等により他の列車に波及する。そして、遅延が発生した列車の影響でさらにまた他の列車へと遅延が伝播する。

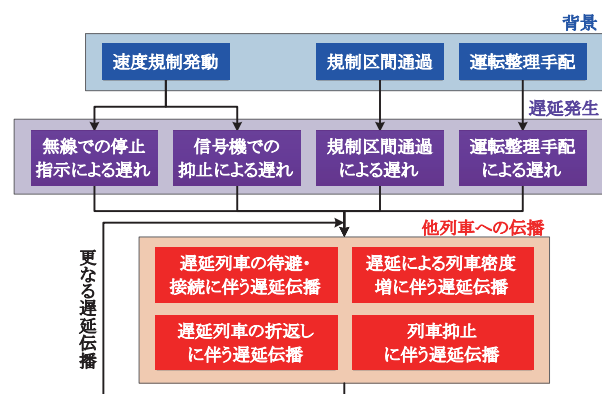


図3 速度規制時の遅延発生と遅延伝播

2.3 速度規制時の運転整理の基本的な考え方

速度規制によるダイヤ乱れが発生した際には、旅客の不便をなるべく抑えるため、指令員は運転整理を行う。しかし、人身事故等の輸送障害と比較して下記の点が異なる。

- ・ 支障区間は減速する必要があるが走行可能である。
- ・ 雨や風がさらに強まり、支障区間が運転取り止めとなる可能性がある。
- ・ いつ支障が解除されるか、予測が非常に難しい。

最も単純な運転整理手配として、速度規制が続く限り規制区間は一切の運転を取り止める方法が考えられる。しかし、規制区間は走行可能であるため、その区間を通過する旅客の利便性を考慮すると、決して好ましいとはいえない。一方で、すべての列車を運転させると、ダイヤ乱れが大きくなるだけでなく、天候悪化により運転取り止めとなった際に駅間停車が発生するリスクが高まる。そこで、速度規制時には下記のような考えにもとづき運転整理が実施される。

(1) 運休

速度規制による増遅延の影響をなるべく抑えるため、また天候悪化時の駅間停車を防止するため、必要最小限の列車を運休とする。また、運休区間は規制区間を含むなるべく短区間にとどめ、可能な限り折返し運転を行うことで、規制区間外への影響を抑えるようにする。

(2) 車両運用変更

列車の区間運休、折返し運転と同時に車両運用の変更が生じるのは当然であるが、それに加えて、規制区間を走行する列車が規制区間を通過した後に運用変更を行い、後続の列車として運転することがある。

(3) 列車順序変更・番線変更

速度規制が一部区間で発生した場合には、線区全体で速度規制の影響を受ける列車と受けない列車が混在する。そこで、順序変更や番線変更により、速度規制が直接影響しない列車まで影響が及ばないようにする。

また、実際の事例分析により、指令員による運転整理手配には下記のような特徴があることがわかった。

- ・ 運休区間および折返し駅は規制区間と運転設備からほぼ一意に決まる。
- ・ 運休頻度については大まかな方針があり、それにもとづき決まる。

一般的に、折返し運転を実施するためには引上げ線等の設備が必要であり、折返し可能な駅は限られる。よって、運休区間は規制区間からほぼ決まる。また、運休の頻度は、たとえば2本に1本運休といった方針があり、それは線区や区間、時間帯に依存して決まってくるということがわかった。

速度規制時の運転整理では、規制による遅延の影響を考慮したうえで、どの列車について運休するか意思決定が非常に重要である。また、この意思決定はなるべく早く行わないといけない。そこで本研究では、運休判断を行う指令員に対し運休列車の意思決定を支援することを目的とし、コンピュータ計算により迅速に運転整理案を提案することを目指す。

3. 速度規制時の運転整理に対する評価尺度

評価尺度を考えるうえでまず重要になるのは、旅客流

動の観点を含めるか否かである。旅客流動の観点を考慮し、実際に旅客行動をシミュレーションすることで、各旅客の不効用値を求めるといった研究も報告されている<sup>3)</sup>が、旅客行動のシミュレーションは複雑な計算を必要とするため、短時間での計算は困難である。よって、本研究では迅速性を重視し、輸送力や列車間隔といった瞬時に計算可能な列車運行に関する項目により評価する。

列車運行の観点において、速度規制時ということに着目すると、特に重要なのは輸送力、列車間隔、遅延時分の3つと考えられるため、これらの項目で運転整理案を評価する。具体的には、輸送力は列車本数、列車間隔は特定の駅の最大列車間隔、遅延時分は特定の駅の総遅延時分とする。また、規制区間内と規制区間外のそれぞれについて計算することで、速度規制の影響が規制区間外にどの程度影響しているかを分析する。

以上より、本研究では①規制区間内および区間外の列車本数、②規制区間内および区間外の最大列車間隔、③規制区間内および区間外の総遅延時分を評価尺度とする。①は値が大きい方が、②、③は値が小さい方が望ましい。規制区間内、区間外のそれぞれについて、どの駅、場面（着か発か）で計算するかについては、事前に規制区間内、区間外で最も重要と思われる駅、場면을指定することとする。

## 4. 速度規制時の運転整理アルゴリズム

### 4.1 前提条件と基本的な考え方

運転整理アルゴリズムを構築するにあたり、本研究では実場面を想定した下記のような前提条件をおく。

- ・ 規制区間に対し、運休区間、折返し運転方法は一意に決まる。
- ・ 速度規制のシナリオが所与である。

2.3節で述べたように、一般的に折返し可能な駅は限られる。また、手配の容易さから、各列車の運休区間は統一されている方が望ましいと考えられる。そこで、規制区間が与えられたときに、どの区間を運休し、どの駅で折返し運転を行うかは一意に決まるものとする。

また、速度規制に関する情報として、規制区間、規制発動時刻、解除時刻、抑止列車運転再開時刻の情報を含む規制シナリオが与えられるものとする。実際の速度規制発生場面では、規制解除時刻、抑止列車運転再開時刻は不明であるが、指令員は経験等にもとづき何らかの予測を行い、それにもとづいた手配を行っている。本手法を実場面に適用する際には、解除時刻はたとえば1時間後とし、30分ごとに状況に応じて再計算するような適用を想定している。

また、速度規制時にどの程度の列車を運転し、またどの程度運休するかは、あらかじめ基本方針として決め

られていることが多いことから、運転整理の方針（パラメータ）として、「運休割合」および「連続運休可能本数」を入力項目とする。運休割合とは、運休判断の対象列車数に対する運休本数の割合を指し、割合の下限 $P_{LB}$ および上限 $P_{UB}$ を設定する。また、連続運休可能本数とは連続して運休が許可される本数を意味し、その上限 $Q$ を設定する。これらのパラメータにより、実態から乖離した運転整理案を作成することを避ける。

運転整理手法としては、シミュレーションによる手法（たとえば文献4）と最適化による手法（たとえば文献5）の2つの方向性が考えられるが、本研究では迅速性を重視し、短時間での計算が見込めるシミュレーションによる手法を採用する。また、計算負荷を減らすため、まずは事前に与えられる情報にもとづいて運休区間のみを対象とした簡易計算を行い、評価値が望ましい組合せのみに絞り込む。その後、絞り込まれた組合せについて、詳細なシミュレーションを行う手法を構築する<sup>6)</sup>。

### 4.2 列車運行のシミュレーション手法

列車運行のシミュレーションは文献7)にもとづきPERT（Program Evaluation and Review Technique）によりモデル化する。そこでは、各列車の各駅の到着や出発をノード、その前後関係をアークとしたネットワークにより列車運行をモデル化する。

本研究では速度規制時を対象にしているため、基本モデルに対し速度規制の影響を考慮する必要がある。具体的には、下記のような方法により対処する。

#### (1) 規制区間の通過による増遅延の反映

規制区間の通過による遅延については、あらかじめ計算した増遅延量を取得し、その分を該当するアークの重みに加えることで反映させる。

#### (2) 規制発動時の抑止の反映

先述のように、規制発動時には付近の列車はいったん抑止となる。そこで、規制発動時刻から抑止列車運転再開時刻までの間は、規制区間内の列車は停車させる。

#### (3) 通告に要する時分の反映

運転再開後も、速度規制が続く限りは区間内に進入する列車に対し、徐行の通告を行う必要がある。通告を行う駅で、一定時分停車時分が増加するようにする。

### 4.3 運転整理アルゴリズムの詳細

開発手法では、まず運休候補列車の抽出を行い、条件を満たす運休列車の組合せを列挙する。続いて、各組合せについて事前に得られる情報を活用して、評価値を算出する。評価値にもとづき運休組合せをいくつか絞り込み、各運転整理手配を入力してシミュレーション計算する。さらに、順序変更や番線変更を行ったうえで、運転整理案を出力する。以降では、各手順の詳細について

特集：輸送計画技術

説明する。

4.3.1 運休候補列車の抽出

速度規制シナリオより得られる、規制発動時刻  $t_1$ 、抑止列車運転再開時刻  $t_2$ 、規制解除時刻  $t_3$  から、下記の手順で運休候補列車を抽出する。ここで、運休区間の境界駅を起点側から  $s_1, s_2$ 、列車  $i$  の駅  $s$  の計画着時刻を  $d_i^s$ 、計画発時刻を  $d_i^s$  と定義し、下り列車は起点側を始発とする列車、上り列車は起点側を終着とする列車とする。

- (1) 下り列車について  $t_2 \leq d_i^{s_1} \leq t_3$  である列車  $i$  を、上り列車について  $t_2 \leq d_j^{s_2} \leq t_3$  である列車  $j$  をすべて抽出する。
- (2) 抽出された列車について、上下で本数が異なる場合、少ない方面の列車について、下り列車であれば  $d_i^{s_1} > t_3$ 、上り列車であれば  $d_j^{s_2} > t_3$  の列車について、発時刻が  $t_3$  に近い順から、本数が多い方面の列車数と同じになるまで追加する。

なお、あらかじめ運休可能な列車種別を定義することで、特急列車など運休を避けるべき列車（あるいは別の意思決定が必要な列車）は候補からはずす。図4は、図1の列車ダイヤに対し、 $t_1, t_2, t_3$  が与えられたときの運休候補列車を示す。B駅、C駅がそれぞれ  $s_1, s_2$  となり、点線が運休候補列車および区間を意味する。手順(1)により、運休区間の境界駅となるB駅～C駅で列車5～9が抽出される。これでは下り列車が3本、上り列車が2本となり上下で列車本数が合わないため、手順(2)で少ない方の上り列車について列車10が追加される。

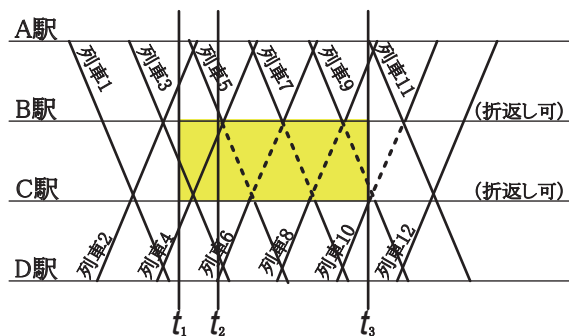


図4 運休候補列車

4.3.2 条件を満たす運休組合せの列挙

上記手順で抽出した運休候補列車から、条件を満たす運休組合せを列挙する。それぞれの運休候補列車について、運転および運休の可能性があることから、組合せの数を単純に求めると2（運転および運休）の「運休候補列車数」乗となるが、そのなかから上下の列車それぞれについて、運休割合の上下限、連続運休可能本数の上限の条件を満たす組合せのみ列挙する。

4.3.3 後運用・前運用未定列車の抽出と運用つなぎ

条件を満たす運休組合せのなかから任意の1つを選び、下記の方法により、後運用未定列車および前運用未

定列車の抽出を行う。

- ・ 運休となった列車は、運休区間の開始駅で後運用未定、運休区間の終了駅で前運用未定とする。
- ・ 運転となった列車は、速度規制による影響を受けて走行した上で（規制による増遅延分を加える）、その先の運休区間の境界駅にて後運用未定とする。一方、その列車の運休区間より先の列車については、境界駅にて前運用未定とする。

さらに、運休区間の両境界駅で、時刻順に後運用未定列車から前運用未定列車へと運用をつなげる。ここで、時刻が逆転して運用をつなげることも許す。

図5は、図4の例の運休候補列車のなかで、列車7、8を運休（点線で運休列車、区間を示す）とした組合せについて、後運用未定列車、前運用未定列車を抽出し、運用つなぎを作成した図を示している。図中で、黒丸は後運用未定、白丸は前運用未定を示す。

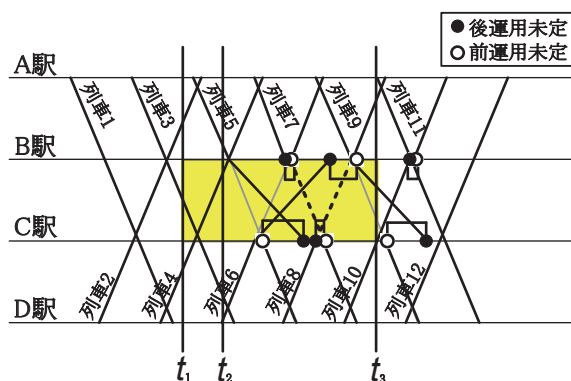


図5 後運用・前運用未定と運用つなぎ

4.3.4 車両運用を考慮した予測発時刻の抽出

選択した運休組合せの評価を行うため、上記の運用つなぎを行ったときの、運休区間境界駅での（規制区間とは逆方面の）予測発時刻を下記の方法で算出する。

- ・ 折返しとなった列車の予測発時刻は、着時刻に、最小折返し時分を加えた時刻とする。ただし、計画発時刻より早い場合は計画発時刻とする。
- ・ 規制区間を走行となった列車の予測発時刻は、着時刻に、最小停車時分を加えた時刻とする。ただし、計画発時刻より早い場合は計画発時刻とする。

続いて、計算した予測発時刻をもとに、運休組合せの評価値を計算する。ここでは、運休区間の境界駅の列車間隔最大値が小さいほど、また運休区間の境界駅の総遅延時分が小さいほど望ましいこととし、 $M$  個の運休組合せを選択する（ $M$  はパラメータ）。

4.3.5 列車運行シミュレーションと自動順序変更

選択した  $M$  個の運休組合せについて、それぞれの運休および車両運用変更を入力し、4.2 節で述べた方法で列車運行シミュレーションを行う。シミュレーションを

行ったのちに、順序変更・番線変更アルゴリズム<sup>6)</sup>を適用し、順序変更および番線変更を提案する。

以上により、 $M$  個の運休組合せについてシミュレーションによる予測ダイヤを作成し、そのなかから最終的に出力する運転整理案を決定する。この段階では、その場面で着目したい特定の駅の総遅延時分により評価する。

#### 4.4 処理の流れ

以上より、処理の流れは下記ようになる。

- (1) 速度規制シナリオ、計画ダイヤ、運転率等のパラメータから、条件を満たす運休組合せを列挙する。
- (2) 各運休組合せについて、下記の計算を行う。
  - (a) 速度規制による増時分を考慮した運用つなぎを作成する。
  - (b) 運休区間境界駅の予測発時刻を計算し、そのなかから最大の列車間隔を算出する。
- (3) 各運休組合せの最大列車間隔をもとに、望ましい運休組合せを複数案選択する。
- (4) 上記で選択された組合せに対して、運休・車両運用変更の手配を入力した上で、順序変更を考慮した列車運行シミュレーションを行う。
- (5) 各組合せのなかで、総遅延時分が望ましい運転整理案を選択し、結果として出力する。

図6には、4.3.3節で例として挙げた組合せが最終的に選択されたときの、運転整理案を示している。このような運転整理ダイヤを、最終的な結果として出力する。

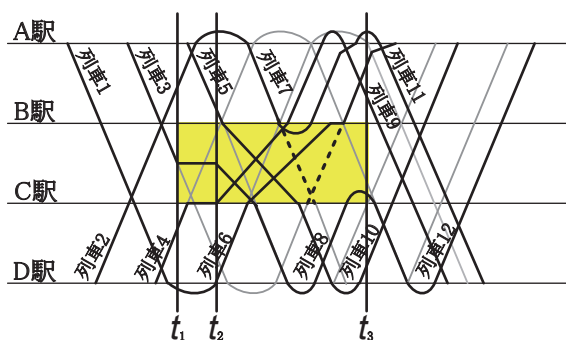


図6 出力する運転整理ダイヤ

### 5. 実際の速度規制事例を対象にした検証

#### 5.1 検証方法

開発したアルゴリズムの性能を検証するため、実際の事例をもとにしたデータを用いて評価計算を行う。対象線区はX、Yの2つとするが、それぞれの1日の列車本数は約540、約680と比較的多い。また、線区Yは途中駅で分割併合を行っており、線区Xに比べてより複

雑な線区である。この2つの線区において、過去に実際に発生した速度規制事例を対象とする。表1に、対象とする事例の線区、規制発動時刻、規制解除時刻、規制影響列車数を示す。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、この数値が大きいほど、速度規制の影響が大きいことを意味する。

これら4つの事例を対象にして、

- ・ すべて徐行で運転し運転整理を一切しない場合のシミュレーションダイヤ
  - ・ 速度規制当日の実績ダイヤ（実際の手配）
  - ・ 開発手法により作成したシミュレーションダイヤ
- の3つについて、3章で述べた評価尺度を比較する。試験には、Windows 10 Professional, CPU Core i7-5960X, メモリ 64GB の計算機を使用する。また、アルゴリズムのパラメータは、 $P_{LB}$ ,  $P_{UB}$  は比較のため実際の手配とほぼ同様になるように設定し、 $Q$  は一律で2とする。また、 $M$  は計算時間を抑えるため1とする（これにより、4.3.5節で述べた順序変更の計算が1つの組合せのみでよいので、計算時間を大幅に短縮することができる）。全体の計算時間を60秒以内に収めることを目標として、順序変更・番線変更の計算時間上限は30秒と設定する。

表1 各事例の規制発動時刻および解除時刻

	事例1	事例2	事例3	事例4
線区	X	X	Y	Y
規制発動時刻	14:25	4:00	14:01	9:34
規制解除時刻	17:41	9:58	17:26	11:54
規制影響列車数	14	26	20	16

#### 5.2 検証結果と考察

対象の4事例について、レーダーチャートによる評価値比較を図7に示す。この図ではすべて徐行で運転する場合の評価値を基準とし、実際の手配および開発手法の各評価値はすべて徐行で運転する場合との相対値（ただし、枠が外であるほど望ましくなるように、列車間隔など値が小さい方が望ましい場合は逆数をプロット）としている。また、計算時間についても記している。

計算時間については、すべての事例において60秒以下で運転整理案を算出することができた。レーダーチャートを見ると、事例1から事例3では、一部の項目を除き実際の手配と同等かよい評価値となっている。ただし、事例4ではどの評価値もすべて徐行とする場合や実際の手配と同等か、それを下回るものになっている。これは、事例4の線区Yはそもそも運用が複雑であり、しかも規制時間が朝時間帯（特に規制区間外の）列車本数が比較的多かったことが影響したと考えられる。

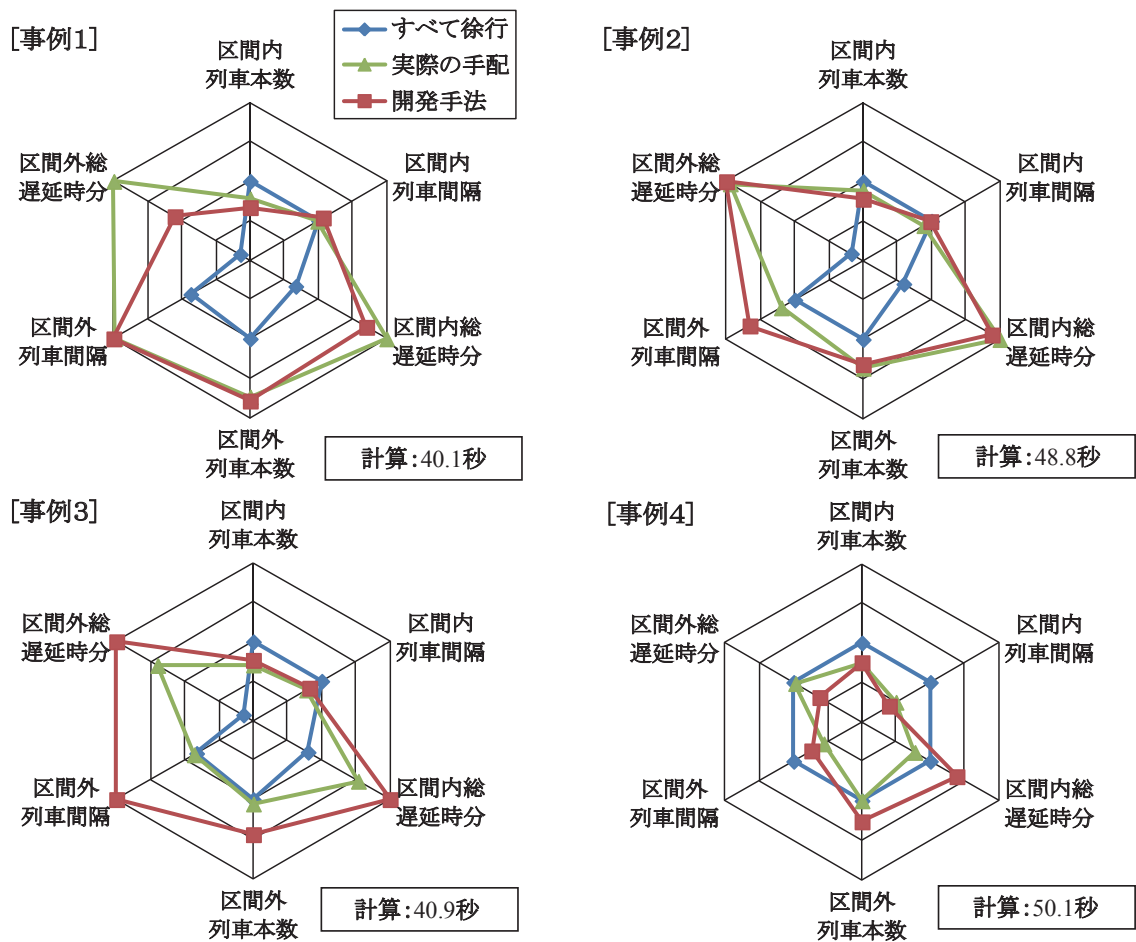


図7 レーダーチャートによる評価値比較

## 6. まとめ

本研究では、速度規制時の運転整理について、実際の速度規制発動事例をもとに遅延発生および遅延伝播の仕組みを分析し、運転整理の考え方を整理した。その結果をもとに、速度規制時に対応した列車運行予測シミュレーションプロトタイプを構築するとともに、指令員の運休判断に係わる意思決定支援を目的とした運休・車両運用変更アルゴリズムを開発した。複数の実際の事例をもとにしたデータを用いて検証した結果、60秒以内で実際の手配とほぼ同等の運転整理案を作成できることを示した。開発したアルゴリズムを活用することで、速度規制時の迅速な意思決定が可能になると考えられる。

## 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) 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: Methodological, Vol. 63, pp.15-37, 2014.

- 3) 國松武俊，平井力：利用者デマンドを考慮した運転整理案作成アルゴリズムの開発，鉄道総研報告，Vol.23, No.8, 2009
- 4) Hirai, C. and Kato, S. : Pattern-based train rescheduling and its evaluation method in temporal speed restricted situations, In: Proceedings of the 6th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015), Tokyo, Japan.
- 5) Wang, L., Mo, W., Qin, Y., Dou, F., and Jia, L. : Optimization based high-speed railway train rescheduling with speed restriction, Discrete Dynamics in Nature and Society, Vol. 2014, Article ID 934369, 2014.
- 6) 加藤裕，平井力：列車速度規制時の運転整理アルゴリズム，第22回鉄道技術・政策連合シンポジウム J-RAIL2015 講演論文集，2015
- 7) 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, SIG-2, pp.26-38, 2005