

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

An Algorithm for Train Rescheduling using Rescheduling Pattern Description Language R

平井 力[†] 富井規雄[†] 田代善昭[‡] 近藤繁樹[†] 藤森 淳[†]
Chikara Hirai Norio Tomii Yoshiaki Tashiro Shigeki Kondou Atsushi Fujimori

1. はじめに

鉄道において列車の運行に乱れが生じた時には、正常な運行に戻すために、列車の運休、折返し運転、臨時列車の運転、列車の順序や番線の変更等、一連のダイヤの変更が行なわれる。この業務を運転整理と言う。運転整理は、

- ・ 多数の列車を対象とするにも関わらず、限られた時間内での迅速な作業が必要とされる、
 - ・ 重視すべき項目が必ずしも明確ではない、
 - ・ 作業の輻輳の防止や起こり得るリスクの回避を考慮しなければならない、
- 等の性質を持ち、
- ・ 評価尺度が必ずしも明確ではなく、その時の状況に応じて変化する、
 - ・ 定量化が困難な要素の考慮が求められる等、
- いわゆる ill-structured な難しい問題である[1]。

現時点では、運転整理案の作成は、ほぼすべて人間の手に委ねられているが、近年、鉄道会社では専門家の減少等を背景に、運転整理案の作成をコンピュータで支援することへの要望が強くなっている[2, 3]。

運転整理案を自動的に作成するアルゴリズムについては、比較的小規模な事故を対象としたものが報告されている[4]。しかし、コンピュータによる支援を一層強化していくためには、数時間程度の不通区間が発生する事故のような、多数の列車の運休とそれに伴う大幅な車両運用の変更があるケースに対しても、運転整理案を自動的に作成できるアルゴリズムが必要である。

数時間にわたる不通区間の発生に対応する運転整理アルゴリズムでは、次のような要件を考慮する必要がある。

- ・ 合理的な運転整理案を作成すること。例えば、不通区間を避けて列車の折返しを計画する時には、輸送需要や折返し設備の有無を考慮すること。
- ・ 作成した運転整理案を実行する場合の労力が考慮されていること。例えば、運行管理システムへのダイヤ変更入力の労力、乗務員等の関係者への伝達の労力等が実行可能な範囲であること。
- ・ 起こりうるリスクへの配慮がなされていること。例えば、列車に予期せぬ遅延が発生しても、番線の競合等による二次遅延が極力発生しないこと。
- ・ 事業者としての経営方針を反映した運転整理案を生成すること。例えば、不通区間以外の区間では列車を極力走行させる、隣接線区へは列車の遅延を極力波及させない等の基本方針が反映されること。

これらの要件を満たす運転整理アルゴリズムを構築するためには、人間の経験的知識と数理計画的手法の双方を適切に組み合わせることが有効と考えられる。

本稿では、運転整理アルゴリズムを実現するために、最近、鉄道会社で使用されている「運転整理パターン」に基づくアルゴリズムを導入する。運転整理パターンは、事故の発生地点等に応じて、採るべき運転整理手法をあらかじめ定めたもので、経験的知識や会社としての経営方針に基づいて作成されている。その結果、運転整理パターンに基づいて運転整理案を作成することには、2章で述べるように様々なメリットがある。

しかしながら、運転整理パターンに基づく運転整理アルゴリズムを構築するためには、運転整理パターンをマシン可読な形で表現する方法、運転整理パターン適用を起動するトリガや具体的適用方法等を検討する必要がある。また、運転整理パターンだけで運転整理案が作成できるわけではないという課題を解決する必要がある。

これらの課題に対し、本稿では、 R と呼ぶ運転整理パターン記述言語を導入する。 R は一種のプロダクションルールとして動作する。そして、 R で記述された運転整理パターンを解釈実行するためのインタプリタ (R インタプリタ) を導入する。あわせて、「列車計画」「車両運用計画」等の目的ごとに構成された複数のサブシステムが連携して運転整理案を作成する枠組みを導入する。

2. 運転整理パターン

2.1 運転整理パターンとは

運転整理パターンを用いた運転整理案の例を図1に示す。なお、図1は、列車ダイヤ図の形式で描かれている。横軸が時刻、斜めの線(スジ)が列車の運行を表す。スジに付された数字は列車番号である。スジとスジを接続する横の線は、車両の使用順序(車両運用計画)を表している。太いスジは快速列車、細いスジは普通列車である。点線のスジは、運転整理の結果として、運休となった列車を表す。

ここでは、次のような運転整理パターンが準備されているとしている。

- 快速列車 X が A 駅から E 駅間で運休になった場合、その折返し列車 Y も E 駅から A 駅間で運休する(山切り)。そして、快速列車 X として運転されるはずであった車両は、 A 駅から、当初計画では Y の折返し列車であった列車 Z として運転する。
- 快速列車 X が C 駅から E 駅で運休になった場合、その折返し列車の快速列車 Y は、 E 駅から B 駅で運休とする。そして、臨時回送列車 T を C 駅から B 駅に設定し、快速列車 X の車両を B 駅からの快速列車 Y に充当する。

[†](財)鉄道総合技術研究所 Railway Technical Research Institute

[‡]九州旅客鉄道株式会社 Kyushu Railway Company

- c) 普通列車 X が、E 駅から C 駅間で運休になった場合、C 駅での折返しの普通列車 Y は、C 駅から E 駅間で運休とする。そして、E 駅から F 駅に臨時回送列車 T を設定し、列車 X の車両を F 駅に一時的に留置する。

これらの運転整理パターンは、不通区間にかかる列車は運休とし、番線に余裕のない C 駅、E 駅に車両を滞留させず、比較的番線に余裕のある B 駅（車両基地）および F 駅に一時的に留置することを念頭において作成されている。

図 1 は、D 駅と E 駅の間で事故が発生し、長時間列車が不通となった（×と×の間にある灰色の極太線）場合の、運転整理パターンに基づいた運転整理案を示している。

不通区間を通ることになる、5 列車、7 列車、2 列車、4 列車は運休となる。ただし、5 列車は既に B 駅を発車しているため、C 駅から E 駅間で運休（部分運休）とする。

7 列車の運休に対して、パターン a を適用する。その折返列車である 8 列車が運休となり、7 列車として走るはずだった車両は、A 駅で待機した後 15 列車として運転することになる。

5 列車の部分運休に対しては、パターン b を適用する。6 列車は E 駅から B 駅まで部分運休となる。臨時列車 9005 を C 駅から B 駅に設定し、5 列車を 9005 列車に折り返し、さらに、その車両を、B 駅からの 6 列車に充当する。

2 列車および 4 列車の運休に対しては、パターン c を適用する。これにより、9 列車および 11 列車は運休となり、F 駅まで、9001 列車、9003 列車が設定される。

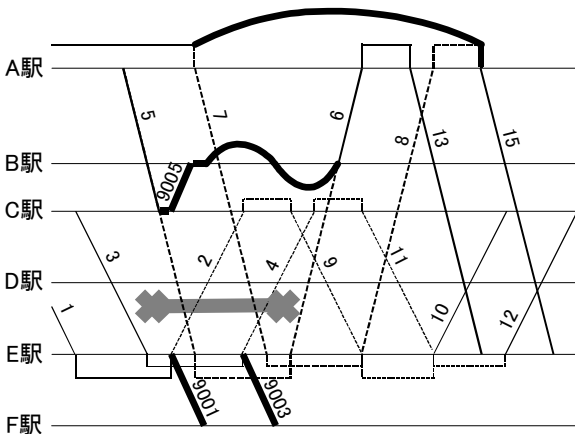


図 1 運転整理パターンの適用による運転整理

2.2 運転整理パターン導入の背景

鉄道会社で運転整理パターンが用いられるようになってきた背景には、次のような事情があると考えられる。

- ① 統一的な方針を定めておくことにより、指令員の考え方の差等に起因する個人差をなくし、提供する輸送サービスにバラツキが生じることを防止する。
- ② 運転整理の方針を事前に定め、駅・乗務員基地等の関係箇所に周知しておくことにより、迅速かつ統制のとれた行動を可能とする。
- ③ 作業の輻輳等を予想した運転整理手段をパターンに組み込むことにより、不測の事態を回避する。
- ④ 経営方針を明確に組み込んだ運転整理が実現できる。

これらの事情を考慮すると、計算機で運転整理案を作成する際にも、鉄道会社が策定している運転整理パターンを無視することは得策ではなく、積極的に利用することで、

実用的なアルゴリズムの構築につながると考えられる。また、処理速度の観点においても、保持しているパターンを利用することで、何も無いところから運転整理案を生成するよりも効率的なアルゴリズムが構築できると考えられる。

2.3 運転整理パターン導入の課題と解決方針

運転整理パターン（以下、「パターン」と略することがある）に基づく運転整理アルゴリズムを構築するためには、次の課題を解決する必要がある。

- ① パターンをコンピュータで解釈可能な形で表現しなければならない。パターンは、一般的なルールを図等で記述したものにすぎない。これをコンピュータ可読な形にする必要がある。
- ② パターンを適用する手法と手順を考案しなければならない。パターンはあくまでもパターンに過ぎず、列車番号等の情報が含まれているわけではない。従って、パターンを「理解」し、それを的確に「適用」するための仕組みが必要となる。
- ③ パターンが適用できない列車に対しても運転整理案を作成しなければならない。パターンだけで運転整理案が作成できるわけではない。パターンが適用できない列車と適用可能な列車が混在する状況に対して運転整理案の作成が行なえる必要がある。パターンが適用されない列車と、パターンが適用された列車との整合性を保ち、その他の条件を加味した上で、運転整理案に的確に組み込む機能が必要である。

本稿では、課題①を解決するために、運転整理パターンを記述するための R と呼ぶ言語を導入する。また、課題②を解決するために、 R インタプリタと呼ぶ仕組みを導入する。そして、課題③を解決するために、目的ごとに構成されたサブシステムの連携によって運転整理アルゴリズムを構成するという枠組みを導入する。

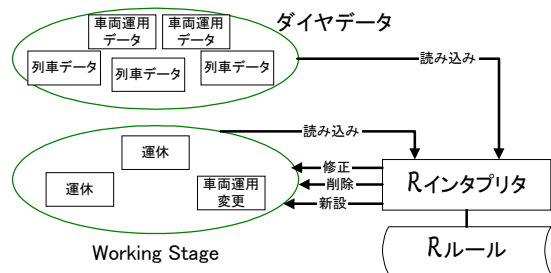


図 2 R インタプリタの動作

3. 運転整理パターン記述言語 R とインタプリタ

3.1 基本的考え方

運転整理パターンを表現するために、 R と呼ぶ言語を新たに導入する（ R で記述された運転整理パターンを R ルールと呼ぶ）。 R ルールは、プロダクションシステムや SQL のトリガと同様に、イベントの生起によって駆動される動作を記述する。イベントには、運休、車両運用変更等のダイヤの変更データが該当する。イベントを Working Stage (WS) と呼ぶ領域に格納し、 R インタプリタと呼ぶ機構が WS 上のイベントとダイヤデータをもとに R ルールを解釈しつつ、イベントの新設・削除・修正を行なう（図 2）。適用できるルールがない時、 R インタプリタは停止する。

3.2 運転整理パターン記述言語 R の構文

R によって記述される運転整理パターン (R ルール) は、次の3つの部分から構成される。

- (1) 事象部 (*for_each* 節)
イベントを記述する。
- (2) 条件部 (*if_exist* 節)
パターンの動作条件を記述する。
- (3) 動作部 (*then* 節)
パターンの動作を記述する。

なお R ルールにおいては、イベント等に対して変数を定義し、パターンの中で参照することが可能である。R の使用例として、2章のパターン a に対する記述を示す。

```

begin Pattern a
  for_each (
    運転休止[始端駅 = A, 終端駅 = E] := x in WS )
  if_exist (
    列車駅[列車番号 = x.列車番号, 駅 = A,
      列車種別 = 快速, 運転方向 = 下り] := q,
    列車駅[列車番号 = x.列車番号, 駅 = E,
      列車種別 = 快速, 運転方向 = 下り] := r,
    列車[列車番号 = 後運用列車(x.列車番号)] := w,
    列車駅[列車番号 = w.列車番号, 駅 = E,
      列車種別 = 快速, 運転方向 = 上り] := s,
    列車駅[列車番号 = w.列車番号, 駅 = A,
      列車種別 = 快速, 運転方向 = 上り] := t,
    列車[列車番号 = 前運用列車(x.列車番号)] := y,
    列車駅[列車番号 = y.列車番号, 駅 = A,
      列車種別 = 快速, 運転方向 = 上り] := u,
    列車[列車番号 = 後運用列車(y.列車番号)] := z,
    列車駅[列車番号 = z.列車番号, 駅 = A,
      列車種別 = 快速, 運転方向 = 下り] := v )
  then (
    generate 運転休止 in WS (
      列車番号=y.列車番号,
      始端駅=E, 終端駅=A)
    generate 車両運用変更 in WS (
      前運用列車番号 = y.列車番号,
      後運用列車番号 = z.列車番号) )
end Pattern a
  
```

4. 目的別サブシステムの連携による運転整理案作成システム

4.1 基本的考え方

運転整理は、複雑かつ規模の大きな業務である。そのような業務を支援するためには、複数のサブシステムがそれぞれの機能を分担しつつ、相互に連携をとって動作するシステムを構築することが効果的であると考えられる。ただし、個々のサブシステムの機能をどのようなものとするかについては十分な注意が必要である。例えば、列車の「運休」ひとつをとってみても、それは、さまざまな状況の下で、さまざまな意図で行なわれる。

- ① 大幅な遅延等により、その列車を運転する意義 (列車使命) が失われた場合。例えば、遅延によって運転時刻が深夜になった場合、あるいは、遅延によって、遅延していない列車と運転時刻が重なり、輸送力が供給過多となった場合等が考えられる。
- ② その列車に充当する車両がない場合。例えば、ある列車が運休となった時、その折返し列車に充当する車両の手配が問題となる。通常は、他の列車に充当予定であった車両を充当する、あるいは、予備の車両を充当する等の手配がとられるが、そのような車両が存在しない場合、折返し列車は運休とせざるをえない。

- ③ 遅延を回復するために列車を運休する場合。例えば、ある列車が遅延している場合、本来の終着駅まで運転せずに、途中の駅で運転を打ち切り、そこで折り返すこととすれば、折返し列車の遅延を小さくすることができる。

このような事情を勘案すると、運転整理案作成アルゴリズムのサブシステムは、運休や車両運用変更等のダイヤの「変更手段」ごとではなく、状況に応じた「目的」ごとに構成することが得策であると考えられる。

本稿での取組みを図3に示す。図3は、サブシステムの構成とそれらの間の関連を示したものである。筆者らの提案する運転整理支援システムは、列車計画サブシステム、車両運用計画サブシステム、(狭義の)運転整理サブシステム、乗務員運用計画サブシステム、構内作業計画サブシステムの5つのサブシステムから構成される。運休、車両運用変更、臨時列車の運転等、見かけ上は同一のダイヤ変更手段であっても、その「目的」に応じて、複数のサブシステムで重複して実現される仕組みとなっている点に特徴がある。

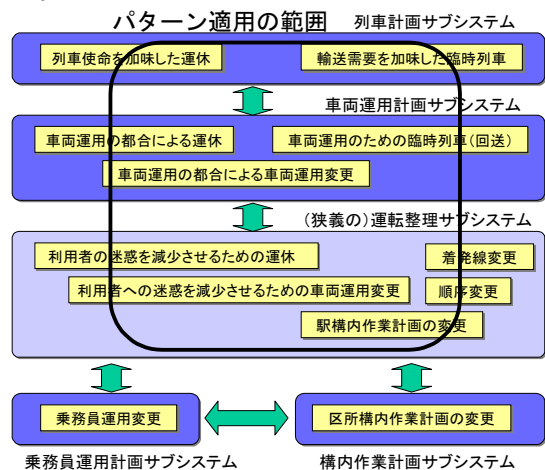


図3 運転整理案作成システムの全体構成

図3において、黒線の四角形で囲まれている範囲が運転整理パターンを適用して作成される部分である。提案アルゴリズムは、次のような順序で動作する。

- ① あらかじめ定められた運休区間決定テーブルにもとづいて支障区間、支障時間帯を走行する列車の最小限の区間の運休または運転線路の変更を提案。提案に対して、人間が修正することも可能 (列車計画サブシステム)。
 - ② ①の結果に対して、R インタプリタが動作。パターンが適用可能な列車に対して、運休、臨時列車の運転、車両運用変更等を出力。
 - ③ ②の結果に対して、車両運用計画サブシステムが動作。パターンが適用されなかった列車を中心に、車両運用計画の変更計画を提案する。提案に対して、人間が修正・追加することも可能 (車両運用計画サブシステム)。
 - ④ (狭義の) 運転整理サブシステムが動作。③までの結果をもとに、着発線変更、順序変更等の比較的局所的なダイヤの変更を実施する。また、少数の列車の運休、車両運用変更を行なって、運転整理案の改良を行なう。
 - ⑤ ④で作成された運転整理案に対して、乗務員運用の変更計画を作成する (乗務員運用計画サブシステム)。
- ③④⑤のアルゴリズムは、確率的局所探索を基本とするメタ・ヒューリスティクスを用いたアルゴリズムである。

すなわち、本稿で提案するアルゴリズムは、メタ・ヒューリスティクスの探索の初期解を運転整理パターンを用いて作成していると考えられることができる。

4.2 動作例

図1を用いて、提案アルゴリズムの動作を説明する。

列車計画サブシステム

図1の場合、列車2, 4のE駅からC駅間、列車9, 11のC駅からE駅間、列車5のC駅からE駅間、列車6のE駅からB駅間、列車7のA駅からE駅間、列車8のE駅からA駅間が運休される。

車両運用計画サブシステム

一時的にF駅に留置されている9001列車, 9003列車の編成を有効に利用するための車両運用計画を作成する。例えば、F駅からE駅まで臨時回送列車を2本設定し、それぞれ10列車, 12列車に編成が充当されるような計画を作成する。また、図1には描かれていないが、現実には、事故発生日点の手前の駅で抑止されている列車も存在する。それらの列車にはパターンは適用できないため、それらの列車の編成を有効に活用するための車両運用計画を作成する。なお、この時のアルゴリズムとしては、文献[5]のアルゴリズム (TrainTrading) を用いる。

狭義の運転整理サブシステム

図1では、F駅での番線が競合しないように、9001列車と9003列車の番線を調整する。また、図1には描かれていないが、通常、多数の列車に遅延が生じており、それらに対して列車の順序・着発線等を変更して、利用者の不満が少なくなるような運転整理案を作成する。なお、この目的のためには、文献[4]のアルゴリズムを用いている。

乗務員運用計画サブシステム

作成されたダイヤの変更案に対し、文献[6]のアルゴリズムを用いて、乗務員運用計画の変更計画を作成する。

5. 実行結果と評価

現実のダイヤデータを用いて、提案アルゴリズムの評価を行なった。対象とする線区では、列車本数が上下方向で1時間に概ね20本程度の列車が運転されている。

約1時間の不通区間が発生したと想定して、提案アルゴリズムを適用した。運転整理を行なわない場合のダイヤ図を図4に、提案アルゴリズムの実行結果を図5に示す。ただし、図5においては、車両運用計画サブシステムにおいて、一部手入力を加えた。

図5では、14本の運休、13件の車両運用変更等を実施している。また、運転整理を行なわない場合、文献[4]のアルゴリズムのみを適用した場合、および、提案アルゴリズムを実行した場合のそれぞれの評価値を表1に示す。なお、表1の評価値は、文献[4]で導入した利用者の不満を表す指数であり、小さいほど「良い」運転整理であることを示す。

表1から、提案アルゴリズムは、文献[4]のアルゴリズムよりも、かなりよい結果を与えていることがわかる。その理由は、文献[4]のアルゴリズムは、「不具合」の一つつけてそれを修正するというプロセスを繰り返すだけであるため、図4のような大規模なダイヤ乱れに対しては、必要な数のダイヤ変更(特に、運休)を行なえないことにある。それに対して、提案アルゴリズムでは、「パターン」を用いて、運転整理案の骨格を作り上げた後、細部を修正する

という方策をとっているため、より効率よく運転整理案を作成することに成功している。

表1 実行結果の比較

アルゴリズム	評価値
運転整理なし	2138
文献[4]のアルゴリズム単独	686
提案アルゴリズム	331

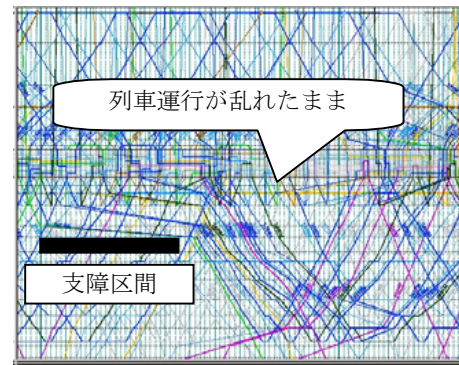


図4 運転整理なし

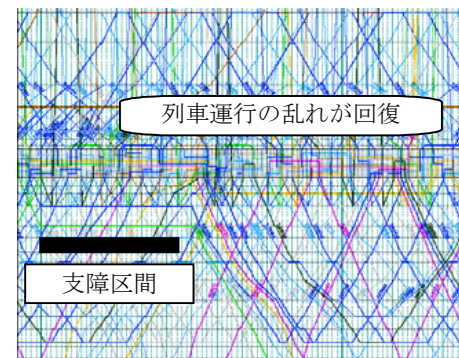


図5 提案アルゴリズムの出力

6. おわりに

運転整理案作成問題という ill-structured な問題に対し、人間の経験的知識と最適化手法を組合せたアルゴリズムとして、運転整理パターンを組み込んだアルゴリズムを導入し、実ダイヤを用いてその有効性を確認した。引続き、未開発の構内作業計画サブシステムの開発を行なう。

文献

- [1] 富井規雄：ダイヤの乱れを克服するー鉄道の運行管理システムの現状と今後、情報処理, Vol. 44, No. 8, 2003
- [2] 富井規雄：列車ダイヤのひみつー一定時運行のしくみ, 成山堂書店, 2005.
- [3] 中村達也, 井原恭平：運行管理システムの現状と課題, 電気学会誌, Vol. 124, No.5, 2004.
- [4] 富井, 田代, 田部, 平井, 村木：利用者の不満を最小にする列車運転整理案作成アルゴリズム, 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), 2005.
- [5] 平井力, 富井規雄, 田部典之：「サイバーレールを指向した車両運用計画作成アルゴリズム」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-02-46, June 2002.
- [6] 藤森 淳, 富井規雄, 平山純一郎：組合せオークションモデルに基づく異常時の鉄道乗務員運用変更計画作成アルゴリズム, 情報科学技術レターズ, Vol. 3 (FIT 2004), 2004.