

# 大規模災害発生後の鉄道輸送の 復旧戦略決定支援手法の基礎検討

奥田 大樹\* 鈴木 崇正\* 深澤 紀子\* 尾崎 尚也\*

**Fundamental Study on a Decision-making Support Method for Railway Transportation Recovery Strategy  
after Large-scale Disasters**

Daiki OKUDA Takamasa SUZUKI Noriko FUKASAWA Naoya OZAKI

Nowadays, the concept of “resilience”, which is to flexibly recover while minimizing damage even if an unexpected disaster is encountered, is drawing attention. In the railway business as well, from the viewpoint of enhancing business continuity, recovery strategies are becoming important more and more for quick railway transportation recovery from damage to normal conditions after a disaster. In this paper, firstly, the mathematical algorithm for calculating a railway network recovery plan, which is built as the planning and decision support method of a railway transportation recovery strategy after a large-scale disaster, is reported. Secondly, the outline and results of the recovery simulation after a disaster in the virtual railway network, which is conducted to verify the feasibility or validity of this algorithm, are reported. Finally, the aim and summary of future development of the proposed recovery decision support method are described.

キーワード：大規模災害，鉄道ネットワーク，レジリエンス，復旧戦略，数理計画

## 1. はじめに

今日の我が国は、稠密かつ高度な交通ネットワークに支えられて、社会経済集積が進んだ大都市圏を中心としたサプライチェーンが国土全域に築かれている。そしてこれらが有機的に機能することで、効率的かつ生産性の高い社会が築かれている。しかし、2011年3月に発生した「東日本大震災」や、2018年7月に発生した「平成30年7月豪雨（西日本豪雨）」など、近年の我が国では想定をはるかに上回る災害外力を持った自然現象による大規模災害が頻発し、交通ネットワークが長期に渡って寸断される事態も発生した。そしてその結果、国土全域で人流や物流が滞り、人々の生活や企業の生産活動に多大な損失が発生することとなった。

相次いで発生した大規模な自然災害は、その被害を完全に防ぐことが困難であることを明白にした。一方で、想定外の災害に遭遇しても平常の営みを損なわない、また、災害が避けられない状況に陥っても、その被害を極力抑えてしなやかに回復する「レジリエンス」という概念が注目される契機となり<sup>1)</sup>、企業の事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）の考え方にも影響を与えた。鉄道においても、事業のレジリエンスを向上させることを目的として、災害外力に対する構造物の耐力強化といった防災対策に加えて、災害外力がある一定規

模を上回る場合に、被害を最小限に留めるための減災対策や、災害発生後の迅速な鉄道輸送の回復を可能とするための復旧戦略を組み合わせた、総合的な災害対策の検討が進んでいる。

このような状況を踏まえ鉄道総研では、大規模災害に対する鉄道事業のレジリエンス向上を目的とした技術開発の一環として、災害発生後の鉄道輸送の復旧戦略の立案および決定を支援する手法（以後、復旧戦略決定支援手法）の開発に取り組んでいる。そしてその基礎検討として、後述する損失輸送量が最小となる最適な鉄道ネットワークの復旧計画を、与えられた条件に基づいて算出する数理アルゴリズム（以後、復旧計画アルゴリズム）を構築している。

本稿では、まず、現在までに構築した、復旧計画アルゴリズムについて述べる。次に、本アルゴリズムの実行可能性や妥当性を検証するために実施した、仮想的な鉄道ネットワークにおける、被災後の復旧シミュレーションの結果を報告する。そして最後に、今後の復旧戦略決定支援手法の開発方針を述べる。

## 2. 復旧計画アルゴリズムの理論

### 2.1 損失輸送量の概念

損失輸送量は、災害発生から完全復旧までの期間（以後、復旧期間）に失われた旅客や貨物の輸送量を意味し、復旧期間中の各日における平常時の輸送量（災害が発生

\* 信号・情報技術研究部 交通計画研究室

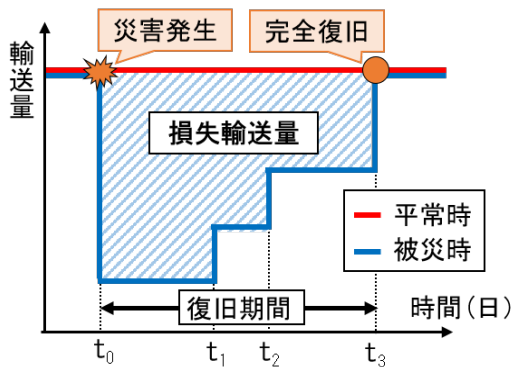


図1 損失輸送量の概念

していない場合の輸送量)と、被災状況下における輸送量の差分の総和である。図1は、損失輸送量の概念を示すものであり、青色で示された領域の面積が損失輸送量となる。

## 2.2 復旧計画アルゴリズムの定式化

復旧計画アルゴリズムは、復旧期間中の損失輸送量が最小となるように、被災箇所の復旧順序を数理計画法に基づいて算出するためのものである。計算単位は、鉄道ネットワークの各駅(ノード)を結ぶ線区(リンク)単位であり、線区内に被災箇所を含む線区が復旧対象となる。なお、同じ駅間を結ぶ線区であっても、方向別にそれぞれ異なる線区とする。

また、鉄道ネットワーク内の輸送量は、OD単位で設定する。ODとは、Origin(発)-Destination(着)の略であり、発駅と着駅の組み合わせを表す。ODが同じであれば、途中経路の違いは区別しない。図2は、ある鉄道ネットワークの、線区とODの例を示すものである。

復旧計画アルゴリズムの構築にあたり、復旧期間中の各線区がとり得る状態は、運行不能・徐行復旧・完全復旧(平常時と同じ)の3段階とする。また、以下の項目については、全て所与とする。

- 各ODの平常時の輸送量
- 各線区の平常時に通過可能な輸送量の上限
- 各線区の徐行復旧時の輸送率(平常時の輸送量を基準とした、各線区の徐行復旧時の輸送量の割合)
- 各線区の点検作業に必要なリソース量
- 各線区の徐行復旧に必要なリソース量
- 各線区の完全復旧に必要なリソース量
- 各線区の復旧作業に投入可能な日ごとのリソース量の上限
- 復旧作業に投入可能な日ごとの総リソース量

各線区の復旧に必要なリソース量や、徐行復旧時の輸送率等の算定や設定方法については議論があるものの、本研究ではこれらは所与のものとして扱う。同様に、乗

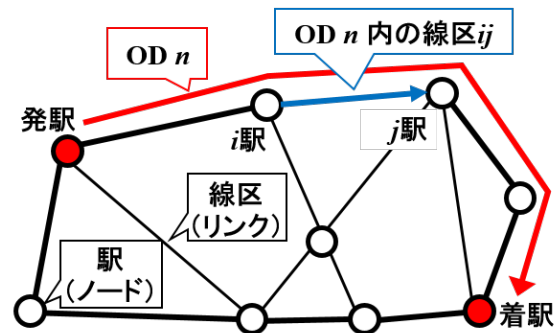


図2 鉄道ネットワーク内の線区とODの関係

務員や車両の運用に関する制約や、電化/非電化といった線区ごとの路線諸元の違いによる制約等についても、本研究では考慮しない。なお、鉄道総研では、鉄道ネットワーク内の構造物の現在の状態を基に、復旧に必要なリソース量を定量的に算出する手法<sup>2)</sup>の開発も進めている。

集合と添字, 所与の変数, 決定変数(制御可能な変数), 目的関数, および制約条件(決定係数が取りうる範囲の条件)は以下のとおりである。

### (1) 集合と添字

- $i, j, k$  ∈ 鉄道ネットワーク内の駅
- $n$  ∈ 鉄道ネットワーク内の全OD
- $d$  ∈ 復旧期間中の各日

### (2) 所与の変数

- $qs_{ord_{n,k}}$  : OD  $n$ 内の駅  $k$ における平常時の発送量
- $qa_{ord_{n,k}}$  : OD  $n$ 内の駅  $k$ における平常時の到着量
- $qs_{low_{n,k}^d}$  : OD  $n$ 内の駅  $k$ における日  $d$ での発送量の下限(通常は0)
- $qa_{low_{n,k}^d}$  : OD  $n$ 内の駅  $k$ における日  $d$ での到着量の下限(通常は0)
- $q_{CAPij}^d$  : 日  $d$ において線区  $ij$ を通過できる輸送量の上限
- $d_{ij}^d$  : 徐行復旧時における線区  $ij$ の日  $d$ の輸送率
- $rc_{ij}$  : 線区  $ij$ の点検作業に必要なリソース量
- $rs_{ij}$  : 線区  $ij$ の徐行復旧に必要なリソース量
- $rn_{ij}$  : 線区  $ij$ の完全復旧に必要なリソース量
- $r_{CAPij}^d$  : 日  $d$ において線区  $ij$ の復旧作業に投入可能なリソース量の上限
- $r_{ALL}^d$  : 日  $d$ における全体リソース量の上限

### (3) 決定変数

- $\bar{q}_{n-ij}^d$  : 日  $d$ においてOD  $n$ 内の線区  $ij$ を通過する輸送量
- $\bar{qs}_{n,k}^d$  : OD  $n$ 内の駅  $k$ における日  $d$ での発送量
- $\bar{qa}_{n,k}^d$  : OD  $n$ 内の駅  $k$ における日  $d$ での到着量
- $\bar{r}_{ij}^d$  : 日  $d$ において線区  $ij$ に投入されるリソース量

- $c_{ij}^d$  : 日  $d$  において線区  $ij$  が点検作業済みなら 1, それ以外 = 0 となる整数変数
- $s_{ij}^d$  : 日  $d$  において線区  $ij$  が徐行復旧済みなら 1, それ以外 = 0 となる整数変数
- $n_{ij}^d$  : 日  $d$  において線区  $ij$  が完全復旧済みなら 1, それ以外 = 0 となる整数変数

(4) 目的関数

目的関数は、鉄道ネットワークの損失輸送量の最小化であり、式 (1) で示すとおりとなる。これは、平常時の各日における各 OD 内の各駅の発送量と、復旧期間中におけるそれらの差分の総和で表されている。

$$\text{Minimize } \sum_n \sum_k \sum_d (qs\_ord_{n\_k} - \bar{qs}_{n\_k}^d) \quad (1)$$

(5) 制約条件

a) 各線区を通過する輸送量に関する制約

日  $d$  において線区  $ij$  を通過できる輸送量は、式 (2) で示すとおり、その線区を通過できる輸送量の上限以下である。日  $d$  において線区  $ij$  が運行不能 ( $s_{ij}^d=0$  かつ  $n_{ij}^d=0$ ) である場合に右边は 0、徐行復旧 ( $s_{ij}^d=1$  かつ  $n_{ij}^d=0$ ) である場合に右边は  $q_{CAPij}^d \cdot d_{ij}^d$ 、そして完全復旧 ( $s_{ij}^d=0$  かつ  $n_{ij}^d=1$ ) である場合に右边は  $q_{CAPij}^d$  となる。

$$\sum_n \bar{q}_{n\_ij}^d \leq q_{CAPij}^d \left\{ d_{ij}^d \cdot s_{ij}^d + (1 - d_{ij}^d) n_{ij}^d \right\} \quad \forall i, j, d \quad (2)$$

b) 各 OD の流量保存に関する制約

日  $d$  における OD  $n$  の輸送には、式 (3) で示す関係が成り立つ。また、OD  $n$  の駅  $k$  における発送量と到着量は、式 (4) および式 (5) で示すとおりとなる。

$$\sum_i \bar{q}_{n\_ik}^d - \sum_j \bar{q}_{n\_kj}^d = \bar{qa}_{n\_k}^d - \bar{qs}_{n\_k}^d \quad \forall k, n, d \quad (3)$$

$$qs\_low_{n\_k}^d \leq \bar{qs}_{n\_k}^d \leq qs\_ord_{n\_k} \quad \forall k, n, d \quad (4)$$

$$qa\_low_{n\_k}^d \leq \bar{qa}_{n\_k}^d \leq qa\_ord_{n\_k} \quad \forall k, n, d \quad (5)$$

駅  $k$  が発駅である場合は発送のみとなるため  $\bar{qa}_{n\_k}^d = 0$  となり、着駅である場合は到着のみとなるため  $\bar{qs}_{n\_k}^d = 0$  となる。また、中間駅である場合は、その駅の到着量がそのままその駅の発送量となるので、 $\bar{qa}_{n\_k}^d = \bar{qs}_{n\_k}^d$  ( $\bar{qa}_{n\_k}^d - \bar{qs}_{n\_k}^d = 0$ ) となり、式 (3) は 0 となる (流量保存則)。

c) 投入される復旧リソースに関する制約

日  $d$  において各線区に配分されるリソース量の総和

は、式 (6) で示すとおり、1 日あたりの全体リソース量の上限以下となる。

$$\sum_i \sum_j \bar{r}_{ij}^d \leq r_{ALL}^d \quad \forall d \quad (6)$$

また、日  $d$  において区間  $ij$  に配分されるリソース量は、式 (7) で示すとおり、区間  $ij$  に投入可能なリソース量の上限以下となる。

$$\bar{r}_{ij}^d \leq r_{CAPij}^d \quad \forall i, j, d \quad (7)$$

d) 線区の復旧に関する制約

日  $d$  において線区  $ij$  に投入したリソース量の累積が、その線区の点検作業を終了させるために必要なリソース量に達した場合、式 (8) で示すとおり、その区間は点検作業済みとする。同じく投入したリソース量の累積が、その線区の徐行復旧および完全復旧に必要なリソース量に達した場合、式 (9) および式 (10) で示すとおり、その区間は徐行復旧済みおよび完全復旧済みとする。

$$\sum_{t=1}^d \bar{r}_{ij}^t \geq rc_{ij}^d \cdot c_{ij}^d \quad \forall i, j, d \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^d \bar{r}_{ij}^t \geq rs_{ij}^d \cdot s_{ij}^d \quad \forall i, j, d \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^d \bar{r}_{ij}^t \geq rn_{ij}^d \cdot n_{ij}^d \quad \forall i, j, d \quad (10)$$

ただし、式 (11) で示すとおり、区間  $ij$  を徐行復旧させるには、その時点までに当該区間の点検作業が終了していることが条件である。また、式 (12) および式 (13) で示すとおり、区間  $ij$  を完全復旧させるには、その時点までに当該区間の点検作業、および徐行復旧が終了していることが条件である。

$$c_{ij}^d \geq s_{ij}^d \quad \forall i, j, d \quad (11)$$

$$c_{ij}^d \geq n_{ij}^d \quad \forall i, j, d \quad (12)$$

$$s_{ij}^d \geq n_{ij}^d \quad \forall i, j, d \quad (13)$$

3. 仮想的な鉄道ネットワークにおける被災後の復旧シミュレーション

復旧計画アルゴリズムの実行可能性や妥当性を検証するために、仮想的に構築した鉄道ネットワークにおいて、

特集：輸送・交通計画技術

地震による被害が発生した場合を想定して、被災後の復旧シミュレーションを実施した。

- 徐行復旧状態の線区の輸送率はすべて0.5とする
- 計算対象期間は被災から40日目までとする。

3.1 復旧シミュレーションの概要

復旧シミュレーションの実施にあたり、以下に示す前提を設定した。

- 対象は鉄道貨物輸送として、輸送量の単位をコンテナの個数、復旧作業に投入するリソースを作業員の人工に換算する。
- 仮想的な鉄道ネットワークは図3で示すとおりであり、各線区を通過できるコンテナ数の上限は、図中で示すとおりとする。
- 平常時の各ODのコンテナ輸送量は、表1で示すとおりとする。なお、例えば表中の0⇔2は0→2と2→0の両方向を表しており、表2および表3でも同義である。
- 復旧シミュレーションは、表2で示す4つのシナリオに基づき実施する。
- 各シナリオにおいて各線区に投入可能なリソース量の上限、および点検作業、徐行復旧作業、完全復旧作業それぞれに必要なリソース量は、表3で示すとおりとする。なお、各作業に投入可能な日単位の総リソース量は、1,500人/日とする。

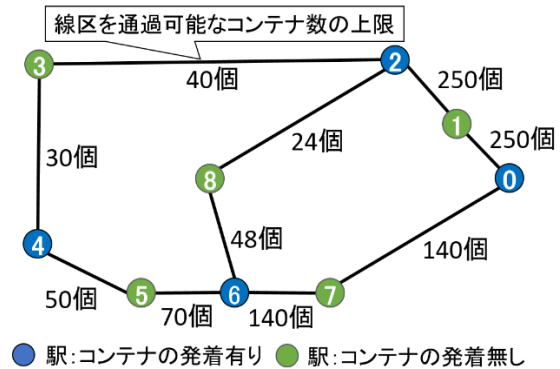


図3 仮想的な鉄道ネットワーク

表1 平常時における各ODのコンテナ輸送量

OD区間	コンテナ輸送量 (個/日)
0⇔2	片方向：225，両方向：450
0⇔4	片方向：20，両方向：40
0⇔6	片方向：100，両方向：200
2⇔4	片方向：15，両方向：30
2⇔6	片方向：6，両方向：12
4⇔6	片方向：5，両方向：10
計	片方向：371，両方向：742

表2 シミュレーションのシナリオとその内容

シナリオ	内容
①基準シナリオ	0⇔1 (0→1, 1→0の両方向), 1⇔2, 0⇔7, 6⇔7の各線区が被災して、復旧作業が必要となった。また、0⇔7線区では脱線など甚大な被害が発生したため、徐行復旧→完全復旧と段階的に復旧させることとした。
②防災シナリオ	耐震化等といった構造物の耐力強化が実施されているため、基準シナリオよりも完全復旧に必要なリソース量が削減されているほか、0⇔7線区も段階を経ずに完全復旧することができる。
③減災シナリオ	早期地震警報が導入されているため、0⇔7線区の脱線が回避（早期停車）できたほか、各線区の詳細な地震動が把握できたため、基準シナリオよりも点検リソース量が削減されている
④リソース制約シナリオ	基準シナリオよりも、点検作業や復旧作業に投入できる各日のリソース量の上限が抑制されている。

表3 各線区の点検および復旧作業に必要なリソースのシナリオ別一覧

線区	リソース上限 (人/日)				点検リソース (人/日)				徐行復旧リソース <sup>注1)</sup> (人/日)				完全復旧リソース <sup>注2)</sup> (人/日)			
	①	②	③	④	①	②	③	④	①	②	③	④	①	②	③	④
0⇔1	1,000	1,000	1,000	500	8	8	8	8	0	0	0	0	795	402.5	795	795
0⇔7	1,000	1,000	1,000	500	148	148	8	148	1,700	0	1,700	1,700	8,665	1,612.5	8,665	8,665
1⇔2	1,000	1,000	1,000	500	8	8	8	8	0	0	0	0	392.5	197.5	392.5	392.5
6⇔7	1,000	1,000	1,000	500	8	8	8	8	0	0	0	0	1,200	600	1,200	1,200
その他線区	1,000	1,000	1,000	500	4	4	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0

注1) 点検作業終了後に必要なリソースのみ

注2) 徐行復旧終了後に必要なリソースのみ

### 3.2 復旧シミュレーションの結果

復旧計画アルゴリズムの計算プログラムは Python (Ver.3.6.1)<sup>3)</sup> で記述し、実行には Python の統合環境である Spyder (Ver. 3.1.4) を用いた。最適化計算は、Python のライブラリ PuLP (Ver. 1.6.8) に同梱されたデフォルトソルバーである、COIN-OR branch and bound を呼び出して実行した。また、計算に用いた PC のスペックは、OS：Windows 10 Professional 64bit、CPU：Intel Core i7-6700 3.40GHz、RAM：8GB であった。

表 4 は、各シナリオの最適化計算の所要時間を示すものであるが、全て計算が収束していることから、復旧計画アルゴリズムは高い実行可能性を持つと言える。

表 5 は、各シナリオにおける鉄道ネットワークの完全復旧までの所要日数と、その間の全体の損失輸送量を示すものである。また、図 4 は、各シナリオにおける復旧期間中の鉄道ネットワーク全体での輸送量の回復状況を、日ごとに示すグラフである。なお、各線区や各 OD における、日ごとの輸送量の回復状況や投入リソース量なども算出されているが、紙面の都合上これらは省略する。

「①基準シナリオ」と比較した場合、「②防災シナリオ」では完全復旧までの所要日数と損失輸送量ともに、大幅

表 4 各シナリオの最適化計算の所要時間

シナリオ	①	②	③	④
計算時間	101'14"	9'58"	25'47"	0'57"

表 5 各シナリオにおける完全復旧までの所要日数とその間の損失輸送量

シナリオ	所要日数	損失輸送量 (個)
①	18	2,107
②	5	962
③	18	2,012
④	23	2,697

に削減される結果となった。また、「③減災シナリオ」では完全復旧までの所要日数は同じであるものの、点検作業に投入するリソースが削減できたため、図 5 で示されているとおり、幾分か輸送量の回復が早く、その分損失輸送量が削減される結果となった。一方で、点検作業および復旧作業に投入できるリソース量が制限されている「④リソース制約シナリオ」では、完全復旧までの所要日数と損失輸送量ともに増加する結果となった。この結果は、防災・減災対策や作業リソースの制約が、被災後の復旧作業や復旧期間中の輸送量に与える影響を適切に反映したものと見え、復旧計画アルゴリズムは、様々な状況における妥当性も持ったものであると言える。また、例えば、「②防災シナリオ」における完全復旧までの所要日数と損失輸送量と、「①初期シナリオ」におけるそれらの差分は、防災対策の効果を定量化したものと見え、対策の実施に必要なコストや災害の発生確率と比較して、費用対効果を算出することも可能と考えられる。

## 4. 今後の復旧戦略決定支援手法の開発方針

今後の復旧戦略決定支援手法の開発に向けて、現在は以下の 2 点の開発を進めている。

### 4.1 復旧期間中における迂回輸送の考慮

鉄道事業のレジリエンスを向上させるには、復旧中の鉄道ネットワークにおいて、被災していない線区や容量に余裕のある線区を活用した、迂回輸送も重要となる。そのため現在は、損失コストの最小化を目的とした、最適な迂回計画を算出するためのアルゴリズム (以後、迂回計画アルゴリズム) の構築を進めている。損失コストには、例えば鉄道貨物輸送であれば、貨物の輸送遅延や廃棄等によって発生する損失金額を充てる。復旧計画と迂回輸送計画の関係性は、図 5 で示すとおりであり、各

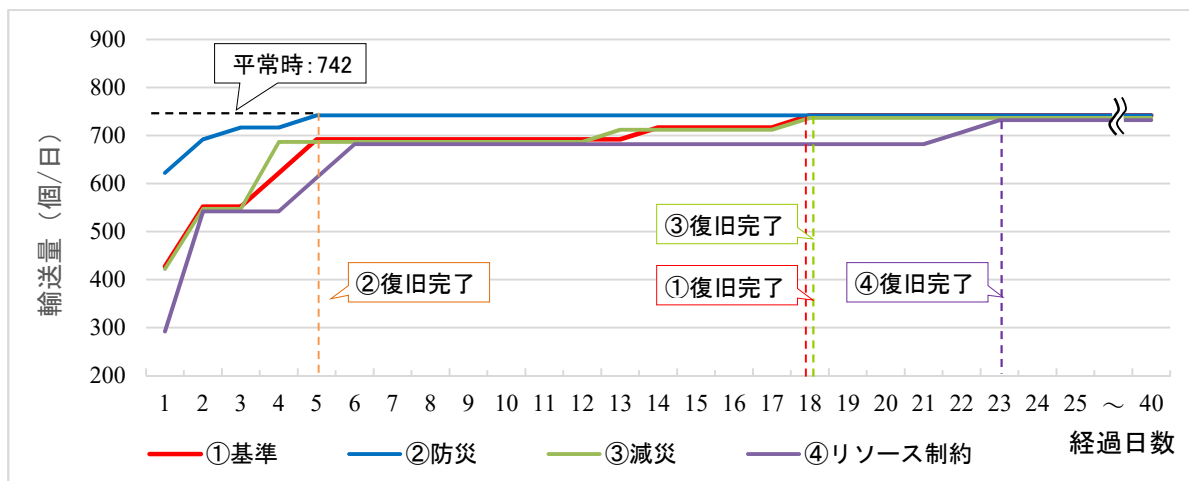


図 4 各シナリオにおける復旧期間中の日ごとの全体輸送量の回復状況

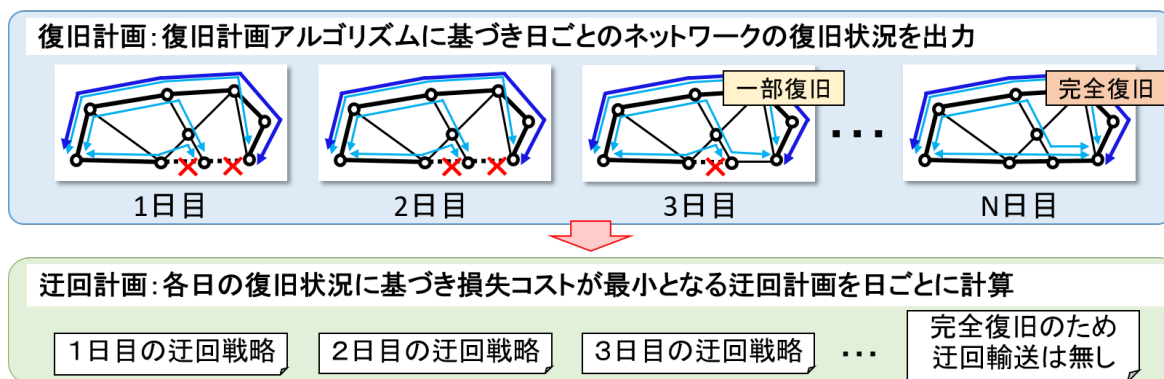


図5 復旧計画アルゴリズムと迂回計画アルゴリズムの関係性

日の鉄道ネットワークの復旧計画に基づき、各日の迂回計画が従属的に設定される。

#### 4.2 復旧戦略決定支援システムの製作

様々な鉄道ネットワークにおける復旧シミュレーションの実施を可能にするための、復旧戦略決定支援システムの製作を進めており、現在は、図6で示すとおり、前述の復旧計画アルゴリズムを実装した、プロトタイプシステムが完成している。本システムでは、分析対象とする鉄道ネットワークの自由な設定や、復旧期間中の輸送量や投入可能リソース等に関する各種制約条件の調整等が可能であり、様々な計算条件に対応することができる。また、与えられた条件下での最適な復旧計画を自動で算出し、日ごとの全体輸送量や各線区の輸送量の回復状況をはじめ、各線区に投入された日ごとのリソース量や、被災線区の復旧順序など、様々な情報の算出が可能である。さらに、全体輸送量や各線区の輸送量の回復状況等は、GUI上でも表示されるため、復旧状況を視覚的に把握することができる。今後は、前節で述べた迂回計画アルゴリズムを追加実装し、最適な復旧計画と迂回計画を同時に算出できるシステムへ拡張する予定である。

### 5. おわりに

鉄道総研では、大規模災害に対する鉄道事業のレジリエンス向上を目的とした技術開発の一環として、被災後の鉄道輸送の復旧戦略決定支援手法の開発に取り組んでいる。本稿では、まず、その基礎検討として構築した復旧計画アルゴリズムの理論的概要と、これを用いて実施した仮想的な鉄道ネットワーク上での復旧シミュレーション結果を報告した。復旧シミュレーションは、防災・減災対策や復旧リソースの制約を伴ういくつかのシナリオに基づき実施し、様々な条件下における復旧計画アルゴリズムの実行性と適用性を示すことができた。そして、復旧戦略決定支援手法の開発に向けて構築を進めている迂回計画アルゴリズムと、併せて製作を進めている復旧

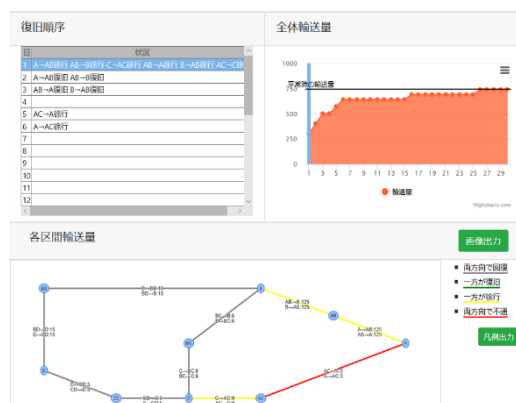


図6 復旧戦略決定支援システムのプロトタイプ画面

戦略決定支援システムのプロトタイプの概要、および今後の手法の開発方針を述べた。

今後の課題としては、まず、復旧戦略決定支援手法の、実鉄道ネットワークにおける実効性や適用範囲の検証の実施が挙げられ、過去の災害発生時における鉄道輸送の復旧や迂回輸送の実績に対する、復旧計画アルゴリズムや迂回輸送アルゴリズムの再現性等の確認が必要と考えられる。また、災害によって鉄道ネットワークが長期間に渡って寸断される場合を想定し、他の交通モードによる代替輸送も考慮できるように、復旧戦略決定支援手法の更なる拡張を図る必要もあると考えられる。

### 文献

- 1) 内閣官房：国土強靱化、  
[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo\\_kyoujinka/](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/)、(参照日:2019年10月21日)
- 2) 神澤拓他：復旧性評価データベースを活用した鉄道構造物の復旧性評価法の提案、第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集、pp.73-80、2019
- 3) Python Japan：プログラミング言語 Python、  
<https://www.python.jp/>、(参照日:2019年10月21日)