

## 列車ダイヤ乱れ時の乗務員シフト自動生成



山口 祐樹<sup>\*1</sup>



小西 勇介<sup>\*2</sup>

### Automatic generation of crew shifts when train schedules are disrupted

Yuki YAMAGUCHI<sup>\*1</sup>, Yusuke KONISHI<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Assistant Chief Researcher, Innovation Design Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

<sup>\*2</sup> Chief Researcher, Innovation Design Unit of Research and Development Center of JR East Group

#### Abstract

This paper introduces a system that supports crew re-scheduling when train schedules are disrupted. The system solves the crew re-scheduling as a combinatorial optimization problem of train and crew. The system incorporates Human-in-the-Loop system in which the crew dispatcher selects the most appropriate plan from multiple crew re-scheduling plans and multi-objective optimization that treats multiple indicators to be considered as they are. The system was able to output several crew re-scheduling plans with variations as a result of the verification in a past schedule disruption event, demonstrating the effectiveness of the system.

●**Keywords:** Crew re-scheduling, Train schedule disruption, Combinatorial optimization, Multi-objective optimization, Human-in-the-Loop

<sup>\*1</sup>JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 イノベーションデザインユニット 副主幹研究員

<sup>\*2</sup>JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 イノベーションデザインユニット 主幹研究員

## 1. はじめに

鉄道の運行は、列車運行図表(列車ダイヤ)、車両運用、乗務員運用等のあらかじめ緻密に作られた計画の元で成り立っている。しかし、事故や事象が発生し列車ダイヤが乱れると、当初の計画を変更し、車両や乗務員の運用計画を再生成しなければならない。その中でも乗務員シフトの再生成(以下、乗務員操配)は、各列車に乗務員の割当漏れが発生しないように、複雑な条件を考慮しながら行わなければならない、多大な労力を要する作業となっている。また、勤務時間や休憩時間など乗務員間の負担平準化も考慮する必要がある。そこで本稿では、乗務員操配の効率化・最適化に向けて、列車の位置・運転整理内容・乗務員の現在地などを考慮し、乗務員操配を自動提案可能な手法について紹介する。

## 2. 乗務員操配自動化のアプローチ

乗務員操配は列車と乗務員の組合せ最適化問題として解くことができる<sup>1)</sup>(根本他、2023)。これまでの乗務員操配自動化の研究は、優先順位を付けた制約条件を満たす1通りの解を出力し、乗務員の勤務時間(拘束時間)や連続乗務時間などの単一の「Key Performance Indicator」(以下、KPI)で評価することが多かった。しかし、その手法の課題は2点挙げられる。1点目は、単一のKPIのみで乗務員操配の良し悪しを評価することは難しいということである。また、乗務員操配の良し悪しに関わるKPIは、割当漏れの最小化や乗務員間の乗務時間の平準化、連続乗務時間の考慮など多岐にわたっており、それらを組合せて1つのKPIにすることは困難である。2点目は、自動出力された1通りの乗務員操配案をそのまま実際の乗務員操配として受け入れられない場合もあるということである。実際の乗務員操配においては、操配担当者が指標化できない暗黙知やその場の状況判断を適宜行っている。これらの判断をすべてシステムで実現することは現状困難である。そこで、上記2点の課題を解決するために、複数のKPIを同時に評価する“多目的最適化問題”と、人間の判断とシステムの出力を融合させた“人間介在型システム(Human-in-the-Loop)”の考え方を取り入れた乗務員操配自動化システムの検討を行った。

構築した乗務員操配自動化の全体フローを図1に示す。流れは3ステップある。

- ① 多目的最適化エンジンがバリエーションに富んだ複数の操配案を出力
- ② 操配担当者が複数のKPIの数値や定性的要素、経験を踏まえて最適な操配案を選択
- ③ 選択された操配案に従い実際に乗務員操配を実施

1ステップ目では、列車の運転休止や行先の変更などの運転整理内容とその時の各乗務員・列車の走行位置を基に、多目的最適化エンジンが複数の操配候補案を生成する。2ステップ目では、操配案の複数のKPIの比較やKPIで表せない定性的な要素や経験を加味して、操配担当者が最適な操配案を1つ選択する。3ステップ目では、操配担当者が選択した操配案に従って実際に乗務員操配を実行する。以上3ステップにより乗務員操配の1サイクルが完了する。その後は新たな運転整理の実行や各乗務員・列車の状況が変化するたびに同じ手順を行う。

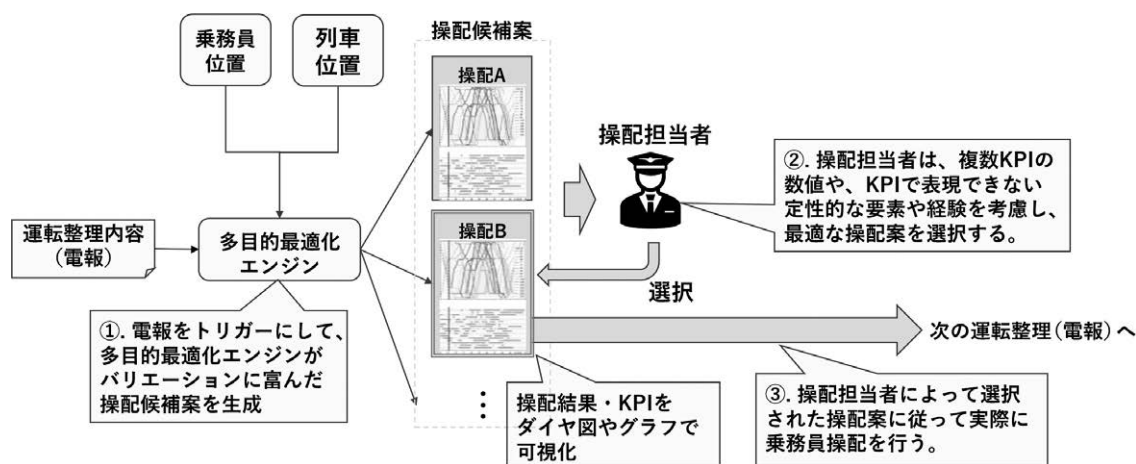


図1 乗務員操配自動化全体フロー

### 3. 組合せ最適化としての乗務員操配手法

図1における多目的最適化エンジンは本システムの中心であり、組合せ最適化問題として乗務員操配案を出力する。列車ダイヤ乱れにより乗務する乗務員が決まっていない列車・区間（以下、未充当列車）と、乗務する列車が決まっていない乗務員（以下、フリー乗務員）を組み合わせ、最適な乗務員操配を計画する。実際の乗務員操配業務では、列車ダイヤ乱れの影響を直接受けず、運用変更する必要のない乗務員も乗務員操配の都合上、運用変更する場合がある。そのような乗務員もフリー乗務員と呼ぶこととする。構築したフローを図2に示す。運転整理内容、運行状況のデータを取り込み、そのデータを基に未充当列車とフリー乗務員を抽出し、乗務員の経路候補を生成する。経路候補の中から最適な組合せを抽出して複数の乗務員操配案を出力する。

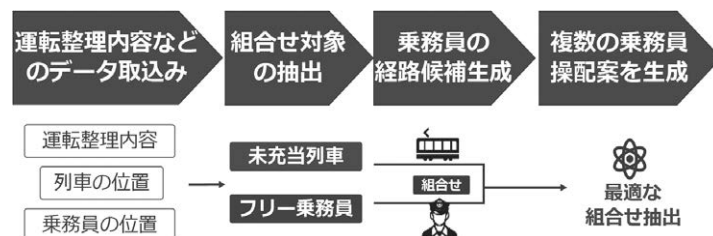


図2 組合せ最適化による乗務員操配

#### 3・1 利用データ

主に使用したデータを以下に示す。

- (1) 基本ダイヤ・・・列車乱れが起きていない時の基本の列車運行計画
- (2) 乗務員の基本行路・・・基本ダイヤにおける乗務員運用計画
- (3) 列車の位置情報・・・路線における列車の走行位置
- (4) 運転整理電報・・・列車の運転休止や行先の変更など基本ダイヤからの変更情報を社内に周知する仕組み

### 3・2 組合せ対象の抽出

まず、列車の運転休止や行先の変更など運転整理内容を基本ダイヤと乗務員の基本行路データに反映する。その後、運転整理によって生じる未充当列車とフリー乗務員を特定する。例えば、ある列車が運転休止となった場合、その列車を乗務する予定であった乗務員はその後フリー乗務員となる。また、その乗務員が運転休止した列車の後に乗務する予定であった列車については、乗務員が決まっていない状態になるので、未充当列車となる。次に、操配時点の列車の遅延を乗務員の基本行路データに反映する。列車の遅延によって本来乗務する予定であった列車へ乗り継ぎが成立しない乗務を判定し、未充当列車とフリー乗務員を特定する。これらの処理は運転整理電報を起点として実施する。

### 3・3 運転整理内容を反映したダイヤ情報を基にしたグラフ生成と行路候補の生成

図3のように、運転整理内容を反映した列車ダイヤ情報をグラフ化する。グラフの横軸は時刻、縦軸は駅であり、各駅・各時刻をノードとし、各列車番号の運行スケジュールに沿って、各列車の「発車時刻、発車駅」と「到着時刻、到着駅」に枝を張る。作成したグラフを使用し、最短経路問題を解くことで経路候補を生成する。操配時点におけるフリー乗務員の位置から、その乗務員の当日の最終目的地（宿泊箇所または退勤箇所）までの経路を複数探索していく。例えば、あるフリー乗務員が時刻15時19分に駅1（網掛部）にいて、16時30分に駅4（網掛部）に戻ってくる必要がある場合、それぞれの「駅、時刻」に対応するノードをスタート・ゴールとし、その間の最短経路を求める。図3におけるノード間を結ぶ枝の集合が行路候補である。ここでは、移動の所要時間をコストとし、コストが最小になるような経路を最短経路とする。同じ駅で待機している場合は、経過時間がそのままコストとなる。未充当列車に乗務する場合は、コストを所要時間の0.01倍、すでに乗務員が割り当てられている列車に乗務する（以下、便乗）場合は、コストを所要時間の1.3倍とする。コストを列車によって変化させることで、より多くの未充当列車が選択されやすくなり、非効率な割当である便乗を減らすことが出来る。

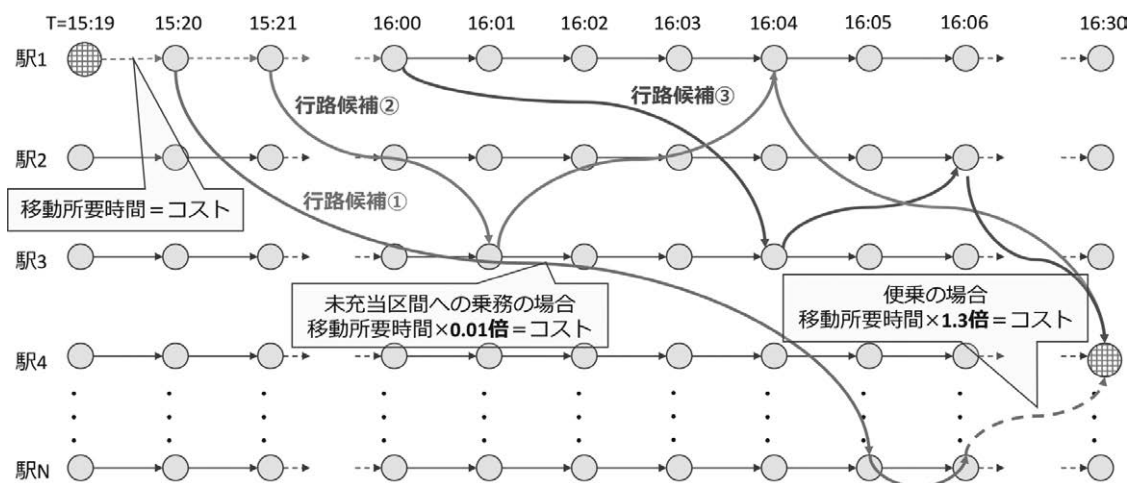


図3 グラフ化したダイヤ情報による最短経路候補の生成

### 3・4 行路候補の最適な組合せの抽出

#### 3・4・1 集合被覆問題

複数作成した行路候補から最適な行路の組合せを抽出する際は、集合被覆問題としてモデル化して最適な解を求める。表1を例に説明する。表の行方向は各フリー乗務員が取りうる行路候補で、列方向は未充当列車・区間である。表1では乗務員1、2は行路候補が2つずつあり、乗務員3、4は行路候補が1つずつある。各行路候補で乗務する駅間を「1」で表現していく。集合被覆問題では未充当列車のすべての駅間に少なくとも1人の乗務員が割り当てられるように行路候補を選択する。また、各乗務員に対し、最大1つの行路候補が選択される。未充当列車のすべての駅間が「1」で網羅され、行路候補の合計コスト値が最も低い組合せが最適な組合せとして選択される。表1の例では、「行路候補1」と「行路候補6」を選択することによって、列車番号1～3の駅間1～3がすべて充足され、コスト（網掛け部）の合計が最小となる。

表1 行路候補と集合被覆問題のイメージ

| 各乗務員行路候補 | 列車番号1 |     |     | 列車番号2 |     |     | 列車番号3 |     |     | コスト |
|----------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
|          | 駅間1   | 駅間2 | 駅間3 | 駅間1   | 駅間2 | 駅間3 | 駅間1   | 駅間2 | 駅間3 |     |
| 乗務員1     | 行路候補1 | 1   | 1   | 1     |     |     | 1     | 1   |     | 6   |
|          | 行路候補2 |     |     | 1     | 1   | 1   |       | 1   | 1   | 6   |
| 乗務員2     | 行路候補3 |     | 1   | 1     | 1   |     | 1     | 1   | 1   | 9   |
|          | 行路候補4 | 1   | 1   | 1     | 1   |     |       | 1   | 1   | 8   |
| 乗務員3     | 行路候補5 |     |     | 1     | 1   |     |       | 1   | 1   | 5   |
| 乗務員4     | 行路候補6 |     |     | 1     | 1   | 1   | 1     | 1   | 1   | 7   |

### 3・4・2 整数計画問題

3・4・1項で述べた集合被覆問題を整数計画問題として定式化する。式(1)は制約条件で、すべての未充当列車・区間に対し少なくとも1名の乗務員が割り当てられることを示す。式(2)も制約条件で、各フリー乗務員に対して最大1つの行路候補が選択されることを示す。式(3)は目的関数で、式(1)、(2)を満たす行路候補のコストの合計値が最小となる複数の行路候補を選択する。数式中の記号の意味を表2、考慮した制約条件を表3、KPIを表4に示す。実務における乗務員操配の制約条件は多数あるが、本稿では一部の条件のみを考慮している。また、多目的最適化問題として解くため、行路候補のコストは1つではなく、表4に示す複数のKPIごとにコスト値を設定する。各KPIのコストを変えて複数回最適化を実行することで異なる解を算出することができる。

$$\sum_{i=1}^N a_{ij} x_i \geq 1, \forall j \in V \quad (1)$$

$$\sum_{i \in S_c} x_i \leq 1, \forall c \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i x_i \quad (3)$$

表2 定式化における記号定義

| 記号    | 意味                                |
|-------|-----------------------------------|
| $i$   | 行路候補のインデックス                       |
| $N$   | 行路候補数                             |
| $a$   | 未充当列車の1つの駅間                       |
| $V$   | 列車番号と駅間の組合せの集合                    |
| $j$   | $V$ のインデックス                       |
| $C$   | フリー乗務員集合                          |
| $c$   | フリー乗務員集合のインデックス                   |
| $S_c$ | フリー乗務員 $c$ の持つ行路候補集合              |
| $x_i$ | 行路候補 $i$ を選択する場合を1、そうでない場合を0とする変数 |
| $w_i$ | 行路候補 $i$ のKPIにおけるコスト              |

表3 乗務員操配の制約条件

| 制約         | 具体的な考慮方法      |
|------------|---------------|
| 乗務員の発着駅    | 宿泊箇所、退勤箇所は同一駅 |
| 乗継時間の最小値   | 一律固定の値        |
| 連続乗務時間の最大値 | 一律固定の値        |

表4 乗務員操配のKPI

| KPI           | 具体的な考慮方法                                                                          |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 未充当駅間数        | 未充当列車の駅間数を最小化                                                                     |
| 未充当列車発生時刻     | 未充当列車の列車運行時刻の最小値の最大化                                                              |
| 乗務員の行路変更数     | フリー乗務員数の最小化                                                                       |
| 乗務員負荷の平準度     | 元々の勤務時間に対する増減時間の最大値の最小化<br>「最小乗換時間+アルファ」のアルファを以下の2通りの方法で考慮                        |
| 乗務員スケジュールの弾力性 | ・各フリー乗務員のアルファの和を最大化<br>・全フリー乗務員にわたるアルファの最小値を最大化                                   |
| 総休憩時間         | 全フリー乗務員にわたる総休憩時間を最大化                                                              |
| 総勤務時間         | 全フリー乗務員にわたる総勤務時間を最小化                                                              |
| 連続乗務時間        | 連続乗務時間について以下の2通りの方法で考慮<br>・各フリー乗務員の最大連続乗務時間の和を最小化<br>・全フリー乗務員にわたる最大連続乗務時間の最大値を最小化 |



## 4. 実線区における検証

### 4・1 対象線区・事象

常磐線（品川～勝田駅間）の中距離列車の運転士を対象に開発した乗務員操配自動化手法を検証した。事象は、2021年4月23日（金）15:03に常磐線三河島駅で発生した「ときわ76号（品川行き）」の人身事故を対象とした。運転休止は上下あわせて16本、全面運転再開は16:22、ダイヤ平復は22:00であった。検証に使用した対象事象では13回の運転整理電報が発行されたが、変更時刻が同一である電報は1回とみなし、7つのグループの運転整理電報として扱い、計7回の乗務員操配を行った。

### 4・2 検証結果

7つの電報グループの内、列車の運用変更数が多く、フリー乗務員と未充当列車が多く発生していた6グループ目における操配案を図4-6、各操配案のKPIの数値を表5に示す。図4-6は乗務員操配案を可視化した図であり、乗務員操配担当者はそれぞれの乗務員操配案を見比べて、最適だと考える乗務員操配案を選択する。可視化方法は3点を要件とした。1つ目は、元行路からの変更点がわかるように乗務員行路をダイヤ形式で表示する。2つ目は、各乗務員の稼働状況（実乗務、便乗、休憩時間等）を確認できる図表を表示する。3つ目は、各KPIの数値として表示することである。

図4を一例に可視化画面について説明する。図の左がダイヤ図で、点線が元行路と同じ乗務列車で、実線が運用変更で新たに割り当てられた乗務列車である。各乗務員の行路については、色分けして表示することで判別することが出来る。図の真ん中は各行路の稼働状況を棒グラフで表している。棒グラフの太さで実乗務や便乗、休憩時間を時系列で把握することが出来る。図の右は各KPIの数値を一覧化して表示している。乗務員操配案ごとの各数値を比較することでそれぞれの操配案の良し悪しを判断できる。

操配案a～cは、各KPIのコスト値を任意で変更することでバリエーションに富んだ操配案となっている。図4の操配案aは基本的なKPIのコストで実行した結果であり、運用変更によってフリー乗務員になった乗務員のみで乗務員操配を行っている。図5の操配案bは連続乗務時間を最小化するKPIのコストを大きくして出力した結果である。表5の連続乗務時間の項目からもわかるように、操配案a、cと比較して総連続乗務時間、最大連続乗務時間が短い操配案となっている。図6の操配案cはスケジュールの弾力性を重視し、乗継時間に余裕を持たせた操配案となっており、表5の総乗継時間が操配案の中で最大となっている。操配案b、cは乗務員の労働負荷を考慮したKPIのコストを大きくしたため、乗務員一人当たりの負荷を軽減するような行路を提案していることがわかる。

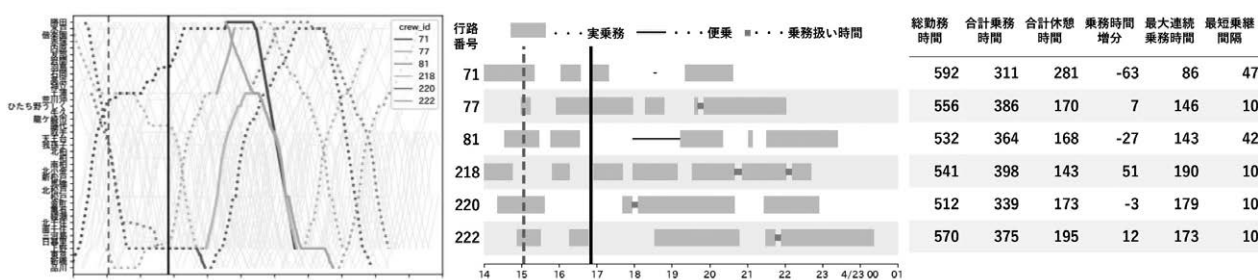


図4 操配案a

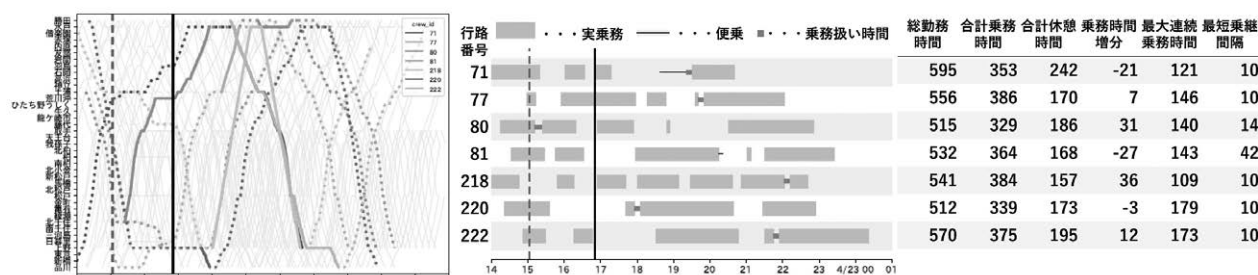


図5 操配案b（連続乗務時間重視）

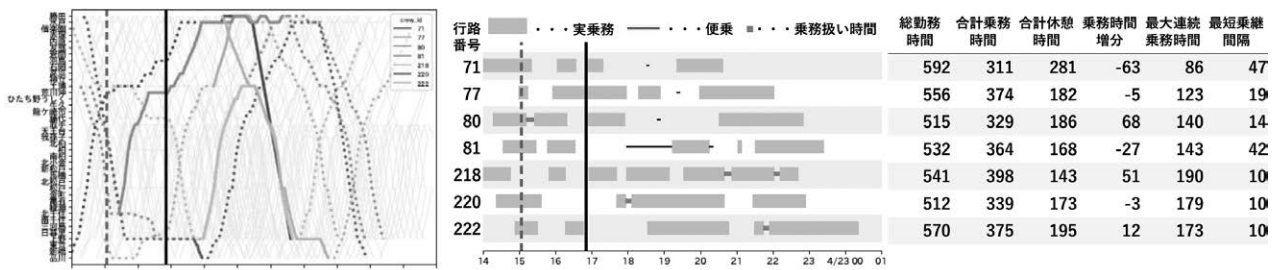


図6 操配案c (スケジュール弾力性重視)

表5 各操配案のKPI比較

| KPI                  | 操配案a | 操配案b | 操配案c |
|----------------------|------|------|------|
| 運用変更によらない<br>フリー乗務員数 | 0    | 1    | 1    |
| 総乗務時間                | 1217 | 1260 | 1240 |
| 総休憩時間                | 599  | 597  | 618  |
| 総乗継時間                | 167  | 178  | 195  |
| 総連続乗務時間              | 881  | 852  | 900  |
| 最大連続乗務時間             | 190  | 173  | 190  |
| 総勤務時間の増減             | 297  | 265  | 297  |

## 5. まとめ

乗務員操配の効率化・最適化に向けて、乗務員操配の自動提案可能な手法について紹介した。乗務員操配における複数のKPIをそのまま評価する多目的最適化と、乗務員操配担当者の判断をシステムと融合する人間介在型システム (Human-in-the-Loop) の考え方を取り入れたシステムを構築した。システムが自動出力する乗務員操配案は組合せ最適化問題として定式化し、乗務員と列車の組合せから行路候補を生成、多くの行路候補から最適な乗務員操配案を選択し、自動出力することができた。提案する乗務員操配案は操配担当者が視覚的に判断できるように、ダイヤ図形式、グラフ形式、数値での表示を実現し、判断しやすい乗務員操配案を出力するシステムとした。構築したシステムにおいて、実線区の実事象のデータを利用し、検証を行った。複数のKPIのコストを変化させることで、バリエーションに富んだ乗務員操配案を出力することができた。

今後は、将来の列車ダイヤの推定や、お客さまの流動予測、定量化しづらい多くの制約の考慮など、より実務に即したシステムとしていく必要がある。また、業務全体のデジタル化、システム化、乗務員操配担当者のノウハウの取り込みや効率的な乗務員操配の定義付けなどを進めていく。

### 参考文献

- 1) 根本逸平、山口祐樹、井上健造、小西勇介、坂入整、ダイヤ乱れ時の乗務員操配自動提案：組合せ最適化問題としての定式化と運転整理実績データでの評価、鉄道サイバネ・シンポジウム論文集、Vol.60 (2023)、pp.1-4

### 出典

山口祐樹、小西勇介、人間介在型システムによる列車ダイヤ乱れ時の乗務員運用再スケジュールリング、オペレーションズ・リサーチ、Vol.69、No.8 (2024)、pp.415-422