

# 鉄道総研報告

## ▶ 特集：情報・通信 ◀

第36巻 第12号

2022年12月

### 展望解説

- 情報通信技術に関する最近の研究開発  
.....福田光芳（1）

### 特集論文

- 列車前方画像を用いた画像解析による軌道設備の検査  
.....長峯望，坪川洋友，合田航，前田梨帆，加藤爽，糸井謙介（7）
- 鉄道向け通信プロトコルにおける伝送媒体選択機能の提案  
.....流王智子，羽田明生，山口大介，中村一城，川崎邦弘（13）
- 遅延の影響度・影響人数に基づく遅延対策箇所検討手法  
.....國松武俊，国崎愛子（21）
- 編成の分割併合を考慮した車両運用計画の自動作成手法  
.....加藤怜（27）
- 地域鉄道におけるパターンダイヤの利便性評価  
.....鈴木崇正，渡邊拓也，奥田大樹，深澤紀子（35）
- 貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果の評価手法  
.....奥田大樹，渡邊拓也，中川伸吾，鈴木崇正，深澤紀子（41）
- 都市鉄道における鉄道路線イメージと沿線居住意向の関係の定量化  
.....渡邊拓也，深澤紀子，奥田大樹，鈴木崇正（47）



特集：情報・通信

# 情報通信技術に関する最近の研究開発

福田 光芳\*

Trend on Research and Development Relating to Information and Communication Technology in Railway Fields.

Mitsuyoshi FUKUDA

In various industrial fields, innovation of systems and improvement of business operations through the use of information and communication technology, or so-called digital technology, have become urgent challenges. In railway industries, decline in the working-age population as well as changes in behavior triggered by the COVID-19 have led to stronger demands than ever before for labor and manpower savings and lower costs. To accomplish these tasks, innovation in railway systems using digital technology is expected. This paper presents recent research and development using digital technology, in terms of data analytics, sensing and recognition, and information networks.

キーワード：デジタル技術, データ解析, 画像処理, AI, 情報ネットワーク

## 1. はじめに

様々な産業分野において、情報通信技術を活用したシステムの革新や業務の改善などが喫緊の課題となっている。鉄道分野においては、生産年齢人口の減少に加えてコロナ禍を発端とした行動様式の変化により、省力化、省人化や低コスト化の要望が以前に増して強くなるとともに、早期の目標達成が求められている。

鉄道総研においては、基本計画 RESEARCH 2025 において、「デジタル技術による鉄道システムの革新」を活動の基本方針の1つと定め、情報通信技術の鉄道への導入を推進し、列車運行の自律化やデジタルメンテナンスの促進など、鉄道現場での労働力不足等の課題に対応した省力化技術に関する研究開発を重点的に実施することとしている。また、2022年4月に情報通信技術研究部を新設し、鉄道におけるデジタル技術の活用を分野横断的に促進するための体制を強化した。鉄道システムを革新する「切り口」として、①データを解析し、メンテナンスや営業・輸送サービスの意思決定を支援する技術、②カメラやLiDARなどでセンシングした結果を画像処理やAI等で認識・判断し、メンテナンス省力化や安全性向上を図る技術、③デジタル技術活用のためにデータ伝送・集約する情報ネットワークや無線通信などの基盤技術の3つに着目し、それぞれに対応した情報解析、画像解析、通信ネットワークの3研究室を設置した。なお、実用的な成果を得るためには、鉄道システムの各分野の技術との連携が重要であるので、各系統の研究者と連携して研究開発を進めることとしている。

本稿では、上記①～③の切り口で、最近の研究開発を

紹介する。

## 2. データ解析と意思決定

設備等のメンテナンスにおいては、高頻度・多箇所のデータの自動計測と集約が可能となりつつあること、データ解析技術の進化などから、各系統で様々なデータ解析の取り組みが行われている<sup>1)2)</sup>。一方で、直接的なデータ計測や、高頻度の自動計測が困難な設備等もある。また、設備の劣化傾向等を高い精度で推定することが難しい場合もある。そこで、メンテナンスの効率化、高度化を目的とし、自系統だけでなく、他系統の計測データも用いてデータ解析する方法について研究開発を進めている。

また、営業・輸送サービスは旅客利便性のほか、鉄道事業者からの視点では、運輸収入など複数の指標で評価することが考えられる。利便性向上は収入増加に直結しない場合もあるが、需要喚起、他交通機関に対する競争力強化、企業イメージ向上など様々な効果が期待できる。列車運行に関わる様々なデータを集約・解析・評価を行い、改善方法の評価や提案ができれば、輸送サービスの品質向上や営業力の強化に資することができる。

以下、これらの2つの観点で、最近の研究開発を紹介する。なお、どちらの観点においてもデータ解析は、手段であり、検査周期の延伸やメンテナンス体制の変更、営業施策の判断など意思決定に資する結果を出せることが重要である。

### 2.1 分野横断のデータ解析

鉄道システムは車両、軌道、電力など様々な業務システムから成り立っている。メンテナンスに必要なデータは、

\* 情報通信技術研究部長

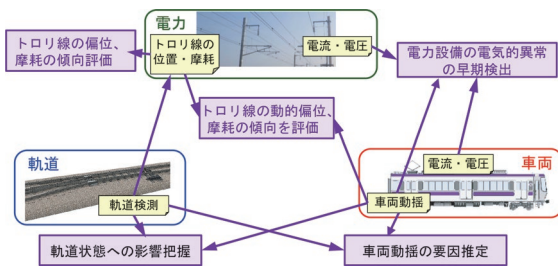


図1 複数系統の相互関係の一例

業務系統毎に計測・集約・解析が行われている。しかし、異なる業務系統間の設備は相互に影響しており、メンテナンスの効率化を進めるためには、分野横断的な解析が効果的と考えることができる。例えば、車両で得られる計測データは、軌道や電力設備の状態の影響を受けるので、図1のように相互に影響しているといえる<sup>3)</sup>。データのフォーマットや位置の基準（キロ程）が業務系統毎に異なるので、これらを共通化するための方法を検討するほか、複数の業務系統間のデータを統合して分析する手法について研究を進めている<sup>4)</sup>。例えば、他系統のデータに、自系統の主要なデータと類似した変化傾向を示すデータを見つけられれば、データ計測の周期が長い場合やデータ欠損がある場合に、他系統のデータから健全性等を確認できる可能性がある。さらに、これまで検出できなかった劣化の兆候の検出など、分野横断的な解析への期待は大きい。

まずは、分野横断的な解析のための統合分析プラットフォームの構築とともに、分析手法の検討を深度化し、上記に示したような効果が得られることを示したい。

## 2.2 営業・輸送サービスの評価

営業・輸送サービスの評価に関わる研究開発として、地域鉄道におけるパターンダイヤの利便性評価<sup>5)</sup>、貨物鉄道ネットワークに対する災害対策<sup>6)</sup>、都市鉄道における鉄道路線イメージと沿線居住意向の関係の定量化<sup>7)</sup>を行っている。

列車が等間隔に発車するようなダイヤをパターンダイヤと呼んでいる。参考文献5では、ダイヤのパターン化により旅客の期待待ち時間を小さくできること、運行本数を増やさずとも、ダイヤのパターン化により、旅客からの利便性評価を向上できる可能性があることを示している。

参考文献6は災害時の事業継続計画（BCP）策定の一環として、輸送サービスの頑健性向上のための対策について評価する手法を報告している。この手法では、事前の設備改修等に要するコスト（投資コスト）、災害発生後に不通区間が存在する状況での輸送量（不通時輸送量）とその運用に要するコスト（災害時コスト）の観点で、事前の対策や災害発生後の復旧手順（どの区間から

復旧させるか等）を評価できるようにしている。

参考文献7は都市鉄道における路線の持つブランドやイメージと居留意向（その路線沿線に住み続ける意向、その路線に転居する意向）の関係について、アンケート調査の結果を分析・考察したものである。鉄道路線の沿線居住者の増加・維持を図るための施策立案の際の意思決定に活用していただくことを見据えたものである。現段階では、定性的なイメージとの対応しか示していないが、イメージを変化させる定量的な要因と対応づけられれば、鉄道事業者の施策への活用が可能になる。

また、旅客運輸収入の変動に対して影響を与えうる要因候補を調査・整理し、各要因候補と収入変動との因果関係を定量化することによって、収入変動の要因とその効果を明らかにすることを目指している<sup>8)</sup>。これはCasual Impactという新しい手法を適用した研究であり、将来の運輸収入の推定や、運輸収入の増加を図る営業施策等の実現を目指すものである。

## 3. センシングと認識・判断

これまで鉄道分野で用いられてきたセンシングは、電圧や変位量などの物理量を計測するものであった。設備監視等に必要な物理量を直接的・間接的に計測できるため、多くの場合、高度な処理を施さなくても状態の認識や判断が可能である。一方で、計測すべき箇所が多くなると、コストや信頼性の面で実用的ではなくなる場合もある。また、目視で状態を判断していた事象は、単純な物理量の計測では代替が困難であることが多い。

この課題を解決する方法として、カメラやLiDARなどを用いたセンシングと認識・判断の技術が注目されている。これらのセンサは対象範囲を2次元あるいは3次元のデータとして一括取得できるので、計測箇所毎にセンサを取り付ける必要がないうえ、目視で得られる情報と同等の情報をデータとして取得できる。これらの技術が注目されるようになった背景は、カメラやLiDARなどセンサの性能向上と低価格化に加え、画像処理やAIなどの処理技術の進化がある。

ここでは、処理技術の観点で最近の研究開発について紹介する。

### 3.1 物体認識

カメラやLiDARなどのセンサを用いる主要な目的として、物体の有無や種別を判別することがあげられる。これまで、画像処理の技術や、対象物の特徴に特化したアルゴリズムを埋め込むことにより、物体の有無や種別を判別することはできていたが、AIを活用することにより、これらの性能が大きく向上している。図2は運転台から撮影した画像から登録済みの設備を抽出し、種



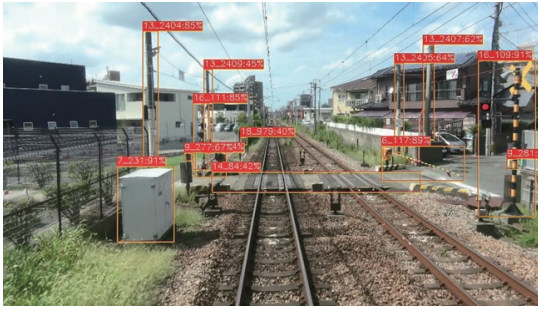


図2 設備の認識結果の例



図3 射影変換の例

別ごとに分類するシステムで用いている AI の実行例である<sup>9)</sup>。オレンジの枠は、登録済みの設備として抽出したことを示し、その上の数字は設備種別や認識の確からしさを示している。学習用のデータ作成ができれば、アルゴリズムを変更することなく様々な設備に対応できる。また、まくらぎを認識して劣化状態を判別するシステムでも物体認識の AI を活用している<sup>10)</sup>。

### 3.2 俯瞰画像への変換

画像中の対象物の大きさや形は、対象物とカメラの位置や角度により変化する。対象物にカメラを正対させて一定距離で撮影できれば、大きさや形が統一できるので、処理が単純化できるが、既設のカメラを活用したり、撮影方法の容易さを優先する場合は、必ずしもこの条件を満たせない。このような場合に有効な手法として、射影変換により正対した画像（俯瞰画像など）を得る手法があげられる<sup>11)</sup>。

射影変換の例を図3に示す。図3の左側の画像はホーム上の点字ブロックや旅客、車両側面を模擬したセットにおいて、車両側面に設置されたカメラから撮影したものである。図3右側の画像は、射影変換により、俯瞰画像に変換したものである。点字ブロックのサイズは既知であるので、1画素あたりの長さを算出することにより、人物とホーム端の距離を算出することができる<sup>12)</sup>。

これにより、車両側面に設置されたカメラの画像から、旅客の接近等を検知し、運転士に注意喚起を行ったり、乗降人数のカウントを行うことができる。

また、図2のアプリケーションでは、俯瞰画像を用いることにより、フレーム間でのまくらぎの移動量を算出し、走行距離を計算できるようになっている。

### 3.3 周波数解析

画像の中から特定の周波数を検出して、物体や事象を検出する技術がある。

特殊信号発光機の明滅を検知するアプリケーションでは、動画の各フレームをしきい値処理によって“1”か“0”（点灯 or 滅灯）に二値化し、連続する動画のフレームを重ね合わせることで、点滅のパターン（ビット列）を得る。重ね合わせ結果の画像から特殊信号発光機の周波数を表すビット列を探索することで、特殊信号発光機の点滅を検知する<sup>13)</sup>。

また、踏切の遮断かん折損を検知するアプリケーションでは、1枚の画像中の空間的な周波数を解析し、遮断かんの折損有無を判別している<sup>14)</sup>。遮断かんは、「黒色」「黄色」が一定間隔で繰り返されているので、この繰り返し状況を周波数分析により判別し、所定範囲から逸脱した場合に遮断かん折損と判断している。

## 4. 情報ネットワーク

鉄道では、無線・有線の通信技術の研究開発に古くから力が注がれ、国内の通信技術をけん引する場面もあった。また、鉄道の運行業務に用いられる通信システムの多くは、自営回線として設備されてきた。しかし、これらの通信技術を含む情報ネットワーク技術の進化は著しく、性能・コストの両面で汎用技術や公衆通信回線を活用することが有益となってきた。このような状況に対応し、汎用技術、公衆通信回線を利用したシステムの研究開発が盛んになってきている。

### 4.1 公衆通信回線の活用

現在、鉄道の運行業務で使われている通信システムでは、鉄道事業者が自社で設計・施工し、保守管理を行う自営網が多く用いられている。一方で、近年は移動体通信技術の発展が著しく、特に第5世代移動通信システム（5G）では、「超高速・大容量」という特徴だけでなく、「高信頼・超低遅延」あるいは、「多数同時接続」という特徴で通信することが可能となる。これらの特徴を選択可能な5Gのサービスを活用することで、従来の鉄道アプリケーションの機能向上に加えて、新たなアプリケーションを創出することが期待されている<sup>15)16)</sup>。しかし、個別に5Gを適用したアプリケーションの実装を進めると、

その都度、様々な仕様や独自の取扱いに対応する必要が生じ、鉄道事業者と通信事業者の双方で導入検討やシステム設計に多くの工程・コストを要する。そこで、運行制御システムの機能の実現に向けた要件定義の方法や導入時の基本的なシステム設計、運用の基本的な考え方をガイドラインとして作成を進めている<sup>17)</sup>。このガイドラインでは、5Gの導入を検討する鉄道事業者の視点で、運行制御システムへの5G適用の要否判断から、導入する際のシステムや設備を設計する基本的な方針、および、運用における保守・保全に関する留意事項を示す予定である。また、鉄道事業者がガイドラインの記載をカスタマイズすることで要求仕様を策定できるようにする。

## 4.2 情報ネットワーク

先述の通り、5Gなど新しい技術や公衆回線網を活用することにより、鉄道アプリケーションの機能向上を図ったり、通信設備の維持管理コストを低減することができる。一方で、個々の鉄道アプリケーションから見ると、これらの技術はあくまでも手段であり、通信媒体に拘らず、所定の通信品質で情報授受できればよい。このような観点から、列車が様々な媒体を切り替えながら通信を行う方法の研究開発も行われている<sup>18)</sup>。また、現状では鉄道アプリケーション毎、あるいは、技術系統毎に独立した通信システムを構築しているが、これらの通信システムを統合できれば、通信設備の省設備化に加え、技術系統間の情報共有により、2.1節に示したような効率的なメンテナンスにもつながる。このような通信システムを実現するため、我々は複数の通信媒体、複数の鉄道アプリケーションを統合し、さらに、鉄道アプリケーション毎に異なる情報の重要度や優先度などの要件に応じて、通信媒体や経路を切り替えるためのプロトコルRITP (Railway Information Transfer Protocol) を提案している<sup>19)20)</sup>。

## 5. まとめ

本稿では、データ解析と意思決定、センシングと認識・判断、情報ネットワークの切り口で、最近の研究開発を紹介した。これらの技術は、あくまでも共通技術であり、鉄道システムの各業務システムの技術と一緒に初めて効果が得られる。引き続き鉄道事業者をはじめとする関係各位にご指導・ご協力をお願いする次第である。

## 文献

1) 久田斗志：スマートメンテナンスの取り組み状況について～データの利活用～, JR EAST Technical Review, 東日本旅客鉄道株式会社, No.67, 2021

2) 高月真明：鉄道沿線設備の状態監視に向けたIoT化の推進、技術の泉, 西日本旅客鉄道株式会社, No.46, 2022

3) 流王智子, 河村裕介, 羽田明生, 栗田いずみ：分野をまたがる鉄道メンテナンスデータの統合分析プラットフォームの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.8, pp.51-56, 2022

4) 河村裕介, 羽田明生, 細川雄太, 流王智子：鉄道のメンテナンスデータに対する変動傾向の定量化手法, 電気学会産業応用部門大会予稿集, 2022

5) 鈴木崇正, 渡邊拓也, 奥田大樹, 深澤紀子：地域鉄道におけるパターンタイヤの利便性評価, 鉄道総研報告, Vol.36, No.12, pp.35-40, 2022

6) 奥田大樹, 渡邊拓也, 中川伸吾, 鈴木崇正, 深澤紀子：貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果の評価手法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.12, pp.41-46, 2022

7) 渡邊拓也, 深澤紀子, 奥田大樹, 鈴木崇正：都市鉄道における鉄道路線イメージと沿線居住意向の関係の定量化, 鉄道総研報告, Vol.36, No.12, pp.47-52, 2022

8) 松本涼佑, 中川伸吾, 鈴木崇正, 渡邊拓也, 深澤紀子：大型商業施設の開業等が鉄道輸送の収入に与える効果に関する一考察, 第28回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2021)予稿集, 2021

9) 向嶋宏記, 長峯望：ハンディカメラによる列車前方映像を用いた信号設備の管理支援システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.8, pp.45-50, 2022

10) 三和雅史：低コスト化・省力化に貢献する軌道技術, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.1-4, 2022

11) 長峯望, 坪川洋友, 合田航, 前田梨帆, 加藤爽, 糸井謙介：列車前方画像を用いた画像解析による軌道設備の検査, 鉄道総研報告, Vol.36, No.12, pp.7-12, 2022

12) 合田航, 長峯望, 向嶋宏記：車両側面カメラを用いた安全確認手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.10, pp.23-28, 2021

13) 向嶋宏記, 長峯望, 野村拓也, 市川武：列車前方カメラを用いた特殊信号発光機の明滅検知手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.17-22, 2020

14) 影山椋, 長峯望, 高崎建, 進藤卓朗：監視カメラを用いた遮断かん折損検知手法の実環境での適用に向けた時間帯に対する依存性の検証, 交通・電気鉄道/マイクロマシン・センサシステム合同研究会, TER-22-040, 2022

15) 中村一城, 北野隆康, 川崎邦弘, 近江泰志, 藤嶋堅三郎, 市川駿：第5世代移動通信システムの鉄道運行業務への適用可能性検証, 鉄道総研報告, Vol.36, No.8, pp.23-30, 2022

16) 中村一城, 北野隆康, 竹内恵一, 流王智子, 川崎邦弘：鉄道運行業務への公衆5G活用に向けたローカル5Gを用いた基礎検討, 電子情報通信学会, 無線通信システム研究会, 2022

17) 北野隆康, 岩澤永照, 中村一城, 竹内恵一, 川崎邦弘：鉄

- 道運行制御システム向け 5G 活用ガイドラインの策定に向けた検討項目の整理, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2022
- 18) Adaptable Communications System Field Test Strategy, <https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=1f74972f-8a50-4564-bf18-af560414d90d>(参照日：2022年9月21日)
- 19) 流王智子, 羽田明生, 中村一城, 川崎邦弘：鉄道運行向け統合情報ネットワークにおけるプロトコルの機能確認試験, 電気学会, 通信研究会, 2022
- 20) 流王智子, 羽田明生, 山口大介, 中村一城, 川崎邦弘：鉄道向け通信プロトコルにおける伝送媒体利用機能の提案, 鉄道総研報告, Vol.36, No.12, pp.13-19, 2022



# 列車前方画像を用いた画像解析による軌道設備の検査

長峯 望\* 坪川 洋友\*\* 合田 航\*  
前田 梨帆\* 加藤 爽\*\* 糸井 謙介\*\*\*

Inspection Method of Track Facilities using Image Analysis of Images in Front of Trains

Nozomi NAGAMINE Yosuke TSUBOKAWA Wataru GODA  
Riho MAEDA So KATO Kensuke ITOI

Appropriate maintenance of tracks is vital for the safe operation of railways. Properly managing track facilities is necessary to prevent buckling of rails. Due to social backgrounds of a shortage of workers, a decrease in skilled engineers, and a decrease in passenger income, inspection methods with a low-cost and no need of experience are desired. Therefore, we have developed a method that estimates each image's kilometers, rail gaps, wooden sleeper deterioration, and ballast shape using only inexpensive camcorders. This paper describes the outline of the method and its application results.

キーワード：画像解析，列車前方画像，軌道設備，検査

## 1. はじめに

鉄道における走行安全性のためには、軌道の適切な維持管理は重要であり、特に、座屈安定性に関わる情報を照査し、軌道設備を適切に管理する必要がある。バラスト軌道は軌道状態を良好に保つために定期的な検査・保守作業が不可欠であるが、近年の労働人口減少に伴う作業員不足や熟練技術者の減少、および旅客収入の減少から、経験によらず検査が可能であり、かつ低コストな軌道設備の状態検査手法の開発が望まれている。

そこで、安価であり入手が容易なハンディカメラのみを用いて、撮影した列車前方画像から車両の走行安全性に係る軌道設備の状態情報を抽出する手法を開発している。抽出する情報は、レール遊間量、まくらぎの劣化度判定、締結装置の脱落の有無、道床横抵抗力の判定をするためのバラスト道床の道床肩幅および余盛高さである。これによって、これまで徒歩で行っていた検査や、特殊車両を用いて行っていた検査を自動化することにより、低コスト化、検査頻度の向上、および状況に応じた臨機応変な検査の実現を目的としている。

本稿では、列車添乗してハンディカメラで撮影した列車前方画像から、軌道設備の状態検査をするための床下画像に変換する射影変換手法、検査した設備を特定するための各画像に対するキロ程推定手法、レール遊間量の

測定手法、木まくらぎの劣化判定手法、道床形状推定手法について、手法の概要と適用結果について述べる。

## 2. 射影変換による床下画像の生成

### 2.1 運転台からの列車前方画像の撮影

軌道面を撮影する場合、真上から俯瞰するようにハンディカメラを設置することが望ましいが、列車の運転台に設置して撮影することを考慮すると、図1のように運転台から斜め下方向に向かって撮影することとなる。その場合、撮影された画像の下部はカメラからの距離が近いので大きく撮像され、画像の上部はカメラからの距離が遠いため小さく撮像される。画像解析によって軌道設備の情報を取得する際には、画像中の座標によるスケールの違いがないことが望ましい。そこで、射影変換という手法を用いて、取得画像を変換し、軌道面を真上から俯瞰したような床下画像を生成する。

### 2.2 射影変換による床下画像化

ここでは2次元における射影変換について述べる。画像中の各ピクセルは2次元空間の点として表現でき、その座標は2つの値を用いて  $x = (x, y, 1) \in R^3$  で表現される。変換前の座標を  $x$ 、変換後の座標を  $x'$  としたとき、同次座標系で行列の掛け算を用いて表現した場合、2次元の幾何学変換は式(1)で表現される。

$$x' = Mx \quad (1)$$

このとき、行列  $M$  によって幾何学変換の種別が異なる

\* 情報通信技術研究部 画像解析研究室  
\*\* 軌道技術研究部 軌道管理研究室  
\*\*\* 軌道技術研究部 軌道管理研究室  
(現 北海道旅客鉄道株式会社)



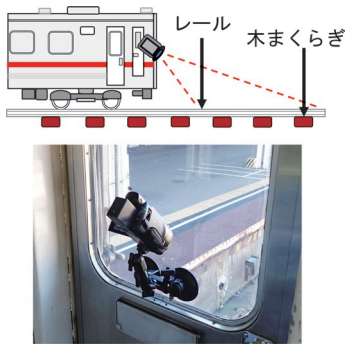


図1 列車前方画像の撮影の例

る。変換に対応する行列を表1に、各変換の概念を図2に示す。ここで、 $I$ は単位行列、 $R$ は回転行列を表す。

列車前方画像を床下画像へ変換する場合は、台形から四角形への変換になるため、これら2次元幾何学変換のうち任意の4点を任意の4点に変換できる射影変換を用いる。射影変換を行う際のホモグラフィ行列 $H$ につ

表1 2次元幾何学変換に対応する行列

変換	行列	自由度
並進	$[I t]_{2 \times 3}$	2
剛体変換	$[R t]_{2 \times 3}$	3
相似変換	$[sR t]_{2 \times 3}$	4
アフィン変換	$[A]_{2 \times 3}$	6
射影変換	$[H]_{3 \times 3}$	8

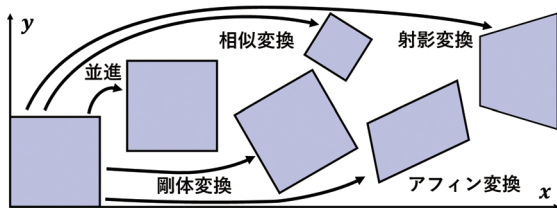


図2 基本的な2次元幾何学変換

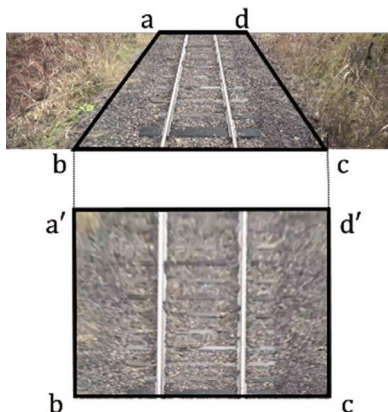


図3 射影変換による床下画像

いては既知の4つの対応点があれば、連立方程式を解くことで算出ができる。列車前方画像に対して射影変換を用いて床下画像化した例を図3に示す。台形 $abcd$ 点が長方形 $a'bcd'$ へと変換されたことが分かる。

### 3. キロ程の推定<sup>1)</sup>

#### 3.1 キロ程推定の目的

鉄道の設備はその設置位置についてキロ程を基準に維持管理されていることから、画像解析によって検査をする際にも列車前方画像の各フレームに対するキロ程を算出する必要がある。GPSなど外部センサを用いてキロ程を付与する方法もあるが、本研究ではハンディカメラのみによって実現することを目的としているため、列車前方画像からのキロ程算出を行う。

#### 3.2 オプティカルフローによる列車速度の算出

2枚の画像間の速度場を算出する方法として、テンプレートマッチングによる方法があるが、これらは一部のピクセルに対して速度場を算出する疎(Sparse)な手法である。そこで画像中のすべてのピクセルの速度場を算出する密(Dense)な手法であるオプティカルフロー<sup>2)</sup>を用いた。これにより画像中のすべてのピクセルにおける速度場を算出することができる。算出された速度場に対して、外れ値除去として最頻値を求め、このフレームにおける速度ベクトルを列車の移動速度[pixel/frame]とする。

#### 3.3 キロ程との対応

各フレームでのピクセル移動速度を累積することで、ピクセル単位での距離データを作成する。動画開始時の距離を0とすると、フレーム $t$ でのピクセル距離は速度を0から $t$ で積分することで求められる。画像フレームに対するピクセル単位距離データと駅のキロ程などのフレームの参照データを用いて、参照データの区間ごとに画像フレーム-ピクセル単位距離の拡大・縮小を行い、画像フレームに対するキロ程データを作成する。

同一走行に対して、従来手法であるテンプレートマッ

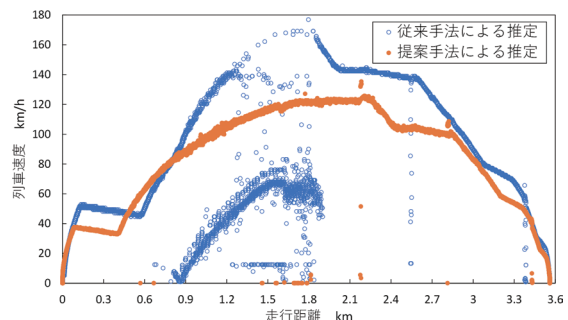


図4 算出されたランカーブ

チングにより算出したランカーブと本手法によるランカーブを図4に示す。従来法では0.9km~1.8km付近に明らかな計算誤差が多く見受けられ、一方で提案手法では誤差がほとんどない。このことから従来法に比べて誤差が少なく速度が算出されていることがわかる。

#### 4. 遊間測定<sup>3)</sup>

##### 4.1 遊間測定の目的と概要

レールは、レール温度の上昇下降に伴って発生する軸力により伸縮するため、事故に直結するレールの座屈や折損が発生しないように遊間を管理する必要がある。遊間検査では、保線技術者が継目1つ1つに対し、隙間ゲージを用いて遊間量を測定し、その結果から遊間量が適正であるか判定を行っている。判定の結果、基準を超過した継目部は、夏場の高温時に所定の遊間量を確保できない（無遊間となる）恐れがあるため、遊間整正が必要となる。そこで、これまで現地で行っていた遊間量の測定作業を列車添乗による撮影作業に置き換え、撮影した画像データから、画像解析を用いて遊間量を測定する手法を開発した。

##### 4.2 継目箇所の抽出

列車前方画像から遊間検査を行うためには、画像中から継目を抽出する必要がある。そこで、Deep Learningによる抽出を行った。使用したネットワークアーキテクチャはYOLOv4であり物体の検出と識別を同時に実施する手法<sup>4)</sup>である。入力画像をYOLOv4の識別器にかけると、出力として物体カテゴリ、カテゴリクラスの信頼度（確率）、横位置、縦位置、横幅、縦幅が得られる。学習データとしては、継目板や固定するボルトなど継目の構造全体が学習範囲に収まるよう指定し、継目タグを付与した画像437枚と継目のない画像2,690枚の合計3,127枚を用いて学習した。このDeep Learningによる継目箇所の抽出結果の例を図5に示す。

##### 4.3 遊間量の測定

図6に、遊間測定アルゴリズムの基本的な考え方を示す。まず、Step1で撮影した「遊間のあるレール画像」からレール長手方向に移動平均平滑化処理を施し「遊間のないレール画像」を疑似的に作成する。それらの差分から得た形状に、ラベリング処理を加え、遊間量（pixel）を

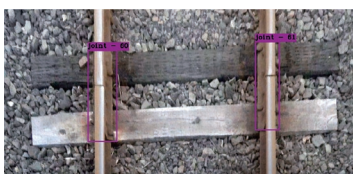


図5 継目箇所の抽出結果

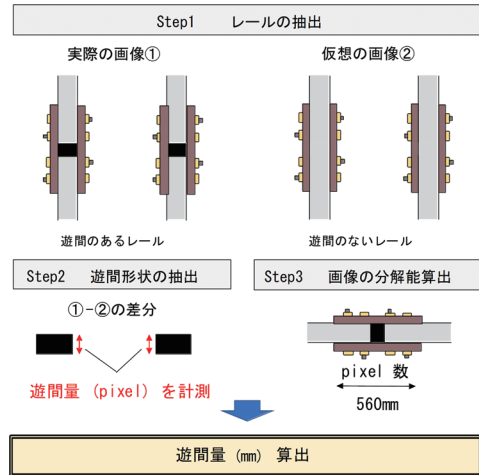


図6 画像解析による測定結果

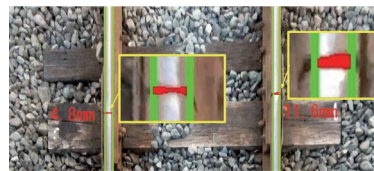


図7 画像解析による測定結果

算出する。次に、Step2でレールとレールを締結する継目板の縦寸法を画像から抽出し、得られたpixel数と実寸法560mmの比率によって、画像の分解能を算出する。最後に、算出した画像の分解能を用いて、画像における画素数で算出した遊間量を実施の長さ（mm）に変換することで、撮影した軌道画像から遊間量を測定することができる。

本手法によって遊間量を測定した結果を図7に示す。左レールの遊間量は4.8mm、右レールの遊間量は11.6mmでありアルゴリズムで抽出した遊間形状を赤色で重ね合わせている。また、遊間検査で安全側に最小箇所を測る必要があることから、遊間測定アルゴリズムではノイズを考慮した上で、遊間形状の最小値を測定値としている。

##### 4.4 遊間量の測定精度

遊間測定アルゴリズムの精度検証として、画像上から人間が測定した遊間量を正の値とし、アルゴリズムで測定した遊間量との比較を実施した。結果を図8に示す。

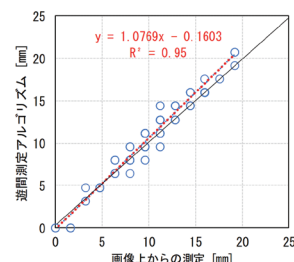


図8 画像解析による測定結果

横軸が画像から読み取った真値であり、縦軸が画像解析による結果である。検査で用いるにあたっては要求精度に合わせた解像度での画像取得が必要ではあるが、決定係数が0.95と強い相関があり、良好に推定できることがわかる。なお、最大誤差は2画素であった。

## 5. 木まくらぎの劣化判定<sup>5)</sup>

### 5.1 木まくらぎの劣化判定の目的

木まくらぎの劣化はレールの締結力の低下に影響を及ぼし、連続すると軌間内脱線の要因となることから、車両の走行安全性に係る軌道設備の状態を評価するための重要な項目である。現状では、まくらぎ検査として、作業員が徒歩でまくらぎを1本ずつ検査している。これに対して、列車前方画像から木まくらぎを1本ごとに劣化判定するアルゴリズムを開発した。

### 5.2 木まくらぎの判定基準

木まくらぎの抽出および劣化度判定は、床下画像に対し、Deep Learningで学習した劣化度判定モデルを用いて行う。本モデルでは、図9に示す木まくらぎの劣化度判定標準をもとに、不良まくらぎをA1～B、軽微な損傷をC、良好なものをDとし、まくらぎの表面が多くのバラストや草等で隠れていたり、埋没したりしている場合は判定を行わない未判定、PCまくらぎ判定の計7クラスの評価を出力する。

### 5.3 学習データの拡張

Deep Learningは、大量の画像データを学習することにより、高精度でカテゴリ判別を行う特性を有しているため、実際の撮影時に起こり得る環境変化として、天候や太陽の動きによる色調の影響を想定し、明度や明暗の比率に対して±60%の強弱をつけ4パターン作成し、また、撮影時に発生するホワイトノイズおよびブレを想定し、乱数により1,000個のノイズと平滑化の2パターンを付与し、データ拡張を行った。

合計6パターンの画像処理を組合わせて、不良まくらぎのA2・Bについては既存データの約5倍、Cについては約1.5倍のデータ拡張を行った。これにより約10万枚のオリジナル画像を2倍の約20万枚に拡張し、モデルの構築を行った。タグの数としては、約20万枚の画像に対し、約37万個のまくらぎにタグ付けを行っている。

### 5.4 判定結果の管理

列車前方画像から変換した床下画像には、同一のまくらぎやレール継目が複数フレームにわたって映るため、キロ程軸上にプロットすると同一のまくらぎを撮った枚数に応じてプロットが密集する。密集している付近は同一のまくらぎやレール継目であり、1つと数えることが

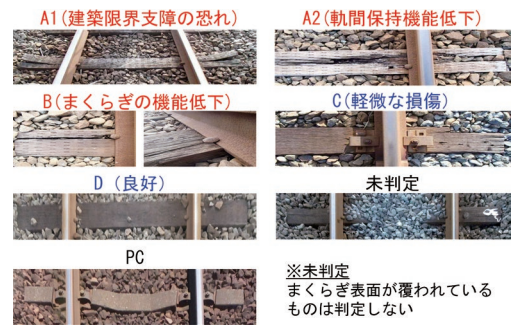


図9 木まくらぎの劣化度判定標準

できるため、クラスタ分析手法のうち、プロット間の最短距離を使用する最短距離法（単連結法）によってクラス分けを行った。このとき、クラス数がまくらぎやレール継目の設置数となる。ここで、違うクラスとして分類するプロット間の最短距離の閾値は、まくらぎについては縦のサイズから20cmに、レール継目についてはレール長さが10m以上の場合がほとんどあるため閾値を1m-2mとすることで適切なクラスタリングが行われる。

まくらぎ不良のランクについては、クラス内の識別で最も状態の悪いランクを採用し、安全側の判定とすることとした。

### 5.5 劣化判定手法の精度検証

木まくらぎ劣化判定アルゴリズムの判定精度については、検出したまくらぎ16,033本に対し、保線技術者が床下画像を目視にて判定した結果を正解値とし、アルゴリズムの判定結果と比較した。判定結果の例を図10に示し、表2に木まくらぎの各劣化度に対する正解率を示す。木まくらぎの劣化度に対する正解率は、Cでは88.6%であり、DおよびB～Aでは90%以上である。また、未判定では72.1%、PCまくらぎでは98.5%である。Cについては、その他の劣化度より判定精度が劣るものの、D～A2の平均正解率は90%以上であることから、本モデルにお



図10 木まくらぎ検出と劣化度判定結果

表2 木まくらぎの劣化度判定の正解率

	D	C	B	A2	未判定	PC
人の判定	10,476	3,387	1,292	404	208	266
システム	9,662	3,001	1,178	380	150	262
正解率 (%)	92.2%	88.6%	91.2%	94.1%	72.1%	98.5%



ける劣化度判定精度は高いと言える。また、まくらぎの検出精度についても、全まくらぎ本数 16,111 本に対し、検出したまくらぎ本数は 16,033 本（検出率 99.5%）であり、高い確率でまくらぎを検出することができた。

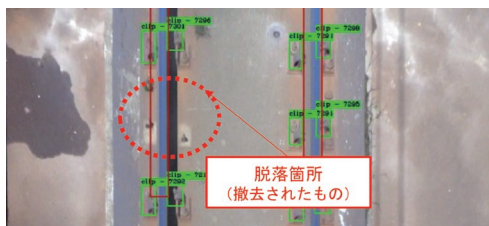
## 6. レール締結装置の脱落検知<sup>6)</sup>

### 6.1 レール締結装置の脱落検知手法

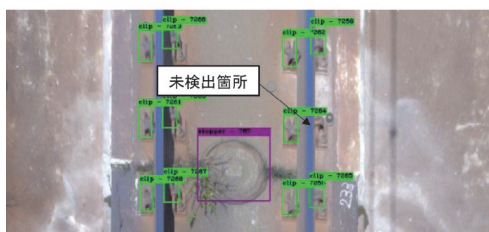
コンクリートまくらぎおよびスラブ軌道においては、レール締結装置の状態の管理が重要であり、徒歩巡視にて重点的に確認をしている。徒歩巡視を完全にカメラに置き換えるためには軌道パッドのはみ出しなど、現状の確認項目のすべてを検知する必要があるが、ここでは、列車前方画像からレール締結装置の脱落について自動検知する手法の開発を行った。5章と同様に Deep Learning を用いてレール締結装置を検出しクラスタリングを行う。算出されたレール締結装置の配置間隔から離隔が設計値以上となる箇所をレール締結装置の脱落箇所として検知する。

### 6.2 脱落検知の検証結果

レール締結装置の検出精度を検証するため、撮影した



(a) 地点 1



(b) 地点 2

図 12 レール締結装置の脱落と未検出箇所

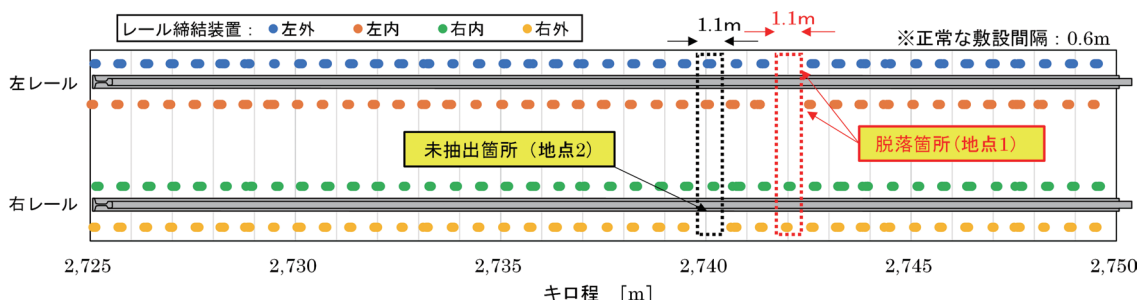


図 11 レール締結装置の分布

モデル区間の内、約 2.8km 間（約 16,000 枚）に対し判定を行い、検出率を算出した。99.6% 以上であり、高い精度で検出していることがわかった。未検知の主要因は架線の影や植生等により明らかに目視しづらいものであった。

図 11 に、レール締結装置の脱落箇所を推定した一例として、当該箇所におけるレール締結装置の分布を示す。レール締結装置のプロットは概ね 0.6m 間隔で並んでおり、正確に捉えることができています。また、本推定において敷設間隔が 1.0m 以上である箇所を 2 件検知した。検知した箇所を図 12 に示す。レール締結装置の「脱落箇所」と「未抽出箇所」が混在した状態で検知結果を出力するが、実用上の影響は少ないと考えられる。

## 7. 道床形状の推定<sup>7)</sup>

### 7.1 道床形状推定の目的

列車走行の安全性を考える上で重要な項目のひとつに道床横抵抗力がある。道床横抵抗力は、レール左右方向のまくらぎ移動に対する抵抗力であり、レール座屈を防ぐために大きな役割を果たしている。道床横抵抗力を確保するには十分な余盛高さと道床肩幅が要求される。余盛高さは道床肩左右それぞれの最高点であり、道床肩幅は、まくらぎ端部から、まくらぎ端部と同じ高さになる余盛外側の点までの距離を表し、検査の際は安全側である小さい方の値を測定している。道床は列車の走行等の外的要因によって沈下や崩壊といった現象が起こるため、定期的に保守を行わねばならない。そこで道床形状を推定する手法を開発した。

### 7.2 道床形状推定手法

列車前方画像から変換した床下画像から道床形状を推定するためには、三角測量の原理を応用して行う。図 13 に原理の概念図を示す。カメラが移動した際に、カメラに対して近くにある物体は大きく移動して撮像され、カメラから遠い物体ほど移動量が小さく撮像される。すなわち、カメラからの距離  $h$  とカメラから見た物体の移動量  $l$  は比例の関係になる。これを利用して移動量から道床形状の推定を行う。なお、この移動量は 3 章で述べたオプティカルフローを用いて算出する。具体的な処

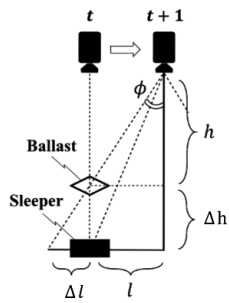


図 13 カメラからの距離と移動量の関係

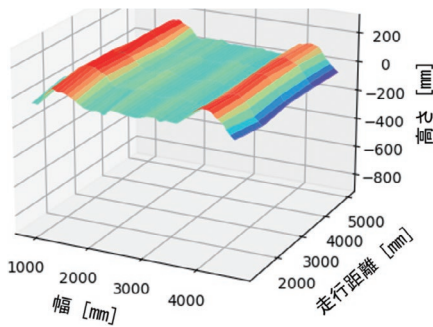


図 14 道床の 3 次元形状推定結果

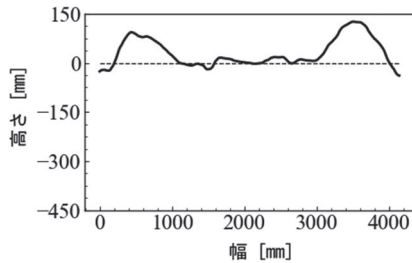
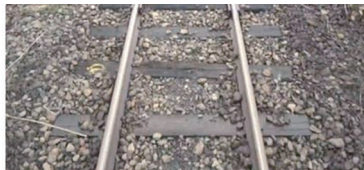


図 15 撮影画像と断面形状推定結果

手順は以下のとおりである。

- (1) 撮影した列車前方画像に射影変換を行い、床下画像を生成する。
- (2) 列車前方画像に映るレールとその消失点の情報からカメラの設置俯角ならびにカメラから被写体までの距離を導出し、それらの値を用いてカメラの軌道面まくらぎ中央からの高さを求める。
- (3) 連続したフレームの疑似床下画像からオブジェクトフローを算出する。
- (4) 上記の手順で得られたカメラの設置高さや軌道面の高さの比より、画像中各点の高さを算出し、その地点での道床断面形状を推定する。
- (5) 各フレームでの断面形状のつなぎ合わせによる道

床の 3 次元形状とする。

### 7.3 道床形状の推定結果

道床の 3 次元推定結果と、その 3 次元の断面形状の結果を図 14、図 15 に示す。まくらぎ端に十分に盛られたバラストの余盛を正しく表現できている。この断面図の情報をもとに道床肩幅、余盛高さの計測ができることを確認できた。

## 8. まとめ

軌道設備の検査の低コスト化として、ハンディカメラで列車添乗して撮影した列車前方画像から、検査するための床下画像に変換するための射影変換手法、検査した設備を特定するため各画像に対するキロ程推定手法、レール遊間量の測定手法、木まくらぎの劣化判定手法、道床形状推定手法について開発した。各手法において 90% 以上の検知性能や測定性能があり、検査への置き換えの可能性が見られた。今後は、実際の検査業務へ適用するための改良を実施していく予定である。

また、これらの画像解析技術は軌道設備以外にも適用が可能であるため、保線以外の系統への適用についても検討をしていく。

## 文 献

- 1) 合田航, 長峯望, 向嶋宏記, 糸井謙介, 坪川洋友, 加藤爽: 列車前方画像を用いたオブジェクトフローによるキロ程推定, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-21-059, 2021
- 2) T. Kroeger, R. Timofte, D. Dai, and L. V. Gool. Fast optical flow using dense inverse search. In European Conference on Computer Vision (ECCV), 2016.
- 3) 糸井謙介, 長峯望, 合田航, 坪川洋友, 大場久良, 加藤爽: レール遊間測定手法の列車前方画像への適用, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-20-076, 2020
- 4) Bochkovskiy, Alexey, Chien-Yao Wang, and Hong-Yuan Mark Liao. "YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection." arXiv preprint arXiv:2004.10934 2020.
- 5) 糸井謙介, 長峯望, 合田航, 坪川洋友, 加藤爽: 列車前方画像を用いた木まくらぎ検査手法の精度向上, 第 28 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2021), 2021
- 6) 糸井謙介, 長峯望, 合田航, 坪川洋友, 加藤爽: 列車前方画像を用いたレール締結装置脱落検知手法の開発, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-21-069, 2021
- 7) 前田梨帆, 長峯望, 糸井謙介, 坪川洋友, 合田航: 列車運転台からのハンディカメラ映像を用いた道床形状推定手法の基礎検討, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-22-029, 2022



# 鉄道向け通信プロトコルにおける伝送媒体選択機能の提案

流王 智子\* 羽田 明生\*\* 山口 大介\*\*\*

中村 一城\* 川崎 邦弘#

Proposal for Transmission Media Usage Functions in Transmission Protocol for Railway System

Satoko RYUO Akio HADA Daisuke YAMAGUCHI

Kazuki NAKAMURA Kunihiro KAWASAKI

Currently, information utilized through a railway system is being collected in each section, such as rolling stock section, civil engineering section and electricity section, which makes it difficult to share the information beyond sections. Therefore, in a previous study, we proposed an integrated information network for sharing the information of each section and basic functions of the communication protocol in this network. In this paper, we present details of the transmission media usage function among them. Furthermore, we report the results of a communication verification test using a router implementing the proposed functions.

キーワード：統合情報ネットワーク、通信プロトコル、伝送媒体選択機能、伝送媒体状態把握機能

## 1. はじめに

鉄道システム内には、列車運行、設備保守、旅客サービス等の用途に使用される様々な情報が流れている。これらの情報は、それぞれの系統毎に収集・伝達されており、かつ情報の様式や形態も系統毎に異なっている。このため、現状の鉄道システムにおいて、系統間をまたぐ情報共有が難しいという課題がある<sup>1)</sup>。

このような課題に対し、鉄道総研では、異なる系統の情報を同一のネットワークで伝送し、それらを系統間でリアルタイムに共有するための統合的な情報ネットワークに関する検討を進めている<sup>1)~4)</sup>。これまでに、統合的な情報ネットワークの構想と、そのネットワークの構築に必要な列車運行向け通信プロトコルの基本的な考え方を提案した<sup>4)</sup>。この通信プロトコルを装置に実装可能なものとするためには、提案した基本的な考え方を機能仕様として具体化し、仕様に基づいて実装したプロトタイプシステムによって動作を検証する必要がある。本稿では、通信プロトコルの基本的な考え方のうち、伝送媒体の利用に関する機能を具体化した処理手順を報告する。また、提案した機能を実装したプロトタイプシステムの動作検証結果について報告する。

## 2. 鉄道向け統合情報ネットワークと通信プロトコル

### 2.1 鉄道向け統合情報ネットワーク

鉄道では、列車の安全・安定運行を支えるために様々なアプリケーションシステムが系統毎に使用されており、それに付随する通信システムも系統別に構築されてきた。例えば、安全に直結する制御情報と、安定運行に必要なモニタリングデータとでは、伝送に求められる要件が異なるため、個々の要求に適した通信技術を活用してシステムを構築することで、伝送要求を満たしてきた。その結果、伝送・収集される状態情報の粒度・頻度・精度・範囲などが系統によって異なっており、現状の鉄道システムでは、系統間での情報共有が難しいという課題が生じている。また、今後、最新の計測技術や情報通信技術を活用した車両の前方監視や車内の防犯カメラの映像など、鉄道システムのデジタル化に向けてネットワーク上で伝送・共有が必要となる情報の種類や量が増えることが想定される。これに応じて、個々の系統がそれぞれに通信システムを構築していくと、類似する伝送路が個別に構築され、結果的にコスト増につながる可能性がある。

これらの問題に対して、現在、鉄道総研では、列車の運行や制御に用いられる情報を系統間で共有できるネットワークの構想を提案し、具体的な実装方法等を開発している<sup>5)6)</sup>。以降では、このネットワークのことを「鉄道向け統合情報ネットワーク」と呼ぶ。系統を超えた情報共有が可能となれば、例えば、車両の前方監視映像や車内情報の多地点での共有による鉄道運行の安全性向上

\* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室

\*\* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

\*\*\* 信号技術研究部 信号システム研究室

# 旧 信号・情報技術研究部（現 研究開発推進部）

や、先行列車の位置情報や信号設備等の状態情報に基づく列車運行パターンの生成による安定運行の実現が期待できる。

また、統合情報ネットワークの構築によってネットワーク基盤を共有化できれば、これまで複数存在した伝送路を一つに束ねることができ、維持管理の省力化が可能となる。また、他の伝送路を利用可能になるため、伝送の信頼性が向上するというメリットも生まれる。統合情報ネットワークの構築後、共通化できる通信路は共有基盤として提供し、列車運行用のネットワークやメンテナンスデータ管理用のネットワークの高信頼化も目指す予定である<sup>7)</sup>。一方、海外では、UIC（国際電気通信連合）が進めているFRMCS（Future Railway Mobile Communication System）のプロジェクトにおいて、自営の無線通信回線や5Gなど複数の通信システムを活用し、鉄道システムのアプリケーション間での情報伝送を担う新しい鉄道用の移動通信システムの仕様策定がほぼ完了し、2025年度の実用化に向けた実証実験を進めている<sup>8)</sup>。

## 2.2 鉄道向け統合情報ネットワークの構成

鉄道向け統合情報ネットワークにおいて、情報共有と、伝送路の効率的な利用を実現するためには、ネットワークを制御するための通信プロトコルが必要となる。鉄道総研では、この通信プロトコルをRITP<sup>®</sup>（Railway Information Transfer Protocol）と名付けている。以降では、プロトコルの基本的な考え方と機能を示す。

鉄道向け統合情報ネットワークを実際の鉄道現場へ適用するためには、現行システムに大きな変更を加えなくても導入できるレイヤや実装方法を提案する必要がある。また、アプリケーションシステム側で、送受信間の伝送経路や伝送媒体を意識することなく、情報伝送を実現できることが重要である。そこで、これを実現するネットワーク構成として、ネットワーク制御機能を保有するインターフェース用の機器を統合情報ネットワークとアプリケーションシステムとの境界点に設置する構成を提案した。アプリケーション側では、このインターフェース用機器に接続するだけで統合情報ネットワークが利用可能となる（図1）。以降では、統合情報ネットワークとシステムとの間のRITP機能を実装したインターフェース用機器をRITPルータと呼ぶこととする。

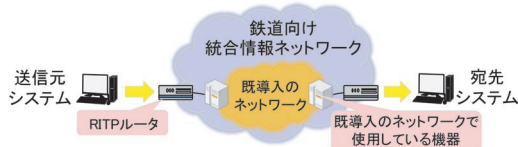


図1 統合情報ネットワークの構成

## 2.3 鉄道向け通信プロトコル

統合情報ネットワークでは、低遅延かつ低損失が求められる列車の緊急停止や停止限界位置などに関する情報と、遅延を許容しつつ確実に伝送が求められる状態監視に関する情報などが混在する。したがって、ネットワークには、伝送する頻度や優先度が異なる情報を伝送するための多種多様な要求を満たすよう、伝送するデータの優先順位の決定や、最適な伝送媒体の選択などの制御が求められる。さらに、情報の送信リクエストに即時対応するためには、統合情報ネットワーク内に情報をキャッシュすることが求められる。

そこで、RITPでは以下に示す7つの機能（図2）を提案した<sup>3)4)</sup>。

- ① 受付番号から通番と送達の確認を行う「通番・送達確認」機能
- ② 伝送の信頼性に基づき優先すべきデータを選択する「伝送データ選択」機能
- ③ 伝送媒体の状態を計測し、その計測結果を更新する「伝送媒体状態把握」機能
- ④ 複数ある伝送媒体の候補からデータの要求品質と伝送媒体状態把握機能による最新結果を踏まえて最適な伝送媒体を利用する「伝送媒体選択」機能
- ⑤ 情報の用途・目的に応じたクラスに応じて再送の有無を判定する「伝送エラー処理」機能
- ⑥ 経路選択において、ネットワークの通信状況を踏まえて経路を構成する「経路選択」機能
- ⑦ RITPルータ内に情報を蓄積し、同様の情報へのアクセスがあった場合に、ネットワーク内で情報の送信を行う「情報蓄積」機能

また、実装形態として、現行システムへの導入を考慮してIPレイヤ上に乗せることを提案し<sup>3)4)</sup>、これらの機能は、OSI参照モデルにおいて、アプリケーションレイヤに相当する位置に定義した。以降では、これらの機能を持つレイヤを新たに「RITP伝送制御レイヤ」と呼ぶ（図3）。RITPルータに接続するシステムは、RITP伝送制御レイヤのヘッダを付け、RITPルータはこの

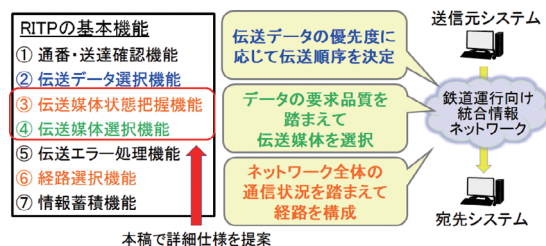


図2 RITPの基本機能

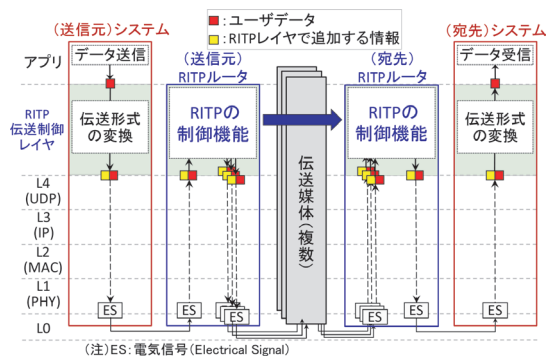


図3 RITP 伝送制御レイヤ

ヘッダの情報を元に上記機能を実行する。

本稿では、通信の基本である受信点から送信点まで伝送を実現する、伝送媒体の利用に必要な③伝送媒体状態把握機能と④伝送媒体選択機能についてその詳細を示す。

### 3. 既往研究

本章では、ネットワーク制御や複数の伝送経路に関する既往研究をまとめる。

#### 3.1 ネットワーク制御に関する研究

ネットワーク内で優先すべきデータを選択する既存技術としては、Quality of Service (QoS) 制御があり、中でも、Differentiated Services (DiffServ) では、確実な品質保証は難しいが、相対的な優先度に応じた品質制御を行うことができる<sup>9)</sup>。これにより、いくつかのクラスに分けた優先制御を行うことは可能であるが、そのクラス数には上限があるという課題がある。

一般的なネットワーク制御の範囲外の細かな伝送要求を満たすネットワークシステムを構築するための技術としては、Software-Defined Networking (SDN) や Network Function Virtualization (NFV) などがある<sup>10)</sup>。SDNとは、ネットワークの制御機能と転送機能を分離し、ソフトウェアによってネットワークの挙動を制御することができる新しいネットワークアーキテクチャのことであり、SDNにQoSを設定することも可能である。課題としては、現在使用しているネットワーク機器を専用のネットワーク機器に入れ替える必要があることが挙げられる。

NFVは、ネットワーク機器の機能を汎用サーバの仮想化基盤上でソフトウェアとして実装する方式のことである<sup>11)</sup>。SDNがネットワーク機器の制御と転送を分離するのに対して、NFVはネットワーク機器の機能をソフトウェアとして提供する。そのため、要求されるネットワーク機能の変化に応じて実行される汎用ハードウェアを変更したり、新たな機能を提供する仮想ネットワーク

を作成したりすることにより、ユーザの需要の変化に合わせたネットワーク機能の処理が柔軟に調整可能である。

鉄道用統合情報ネットワークでは、統合情報ネットワークとシステムとの境界点に設置した専用機器に、前述したNFVのようにネットワーク機器の機能を集約し、そこにネットワークの制御を実装することを提案している。しかし、SDNやNFVの技術では、柔軟にネットワーク内のフロー制御を行うことは可能であるが、統合情報ネットワークで目指す、利用可能な複数の伝送経路の中から伝送する情報の種類に応じて最適な経路を選択するような機能はない。

#### 3.2 複数伝送手段に関する研究

次に、複数ある伝送手段の候補の中から最適な伝送手段を選択する技術に関する既往研究を挙げる。統合情報ネットワークでは、RITP 伝送制御レイヤでの伝送媒体の選択を目指しているのに対して、既往研究では、着目するレイヤが統合情報ネットワークとは異なるが、利用者が意識することなく最適な伝送手段を選択する手法として、コグニティブ無線技術<sup>12)</sup>が開発されている。コグニティブ無線技術は、伝送する媒体を選択するのではなく、周囲の電波状況を端末や基地局がチェックし、その状況に応じて周波数や通信方式を選択する。このコグニティブ無線技術を異種無線ネットワークに適用すると、端末、基地局、無線アクセスネットワークを最適に選択ないし再構築することが可能なネットワークに適用することができる。

### 4. 伝送媒体状態把握機能と伝送媒体選択機能

本章では、RITPの基本機能のうち、伝送媒体状態把握機能と伝送媒体選択機能についてその詳細を示す。

#### 4.1 伝送媒体状態把握機能

まず、伝送媒体の状態を把握する機能について述べる。伝送媒体状態把握機能では、伝送速度とフレーム損失率により伝送媒体の状態を定める。これらの値を算出する毎に更新し、最新の値を把握する手順を示す。

初めに、送信元のRITPルータは、宛先のRITPルータに対して、経路確立の確認を行う。次に、経路確立が確認された宛先のRITPルータに対して、サイズ $S_i$ の $\gamma_i$ 個のデータを送信する。また、 $\gamma_i$ 個目のデータ送信後、宛先RITPルータに送信完了を送信する。宛先RITPルータでは、最初にデータを受信した時刻を $t_1$ とし、送信完了が送られる前の最後のデータを受信した時刻を $t_2$ とする。さらに、送信元ルータより送信完了を受信したら、到達データ数 $\gamma_i$ と伝送速度を送信元RITPルータに送信する。時刻を $t_1$ から時刻 $t_2$ の間に宛先RITP



ルータで受信したデータ数は  $\gamma'_i$  であるから、送信元 RITP ルータと宛先ルータ間の伝送速度  $T_i$  は以下の式で算出する。

$$T_i = \gamma'_i \times S_i / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

また、送信元 RITP ルータは宛先 RITP ルータから受信した到達データ数  $\gamma'_i$  と送信したデータ数  $\gamma_i$  より、フレーム損失率  $F_i$  を以下の式で求める。

$$F_i = (1 - \gamma'_i / \gamma_i) \times 100 \quad (2)$$

この伝送媒体の状態（伝送速度、フレーム損失率）は、各 RITP ルータ内にある「保有テーブル」と呼ばれる表に記録される。保有テーブルは、RITP ルータ毎に設定され、地上に設置する RITP ルータ（以下、地上 RITP ルータ）と車上に設置する RITP ルータ（以下、車上 RITP ルータ）で定義が異なる。

地上 RITP ルータでは、他の RITP ルータとの間で利用可能な伝送媒体の組み合わせ毎に 1 つの保有テーブルを作成する（表 1）。ここで、他の RITP ルータとは、他の地上 RITP ルータと車上 RITP ルータのことを指す。保有テーブルには、計測時間と伝送速度、フレーム損失率が 1 つの情報として記録され、これが更新されるごとに、保有テーブルの 1 行目に挿入される。

車上 RITP ルータでも、表 1 に示した地上 RITP ルータの保有テーブルと同様に、伝送媒体の最新情報を記録する保有テーブルを作成する。地上 RITP ルータの保有テーブルとの違いは、計測時点における伝送速度とフレーム損失率に加え、計測地点（キロ程）と進行方向を記録する点である。また、車上 RITP ルータでは、沿線を複数の区間に分割した各区間で利用できる地上 RITP ルータに関する固定情報と、それら地上 RITP ルータに関する保有テーブル（表 2）も持つ。

今回提案する機能仕様では、RITP ルータ間で送受信したデータサイズ  $S_i \times \gamma_i$  とその所要時間  $t_2 - t_1$  により

表 1 地上 RITP ルータの保有テーブル

RITP 保有テーブル		
【宛先：地上 RITP ルータ：***，伝送媒体：***】		
更新日時	伝送媒体状態	
	伝送速度	フレーム損失率
###	###	###
:	:	:

表 2 車上 RITP ルータの保有テーブル

区間	地上 RITP ルータ	始点	終点	伝送媒体
***	***	***		
:	:	:		

スループットを算出し、それを伝送速度とする。スループットの値から遅延の影響を把握できるため、表 1 や表 2 の伝送媒体状態において、伝送遅延をパラメータとして定義しないこととした。

## 4.2 伝送媒体選択機能

伝送媒体選択機能として、2 つの方式を提案する。

### 4.2.1 伝送媒体切替方式<sup>5)</sup>

伝送媒体切替方式では、地上 RITP ルータと車上 RITP ルータで更新される伝送媒体の状態を元に、情報を伝送する媒体を決定する。送信元 RITP ルータと宛先 RITP ルータとの間で利用可能な伝送媒体集合を  $C$ 、伝送媒体  $i \in C$  の伝送速度とフレーム損失率をそれぞれ  $T_i$ 、 $F_i$  とする。ただし、伝送媒体を選択する際の基準として、各データには伝送速度とフレーム損失率のどちらかを優先するかが事前に与えられているものとする。以下に、送信するデータが RITP ルータに伝送された際に、RITP ルータにおける伝送媒体の選択手順を示す。初期状態は、保有テーブルの情報を元に、伝送媒体集合  $C$  に送信元 RITP ルータと宛先 RITP ルータとの間で利用可能な伝送媒体が記録されている。

- STEP1.  $C = \emptyset$  の場合は処理を終了する。そうでなければ STEP2 へ進む。
- STEP2. 送信するデータがフレーム損失率よりも伝送速度を優先する場合は STEP3 へ進む。そうでなければ、STEP4 へ進む。
- STEP3.  $i^* = \operatorname{argmax}_{i \in C} T_i$  を求め、伝送媒体  $i^* \in C$  を選択して停止する。
- STEP4.  $j^* = \operatorname{argmax}_{j \in C} F_j$  を求め、伝送媒体  $j^* \in C$  を選択して停止する。

### 4.2.2 全媒体利用方式<sup>6)</sup>

全媒体利用方式では、伝送媒体状態把握機能において、経路確立が確認できた伝送媒体全てに対して同じデータの送信を行う。利用できる伝送媒体が複数ある場合、送信側の RITP ルータでデータを複製し、この複製データに同一の受付番号を付与して送信する。一方、受信側では複数の重複するデータを受信する可能性がある。そこで、受信側の RITP ルータにおいては、事前に保持しているシステムの RITP アドレスと受信したデータの宛先 RITP アドレスが一致した場合、最初に受信したデータの受付番号を記憶し、後から到着したデータの受付番号と記憶した受付番号が一致する場合は破棄する。

## 5. 実証試験による機能の検証

### 5.1 実証試験の構成

前章で示した伝送媒体状態把握機能と伝送媒体選択機

能を確認するため、これらの機能を実装したルータを試作した。この試作ルータを用いて、鉄道総研所内試験線において試験電車を走行させ、指令を模擬した機器室と模擬車上制御装置を設置した車両との間でのデータ伝送を行い、提案した機能の動作を確認した。さらに、車両の走行に伴うデータの到達率と伝送遅延の測定を行った。試験では、機器室内に1台の中央RITPルータ（RITP①）を、試験線沿線に4台の沿線RITPルータ（RITPルータ①～④）をそれぞれ設置した。また、試験用電車（2両編成）に1台の車上RITPルータ（RITP②）を設置した。地上RITPルータ（中央RITPルータおよび沿線RITPルータ）間は光ケーブルを用いたIPネットワークで構成した。車上―地上間の伝送媒体としては、RITP④の区間には、IEEE 802.11a 準拠の5.6GHz帯無線LAN、LTE、60GHz帯のミリ波の3種類、RITP①～③の区間には、無線LANとLTEの2種類を用意した。本試験における沿線の各RITPルータが受け持つ区間の定義を表3に示す。なお、LTEに関しては全線で使用可能であるため、区間の定義をしていない。

さらに、本試験では、車上と地上にネットワークテストを設置し、ネットワークテストの模擬パケット生成・送信機能を用いて、無線LANネットワークを他のユーザが高負荷で利用している状態を模擬した。具体的には、

表3 沿線 RITP ルータの区間

区間	沿線 RITP ルータ	始点	終点	伝送媒体
4	RITP④	0	250	ミリ波
4	RITP④	0	250	無線LAN
3	RITP③	250	380	無線LAN
2	RITP②	380	600	無線LAN
1	RITP①	600	760	無線LAN
—	—	0	760	LTE



図4 実証試験の機器配置

今回の試験で使用する無線LANの帯域がひっ迫するようにネットワークテストでパケットを生成し、車上から地上、および地上から車上の双方向でUDPにより宛先のネットワークテストへ送信した。ネットワークテストも含めた機器配置図を図4に示す。また、図4には表3で定義した区間の位置も示す。

## 5.2 実証試験の方法と評価

試験では、伝送媒体選択機能のうち、「伝送媒体切替方式（以下、伝送方式A）」と、「全媒体利用方式（以下、伝送方式B）」の性能差を比較するため、車上装置と運行制御装置との間の制御情報の伝送を毎秒150byteで模擬し、車上と地上にそれぞれのデータの到達率と伝送遅延を測定した。伝送遅延については、指令を模擬した機器室のPCと接続する中央RITPルータと車上制御装置を搭載したPCと接続する車上RITPルータそれぞれにおいて計測された送信時刻の送信間隔と受信時刻の受信間隔を記録した。以降の試験結果では、送信側でのパケット送信間隔の10%値、中央値、90%値をそれぞれ算出すると共に、受信側でのパケット到達率とパケット受信間隔の10%値、中央値、90%値をそれぞれ算出し、これらの値で評価をした。

さらに、無線LANに負荷をかけた状態（以下、負荷有状態）とかけていない状態（以下、通常状態）の試験を実施し、データの到達率と受信間隔を比較した。さらに、伝送方式Aで選択された伝送媒体を図示することにより、負荷の影響による到達率の変化や選択される伝送媒体の違いを確認した。

## 5.3 試験結果

### 5.3.1 送信間隔の結果

送信側のパケット送信間隔の10%値、中央値、90%値をパケットの送信方向ごとに表4に示す。表4から、伝送方向によって送信間隔に差があり、地上から車上への送信間隔が、設定した1秒に対して、若干遅れることが分かった。

### 5.3.2 受信間隔の結果

#### (1) 通常状態の試験結果

まず、通常状態の結果を表5にまとめる。なお、全てのパケットが受信できた場合でも、次に受信するパケットを損失する可能性があるため、到達率は99.9%以上と表記する。また受信間隔の算出では、ロスしたパケットは除いて値を算出した。このため、表5における伝送

表4 送信間隔の結果

送信間隔 [秒]	伝送方向	地上から車上	車上から地上
	10%値		1.015
中央値		1.015	1.001
90%値		1.016	1.002
N		1828	1779

N：サンプル数



方式 A の N の値は、受信間隔の方が小さい。

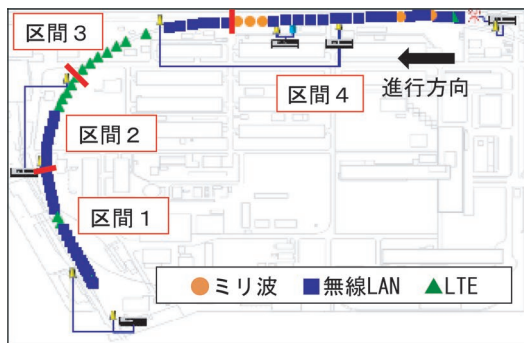
表 5 から、伝送方式 A では、地上から車上へのパケットの到達率よりも、車上から地上へのパケットの到達率が高いことが分かる。一方、伝送方式 B では、伝送方向によらず、到達率は 99.9% 以上であった。パケットの受信間隔に着目すると、中央値に関しては、送信間隔の中央値とほぼ同様の値であることが分かる。しかし、10% 値と 90% 値の差を比較すると、いずれの伝送方向においても伝送方式 B の方が伝送方式 A より小さいことが分かる。したがって、伝送方式 B は伝送方式 A より低遅延で伝送できたと言える。

また、図 5 に伝送方式 A において選択された媒体を示す。図 5 から、全ての媒体が利用可能な区間 4 では、ほぼ無線 LAN が選択されており、曲線区間である区間

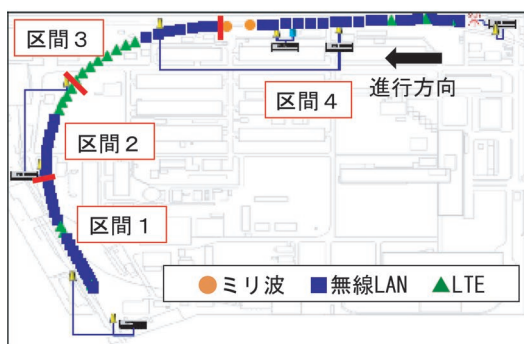
表 5 試験結果（通常状態）

伝送方向		地上から車上		車上から地上	
伝送方式		A	B	A	B
到達率 [%]	10%値	98.3	>99.9	99.1	>99.9
	中央値	99.2	>99.9	>99.9	>99.9
	90%値	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9
	N	777	548	748	524
受信間隔 [秒]	10%値	1.000	1.000	0.985	0.994
	中央値	1.015	1.015	1.000	1.001
	90%値	1.024	1.022	1.015	1.008
	N	771	548	745	524

N：サンプル数



(a) 地上から車上へのパケット



(b) 車上から地上へのパケット

図 5 伝送方式 A での選択媒体（通常状態）

3 から 2 付近では、LTE が選択されていたことが確認できる。地上から車上へのパケットでは、無線 LAN から LTE への切り替え時に、車上から地上への伝送では、ミリ波と無線 LAN の切替え時に、それぞれ損失（プロットの抜け）が発生している様子が見られる。

(2) 負荷有状態の試験結果

次に、無線 LAN に負荷をかけた場合の試験結果を表 6 に示す。表 6 の伝送方式 A において、到達率を比較すると、表 5 と同様に、車上から地上へのパケットの平均到達率の方が、地上から車上への到達率よりも高いことが確認できる。車上の伝送媒体切替方式では、車上で伝送媒体の状態把握結果を直接受信できるのに対して、地上の伝送媒体切替方式では、伝送媒体の状態把握結果を沿線 RITP ルータから中央 RITP ルータへ転送する時間が発生する。そのため、車上で伝送媒体切替時よりも地上での伝送媒体切替時の方が、伝送媒体の状態を把握してからデータ伝送までの時間差が大きく、その間に伝送媒体の状態が変化したことで損失が発生したものと考えられる。

また、負荷をかけることによって、伝送方式 A における地上から車上へのパケットは、表 5 に示した通常状態よりも到達率が下がることが分かった。地上から車上へのパケットの詳細を解析した結果、最大で 4 パケットロスしていた。一方、車上から地上へのパケットは、負荷有状態時ではロスが発生しなかった。これは、無線 LAN に負荷がかかることにより、ミリ波や LTE を積極的に使用するようになったため、無線 LAN の接続断によるパケット損失の影響を受けにくくなったためと考えられる。

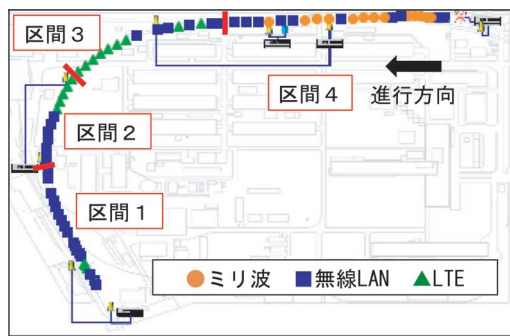
さらに、パケットの受信間隔に着目すると、その中央値は、通常状態と差がないことが分かる。一方、10% 値と 90% 値の差に着目すると、伝送方式 A の方が、伝送方式 B よりも差が大きいことが分かる。伝送方式 B では、負荷状態でも到達率が 99.9% 以上であったが、受信間隔の 10% 値と 90% 値に着目すると、車上から地上へのパケットに関しては、表 5 の値よりもその差が広がったことが分かる。したがって、到達率に影響は及ぼさなかったものの、負荷によって伝送遅延が大きくなったものと考えられる。

図 6 は、伝送方式 A において選択された媒体を示し

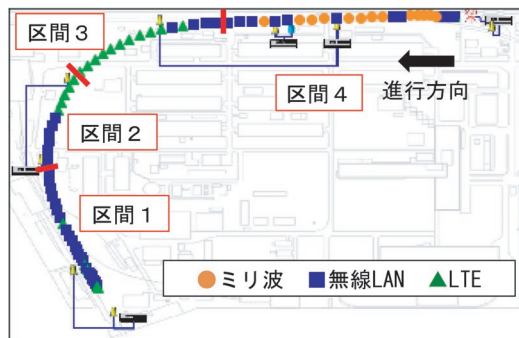
表 6 試験結果（負荷有状態）

伝送方向		地上から車上		車上から地上	
伝送方式		A	B	A	B
到達率 [%]	10%値	91.2	>99.9	>99.9	>99.9
	中央値	92.2	>99.9	>99.9	>99.9
	90%値	93.1	>99.9	>99.9	>99.9
	N	201	324	203	307
受信間隔 [秒]	10%値	0.984	1.000	0.961	0.974
	中央値	1.015	1.015	1.000	1.000
	90%値	1.039	1.028	1.037	1.026
	N	185	324	203	307

N：サンプル数



(a) 地上から車上へのパケット



(b) 車上から地上へのパケット

図6 伝送方式 A での選択媒体（負荷有状態）

たものである。図6から、全ての媒体が利用可能な区間4では、通常状態（図5）とは異なり、伝送媒体としてミリ波が選択されていることが分かる。また、曲線区間では、図6と同様にLTEを用いているが、LTEを用いる区間が図5よりも手前に広がっていることが分かる。

以上から、伝送媒体選択機能のうち、伝送媒体切替方式は、高い負荷をかけた場合に地上から車上の通信が安定せず、負荷の影響を受けやすいことが分かった。一方で、全媒体利用方式では、いずれの場合も安定して通信が可能であることが分かった。

## 6. まとめ

本稿では、鉄道システムに流れる異なる系統のデータをネットワーク上でシステムを超えて共有できる統合情報ネットワークの構築に向けて、複数の伝送路を活用してデータを伝送する手順として提案した鉄道向け通信ネットワークプロトコル（RITP）の考え方と基本的な機能について述べた。さらに、RITPの基本機能のうち、伝送媒体状態把握機能と伝送媒体選択機能の具体的な仕様を提案し、これらの機能を実装した試作ルータを用いて、走行中の車両と地上との間で機能の実証試験を行った。その結果、伝送媒体選択機能の全媒体利用機能により、

パケット到達率が99.9%以上となることを確認した。

今後は、他のRITP機能に対する具体的な仕様の提案を行い、統合情報ネットワークの実現に向けた検討を進めていく予定である。

本研究の一部は、三菱電機株式会社との共同研究により得られた成果が含まれている。

## 文献

- 1) 竹内恵一, 川崎邦弘, 流王智子, 寺田夏樹, 祇園明宏, 辰井大祐: 鉄道の運行に関わる情報の流れをみる, Railway Research Review, vol.75, no.2, pp.16-19, 2018
- 2) 中村一城, 川崎邦弘, 竹内恵一, 流王智子: 運行に関わる情報を共有する統合情報ネットワーク, RRR, vol.75, no.8, pp.8-11, 2018
- 3) 中村一城, 川崎邦弘, 竹内恵一, 流王智子: 鉄道運行向け情報統合ネットワークの提案, 鉄道総研報告, vol.32, no.5, pp.41-46, 2018
- 4) 羽田明生, 岩澤永照, 祇園明宏, 流王智子, 川村智輝, 小川祥吾, 山口大介, 竹内恵一, 中村一城, 川崎邦弘: 列車運行向け情報統合ネットワーク用プロトコルの提案, 2019年電気学会電子・情報システム部門大会, No.GS12-4, 2019
- 5) 流王智子, 羽田明生, 山口大介, 中村一城, 川崎邦弘, 富澤俊明: 列車運行向け統合情報ネットワークにおけるプロトコルの提案と機能検証, 電気学会研究会, TER, Vol.2022, No.1, pp.79-84, 2022
- 6) 流王智子, 羽田明生, 山口大介, 中村一城, 川崎邦弘, 富澤俊明: 列車運行向け統合情報ネットワークにおけるプロトコルの機能確認試験, 電気学会研究会資料, CMN-22-040, 2022
- 7) 北野隆康, 岩澤永照, 中村一城, 竹内恵一, 川崎邦弘: 鉄道運行制御システム向け5Gガイドラインの策定に向けた検討項目の整理, 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-5-15, 2022
- 8) FRMCS: <https://uic.org/rail-system/frmcs/>(参照日: 2022年10月3日)
- 9) 阪田史郎: インターネットにおけるQoS制御, 電子情報通信学会誌, Vol.85, No.10, pp.749-755, 2002
- 10) 中尾彰宏: SDNがもたらす柔軟な将来網の世界, 電子情報通信学会誌, vol.96, no.12, pp.902-905, 2013
- 11) Han B, Gopalakrishnan V, Ji L, Lee S., "Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations.," IEEE Communications Magazine, vol.2, pp.90-97, 2015.
- 12) 原田博司: コグニティブ無線ルータの概要と今後の展開, 信学技法, SR2010-44, pp.25-32, Oct 2020



# 遅延の影響度・影響人数に基づく 遅延対策箇所検討手法

國松 武俊\* 国崎 愛子\*

Evaluation Methods of Measures Against Delay based on Propagation Score and Affected Passengers

Taketoshi KUNIMATSU Aiko KUNISAKI

In recent years, train delay is one of the most serious problems in rail transportations in Japan. Although timetable planners try to improve punctuality by modifying a current timetable, there are no clues as to increase of trains or stations running time/ dwell time supplements should be increased. In this research, we developed an evaluation method of train delay based on its propagation range. We also proposed an evaluation method from the viewpoints of passengers. We applied these methods to the timetable change in existing rail lines and confirmed that the proposed methods can pick up critical trains for which taking measures are effective for improving overall punctuality of the railway lines.

キーワード：遅延波及，定時性，旅客流動，運転時間余裕，停車時間余裕

## 1. はじめに

近年、各鉄道路線において、列車遅延が日々、慢性的に発生し、多くの列車に波及することが課題となっている。特に、複数路線に跨る直通運転を行っている路線では、ある路線でひとたび発生した遅延が、広範囲・長時間にわたり継続するような状況も発生している。このような広域型の遅延は、多くの旅客に迷惑をかけるため、優先的に遅延を解消、縮小する必要がある。

鉄道事業者でも、日々の運行状況を調査、分析し、ダイヤ改正で余裕時分を付加する等の遅延対策を行うことで、ダイヤの定時性向上に努めている。現在、運行状況の分析には、主に運行管理システムに日々蓄積される実績遅延データが活用されている。実績遅延データに対する従来の分析手法として、一定期間の列車遅延の平均値や中央値を算出し、ダイヤ図の列車スジを着色する「色付きダイヤ図」が使用されている。これにより、慢性的に遅延量が多い箇所（列車や駅の着時点または発時点）は判別可能である。しかし、具体的にどこに余裕時分を付加する等の遅延対策を講ずるのが効果的・効率的か、といった遅延対策の立案のための手掛かりを得るのは困難という課題がある。また、遅延量は列車単位で集約されており、その列車遅延により、具体的に何人の旅客が影響を受けたのか、旅客への影響の程度が明示的に反映されない課題もある。

そこで本研究ではまず、遅延量ではなく、遅延の「波及範囲」に着目し、ある箇所の遅延が、何箇所の列車や

駅に波及し、遅延の原因となったのか、波及先の箇所数を「影響度」として評価する手法を構築した。これは、多くの列車や駅に遅延を波及させている箇所に、遅延対策を優先的に打てば、広域型の遅延を効果的、効率的に解消、または縮小出来るという考え方に基づいている。次に、ある箇所の遅延により、目的駅への到着が当初より遅れた旅客の人数を「影響人数」として評価する手法を構築した。これは、自動改札機等で取得可能な旅客データを使用し、各旅客について、仮に遅延が無かった場合の列車乗継経路と目的駅到着時刻、および遅延が発生した当日の列車乗継経路と目的駅到着時刻を推定し、それらを比較することで、各箇所の列車遅延により目的駅到着が遅れた旅客を特定し、人数を推定するものである。

構築した2つの分析手法を、単線／複線、通勤路線／都市間特急が走る幹線路線など、性格の異なる3路線に適用し、影響度と影響人数を算出した。影響度や影響人数が大きく計算された個別の列車や駅の情報を、ダイヤ作成担当者に提示したところ、担当者自身も、これらの列車や駅に遅延対策を実施すべきと考えていたことが判明した。さらに、ダイヤ改正において、これらの箇所に余裕時分を付加する時刻変更を施した結果、余裕時分を付与した時間帯、周辺列車の遅延が、ダイヤ改正後には大きく縮小したことを確認した。

以下、2章では、輸送計画における遅延対策業務の概要と関連研究について述べる。提案手法のうち、影響度評価手法を3章で、影響人数評価手法を4章で述べる。5章では、実路線のダイヤ改正への適用結果を示し、6章で結論をまとめる。

\* 信号技術研究部 運転システム研究室



## 2. 列車遅延と輸送計画業務

### 2.1 列車遅延

列車遅延は一般的に、人身事故、信号トラブル等に起因する数十分程度以上の大規模遅延と、混雑による乗降時間の伸び、荷物挟まり等に起因し、比較的頻繁に発生する数分程度の小規模遅延に分類される<sup>1)</sup>。後者の小規模遅延に対しては、ダイヤ改正時に計画ダイヤに余裕時分を付加する等の対策が取られることが多い。本研究では、この小規模遅延への対策に資する分析手法を検討する。

小規模遅延は、非常に広範囲に波及する場合がある。事例として、図1のように、ある枝線Pの列車の駅A到着が遅延し、その結果、平面交差支障により、基幹路線Qの下り普通列車の駅A発車も遅延するケースがある。この普通列車の遅延は、特急を待避する駅Cで下りの特急にも波及するほか、特急が直通運転する単線路線Rにも遅延を持ち込み、駅Eでの行き違い待ちにより、逆方向の上り特急にも遅延を波及させる。そして、上り特急により、基幹路線Qに再度、遅延が波及し、特急を待避する上り普通列車にも遅延が波及する。このケースでは、遅延量は2～5分であるものの、枝線Pでの一次遅延から約4時間経過しても、二次遅延が継続する。このような広域型の遅延波及に対策を打つためには、一次遅延箇所の特定と、そこからの波及範囲の把握が重要である。

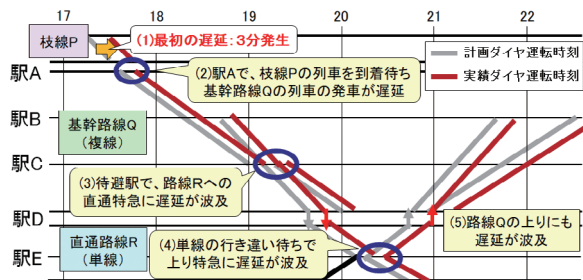


図1 広域型の遅延波及現象

### 2.2 輸送計画業務における遅延対策

遅延対策の検討は、輸送計画の担当者により行われるが、多大な労力を要している。その理由は、①遅延の把握、②原因の分析、③対策の立案、④対策効果の推定、⑤ダイヤ改正後の効果の検証の5段階の業務を、全て担当者が行うためである。特に③では「どの列車・駅のダイヤをどう変更すれば、全体の遅延の縮小に効果的か」を見極め、判断することになる。これには、担当者の経験が大きく影響し、ノウハウが必要なだけでなく、遅延対策案の妥当性の客観的評価といった課題もある。また、余裕時分の付加は、場合により速達性や列車本数に悪影響を及ぼすため、必要以上の付加は望ましくない。

現状、担当者は列車運行状況を何度も現地調査し、複数の対策案の得失を定性的に比較することで遅延対策を決定しており、業務の効率性にも課題がある。

### 2.3 関連研究

小規模遅延に対する分析手法は、一定期間内の遅延の傾向を可視化するクロマティックダイヤ<sup>2)</sup>、遅延の伝経路を相関ルールで抽出する手法<sup>3)</sup>などが提案されている。これらは、遅延対策業務のうち①遅延の把握、②原因の分析、④対策効果の推定、⑤対策後の効果検証のいずれかを支援する。しかし、③対策の立案の支援には十分では無い。すなわち、現状の遅延状況が把握出来たところで、「どの列車や駅のダイヤをどう変更すべきか」「他と比べ、なぜこの箇所への対策が効果的と言えるのか」といった、対策箇所の選定や妥当性に関する示唆が得られない課題がある。それに加え、列車単位で遅延が集約されており、遅延により具体的に何人の旅客が影響を受けたかが、定量的に示されない課題もある。

一方で、遅延による旅客への影響を不効用値として、他路線との乗継の失敗による影響を含めて旅客の視点で評価する方法<sup>4)</sup>や、ICカードデータを利用し、目的駅到着遅延が生じた旅客の総数や総遅延時間で送達障害による影響を評価する方法<sup>5)</sup>も提案されている。これらの研究は、遅延による影響を、列車では無く旅客の視点で分析し、鉄道を利用する旅客にどの程度の影響があるかに基づいたものである。しかし、当日の列車運行トータルとしての影響の評価であり、個別箇所の列車や駅の遅延が、どの程度影響したかは不明で、上記③対策の立案の支援には十分では無い。すなわち、多数の遅延箇所のうち、どこを優先的に解消するのが効果的か、遅延対策の立案と実施の手掛かりが得られない課題がある。

### 2.4 研究の目的

以上を踏まえ、本研究では次の要件を満たす評価手法を構築する。

- ・複数日の実績遅延データから定量的に評価可能
- ・評価値が表す遅延状況を、直感的に理解可能
- ・遅延の波及範囲を把握可能
- ・遅延対策実施時の遅延縮小効果を把握可能
- ・遅延により影響を受けた旅客数を把握可能

## 3. 遅延の影響度評価手法

### 3.1 目的と影響度の考え方

本章では、余裕時分の付加などの遅延対策が、路線全体の列車遅延の縮小に効果のある列車や駅を抽出することを目的に、遅延量に代わり、遅延の波及範囲の大きさを「影響度」として評価する手法について述べる。具体



的には、ある列車・駅で生じた遅延が、同一列車の次の駅以降や、同一駅の後続列車などに波及した箇所数を、影響度として定義する。例えば、図2に示す通り、列車1MのB駅で5分の遅延①が発生し、それが他の28箇所の列車や駅に波及している場合には、遅延①の影響度は28となる。一方、別の列車9MのB駅で7分の遅延②が発生し、それが他の12箇所に波及している場合には、影響度は12となる。この場合、遅延量では遅延②の方が①より大きいものの、影響度では遅延②より①の方が大きい。すなわち遅延①は、広範囲に波及する観点で、②よりも路線全体の定時性に悪影響を与えている。また、仮に遅延①の遅延を解消した場合、①以外に28箇所の遅延が解消出来るのに対し、遅延②を解消した場合、②以外に12箇所の遅延解消に留まることもわかる。よって、路線全体の遅延の箇所数を効率的に減らすためには、遅延対策を②の箇所に実施するよりも、①の箇所に実施した方が効果的と考えられる。このように、影響度の算出により、遅延の波及範囲を定量化することで、遅延対策が効果的な箇所を抽出することができる。

鉄道事業者の輸送計画の実務でも、多くの列車や駅に遅延を波及させている箇所を優先して、遅延対策を打てば、その箇所だけでなく波及先箇所の遅延も改善するため、路線全体の遅延を効果的、効率的に改善出来るというノウハウがある。したがって、影響度に基づく列車遅延評価は、遅延対策の実務に沿った手法であると言える。

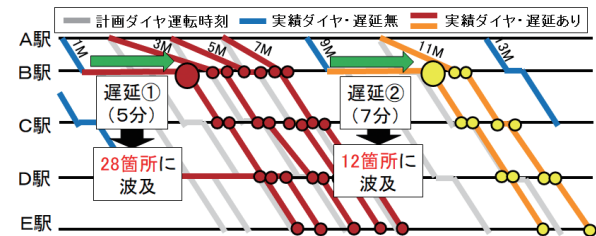


図2 遅延の「影響度」の定義

### 3.2 影響度の算出手順

影響度の算出手順は以下の通りである。まず、対象路線の計画ダイヤデータ、実績遅延データ（各日における、各列車・駅の着遅延／発遅延を記録したもの）を準備する。次に、各分析対象日について、担当者が設定した閾値を上回る遅延量となる箇所を特定する。また、各対象日の各遅延箇所について、その遅延の波及範囲を次節に記載の方法で特定する。そして、波及範囲内の遅延箇所数をカウントすることにより、その遅延箇所の波及先箇所数を当日の影響度として算出する。最後に、計画ダイヤの各列車と駅の着時点または発時点を対象に、全分析対象日の波及先箇所数の中央値を算出し、これを影響度の中央値とする。ここで、当該箇所が遅延が発生してい

ない日は、波及先箇所数を0として計算する。

なお、人身事故や急病人対応等、トラブルによるダイヤ乱れ発生日には、遅延の波及範囲が大きくなり、影響度の値も平常時より相応に大きくなる。今回、平常運転時の小規模遅延対策が目的であるため、トラブルに起因した大規模遅延時の影響度を含めるのは適切で無いと考えられる。一方で、トラブルは様々な時間帯、箇所で発生するため、時間帯、影響が局所的なものを含め、対象路線でトラブルが発生した日の実績遅延データを全て分析対象から除外してしまうと、分析可能な日がほとんど無くなるという問題も発生する。そこで、本研究においては、各遅延箇所に対し、トラブル等で影響度が大きくなったケースを適切かつ効率的に除外するため、複数日の評価結果の集約に、平均値では無く中央値を採用する。

### 3.3 遅延の波及範囲の特定手法

遅延の波及範囲は、以下の方法に基づき特定する。まず、ある遅延箇所の「下流側の隣接箇所」に、当該箇所と遅延量が同一、またはそれ以上となる他の遅延箇所がある場合に、当該の遅延箇所同士を「遅延の波及箇所」として判定する。ここで「下流側の隣接箇所」とは、以下の条件にあてはまる箇所を示す。なお  $T_{min}$  は、対象路線の最小運転間隔の実績値に相当するもので、信号設計上の最小運転間隔（理論値）に、実際の運転操作によるゆらぎ分を加味して設定する。遅延が波及している場合には、先行列車の到着または発車後、すみやかに後続列車が到着または発車するためである。

- 遅延箇所が、列車の駅到着時点の場合
  - ・当該列車の当駅発車時点の箇所
  - ・当該列車の後続列車の、当駅到着時点の箇所（当該列車到着～後続列車到着まで  $T_{min}$  分以内の場合のみ）
- 遅延箇所が、列車の駅発車時点の場合
  - ・当該列車の次駅到着時点の箇所
  - ・当該列車の当駅発車後、次に当駅の同一番線に到着する後続列車の、当駅到着時点の箇所（当該列車発車～当該列車到着まで  $T_{min}$  分以内の場合のみ）
  - ・当該列車の後続列車の、当駅発車時点の箇所（当該列車発車～後続列車発車まで  $T_{min}$  分以内の場合のみ）
- 遅延箇所が、単線区間の列車の駅到着時点の場合
  - ・当該列車の到着後、単線区間に進入する対向列車の当駅発車時点の箇所（当該列車到着～後続列車発車まで  $T_{min}$  分以内の場合のみ）

例えば、図2において、 $T_{min}$  を3分として、遅延箇所①（列車1MのB駅発）の遅延が5分で、1MのC駅到着時の遅延が4分の場合には、①の遅延が1MのC駅着に波及したと判定する。同様に、B駅において、後

続列車 3M（1M と同一の番線に、1M 発車の 2 分後に到着）の B 駅到着時の遅延が 3 分の場合には、1M 発車から 3M 到着まで 2 分で、これが  $T_{\min}$  より小さいため、①の遅延が 3M の B 駅着に波及したと判定する。

次に、ある遅延箇所  $i$  から開始し、遅延の波及箇所と判定された隣接箇所を順に辿ることで、到達可能な全ての遅延箇所を求める。この到達可能な遅延箇所の集合  $E(i)$  を遅延箇所  $i$  の波及範囲と呼び、 $E(i)$  に含まれる箇所数が、当日の遅延箇所  $i$  の波及先箇所数、すなわち、影響度となる。そして、前節で述べたように、全分析対象日における箇所  $i$  の波及先箇所数の中央値が、箇所  $i$  の影響度の中央値となる。

## 4. 遅延の影響人数評価手法

### 4.1 目的と影響人数の考え方

本章では、列車遅延による影響の大きさを、利用者である旅客の視点から評価する目的で、遅延の影響人数を評価する手法について述べる。基本的な考え方として、影響人数では「遅延により目的駅への到着が遅れた旅客の人数」を算出する。3 章の影響度では、列車と駅の組合せの数により、遅延の波及範囲の大きさを評価している。しかし、遅延列車の乗車旅客数や、実際に旅客何人の到着遅れに繋がったかが不明であり、その結果、ラッシュ時間帯の中心部の駅の、混雑の激しい列車遅延と、乗車旅客がほとんどいない早朝の郊外での列車遅延が同等に評価され、旅客数が多い時間帯を優先した遅延対策の立案に繋がらない課題があった。これを踏まえ、自動改札機等で取得可能な旅客データを活用することで、列車遅延による影響を受けた旅客を特定、集計し、旅客の視点で評価するのが、影響人数の考え方である。

### 4.2 影響人数の算出手順

影響人数の算出手順は、以下の通りである<sup>6)</sup>。必要なデータとして、3.2 節に記載のデータと、自動改札機等で取得可能な旅客データを準備する。旅客データは、分析対象日の毎日では無く、当該路線で標準的な利用状況の日、一日分のデータを用意する。

まず、3.2 節の影響度と同様の手順で、各分析対象日に対し、遅延箇所の特定と、遅延の波及範囲の特定を行う。次に、旅客データと計画ダイヤデータを利用し、仮に列車遅延が全く発生しなかった場合における、旅客 1 人 1 人の列車乗継経路（以下「計画の乗継」）を推定する。あわせて、同一の旅客データ、計画ダイヤデータと、分析対象日の実績遅延データを利用して、列車遅延が生じた当日の、旅客 1 人 1 人の列車乗継経路（以下「実績の乗継」）を推定する。その次に、列車遅延により、目的駅到着が遅れた旅客を特定する。

具体的には、各旅客について、計画の乗継と実績の乗継を比較し、計画の乗継の目的駅到着時刻よりも実績の乗継の到着時刻の方が遅い場合には、目的駅の到着が遅延した旅客（以下「到着遅延旅客」）と判定する。例えば、図 3 において、仮に遅延が無い場合に、A 駅から快速 1M に乗車し B 駅に向かう旅客 P と、A 駅から快速 1M に乗車し、さらに B 駅で普通 3M に乗換え C 駅に向かう旅客 Q が存在する場合を考える。分析対象日当日、快速 1M のみ 5 分の遅延が発生し、普通 3M に遅延が発生しなかった場合、旅客 P は B 駅に計画より 5 分遅れて到着する。一方で旅客 Q は、快速 1M は遅延したものの、B 駅で普通 3M に乗り換えられ、3M には遅延が発生しなかったことから、C 駅には当初の予定通りの時刻に到着している。このような場合には、快速 1M の遅延により影響を受け、到着遅延が生じた旅客は、旅客 P のみが該当し、旅客 Q は該当しない、という判定となる。

その後、各到着遅延旅客を、次節に記載の手法により、列車遅延の箇所と対応付ける。そして、当日の各遅延箇所とその遅延波及範囲内に対応付いている到着遅延旅客数を集計し、それを当日の影響人数として算出する。最後に、計画ダイヤの各列車と駅の着時点または発時点を対象に、全分析対象日の影響人数の中央値を算出する。ここで、当該箇所が遅延が発生していない日は、当日の影響人数を 0 人とし計算する。

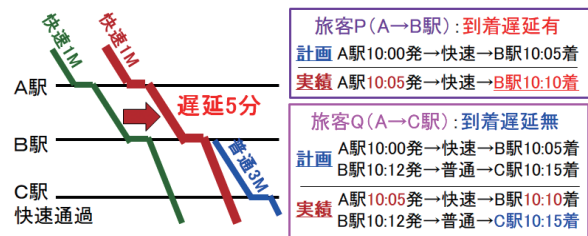


図 3 影響人数算出のための到着遅延旅客の特定

### 4.3 列車遅延と到着遅延旅客の対応付け手法

前節の到着遅延旅客の列車遅延箇所への対応付けは、各旅客の計画の乗継、または実績の乗継が、以下のケースに該当する場合に行う。これは、旅客の到着遅延は、途中駅での乗継に失敗するケースを除き、降車時の列車の遅延に起因するという性質に基づくものである。

- ・計画の乗継に含まれる各列車について、当該旅客が列車を降りる駅の着時点で当日、遅延が生じた場合、当該列車・駅の着時点で当該旅客に対応付ける。ただし、当日の他の列車の遅延により、乗換駅で乗継が出来なくなる列車に対しては、対応付けを行わない。

- ・実績の乗継に含まれる各列車について、当該旅客が列車を降りる駅の着時点で当日、遅延が生じた場合、当該列車・駅の着時点で当該旅客に対応付ける。



## 5. 実路線への適用

### 5.1 対象路線の概要

大部分が複線で、都市間の特急列車、都市圏輸送の快速、普通列車が運行される路線を対象に、実際に行われたダイヤ改正の前後、それぞれの遅延データに対して分析し、提案手法の妥当性と有用性を検証する。

### 5.2 使用データと分析条件

対象路線のダイヤ改正前、改正後それぞれの計画ダイヤデータと、平日約1ヶ月間の実績遅延データを使用する。実績遅延データは1分単位で着遅延、発遅延を記録したものである。また、影響度の算出にあたっては、遅延が1分以上発生した列車、駅、着時点または発時点が遅延箇所とし、影響人数の算出にあたっては、目的駅に1分以上遅延して到着した旅客を計上する。さらに、 $T_{min}$ は対象路線の最小運転間隔を踏まえ、3分に設定する。

### 5.3 色付きダイヤ図による分析結果（改正前）

ダイヤ改正前を対象に、従来手法の遅延量に基づく色付きダイヤ図を作成した結果を図4に示す。列車スジは、対象期間内の各列車、各駅の発遅延の中央値に応じ色分けされ、濃い青色は遅延が無い（0分）列車を、濃い赤色は遅延が大きい列車を表し、緑色はその中間の遅延量を表す。一般的に、多くの列車や駅に慢性的な遅延が生じている。一方で、この多数箇所の遅延を効率的に解消させるために、具体的にどの列車や駅に対策を行うのが良いのか、遅延対策の立案に役立つ知見を得るのは難しい。

一見すると、図4中の黒丸内のような、遅延量が多い赤線または橙線の列車スジに対策を講じるのが良さそうだと考えられる。しかし、これらの遅延は多くの分析対象日において、ここで初めて発生した遅延では無い。赤丸内の箇所で発生した別の遅延が、波及、拡大した結果である。この場合、発生源である赤丸内の箇所の遅延を解消する対策を講じる方が、その遅延波及先である黒丸内の箇所の遅延も同時に解消出来るため、効率的である。そのような、遅延の波及関係を考慮して、効率の良い対策箇所を示す分析とはなっていない問題点がある。

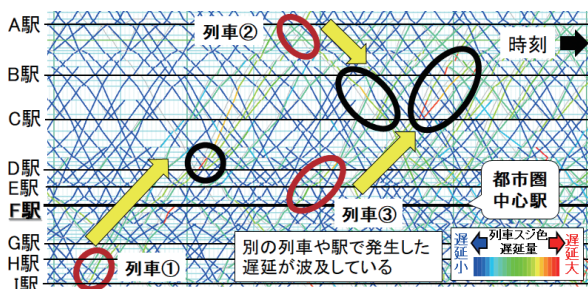


図4 遅延量色付きダイヤ図による分析（改正前）

### 5.4 影響度による分析結果

次に、対象路線のダイヤ改正前のデータを用い、各列車や駅の影響度の中央値を算出した。各列車、各駅発時点の影響度に応じ、色付きダイヤを作成した（図5）。

図4、図5より、影響度を算出することで、多くの遅延箇所から、他の箇所に遅延を波及させやすい列車や駅が容易に特定出来ることがわかる。特に、図4の赤丸内の箇所が、図5で明確に特定され、これらの箇所の遅延対策により、遅延が解消出来れば、その波及先も含む、多くの箇所の遅延縮小、解消に繋がると考えられる。

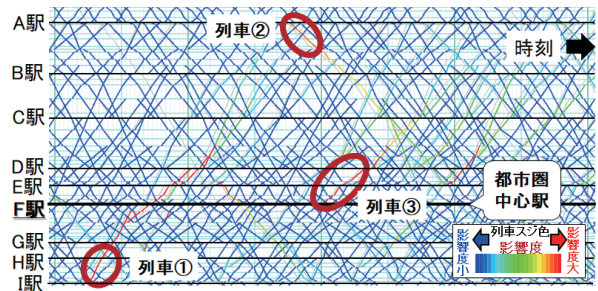


図5 影響度色付きダイヤ図による分析（改正前）

### 5.5 影響人数による分析結果

対象路線のダイヤ改正前のデータと、対象路線の自動改札機から取得された旅客データを用い、各列車や駅の影響人数の中央値を算出した。各列車、各駅発時点の影響人数に応じ、色付きダイヤを作成した（図6）。

図4、図5、図6を比較すると、影響人数の比較的大きな列車、区間は、影響度よりもさらに限定的になる。具体的には、列車①、列車③の都市圏中心駅F駅周辺や、列車②の始発駅A駅周辺の列車スジが赤色、橙色、または緑色で着色された。このうち、列車①と③については、都市圏中心駅であるF駅周辺の区間は、利用者数が多いためであると考えられる。これは、他の駅間では無く、このF駅周辺での列車①、③の遅延を解消した方が、F駅を発着する多くの列車の遅延解消に繋がり、F駅から乗車する多くの旅客の目的駅到着遅延の解消に繋がることを示唆している。

一方で、列車②のA駅発時点については、A駅→B駅、またはC駅への一定数の旅客の目的駅到着遅延に繋がっている。さらに、この遅延がF駅→I駅間を走る複数列車の遅延に波及し、F駅からこれらの列車に乗車する多くの旅客の目的駅到着遅延に繋がることが、影響人数が高くなる原因である。

これらのうち、列車①と②は、この路線のダイヤ作成担当者も、本分析結果の提示前から課題と認識していた。したがって、影響度、影響人数により、遅延対策が必要な列車が適切に抽出出来ることを確認した。

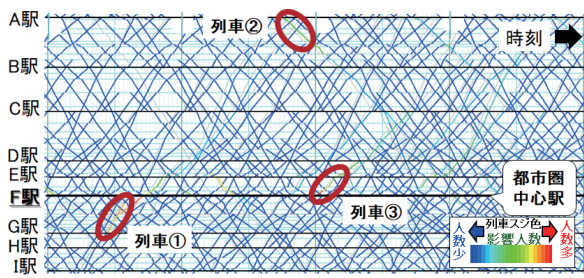


図6 影響人数色付きダイヤ図による分析（改正前）

### 5.6 分析結果のダイヤ改正案作成への活用

前節の分析結果を踏まえ、対象路線のダイヤ改正案の作成において、以下の遅延対策が実施された。まず、列車①については、I 駅到着前の他路線内での遅延が発端となることから、他路線内でのダイヤを見直し、I 駅到着時点での遅延の低減を図った。また、列車②については、A 駅に到着する別路線の列車が遅延した場合に、平面交差支障により列車②の A 駅発車が遅延しやすいことから、A 駅→B 駅間で混雑により遅延が拡大しやすいことから、A 駅の発車番線の変更と、A 駅→B 駅間に余裕時分を付加する変更が行われた。

ダイヤ改正後における、平日1ヵ月間の実績遅延データを用い、遅延量の中央値を算出し、遅延量色付きダイヤ図を作成したものを図7に示す。図4、図7を比較すると、列車①および②の遅延はほぼ解消し、これらの列車から波及していた遅延も解消していることがわかる。これは、遅延対策による効果が発揮されたと言える。一方、遅延対策を実施していない列車③については、遅延量は低下しながらも、多少の遅延が残っており、C 駅付近では後続列車への波及も見られる。

なお、ダイヤ改正後には、新型コロナウイルス感染症拡大等の影響により、利用状況が大きく変化している。しかし今回、遅延対策を実施した列車①および②と、対策未実施の列車③で、改正後の遅延状況に相違が見られたことから、提案手法の影響度、影響人数により抽出された箇所への遅延対策は、一定の効果があったと言える。以上より、提案手法を用いた遅延対策実施の妥当性、有用性が確認された。

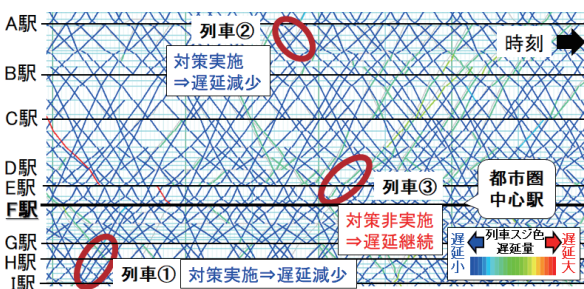


図7 遅延量色付きダイヤ図による分析（改正後）

## 6. まとめ

本研究では、鉄道事業者が、列車運行の定時性向上のためのダイヤ改正等における遅延対策の立案を効率的かつ効果的に実施可能とするため、影響度、影響人数の2つの評価尺度と、それらを用いた分析手法を提案した。影響度は、ある箇所の遅延が、その先、何箇所の遅延に波及しているか、遅延の波及範囲の大きさを表す指標で、広範囲に波及しやすい遅延を優先的に解消するという、鉄道事業者での現状の遅延対策の効果を定量的に示す指標である。一方で、影響人数は、実績遅延データに加え旅客データも使用し、遅延により目的駅への到着遅延が生じた旅客人数を指標とするものであり、遅延によって影響を被る利用者の視点に基づいた評価指標である。

影響度、影響人数ともに、実路線の遅延データに適用し、ダイヤ作成担当者が課題と認識している列車や駅が抽出されることを確認した。さらに、ダイヤ改正後の遅延データと比較し、遅延対策箇所における遅延が実際に解消したことが確認でき、影響度や影響人数による分析の妥当性、有用性を確認した。なお、本稿で紹介した路線以外でも、単線と複線が混在する都市間輸送路線や、単線の通勤路線など、3つの路線で提案手法を適用し、その妥当性と有用性を確認している。

今後は、遅延の波及範囲を特定する手法や、利用者の視点に基づき評価するという考え方を拡張し、ポスト・コロナの鉄道事業環境に応じた、様々な施策の評価にも展開したいと考えている。具体的には、ダイヤ乱れ時の運転整理の評価手法や、列車減便時の旅客への影響評価等に取り組んでいく予定である。

## 文献

- 1) 国土交通省：東京圏における今後の都市鉄道のあり方について、交通政策審議会答申第198号、2016
- 2) 富井規雄：運行実績データに基づく列車の遅延対策、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム DICOMO2017、2017
- 3) 河野重美、富井規雄：相関ルールを用いた遅延伝搬経路の推定、平成29年電気学会全国大会論文集、2017
- 4) 武内陽子、富井規雄、平井力：列車ダイヤの頑健性評価手法、鉄道総研報告、Vol.21, No.4, pp.11-16, 2007
- 5) 角田史記、加藤学、大塚理恵子、助田浩子、大関一博：交通系ICカードを利用した鉄道輸送障害時の影響を定量化する方法の研究、情報処理学会論文誌データベース、Vol.6, No.3, pp.187-196, 2013
- 6) 國松武俊、国崎愛子、中挟晃介：旅客への影響人数の観点による列車遅延データ分析手法、電学論D、Vol.142, No.5, pp.418-427, 2022



# 編成の分割併合を考慮した車両運用計画の自動作成手法

加藤 怜\*

Automatic Calculation Method for Rolling Stock Assignment Considering Splitting and Combining of Train

Satoshi KATO

Railway operating companies are required to prepare rolling stock assignment for each timetable revision. In some railway lines, splitting and combining of trains are often used to adjust transportation capacity flexibly. However, these operations are labor-intensive and time-consuming, reduction in the number of splitting and combining is desirable. In this paper, we propose a method for automatically creating rolling stock assignment which reduces the number of splitting and combining of trains using a mathematical optimization technology. Computational experimental results targeting real instances of several railway lines show that the proposed method is effective in terms of evaluation criteria.

キーワード：車両運用計画，分割併合，仕業検査，交番作成，混合整数計画法，巡回セールスマン問題

## 1. はじめに

ダイヤ改正時には、列車ダイヤの作成に加えて、付随する車両等のリソースの使用計画も作成する必要がある。その1つである車両運用計画は、ダイヤ上の各列車に充当する車両編成や、各車両編成の運行スケジュールを定めた計画である。車両運用計画により、その列車ダイヤを実現するために必要となる車両編成数が決まるため、作成担当者はなるべく効率がよい計画の作成を求められる<sup>1)</sup>。

効率的に車両を使用するため、旅客需要の多い朝の通勤時間帯は各列車の両数を多くする一方で、需要の少ない昼間時間帯は少ない両数で運行するなど、柔軟な輸送力設定が可能であることが望ましい。そのため、多くの路線において、各列車の両数を柔軟に変更するために、編成の分割併合を含んだ車両運用計画が作成されている。一方で、分割併合作業には一定の時間および作業員が必要となるため、なるべく少ない方が望ましい。

現在も、車両運用計画の作成は担当者の経験やノウハウに基づき作成されている。しかし、作成に要する時間が膨大であることや、技術継承の課題、担当者の能力に依存した品質となるなどの課題がある。そのため、コンピュータによる自動作成技術の実用化が望まれている。

本稿では、分割併合を含む路線を対象とし、運行効率性の尺度である交番日数や回送距離を低減するとともに、分割併合をなるべく抑制するための車両運用計画の自動作成手法を提案する。その上で、実際の列車ダイヤデータを対象とした提案手法の有効性の検証結果について述べる。

## 2. 車両運用計画の作成

### 2.1 車両運用計画の概要

列車ダイヤを所与とし、ダイヤ上の全列車に必要な車両を充当し、各車両の使用スケジュールを定めたものが車両運用計画である。実際には、1営業日単位のスケジュールである「仕業」と、仕業の順序を定めた循環計画である「交番」を作成する。仕業作成においては、ある充当列車から次の充当列車への接続（つなぎと呼ぶ）の際には、必要な間合い時間を設ける必要がある。交番作成においては、ある仕業の終了駅と次の仕業の開始駅が一致している必要がある（交番の最後の仕業は、その終了駅を最初の仕業の開始駅に一致させる）。

本稿では、それ以上切り離すことが出来ない、複数車両のまとまりを「ユニット」と呼ぶ。通常、交番は車両形式ごとに、また同じ車両形式でも両数が異なれば、それぞれで作成される。本稿では、両数が異なれば、たとえ形式が同一でも別の形式として扱う。

車両運用計画作成における重要な制約条件として、一定周期ごとに車両検査を実施する必要がある。本研究では車両検査の中で最も周期の短い仕業検査を考慮する。

交番における仕業数は対応する形式のユニットの最低必要数を意味するため、リソースの効率的な使用の観点で仕業数はなるべく少ない方が望ましい。また、車両基地に戻す等の理由により、旅客の輸送をせずに車両を移動させる回送が必要になることがあるが、このような回送も少ない方が望ましい。

日本国内の多くの路線において、分割併合を含む車両運用計画が作成されている。「分割」とは複数のユニットからなる編成の切り離しを意味する。「併合」とは複数のユニットの結合を意味する。分割併合により、旅客

\* 信号技術研究部 運転システム研究室

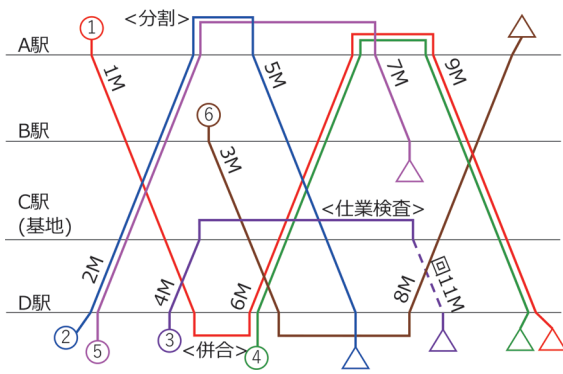


図1 車両運用計画の例

仕業	
1	A ○ 1M D 6M(前) A 9M(後) △ D
2	D ○ 2M(前) A 5M △ D
3	D ○ 4M C <仕業検査> 回11M △ D
4	D ○ 6M(後) A 9M(前) △ D
5	D ○ 2M(後) A 7M △ B
6	B ○ 3M D 8M △ A

図2 交番の例

需要に応じた効率的な列車運行が可能となる一方、分割併合には作業員が必要であり、一定の作業時間が必要であることから、その回数は少ない方が望ましい。

図1には、車両運用計画の例を示している。○は仕業の開始（出区）、△は仕業の終了（入区）を意味する。列車2M、6M、9Mは列車線が二重線となっているが、これは2つのユニットが併合した編成として運行することを意味する。ここで、左側の線が進行方向に向かって前編成、右側の線が後編成を意味する。また、2Mの運行後には分割が、6Mの運行前には併合が行われている。一方、図2には図1の計画の交番を示している。仕業3に仕業検査が含まれているが、仕業1から順に充当されることから、6日に1回仕業検査が実施される。交番における仕業数（「交番日数」と呼ぶ）はその車両運用計画での運行に必要なユニット数を示すため、この例では最低でも6ユニットが必要である。

## 2.2 編成の分割併合と扱いの難しさ

本稿では分割併合を許容するものの、なるべく分割併合回数が少ない計画作成を目指す。そのためには、編成の分割併合が起きているか否かを、判断する手法を構築する必要がある。しかし、分割併合が起きるか否かは、単につなぎ前後の列車のユニット数だけでは判断ができず、各ユニットが編成内のどの位置にあるかにも依存するため、分割併合の有無の判断は非常に難しい。

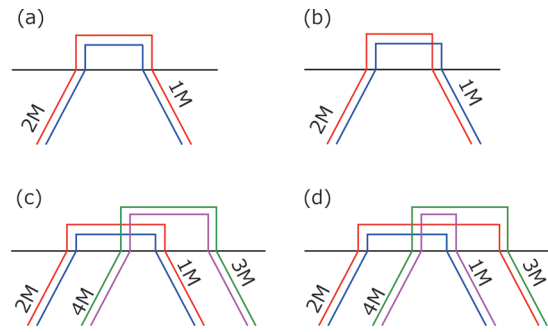


図3 分割併合の複雑さ

図3に例を示す。(a)では、折り返し場面で2つのユニットの前後が入れ替えられているため、分割併合なしに、そのまま折り返すことが可能である。しかし、(b)ではそのままの折り返しでは実現できず、いったん分割し、前後を入れ替えた上での併合が必要となる。(c)の例では、2Mおよび4Mがそのまま折り返しとなっているが、(d)では2Mおよび4Mのそれぞれのユニットを組み替えて1Mおよび3Mに充当しているため、分割併合作業はそれぞれで発生する。このような複雑な分割併合は非効率であるため、実際には許容されにくい。自動作成手法では何らかの制御をしないと、頻発する恐れがある。

## 2.3 既往研究

車両運用計画の自動作成に関する既往研究は欧米をはじめ国外で盛んであり、数理最適化手法の適用例が多い。例えばAlfieri et al.<sup>2)</sup>、Borndörfer et al.<sup>3)</sup>などの研究が挙げられる。国外の研究はネットワークフロー問題としてのモデル化が主流であるが、Giacco et al.<sup>4)</sup>は巡回セールスマン問題（Travelling Salesman Problem：TSP）としてモデル化し、検査制約を満たす手法を提案している。一方で、近年では日本国内の路線を対象とした研究も散見され、今泉ら<sup>5)</sup>、大槻ら<sup>6)</sup>の取り組みがある。

このように車両運用計画の自動作成に関しては多数の研究が行われているが、編成の分割併合に着目した研究は数が限られる。国外ではFioole et al.<sup>7)</sup>、Peeters and Kroon<sup>8)</sup>、国内ではTsunoda et al.<sup>9)</sup>などが挙げられるが、これらは分割併合の作業回数の抑制までは考慮しておらず、結果として、分割併合が多発する非実用的な計画が提案される可能性がある。

## 2.4 問題定義

本稿では、なるべく短時間で計画案作成を目指すため、下記的前提条件を置く。

- ・計画作成対象の列車ダイヤは所与とする。
- ・各列車について、どのユニットをいくつ充当するか、あらかじめ決まっているものとする。また、各列車の

最大ユニット数は2ユニットとする。

- ・回送は自動作成時に設定するが、各列車間のつながりで回送可能な時間が確保されている場合のみ設定可能とする。

以上の前提のもと、対象の全ての形式について、仕業と交番を作成する。評価指標は、総仕業数、総回送距離、分割併合回数の3点とし、どの項目を優先するかはユーザがパラメータで指定できるものとする。

### 3. 本研究のアプローチ

#### 3.1 採用する数理モデル

2.3節で述べたように、既往研究の多くは数理最適化手法を適用している。また、数理最適化の中でも、適用する数理モデルとしては、ネットワークフロー問題、集合分割問題、TSPの大きく3つが挙げられる。

この中で、交番を作成、仕業検査周期制約を充足し、その上で分割併合を考慮という本研究の目的を踏まえた場合、一度の求解で交番を作成でき、仕業検査周期制約を考慮可能なTSPを基本とし、その拡張により分割併合に対応することが、計算負荷抑制の観点からも望ましいと考えられる。よって、本研究では、文献4のTSPに基づく数理最適化モデルを採用する<sup>10)</sup>。

#### 3.2 基本ネットワークモデル

TSPとしてモデル化するために、ネットワークを構築する。まず、各列車に対応するノードを設ける。そして、列車間で車両運用のつながりが可能である場合に、対応するノード間でアークを張る。また、そのつながりが回送を含むか否か、仕業検査を含むか否かにより、4種類のアークを設定する。よって、2つのノード間に複数のアークが張られることになる。各アークのコストは、交番日数、回送距離、分割併合回数（詳細は後述する）を目的関数に反映できるように設定する。このネットワークを対象にTSPとして求解すると、解として得られる巡回路が本手法で作成する交番となる。

図4に、6列車での基本ネットワークと巡回路の例を示す。左図は基本ネットワークであり、6つのノードが設けられている。ノード間には複数のアークが張られているが、上述の4種類の中で設定可能なアークのみ張られている。このネットワークにおいて、右図のような全てのノードを経由する巡回路を求める。

#### 3.3 分割併合を考慮するためのモデルの拡張

前節で示したネットワークモデルは、各列車に対し1つのユニットを充当することが前提である。本稿では2ユニットまで充当することを許容し、また分割併合を想定するため、以下の拡張を行う。

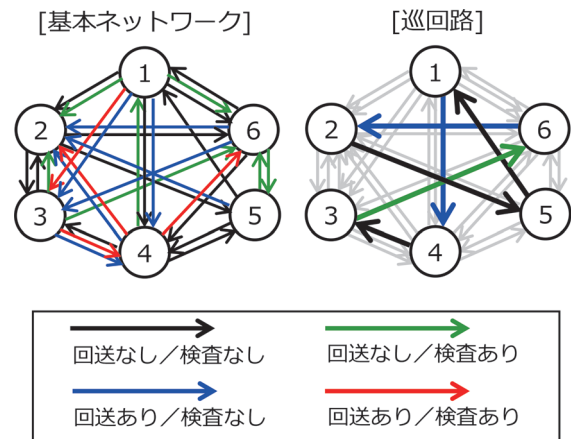


図4 基本ネットワークと巡回路の例

まず、TSPのネットワークについて、2ユニットの列車はその列車に対応するノードを2つ設けることとする。その上で、2つのノードを識別するために、「編成内位置」を定義する。編成内位置とは、2ユニット列車における当該ユニットの地理的な位置を意味するものである。まず、1ユニット列車については、編成内位置は0と定義する。2ユニット列車については、地理的な情報をもとに編成内位置を1もしくは2で定義する。例えば、東側に位置するものを編成内位置1、西側に位置するものを編成内位置2とする。2ユニット列車の終端駅での折り返しの際には、そのまま折り返す場合、地理的な位置は変わらないはずであり、上記で定めた定義により、つながりの前後での編成内位置の変化により、分割併合の有無を判断できるようになる。

編成位置の情報からどのように分割併合回数をカウントするか、以下で分割と併合に分けてその詳細を述べる。

##### 3.3.1 分割回数のカウント方法

どの編成内位置からのつながりであるかにより、下記(A)~(C)の3通りに分かれる。

- (A) 編成内位置0からのつながりの場合
  - 1ユニット列車からのつながりとなるため、つながり先に関係なく、分割は発生しない。
- (B) 編成内位置1からのつながりの場合
  - つながり先の列車の編成内位置により、分割の発生有無が変わる。
  - (B-1) 編成内位置0へのつながりの場合
    - 2ユニット列車から1ユニット列車へのつながりとなるため、分割をカウントする。
  - (B-2) 編成内位置1へのつながりの場合
    - 2ユニット列車から2ユニット列車へのつながりとなり、また編成内位置は同一である。編成内位置2のユニットが同一であれば、分割は生じないが、もし異なる場合には分割が必要となり、カウントする必要がある。よって、編成内位置2のユニットに依存する。



(B-3) 編成内位置 2 へのつなぎの場合

2 ユニット列車から 2 ユニット列車へのつなぎとなるが、編成内位置は異なる。編成内位置が異なる場合には必ず分割が必要となるため、分割をカウントする。

(C) 編成内位置 2 からのつなぎの場合

2 ユニット列車からのつなぎであるため、分割が発生する可能性がある。しかし、もし発生する場合には、編成内位置 1 のユニットで (B-2) もしくは (B-3) でカウントしている。よって、ここでのカウントは不要である。

3.3.2 併合回数のカウント方法

基本的な考え方は分割と同様であり、つなぎの前後が逆になる。どの編成内位置へのつなぎであるかにより、下記 (D)~(F) の 3 通りに分かれる。

(D) 編成内位置 0 へのつなぎの場合

1 ユニット列車へのつなぎとなるため、つなぎ元に関係なく、併合は発生しない。

(E) 編成内位置 1 へのつなぎの場合

つなぎ元の列車の編成内位置により、併合の発生有無が変わる。

(E-1) 編成内位置 0 からのつなぎの場合

1 ユニット列車から 2 ユニット列車へのつなぎとなるため、併合をカウントする。

(E-2) 編成内位置 1 からのつなぎの場合

2 ユニット列車から 2 ユニット列車へのつなぎとなり、また編成内位置は同一である。編成内位置 2 のユニットが同一であれば、併合は生じないが、もし異なる場合には併合が必要となり、カウントする必要がある。よって、編成内位置 2 のユニットに依存する。

(E-3) 編成内位置 2 からのつなぎの場合

2 ユニット列車から 2 ユニット列車へのつなぎとなるが、編成内位置は異なる。編成内位置が異なる場合には必ず併合が必要となるため、併合をカウントする。

(F) 編成内位置 2 へのつなぎの場合

2 ユニット列車へのつなぎであるため、併合が発生する可能性がある。しかし、もし発生する場合には、編成内位置 1 のユニットで (E-2) もしくは (E-3) でカウントしている。よって、ここでのカウントは不要となる。

4. 数理最適化問題としての定式化

3.3 節で述べた分割併合への対応の考え方を、3.2 節で示した基本ネットワークモデルに導入する。具体的には、(B-1)、(B-3)、(E-1)、(E-3) の場合は、必ず分割または併合が発生するため、それに伴うコストを当該のアーキに付与する。また、(B-2) および (E-2) の場合は、分割または併合が発生するか否かは、編成内位置 2 のユニットのつなぎが同様であるか否かに依存する。よって、これらについては論理条件で考慮する。

以上の考え方にに基づき、混合整数計画問題 (Mixed Integer Linear Programming : MILP) として定式化する。使用する記号を表 1 に示す。なお、アーキ種別の 1~4 は、3.2 節で述べた 4 種類のアーキそれぞれに対応する。

制約条件は、割当制約、部分巡回路除去制約、仕業検査周期制約、論理条件に基づく制約、変数制約の 5 種類から構成される。

表 1 定式化で使用する記号の定義

記号	意味
$V$	ノードの集合 (列車の集合, インデックスは $0, 1, \dots,  V  - 1$ とする)
$V_1$	編成内位置 1 のノード集合
$K$	アーキ種別の集合 ( $k = 1, 2, 3, 4$ )
$A$	アーキの集合
$A^k$	種別 $k$ のアーキの集合
$c_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキの日乗りコスト
$d_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキの回送コスト
$e_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキの分割併合コスト
$p_1$	列車位置 1 のノード $i$ と同じ列車の列車位置 2 のノード
$l$	仕業検査周期下限
$u$	仕業検査周期上限
$x_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキを選択する場合 1, さもなければ 0
$y_{ij}$	巡回路におけるノード $i, j$ 間の順序
$z_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキの前回仕業検査からの経過日数
$r_i$	列車位置 1 のノード $i$ からのつなぎで分割が生じる場合は 1, さもなければ 0
$s_i$	列車位置 1 のノード $i$ へのつなぎで併合が生じる場合は 1, さもなければ 0

<割当制約>

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j,k) \in A} x_{ij}^k = 1, \forall i \in V \tag{1}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i: (i,j,k) \in A} x_{ij}^k = 1, \forall j \in V \tag{2}$$

式 (1) はネットワーク上でノード  $i$  から出力するアーキから 1 つのみ、式 (2) はノード  $j$  に入力するアーキから 1 つのみ巡回路として選択されることを示す。

<部分巡回路除去制約>

$$\sum_{j \in V} y_{ij} = \sum_{h \in V} y_{hi} + 1, \forall i \in V \setminus \{0\} \tag{3}$$



$$y_{ij} \leq |V| \sum_{k \in K} x_{ij}^k, \forall i, j \in V \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} y_{0j} = 1 \quad (5)$$

部分巡回路とは、ネットワーク上の一部のノードのみで構成される巡回路を意味する。これは交番上の一部の作業のみで巡回してしまうことを意味し、全作業で巡回するという交番の要件を満たせず、作業検査周期制約を満たす保証ができない。式(3)~(5)の制約式により、この部分巡回路の発生を防ぐことができる。

〈作業検査周期制約〉

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j,k) \in A} z_{ij}^k = \sum_{k \in K} \sum_{h: (h,i,k) \in A^1 \cup A^2} (c_{hi}^k x_{hi}^k + z_{hi}^k) + \sum_{k \in K} \sum_{h: (h,i,k) \in A^2 \cup A^4} c_{hi}^k x_{hi}^k, \forall i \in V \quad (6)$$

$$lx_{ij}^k \leq z_{ij}^k, \forall (i, j, k) \in A^2 \cup A^4 \quad (7)$$

$$ux_{ij}^k \geq z_{ij}^k, \forall (i, j, k) \in A \quad (8)$$

式(6)は直近の作業検査からの経過日数を算出する式である。式(7)は作業検査周期下限、式(8)は作業検査周期上限を意味する。式(6)~(8)により、作業検査周期制約を満たすことができる。

〈論理条件に基づく制約〉

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k - \sum_{k \in K} x_{p_i p_j}^k \leq r_i, \forall i, j \in V_1 \quad (9)$$

3.3節で述べたように、編成内位置1からのつながりの分割は論理条件で把握するが、式(9)はその制約式を示す。分割が生じる場合は、 $r_i = 1$ となり、分割をカウントする。

$$\sum_{k \in K} x_{ji}^k - \sum_{k \in K} x_{p_j p_i}^k \leq s_i, \forall i, j \in V_1 \quad (10)$$

同様に、編成内位置1へのつながりの併合は論理条件で把握するが、式(10)はその制約式を示す。併合が生じる場合は、 $s_i = 1$ となり、併合をカウントする。

〈変数制約〉

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall (i, j, k) \in A \quad (11)$$

$$y_{ij} \in \mathbb{Z}^+, \forall i, j \in V \quad (12)$$

$$z_{ij}^k \geq 0, \forall (i, j, k) \in A \quad (13)$$

$$r_i \in \{0, 1\}, \forall i \in V \quad (14)$$

$$s_i \in \{0, 1\}, \forall i \in V \quad (15)$$

式(11)~(15)は各変数の取りうる値、範囲を示す。

$$\alpha \sum_{(i,j,k) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k + \beta \sum_{(i,j,k) \in A} d_{ij}^k x_{ij}^k + \gamma \left\{ \sum_{(i,j,k) \in A} e_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in V_1} (r_i + s_i) \right\} \quad (16)$$

式(16)は目的関数である。第1項は交番日数、第2項は回送距離、第3項は分割併合回数に対するコストを意味する。それぞれに重みパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  (いずれも0以上とする) を乗じ、その合計値を最小化する。

## 5. ケーススタディ

### 5.1 対象路線データ

開発した自動作成手法の性能を確認するため、実在する路線データを用いて検証した。検証対象路線は、国内の実在するA~Dの4路線、および仮想的な線区Eの計5路線である。各データの詳細として、列車数(1ユニット列車数、2ユニット列車数の合計)、2ユニット列車数、車両形式数、路線長を表2に示す。

ケーススタディでは、重みパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  を変更することで、意図する計画が得られるか確認した。また、路線CやEなどの規模の大きなデータに対し、実行時間内に結果が得られるかについても確認した。

最適化計算の計算時間は、一律で10,800秒を上限とした。計算には、Windows10 Pro, CPU Core i7-8700K, メモリ64GBのPCを使用し、MILPの求解には、数値最適化ソルバーGurobi Optimizer 9.1.1を使用した。

表2 各路線データの問題規模

路線	列車数	2ユニット 列車数	車両形式数	路線長(km)
A	89	32	1	148.6
B	142	19	1	112.8
C	178	80	1	197.5
D	73	33	2	341.6
E	217	39	2	206.1

### 5.2 作成結果と考察

各データに対し、提案手法を適用した結果を示す。重みパラメータについては、下記の3通りを設定した。

- (1)  $\alpha = 1, \beta = 0.001, \gamma = 0$
- (2)  $\alpha = 1, \beta = 0.001, \gamma = 0.001$
- (3)  $\alpha = 1, \beta = 0.001, \gamma = 0.1$

(1) は交番日数および回送距離を考慮し、分割併合回数は考慮しない場合、(2)、(3) は分割併合回数も考慮するが、(3) はより重視した場合を意味する。

表3に、路線A~Cを対象に提案手法を適用した結果を示す。「データ」は路線および重みパラメータの組合せを意味する。同様に、路線D, Eについて、表4に各項目を示す。ただし、2形式であるため、交番日数および回送距離は各形式の値を記している。

表3をみると、路線A~Cのいずれも、重みパラメータ(1)では回送距離は少ないものの、分割併合回数が非常に多い。一方、(2)および(3)では、分割併合回数も大幅に低減できていることがわかる。各路線の(2)と(3)を比較すると、回送距離は(2)の方が、分割併合回数は(3)の方が少ないことがわかる。以上の結果は、重みパラメータがその意図通りに作用していることを示している。なお、交番日数はいずれの路線でも重みに関わらず一定となっている。これは、今回の路線データでは、(1)~(3)において、交番日数に対する重みが、回送距離、分割併合回数に対する重みより十分に大きく設定できていることを意味するとともに、同じ交番日数でも、実行可能な多様な計画案が存在することを示している。以上の傾向は、表4でも共通していることがわかる。

一方、計算時間をみると、(2)や(3)は、(1)に比べ計算時間を要することがわかる。これは、(2)や(3)

では分割併合に対し重みが付与されていることから、定式化上で論理条件に基づく制約式が必要になることが要因と考えられる。この傾向は路線Cで顕著であり、(2)や(3)では既定時間内に計算が終了しなかった。路線Cは列車数が多いだけでなく、2ユニット列車数が多いことから、分割併合が可能な候補箇所が多く、それが求解を困難にしている要因の一つと考えられる。

## 6. まとめ

本稿では、編成の分割併合を含む路線を対象とした、車両運用計画の自動作成手法を提案した。分割併合は輸送力の調整や効率的な運行に寄与する一方で、その作業には労力や時間を要するため、作業回数はなるべく少ない方が望ましい。そこで、数理最適化モデルの1つであるTSPによりモデル化するアプローチを採用した。ここでは、仕業数や回送距離に加え、分割併合回数を減らすことを指向するものとした。実在する路線データを含むケーススタディにて、交番日数、回送距離、分割併合回数のいずれも低減した。以上より、実用的な計画を短時間で作成できることを確認した。

今後は、各列車に対する3ユニット以上の充当、またそのときの分割併合への対応など、実用を踏まえた様々なケースへの対応を検討することで、車両運用計画自動作成手法の実用化につなげたい。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、(株)ジェイアール総研情報システムの関係者にご協力頂いた。ここに謝意を表する。

## 文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所運転システム研究室：鉄道のスケジューリングアルゴリズム，エヌ・ティー・エス，2005
- 2) A. Alfieri, R. Groot, L. Kroon, and A. Schrijver, "Efficient circulation of railway rolling stock", *Transportation Science*, Vol.40, No.3, pp.378-391, 2006.
- 3) R. Borndörfer, M. Reuther, T. Schlechte, K. Waas, and S. Weider, "Integrated optimization of rolling stock rotations for intercity railways", *Transportation Science*, Vol.50, No.3, pp.863-877, 2016.
- 4) G. Giacco, A. D'Ariano, and D. Pacciarelli, "Rolling stock rostering optimization under maintenance constraints", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol.18, No.1, pp.95-105, 2014.
- 5) 今泉淳，山岸雄樹，森戸晋：二段階数理計画アプローチによる鉄道車両運用計画の策定，日本オペレーションズ・リ

表3 計算結果(路線A~C)

データ	交番日数	回送距離(km)	分割併合回数	計算時間(秒)
A- (1)	17	39.5	54	31.6
A- (2)	17	39.5	2	94.8
A- (3)	17	442.1	2	154.8
B- (1)	13	4.8	34	85.6
B- (2)	13	4.8	8	89.0
B- (3)	13	38.8	6	154.5
C- (1)	29	131.6	130	889.1
C- (2)	29	131.6	8	10,800.0
C- (3)	29	192.8	4	10,800.0

表4 計算結果(路線D, E)

データ	交番日数	回送距離(km)	分割併合回数	計算時間(秒)	
D- (1)	17	934.6	114.9	34	10.9
D- (2)	17	934.6	114.9	2	69.7
D- (3)	17	934.6	114.9	2	73.9
E- (1)	14	283.1	37.7	48	587.6
E- (2)	14	283.1	37.7	22	1,084.0
E- (3)	14	391.9	174.5	16	776.0

- サーチ学会和文論文誌, Vol.53, pp.14-29, 2010
- 6) 大槻和史, 愛須英之, 田中俊明: 車両運用計画問題に対する制約充足解法の提案, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, Vol.53, pp.30-55, 2010
- 7) P.-J. Fioole, L. Kroon, G. Maroti, and A. Schrijver, "A rolling stock circulation model for combining and splitting of passenger trains", *European Journal of Operational Research*, Vol.174, No.2, pp.1281-1297, 2006.
- 8) M. Peeters and L. Kroon, "Circulation of railway rolling stock: a branch-and-price approach", *Computers and Operations Research*, Vol.35, pp.538-556, 2008.
- 9) M. Tsunoda, J. Imaizumi, and S. Morito, "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-", *Proceedings of 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, Narashino, Japan, 2015.
- 10) 加藤怜, 森戸晋, 福村直登: 混合整数計画法を用いた編成の分割併合を考慮した車両運用計画の作成, *電気学会論文誌 D*, Vol.142, No.4, pp.280-289, 2022





# 地域鉄道におけるパターンダイヤの利便性評価

鈴木 崇正\* 渡邊 拓也\* 奥田 大樹\* 深澤 紀子\*

## Convenience Evaluation of Clock-face Local Railway Timetables

Takamasa SUZUKI Takuya WATANABE Daiki OKUDA Noriko FUKASAWA

This article aims to reveal convenience evaluation of clock-face (regular interval) timetable for local railways, which provides periodic train services, we conducted a questionnaire survey to collect data on the evaluation of timetables with varying number of trains or periodicity of train services. Using the collected data, a logistic regression model was constructed to quantify the magnitude of the effect of such characteristics on the convenience evaluation. The results obtained by the regression model revealed that both interval regularity and hour-by-hour cyclicity improve passengers' evaluation. This may lead to improving convenience of local railway lines where additions of train services may be impractical.

キーワード：地域鉄道, パターンダイヤ, 運行間隔, 利便性, アンケート調査

### 1. はじめに

列車の待ち時間は鉄道の利便性を表現する重要な指標のひとつである<sup>1)</sup>。その待ち時間の平均的な値としては、列車の平均運行間隔を1/2にした値が用いられることがある<sup>2)</sup>。列車の運行本数が増加すれば平均運行間隔は小さくなり、平均的な待ち時間も短縮される。

しかし、旅客1人1人にとっての平均的な待ち時間（以下「期待待ち時間」と呼ぶ）は、列車の運行間隔の平均だけではなくそのばらつきの影響も受ける。次章で述べるとおり、運行間隔のばらつきが少ないほど期待待ち時間は短くなることから、列車本数を増やさずとも列車の運行を等間隔にするなどの取り組みが旅客の待ち時間を短縮し、旅客の利便性を向上させる可能性がある<sup>3)</sup>。

特に経営状況の厳しい地域鉄道路線にとって、列車運行本数の増加に依存しない期待待ち時間の短縮方策は、旅客の利便性向上を低コストで実現する上で重要である。

列車が等間隔に発車するようなダイヤはパターンダイヤと呼ばれ、近年では列車本数の比較的少ない地域鉄道路線でも新たに導入された事例がみられる<sup>4)5)</sup>。

しかし、地域鉄道路線へのパターンダイヤ導入がもたらす効果に関する知見の蓄積は十分ではない。例えば、旅客の平均的な所要時間を表現する期待所要時間を指標としたダイヤの評価を試みた既往研究<sup>6)</sup>は、旅客の立場からみた主観的な利便性の評価を明らかにしていない。パターンダイヤ導入の代表的な事例のひとつであるスイスのBahn2000プロジェクトに関する報告<sup>7)</sup>も、ダイヤの様々な特性と利便性評価や需要の変化との関係に触れていない。

そこで本研究では、特に地域鉄道路線へのパターンダイヤ導入が旅客の評価に対してもたらす効果の把握を目的として、旅客の立場からみたダイヤの利便性評価に関する基礎的な分析を実施した。具体的には、旅客の期待待ち時間を短縮する「列車本数の増加」と「ダイヤのパターン化」という2つの方策が利便性評価に与える影響を比較できるように、列車の運行が1時間に6本以下であるような地域鉄道路線を想定して、平均運行間隔や期待待ち時間などが様々に異なるダイヤに対する旅客の評価に関する調査を実施した。そして得られたデータに基づいて、平均運行間隔や期待待ち時間等で利便性評価を説明するモデルを構築し、その影響を定量化することでダイヤのパターン化がもたらす効果の把握を試みた。

以下本稿では、Johnson et al.<sup>8)</sup>やWardman et al.<sup>9)</sup>の議論を踏まえ、「列車が等間隔に発車すること」に着目し、列車の発車を等間隔にすることを「ダイヤをパターン化する」と表現する。本稿2章では、パターンダイヤがもたらす効果のひとつとして期待待ち時間の削減に着目し、その定式化を行う。3章では列車ダイヤの利便性評価に関するアンケート調査の設計と実施概要、回答者の主な個人属性等の単純集計結果を報告する。4章ではダイヤの特性を変数化したうえで、それらが利便性評価に与える影響をモデル化するとともに、そのモデルを応用した、パターンダイヤ導入施策の評価の事例を挙げる。最後に5章で本研究のまとめと今後の課題を示す。

### 2. パターンダイヤの特徴

#### 2.1 期待待ち時間

期待待ち時間とは、鉄道を利用するために駅に到着した旅客の、次にやってくる列車までの平均的な待ち時間

\* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

である。ここでは期待待ち時間の導出過程を示す。なお以下の議論において、一日の初列車より前の待ち時間と、終列車の後の待ち時間は無視する。

初列車の発車時刻から終列車の発車時刻までの営業時間  $t$  (分) において  $n + 1$  (本) の列車があるとき、運行間隔は  $n$  回分存在する。平均運行間隔を  $\bar{i}$  (分) とすると、

$$t = n\bar{i} \quad (1)$$

である。 $\bar{i}$  と、 $k$  番目 ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) の運行間隔  $i_k$  (分) との差を  $d_k$  (分) とすると、

$$i_k = \bar{i} + d_k \quad (2)$$

である。このとき  $i_k$  が  $\bar{i}$  より長ければ  $d_k > 0$ 、短ければ  $d_k < 0$  である。営業時間  $t$  は運行間隔の総和であるから、

$$t = \sum_{k=1}^n (\bar{i} + d_k) = n\bar{i} + \sum_{k=1}^n d_k \quad (3)$$

である。また、式 (1) と (3) から、式 (4) が成立する。

$$\sum_{k=1}^n d_k = 0 \quad (4)$$

さて、ある個別の列車、例えば  $k + 1$  番目の列車を利用する旅客の平均待ち時間は、 $k$  番目の列車と  $k + 1$  番目の列車との間隔  $i_k$  の半分である。またランダムに駅に到着する旅客がその運行間隔の間に駅に到着する確率は、営業時間全体に占めるその運行間隔の割合  $i_k/t$  である。一日を通した旅客の期待待ち時間  $E[W]$  (分) は、一日全体の列車について、各列車を利用する旅客の平均待ち時間  $i_k/2$  とその列車を利用する確率  $i_k/t$  の積を、一日のすべての列車について足し合わせた総和であるから、

$$\begin{aligned} E[W] &= \sum_{k=1}^n \left( \frac{i_k}{2} \cdot \frac{i_k}{t} \right) = \frac{\sum_{k=1}^n (\bar{i} + d_k)^2}{2t} \\ &= \frac{n\bar{i}^2 + 2\bar{i}(\sum_{k=1}^n d_k) + \sum_{k=1}^n d_k^2}{2t} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{t} \cdot \bar{i}^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{t} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_k^2 \\ &= \frac{1}{2} \bar{i} + \frac{1}{2\bar{i}} \text{Var}[d_k] \end{aligned} \quad (5)$$

である。ここで  $\text{Var}[d_k]$  は運行間隔の分散であり、その最小値は 0 である。よって、すべての列車運行間隔が等しい場合に  $E[W]$  は最小値  $\bar{i}/2$  をとり、そうではない場合には  $\bar{i}/2$  より大きい値をとる。

式 (5) が示すように、期待待ち時間は運行間隔の平均と分散で説明される。そして運行間隔が完全に等間隔でない限り、期待待ち時間は平均運行間隔の半分とはならない。平均運行間隔が同一である、すなわち列車運行本数が同一である場合でも、運行間隔の分散が大きいかほど期待待ち時間は長くなる。パターンダイヤの導入は、ダイヤの分かりやすさや覚えやすさの向上だけではなく、期待待ち時間の短縮にも貢献しうる。単純に平均運行間隔の半分を期待待ち時間とみなす手法では、この点を考慮することができない。

列車の運行が完全にランダムである、すなわち列車の運行間隔が  $\lambda = 1/\bar{i}$  の指数分布に従うときには、 $\text{Var}[d_k] = \bar{i}^2$  であるから、平均運行間隔と期待待ち時間は同じ値となる (式 (6))。運行間隔が極端に偏った場合、例えば全列車のうち半数が初列車に近い時間帯に集中し、残り半数が終列車に近い時間帯に集中するようなケースでは  $E[W] > \bar{i}$  となりうるが、本研究ではそのような極端な事象を考慮しないこととし、列車の運行がランダムである式 (6) の状態を  $E[W]$  の上限とした。よって、 $E[W]$  の取りうる範囲は式 (7) のとおりである。またこれに伴い、運行間隔の分散  $\text{Var}[d_k]$  のとりうる範囲は式 (8) のとおりとなる。

なお、国内の JR および民鉄の都市鉄道路線や地域鉄道路線に所在する、平均運行間隔が約 5 分～約 50 分のいくつかの駅について、実際のダイヤの平均運行間隔  $\bar{i}$  と期待待ち時間  $E[W]$  を比較したところでは、 $E[W]$  の範囲は  $0.5\bar{i} \sim 0.7\bar{i}$  程度であり、式 (7) を満足している。

$$E[W] = \frac{1}{2} \bar{i} + \frac{1}{2\bar{i}} \cdot \bar{i}^2 = \bar{i} \quad (6)$$

$$\bar{i}/2 \leq E[W] \leq \bar{i} \quad (7)$$

$$0 \leq \text{Var}[d_k] \leq \bar{i}^2 \quad (8)$$

## 2.2 運行本数と期待待ち時間のトレードオフ

パターンダイヤの導入により、より少ない列車本数でより短い期待待ち時間を実現することも可能である。図 1 に例示する 2 駅のダイヤの運行間隔等に関する特性を表 1 に示す。一日当たりの運行本数が多く平均運行間隔が短いのは A 駅であるが、期待待ち時間がより短いのは A 駅ではなく B 駅である。これは、B 駅では昼間時間帯にパターンダイヤが導入されているなど、運行間隔の分散が小さいことによる。

A 駅		B 駅	
時	分	時	分
5	37	5	03 29
6	03 18	6	06 48
7	01 23	7	15 40
8	17 47	8	19
9	46	9	37
10	11	10	37
11	45	11	37
12	35	12	37
13	03	13	37
14	49	14	37
15	46	15	28
16	20 51	16	13 45
17	38 56	17	27
18	13 59	18	12 44
19	16 44	19	26
20	14	20	03 42
21	09 38	21	30 58
22	12	22	16 45
23	18	23	

図1 2駅のダイヤの例

表1 A駅とB駅のダイヤ特性

駅	運行本数 (本/日)	平均運行 間隔 (分)	期待待ち 時間 (分)
A 駅	27	40.8	26.5
B 駅	26	42.5	23.6

### 3. 利便性評価に関するアンケート調査

#### 3.1 調査の目的と形式

ダイヤの特性が利便性評価に与える影響を明らかにすることを目的として、特性の異なるさまざまな仮想ダイヤを被験者に提示し、その利便性評価データを取得するために調査を実施した。今回は、2つの異なる仮想ダイヤをペアとして被験者に提示し、便利であると考えどちらか一方を選択してもらう相対評価形式の調査とした(図2)。

#### 3.2 仮想ダイヤの作成

1章で述べたとおり、本研究では旅客の期待待ち時間を短縮する「列車本数の増加」と「ダイヤのパターン化」という2つの方策が利便性評価に与える影響を比較したい。そこで、「列車本数が多く平均運行間隔は短い、運行間隔の分散が大きく期待待ち時間が長い」仮想ダイヤと、「列車本数が少なく平均運行間隔は長い、運行間隔の分散が小さく期待待ち時間が短い」仮想ダイヤを組み合わせるダイヤペアを構成した(表2)。図2に例示したダイヤペアは実際に調査に用いたもので、この組み合わせ条件を満たしている。平均運行間隔と期待待ち

時間がトレードオフ関係にある2つのダイヤを組み合わせることで、平均運行間隔と期待待ち時間のどちらをより重視して利便性を評価しているかを明らかにする狙いがある。これ以降、平均運行間隔が短いダイヤを「本数重視ダイヤ」、期待待ち時間が短いダイヤを「等間隔重視ダイヤ」と呼ぶ。

仮想ダイヤは、いずれも初列車が10時00分発、終列車が16時00分発の6時間分である。仮想ダイヤの列車本数は概ね1時間あたり1本から6本であり、列車本数に応じて表2に示す通り「低頻度」「中頻度」「高頻度」の各グループに分類した。

仮想ダイヤのうち列車が完全に等間隔であるダイヤは、運行間隔が120, 72, 60, 36, 30, 18, 15(分)であるダイヤである。これらのうち平均運行間隔が60, 30, 15(分)である仮想ダイヤは、等間隔ダイヤであると同時に毎時同時刻ダイヤでもある。これ以外のダイヤは運行間隔にばらつきのあるダイヤであり、乱数を用いてランダムな運行間隔を生成し、これを発車時刻に変換することによって仮想ダイヤを作成した。

以上の処理により作成した仮想ダイヤの総数は、低頻度グループ66、中頻度グループ64、高頻度グループ63である。そして各グループ内において、「本数重視ダイヤ」と「等間隔重視ダイヤ」の組み合わせ条件を満たすダイヤペアを構成した。ペア数は、低頻度グループ282、中頻度グループ418、高頻度グループ400である。

#### 3.3 調査の実施

本調査はインターネットを活用し、調査業務はウェブ調査会社に委託した。被験者はウェブ調査会社が保有する全国の登録モニターのうち、昼間1時間あたりの運行

時	分		時	分
10	00	36	10	00 35 38
11	12	48	11	11 47
12		24	12	32
13	00	36	13	03 25 53
14	12	48	14	11 14
15		24	15	18
16	00		16	00



図2 提示したダイヤペアの例

表2 各グループにおける列車本数水準

グループ	等間隔重視ダイヤ	本数重視ダイヤ
低頻度	3・4・5・6本 (120~60分間隔)	4・5・6・7・8・9・10・11・12本 (90~30分間隔)
中頻度	10・12本 (36・30分間隔)	12・14・16・18・20・22・24本 (30~15分間隔)
高頻度	20・24本 (18・15分間隔)	24・28・32・36・40・44・48本 (15~7.5分間隔)

本数は10時台~15時台の6時間合計、運行間隔は6時間平均の値である



本数が概ね片方向6本以内である鉄道路線が通過する市区町村の居住者とした。さらに、図3に示す時刻表のサンプルの読み方が分かることをスクリーニング通過条件とした。

スクリーニング調査は2020年2月28日から3月2日にかけて実施し、21,836人の被験者がスクリーニング条件をクリアした。本調査はこれらの被験者を対象として同年3月6日から9日にかけて実施し、3,180人から最終的な回答を得た。

本調査では、ダイヤ評価に関する回答の精度をより高められるよう、各被験者の最寄り駅における列車の運行頻度に近い仮想ダイヤを提示した。具体的には、各被験者の最寄り駅における昼間1時間あたり片方向の列車本数が「1本以下」の場合には低頻度グループ、「2~3本」の場合には中頻度グループ、「4~6本」の場合には高頻度グループのダイヤペアを提示しその利便性を評価してもらった。低頻度グループの回答者数は1,042人、中頻度1,069人、高頻度1,069人であり、それぞれほぼ同数ずつの回答が得られた。

回答者の年齢・性別構成を図4に示す。今回の調査では回答者の性別・年齢構成を制御しておらず、性別構成に大きな偏りはみられないが、年齢層では40歳代と50歳代に集中している。地域鉄道の主たる利用者である高校生や高齢者<sup>10)</sup>の割合が小さく、調査結果は旅客の傾向を十分に把握できていない可能性があるが、実際には鉄道を利用していない人の評価も考慮するため、これ以降の分析ではこのデータを用いた。なお、本調査はコロナ禍が本格化する以前に実施されたものであり、得られたデータはコロナ禍後の状況を反映するものではない。

### 3.4 便利だと思ふダイヤの選択傾向

ダイヤの評価に関しては、より多くのデータを確保するため、被験者1人につき10ペアのダイヤを提示し、それぞれについて便利だと思ふ方を選択してもらった。すなわち、収集されたダイヤの評価データの総数は31,800件である。

ダイヤ評価において「等間隔重視ダイヤ」それぞれが選択された回数と、その選択割合を表3に示す。いずれのダイヤグループについても選択割合はほぼ半々である

時	下り ○○方面	時	上り ○○○方面
5	10 30 45	5	10 30 45
6	00 15 30 45	6	00 20 40
7	00 15 30 45	7	00 20 40
8	00 12 24 36 48	8	00 15 30 45
9	00 12 24 36 48	9	00 15 30 45
10	00 20 40	10	00 20 40
11	00 20 40	11	00 20 40
12	00 20 40	12	00 20 40

図3 時刻表のサンプル

ことから、利便性の評価において列車本数が絶対的な基準となっているとは言えず、旅客は平均運行間隔と期待待ち時間、換言すれば列車の本数と運行間隔のばらつきのバランスの中で利便性を評価していることが示唆される。そこで次章では、平均運行間隔と期待待ち時間を中心としたダイヤの特性に関する変数に着目して、それらがダイヤの利便性評価に与える影響をモデル構築により定量化する。

## 4. パターンダイヤの利便性評価のモデル化

### 4.1 モデル構造

モデルの基本的な構造は、提示された2つのダイヤの特性の差から一方のダイヤの選択割合を求めるロジスティック回帰モデルである。本調査において、被験者に対して提示されたダイヤペアのうち左側に表示されたダイヤを  $a$ 、右側に表示されたダイヤを  $b$  とするとき、ダイヤ  $a$  のほうが便利であると評価される確率  $P_a$  は式(9)により求められる。そして本研究ではこの  $P_a$  を、ダイヤ  $b$  を基準としたときのダイヤ  $a$  の利便性評価値であると捉える。

$$P_a = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i)]} \quad (9)$$

$P_a = 0.5$  のとき、ダイヤ  $a$  とダイヤ  $b$  の利便性は同等である。 $P_a > 0.5$  のとき、ダイヤ  $a$  の利便性はダイヤ  $b$  より高いと解釈される。

ここで、 $\beta_0$  は定数項、 $m$  は説明変数の数、 $x_i$  は  $i$  番目の説明変数のダイヤ  $a$  とダイヤ  $b$  の差分、 $\beta_i$  は説明

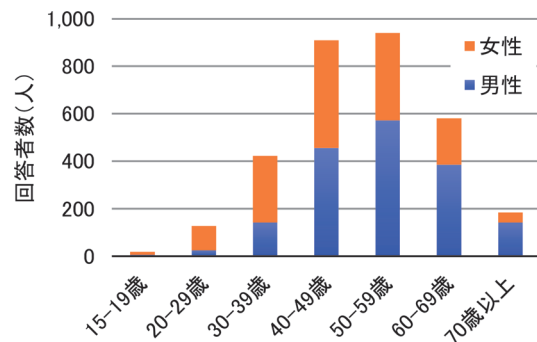


図4 回答者の年齢・性別構成

表3 「等間隔重視ダイヤ」の選択結果

グループ	回答総数	選択回数	選択割合
低頻度	10,420	5,948	57.1%
中頻度	10,690	5,463	51.1%
高頻度	10,690	5,064	47.4%



変数  $x_i$  にかかる係数である。

モデル構築は3つのダイヤグループそれぞれ別々に実施した。サンプルサイズはダイヤペア数と同じ、低頻度 282, 中頻度 418, 高頻度 400 である。なおダイヤペアによって被験者に提示された回数が異なることから、パラメータ推定においてはダイヤペアの提示回数による重みづけを行った。パラメータ推定には統計解析ソフトウェア R version 4.0.2<sup>11)</sup> に実装されている glm 関数を用いた。

#### 4.2 変数

被説明変数は前節で述べたとおり、本調査において被験者に提示されたダイヤペアのうち左側のダイヤが選択された場合に 1、そうでない場合に 0 となる二値変数である。

ダイヤの特性を表現する説明変数としては、表 4 に示す各変数を用いた。このうち運行間隔に関する変数は、本研究において当初より着目してきた平均運行間隔と期待待ち時間である。平均運行間隔は、360 (分) を 6 時間の運行本数で除した値であり、期待待ち時間は式 (5) により計算した値である。また 1 時間ごとのダイヤの周期性に関する変数として、1 時間ごとの運行本数の分散も説明変数とした。

#### 4.3 パラメータ推定結果

3つのダイヤグループそれぞれについて、表 4 に示す説明変数を用いて利便性評価結果を説明するモデルのパラメータを推定した結果を表 5 に示す。いずれのモデルにおいても、平均運行間隔と期待待ち時間の係数が有意水準 1% で統計的に有意な負の値となった。このことは、

表 4 説明変数の一覧

分類	変数	計算方法
運行間隔に関する変数	平均運行間隔 (分)	360分÷6時間の運行本数
	期待待ち時間 (分)	式(5)のとおり
1時間ごとの周期性に関する変数	時間帯別本数分散	1時間ごとの本数の分散

他の条件が同一であれば、平均運行間隔がより短いほど、あるいは期待待ち時間がより短いほど、利便性がより高いと評価される傾向にあることを示しており、現実には照らして合理的な結果である。列車の運行本数が 1 時間あたり 6 本以下であるような地域鉄道路線において、「列車本数の増加」と、より等間隔・毎時同時刻に近いダイヤとする「ダイヤのパターン化」という 2 つの方策はどちらも利便性評価の向上に寄与することが示唆される。また 1 時間ごとの周期性に関しても、時間帯別本数分散の係数が有意に負の値であることから、時間帯ごとの列車本数が揃い、1 時間の周期性を有するダイヤであるほど利便性評価が高いと評価される傾向にあると言える。

#### 4.4 モデルを活用したダイヤの利便性評価

構築したモデルにより、2つのダイヤの利便性評価を相対比較することが可能である。

一例として、図 1 に示した A と B の 2 駅のダイヤを用いる。両駅のダイヤ特性は表 1 の通りである。表 5 の中頻度モデルにこの 2 駅の特性を代入した結果、A 駅を基準とした B 駅の相対的な利便性評価値は 0.503 となった。この値は、列車本数が少ないもののより等間隔に近い B 駅におけるダイヤの利便性評価が、A 駅におけるそれをわずかに上回ることを意味する。

また、構築したモデルを用いて、地域鉄道において実際にみられる程度の運行間隔のばらつきを持つダイヤをパターン化した場合、1 日全体の運行本数や運行間隔のばらつきによっても異なるが、1 日あたり最大で 7.4 本程度列車を増発したのと同程度の利便性向上効果を得ることが明らかになった。

このように構築したモデルを応用することで、例えばダイヤ改正の検討にあたって、改正後におけるダイヤの利便性評価の事前推定や、いくつかの改正案の比較検討等を実施することが可能になるなど、実務で本手法を活用できる。

表 5 パラメータ推定結果

ダイヤ 説明変数	低頻度			中頻度			高頻度		
	係数	t 値	判定	係数	t 値	判定	係数	t 値	判定
定数項	-0.151	-7.286	***	-0.100	-5.005	***	-0.043	-2.089	**
平均運行間隔 (分)	-0.033	-17.260	***	-0.086	-19.700	***	-0.274	-28.053	***
期待待ち時間 (分)	-0.042	-13.177	***	-0.090	-13.016	***	-0.057	-4.254	***
時間帯別本数分散	-0.822	-23.429	***	-0.357	-15.685	***	-0.267	-30.922	***
観測数	282			418			400		
AIC	2,063.0			2,241.4			2,114.6		
自由度調整済み尤度比	0.341			0.206			0.389		

\*:  $\alpha=10\%$ , \*\*:  $\alpha=5\%$ , \*\*\*:  $\alpha=1\%$  でそれぞれ有意であることを示す

## 5. まとめ

本研究では、列車ダイヤに対する利便性評価に関するアンケート調査データと評価モデルの構築を通じて、列車の運行本数を増やさずとも、列車ダイヤのパターン化により旅客の利便性評価を向上できる可能性があることを示した。この知見は、地域鉄道における旅客の利便性向上を低コストに実現する取り組みに寄与できるものと考えられる。

今後は、旅客による期待待ち時間の認知や、その認知が利便性評価に与える影響、ダイヤに合わせた旅客の行動などに関するさらなるデータの収集と分析が必要である。

## 文 献

- 1) 国土交通省鉄道局：鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル（2012年度改訂版），2012
- 2) 交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会：鉄道需要分析手法に関するテクニカルレポート，2016
- 3) 高橋幸雄：やさしい待ち行列（2）一等間隔運転は待ちを減らす，オペレーションズ・リサーチ，Vol.40，No.12，pp.716-721，1995
- 4) 四国旅客鉄道株式会社：2021年3月ダイヤ改正について（ニュースリリース），[https://www.jr-shikoku.co.jp/03\\_news/press/2020%2012%2018%2002.pdf](https://www.jr-shikoku.co.jp/03_news/press/2020%2012%2018%2002.pdf)（参照日：2021年6月5日）
- 5) 中川大，長戸正二，渡邊拓也，永易雅志：地方鉄道路線のダイヤ検討とその効果に関する一考察—JR 牟岐線の事例を踏まえて—，土木計画学研究発表会・講演集，Vol.60，No.25-13，2019
- 6) 松中亮治，中川大，大庭哲治，鈴木克法：所要時間の構成に着目した地方鉄道のダイヤ分析，都市計画論文集，Vol.50，No.3，pp.358-364，2015
- 7) 加藤浩徳：スイスの都市間鉄道サービス改善に向けた取組：RAIL2000プロジェクトとその後のSBBの研究開発，運輸政策研究，Vol.9，No.2，pp.59-61，2006
- 8) Johnson, D., Shires, J., Nash, C. and Tyler, J.: Forecasting and appraising the impact of a regular interval timetable, Transport Policy, Vol.13, pp.349-366, 2006.
- 9) Wardman, M., Shires, J., Lythgoe, W. and Tyler, J.: Consumer benefits and demand impacts of regular train timetables, International Journal of Transport Management, Vol.2, pp.39-49, 2004.
- 10) 加藤博和：なぜ鉄道廃止代替バスは乗客を減らすのか？その検討プロセスが抱える問題に関する一考察，土木計画学研究発表会・講演集，Vol.31，p.129，2005
- 11) R Core Team: R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.

# 貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果の評価手法

奥田 大樹\* 渡邊 拓也\* 中川 伸吾\*  
鈴木 崇正\* 深澤 紀子\*

Evaluation Method for Implementation Effect of Disaster Countermeasures on a Freight Railway Network

Daiki OKUDA Takuya WATANABE Shingo NAKAGAWA  
Takamasa SUZUKI Noriko FUKASAWA

We developed a method for evaluating the effectiveness of disaster countermeasure implementation using two indexes: the amount of freight transported during the period when an interrupted section due to a natural disaster exists in the freight railway network, and the costs of restoration work and keeping freight transportation during the period, covered by the operator of the freight railway. The method aims to support decision-making of the operator in planning and examination of disaster countermeasures. A case study applying the developed evaluation method, showed that the method can provide appropriate evaluation results contributing to the decision-making of the freight railway operator.

キーワード：貨物鉄道ネットワーク，災害対策，評価手法，自然災害，不通区間

## 1. はじめに

自然災害が激甚化・高頻度化し、その影響で鉄道貨物輸送が長期間滞る事態がしばしば発生している。そのため、想定を超える自然災害に遭遇しても可能な限り貨物輸送を継続すること、もしくは可能な限り早期に復旧して影響を最小化すること、つまり、鉄道貨物輸送の災害レジリエンスの向上が年々重要度を増している。

このような状況の中、貨物鉄道事業者は大規模な災害を想定した事業継続計画（BCP）の策定を進めており、その一環として様々な災害対策が検討されている。しかし、災害対策に投資できる費用には限りがあり、実施にも多くの時間を要する。そのため、災害対策への投資効果を最大化するには、各災害対策の実施に関する要否判断や優先順位付け等の意思決定を、定量的な根拠に基づいて行う必要がある。

災害対策の実施効果の評価手法に関する研究はこれまでもいくつか報告されている<sup>1)2)</sup>が、これらは主に道路ネットワークに着目している。また、これらの手法の評価基準は、災害時の迂回損失・機会損失の軽減といった利用者便益や、災害発生直後の孤立エリアの発生防止といった社会的便益が中心であり、輸送を担う事業者の負担に関する視点が薄い。

以上を踏まえて本研究では、災害対策の実施等に関する貨物鉄道事業者の意思決定支援を目的として、災害によって貨物鉄道ネットワークに不通区間が発生している

期間の貨物輸送量（以後、不通時輸送量とする）、およびその期間中に発生する災害時コストと災害対策への投資コストの和（以後、総災害コストとする）に基づき、貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果を、定量的に評価する手法を構築した<sup>3)4)</sup>。災害時コストとは、被災箇所での復旧コストや、通常時と比較して増加した災害時における各種輸送関連コストの和である。

本稿では、まず、不通時輸送量と災害時コストの定量化手法と、その推計精度の検証結果について述べる。次に、定量化手法に基づく災害対策の実施効果の評価手法について概要を述べ、最後に、この評価手法を適用したケーススタディと、その結果に対する考察を述べる。

## 2. 不通時輸送量と災害時コストの定量化手法

### 2.1 貨物輸送に関する基本定義

#### 2.1.1 貨物鉄道ネットワークに関する定義

本研究における貨物鉄道ネットワークは、図1で示す

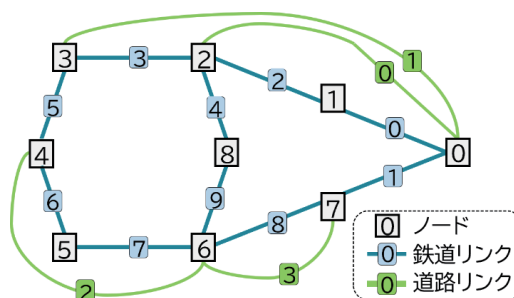


図1 貨物鉄道ネットワークの例

\* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

とおり、貨物駅や信号場を示すノードと、各ノードを結ぶ鉄道リンクで構成する。また、トラックによる代行輸送が可能な道路リンクも、一部のノード間に存在する。各ノードを結ぶ鉄道リンクと道路リンク数はそれぞれ1本以内であり、これらの長さ(km)は所与とする。

ノードと鉄道リンクが被災した場合には、後述する復旧作業が終了するまで、それらは輸送能力を失うとする。一方で、貨物鉄道ネットワークの被災状況に関わらず、道路リンクは常に通常と同じ輸送が可能とする。これは、自動車の機動性と経路選択の柔軟性による、輸送継続性の高さを考慮したものである。

### 2.1.2 貨物輸送に関する定義

貨物需要は、OD(発ノード: Origin と着ノード: Destination の組み合わせ)ごとに日々発生するとし、その値は鉄道貨物輸送で最も一般的な12ftコンテナ換算値とする。また、条件設定や計算を簡略化するために、各日の各ODにおける貨物需要は一定とし、その値は所与とする。

日々発生する貨物需要には、表1に示すいずれかの処理形態が適用されるものとする。輸送経路の一部をトラック輸送に置き換える代行輸送の場合、鉄道とトラック間での貨物の積み替えは、経路内のノード(以後、中継ノードとする)で実施されるものとする。通常時における各ODの貨物需要の輸送経路は所与とする。なお、現実には、長距離ODを中心に、輸送日数が2日以上となる経路も存在するが、本研究における輸送は全て1日で完結するものとする。

各ノードと各鉄道リンクの貨物輸送能力は、表2に示す項目で定義されるとし、いずれも所与とする。なお、現実の道路において、その交通容量が制約となってトラック輸送が不可能となる事態はほぼ発生しえないことから、道路リンクについては、通過可能な貨物量の上限を設定しないこととする。そして各ODで輸送可能な貨物量は、その経路内の発ノード、着ノード、中継ノード、および鉄道リンクの貨物輸送能力で決まり、通過ノードの貨物輸送能力は影響しないものとする。つまり、経路内で通過ノードのみが被災している場合、その経路は貨物輸送が可能である。

### 2.1.3 被災箇所の復旧作業に関する定義

被災したノードや鉄道リンクには復旧作業人工(人/日)が日々投入され、復旧作業人工の累積量(人)が復旧に必要な一定量(人)に達した被災箇所から、順次復旧するものとする。なお、わが国の貨物鉄道ネットワークにおける鉄道リンクの大半は旅客鉄道会社によって管理されていることを考慮して、ノードと鉄道リンクに投入される復旧作業人工は、それぞれ独立したものとする。

被災した各ノードと各鉄道リンクそれぞれの復旧に必要な復旧作業人工の一定量、各ノードと各鉄道リンクそれぞれに投入可能な1日当たりの復旧人工量の上限

表1 貨物の処理形態

通常輸送	通常時と同じ経路での鉄道輸送
迂回輸送	通常時とは異なる経路での鉄道輸送
代行輸送	経路の一部または全部をトラック輸送に置き換えた輸送
保管	発ノードで貨物を保管し、翌日の貨物需要に追加
返却	輸送や保管をせずに荷主へ返却

表2 各ノードと各リンクの輸送能力を定義する項目

ノード	鉄道で発送/荷受けが可能な1日あたりの貨物量(コンテナ数/日)の上限
	トラックで発送/荷受けが可能な1日あたりの貨物量(コンテナ数/日)の上限
	鉄道とトラック間で積み替え可能な1日あたりの貨物量(コンテナ数/日)の上限
	保管可能な1日あたりの貨物量(コンテナ数/日)の上限
鉄道リンク	通過可能な1日当たりの方向別の貨物量(コンテナ数/日)の上限

(人/日)、および全ノードと全鉄道リンクそれぞれに投入可能な1日当たりの復旧作業人工の総量の上限(人/日)は所与とする。

## 2.2 不通時輸送量と災害時コストの定量化アルゴリズム

### 2.2.1 定量化アルゴリズムの構成

通常時における各ODの貨物需要は全て通常輸送で処理されるが、被災した貨物鉄道ネットワークの復旧期間中における一部の貨物は迂回輸送や代行輸送で処理されるなど、通常時とは異なる貨物輸送パターンとなる。また、復旧作業が終了したノードや鉄道リンクから順次輸送能力を回復するため、これに合わせて復旧期間中の貨物輸送パターン(貨物の処理形態の組み合わせ)も日々変化する。そのため、不通時輸送量や災害時コストを定量化するには、被災後の貨物鉄道ネットワークの復旧過程と、その復旧過程下における各日の貨物輸送パターンの推計が必要となる。

### 2.2.2 貨物鉄道ネットワークの復旧過程の推計

ノードが輸送能力を失った場合、輸送ができない貨物は、そのノードが発駅もしくは着駅となっている貨物のみである。一方で鉄道リンクが輸送能力を失った場合、そのリンクを含む全ての輸送経路が輸送能力を失うため、影響が重大なものになりやすい。そこで本研究では、鉄道リンク→ノードの順に、貨物鉄道ネットワークの復旧過程を2段階で推計する。

鉄道リンクの復旧過程は、図2で示す損失輸送量の最小化を目的とした最適化計算で推計する。損失輸送量とは、復旧期間中に通常輸送ができない貨物鉄道ネットワー



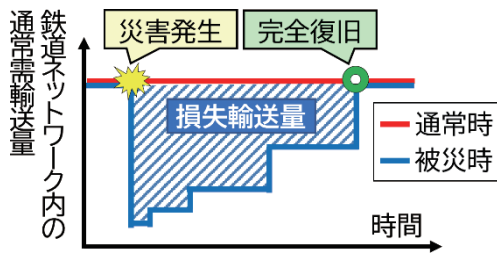


図2 損失輸送量のイメージ

ク内の貨物需要の総量を意味し、この最小化は、復旧作業の実施目的が、通常時の輸送体制への早期復帰であることを表現したものである。制約条件は、各鉄道リンクに投入可能な復旧作業人工の上限や、全鉄道リンクに投入可能な復旧作業人工の総量の上限等である。また、この時の各ノードは、通常時の輸送能力を維持しているとする。

ノードの復旧過程は、鉄道リンクの復旧過程と同じく、損失輸送量の最小化を目的とした最適化計算で推計する。制約条件は、各ノードに投入可能な復旧作業人工の上限や、全ノードに投入可能な復旧作業人工の総量の上限等である。また、この時の鉄道リンクの復旧状況は、先の推計結果に従うとする。

自然災害は、例えば大規模な停電や道路の寸断など、鉄道以外の社会インフラにも多大な被害をもたらす場合がある。そしてこのような場合には、被災箇所での復旧作業に様々な制約が発生し、貨物鉄道ネットワークの復旧過程が、損失輸送量を最小化するような理想的なものにならない可能性がある。そこで、このようなケースに対応するため、各被災箇所の復旧日を定めたシナリオ（以後、復旧シナリオとする）の設定も可能とする。復旧シナリオは、ノードと鉄道リンクのどちらか一方のみ、もしくは両方について設定可能とし、シナリオに従って各被災箇所に対して、復旧するまでに投入されるであろう復旧作業人工の累積量も設定可能とする。

### 2.2.3 復旧期間中の貨物輸送パターンの推計

前項で推計した復旧過程のとおりには貨物鉄道ネットワークが復旧するとして、復旧期間中の各日の貨物輸送パターンを推計する。復旧期間中の各日に発生する貨物需要には、表1で示したいずれかの処理形態が適用されるが、過去の災害時の輸送実績や、災害時輸送に関する貨物鉄道事業者の方針等に基づき、処理の優先度は通常輸送、迂回輸送、代行輸送、保管、返却の順とする。そして、図3に示すフローのとおりには、復旧期間中の各日の貨物輸送パターンを推計する。

まず、通常輸送ができない貨物を最大限迂回輸送しつつ、通常時と比較して追加が必要となる輸送コスト（以後、迂回コストとする）が最小となるように、復旧期間中の各日の迂回輸送パターンを推計する。通常輸送と迂回輸送の輸送コストは、輸送量、経路長、および鉄道輸送単価（円/コンテナ数・km）の積とし、鉄道輸送単価は所与とする。迂回輸送よりも通常輸送を優先するため、迂回輸送で使用可能なノードや鉄道リンクの輸送能力は、通常輸送を実施した後の余剰輸送能力であり、これが迂回輸送パターンの推計における制約条件となる。

次に、迂回輸送ができない貨物を最大限代行輸送しつつ、通常時と比較して追加が必要となる輸送コスト（以後、代行コストとする）が最小となるように、復旧期間中の各日の代行輸送パターンを推計する。代行輸送の輸送コストは、通常輸送や迂回輸送と同じ要領で求める。ただし、輸送経路内の鉄道区間と道路区間は区別し、輸送単価も鉄道とトラックで区別する。トラック輸送単価（円/コンテナ数・km）は所与とする。一般的に、トラックの輸送単価は鉄道の輸送単価よりも割高となる。

代行輸送で使用可能なノードや鉄道リンクの輸送能力は、迂回輸送を実施した後の余剰輸送能力であり、これが代行輸送パターンの推計における制約条件となる。

最後に、代行輸送ができない貨物は、その貨物の発ノー

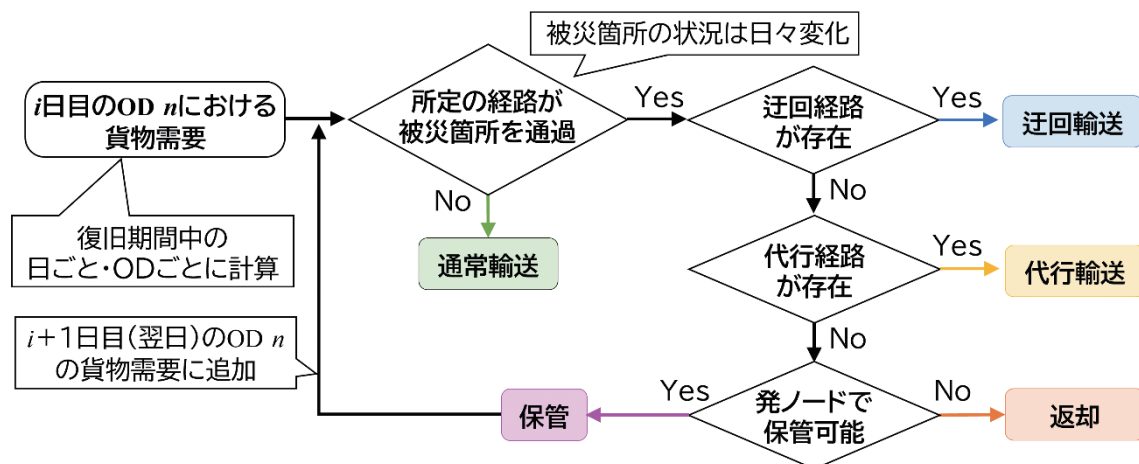


図3 貨物輸送パターンの算出フロー

ドで保管し、同 OD における翌日の貨物需要に追加する。保管コストは、保管量（コンテナ数）と保管単価（円/コンテナ数・日）の積とし、保管単価は所与とする。ただし、表2で示したとおり、各ノードには保管可能な1日あたりの貨物量の上限が設定されており、これを越えた貨物は、全て荷主に返却するものとして処理することになる。荷主への返却にはペナルティが発生するものとし、返却量（コンテナ数）と返却単価（円/コンテナ数）の積とする。返却単価は所与とする。

#### 2.2.4 不通時輸送量と災害時コストの推計

不通時輸送量は、復旧期間中の各日の通常輸送、迂回輸送、および代行輸送における貨物輸送量の和とする。災害時コストは、被災した鉄道リンクとノードの復旧コストと、復旧期間中の各日の迂回コスト、代行コスト、保管コスト、返却ペナルティの和とする。鉄道リンクとノードの復旧コストは、復旧までに投入した復旧作業人工の累積量と復旧作業人工単価（円/人・日）の積とする。鉄道リンクとノードの復旧作業人工単価は、それぞれ所与とする。

#### 2.3 定量化手法の推計精度の検証

定量化手法の推計精度を検証するために、過去の災害事例を対象として、不通時輸送量の再現シミュレーションを実施した。本シミュレーションに用いる貨物輸送実績データは、JR 貨物殿からご提供いただいた。なお、災害時コストについては実績データが存在しないため、この推計精度を直接的に検証することはできない。ただし、各被災箇所の復旧コストは、先述のとおり、投入された復旧作業人工の累積量と復旧作業人工単価の積であることから、その値は、貨物鉄道ネットワークの復旧過程や、復旧期間中の貨物輸送パターンの推計結果によって変化することはない。つまり、災害時コストの推計精度は、迂回コストや代行コスト等によって決まるものであり、これらは貨物輸送パターンの推計精度、つまり不通時輸送量の推計精度に依存すると言える。よって、不通時輸送量が精度良く推計できていれば、災害時コストも精度良く推計できていると見なせる。

本シミュレーションにおける貨物鉄道ネットワークは、図4に示すとおりである。災害の影響を直接受けていない範囲は除外したほか、オフレールステーションや小規模な貨物駅は、近傍の大規模な貨物駅に集約してネットワークの規模を縮小させた。対象とした災害事例ではノードの被災はなかったものの、鉄道リンクは複数箇所が被災しており、全てが復旧するまでには50日以上を要した。

復旧期間中の各日に発生する各 OD の貨物需要は、貨物鉄道ネットワークが被災する前2週間における、各 OD の平均貨物輸送量の実績値を充てた。なお、平均貨物輸送量は小数第一位を四捨五入して整数化するととも

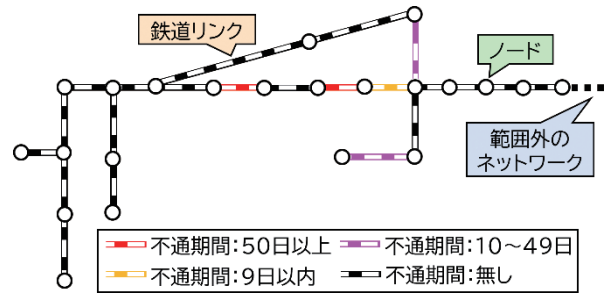


図4 再現シミュレーションにおける貨物鉄道ネットワーク

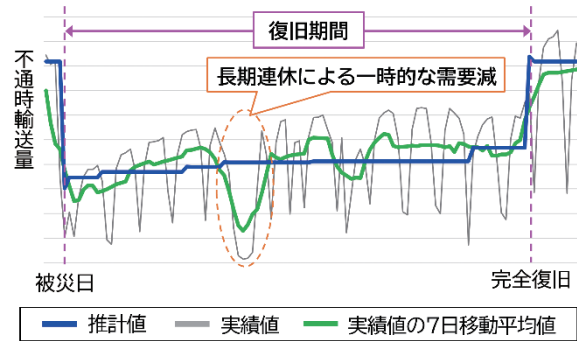


図5 再現シミュレーションの結果

に、その値が1未満となる OD は除外した。

各ノードや鉄道リンクの輸送能力については、それらを明示する資料が存在しないことから、通常時の貨物需要に十分対処可能な水準に設定した。また、各被災箇所には、実際の復旧過程に沿った復旧シナリオを与えた。

図5は、不通時輸送量の推計値と実績値を示すものである。なお、現実の貨物需要には週単位の周期性があるため、不通時輸送量の実績値にも周期性が生じる。一方で、不通時輸送量の推計においては、日々発生する貨物需要を被災前2週間の平均貨物輸送量としたため、その推計結果に周期性は生じない。そのため、不通時輸送量の推計値の精度は、周期性を平滑化した実績値の7日移動平均値（比較当日とその前後3日の平均）と比較して検証した。

図5より、推計値と実績値の7日移動平均値は、貨物需要が一時的に低下する長期連休期間を除いて概ね一致している。よって、構築した定量化手法は、良好な推計精度を有していると言える。

### 3. 災害対策の実施効果の評価手法

#### 3.1 評価手法の概要

貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の目的は、鉄道貨物輸送の災害レジリエンスの向上であり、大規模な自然災害に遭遇した場合でも、日々発生する貨物需要を滞りなく処理できることが理想と言える。また、貨物鉄道事業者の事業継続性を考える上では、災害時における

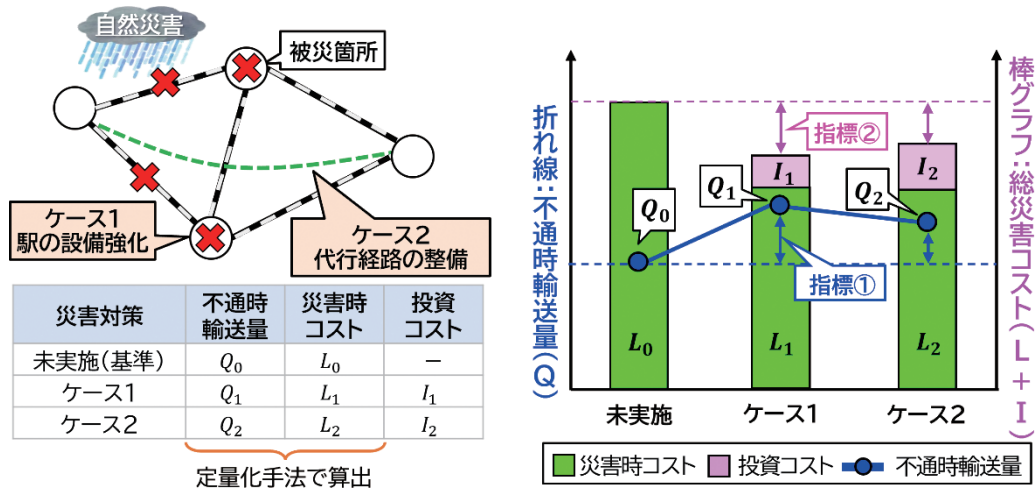


図6 災害対策の実施効果の評価

事業者の負担についても考慮が必要である。よって、不通時輸送量と、災害対策への投資コストの和である総災害コストは、災害対策の実施効果の評価指標になると考えられる。さらに、災害対策の実施効果は、その対策が実施されているケースと実施されていないケース（現状のまま）を比較して評価することが一般的である<sup>5)</sup>。

以上を踏まえて本研究では、図6に示すとおり、評価対象の災害対策が実施済みのケースと未実施のケースにおける、不通時輸送量の差分（指標①）と総災害コストの差分（指標②）を評価指標として、災害対策の実施効果を定量的に評価する。本評価手法は、貨物駅の災害耐力を向上させるための設備強化といったハード対策や、貨物輸送の冗長性を確保するためのトラック代行輸送体制の強化といったソフト対策など、幅広い災害対策を評価対象とすることが可能である。

### 3.2 災害対策の実施効果の評価に関するケーススタディ

2.3節とは異なる過去の災害事例を対象に、災害対策の実施効果の評価に関するケーススタディを実施した。

本ケーススタディにおける貨物鉄道ネットワークは、図7に示すとおりであり、2.3節と同様に、災害の影響を直接受けていない範囲は除外したほか、オフレールステーションや小規模な貨物駅は、近傍の大規模な貨物駅に集約してネットワークの規模を縮小させた。対象とした災害事例ではノードの被災はなかったものの、鉄道リンクは複数箇所が被災しており、全てが復旧するまでには2週間弱を要した。

本ケーススタディではトラック代行輸送経路の設定を評価対象の災害対策とし、図7で示したとおり、重要な貨物駅であるA駅とB駅～F駅間のそれぞれを結ぶ5区間を、災害対策の実施候補区間とした。そして、これら区間のうちの各1区間のみで災害対策が実施される

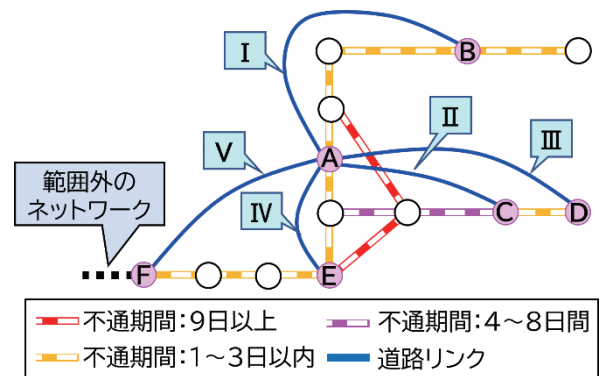


図7 ケーススタディにおける貨物鉄道ネットワーク

ケースI～ケースVの5ケースについて、それぞれ実施効果の評価した。

各災害対策実施ケースと未実施ケースの不通時輸送量と災害時コストを推計するにあたっての各種条件は、2.3節と同様に定義した。本ケーススタディに用いる災害時の貨物輸送実績データも、JR貨物殿からご提供いただいた。鉄道輸送単価等の各種単価は、鉄道統計年報<sup>6)</sup>やJR貨物の鉄道営業費に占める動力費の割合等に基づき設定した。また、各災害対策ケースにおいて、利用可能なトラック台数（各ノードにおいてトラックで発送/荷受けが可能な1日あたりの貨物量）は制限が無いものとした。

トラック代行輸送経路の設定はソフト対策であり、大規模な設備投資を必要としないため、本対策における投資コストの主な構成項目は、トラックの手配に関するコストと人件費などの諸経費が考えられる。ただし、代行輸送で用いられるトラックの大半はリースであり、そのリース料はリース期間によって異なる。よって、リース料、つまりトラックの手配に関するコストは、代行コストの一つとしてトラック輸送単価に反映することとした。また、本ケーススタディにおけるトラック代行輸送



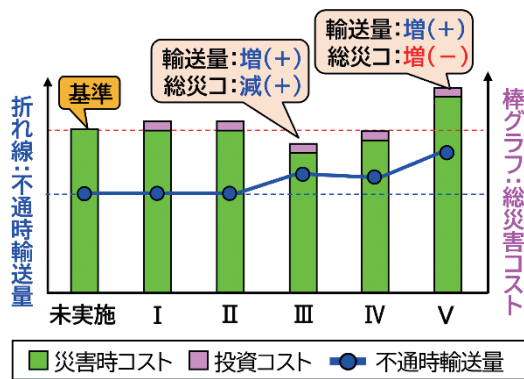


図8 ケーススタディの評価結果

の実施期間は最長で2週間弱であるため諸経費は微少額と考えられるほか、各ケースにおける額も大きく変わらないと考えられる。よって、各ケースにおける諸経費、つまり投資コストは、一般的な人件費の単価に基づきつつ、災害時コストと比較して十分に小さく評価結果に影響を与えない額、かつ定額として計上することとした。

各ケースにおける不通時輸送量と総災害コストの推計結果は、図8に示すとおりである。まず、不通時輸送量については、ケースⅢ、ケースⅣ、およびケースⅤにおいて未実施ケースから改善（輸送量が増加）されており、その中でもケースⅤの改善度合いが最大となった。よって、災害時における貨物輸送能力の維持のみを考えた場合には、ケースⅤが最善の災害対策と言える。しかし、総災害コストについては、ケースⅤは未実施ケースより増加しており、貨物鉄道事業者の事業継続性の維持も考えた場合には、最善の災害対策とは言えない。長距離かつ多くの貨物が輸送されるA～F駅間に対して、鉄道輸送よりも単価が高いトラック輸送によって輸送量の最大化を図ったことが、このような結果になったと理由と考えられる。

未実施ケースと比較して不通時輸送量と総災害コストの両方が改善するのはケースⅢのみであり、貨物輸送能力の維持と事業継続性の維持の両面を考えた場合、ケースⅢが最善かつ唯一の有効な災害対策と言える。

以上より、構築した災害対策の実施効果の評価手法は、災害対策の要否や実施の優先順位の設定等に関する貨物鉄道事業者の意思決定に対して、有益な情報を提供できると言える。

#### 4. おわりに

本研究は、災害対策に関する貨物鉄道事業者の意思決定支援を目的として実施し、以下の成果が得られた。

- ・ 貨物鉄道ネットワークの被災条件や貨物輸送能力等に基づいて、貨物鉄道ネットワークの復旧過程と、その復旧過程下における各日の貨物輸送パターンを推計し、これら結果から、不通時輸送量と災害時コ

ストを定量化する手法を構築した。

- ・ 構築した定量化手法を過去の災害事例に適用した不通時輸送量の再現シミュレーションによって、本手法が良好な推計精度を有することを確認した。
- ・ 災害対策が実施済みのケースと未実施（現状のまま）のケースにおける不通時輸送量と総災害コストの差分を指標として、災害対策の実施効果を定量的に評価する手法を構築した。
- ・ 構築した評価手法を用いたケーススタディを実施し、本手法が、災害時における貨物輸送能力の維持と事業継続性の維持の両面から、災害対策の実施効果について妥当な評価が行えることを確認した。

今後の取り組みや課題は以下のとおりである。

- ・ 災害対策の実施効果の評価について、より正確かつ実態に即した結果が得られるように、考慮可能な被災条件や貨物鉄道ネットワークに関する諸条件の詳細化を進める。
- ・ 災害対策は中長期にわたって効果を発揮することが期待されるものであることから、将来における一定期間内に発生が想定される全ての自然災害を対象として、災害対策の実施効果が評価できるように、評価手法の拡張を進める。
- ・ 評価に関する一連の計算を自動化するために、構築した評価手法を実装したシステムの開発を進める。
- ・ 旅客輸送を対象とした災害対策の実施効果の評価が行えるように、評価手法の拡張を図る。

#### 文献

- 1) 村木康行, 高橋清, 家田仁: 利用者便益から見た全国幹線交通ネットワークの耐震信頼性評価と耐震性向上による影響分析, 土木計画学研究・論文集, No.16, 1999
- 2) 原田剛志, 小野剛史, 倉内文孝, 高木朗義: 道路ネットワーク防災機能の便益評価に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol.73, No.2, pp.109-123, 2017
- 3) 奥田大樹, 中川伸吾, 渡邊拓也, 鈴木崇正, 深澤紀子: 鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果の評価手法(その1) - 災害時の鉄道ネットワークの貨物輸送量と事業者負担の定量化手法 -, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会講演概要集, 2022
- 4) 渡邊拓也, 奥田大樹, 中川伸吾, 鈴木崇正, 深澤紀子: 鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果の評価手法(その2) - 評価手法の概要とケーススタディ -, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会講演概要集, 2022
- 5) 国土交通省: 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針(共通編), 2009
- 6) 国土交通省: 鉄道統計年報, [https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_tk2\\_000045.html](https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000045.html), 2016. (参照日: 2022年7月21日)



# 都市鉄道における鉄道路線イメージと 沿線居住意向の関係の定量化

渡邊 拓也\* 深澤 紀子\* 奥田 大樹\* 鈴木 崇正\*

## Quantification of Relationship between Image of Urban Railway Services and Residential Location Preference

Takuya WATANABE Noriko FUKASAWA Daiki OKUDA Takamasa SUZUKI

Railway operators are endeavoring to improve the people's image of their services in order to gain more residents nearby. However, there are no studies focusing on the relationship between image of railway services and residential location preference in urban areas. In this study, a questionnaire survey on urban railways was conducted. We applied factor analysis to the collected data, and aspects of the image were integrated into four categories. Next, we developed a regression model to quantify the relationship between categories of image aspects and residential location preference. The model enables railway operators to improve residential location preference in terms of image of their services.

キーワード：都市鉄道，鉄道路線イメージ，居住意向，アンケート調査，因子分析

### 1. はじめに

人口減少が深刻化するわが国の鉄道事業者が今後も安定的に需要を獲得するには、人々がその沿線に居住することに価値を感じるような鉄道路線を創り、沿線居住者の維持・増加を図る必要がある。このような観点から、鉄道事業者は新駅設置や新型車両の投入などの設備投資をはじめ、ダイヤ改正による利便性の向上など多岐にわたる輸送サービス向上施策を実施している。

その一方で、不動産・住宅サイトによる「住んでみたい鉄道路線沿線」に関する調査<sup>1)</sup>によれば、必ずしも輸送サービスの充実度合いのみが転居先の意向の強さを反映しているわけではなく、路線の持つブランドやイメージなども影響していると考えられる。実際に、大手民間鉄道事業者の多くが自社線の沿線価値を向上させるために、自社のブランド力強化に取り組んでいる<sup>2)</sup>。

また、都市や地域への居住地選択の観点では、その都市や地域のイメージが居住意向に影響を及ぼしていることを定量的に示す既往研究<sup>3)4)</sup>が存在している。しかし、鉄道路線の持つブランドやイメージと、居住意向の関係について考察した研究は見当たらない。

そこで本研究では、鉄道路線が路線ごとに持つイメージと各沿線の居住意向に着目し、それらの関係性について考察を行った。具体的には、どの鉄道路線の沿線かという観点が居住地選択に影響を及ぼしやすいと考えられる首都圏や関西都市圏の都市鉄道を対象に、鉄道路線のイメージや沿線居住意向に関するアンケート調査を実施

し、沿線居住意向に影響を及ぼすイメージについて、統計分析やモデル構築を通して定量的な考察を行った。

なお、本研究においては、ある路線の沿線居住者がその路線の沿線に住み続けたいかどうかを示す「居住継続意向」と、ある路線の沿線居住者以外がその路線の沿線に転居したいかどうかを示す「転居意向」を合わせて、鉄道路線の「沿線居住意向」と定義する。

### 2. アンケート調査によるデータ収集

#### 2.1 調査項目と調査方法

調査では、被験者に対していくつか具体的な鉄道路線を提示し、「その路線のイメージ」と「その路線の沿線への居住経験の有無」を尋ねた。次に、現在その路線の沿線に居住している被験者には居住継続意向を、その路線の沿線に居住経験のない被験者にはその路線の沿線への転居意向を尋ねた。これにより、さまざまな路線のイメージとその路線の沿線への居住意向の関係性に関するデータを収集した。なお、これら項目に加え、性別・年齢などの個人属性についても調査した。

鉄道路線の持つイメージを調査するにあたり、今回は Semantic Differential 法 (SD 法) を採用した。SD 法は、意味が対になる形容詞を用いた多数の評価尺度により、人間が様々な事象に対して抱く意味やイメージを測定する方法であり、都市や地域のイメージ<sup>5)6)</sup>にとどまらず、人格、言語、知覚など幅広い分野への適用事例がある<sup>7)</sup>。今回は広範囲にわたる被験者の確保が比較的容易であり、調査方法も適している web アンケート調査を活用して、被験者に鉄道路線の特徴を表現する形容詞対を提示

\* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

することで、その路線のイメージを把握することとした。

## 2.2 調査対象路線

被験者に提示した路線は、関西都市圏および首都圏に実在する鉄道路線である。正式名称だけではなく、「JR琵琶湖線」「東武アーバンパークライン」のような路線愛称名や、「新快速」のような列車名称、「湘南新宿ライン」のような直通サービスの名称についても、イメージがある程度浸透しており被験者が評価可能であると考えられるものについて被験者に提示することとした。以下、これら正式名称、路線愛称、列車名称、直通サービス名称をまとめて「路線」と表記する。提示した路線数は、首都圏 21 路線、関西都市圏 56 路線の合計 77 路線である。主要 JR 線・民鉄線の主要幹線、観光色の強い路線や新交通、路面電車など様々な特色を持った路線を、数路線ずつ対象とした。対象とした主な路線を表 1 に示す。

## 2.3 提示する形容詞対

被験者に提示した形容詞対は、速達性や車内環境など鉄道路線そのものの特徴を想起させる語句とし、その特徴が多岐にわたるように 33 対を設定した。被験者には、各路線に対して、33 の形容詞対ごとのあてはまり度合いについて、5 段階評価で回答を求めた。調査における形容詞対の提示の順番はランダムとした。

## 2.4 調査対象者

アンケート調査の実施は web 調査会社に委託した。被験者は、その web 調査会社に登録されているモニターのうち、下記のスクリーニング条件に合致する人とした。

今回の実施では鉄道路線のイメージを尋ねていることから、鉄道が身近にあることが好ましい。また居住意向を回答するにあたっては、居住場所に関する意思決定権を有している人であることが望ましい。

そこで今回は、77 の調査対象路線が通過する 194 市区町村に居住していること、鉄道を年数回程度以上利用すること、職業が学生でない 20~69 歳であること、の 3 条件をスクリーニング条件とした。

表 1 主な調査対象路線

地域	主な調査対象路線
首都圏	JR 山手線, JR 中央線, JR 宇都宮線, 湘南新宿ライン, 東武伊勢崎線, 小田急線, 京王井の頭線, 東京メトロ南北線, 都電荒川線, 多摩都市モノレール
関西都市圏	JR 大阪環状線, JR 東海道本線, JR 神戸線, 新快速, 京阪本線, 阪急宝塚線, 阪神本線, 大阪メトロ堺筋線, 京福電鉄(嵐電), ポートライナー

## 2.5 各被験者への路線の割り当て

対象路線ごとのサンプルサイズを確保するため、一人の被験者に複数の路線についてのイメージの回答を求めた。被験者の回答負担を考慮して、被験者一人あたりの路線数は 5 路線とした。

路線イメージは、各被験者のその鉄道路線沿線への居住経験に影響を受けることが想定される。そこで、各被験者に対して、その被験者が現在居住している市区町村を通過するか、通過しなくともその付近を通る路線から 2 路線、居住する市区町村より遠方の路線から 3 路線の合計 5 路線を割り当てた。居住自治体別の目標サンプル数は、路線別の目標サンプル数なるべく均等になるように決定した。ただし、面積の広い市区町村などにおいて、鉄道路線がその市区町村を通過していながら被験者がその沿線に居住していると認識していないことも考えられることから、その認識に関する質問も設けた。

## 2.6 調査の実施と回答の収集

スクリーニング調査は 2020 年 2 月 28 日から 3 月 5 日にかけて実施し、16,076 人がスクリーニングを通過した。本調査は同年 3 月 10 日から 12 日にかけて実施し、6,687 人から回答を得た。回答者の性・年齢階層と職業

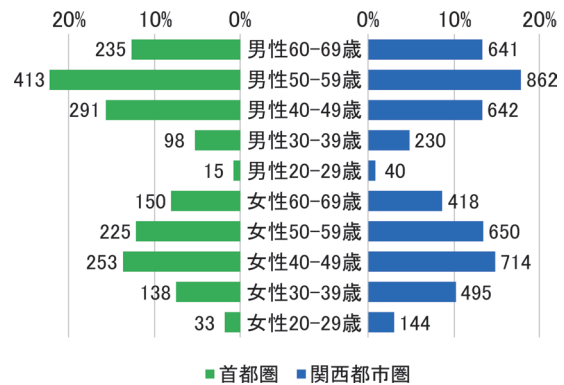


図 1 被験者の性・年齢階層別人数

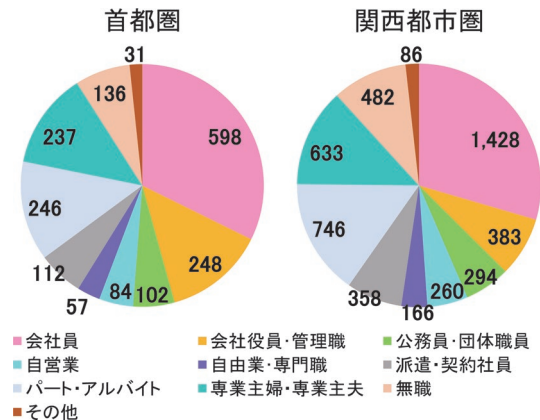


図 2 被験者の職業別人数

の内訳についてそれぞれ図1, 2に示す。関西都市圏と首都圏で、被験者の構成に大きな違いは見られなかった。

各被験者には5路線のイメージ評価を実施したため、イメージ評価の取得サンプルサイズは33,435 (= 6,687 × 5)である。路線ごとのサンプルサイズは最少で386サンプル、最多で500であり、大きな偏りなくどの対象路線も十分にサンプルを確保できた。

### 3. 因子分析による路線イメージの抽出

#### 3.1 分析の方法

路線イメージは、路線に対する理解の程度によって異なると考えられる。そこで、2.3節で説明した33形容詞対の評価が全て同じ回答になっているサンプルを除外した上で、対象路線沿線への居住経験の有無の回答により、沿線居住経験のない路線に対する評価データ16,353件、現在居住している沿線に対する評価データ4,610件を別々に抽出した。それぞれのグループで、77路線について33形容詞対ごとの平均値を算出し、因子分析を適用した。因子分析の条件は、因子軸の回転はバリマックス回転とし、初期解は最尤法により算出した。分析には、統計ソフトウェアR (64 bit) version 4.0.3<sup>8)</sup>と、因子分析の計算パッケージpsych version 2.1.6<sup>9)</sup>を用いた。

#### 3.2 沿線への居住経験がない路線に対する評価

##### 3.2.1 因子負荷量の算出と因子の命名

沿線への居住経験がない路線に対するイメージ評価

データ16,353件に対して、因子分析を適用した。因子の数は、スクリープロットを参考に4とした。各因子がデータ全体をどれだけ説明しているかを示す寄与率の、4つ目の因子までの合計(累積寄与率)は87.8%に達し、データが4つの因子で十分に説明出来ていると言える。各形容詞対において最大の因子負荷量を示す因子を、因子ごとにまとめた結果を表2に示す。因子負荷量とは、各形容詞対が各因子に与える影響の強さを示した値である。表中の各因子の形容詞対は因子負荷量の絶対値が大きな順に掲載し、各対では左側の語が、各因子に対して正の影響を与える語として表記した。

各因子に関する形容詞対の因子負荷量を参考に、各因子の指し示す意味内容の解釈を行った。第一因子であるA1は「高級な-低級な」「庶民的な-貴族的な」などの高級感を表す形容詞対や「危険な-安全な」「信頼できる-信頼できない」などの安心感を表す形容詞対の因子負荷量が高いため、【高級・安心度】と命名した。第二因子であるA2は、「スピード感のある-スピード感のない」「速い-遅い」などの疾走感を表す形容詞対や、「地味な-派手な」「ごみごみした-整然とした」などの洗練された感じを表す形容詞対の因子負荷量が高いため、【疾走・洗練度】と命名した。第三因子であるA3は「陽気な-陰気な」「明るい-暗い」といった形容詞対の因子負荷量が高いため【活発度】と命名した。最後に第四因子であるA4は「若々しい-成熟した」「自然の-人工の」などの形容詞対の因子負荷量が高いため【下町度】と命名した。

表2 居住経験のない路線に対する評価の因子分析の結果

抽出された因子	A1:「高級・安心度」因子	A2:「疾走・洗練度」因子
各因子で最大の因子負荷量を示した形容詞対の一覧	高級な-低級な 清潔な-不潔な 貴族的な-庶民的な 高価な-安価な 格式のある-気取らない 道徳的な-不道徳的な 手の届かない-手頃な お洒落な-野暮ったい 安全な-危険な 落ち着いた-落ち着きのない 信頼できる-信頼できない 気の利いた-気が利かない	慌ただしい-のんびりした きびきびした-のんびりした 密な-疎な スピード感のある-スピード感のない 速い-遅い 賑やかな-寂しい 鋭い-鈍い ごみごみした-整然とした 派手な-地味な 豊富な-不足した 殺伐とした-和やかな
寄与率	0.312	0.288
抽出された因子	A3:「活発度」因子	A4:「下町度」因子
各因子で最大の因子負荷量を示した形容詞対の一覧	陽気な-陰気な 開放的な-閉鎖的な 明るい-暗い 個性的な-画一的 軽い-重い 刺激的な-退屈な	人情味のある-無機質な 成熟した-若々しい 自然の-人工の 親切な-不親切な
寄与率	0.176	0.102



表3 転居意向に関する回帰分析の結果

説明変数	係数	t 値
(切片)	3.7053**	291.822
A1:高級・安心度	0.1429**	11.139
A2:疾走・洗練度	0.1337**	10.384
A3:活発度	0.0972**	7.494
A4:下町度	0.0704**	5.331

\*\* :有意水準 0.05 で有意  
自由度調整済み決定係数: 0.8154

### 3.2.2 各路線の因子得点と転居意向の関係

各路線の居住意向に影響を及ぼす因子について明らかにするため、抽出した4つの因子の因子得点を算出する。因子得点は、77路線に対する各因子の評点であり、例えばある路線がどの程度の「高級・安心度」を持っているか、「下町度」を持っているかなどを定量化した値である。因子得点の求め方には様々なものがあるが、今回は回帰法を用いる。回帰法による因子得点の算出は、路線数を  $n$ 、因子数を  $c$ 、形容詞対の数を  $m$  としたとき、因子得点行列  $F$  (大きさ  $n \times c$ )、データ行列  $X$  ( $n \times m$ )、形容詞対に関する相関行列  $R$  ( $m \times m$ )、因子負荷行列  $A$  ( $m \times c$ ) とすると、 $F=X \cdot R^{-1} \cdot A$  で求めることが出来る。

各路線への転居意向に影響を及ぼす因子について明らかにするため、転居意向を各因子の因子得点で説明する重回帰分析を行った。その結果を表3に示す。転居意向は、1が「とても住みたい」、5が「全く住みたくない」の5段階で被験者に調査した数値を、77路線ごとに平均した値として分析に用いた。

回帰分析の結果によれば、切片が3.71であり、どちらかと言うと平均的には「住みたくない」寄りの評価となっている。これは、沿線への居住経験がない路線に対する評価であるため、そもそも今の居住地から転居する見込みがないために「住みたくない」寄りの評価をした回答者が多くいることに依ると考えられる。

各説明変数の係数および切片は有意水準 0.05 で全て有意となり、構築した回帰モデルのあてはまりの良さを示す自由度調整済み決定係数も 0.8154 で、説明力の高い回帰式が構築できている。説明変数とした77路線の因子得点は平均0、分散はほぼ1に規格化されているため、係数の絶対値を比較することによって、居住意向への影響の大きさを評価することが可能である。高級・安心度、疾走・洗練度の係数の絶対値が大きく0.13~0.14程度で、続いて活発度、下町度の順に影響が大きい。

### 3.3 現在沿線に居住している路線に対する評価

#### 3.3.1 因子負荷量の算出と因子の命名

現在沿線に居住している路線に対するイメージ評価4,610件に対して、因子分析を適用した。因子の数は、スクリープロットを参考に4とした。4つ目の因子までの累積寄与率は77.5%に達し、データが4つの因子で十分に説明出来ていると言える。各形容詞対において最大の因子負荷量を示す因子を、因子ごとにまとめた結果を表4に示す。

各因子に関する形容詞対の因子負荷量を参考に、各因子の指し示す意味内容の解釈を行った。第一因子である

表4 現在居住している路線に対する評価についての因子分析の結果

抽出された因子	B1:「洗練・活発度」因子	B2:「安心度」因子
各因子で最大の因子負荷量を示した形容詞対の一覧	陽気な-陰気な 開放的な-閉鎖的な 賑やかな-寂しい 刺激的な-退屈な 明るい-暗い 密な-疎な 派手な-地味な 豊富な-不足した 個性的な-画一的 軽い-重い	親切な-不親切な 落ち着いた-落ち着きのない 道徳的な-不道徳的な 和やかな-殺伐とした 安全な-危険な 清潔な-不潔な 気の利いた-気が利かない 整然とした-ごみごみした 信頼できる-信頼できない
寄与率	0.229	0.191
抽出された因子	B3:「高級/下町度」因子	B4:「疾走度」因子
各因子で最大の因子負荷量を示した形容詞対の一覧	貴族的な-庶民的な 高価な-安価な 格式のある-気取らない 手の届かない-手頃な 高級な-低級な お洒落な-野暮ったい 無機質な-人情味のある 若々しい-成熟した	速い-遅い スピード感のある-スピード感のない きびきびした-のんびりした 慌ただしい-のんびりした 鋭い-鈍い 人工の-自然の
寄与率	0.178	0.178



B1は「地味な－派手な」「退屈な－刺激的な」などの洗練された感じを表す形容詞対や、「陽気な－陰気な」「明るい－暗い」といった形容詞対の因子負荷量が高いため【洗練・活発度】と命名した。第二因子であるB2は、「危険な－安全な」「落ち着いた－落ち着きのない」などの安心感を表す形容詞対の因子負荷量が高いため、【安心度】と命名した。第三因子であるB3は「庶民的な－貴族的な」「手頃な－手の届かない」といった高級感を表す形容詞対や、「無機質な－人情味のある」「若々しい－成熟した」といった下町の雰囲気や醸す形容詞対の因子負荷量が高いため【高級・下町度】と命名した。最後に第四因子であるB4は「スピード感のある－スピード感のない」「のんびりした－きびきびした」などの疾走感を表す形容詞対の因子負荷量が高いため、【疾走度】と命名した。

### 3.3.2 各路線の因子得点と居住継続意向の関係

抽出した4つの因子の因子得点を算出し、居住継続意向を各因子の因子得点で説明する重回帰分析を行った。その結果を表5に示す。居住継続意向は、1が「とても住み続けたい」、5が「全く住み続けたくない」の5段階で被験者に調査した数値を、77路線ごとに平均した値として分析に用いた。

回帰分析の結果によれば、切片が2.18であり、平均的には「住み続けたい」寄りの評価となっているが、沿線に現在居住している人に対して行っている調査であることから、整合性のとれた妥当な結果であると言える。

各説明変数の係数および切片は、【B3：高級・下町度】を除き、有意水準0.05で有意であった。自由度調整済み決定係数は0.4809であり、前項の表3に示した、沿線への居住経験がない路線に対する評価についての因子得点と転居意向の関係についての回帰分析で得られた自由度調整済み決定係数0.8154と比較すると小さい値であった。係数の最も大きな説明変数は洗練・活発度で、それに続いて、安心度と疾走度が同程度であった。

### 3.4 因子分析・重回帰分析の結果についての考察

まず、因子負荷量と抽出された因子について、居住経験の有無による違いを考察する。表2に示した沿線への居住経験がない路線に対する評価への因子分析の結果と、表4に示した現在沿線に居住している路線に対する評価への因子分析の結果を比較すると、居住経験のない路線の結果で【A1：高級・安心度】を構成している形容詞対が、現在居住している路線の結果では【B2：安心度】、【B3：高級・下町度】と2つの因子に分かれて集約されていることが見て取れる。同様に、【A2：疾走・洗練度】を構成している形容詞対は、【B4：疾走度】、【B1：洗練・活発度】と異なる因子に集約されている。これらのことは、居住経験の有無により、路線に抱くイメージ

表5 居住継続意向に関する回帰分析の結果

説明変数	係数	t値
(切片)	2.1824**	112.184
B1:洗練・活発度	0.1173**	5.886
B2:安心度	0.0896**	4.465
B3:高級・下町度	0.0290	1.454
B4:疾走度	0.0804**	4.042

\*\* :有意水準0.05で有意  
自由度調整済み決定係数:0.4809

の集約の傾向が異なることを示唆するものである。

続いて、表3、5で示した居住意向を路線イメージの因子で説明した重回帰分析の結果を比較する。居住経験のない路線の結果では、居住意向に最も大きく影響を及ぼす説明変数は【A1：高級・安心度】であった一方で、現在居住している路線の結果では、【B3：高級・下町度】は有意でない説明変数であり、【B1：洗練・活発度】が最も大きく影響を及ぼす説明変数であった。居住経験のない路線の結果で、最も影響を及ぼす「高級」に関する説明変数が現在居住している路線の結果では有意ではないことから、人が路線に抱く高級感、路線沿線に居住経験のない人にとっては転居意向を高めるものであるが、既に路線沿線に居住している人にとっては居住継続意向を高めるものではないことがわかる。このことを鉄道事業者が取るべき施策に置き換えると、高級なイメージを自社路線に根付かせることが出来たとしても、現在自社路線沿線に居住していない人を呼び込むための有効な施策にはなり得るが、既に居住している人に対して継続して住んでもらうための有効な施策にはならないということである（もちろん高級なイメージが安心感を惹起して、それが居住継続意向を高めることにつながることは十分に考えられる）。このように、居住意向に影響を及ぼすイメージが、居住経験の有無によって異なる可能性が示唆され、現在沿線に居住している人に対して沿線への居住を継続してもらうためのイメージアップと、現在沿線に居住していない人に対して沿線への居住を呼びかけるためのイメージアップでは、方向性が異なることが明らかになった。

また、推定した回帰式の自由度調整済み決定係数を比較すると、居住経験のない路線の結果では0.8154と大きな値であったのに対し、現在沿線に居住している路線の結果では0.4809とそれほど大きな値ではなかった。このことは、路線沿線に現在居住している人にとっては、路線の実態を理解しているが故に、路線に抱くイメージ以外にも居住意向に影響を及ぼす要素が大きいことの証左といえる。

さらに、路線の名称自体がイメージに影響を及ぼす可能性が示唆された。例として、沿線への居住経験がない路線についての【A2：疾走・洗練度】の因子得点の抜

表6 【A2：疾走・洗練度】に関する因子得点の抜粋

分類	路線名	因子得点
正式名称	東武野田線	-1.254
愛称	東武アーバンパークライン	-0.887

粹を表6に示す。同じ路線である東武野田線と東武アーバンパークラインの因子得点を比較すると、正式名称である前者と比較し、愛称である後者のほうが因子得点が大きくなっている。表3で示したように、【A2：疾走・洗練度】の因子得点が大きいほど、転居意向は有意に高いため、【A2：疾走・洗練度】の観点では、愛称を付けることによって、速く、洗練されたイメージを形成させ、居住意向を向上させることに成功していると考えられる。以上のように、路線名が形作るイメージを変化させることで、居住意向を高め、沿線への転居・居住継続を推進することが可能になると考えられる。

### 3.5 成果の活用例

3.2.2項で示したように、各因子分析の結果から、調査対象とした各路線の因子得点を算出することができる。因子得点は、各因子の反映するイメージを各路線がどれだけ持っているかを定量化した値であり、例えば【A1：高級・安心度】の因子得点の上位路線であれば、「高級・安心度」を強く抱かれている路線と解釈できる。

【A1：高級・安心度】の因子得点の上位路線には、ある特定の鉄道事業者、または特定の地域を通る路線が多く含まれていることが分析結果から明らかになっており、各因子得点の上位路線には明確な傾向がある。自社路線の持つ現在のイメージを把握した上で、各因子得点の上位路線の持つイメージに自社路線のイメージを近づけるような施策を行うことにより、鉄道事業者は自社路線の沿線居住意向を高めることが可能になる。

## 4. まとめと今後の課題

本研究では、都市鉄道の路線イメージに関するwebアンケート調査によって得られたデータに対して因子分析を適用し、路線沿線への居住経験によって、異なる路線イメージの因子が抽出されることを示した。その結果、居住経験の有無により、路線に抱くイメージの集約の傾向が異なることが示唆された。また、webアンケート調査によって得られた居住意向のデータと、因子分析で抽出した路線イメージの因子による重回帰分析を行い、居住意向を路線イメージの因子で説明するモデルを構築した。その結果、居住意向に影響を及ぼすイメージが、居住経験の有無によって異なる可能性が示唆された。

冒頭で述べた通り、居住意向を向上させる要因について検討するのは、鉄道路線の沿線居住者の増加・維持を

図るための施策立案を見据えたものである。モデル構築によって、居住意向と路線イメージの関係を定量化したことにより、自社沿線路線の居住意向を高めるために必要な路線イメージやイメージアップ施策の方向性について、鉄道事業者がより定量的に把握できるようになった。

最後に本研究の課題について述べる。本研究では、居住意向に影響を及ぼす鉄道路線のイメージについてモデルを構築し、定量的な関係を示すことが出来たが、今回構築したモデルで説明変数とした各因子の示すイメージはあくまで定性的なものである。例えば、各路線の疾走度の因子得点は、各路線の表定速度など客観的な指標に基づく値ではない。表定速度の上昇と沿線居住意向変化の関係など、各路線のイメージを変化させる具体的な要因を明らかにすることで、鉄道事業者の施策への活用が可能になる。

## 文 献

- 1) 株式会社リクルート住まいカンパニー：プレスリリース「SUUMO 住みたい街ランキング 2021 関東版」：<https://www.recruit.co.jp/newsroom/recruit-sumai/press/2021/03/suumo2021.html>(参照日：2022年7月4日)
- 2) 田中絢人, 高見沢実：大手民間鉄道事業者による沿線価値向上に向けた取り組みに関する研究, 都市計画報告集, No.8, pp.213-216, 2010
- 3) 久隆浩：居住地に対するイメージ調査と満足度調査の比較, 都市計画論文集, Vol.19, pp.187-192, 1984
- 4) 松下岳史, 木附晃実, 馬奈木俊介：高齢者の居住地選択の要因分析, 土木学会論文集D3, Vol.75, No.5, pp.I\_347-I\_352, 2019
- 5) 土井勉, 西井和夫, 木内徹：鉄道沿線イメージの空間配置に関する評価方法－形容詞対による評定尺度データを用いて, 都市計画論文集, Vol.31, pp.601-606, 1996
- 6) 玉井泰子, 加藤久晶, 山内陸平：都市における地域イメージの構造に関する研究－関西私鉄沿線を対象として, 日本デザイン学会研究発表大会概要集, Vol.47, pp.188-189, 2000
- 7) 井上正明・小林利宣：日本におけるSD法による研究分野とその形容詞対尺度構成の概観, 教育心理学研究, Vol.33, No.3, pp.253-260, 1985
- 8) R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing,” R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria : <https://www.r-project.org/> (参照日：2022年7月4日)
- 9) Revelle, W., “psych version 2.1.6.” : <https://cran.r-project.org/web/packages/psych/index.html> (参照日：2022年7月4日)

鉄道総研報告 月別掲載目次一覧表

第36巻 第1号 (2022年1月)〔人間科学〕		著者名
展望解説		
1	鉄道における最近の人間科学研究	水上直樹
特集論文		
1	レジリエンスの実現のための職場活動評価手法	宮地由芽子, 他
2	生理指標を活用した運転士の心身状態の推定	中川千鶴, 他
3	カスタマーエクスペリエンスに基づく鉄道における総合快適性の評価	中川千鶴, 他
4	マイクロバイーム解析を用いた列車内の環境衛生評価のための基礎研究	吉江幸子, 他
5	駅での利用者トラブルの発生メカニズムと対応方法	岡田安功, 他
6	音声と遮断開始タイミングによる踏切警報中の歩行者の進入防止策	鍋木俊暁, 他
第36巻 第2号 (2022年2月)〔車両技術〕		著者名
展望解説		
1	車両技術に関する最近の研究開発	山本貴光
特集論文		
1	周期解計算手法を用いた蛇行安定性解析	山長雄亮
2	床下機器弾性支持質量の違いによる車体弾性振動低減効果の検証	相田健一郎, 他
3	車軸の超音波探傷における反射点のずれによる影響の評価	牧野一成
4	鉄道車両におけるモニタデータを用いた機器の異常検知	横内俊秀, 他
5	温度変動に対応した鉄道車両用リチウムイオン電池の劣化予測手法	田口義晃, 他
調査報告		
1	鉄道車両へのSiC電力用半導体素子適用状況	廿日出悟
2	国内外の燃料電池鉄道車両の開発動向	米山崇, 他
第36巻 第3号 (2022年3月)〔軌道技術〕		著者名
展望解説		
1	低コスト化・省力化に貢献する軌道技術	三和雅史
特集論文		
1	列車巡視支援のための線路周辺画像解析エンジンの開発	昆野修平, 他
2	低温時のロングレール保守作業制限の見直しの提案	玉川新悟, 他
3	軌道回路に代わる車上式レール破断検知システム	細田充, 他
4	まくらぎ間隔拡大に対応したバラスト軌道の設計法	弟子丸将, 他
5	輪重測定結果に基づくPCまくらぎの疲労寿命評価	後藤恵一, 他
6	既設線省力化軌道用路盤改良の設計法	伊藤壱記, 他
7	噴泥したバラスト軌道を対象としたSFCてん充道床軌道の性能評価	瀧上翔太, 他
8	レールガス圧接の加熱変形解析手法の構築	伊藤太初, 他
第36巻 第4号 (2022年4月)〔防災技術〕		著者名
展望解説		
1	防災技術に関する最近の研究開発	太田直之
特集論文		
1	任意地点の融雪量推定方法の開発	飯倉茂弘, 他
2	融雪量に基づく実効雨量を用いた融雪災害警戒基準の提案	高柳剛, 他
3	泥質軟岩の含水比変化がロックボルトの付着力に与える影響	西金佑一郎, 他
4	推定流出土砂量を用いた土石流要注意溪流の抽出方法	長谷川淳, 他
5	粒子法を用いた土・水連成解析による津波越流および洗掘解析手法の開発	阿部慶太, 他
6	海底地震計情報を活用した早期地震検知手法の即時性向上	野田俊太, 他
7	線区情報を活用した地震時運転規制基準値の更新手法	坂井公俊, 他
8	旅客上家の影響を考慮した鉄道高架橋への地震力の設定手法	三木広志, 他

第36巻 第5号 (2022年5月)〔鉄道トンネルの設計技術〕		著者名
展 望 解 説		
1	鉄道トンネルの設計技術の動向と鉄道構造物等設計標準 (トンネル) 改訂の要旨	野城一栄
特 集 論 文		
1	粘性土地盤中のシールドトンネルの設計土圧の算定方法	津野究, 他
2	縦断方向に地盤条件が変化するシールドトンネルの耐震設計法	藤田輝一, 他
3	山岳トンネル覆工およびインバートの適合みなし仕様の提案	嶋本敬介, 他
4	地山劣化法を用いた山岳トンネル覆工およびインバートの性能照査法	嶋本敬介, 他
5	地山形状を考慮した応答変位法による山岳トンネル坑口部の地震時影響の詳細評価法	野城一栄, 他
調 査 報 告		
1	鉄道シールドトンネルのセグメントおよびシールドマシンに関する事例調査	船越宏治, 他
解 説		
1	改訂鉄道構造物等設計標準 (トンネル) に基づくシールドトンネルの試設計	滝川遼, 他
2	改訂鉄道構造物等設計標準 (トンネル) に基づく山岳トンネルの試設計	野城一栄, 他
第36巻 第6号 (2022年6月)〔浮上式鉄道の技術と超電導の実用に向けた研究〕		著者名
展 望 解 説		
1	浮上式鉄道技術と超電導の研究動向	富田優
特 集 論 文		
1	リニアレールブレーキに向けたインバータレス励磁方法の開発	坂本泰明, 他
2	車上集電電力密度を向上した鉄道車両用非接触給電システム	依田裕史, 他
3	浮上案内コイルの電磁加振試験による耐振動特性評価	池田遼平, 他
4	超電導き電ケーブルの電気特性評価	福本祐介, 他
5	超電導き電ケーブルの冷却方式	小林祐介, 他
6	二ホウ化マグネシウム線材を用いた超電導コイルの開発	恩地太紀, 他
7	高磁場特性を有する高温超電導材料の製作と特性評価	赤坂友幸, 他
第36巻 第7号 (2022年7月)〔鉄道固有の力学的問題に関わる最近の研究〕		著者名
展 望 解 説		
1	鉄道固有の力学的問題に関わる最近の研究	上半文昭
特 集 論 文		
1	パンタグラフの不安定振動に対するしゅう動摩擦の影響の解析的検討	天野佑基, 他
2	ヨーダンパを装備した鉄道車両の地震時走行安全性向上	飯田浩平, 他
3	雨天走行時の車輪/レール接線力特性における車輪削正痕の影響	山本大輔
4	車輪/レール接触応力の緩和によるゲージコーナキ裂抑制手法の検討	辻江正裕, 他
5	既設橋りょうの加速度モニタリングによる構造性能評価	徳永宗正, 他
6	構造物境界部における縦まくらぎ軌道による変位抑制効果	渡辺勉, 他
7	降雪地帯を走行する鉄道車両への着雪を再現する着雪シミュレータの開発	室谷浩平, 他
8	バラスト軌道のマイクロメカニクスに着目した解析手法の改良	河野昭子
第36巻 第8号 (2022年8月)〔信号通信分野における設計・メンテナンス技術〕		著者名
展 望 解 説		
1	信号通信分野における研究開発の動向	新井英樹, 他
特 集 論 文		
1	信号保安装置に適用可能な画像処理システムの構成手法および安全確認手法	祇園昭宏, 他
2	継電連動装置の結線図自動作成における回路規模最小化手法	関根俊
3	汎用端末を用いた保安用途向け接点入出力システムの構成手法	祇園昭宏, 他
4	第5世代移動通信システムの鉄道運行業務への適用可能性検証	中村一城, 他
5	電気転てつ機モニタ用の転換負荷推定手法の開発	潮見俊輔, 他
6	使用環境センシングによる信号用電子機器の寿命予測手法	藤田浩由, 他
7	ハンディカメラによる列車前方映像を用いた信号設備の管理支援システムの開発	向嶋宏記, 他
8	分野をまたがる鉄道メンテナンスデータの統合分析プラットフォームの開発	流王智子, 他



第36巻 第9号 (2022年9月)〔騒音と空気力学的問題〕		著者名
展望解説		
1	鉄道における空気力学に関する最近の研究開発	斉藤実俊
特集論文		
1	走行風を利用した新幹線台車周りの着雪対策	高見創, 他
2	線形音響理論に基づく微気圧波低減のための列車先頭部形状最適化	宮地徳蔵, 他
3	圧力変動の非定常性を考慮したトンネル内設置物への空気力算出法	斉藤実俊
4	台上試験と実車走行試験によるきしり音の特性評価	末木健之, 他
5	列車走行時に発生する低周波圧力変動の発生源の解明	宇田東樹, 他
6	音場情報を用いたマイクロホンアレイによる新幹線台車部空力音の推定手法	山崎展博, 他
一般論文		
1	多点同時測定による構造物・地盤の振動特性と地盤振動分布との関係性の評価	野寄真徳, 他
調査報告		
1	防風柵設置による空気力低減量に関する風洞試験結果	野口雄平, 他
第36巻 第10号 (2022年10月)〔車両技術〕		著者名
展望解説		
1	車両技術に関する研究開発の動向	石毛真
特集論文		
1	車体弾性振動低減に向けた新幹線用台車前後加振力伝達抑制デバイスの開発	相田健一郎, 他
2	連結装置の破壊モードに着目した編成車両の衝突シミュレーション	佐藤裕之, 他
3	ハイブリッドシミュレータを用いた滑走制御アルゴリズムの性能評価手法	土方大輔, 他
4	定速運転を用いた貨物列車の省エネ運転方法の提案	小川知行
5	運転曲線作成システムと汎用シミュレータとの連携による主電動機の性能評価	横内俊秀, 他
6	高速度カメラを用いた車両部品の取付状態診断手法	風戸昭人, 他
第36巻 第11号 (2022年11月)〔材料技術〕		著者名
展望解説		
1	材料技術に関する研究開発と今後の展望	松井元英
特集論文		
1	左官用ジオポリマーモルタルの開発	上原元樹, 他
2	水平面に適用可能なコンクリート表面の水分浸透抵抗性評価手法	西尾壮平
3	鋼橋におけるめっき・溶射材料への塗装による防食性向上手法	坂本達朗
4	回折X線を用いた表面層の分析によるレール削正量の検討	兼松義一, 他
5	車軸軸受のフレッチング摩耗防止に対するセグメント構造炭素膜の効果	岡村吉晃, 他
6	低温流動性を向上したギヤ油による起動加速度の向上	木川定之, 他
7	自律型損傷検知システムによる車軸軸受の損傷検知	間々田祥吾, 他
第36巻 第12号 (2022年12月)〔情報・通信〕		著者名
展望解説		
1	情報通信技術に関する最近の研究開発	福田光芳
特集論文		
1	列車前方画像を用いた画像解析による軌道設備の検査	長峯望, 他
2	鉄道向け通信プロトコルにおける伝送媒体選択機能の提案	流王智子, 他
3	遅延の影響度・影響人数に基づく遅延対策箇所検討手法	國松武俊, 他
4	編成の分割併合を考慮した車両運用計画の自動作成手法	加藤怜
5	地域鉄道におけるパターンダイヤの利便性評価	鈴木崇正, 他
6	貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果の評価手法	奥田大樹, 他
7	都市鉄道における鉄道路線イメージと沿線居住意向の関係の定量化	渡邊拓也, 他



鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕 福田光芳

■企画・監修

鈴木浩明	川崎邦弘	長倉 清	日比野有
伊積康彦	石毛 真	神田政幸	重枝秀紀
桃谷尚嗣	布川 修	新井英樹	福田光芳
上田 洋	上半文昭	斉藤実俊	水上直樹
富田 優	小島謙一		

鉄道総研報告 第36巻 第12号

2022年12月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2022 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先  
総務部広報 電話 042-573-7219

# RTRI REPORT

▶ Special Features: Information and Telecommunication ◀

Vol. 36 No. 12

Dec. 2022

## PERSPECTIVE

- Trend on Research and Development Relating to Information and Communication Technology in Railway Fields  
.....M.FUKUDA (1)

## PAPERS

- Inspection Method of Track Facilities using Image Analysis of Images in Front of Trains  
.....N.NAGAMINE, Y.TSUBOKAWA, W.GODA, R.MAEDA, S.KATO, K.ITOI (7)
- Proposal for Transmission Media Usage Functions in Transmission Protocol for Railway System  
.....S.RYUO, A.HADA, D.YAMAGUCHI, K.NAKAMURA, K.KAWASAKI (13)
- Evaluation Methods of Measures Against Delay based on Propagation Score and Affected Passengers  
.....T.KUNIMATSU, A.KUNISAKI (21)
- Automatic Calculation Method for Rolling Stock Assignment Considering Splitting and Combining of Train  
.....S.KATO (27)
- Convenience Evaluation of Clock-face Local Railway Timetables  
.....T.SUZUKI, T.WATANABE, D.OKUDA, N.FUKASAWA (35)
- Evaluation Method for Implementation Effect of Disaster Countermeasures on a Freight Railway Network  
.....D.OKUDA, T.WATANABE, S.NAKAGAWA, T.SUZUKI, N.FUKASAWA (41)
- Quantification of Relationship between Image of Urban Railway Services and Residential Location Preference  
.....T.WATANABE, N.FUKASAWA, D.OKUDA, T.SUZUKI (47)

