

貨物鉄道事業者の負担を考慮した 災害対策の実施効果の評価手法

奥田 大樹¹・渡邊 拓也²・中川 伸吾³・鈴木 崇正⁴・深澤 紀子⁵

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 情報解析研究室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: okuda.daiki.67@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 情報解析研究室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: watanabe.takuya.42@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 情報解析研究室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: nakagawa.shingo.39@rtri.or.jp

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 情報解析研究室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: suzuki.takamasa.91@rtri.or.jp

⁵正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 情報解析研究室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: fukasawa.noriko.11@rtri.or.jp

自然災害が激甚化・高頻度化するなか、鉄道貨物輸送の災害レジリエンスの向上が課題となっている。このような状況を踏まえて、貨物鉄道事業者は様々な災害対策の実施について検討を進めているが、これら対策に投入できるリソースには限りがあるため、その全てを実施することは難しく、定量的な根拠に基づく実施の要否判断や優先順位付けが必要となる。そこで本研究では、災害対策の実施に関する貨物鉄道事業者の意思決定を支援するために、被災した貨物鉄道ネットワークにおける復旧期間中の貨物輸送量と、災害対策や災害対応に関する貨物鉄道事業者の負担を指標とした、災害対策の実施効果の定量的な評価手法を構築した。そして、ケーススタディとして、日本各地の主要貨物駅間でトラック代行輸送を増強する場合の効果を各区間で評価し、その結果から構築した評価手法が有益なものであることを示した。

Key Words: railway freight, freight railway network, disaster countermeasure, evaluation method, detour transportation, truck substitution transportation

1. はじめに

自然災害の激甚化・高頻度化に伴って、鉄道路線の被災が日本各地で増加しており、鉄道輸送の安定性や信頼性が低下しつつある。その中でも、広域かつ長距離な輸送を展開する鉄道貨物輸送に対する影響は大きく、2016年から2020年までの5年間で自然災害を理由に運休した貨物列車の本数は、2006年から2010年までの5年間と比較して約1.7倍¹⁾になっている。特に、台風や大雨といった風水害を理由とした運休本数の増加が著しく、これに限った場合には約3.7倍¹⁾となっている。

鉄道貨物輸送の安定性や信頼性を維持・向上させるには、想定を超える自然災害に遭遇しても可能な限り輸送を継続するとともに、可能な限り早期に元の輸送体制に復旧して影響を最小化すること、つまり、鉄道貨物輸送

における災害レジリエンスの向上が重要と言える。このような状況を踏まえて、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：Business Continuity Planning）の策定を進めている²⁾。そしてこれに関連して、貨物鉄道事業者が責任を負う範囲での貨物鉄道ネットワークの強化や、輸送の多重性・代替性の確保といった災害対策の実施を日本各地で検討している。しかし、災害対策の実施には多くの費用や時間が必要である一方で、貨物鉄道事業者が災害対策に投資できるリソースには限りがある。そのため、効果的かつ効率的に災害対策を実施するには、優先的に実施すべき災害対策や、貨物鉄道ネットワーク内で災害対策を優先的に実施すべき箇所の選定が必要となる。そして、そのような選定を実施するには、災害対策の実施効果を定量的に評価可能な手法が必要となる。

災害対策の実施効果の定量的な評価に関連する既往研究は、道路ネットワークを対象とした事例が中心となっている。例えば、村木³⁾らは、地震によって国内幹線交通ネットワーク内のリンクが途絶した際に交通流動が受ける影響の評価モデルを構築し、ケーススタディとして、国内の鉄道路線の新設効果や高速道路の耐震補強効果を評価している。原田⁴⁾らは、新しい道路経路が確保されることによる道路利用者の経済損失（災害時の迂回損失・機会損失）の軽減効果と、地域住民の孤立に対する心理不安の軽減効果に着目して、道路ネットワーク整備による防災効果の便益を評価する手法を構築している。そして、岐阜県飛騨圏域を対象としたケーススタディで、災害時の便益がほとんど発生しない道路整備がある一方で、経路確保の便益が少なくない道路整備が存在することを示している。これら事例における災害対策の効果の評価基準は、被災時の利用者便益や孤立地域の発生防止といった社会的便益が中心で、道路ネットワークの管理主体にもたらされる便益や、災害対策に関連して管理主体が負担する各種コストは考慮されていない。これは、道路ネットワークの主な管理主体が国や地方公共団体であり、社会的な有用性や公平性に主眼が置かれているためと考えられる。一方で鉄道ネットワークの管理主体は鉄道事業者であることから、管理主体の負担を考慮せずに評価することは、鉄道事業者の経営や事業の継続性の観点から不適切である。また、道路ネットワークと鉄道ネットワークの構造的な違いや、道路輸送と鉄道輸送の特性の違いなども考慮が必要と言える。

鉄道ネットワークを対象とした研究事例は、数は少ないもののいくつか存在している。例えば、岩田ら⁵⁾は、鉄道ネットワークに対する地震対策に着目し、その実施効果を、鉄道ネットワークが被災した際に、地震対策が実施されていないケースと比較して軽減可能な、旅客や貨物の輸送量で評価している。しかし、この事例では、鉄道事業者による負担が評価の対象となっていないなどの課題がある。

以上を踏まえて本研究では、貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果を、将来の一定期間において未対策の場合よりも増加が見込める不通時輸送量、および軽減が見込める総災害コストで評価する手法を構築した。不通時輸送量とは、被災の影響で貨物鉄道ネットワーク内に不通区間が存在し復旧作業が実施されている期間（以後、復旧期間とする）の貨物輸送量を意味する。総災害コストとは、貨物鉄道事業者による災害対策への投資コストと、被災時に貨物鉄道事業者が負担する各種コスト（以後、被災時コストとする）の和を意味する。そして、構築した手法を用いたケーススタディとして、日本全国の主要な貨物駅間でトラックによる代替輸送を増強する場合の効果を各区间で評価し、その結果から、

災害対策の実施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ことを示した。

以降の第 2 章では、本研究における前提を述べ、第 3 章では、災害対策の実施効果の評価手法について述べる。そして第 4 章では、構築した評価手法を用いたケーススタディと、得られた結果に対する考察を述べる。そして最後の第 5 章では、まとめと今後の課題を述べる。

2. 本研究における前提

本研究では、鉄道貨物輸送の実態に基づき、以下に示す前提を定義する。

(1) 貨物鉄道ネットワーク

貨物鉄道ネットワークは、貨物駅、信号場、およびその他結節点をノード、各ノード間を結ぶ鉄道線区をリンク（以後、鉄道リンクとする）とした無向グラフで表現する。また、トラックによる輸送を考慮するために、特定のノード間には道路経路（以後、道路リンクとする）も設定する。各ノード間を結ぶ鉄道リンクと道路リンクは、それぞれ 1 本以下とする。図-1 は、本研究における鉄道ネットワークの例を示すものである。

(2) 貨物需要

貨物鉄道ネットワーク内で発生する貨物需要は、各ノードを発駅・着駅とする OD 別・品目別に日単位で設定する。なお、同じ OD で発生する同じ品目の貨物需要であっても、通常時の輸送経路が異なるものが存在する場合は、それぞれ別の貨物需要として取り扱う。貨物需要の単位は、鉄道貨物輸送で最も一般的な 12ft コンテナ（以後、単にコンテナとする）の個数とし、コンテナ以外の容器等で輸送されている品目の貨物についても、コンテナ個数に換算して取り扱う。

現実の貨物需要は、1 週間単位で周期的に変動しているが、本研究では、条件設定や計算を簡略化するため、各日の OD 別・品目別の貨物需要はそれぞれ一定とする。さらに、現実の貨物輸送では、輸送期間が 2 日以上となる OD も存在するが、本研究における輸送期間は全ての

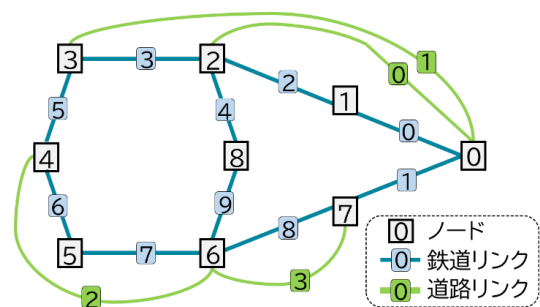


図-1 鉄道ネットワークの例

ODで1日とする。

(3) 貨物需要の処理方法

貨物需要は、表-1 に示すいずれかの方法で処理する。代行輸送には、トラックのみで輸送するパターンと、鉄道とトラックを組み合わせる輸送するパターンの2通りが存在するが、後者の場合には、鉄道とトラックを中継するノード（以後、中継ノードとする）において、貨物の積み替え作業が発生する。

各処理の優先順は、過去の被災時における鉄道貨物の輸送実績や、被災時の輸送に関する貨物鉄道事業者の方針に基づき、通常輸送、迂回輸送、代行輸送、保管、返却の順とする。また、後述する貨物の処理能力についても、優先順が高い処理に対して優先的に充当する。

各処理の実施に必要なコストについては、通常輸送、迂回輸送、および代行輸送の場合には、輸送した貨物量（コンテナ個数）、輸送距離（km）、および各輸送単価（円/コンテナ個数・km）を掛け合わせて算出する。保管と返却の場合は、処理した貨物量（コンテナ個数）に保単価（円/コンテナ個数・日）もしくは返却単価（円/コンテナ個数）を掛け合わせて算出する。なお、返却に必要なコストとは、貨物を輸送できなかったことによる違約金やその他ペナルティに相当するものである。

ノード、鉄道リンク、および道路リンクには、表-2 に示す貨物処理に関する各能力（以後、処理能力とする）を設定する。ここで、道路リンクの処理能力については、道路の交通容量を超える台数のトラックが充当されることは現実的に考えにくいこと、本研究は貨物鉄道ネットワークが被災した状況における鉄道貨物輸送に着目したものであり、道路ネットワークの被災や道路輸送につい

表-1 貨物の処理方法

通常輸送	通常時と同じ経路での鉄道輸送
迂回輸送	通常時と異なる経路での鉄道輸送
代行輸送	トラック輸送のみ、もしくはトラック輸送と鉄道輸送を組み合わせる輸送
保管	発ノードで貨物を保管し、翌日の同 OD 間の貨物需要に追加
返却	輸送や保管ができず荷主へ返却

表-2 ノード、鉄道リンク、および道路リンクの処理能力

ノード	鉄道で発送・荷受けが可能な1日当たりの品目別貨物量（コンテナ個数/日）の上限
	トラックで発送・荷受けが可能な1日当たりの品目別貨物量（コンテナ個数/日）の上限（＝災害時に確保できるトラック台数）
	鉄道とトラック間で積み替え可能な1日当たりの品目別貨物量（コンテナ個数/日）の上限
	保管可能な1日当たりの品目別貨物量（コンテナ個数/日）の上限
鉄道リンク	通過可能な1日当たりの方向別貨物量（コンテナ個数/日）の上限
	通過可能な品目（通過可：1 不可：0のバイナリ変数）
道路リンク	通過可能な品目（通過可：1 不可：0のバイナリ変数）

て着目したのではないことなどの理由から、通過可能な品目のみを設定する。

各 OD で発生する品目別の貨物需要は、その輸送経路内の発ノードと着ノード、中継ノード、鉄道リンク、および道路リンクの処理能力の範囲内で処理する。なお、輸送経路内で、発ノード、着ノード、および中継ノードのいずれにも該当しないノード（以後、途中ノードとする）の処理能力については、その経路における貨物需要の処理には影響しない。

(4) 被災した貨物鉄道ネットワークでの貨物処理

被災したノードや鉄道リンクは、全ての処理能力を一時的に喪失し、復旧作業が完了するまでは、貨物需要の発送・荷受けや通過などの処理は行えない。一方で、先述のとおり、輸送経路内の途中ノードの処理能力は、その経路における貨物需要の輸送に影響しないことから、途中ノードのみが被災している場合は、復旧の有無に関わらず貨物需要は処理可能である。また、輸送経路内の中継ノードが被災している場合は、そのノードでの貨物の積み替えはできないものの、それ以外の貨物需要の処理は可能である。

道路リンクについては、設定する処理能力が通過可能な品目のみの設定であることから、被災の有無に関わらず、処理能力は常に維持される。

3. 災害対策の実施効果の評価手法

(1) 評価手法の概要

河川事業や地滑り対策といった防災事業の評価マニュアル⁶⁾では、災害対策の実施効果を、未対策の場合と比較して軽減が見込める、一定期間内の総被害の期待値で評価している。本研究はこの事例に倣い、貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果を、図-2 で示すとおり、将来の一定期間において未対策の場合よりも増加が見込める不通時輸送量の期待値 ΔQ と、軽減が見込める総災害コストの期待値 $\Delta(L+I)$ で評価する。

将来のある一定期間に発生し得る災害の発生確率は、国や自治体が公開しているハザードマップ等で把握でき

る。しかし、それら災害による貨物鉄道ネットワークの被災箇所や、その被害の程度を把握することは困難である。そこで本研究では、図-3 で示すとおり、ある地域で過去に発生した災害とそれによる貨物鉄道ネットワークの被害が、将来も同じ地域に同じ頻度で発生すると仮定して、将来のある一定期間に生じる不通時輸送量の期待値と総災害コストの期待値を推計する。

(2) 不通時輸送量と総災害コストの定量化手法

災害によって被災した貨物鉄道ネットワークでは、貨物需要の一部が迂回輸送で処理されるなど、貨物処理パターンが通常時と異なる。また、復旧作業によって貨物鉄道ネットワークの状態は日々変化し、貨物処理パターンもそれに依りて日々変化する。そのため、不通時輸送量や被災時コストを定量化するには、復旧期間中の各日における貨物処理パターンの定量的な把握が必要となる。本研究では、被災した貨物鉄道ネットワークの復旧に関するシナリオが所与であるとして、復旧期間中の各日における貨物処理パターンを、数理最適化技術を用いて推定する。

a) 貨物鉄道ネットワークの復旧シナリオ

貨物鉄道ネットワークの復旧シナリオでは、被災したノードと鉄道リンク、およびそれらの復旧までに必要な時間を日単位で設定する。また、現実の鉄道貨物輸送で通常時と異なる貨物処理を実施するには、準備期間を必要とする場合が多いことから、各ノードや鉄道リンクで、通常輸送以外の処理への対応が可能となる日も、併せて設定する。

b) 最適化計算における所与の変数と集合・添え字

所与の変数は、以下に示すとおりである。

- 貨物鉄道ネットワーク内の鉄道リンクと道路リンクの延長 (km)
- 貨物鉄道ネットワーク内の各ノード、鉄各鉄道リンク、および各道路リンクにおける、表-2 に示した各処理能力
- OD別・品目別の1日当たりの貨物需要 (コンテナ数/日)
- 品目別の通常輸送単価 (円/コンテナ数・km)
- 品目別の迂回輸送単価 (円/コンテナ数・km)
- 品目別の代行輸送単価_鉄道 (円/コンテナ数・km)
- 品目別の代行輸送単価_トラック (円/コンテナ数・km)
- 中継ノードにおける積み替え単価 (円/コンテナ数)
- 品目別の保管単価 (円/コンテナ数・日)
- 品目別の返却単価 (円/コンテナ数)

集合・添え字は、以下に示すとおりである。

- $d \in$ 復旧期間中の各日
- $r \in$ 全OD
- $i \in$ 全品目

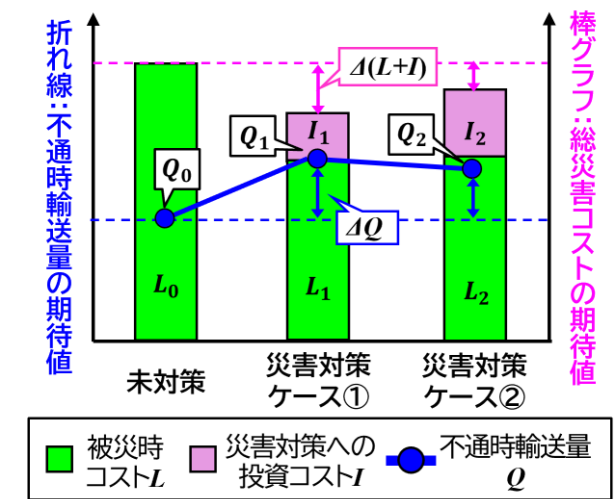


図-2 評価手法の適用イメージ

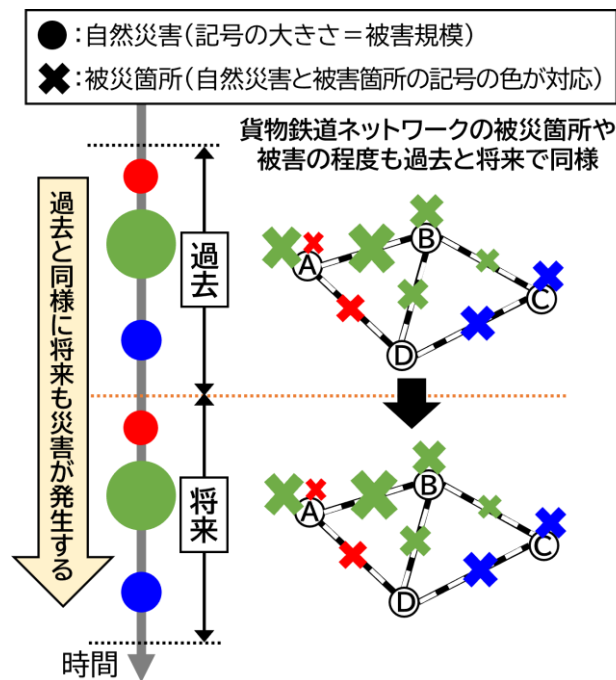


図-3 将来の災害発生に関する仮定

- $l \in$ 全鉄道リンク
- $n \in$ 全ノード
- $t \in \{$ トラック輸送, トラック輸送 + 鉄道輸送 $\}$
- $\rho_{r,i}^d \in$ d 日のOD r において品目 i の貨物の迂回輸送が可能な経路の集
- $\sigma_{r,i,t}^d \in$ d 日のOD r において品目 i の貨物をパターン t で代行輸送が可能な経路の集合
- P, Q : 十分に大きい任意の定数

c) 復旧期間中の貨物処理パターンの推定

復旧期間中の各日の貨物処理パターンは、図-4 で示すとおり、処理方法ごとに優先順に従って推定する。

①通常輸送による処理

復旧期間中の d 日目の通常輸送パターンは、各 OD でその日に発生する品目別の貨物需要が、可能な限り通常輸送で処理されるように推定する。制約条件は、各ノードと各鉄道リンクの処理能力である。そして、通常輸送で処理できない貨物需要については、迂回輸送で処理する。

②迂回輸送による処理

復旧期間中の d 日目の迂回輸送パターンは、式(1)で示すとおり、その日の迂回輸送量の最大化を優先しつつ、通常時と比較して追加となる輸送コスト（以後、迂回コストとする）の最小化を目的とする数理最適化問題を解いて推定する。

$$\text{Maximize} \sum_r \sum_i \sum_{\rho_{r,i}^d} \left(\text{迂回輸送量}_{r,i,\rho_{r,i}^d}^d - \frac{1}{P} \text{迂回コスト}^d \right) \quad (1)$$

制約条件は、各ノードと各鉄道リンクの処理能力であるが、迂回輸送で利用可能な処理能力は、通常輸送を実施した後の余剰分である。また、各ノードや鉄道リンクにおいて、迂回輸送への対応が可能となるまでの日数も制約条件となる。

復旧期間中の d 日目の迂回コストは、式(2)で算出する。

$$\begin{aligned} \text{迂回コスト}^d = & \sum_r \sum_i \sum_{\rho_{r,i}^d} \left\{ \text{迂回輸送量}_{r,i,\rho_{r,i}^d}^d \right. \\ & \times \left(\text{迂回経路長}_{r,i,\rho_{r,i}^d}^d \times \text{迂回輸送単価}_i \right. \\ & \left. \left. - \text{通常経路長}_i \times \text{通常輸送単価}_i \right) \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

通常経路長と迂回経路長は、その経路内の鉄道リンクの総延長(km)である。迂回輸送で処理できない貨物需要

については、代行輸送で処理する。

③代行輸送による処理

復旧期間中の d 日目の代行輸送パターンは、式(3)で示すとおり、その日の代行輸送量の最大化を優先しつつ、通常時と比較して追加となる輸送コスト（以後、代行コストとする）の最小化を目的とする数理最適化問題を解いて推定する。

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \sum_r \sum_i \sum_t \sum_{\sigma_{r,i,t}^d} & \left(\text{代行輸送量}_{r,s,i,\sigma_{r,i,t}^d}^d \right. \\ & \left. - \frac{1}{Q} \text{代行コスト}^d \right) \quad (3) \end{aligned}$$

制約条件は、各ノード、各鉄道リンク、および各道路リンクの処理能力であるが、代行輸送で利用可能な処理能力は、通常輸送と迂回輸送を実施した後の余剰分である。また、迂回輸送と同じく、各ノードや鉄道リンクにおいて、代行輸送への対応が可能となるまでの日数も制約条件となる。

復旧期間中の d 日目の代行コストは、式(4)で算出する。

$$\begin{aligned} \text{代行コスト}^d = & \sum_r \sum_i \sum_t \sum_{\sigma_{r,i,t}^d} \left\{ \text{代行輸送量}_{r,s,i,\sigma_{r,i,t}^d}^d \right. \\ & \times \left(\text{代行経路長}_{\text{道路}}^d_{r,i,t,\sigma_{r,i,t}^d} \times \text{代行輸送単価}_{\text{トラック}}_i \right. \\ & \left. + \text{代行経路長}_{\text{鉄道}}^d_{r,i,t,\sigma_{r,i,t}^d} \times \text{代行輸送単価}_{\text{鉄道}}_i \right. \\ & \left. + \text{積み替え単価}_i \right) \\ & \left. - \text{通常経路長}_i \times \text{通常輸送単価}_i \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

代行経路長_道路および代行経路長_鉄道は、その経路内の道路リンクおよび鉄道リンクそれぞれの総延長(km)

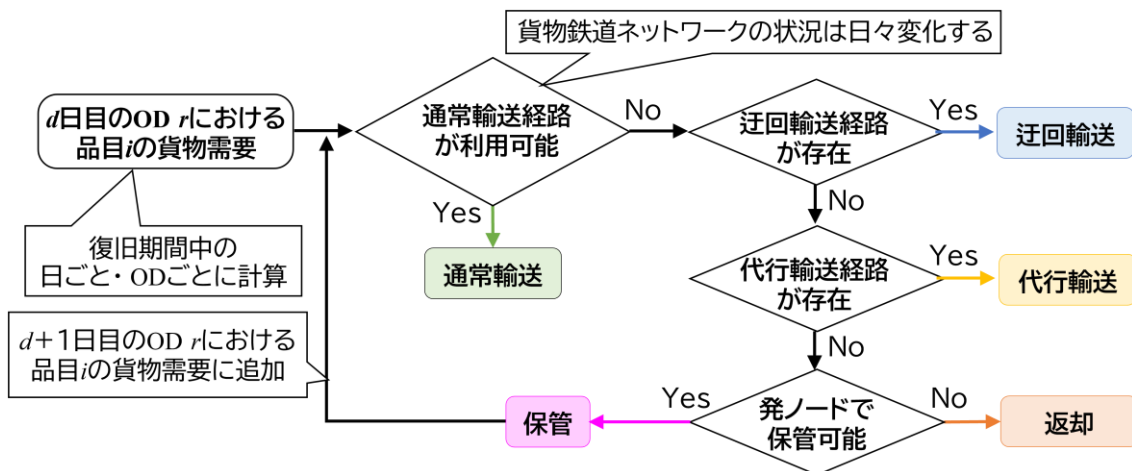


図4 復旧期間中の各日における貨物処理パターンの推定フロー

である。代行輸送で処理できない貨物需要については、保管で処理する。また、ある OD において代行輸送の対象となっている貨物需要は、トラックのみで輸送するパターンと、トラックと鉄道を組み合わせて輸送するパターンを併用して輸送することも可能とする。

④ 保管・返却による処理

復旧期間中の d 日目の保管・返却輸送パターンは、その日の保管量が最大になるように推定する。制約条件は、各貨物需要の発ノードで保管可能な品目別貨物量の上限であり、保管で処理できない貨物需要については、返却で処理する。また、発ノードで保管された貨物は、翌日の同 OD で発生する同じ品目の貨物需要に付加する。

d) 不通時輸送量と総災害コストの定量化

不通時輸送量は、式(5)で示すとおり、復旧期間中の各日において最大化された通常輸送量、迂回輸送量、および代行輸送量の和として定量化する。

$$\text{不通時輸送量} = \sum_d \left(\text{通常輸送量}_{max}^d + \text{迂回輸送量}_{max}^d + \text{代行輸送量}_{max}^d \right) \quad (5)$$

被災時コストは、式(6)で示すとおり、式(2)と式(4)で示した迂回コストと代行コスト、および式(7)で示す各日の保管コストと返却コストの和として定量化する。なお、貨物鉄道事業者が管理するノードや鉄道リンクが被災した場合には、貨物鉄道事業者が負担する復旧作業等のコストも、被災時コストに加える。

$$\text{被災時コスト} = \sum_d \left(\text{迂回コスト}^d + \text{代行コスト}^d + \text{保管コスト}^d + \text{返却コスト}^d \right) \quad (6)$$

$$\text{保管コスト}^d + \text{返却コスト}^d = \sum_r \sum_i \left(\text{保管量}_{r,i}^d \times \text{保管単価}_i + \text{返却量}_{r,i}^d \times \text{返却単価}_i \right) \quad (7)$$

総災害コストは、推計された被災時コストと、貨物鉄道事業者による災害対策への投資コストの和として定量化する。

(3) 定量化手法の推計精度の検証

我が国で発生した過去の大雨災害と地震災害を対象に、貨物鉄道ネットワークが被災した際の不通時輸送量を、構築した定量化手法で再現した。そして、これら再現値

と実績値の比較を通じて、定量化手法の推計精度を検証した。不通時輸送量の実績値は、貨物鉄道事業者から提供された、対象の災害発生時における鉄道貨物輸送の実績データから整備した。

被災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、式(6)でも示したとおり、被災時コストの推計精度は、迂回コスト等の推計精度、つまり、復旧期間中の貨物処理パターンの推計精度に依存することとなる。そのため、不通時輸送量の推計精度の検証は、間接的に被災時コストの推計精度も検証していると言える。

本検証では、可能な限り実態の再現を目指しつつも、計算負荷を軽減するために、以下に示す前提を定義した。

- 災害の影響を受けない範囲で輸送が完結する貨物は対象外とする
- 貨物鉄道ネットワークの復旧シナリオは、当時の復旧実績⁷⁹⁾に基づき設定する
- 各ノードや鉄道リンクで通常輸送以外への対応が可能となる日は、災害発生時の輸送実績⁷⁹⁾に基づき設定し、記録が残っていない場合は、災害発生日から対応可能とする
- 貨物鉄道ネットワークの規模を縮小するために、オフル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する
- 各 OD で発生する各日の貨物需要には、災害発生2週間前から災害発生前日の当該 OD おける平均な 1 日当たりの貨物需要を充て、品目は区別しない
- 貨物鉄道ネットワークの道路リンクは、復旧期間中に道路輸送の実績があったノード間のみを設定する
- ノードや鉄道リンクの処理能力を明示的に示すデータが存在しないため、通常時の貨物需要を滞りなく輸送できる水準の値を便宜的に与える
- 不通時輸送量の実績値に存在する週単位の周期性は、7日移動平均処理（当該日とその前後3日の平均）を適用して平滑化する

a) 大雨災害時における不通時輸送量の推計精度

図-5は、大雨災害を対象とした検証における貨物鉄道ネットワーク（ノード：22箇所、鉄道リンク：22本）

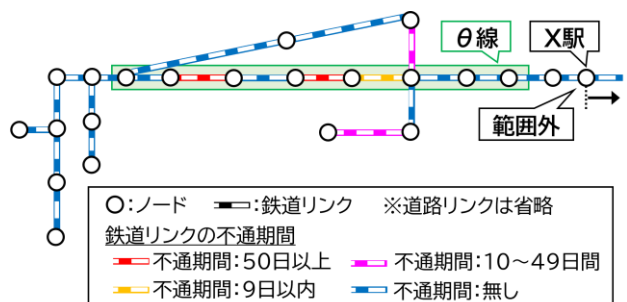


図-5 貨物鉄道ネットワーク（大雨災害）

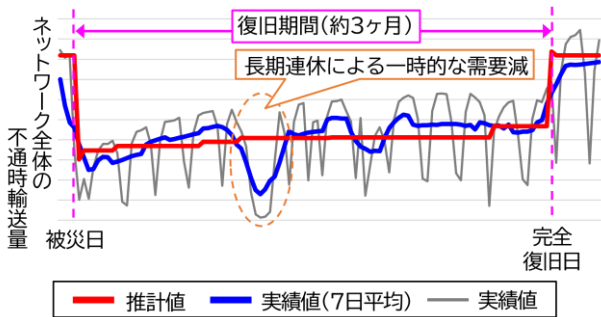


図-6 貨物鉄道ネットワーク全体における不通時輸送量の推計値と実績値の推移

を示すものであり、図中のX駅以東は、大雨災害の影響を直接的に受けていない地域である。また、図中のθ線は、我が国における主要幹線の一つであり、その一部の鉄道リンクでは、対象の大雨災害によって甚大な被害が発生した。さらに、被災した鉄道リンクの中には、復旧期間中に発生した別の大雨災害によって再被災したものも存在し、貨物鉄道ネットワークの完全復旧には、約3ヶ月という長い時間を要した。ノードについては、いずれも被害は無かった。

図-6は、貨物鉄道ネットワーク全体における、不通時輸送量の再現値と実績値の推移を示すものであるが、貨物需要が一時的に低下する長期連休期間を除いて、これらの傾向は概ね一致しており、精度良く再現できていると言える。

b) 地震災害時における不通時輸送量の推計精度

図-7は、地震災害を対象とした検証における貨物鉄道ネットワークを示すものであり、図中のY駅以南は、対象の地震災害の影響を直接的に受けていない地域である。また、図中のσ線とε線は、いずれもこの地域における重要な路線であり、貨物列車も多数運行している。

地震発生日には、貨物鉄道ネットワークの全域が不通となったが、被害はさほど大きなものとはならず、完全復旧までに要した時間は2週間程度であった。

図8は、貨物鉄道ネットワーク全体における、復旧期間中の不通時輸送量の再現値と実績値の推移を示すものであるが、実績値が再現値よりもやや高い値で推移しているものの、これらの傾向は概ね一致しており、精度良く再現できていると言える。なお、貨物鉄道ネットワーク全体における完全復旧後2週間の1日当たりの平均貨物需要は、災害発生前2週間のそれと比較して約1.2倍に増加していることから、再現値と実績値のズレは、時期的な貨物需要増の影響を受けたものと考えられる。

図-9は、復旧期間中にσ線を通過する不通時輸送量の再現値と実績値の推移を示すものであるが、これらの傾向は概ね一致しており、精度良く再現できていると言える。現実のσ線では、地震発生後に復旧が遅れていたε線の迂回輸送が一時的に実施され、通過する貨物量もその期

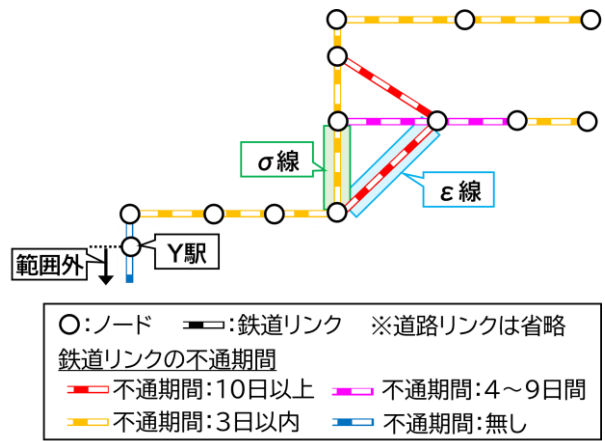


図-7 貨物鉄道ネットワーク (地震災害)

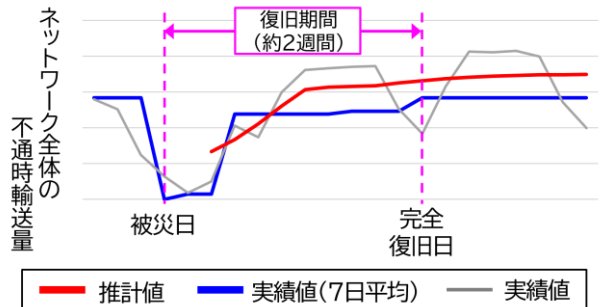


図-8 貨物鉄道ネットワーク全体における不通時輸送量の推計値と実績値の比較

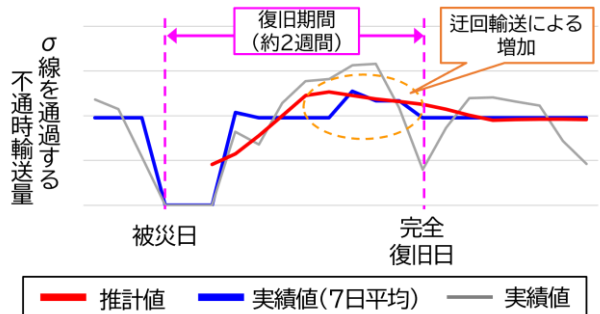


図-9 σ線における不通時輸送量の推計値と実績値の比較

間のみ増加したが、再現値ではその点も精度良く反映されていると言える。なお、実績値における通貨貨物量の増加期間は、再現値のそれよりも前後にやや長くなっているが、これは移動平均処理の影響である。

4. 災害対策の実施効果の評価手法を用いたケーススタディ

災害対策の実施効果の評価手法を用いたケーススタディとして、図-10に示すA駅とB駅～I駅を結ぶ計8区間でトラック代行輸送を増強する場合における、各区間での実施効果を評価した。

本ケーススタディの前提条件は、以下に示すとおりである。

a) 貨物鉄道ネットワーク

対象範囲は日本全国とし、各貨物駅をノード、これらをつなぐ鉄道路線を鉄道リンクとした。ただし、貨物取扱量の実績や貨物駅間の近接度等を考慮して、オフレールステーションや小規模な貨物駅は、近隣の大規模な貨物駅に集約した。その結果、貨物鉄道ネットワーク内のノード数は 70、鉄道リンク数は 76 となった。図-10 は、本ケーススタディにおける貨物鉄道ネットワークを示すものであり、A 駅、および B 駅～I 駅はいずれも貨物取扱量が多く、各地域を代表する貨物駅である。

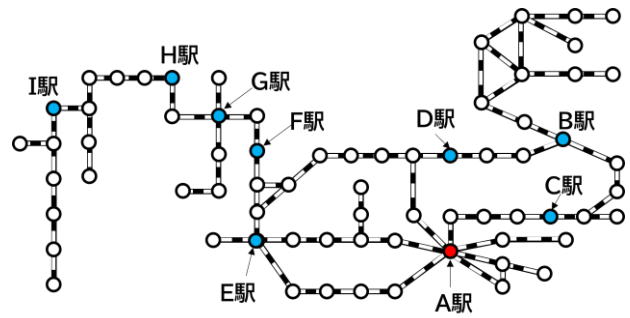


図-10 貨物鉄道ネットワーク

b) 対象の災害事例と復旧シナリオ

対象の災害事例は、2019年から2021年までの3年間に発生した 16 件の風水害¹⁰⁾のうち、鉄道への被害が確認されなかった「令和元年台風第 13 号」と、鉄道路線の運転休止期間に関する情報のない「令和 3 年台風 14 号」を除く 14 件とした。ただし、「令和 2 年 7 月豪雨災害」は、九州と東日本の両地域に被害をもたらしており、これらは別の災害として扱うことが適切であるため、表-3 に示すとおり、対象の災害事例は最終的に 15 件（総復旧期間 115 日）となった。

各災害による貨物鉄道ネットワークの復旧過程については、国土交通省が Web サイトで公開している災害時の鉄道運行状況¹¹⁾に基づき、1 日単位の復旧シナリオを与えることとした。各シナリオは各日の正午を基準とし、半日以上運転休止があった場合には、その日 1 日を運転休止とみなした。ただし、運転休止が発生した日が 1 日のみである場合は、運転休止時間時間に関わらず、その日 1 日を運転休止とした。

c) 各 OD における貨物需要とこれらの通常輸送経路

各日の各 OD で発生する品目別の貨物需要には、2017 年 6 月 1 日～11 月 30 日（183 日）までの貨物輸送の実績データから算出した、それら OD における品目別の平均貨物輸送量を充てた。輸送実績データは、先述の貨物鉄道事業者から提供されたものである。2017 年のデータを用いた理由は、対象とした災害の発生時期と鉄道貨物輸送の条件に大きな違いがなかったほか、大規模な輸送障害が少なく、通常時の貨物需要を設定するのに適していたためである。輸送実績データでは、貨物は 1,161 の品目に分類されているが、本ケーススタディではこれらを、生鮮（青果・畜産物・海産物など 59 種類）、危険（引火性・毒性のある化学物質など 516 種類）、一般（生鮮・危険に含まれない 586 種類）の 3 品目に集約した。その結果、各 OD で発生する品目別の貨物需要は 2,836 通りとなり、これら需要の総量は 12,784 コンテナとなった。また、これら貨物需要の通常時の輸送経路も、同じ輸送実績データから整備した。

表-3 ケーススタディで対象とした風水害

災害名称	復旧期間
6 月下旬からの大雨（19 年 6 月 30 日）	5 日
梅雨前線に伴う大雨及び令和元年台風第 5 号（19 年 7 月 21 日）	4 日
令和元年台風第 8 号（19 年 8 月 5 日）	2 日
令和元年台風第 10 号（19 年 8 月 14 日）	4 日
令和元年 8 月の前線に伴う大雨（19 年 8 月 27 日）	4 日
令和元年台風第 15 号（19 年 9 月 8 日）	3 日
令和元年台風第 17 号（19 年 9 月 22 日）	2 日
令和元年台風第 18 号（19 年 10 月 3 日）	17 日
令和元年台風第 19 号（19 年 10 月 12 日）	2 日
令和元年台風第 19 号後の低気圧の接近に伴う大雨（19 年 10 月 25 日）	3 日
令和 2 年 7 月豪雨災害_九州（20 年 7 月 4 日）	31 日
令和 2 年 7 月豪雨災害_東日本（20 年 7 月 23 日）	1 日
令和 2 年台風第 10 号（20 年 9 月 6 日）	4 日
令和 3 年 7 月 1 日からの大雨（21 年 7 月 3 日）	10 日
令和 3 年 8 月の大雨（21 年 8 月 12 日）	23 日

d) ノード、鉄道リンク、道路リンクの処理能力

被災しなかった鉄道路線では、旅客輸送に影響が出ない範囲で貨物輸送に最大限の便宜が図られると仮定し、被災していないノードから鉄道輸送として発送もしくは荷受け可能な貨物量と、被災していない鉄道リンクを通過可能な貨物量には、上限を設定しないとした。また、各ノードにおけるコンテナの保管能力は、少なくとも普段取り扱う貨物量の 1 日分は保管可能と仮定して、各ノードから発送される 1 日当たりの品目別の貨物需要と同値とした。さらに、トラックが必災害時にどの程度確保できるかは不明であるものの、貨物鉄道車両よりは容易に準備可能と仮定し、各災害時に確保できるトラック台数にも上限を設定しないこととした。

e) 貨物の処理単価

通常時における一般品の通常輸送単価は、鉄道統計年報¹²⁾、エネルギー源別標準発熱量一覧表¹³⁾、交通部門エネルギー消費実績¹⁴⁾、および貨物鉄道事業者の鉄道営業費に占める動力費の割合¹⁵⁾を基に、51 円/コンテナ個数・km に設定した。生鮮品の通常輸送単価については、国交省の定める標準的な運賃¹⁶⁾において、冷蔵車・冷凍車によ

表-4 ケーススタディにおける各種単価

品目の区分	一般	生鮮	危険
通常の鉄道輸送単価 (円/コンテナ個数・km)	51	61	102
迂回・代行の鉄道輸送 単価 (円/コンテナ個数・km)	61	73	122
代行の道路輸送単価 (円/コンテナ個数・km)	96	122	192
保管単価 (円/コンテナ個数・日)	50,000	60,000	100,000
返却単価 (円/コンテナ個数)	300,000	360,000	600,000

る運賃の割増率が 2 割とされていることから、一般品の通常輸送単価の 1.2 倍に設定した。危険品の通常輸送単価については、貨物鉄道事業者のコンテナ貨物割増率表⁷⁾において、火薬類の輸送費が一般品の 10 割増しとされていることから、一般品の通常輸送単価の 2.0 倍に設定した。

各品目の迂回輸送単価と代行輸送単価_鉄道については、貨物鉄道事業者のコストとして直接的に決定することは困難であるものの、輸送経路の変更手配等に関わる人件費や、貨物駅に遅着することで発生する諸経費等を考慮して、各品目の通常輸送単価の 1.2 倍に設定した。

代行輸送単価_トラックについては、鉄道の通常輸送単価と同様の方法で推計し、一般品で 96 円/コンテナ個数・km に設定した。そして、生鮮品と危険品の単価については、鉄道と同じく一般品の 1.2 倍と 2.0 倍とした。

保管単価および返却単価についても、貨物鉄道事業者のコストとして直接的に決定することは困難であるものの、各種の輸送単価と釣り合いがとれる合理的な額を設定することとした。設定においては、「トラックで運ぶよりは、数日保管しても鉄道で運ぶほうが良い」、
「荷主への返却となるぐらいなら、トラックで運ぶほうが良い」という仮定を基準とした。表-4 は、本ケーススタディにおける各種処理の単価をまとめたものである。

f) トラック輸送に対する投資コスト

トラックはリースが一般的であるため、その購入費や毎月の固定費といった大規模な設備投資は発生しない。また、リースしたトラックの経費は、リース料、燃料費、ドライバーの人件費などで、これらはリース期間や貨物の輸送距離に比例するものである。よって、トラックのリースに関わる費用は、トラック輸送に関わるコスト、つまり代行輸送単価_トラックに含めることが適切と言えるため、本ケーススタディでは、災害対策への投資コストは考慮せず、被災時コスト=総災害コストとした。

(3) 評価結果とそれに対する考察

表-5 各ケースの不通時輸送量と総災害コスト

ケース	不通時輸送量 (コンテナ個数)	総災害コスト (万円)
①	1,369,856	—
②	1,372,134 (+2,278)	126,904 (-513)
③	1,372,319 (+2,463)	126,730 (-687)
④	1,371,665 (+1,809)	126,792 (-625)
⑤	1,373,742 (+3,886)	126,333 (-1,084)
⑥	1,374,107 (+4,251)	126,169 (-1,248)
⑦	1,373,688 (+3,832)	126,393 (-1,024)
⑧	1,383,749 (+13,893)	123,702 (-3,715)
⑧	1,448,224 (+78,368)	102,465 (-24,952)

※ () 内はケース①との差分

現状のままを意味するケース①(未対策)を基準として、以下に示す①~⑧の 8 ケースにおける実施効果を評価した。なお、各ケースにおける代行輸送には、トラックと鉄道を組み合わせた輸送も含まれている。例えばケース①の場合には、A 駅から B 駅まではトラックで輸送し、B 駅からその他の駅までは鉄道で輸送するといった代行輸送も含まれている。

① 未対策 (現状のまま)

② A 駅~B 駅間のトラック輸送を増強

③ A 駅~C 駅間のトラック輸送を増強

④ A 駅~D 駅間のトラック輸送を増強

⑤ A 駅~E 駅間のトラック輸送を増強

⑥ A 駅~F 駅間のトラック輸送を増強

⑦ A 駅~G 駅間のトラック輸送を増強

⑧ A 駅~H 駅間のトラック輸送を増強

⑧ A 駅~I 駅間のトラック輸送を増強

表-5 は、対象の各災害の復旧期間中における不通時輸送量と総災害コストそれぞれの合計を、ケースごとに示すものである。

①~⑧の全てのケースで、ケース①(未対策)よりも不通時輸送量は増加し総災害コストは減少していることから、トラック代行輸送の増強は災害対策として有効と言える。しかし、不通時輸送量と総災害コストの両面で最も実施効果が高いケース⑧と、両面で実施効果が低いケース①~③を比較した場合、不通時輸送量の増加分で約 76,000 コンテナ、総災害コストの減少額で約 24,000 万円の差があるなど、実施効果には大きな差があるものとなった。

F 駅~I 駅間には迂回可能な鉄道経路が存在しないため、この区間が不通となった場合には、この区間を通過する貨物の鉄道輸送はほぼ不可能となり、影響が非常に大きいものとなる。そのため、ケース⑧におけるトラック輸送の増強が、大きな効果が得られたものと考えられる。また、災害は日本各地で発生するものであるため、

輸送距離が長いほど災害の影響を受ける確率は高くなるが、このことも、長距離区間におけるトラック代行輸送の増強を図ったケース⑧で、実施効果が大きくなった理由の一つと考えられる。また、不通時輸送量と総災害コストの両面で 2 番目に効果が大きいケース⑦も、F 駅～I 駅区間の一部を通過する輸送であり、ケース⑧と同様の理由で実施効果が高くなったものと考えられる。

実施効果が低いケースの場合、例えばケース①では、C 駅経由と D 駅経由の 2 経路が存在するが、これらは地理的に大きく離れた場所にあるため、同時に不通となる状況はまず発生しない。そのため、何らかの災害が発生しても、通常輸送もしくは迂回輸送が可能な経路はほとんどの場合において確保されており、トラック輸送の増強による効果が小さくなったものと考えられる。また、輸送距離が短距離であることも、効果が小さくなった理由の一つとして考えられる。ケース②とケース③も、同様の理由で効果が低くなったと考えられる。

以上より、構築した災害対策の実施効果の評価手法は、効率的かつ効果的な災害対策の実施に向けた貨物鉄道事業者の意思決定に対して、定量的かつ有益な情報を提供できるものと言える。

5. おわりに

本研究は、鉄道貨物輸送の自然災害に対するレジリエンスの向上に向けた、貨物鉄道事業者による災害対策の実施に関する意思決定支援を目的として、貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果を、定量的に評価可能な手法を構築した。本評価手法は、将来の一定期間において、災害対策の実施によって未対策の場合よりも増加が見込める不通時輸送量の期待値 ΔQ と、軽減が見込める総災害コストの期待値 $\Delta(L+I)$ を評価指標とするものである。そして、被災した貨物鉄道ネットワークの復旧期間中の各日における貨物処理パターンから、不通時輸送量と総災害コストを定量化する手法を構築し、過去に発生した 2 つの災害事例を対象とした検証で、本定量化手法が高い推計精度を有することを示した。

災害対策の実施効果の評価手法を用いたケーススタディとして、日本各地の主要貨物駅間でトラック代行輸送を増強する場合における、各区間の実施効果について評価を行い、その結果から本評価手法は、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ことを示した。

今後の課題としては、より詳細かつ広範な意思決定に資する情報が提供できるように、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図る必要がある。また、貨物鉄道ネットワーク内では、貨物輸送だけではなく旅客輸送も行われていることから、災

害対策の実施が旅客輸送に与える効果についても考慮できるよう、構築した評価手法の拡張を図る必要がある。

REFERENCES

- 1) 国土交通省：貨物鉄道のサービス向上・利用促進に向けた課題と取組み, <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001473648.pdf>, 2022. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 2) 例えば、日本貨物鉄道株式会社：JR 貨物グループレポート 2022, https://www.jrfreight.co.jp/ir_sustainability/groupreport.html, 2022. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 岩田直泰, 丹羽健友, 鈴木崇正, 山本俊六：鉄道ネットワークの損失輸送量に着目した地震対策効果の一元的評価, 令和 2 年度 土木学会全国大会 第 75 回年次学術講演会, 2020.
- 6) 国土交通省：治水経済調査マニュアル (案), https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/t204/chisui.pdf, 2020. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 7) 国土交通省：平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について, https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_180703.html, 2018. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 8) 国土交通省：平成 30 年北海道胆振東部地震, https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_180906.html, 2018. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 9) JR 貨物：貨物列車の迂回運転実施について, <https://www.jrfreight.co.jp/storage/upload/66c2a0b89432238f368fa0293a3caf38.pdf>, 2018. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 10) 国土交通省：災害・防災情報, <https://www.mlit.go.jp/saigai/>, (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 11) 例えば、国土交通省：6 月下旬からの大雨による被害状況等について (第 7 報), <https://www.mlit.go.jp/common/001301699.pdf>, 2019. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 12) 公益社団法人鉄道貨物協会：JR 貨物時刻表平成 29 年 3 月ダイヤ改正, 2017.
- 13) 国土交通省：鉄道統計年報, https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000045.html, 2016. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 14) 資源エネルギー庁：エネルギー発熱一覧, https://www.enec.ho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf, 2018. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 15) 国土交通省：エネルギー消費実績, <https://www.mlit.go.jp/statistics/pdf/23000000x033.pdf>, 2020. (最終閲覧 2023 年 2 月)
- 16) 国土交通省：トラック運送業に係る標準的な運賃を告示

しました～持続可能な物流の実現に向けて、取引の適正
化・労働条件の改善を進めます～, [https://www.mlit.go.jp/re
port/press/jidosha04_hh_000213.html](https://www.mlit.go.jp/port/press/jidosha04_hh_000213.html), 2020. (最終閲覧 2023 年
2月)

17) JR 貨物：コンテナ営業ガイド

(Received March 5, 2023)

EVALUATION METHOD OF THE IMPLEMENTATION EFFECT OF DISASTER COUNTERMEASURES CONSIDERING THE COSTS COVERED BY FREIGHT RAILWAY OPERATORS

Daiki OKUDA, Takuya WATANABE, Shingo NAKAGAWA, Takamasa SUZUKI,
and Noriko FUKASAWA

As natural disasters become more severe and frequent, the importance of improving the resilience of railway freight transport against disasters is increasing. Railway freight operators are therefore considering various disaster countermeasures. However, it is difficult to implement all of them because they require large amount of monetary and labor resources. In order to support the decision-making of freight railway operators regarding the implementation of disaster countermeasures, we developed an evaluation method of the implementation effect of disaster countermeasures on freight railway networks considering the costs covered by freight railway operators. Then, as a case study, we quantitatively evaluated the effect of strengthening truck transportation between major freight stations in various parts of Japan and verified the validity of the developed method.