

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¹⁾²⁾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³⁾⁴⁾。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

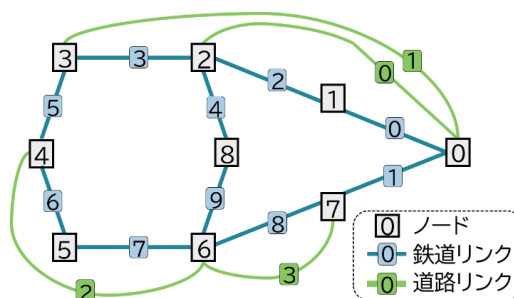


図1 貨物鉄道ネットワークの例

* 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: Ori^giⁿ と着ノード: Des^tiⁿation 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

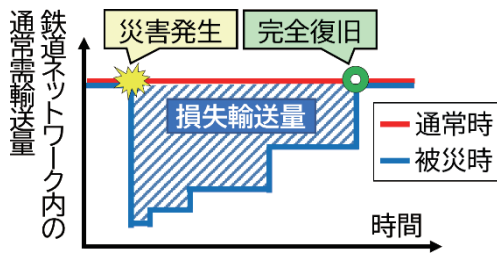


図2 損失輸送量のイメージ

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

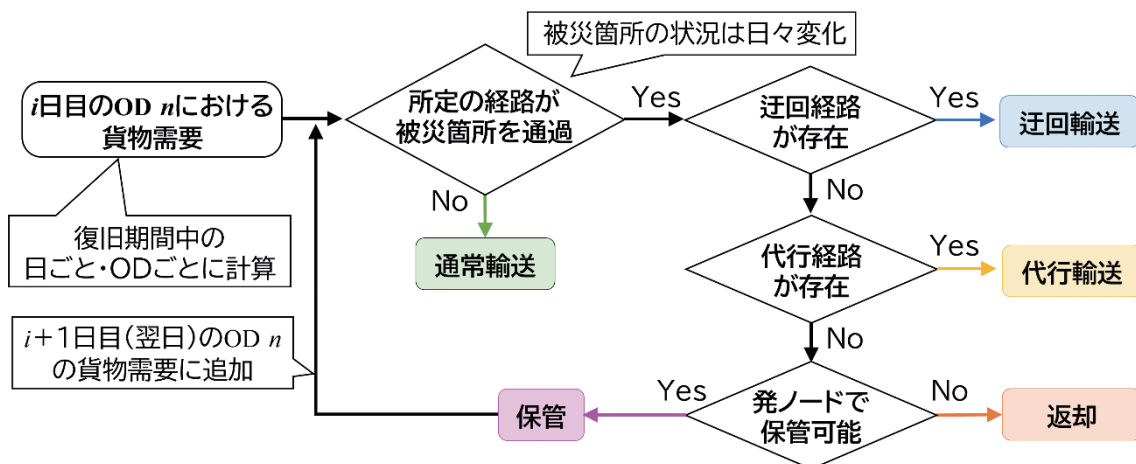


図3 貨物輸送パターンの算出フロー

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

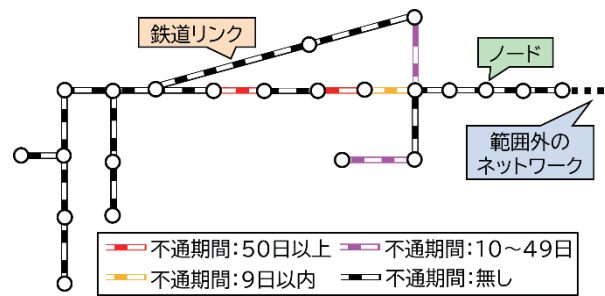


図4 再現シミュレーションにおける貨物鉄道ネットワーク

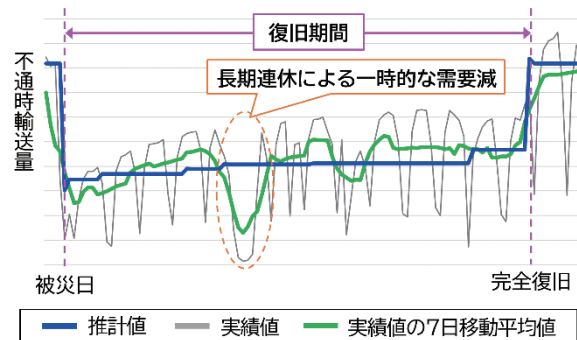


図5 再現シミュレーションの結果

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

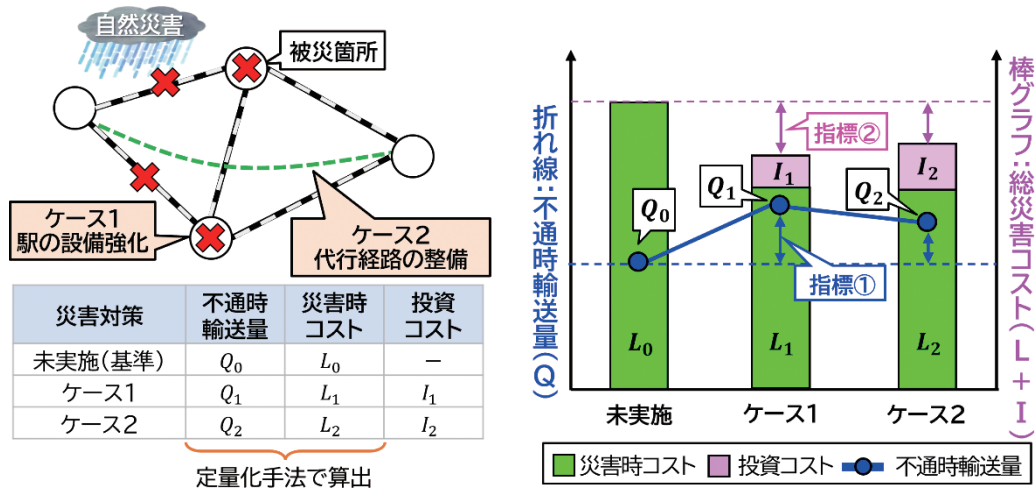


図6 災害対策の実施効果の評価

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⁵⁾。

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

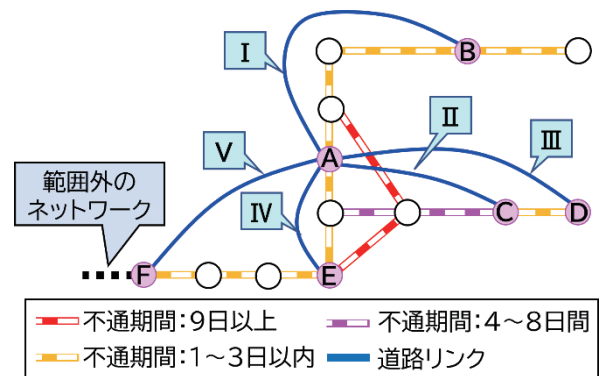


図7 ケーススタディにおける貨物鉄道ネットワーク

ケースI～ケースVの5ケースについて、それぞれ実施効果を評価した。

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⁶⁾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

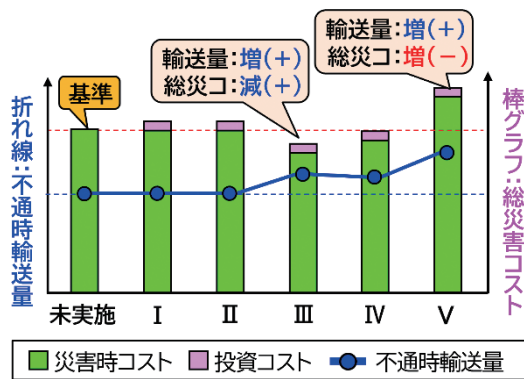


図8 ケーススタディの評価結果

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, 2016. (参照日: 2022年7月21日)