

# 大規模地震における幹線鉄道の リダンダンシー効果の把握に関する基礎的検討

宮本 聖<sup>1</sup>・窪田 崇斗<sup>2</sup>・川原 悠<sup>3</sup>・大串 拓<sup>4</sup>・柳沼 秀樹<sup>5</sup>・力石 真<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 非会員 鉄道・運輸機構 北陸新幹線建設局 事業推進調査部 (〒532-0003 大阪市淀川区宮原 3-5-36)

E-mail: miyamoto.sat-44d3@jrtr.go.jp

<sup>2</sup> 正会員 鉄道・運輸機構 新幹線部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1)

<sup>3</sup> 非会員 鉄道・運輸機構 新幹線部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1)

<sup>4</sup> 正会員 エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社 社会システム事業部  
(〒100-0014 東京都千代田区永田町 2-10-3)

<sup>5</sup> 正会員 東京理科大学准教授 創域理工学部社会基盤工学科 (〒278-0022 千葉県野田市山崎 2641)

<sup>6</sup> 正会員 広島大学准教授 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

大規模災害により鉄道施設が大きな被害を受けた場合に生じる経済損失や社会的影響は非常に大きい。交通ネットワークの多重化により、その損失や影響を軽減出来る効果が期待されている。防災・減災に取り組むことを目的として、災害後に不通となる可能性がある路線の代替経路確保（リダンダンシー）による効果を適切に把握する事が求められている。

本研究ではケーススタディとして、大規模地震により交通ネットワークが被害を受けた場合、幹線鉄道の整備によるリダンダンシー効果の把握を検討した。地震による被害状況と復旧シナリオを設定し、現行の鉄道事業の評価手法に基づき、幹線鉄道利用者数の変化および便益計測を用いてリダンダンシー効果を把握した。また、道路事業の防災機能評価手法を幹線鉄道に対して行い、適用可能性を検証した。

**Key Words:** inter-regional railway network, redundancy effect, catastrophic earthquake

## 1. はじめに

我が国は地震等の自然災害が世界的にも多い国である。中央防災会議、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ<sup>注1)</sup>では、将来的に発生が確実視されている東海地震や東南海・南海地震が、南海トラフ沿いで同時に発生した場合、2011年に発生した戦後最大の甚大な被害をもたらした東日本大震災を超える人的・物的被害が生じることが想定されている。このような大規模地震による被害軽減に向けて、防災・減災への取り組みは重要である。鉄道ネットワークにおいても、鉄道施設の耐震化等の防災力を向上させる取り組みが続けられている。

大規模災害により鉄道施設が大きな被害を受け、交通ネットワークが寸断された場合に生じる経済損失や社会的影響は非常に大きい。1995年に発生した阪神・淡路大震災では、山陽新幹線新大阪・姫路間に構造物等に甚大な損傷を受け、81日間に渡って不通<sup>注2)</sup>となった。2011年に発生した東日本大震災では、東北新幹線大宮・新青森間の各地で構造物等に損傷を受け、49日間に渡って不

通<sup>注2)</sup>となった。

鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル<sup>注3)</sup>では、鉄道事業の評価に当たっては、手法の一つとして費用便益分析が用いられており、鉄道整備による効果のうち貨幣換算が可能な項目による便益を基に評価している。また、都市内鉄道や都市間鉄道については、災害後に不通となる可能性がある路線の代替経路確保（リダンダンシー）により、災害後の経済損失や社会的影響を低減することが期待できることを挙げている。また、鉄道防災対策の評価に当たっては、定性的に評価したうえで、定量化が可能な効果については定量的指標により評価を行う事である。しかし、リダンダンシー効果の検討にあたっては、災害の発生確率をどのように捉えるべきかや、前提条件の設定等について、研究・検討の余地がある。

浅見<sup>1)</sup>の研究では、東海道新幹線が大きな需要を分担しているという現状の課題を明示し、東海道新幹線が長期不通になった際の社会的損失を定量的に評価した上で、東海道新幹線の代替ルートが存在した場合の社会的損失緩和を定量的に評価した。

国土交通省による道路事業評価では、高規格道路の新規整備を対象に、防災機能評価<sup>注3)</sup><sup>注4)</sup>が適用されている。この評価では、災害時においても安全な道路交通の確保を目的として、道路ネットワークが災害時においても維持されるのか否かを拠点間の接続性に基づいて評価した定量指標および定性指標を示している。

そこで本研究では、災害発生時に発現するリダンダンシー効果に着目し、複数の幹線鉄道の利用が想定されるネットワークにおいて、大規模地震により交通ネットワークが被害を受けた場合を想定して、幹線鉄道の整備によるリダンダンシー効果の把握に関するケーススタディ分析を行った。

併せて、道路事業の評価手法である国土交通省道路局における防災機能の計測手法を幹線鉄道を対象に行った。

## 2. 災害時における幹線鉄道の整備効果

新幹線を基幹とした幹線鉄道網は、国土の骨格を形成する重要な高速大量輸送機関である。

2011年に発生した東日本大震災では、東北新幹線を始めとする東北地方の幹線鉄道ネットワークは甚大な影響を受けた。東北新幹線は地震発生から49日後に全線復旧<sup>2)</sup>したが、復旧までの期間、代替交通機関として、主に航空や高速バスが用いられたほか、上越新幹線と高速バスを乗り継ぐ経路など他の新幹線を活用した経路や、早期に復旧した一部の在来線による迂回経路が機能した。

また、今井<sup>2)</sup>の研究では、復旧状況の報道を検証しており、「幹線鉄道復旧に関して、被災地の復興（特に観光客入込）、及び経済効果に対する期待感が大きいことがうかがえる。また、精神的・心理的な支えになる旨の記事も少なくなく、報道の数とあわせ、復旧・復興のシンボルともなっている」と指摘しているように、新幹線の存在による、経済面や安心感等の心理面の効果は大きかったと考えられる。

## 3. 想定する大規模災害と分析条件の設定

本章以降において、大規模災害を想定したシナリオ条件を設定し、ケーススタディ分析を実施する。

### (1) リダンダンシー効果の考え方

大規模地震による被害の大きさは、規模や復旧過程により大きな影響を生じることになるため、リダンダンシー効果も大きく変化することになる。そこで本研究においては、新たな幹線鉄道の整備前後（Without/With）と災害有無（平常時/災害後）の4つの状態について、利

用者が代替経路確保により得られる速達性等の利便性の差異をリダンダンシー効果とした。イメージを図-1の通り示す。

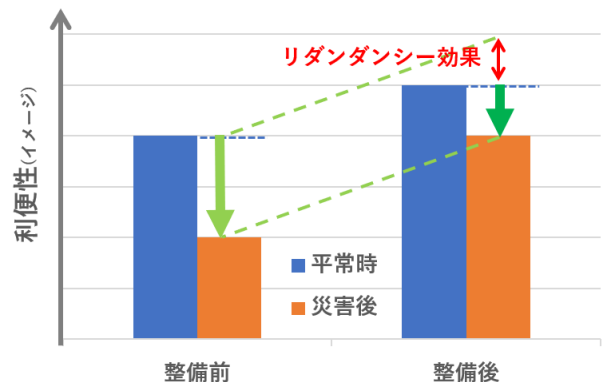


図-1 リダンダンシー効果のイメージ

### (2) リダンダンシー効果の検討対象

対象とする路線は大都市であるA都市・B都市間にて、幹線鉄道①、②、③の異なる3路線あることを想定し、大規模地震により幹線鉄道①のC都市・D都市間が被災して不通になるものとする（図-2）。

この前提のもと、幹線鉄道③の整備状況による違いによるリダンダンシー効果を検討対象とすることとし、With、Withoutの状況は以下の通りとする。

- With：幹線鉄道③全区間（A都市・B都市間）
- Without：幹線鉄道③一部区間（A都市・E都市間）  
なお、B都市とE都市間は既存在来線を使用すると想定した。

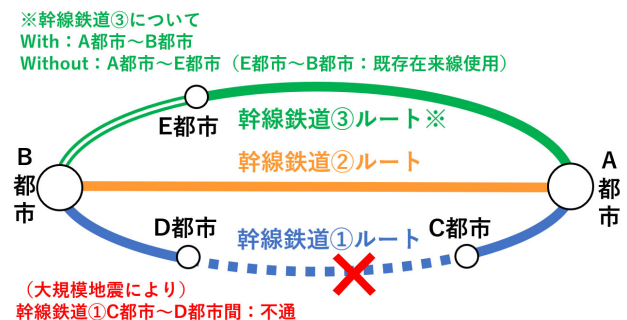


図-2 リダンダンシー効果の検討対象

### (3) 復旧シナリオ

#### a) 交通流動量・パターン

大規模地震発生直後は、全国にわたり被災地への支援や復旧など平常時とは異なる交通量が発生することが予想されるが、これらは実績等に基づき定量的に想定する事は困難である。

本研究では、大規模地震発生から1週間以降は交通流動量・パターンが平常時と同等になると想定した。

b) ネットワーク条件

大規模地震後、交通流動量・パターンが平常時になる1週間後から、幹線鉄道①のC都市・D都市間が復旧する1か月後までの間を対象とする期間・ネットワークとする。なお、この設定は過去の大規模地震災害後の実績を参考としている。その期間のA都市・B都市間のネットワークの状況を表-1の通り整理した。

表-1 A都市・B都市間の想定条件

A都市・B都市間の交通機関及び鉄道経路		大規模地震発生後1週間以降～1か月後	(参考)※5 A都市・B都市間の平常時所要時間	
鉄道	幹線鉄道①ルート	一部不通※3	約3.7時間	
	幹線鉄道②ルート	通常	約2.4時間	
	幹線鉄道③ルート	With(全区間※1)	通常	約4.9時間
		Without(一部区間※2)	通常	約5.6時間
航空		通常	約4.0時間	
道路	(参考) 高速道路	不通	/	
	一般道路	仮復旧		
	高速バス (所要時間)	不通※4	約8.0時間	
	自動車 (所要時間)	2倍 ※4	約8.1時間	

- ※1 A都市・B都市間
- ※2 A都市・E都市間(E都市・B都市間：既存在来線)
- ※3 C都市・D都市間：不通
- ※4 被害が大きい地域(C都市～D都市の一部)
- ※5 公共交通機関の所要時間は、アクセス・イグレス時間及び乗り継ぎ時間を考慮した参考値

4. リダンダンシー効果の算出

現行の鉄道事業の評価手法に基づき、以下の通りリダンダンシー効果の算出を行った。

(1) 需要推計モデル

将来交通需要推計モデルは、基本的に四段階推計法に則し、「生成→発生→OD(分布)→交通機関分担」の順に推計を行う。

交通機関分担については、幹線鉄道の事業評価で用いられている非集計ネスティッドロジットモデルを活用した交通機関・鉄道経路選択の同時選択モデル<sup>注2)</sup>を用いる。交通機関選択(上位ツリー)では、航空、鉄道、幹線バス、フェリー・旅客船および自動車の5選択肢を設定している。また、経路選択(下位ツリー)では、代表交通機関が鉄道の場合に複数経路の選択を表現している。

なお、幹線交通流動の実態データ、需要予測モデルの構築データとして全国幹線旅客純流動調査データ(2015年度)を用いる。

(2) 災害後の制約条件

算出に当たり、災害後については以下の通り制約条件を設定する。

a) 被害が大きい地域(C都市～D都市の一部)

被害が大きい地域は平常時とは異なる交通量が発生するものと考えられるが、これらを客観的に想定する事は困難である。そのため、本ケーススタディでは被害の大きい地域を発着する交通流動量は対象外(0人)とする。

b) 旅行とりやめ

交通流動量・パターンが平常時と同等になると考えられる災害発生1週間以降を計測対象とし、被害が大きい地域は対象外となることを考慮すると、本ケーススタディにおいては、旅行とりやめはないものとする。

c) 容量制約

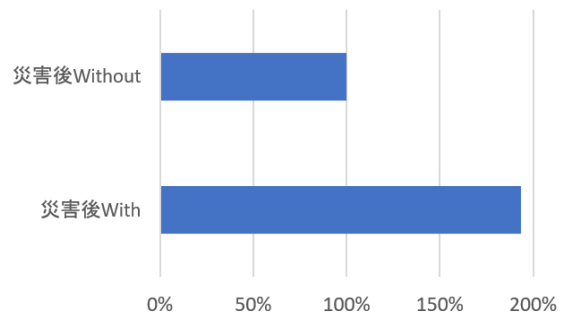
幹線鉄道①が被災から1か月後まで不通となるため、平常時の幹線鉄道①利用者は他の鉄道路線や他の交通機関(航空)へ転換する。ただし主な転換先である航空や幹線鉄道②は容量100%を超える運行は不可、座席利用のみと想定し、容量制約を考慮する。

容量制約を超える需要があった場合は、当該の需要を容量100%までを配分し、溢れた需要については当該の選択肢がないものとして、再度計算を行い、他の鉄道路線や他の交通機関に配分する。

(3) A都市・B都市間における幹線鉄道③利用者数の変化

A都市・B都市間において、幹線鉄道③利用者数の災害後の整備前後(With, Without)の変化率を図-3に示す。

災害後Withにおいて、災害後Withoutと比較すると、幹線鉄道③のA都市・B都市間の利用者数は約2倍となっており、リダンダンシー効果が発現していると考えられる。



※災害後Withoutの幹線鉄道③利用者数を100%とする

図-3 A都市・B都市間における幹線鉄道③利用者数の変化率

(4) リダンダンシー効果の便益計測を用いた算出

上記の利用者による交通機関選択の変化を基にしたリダンダンシー効果について、消費者余剰法に基づいた便益計測を用いた算出を行った場合について検討する。

今回の検討では、設定した復旧シナリオに合わせて、災害発生からそれぞれのステージにおける、1日あたりの便益（リダンダンシー効果）を算出した結果、リダンダンシー効果として災害発生より1週間以降～1か月後の場合は、平常時における整備効果（利用者便益）の約25%に相当する事が確認できた。

ただし本ケーススタディにおいては、平常時と災害後の経路選択肢集合は、平常時では幹線鉄道①と幹線鉄道②、災害後では幹線鉄道②と幹線鉄道③を設定しており、災害後において幹線鉄道①が利用出来なくなる不便益まで考慮されていない課題がある。今後は、適切な経路選択肢集合の設定など、さらなる研究・検討の余地がある。

5. 拠点間の接続性に着目した効果

本章では、道路事業の評価指標である国土交通省道路局における防災機能の計測手法<sup>注3)</sup><sup>注4)</sup>を幹線鉄道を対象に行った。

(1) 道路事業評価における防災機能の計測

災害後においても安全な道路交通の確保を目的に、道路ネットワークが災害後においても維持されるのか否かを拠点間の接続性に基いてを評価する手法であり、高規格道路の新規整備時の評価には費用便益分析と合わせて評価が行われている。

ある拠点間rs間について、整備有無（整備前・整備後）と災害有無（平常時・災害後）の4つの状態を想定し、期待所要時間を算出する。その上で、拠点rs間のを基に脆弱度 $Z_{rs}$ と改善度 $K_{rs}$ を以下のように求める。

$$Z_{rs} = 1 - \frac{S_{rs}^N}{S_{rs}^H}$$

$$K_{rs} = 1 - \frac{S_{rs}^W}{S_{rs}^O}$$

ここで、 $Z_{rs}$ は拠点rs間における脆弱度、 $K_{rs}$ は拠点rs間における改善度、 $S_{rs}$ は拠点rs間における期待所要時間である。また、期待所要時間は平常時N、災害後H、整備前（現状ネットワーク）Oおよび整備後（将来ネットワーク）Wの4つの状態を意味する。

最終的には表4に基づき防災機能ランク評価を行う。また、対象事業の寄与の程度を評価する為に、整備前後の期待所要時間を基に改善度を求める。

表-4 防災機能ランクの評価<sup>注3)</sup>

評価ランク	脆弱度	災害後の期待所要時間
A	0	平常時と同じ期待所要時間
B	0より大～1/3未満	平常時の1.5倍未満の期待所要時間
C	1/3以上～1未満	平常時の1.5倍以上の期待所要時間
D	1	災害後には到達不可能

計測の結果、当該事業の実施により、防災機能ランクが改善される場合は「◎」、防災機能ランクに改善が見られないものの脆弱度の値の改善が見られる場合は「○」として評価する。

また、道路事業評価で用いられている防災機能の評価手法においては、金銭換算を行い費用便益分析に計上することは、需要量を加味する事により地方部で便益が小さくなる事、需要や災害後の発生確率を設定する事が難しいこと等を踏まえて、需要量を考慮しない拠点間の接続性にのみ着目している。

(2) 鉄道事業への適用

道路事業評価で用いられている防災機能の評価手法を参考に、本ケーススタディに適用した場合を検討する。

a) 前提条件

A都市・B都市間において、幹線鉄道①と幹線鉄道③の異なる2路線が存在する状態を想定する。また災害後は幹線鉄道①が不通になることを想定する。これは幹線鉄道②に容量制約があり、幹線鉄道②を利用できず幹線鉄道③を利用する旅客の所要時間に与える影響が大きいことによる。

b) 算出結果

存在するとした2路線のうち、それぞれの時点で最短となる路線の所要時間を基に算出した。算出結果は表-5のとおり表せられる。

表-5 A都市・B都市間における幹線鉄道③整備による防災機能ランクと改善度

A都市→B都市	所要時間（分）				評価
	整備前		整備後		
鉄道路線	平常時	災害後	平常時	災害後	
幹線鉄道①	220		220		◎
幹線鉄道③(全区間)			290	290	
幹線鉄道③(一部区間)	330	330			
最短所要時間	220	330	220	290	
脆弱度	0.33		0.24		△ 0.09
防災機能ランク	C		B		◎
改善度			0.00	0.12	0.12

※ 公共交通機関の所要時間は、アクセス・イグレス時間及び乗り継ぎ時間を考慮する。

防災機能ランクは整備により C から B に改善され、脆弱度は 0.09 減少、改善度は 0.12 増加していることから、評価は「◎」である。

以上の検討においては、複数経路がある場合は最短所要時間経路のみで計測していること、鉄道固有のサービス水準（運行頻度等）を考慮していないことに留意する必要がある。

## 6. まとめ

本研究では、幹線鉄道の整備によるリダンダンシー効果を把握することを目的に、鉄道事業の評価指標の一つである便益計測を用いた方法でケーススタディを行った。今回設定したシナリオ及び算出方法では効果は限定的であったが、引き続き様々なシナリオや、適切な経路選択肢集合の設定など、算出方法の検討を行いたい。

また、道路事業の評価指標である国土交通省道路局における防災機能の計測手法を幹線鉄道に対して行い、定性的な評価を行った。

引き続き、より適切な算出方法の検討を行い、幹線鉄道のリダンダンシー効果の評価につなげていきたい。

謝辞：本調査研究に際してご助言、ご示唆頂きました岩倉先生他皆様に謝礼申し上げます。

## NOTES

- 注1) 内閣府（中央防災会議、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ）「南海トラフ巨大地震対策について（最終報告）」、p.1-2, 2013.5.
- 注2) 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年改訂版）」第1編、p.6-7, 2012.7
- 注3) 国土交通省 道路局 都市局「道路の防災機能の評価手法(案)」、p.4, 2016.2.
- 注4) 国土交通省 道路局 都市局「道路ネットワークの防災機能の向上効果計測マニュアル(案)」、p.1-11, 2016.2.
- 注5) 国土交通省 鉄道局「費用便益分析における将来交通需要推計手法の改善について」、p.3-1-3-13, 2010.11.

## REFERENCES

- 1) 浅見均：代替ルート構築によるリンク途絶時の社会的損失緩和、機関誌 運輸政策研究 Vol.7 No.2 2004 Summer（通巻 025 号）[Asami, H : Mitigating Social Costs of the Emergency Service Interruption by Developing an Alternative Route—The Case of Tokaido Shinkansen—*Journal of Transport Policy*, Vol.7 No.2 2004 Summer (Total No.025) ]
- 2) 今井寛樹, 浅見均, 高津俊司：東日本大震災における東北地方の幹線鉄道ネットワークの途絶状況に関する一考察、土木計画学研究・講演集, 44 巻 174 頁, 2011.11 [Imai H, Asami H and Tskatsu T : A study for link disruption of inter-regional railway network in Tohoku area on the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Civil Engineering Planning Research and Lectures*, Vol. 44, Issue 174, 2011.]

(Received ??, ?)

(Accepted ??, ?)

## A STUDY ON REDUNDANCY EFFECT OF INTER-REGIONAL RAILWAY NETWORK BY CATASTROPHIC EARTHQUAKES

Satoru MIYAMOTO, Takato KUBOTA, Yu KAWAHARA,  
Hiromu OKUSHI, Hideki YAGINUMA, Makoto CHIKARAISHI

When railway network is severely damaged in a major disaster, the economic and social losses must be very large. Therefore, it is expected that the transportation network needs to be multiplexed enough to minimize such losses and impacts. Accordingly, it is important to properly understand the effects of redundancy--preparing alternative routes to replace ones that may be disrupted by a disaster. --in order to mitigate disasters.

In this study, we conduct a case study about the transportation network damaged by a catastrophic earthquake. To evaluate the effect of redundancy of improving inter-regional railways based on the methodology for evaluating rail projects, we first set up earthquake damage and recovery scenarios, and then measure changes in the number of trips and benefits of inter-regional railways. In addition, we carry out applicability study on the approach of measuring disaster prevention and mitigate functions used in road projects to inter-regional railway and measure the effects of railway improvement focusing on connectivity between hubs.