論文

災害時における交通網リダンダンシーとその特性に関する研究
――12災害から見た災害時における交通機関の連携――

中島 弘貴　　岡田 啓

阪神・淡路大震災以降の激甚災害に相当する自然災害によって交通インフラの一部が使用できなくなった際に，交通網リダンダンシーはどのように機能したのであろうか．本研究は，交通網の被災と代替の歴史的事実を調査･集計し，交通リダンダンシーの特性について分析した．集計結果から，陸上交通は被災数が多く，海上交通と航空交通の被災数は少なかった．各交通機関は，災害時に代替として一定数利用されていた．また代替・被災比を用いると，新幹線と航空がリダンダンシーとして機能していることがわかった．集計結果を踏まえ，各交通機関のリダンダンシーを柔軟性と骨格性の２つの特性にて定性的に評価した．バス輸送を含む道路網と航空は高い柔軟性を有し，新幹線・JR 幹線や高速道路と船舶・航空は高い骨格性を有すると評価した．

キーワード：自然災害，交通機関，被災，代替，リダンダンシー

1. 研究の背景と目的

日本の国土は，地形・地質・気象といった条件の影響で，従来から度々自然災害により被害を受けてきた．阪神・淡路大震災以降の主要な自然災害についてまとめている内閣府（2022）[1] によると,2014年では11回，直近の2021年では５回と日本は断続的に災害に見舞われている（図１）．また，国土交通省がまとめている水害統計調査[2] によると，2019年には一般資産等被害額のみで１兆円を超える被害が生じている（図２）．

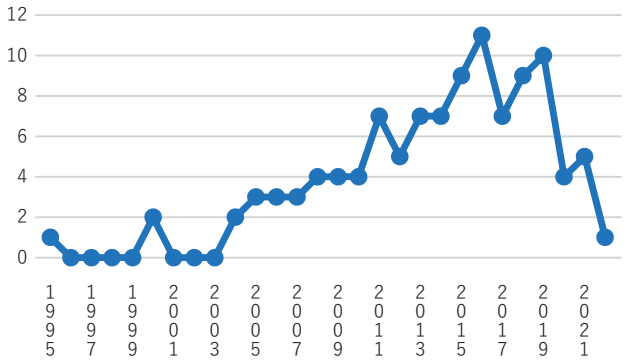

図１　阪神・淡路大震災以降の災害数推移

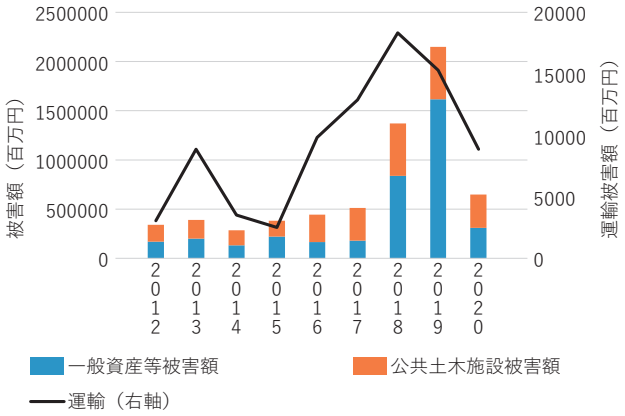

図２　水害に伴う被害額の推移

自然災害によって日常生活を支えるインフラは被災しており，交通インフラネットワークの一部も同時に被災する．例えば，後で詳述するが,2019年台風19号では，鉄道や高速道路などの交通が被災し不通となった．国土交通省（2020）[2] では，水害による運輸関連の被害額も調査されており，図２にあるように，毎年運輸関連の被害額が100億円程度計上されている．

災害にて交通機関の一部区間や施設が被災したとしても，日常的な移動や事業継続のための物流サービスは維持されることが望まれる．被災していない地域においては日常が継続しており，社会経済活動を円滑に存続させる必要がある．それに対し，公益事業として位置づけられる交通事業者は被災後も合理的な範囲と方法にて輸送サービスの提供が継続されることが希求され得る．多くの物流事業者においては，事業パートナーの事業継続や取引継続等の観点から被災後の物流サービスの継続が望

NAKASHIMA Koki
東京都市大学環境学部環境経営システム学科2022年度4年生
OKADA Akira
東京都市大学環境学部環境経営システム学科准教授

まれる．

ある区間が被災した折に総体的に交通サービスを維持するためには，交通網が持つネットワークという性質を活かし，被害を受けていない区間・経路がそれを代替・補完する交通リダンダンシー（冗長性）が必要となる．国土交通省（2012）[3]は「広域的なバックアップ体制や適切なリダンダンシーの確保等，陸海空が連携して移動・輸送手段の確保を図るための検討（中略）モード横断的な旅客代替輸送の確保を図るための検討を行っている」と述べ，災害時のリダンダンシーについて言及している．ここで，モード横断的輸送の確保についても国土交通省が見解を示している点は，留意すべきであろう．リダンダンシーの確保のため，政府は各種交通網の整備を戦後実施し，現在も新直轄方式による地方での高速自動車国道の建設を行なっている．

では，交通インフラネットワークの一部が自然災害により使用できなくなった際に，交通リダンダンシーはどのように機能したのであろうか．災害にてどの交通機関が被災したのか，被災後いかなる交通機関が代替を担ったのかについて，特定の災害においてはその調査，分析が存在する．しかし，筆者の調べた限りにおいては，交通機関の被災・代替について，複数の災害を調査し，俯瞰的に分析した研究は見当たらなかった．

そこで本研究は，阪神・淡路大震災以降の激甚災害もしくはそれに準ずる災害における各交通機関の被災と代替状況について調査し，集計や類型化を用いて交通リダンダンシーの特性について分析する．分析を通して，交通機関が被災した際に代替を通していかに連携しているのかも示唆する．そして調査と分析を踏まえ，リダンダンシーに関して交通機関別の特性を検証し示す．それに基づき，地方鉄道がリダンダンシーとなるための条件について考察を行う．

2. 調査対象とデータの収集方法

2.1 調査対象の災害

調査対象とする災害は，阪神・淡路大震災以降，激甚災害に指定されている事象を基本とし，交通支障について報じられたトピックが１つ以上あるものに限った．激甚災害の程度を示す本激，局激は問わないこととする．これは，社会経済活動の停滞や人命救助の必要性が出てくる災害に着目した定義である．他に激甚災害に指定はされていないものの，交通支障について報じられたトピックが１つ以上ある2021年福島県沖地震，日本海沿岸豪雪も調査対象として含めた．以上より，本研究の対象は12災害とする（表１）．

表１　調査対象の12災害

D-ID	災害名	発生年月	程度	タイプ
①	**阪神・淡路大震災**	1995/1	本激	地震
②	**有珠山噴火**	2000/3	局激	噴火
③	**新潟県中越地震**	2004/10	本激	地震
④	**東日本大震災**	2011/3	本激	地震
⑤	***熊本地震***	2016/4	本激	地震
⑥	***西日本豪雨***	2018/7	本激	水害
⑦	**東日本台風**	2019/10	本激	水害
⑧	***熊本豪雨***	2020/7	本激	水害
⑨	***2021年福島県沖地震***	2021/2		地震
⑩	***2022年福島県沖地震***	2022/3	局激	地震
⑪	東北・北陸集中豪雨	2022/8	本激	水害
⑫	日本海沿岸豪雪	2022/12		雪害

※***斜字***…報道で使用された正式でない災害名
細字…本論文で命名した正式でない災害名

2.2 調査対象の交通機関

調査対象の交通機関は，陸・海・空の輸送機関のうち，公共の利益に供する（公共）交通機関であるものとした．具体的には，鉄道，航空機，船舶，路線バス，及び自動車が走行する道路である．交通機関の被災と代替の数量を把握する方法は２種類用意した．被災・代替状況全数集計（表２）とは，被災した，もしくは代替を担った対象の数そのものを把握することを優先する集計方法である．被災交通機関別代替輸送状況集計（表３）では，被災した一交通機関に対し，どのような交通機関の路線を代替として使用したか把握することを念頭に置いた集計方法である．結果，表２と表３では一部で単位が異なる．

交通機関の被災とは，一般利用ないし緊急輸送道路などの緊急輸送において72時間以上不通であった場合とした．東京都帰宅困難者対策条例[4]では非常備蓄の基準が３日分とされ，また災害時において人命救助の生存率が急減するのが72時間と言われている．これらを踏まえると，発災後72時間以内の輸送手段全面復旧，もしくは緊急物資・人員輸送を開始し，被災地への交通アクセスを確保することが望まれる．よって，72時間を被災の起点とした．

交通機関における代替は，一度でも不通となった交通機関とは異なる交通機関や経路を用いて輸送を行うこと，ないしそれが明らかに想定された輸送，または，緊急輸送道路などの緊急車両限定であっても明らかに代用手段として活用されている輸送と定義した．対象災害発生後，振替輸送や明らかな増発など輸送力強化が行われているものを主に集計した．なお，被災の後に早期復旧し，未復旧交通機関の代替として機能したもの，並びに被災区

表２　被災・代替状況全数集計における交通機関の定義及び集計単位

種類	種名	表記号	定義	集計単位
鉄道	新幹線	RS	全国新幹線鉄道整備法に適合する路線、ないしそれに直接直通する路線（新在直通路線）	路線
	JR線	RJ	元国鉄の旅客鉄道(JR)によって運行される、新幹線以外の路線	路線
	私鉄線	RP	新幹線・JR線に適合しないすべての旅客鉄道。私営・公営・第三セクター問わない各鉄道	路線
航空	空港	AP	以下いずれかを満たす空港 ①空港法第４条第１項各号に掲げる空港 ②空港法第５条第１項に規定する国際航空輸送網又は国内航空輸送網を形成する上で重要な役割を果たす空港 ③空港法第２条に規定する空港のうち、拠点空港、地方管理空港及び公共用ヘリポートを除く空港 ④空港法附則第２条第１項に規定する空港	港
船舶	内航船	CV	国内フェリー・旅客船、貨物船が運航する区間	路線
	港湾	OV	港湾法第２条第２項によって定義されている港湾	港
道路網	高速道路	HW	高速自動車国道・自動車専用道	路線
	国道	NW	一般国道の路線を指定する政令で指定された道路。直轄国道・補助国道問わない	路線
	都道府県道	PW	道路法に基づき、都道府県知事が認定し、当該行政が管理する道路。主要地方道・一般都道府県道問わない。またはそれに相当する道路。広域農道といった高規格農道なども含む	路線
バス輸送	バス輸送	BS	日本国道路運輸法における一般乗合旅客自動車運送事業の許可を受けて運行されるバス、または鉄道代行バスとして鉄道会社より公式に案内の出ている貸切バス	路線

表３　被災交通機関別代替輸送状況集計における交通機関の定義及び集計単位

種類	種名	表記号	定義	集計単位
鉄道	新幹線	RS2	全国新幹線鉄道整備法に適合する路線、ないしそれに直接直通する路線（新在直通路線）	路線
	JR幹線	RJM	元国鉄の旅客鉄道によって運行される路線の内、幹線運賃が適用される路線	路線
	地方交通線	RJL	元国鉄の旅客鉄道によって運行される路線の内、地方交通線運賃が適用される路線。及び、元国鉄・JRの路線であったないし鉄道建設公団で建設された路線などなる予定であった路線のうち、調査対象の災害発生時にJR以外の手法で運行されていた路線	路線
航空	空路	AR1	日本を拠点として運行されている国内航空便（ANA・JALとその系列、またスカイマーク・フジドリームエアラインetc.)。なお、同じ区間を運行する別会社の運行、およびコードシェア便は考慮せず、運行区間（発着空港）のみを基準とする。運航母体の出資先などは考慮しない	路線
船舶	内航船	CV2	国内フェリー・旅客船、貨物船が運航する区間	路線
	港湾	OV2	港湾法第２条第２項によって定義されている港湾	港
道路網	高速道路	HW2	高速自動車国道・自動車専用道	路線
	国道	NW2	一般国道の路線を指定する政令で指定された道路。直轄国道・補助国道問わない	路線
	都道府県道	PW2	道路法に基づき、都道府県知事が認定し、当該行政が管理する道路。主要地方道・一般都道府県道問わない。またはそれに相当する道路。広域農道といった高規格農道なども含む	路線
バス輸送	高速バス	EBS	一般乗合旅客自動車運送事業の許可を受けて運行されるバスのうち、高速自動車国道・自動車専用道路を走行するないし走行すると想定できる距離を走るバス。なお、全く同じ区間・系統を運行する場合、会社の違いは考慮せず、すべて含めて1路線とする	路線
	路線バス	SBS	一般乗合旅客自動車運送事業の許可を受けて運行されるバスのうち、高速バスに当てはまらないバス、及び鉄道代行バスとして鉄道会社より公式に案内の出ている貸切バス。	路線
	タクシー	TXB	高速バス・路線バスに当てはまらない運賃を徴収しないが乗客を選ばないバスの路線数。または利用者の予約に合わせて運行されるものを含むデマンドバス。及び、鉄道会社など他の公共交通機関が振替輸送として用意したタクシーの走行が明らかに想定される道路	路線

間と代替区間が離れており両者が同じ路線名のものについては，被災・代替両者に重複しているものが存在する．

2.3　データの収集方法

本研究のデータは主に国の省庁の発信情報か交通各社の情報から収集した．国の省庁の情報は，国土交通白書（運輸省時代は運輸白書），国土交通省報道発表資料，内閣府の災害情報から取得した．交通各社の情報は，各社の公式ウェブサイトやインターネットアーカイブであるWayback Machineにて検索・観覧可能な運行状況，プレスリリースを渉猟した．専門的な運輸の扱いにおいては，交通の専門オンラインニュースサイト，並びに研究論文・災害調査報告書に依拠する場合もある．

3.　災害による交通機関の被災と代替に関するケーススタディ

3.1　ケーススタディにおける交通機関の被災

本章では，2019年10月12日前後に発生した台風19号（令和元年東日本台風）による被害を事例として，被災・代替のデータ収集や集計方法を概観する．

令和元年東日本台風は，2019年10月12日に約955hPaで伊豆半島に上陸した台風であり，同月14日頃までに大雨特別警報が最大で１都12県に発令された．本台風による降雨は神奈川県箱根で1000mm以上に達し，関東甲信越・東北地方の多数の地点で3，6，12，24時間降水量の記録を更新した．この大雨に伴い142箇所で堤防が決壊するなど，河川の越水や氾濫が各地で発生した．これらの影響もあり，本台風では死者104名，負傷者384名[5]，住家の全半壊等27,684棟，住家浸水59,716棟[9]の被害が生じた．

本台風による全ての被災交通機関と路線は，内閣府（2019）[5]に記載されている名称を抽出し，各種定義と照らし合わせることで整理を行った（表4, 表５）．内閣府（2019）[5]では，台風による被害状況を日時別かつ公共インフラ・サービス別に報告している．交通に限ると，道路（高速道路，直轄国道，補助国道，都道府県道，一部の重要な市町村道）については被災道路番号か路線名とその状況，鉄道については被災路線名と保有する事業者数，空路と航路では港の被災状況と欠航路線・欠航便数，高速バスでは運休路線数とそれを運営していた事業者数が記載されている．

この台風で被災した主な公共交通機関は，北陸新幹線と中央本線（中央東線）である（図３）．内閣府（2019）[5]の10月25日現在の資料にて「ＪＲ東日本 北陸新幹線 長野～上越妙高については10月25日始発より運転再開」，「ＪＲ東日本 中央線 四方津駅～梁川駅間 土砂流入，高

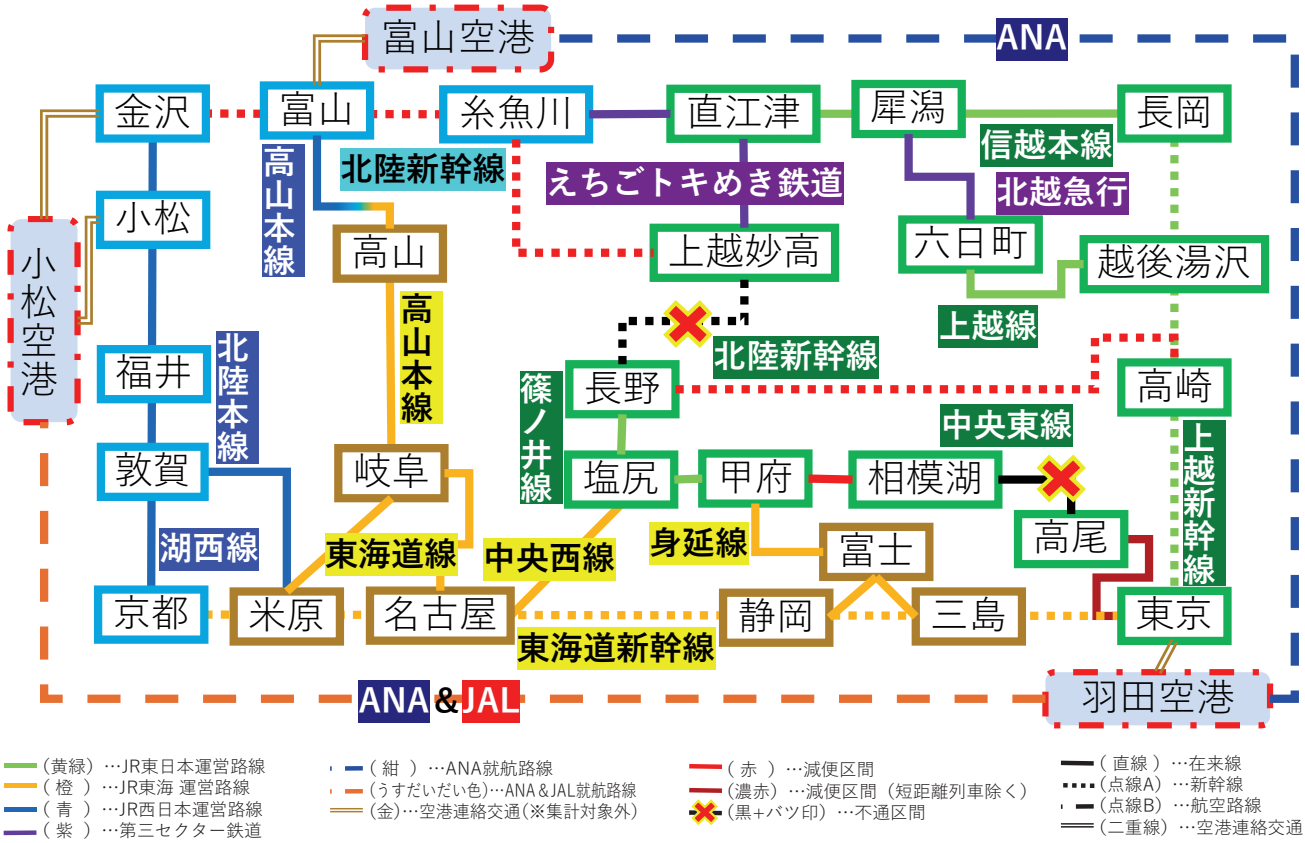

図３　東日本台風に伴う公共交通機関の被災と代替状況（道路網を除く）

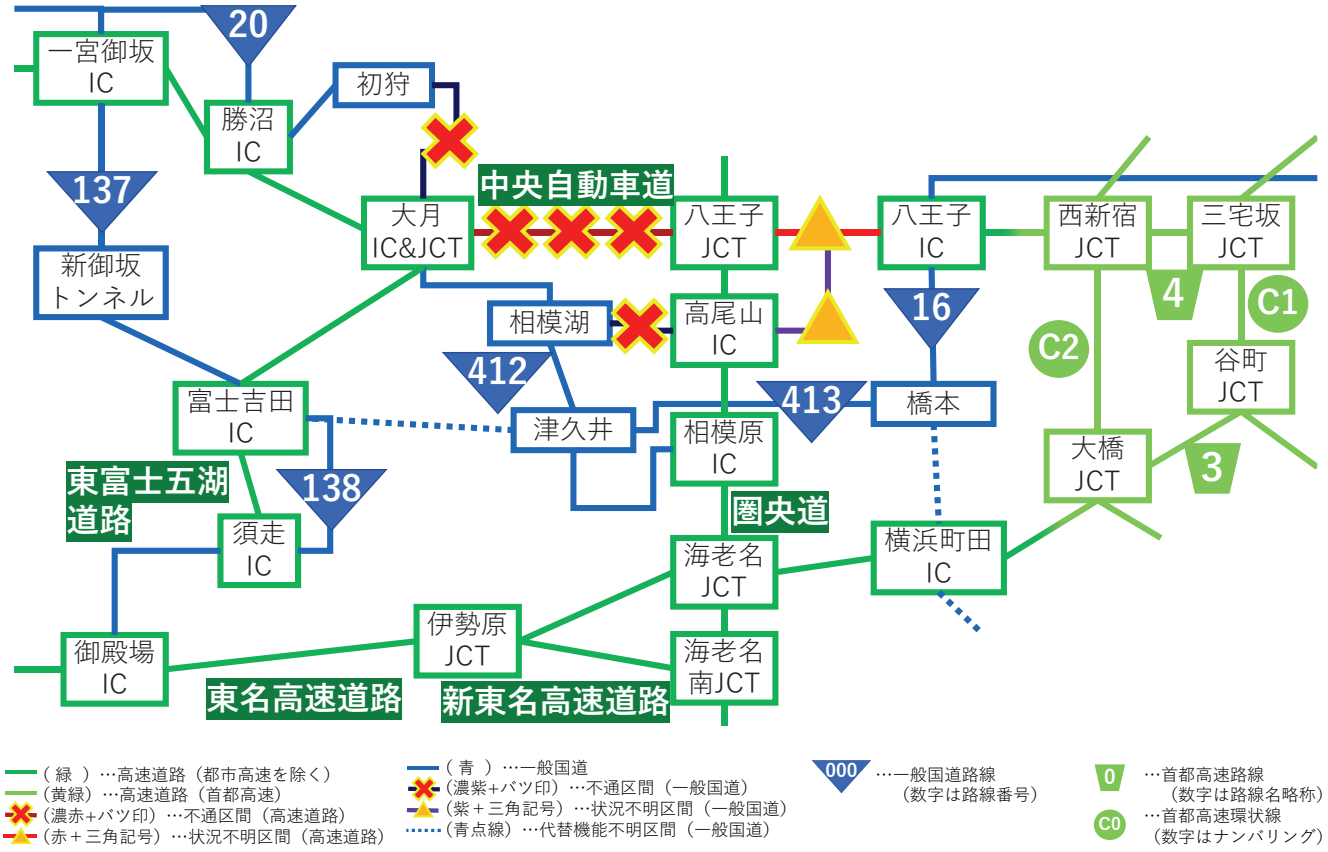

図４　東日本台風に伴う道路網の被災と代替状況

尾～相模湖 土砂流入，のり面崩壊<首都圏と山梨県・松本方面とのアクセスに制限有り．代替ルートを設定〉」と報告されている．そして，北陸新幹線は本線設備に加え，長野新幹線車両センターが水没，留置中車両（E７/W７系）120両が廃車となった．北陸新幹線は電源周波数が途中で変わるなど特殊路線であり他路線車両は使用できないため，路線復旧後も減便を余儀なくされた．この２路線の被災は代替輸送状況集計に基づくと，RS２が１本，RJM１本と集計される．

道路網の被災は各地で発生したものの，とりわけ八王子から甲府の間で土砂流入や冠水が発生し，同区間の主要経路である中央自動車道と国道20号が通行止めとなった．内閣府（2019）[5]の10月15日現在の資料にて「E20 中央道八王子 JCT～大月 IC　のり面崩落３箇所 延長35.4km 全面通行止め：10/12 10:00～」「国道20号 法雲寺橋　山梨県大月市初狩町下初狩　橋脚洗掘による落橋の恐れ　本雲寺橋　延長 64m 全面通行止め：10/12（土）15:45～」などと被害が報告されている．この２路線の被災は代替輸送状況集計に基づくと，HW２が１本，NW２が１本と集計される．都市間の高速道路と国道は，片方が通行不能の際にもう一方が迂回路となる．しかし，本台風では両者が被災し，この運用は出来なかった．更に，並行する鉄道である中央本線も被災したため，八王子―甲府間は完全に寸断された．そのため，東京と山梨・諏訪間の早急な代替手段の設定が求められた．

結局，本災害による被災全体を全数集計の定義を用いて示すと，被災路は表４の被災の行のようになり，その数値は表６の⑦の行に示される数値になった．

3.2　ケーススタディにおける交通機関の代替

代替路線は，被災した交通機関を運営する企業が発表した振替輸送案内もしくは，被災交通機関の振替輸送を担った交通機関に関係する企業もしくは行政のプレスリリースを収集し，その確定を行う．例えば西日本旅客鉄道（2019）[6]では，被災した北陸新幹線の長野―上越妙高間の不通に伴い，経路図を用いつつ，東京―米原間が東海道新幹線，その後，特急しらさぎ号に乗り継ぎ金沢に到着する等の東京―富山・金沢の４つの代替手段が紹介されていた（図３参照）．国土交通省関東地方整備局（2019）[7]では，中央自動車道と国道20号の八王子―甲府間の不通に伴い，地図を用いつつ，高速道路などによる御殿場への迂回ルートなど複数の迂回手段が示されていた．代替全体を把握するために全数集計の定義を用いると，代替路は表４の代替の行のようになり，その数値は表７の⑦の行に示される数値になった．

表4　東日本台風による交通機関の被災と代替状況

	新幹線	JR線		私鉄線	高速道路	国道(旧1級)	国道(旧2級)		都道府県道	バス輸送	航空	内航船
被災	北陸新幹線	東北本線 八戸線 陸羽西線 陸羽東線 左沢線 仙山線 仙石線 石巻線 気仙沼線 米坂線 磐越西線 磐越東線 只見線	常磐線 中央線 両毛線 吾妻線 水郡線 久留里線 飯山線 篠ノ井線 小海線 八高線 青梅線 外房線	東武鉄道佐野線 東武鉄道日光線 京王電鉄高尾線 京王電鉄動物園線 小田急電鉄小田原線 山形鉄道フラワー長井線 阿武隈急行阿武隈急行線 秩父鉄道秩父本線 小湊鐵道小湊鉄道線 箱根登山鉄道鉄道線 (山岳区間) えちごトキめき鉄道妙高はねうまライン 北越急行ほくほく線 しなの鉄道北しなの線 しなの鉄道しなの鉄道線 上田電鉄別所線	上信越道 中央道 圏央道 東北中央自動車道 三陸沿岸道路 西湘バイパス(国道1号) 中部横断自動車道	国道4号 国道18号 国道20号 国道45号 国道49号 国道50号 国道52号 国道73号	国道113号 国道114号 国道140号 国道141号 国道142号 国道143号 国道144号 国道145号 国道146号 国道152号 国道252号 国道254号 国道289号 国道292号 国道294号 国道299号	国道346号 国道347号 国道349号 国道352号 国道355号 国道398号 国道399号 国道400号 国道403号 国道406号 国道407号 国道410号 国道412号 国道413号 国道418号 国道456号 国道457号 国道461号	(調査対象外)	(調査対象外)	(当該なし)	(当該なし)
代替	東海道新幹線 上越新幹線	東海道線 信越本線 高崎線 上越線 白新線 羽越本線 奥羽本線	中央西線 北陸本線 湖西線 身延線 高山本線	えちごトキめき鉄道 日本海ひすいライン えちごトキめき鉄道 妙高はねうまライン あいの風とやま鉄道線 IRいしかわ鉄道線 北越急行ほくほく線	東名高速道路 新東名高速道路 東富士五湖道路 東北自動車道 圏央道	国道4号 国道16号	国道137号 国道138号 国道292号 国道412号 国道413号		梨県道56号 山梨県道510号 群馬県道59号 群馬県道112号 長野県道60号 つまごい パノラマライン (北ルート) 北信五岳道路 (広域農道)	長野原草津口ー大前 (吾妻線代行) 寄居ー北藤岡（八高線代行) 佐野ー栃木（両毛線代行) 新白河ー安積永盛 (東北本線代行) 本宮ー松川（東北本線代行) 階上ー久慈（八戸線代行) 郡山ー小野新町（磐越東線代行) 箱根湯本ー強羅 (箱根登山電車代行) 上田ー城下（上田電鉄代行)	羽田空港 富山空港 小松空港	東京港ー 苫小牧&釧路港 (JRF代行) 舞鶴港ー小樽港 (JRF代行)

表5　東日本台風に伴う被災交通機関別代替輸送状況集計
（北陸新幹線・中央東線・中央自動車道・国道20号に対して）

被災	代替								
	新幹線	JR幹線	地方交通線	高速道路	国道	都道府県道	バス輸送	航空	航船
北陸新幹線	上越新幹線 東海道新幹線	信越本線 東海道本線 湖西線 北陸本線 上越線	高山本線 北越急行ほくほく線 えちごトキめき鉄道 妙高はねうまライン えちごトキめき鉄道 日本海ひすいライン				東京ー 富山線 名古屋ー 富山線	羽田空港ー富山 空港（ANA) 羽田空港ー小松 空港（ANA&JAL)	
中央東線	東海道新幹線	東海道本線 中央西線	身延線						
中央自動車道 &国道20号				東名高速道路 新東名高速道路 東富士五湖道路 圏央道	国道16号 国道137号 国道138号 国道412号 国道413号	山梨県道56号 山梨県道510号			

表注：空欄の部分は該当する路線が無いことを意味する。

本台風による代替路線として，広域迂回，他の陸上交通機関，そして航空路線が活用された（表5）．中央東線の代替として，地方交通線（RJL）である身延線が用いられていることから，RJLの1本が代替として機能したというデータを得る．北陸新幹線の代替として，他のJR線に加え地方鉄道を使用した広域迂回と，航空機や高速バスが使用された．このうち，鉄道の代替パターンは西日本旅客鉄道（2019）[6]より新幹線と在来線を乗り継ぐ形態であり，名古屋・敦賀を経由する西回りと，直江津を経由する北回りが使用された．高速バスは東京・名古屋と富山を結ぶ経路で，航空は東京と富山・金沢を結ぶ経路で代替が実施された（図3）．北陸新幹線の代替は，代替輸送状況集計の定義に沿うとRS2が2本，RJM5本，RJL4本，EBS2本，AR1が2本というデータになる（表5の北陸新幹線の行参照）．中央自動車道・国道20号という道路の代替としては，国土交通省関東地方整備局（2019）[7]より御殿場を経由する広域迂回が用いられた．国道20号では津久井（三ケ木）を経

由する近距離迂回も実施された（図４）．こちらは，HW２が４本，NW２が５本，PW２が２本というデータとなる（表５の中央自動車道＆国道20号の行参照）．

４．被災・代替の集計結果とその特徴

４.1　被災・代替状況の全体集計

表２に基づく全数集計の結果から，陸上交通は被災数が多く，対して海上交通と航空交通の被災数は少ないことが判明した（表６）．被災数の多い陸上交通機関の中においても，JR在来線は調査した全12災害で被災が確認されており，平均被災路線数も10路線と全体で２番目に多い．国道は調査対象内で被災路線数がゼロとなったことが２例確認されたものの，平均被災路線数が12路線と最多である．私鉄線や高速道路もこれに次いでいる．海上交通は阪神・淡路大震災と東日本大震災を除くと被災数は限られ，航空は津波被害と雪害に伴う長期欠航による被災が１事例ずつ確認されたのみである．

交通機関の代替を全数集計した結果，陸・海・空の交通機関が，災害に拘わらず，一定数利用されていた（表７）．新在直通運転を含めて10路線（2023年1月時点）のみの新幹線や，都市間旅客交通としての役割が小さい内航船と都道府県道は平均代替数が相対的に小さく見える．だが，総じてみると，災害発生後に使用・利用できる交通機関は代替として一定程度活用されているといえる．

災害における交通機関の被災・代替状況を全数集計の平均値にて概観すると，新幹線と航空がリダンダンシーとして特に機能していると言える．これは，１災害あたりの被災数が少なく，かつ１災害あたりの代替数が多いことに起因する（表８）．航空は被災が２事例に対して代替事例が多数存在しており，代替・被災比（[代替/被災]）が31.00となった．よって，航空はリダンダンシーとして機能していると言える．他方，新幹線を除く鉄道や道路網と船舶は，被災・代替数に多寡はあれ，平均被災数が平均代替数を上回っている．これらは，新幹線を除く陸上交通機関と海上交通機関にはリダンダンシー機能に一定の限界があることを示している．

4.2　被災原因別被災交通機関の集計

交通機関の被災原因は，被災交通機関によって異なり，津波を含む地震災害ではすべての交通機関が被災したが，水害，火山噴火，豪雪では被災する交通機関に差異が生じた（表９）．

新幹線と船舶は，地震による被害が他の交通機関よりも多い．地震による被害は震源地との距離か震度・加速度に応じてその被害の大小が決まるため，敷設距離が長い路線やネットワークを形成している鉄道・道路，各地に多数点在する港がその被害を受けやすい．新幹線は地震で高架橋や架線が被害を受けると，それを復旧するにあたって高い技術精度が要求されるため，運転再開までに必要となる時間は長くなる．内航船は発着・経由地となる港が被災し使用できなくなると，路線が欠航となるケースが多い．東日本大震災では，関東・東北地方の太平洋沿岸の港が被災し，欠航路線が拡大した．他方，航空は空港設備が津波で被災しない限り地震によって被害を受けていない．

水害による被害は地上の設備で発生し，JR在来線や国道では被害が顕著に出てくる．これは,1940年代以前に建設された路線は渓谷に沿って建設された区間が多く

表６　12災害における交通機関の被災数

D-ID	RS	RJ	RP	AP	CV	OV	HW	NW	BS	総計
①	2	4	15	0	0	24	3	2		50
②	0	1	0	0	0	0	1	3		5
③	1	5	1	0	0	0	2	3		12
④	3	32	13	1	18	9	21	8		105
⑤	1	4	10	0	1	1	3	11		31
⑥	0	24	6	0	3	0	16	25		74
⑦	1	25	15	0	0	0	7	42		90
⑧	0	6	4	0	2	0	3	27		42
⑨	3	1	0	0	0	2	1	0		7
⑩	3	2	1	0	0	1	0	1		8
⑪	0	8	3	0	0	0	3	17		31
⑫	0	11	0	1	0	0	0	0	79	91
平均	1	10	6	0	2	3	5	12		46

表７　12災害における交通機関の代替数

D-ID	RS	RJ	RP	AP	CV	OV	HW	NW	PW	BS	総計
①	0	5	0	7	12	9	2	1	0	7	43
②	0	1	0	3	4	0	0	5	4	1	18
③	3	5	0	2	0	0	4	3	0	4	21
④	1	12	7	14	2	3	10	20	2	63	134
⑤	0	1	0	7	3	0	3	3	1	0	18
⑥	1	4	1	3	14	0	5	2	3	35	68
⑦	2	12	5	3	2	0	5	7	7	9	52
⑧	1	0	0	0	0	0	2	1	0	14	18
⑨	1	7	5	13	0	0	2	2	0	13	43
⑩	1	7	5	10	0	0	0	0	0	11	34
⑪	6	10	4	0	1	0	13	8	4	20	66
⑫	1	3	0	0	0	0	15	0	0	5	24
平均	1.4	5.6	2.3	5.2	3.2	1.0	5.1	4.3	1.8	15	44.9

表８　12災害における交通機関の被災・代替状況の平均値

	高速鉄道	在来線鉄道	バス※1	道路網	航空輸送	船舶輸送	総計
被災	1.17	15.92	79	16.58	0.17	5.08	45.50
代替	1.42	7.83	15.17	9.42	5.17	4.17	44.92
代替/被災	1.21	0.49		0.57	31.00	0.82	0.99

※1…被災は「日本海沿岸豪雪」のみ集計、代替は全災害集計の平均値である。

存在することに起因する．これに対し，高速輸送に耐えうるよう（高規格で）建設されている新幹線や高速道路では被害が抑えられている．なお，航空は地震同様に空港設備が風雨により被災しない限り，その運航に影響はない．

噴火においては火口から風向きと距離に応じて周囲に被害をもたらし，被害は噴煙を除き地上に限定されるのであるが，噴火災害による交通への被害は事例が少ないため，被害の傾向を示すことは難しい．新幹線沿線の噴火事例は2023年１月現在確認されない．そして，豪雪による交通への影響は，すべての交通機関に及ぶものの，災害として激甚災害に区分されるケースは少ない．

表９　被災原因別交通機関の被災数（表２の定義に基づく）

交通機関種類		RS	RJ	RP	AP	CV	OV	HW	NW
調査対象数		14(※)	123	68	2	24	37	60	139
被災原因（内訳）	地震	13(※)	48	40	1	19	37	30	25
	水害	1	63	28	0	5	0	29	111
	噴火	0	1	0	0	0	0	1	3
	豪雪	*0*	*11*	*0*	*1*	*0*	*0*	*0*	*0*

(※)山形新幹線は東京ー新庄、秋田新幹線は東京ー秋田の路線として集計する

4.3　鉄道における代替状況の集計

同じJRに関連する旅客鉄道による鉄道路線ながら，代替輸送状況集計に基づいて新幹線，JR幹線，地方交通線と分離して集計すると，被災に伴う代替手段の種類や使用数は異なる．まず，中・長距離輸送を担う新幹線（RS２）の代替としては，長距離輸送で競合関係にある航空（AR１）と，中距離輸送で競合関係にある高速バス（EBS）が占めている（図５）．AR１は被災する可能性が低く，空港が全国各地に既設されているために新幹線の代替としての役割を果たしている．EBSは，所要時間が新幹線と比して増加するものの，道路が持つネットワークを活用できると同時に，道路の復旧や迂回に対応できることから中距離の代替を担う．両者は共通して地点間輸送を担うため，新幹線の被災１路線の代替に求められる路線数は多岐にわたる．ここで，図示の都合から図５の中には災害④によるRS２の代替状況を含めていないのであるが，災害④の代替状況は災害⑨と同様の傾向を示していた．

次に，短・中距離輸送を担うJR幹線（RJM）の代替は，被災した路線に応じて複数の代替手段が使用されている（図６）．例えば，災害⑪に伴い北陸本線が不通となった際の代替として，RS２と他のJR線（RJM・RJL）を用いた迂回が実施された．東海道新幹線と北陸新幹線が代替の基幹を成し，中央西線や篠ノ井線，高山本線を走行する特急列車も活用された．同区間を走行するEBSは，敦賀・武生間の道路網が悉く使用できない状況になったが，東海北陸自動車道経由の迂回運行を行うことで，北陸本線の代替としての機能を果たした．災害⑥に伴う呉線の被災では，並行する国道が暫定復旧することで鉄道代行バスが運行した．その他，広島（宇品）港・呉港間相互を経由するフェリー・高速船では当該区間の旅客定員を増やし，呉線災害時緊急輸送船を始めとした臨時船が設定され代替輸送を行った．このように，RJMの代替は被災した路線の地域特性によって異なる．

第三に，地域の旅客を担うRJLの代替は，路線バス相当の鉄道代行バス（SBS）によって大半が担われ，一部のみデマンドバス（TXB）が使用される（図７）．これは，地域旅客は長距離の迂回による代替が適さず，バスで輸送力が足りるためである．中でも，存廃が議論される津軽線の非電化区間や肥薩線の代替でTXBが使用された．災害⑧による肥薩おれんじ鉄道や災害⑪によるIGRいわて銀河鉄道の被災では，並行する新幹線が代替として機能した．これらは整備新幹線開通に伴いJRから切り離された並行在来線であり，元々がRJMであったことから実質的にはRJMの代替に準ずる．災害⑪に伴う米坂線不通の代替として，特定地方交通線としてJRから切り離された山形鉄道が用いられた．

最後に，鉄道貨物輸送の中でも日本貨物鉄道（JRF）の代替は，貨物列車の迂回運行と，貨物自動車もしくは船舶を使用した代替が実施された（図８）．災害⑦に伴い東北本線が不通となった際，RJMである上越線や日本海縦貫線を使用した迂回運転が実施された．宇都宮・仙台間で貨物自動車による代替輸送が，東京港―北海道間と舞鶴港―小樽港間では船舶による代替輸送が実施された．

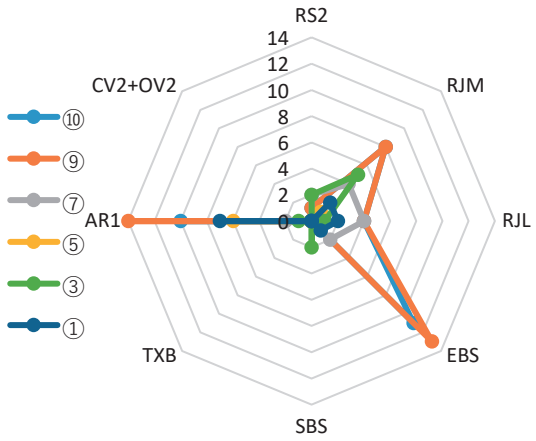

図５　新幹線（RS2）の被災に伴う代替手段の利用数

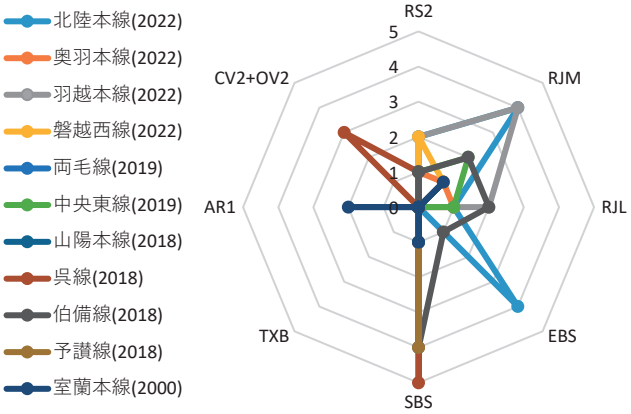

図６　JR 幹線（RJM）の被災に伴う代替手段の利用数

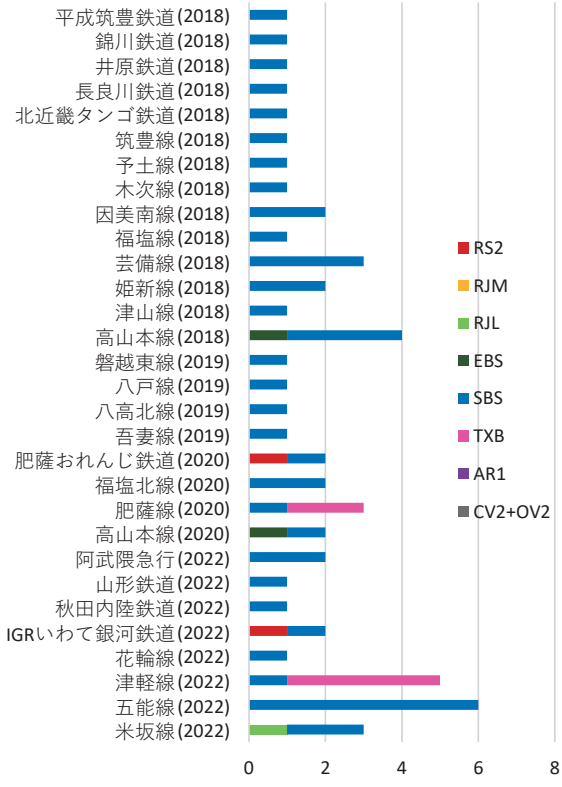

図７　地方交通線（RJL）の被災に伴う代替手段の利用数

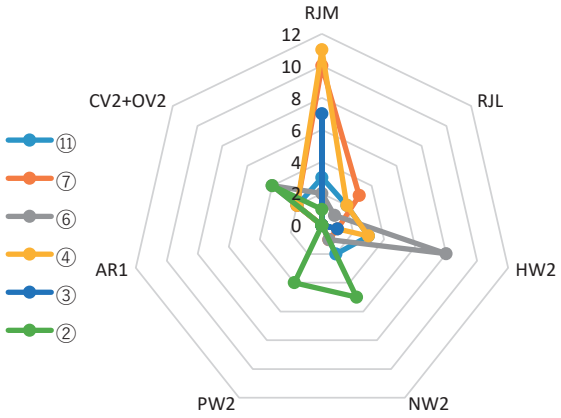

図８　鉄道貨物輸送（JRF）の被災に伴う代替手段の利用数

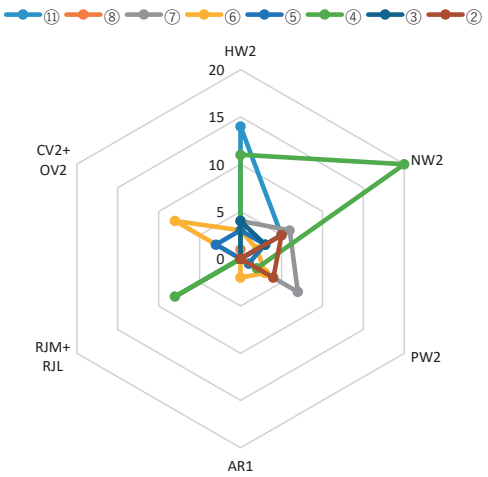

図９　道路網（HW＋NW）の被災に伴う代替手段の利用数

4.4　高速道路と国道における代替状況の集計

自動車が通過できるインフラは道路以外では制約があるため，高速道路と国道の代替には被災道路とは別の道路網が使用される（図９）．多くの場合は被災した道路に隣接した道路が代替経路として用いられるため，その数は限定される．隣接の道路・経路がもれなく被災した場合は，道路網を用いた広範な迂回が実施されることにより，代替経路の数は極端に増加する．災害⑪では福井県の敦賀―武生間の全道路被災に伴い，迂回経路は岐阜県の郡上・美濃地域までの広域に及んだ．災害④においては三陸海岸の主要道路である国道45号のほぼ全区間において代替経路の確保が求められ，内陸部にある東北自動車道と国道４号を代替経路の軸に据え，旧二級国道などにより三陸海岸各地に至る通称「くしの歯作戦」が実施された．同災害では自動車の不足や輸送力の観点から鉄道貨物が貨物自動車による輸送の代替として使用された．災害⑧では中国地方の多くの道路が損壊し，紀伊水道や瀬戸内海を航行するフェリー航路が近畿・四国・九州間の代替交通として機能した．当該フェリーに貨物自動車が載ることで，物流ルートの代替としても機能した．

5. 交通機関別のリダンダンシー特性

5.1 交通リダンダンシー特性の抽出

全数集計，及び代替輸送状況集計の結果を俯瞰すると，リダンダンシーは柔軟性と骨格性という２つの特性を用いることで定性的に評価でき得る．ここで，柔軟性とは，発災後速やかに被災地への救援物資や被災地発着の人員の輸送を行うため，迅速に代替ルートを活用できる機動力や，被災後早期に復旧できる復元力を確保できることを意味する．柔軟性は，各輸送機関で使用される輸送車両・機材の違いや特徴により変化し，輸送機関内の差異による影響力は小さい．例えば自動車は，重量や幅員制限により走行路線は制限されるが，特殊例を除いて車線数や路面状況といった道路状況に左右されない．一方，鉄道車両の制限は車両限界や電化方式，保安装置と多岐にわたり，原則として他線区への入線は難しい．

骨格性とは，設備や安全技術等により災害をかわすことで被災確率を低減する高規格性や，一度に大量の物資や人員を輸送できる輸送力が確保できることを指す．骨格性はインフラ投資との関わりが強くなるため，国土計画において重視されている交通機関がこの性質を持つ．具体的には，国際港やハブ空港，新幹線である．

柔軟性と骨格性という２つの特性を有する交通機関はリダンダンシーとして機能し得ると言える．柔軟性を有することは，通常時と異なる状況下・手段であっても交通機関のパフォーマンスを発揮できるためである．骨格性を有することは被災せずに輸送サービスを継続できるか，代替の伴う短期的な需要増加に応じる輸送力が確保できるためである．

5.2 各交通機関の交通リダンダンシー特性

各交通機関により，２つの特性の持ち様は異なるが，バス輸送を含む道路網と航空は高い柔軟性を有し，高規格鉄道（RS２・RJM）や高速道路，また陸上交通ではない船舶・航空は高い骨格性を有すると評価できる（表11）．

表11　交通機関のリダンダンシー特性

	柔軟性	骨格性
RS2	×	◎
RJM	△	○
RJL	×	×
HW2	○	○
NW2	○	△
PW2	△	×
AR1	◎	○
CV2+OV2	△	○

◎期待大、△場合による
○期待可、×期待不可

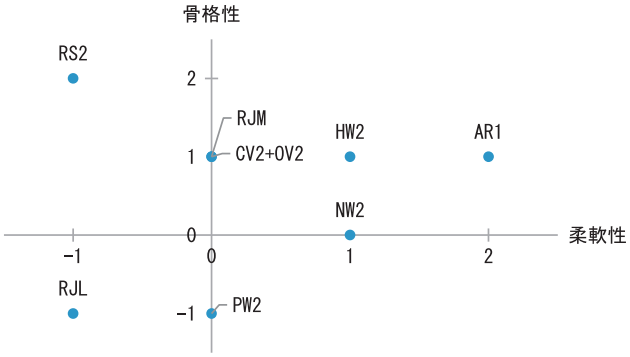

図10　交通リダンダンシーの２特性による散布図

航空は，経路上の地上における災害の影響を受けることがなく，発着地の滑走路や管制塔などの最小限の空港設備が整えば運航できることから柔軟性が高い．実際，被災事例は僅かであり，代替事例が多数存在している．航空は速達性に優れており，中・長距離輸送を担う新幹線が地震で被害を受けた際のリダンダンシーとして機能する．空港設備が対応している場合には，増便や輸送力強化を目的とした機材の変更も可能である．災害④では，当時小型機で運航されていた羽田空港―青森空港便が，南東北地方発着便の増便に小型機MD-90を充当するため，大型機A300-600Rへと機材変更し，東北地方全体で航空輸送力を確保した実例もある．

道路網は短区間の代替と長距離の迂回を問わず様々な経路で代替を行うことができ，柔軟性が高い．災害④での通称「くしの歯作戦」のように，主要国道の被災に伴う代替として，旧二級国道や県道，主要市町村道を組み合わせて活用する実績もある．骨格性は道路網の種類によって異なる．高速道路（HW２）は，地域間高規格道路として国土計画と結びつき整備される．国道（NW２）はHW２同様に地域間を結ぶ重要な道路ではあるものの，一般道であることからHW２より重要性は低くなる．都道府県道（PW２）は，都市間や地域間を結ぶことを重視するHW２やNW２とは趣旨が異なり，地方地域間や地域内を担うため，骨格性をさほど有さない．

船舶は，一隻あたりの輸送力が大きく，港湾が利用可能であるならば都市間の輸送力を確保できることから骨格性が高い．連絡船と内海船は，災害②⑥⑪などで在来線鉄道（RJM・RJL）や道路網のリダンダンシー経路となった実績がある．

鉄道は種類によって差異があるが，高規格鉄道（RS２・RJM）は輸送力を保持して都市間・地域間を結ぶことから，国土計画上重要視されており骨格性が高い．RS２は地震以外の災害に強く，災害⑥では山陽地域で唯一早期に通常運行に戻った．RJMは広大なネットワークを活かし，中・長距離輸送を担う貨物列車の迂回を担っている．併せて，RS２とRJMを組み合わせた代替輸送

も存在する．他方，RJLは低規格でもあり災害リスクが高く，復旧が容易でない区間もある．これは，復旧が容易でないという点で，高い技術力が求められるために時間がかかるRS２と同様であり，このために柔軟性が低い．地域内の需要を主に担当するという点でPW２と同様であり，骨格性も低い．

各交通機関のリダンダンシー特性に点数を付ける（期待大を２点とし，順次１点刻みで得点を減らし，期待不可を - 1 点とする）ことで散布図（図10）に位置付け，リダンダンシーとして期待することができる交通機関の順位を視覚的に明示できる．図10においては右上に行くほどリダンダンシーとして活用できる交通機関であることを意味する．今回の評価ではAR１が最もリダンダンシーとして期待できると判断される．そして，図10は，災害にて交通機関が被災した際に行政等がリダンダンシーを考える際の指針として使うことができる．つまり，行政等が災害時にリダンダンシーの候補を検討する時には，地域の交通インフラの状況を踏まえつつ，第1,2,4,３象限の順に候補となる交通機関を選んでゆけばよいことになる．実際，4.3節で見たRS２の被災において，AR１が代替する連携もこれで示すことができる．

6. 地方鉄道がリダンダンシーとなるための条件

RJLの多くの路線において存廃についての協議が行われることが将来見込める中でリダンダンシーを根拠の一つに据えてRJLの存続意義を訴える地方の鉄道ネットワークを守る緊急提言［8］もでてきている．RJLは４章でみたように災害による被災数が多く，鉄道代替バスをはじめとした代替輸送が数多く行われた．だが，RJLがリダンダンシーとして機能した事例は少ない．事例は限られるが，これらよりRJLでリダンダンシー機能を発揮する条件を探る．

RJLがリダンダンシーとして機能するための第一の条件は定期特急や速達列車が運行可能な設備が維持されていることである．定期特急や速達列車は都市・地域間を高速で連絡することから，災害時に被災していないことを条件に，走行する路線の規格に左右されずに迂回手段としての役割を担う．災害⑪では，高山本線が北陸本線の代替を担い，特急列車に代替需要が集中した．

第二の条件は貨物列車が走行可能な設備が維持されていることである．災害時に設備への負荷が高い大型車両や貨物車両が入線できるため，求められる需要に対処できる．山口線や整備新幹線並行在来線の大部分がこの条件を満たし，災害④⑥⑪などでJRFの迂回貨物列車が走行した．なお，山口線は陰陽連絡特急が毎日運転しており，都市間連絡のリダンダンシー機能も期待できる．

第三の条件が日本鉄道建設公団建設線であることである．日本鉄道建設公団建設線は多くのRJLとは一線を画すトンネルや橋梁が連続する近代的な設備を持つため被災確率が低く，リダンダンシーとして機能できる．災害④⑨⑩で，野岩鉄道が東武鬼怒川線，会津鉄道と共に東北新幹線や東北本線の代替として機能した．日本鉄道建設公団建設線は設備を生かして速達列車が運行されているケースも多く，災害⑥では智頭急行を経由する特急列車が伯備線の代替として，災害⑦では北越急行の超快速列車が北陸新幹線の代替として機能した．なお，北越急行は2023年３月ダイヤ改正で快速運転を取りやめ，最高速度を110km/h から95km/h に落とすため，速達列車によるリダンダンシー機能は期待しにくくなる．

上記３条件は，RJLがただそこに存在するだけではリダンダンシーとして機能しないことを意味すると同時に，多くのRJLに対して条件が満たされるものでもないことも示唆している．よって，地方の鉄道ネットワークを守る緊急提言［8］で述べられている「災害時の移動手段の代替性・補完性の確保」を，RJLを存続させる根拠として持ち出すことは妥当とは言えない．3条件を満たさないRJL路線の沿線地域において，当該RJLの在り方を検討する際は，リダンダンシーを存続のための一根拠に据えることなく，議論を進めることが望まれる．

7　まとめ

本研究では，阪神・淡路大震災以降の激甚災害に相当する自然災害によって，交通インフラの一部が使用できなくなった際に，交通リダンダンシーはどのように機能したのか，調査・集計し，特性について分析した．

全体集計結果から，交通機関の被災において陸上交通は被災数が多く，海上交通と航空交通の被災数は少ない．交通機関の代替においては，全ての交通機関が災害に拘わらず一定数利用されていた．そして代替・被災比から，新幹線と航空がリダンダンシーとして特に機能していることが分かった．交通機関の被災原因は，被災交通機関によって異なり，津波を含む地震災害ではすべての交通機関が被災したが，水害，火山噴火，豪雪では被災する交通機関に差異があった．続いて，同じJRに関連する旅客鉄道である新幹線，JR 幹線，地方交通線を分け，代替輸送状況集計に基づき集計したところ，被災に伴う代替手段の種類や使用数は異なっていた．自動車が通過できるインフラは道路以外では制約があることから，高速道路と国道の代替には被災道路とは別の道路網が使用されていた．

全数集計と代替輸送状況集計の結果を踏まえると，リダンダンシーは柔軟性と骨格性という２つの特性を用いることで定性的に評価でき得る．ここで，柔軟性とは，発災後速やかに代替ルートの活用や被災交通の早期復旧によって，被災地への救援物資や被災地発着の人員輸送

ができることを意味し，骨格性とは被災確率を低減する高規格性や一度に大量の貨客を輸送できる輸送力が確保できることを指す．各交通機関により，特性の持ち様は異なるが，バス輸送を含む道路網と航空は高い柔軟性を有し，新幹線・JR幹線や高速道路と陸上交通ではない船舶・航空は高い骨格性を有すると評価した．交通機関のリダンダンシー特性に対し点数を割り当てることで散布図（図10）に位置付け，リダンダンシーとして期待することができる交通機関の順位を視覚的に明示した．

本研究の課題は，次の３つである．第一に，本研究では路線数を基準としたことにより，実際に必要となった輸送力を反映していないことである．複数の経路が代替として設定されたとしても，実際の輸送力は一部のルートに偏ってしまうことも考えられる．今回，集計時に路線数を主に基準としたことで，輸送力による偏りを明確化できていない．第二に，各交通機関に存在する課題点，解決策とリダンダンシーの関係性の検討に至らなかったことである．図10において，第１象限以外に位置する交通機関では，リダンダンシーとして機能するにあたっての問題点が存在し，何らかの解決策が必要である．柔軟性・骨格性ともに欠けている多くのRJLにおいて，リダンダンシーを存続の根拠とするためにはこの解決策が必要である．本研究ではリダンダンシーとなるための条件は提示したが，リダンダンシーとして機能するための解決策は明示できていない．最後の課題は，交通機関が災害時に代替以外にも活用できることについて整理していない点である．国土交通省海事局内航課（2014）[13]にもあるように，災害時において，宿泊，医療，通信，電力供給等の支援に交通機関がその能力を発揮できる．これらの能力や機能を包含した上でリダンダンシーを評価してゆくことも必要であろう．

8　参考文献

［1］内閣府（2022）『令和４年版　防災白書』
［2］国土交通省（2020他）『水害統計調査』
［3］国土交通省（2012）『平成23年度 国土交通白書』
［4］東京都（2012）『東京都帰宅困難者対策条例　第７条』
［5］内閣府（2019）『令和元年台風第19号に係る被害状況等について』 https://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/index.html
［6］西日本旅客鉄道（2019）北陸新幹線（東京～金沢駅間）の直通運転再開見込みについて https://www.westjr.co.jp/press/article/2019/10/page_15132.html（2022年２月２日閲覧）
［7］国土交通省関東地方整備局（2019）『台風19号の影響による国道20号（東京都八王子市から神奈川県相模原市）の通行止め区間の被災状況，迂回路等のお知らせ.』
［8］広島県知事ほか（2021）『地方の鉄道ネットワークを守る緊急提言』
［9］国土交通省（2019）『台風19号による被災状況と今後の対応について』
［10］東海旅客鉄道（2019）「ＪＲ東日本管内中央本線運転見合せに伴う臨時列車の運転等について」 https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000040103.pdf（2022年２月２日閲覧）
［11］気象庁（2019）『令和元年東日本台風（台風第19号）による大雨，暴風等（速報）』
［12］廣瀬亮太（2011）「東日本大震災による被害状況及び復旧・復興に向けた課題」，『立法と調査』317:149-156
［13］国土交通省海事局内航課（2014）『大規模災害時の船舶の活用等に関する調査検討会　最終報告書』