

災害時交通のレジリエンス評価 に向けた研究展望

杉浦 聡志¹・力石 真²・柳沼 秀樹³

¹正会員 工博 北海道大大学院准教授 工学院北方圏環境政策工学専攻 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

²正会員 工博 広島大学大学院准教授 先進理工系科学研究科 (〒 739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 工博 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: yaginuma@rs.tus.ac.jp

大規模災害においては、災害直後の救命救急から復興期に至る災害対応フェーズにおいて、求められる交通ネットワークが果たすべき機能は変化する。交通ネットワークが求められる各種機能に関する供給力、あるいは需要マネジメントに関連する研究、事例報告によりそれぞれの災害後フェーズや予防的施策、事後対応に応じた知見が提供されている。本稿ではこれら大規模災害における交通をめぐる研究・事例を概観するとともに、災害対応フェーズ、事前・事後対応の区別に応じて整理を試みる。これらの整理に基づいて今後取り組むべき研究の方向性を議論したい

Key Words: *Transportation Network Resilience, Vulnerability/Reliability, Management, Precautionary principle*

1. はじめに

災害時に交通ネットワークがもたらす社会的厚生 (Social welfare) は、平時のそれとは大きく異なる。仮に周辺住民 100 人がある道路によって避難できた (i.e. 道路がなければ避難できなかった) 場合、当該道路がもたらした社会的厚生の増大効果は極めて大きく、平時の便益を計上せずともその道路整備の重要性は十分に立証し得る。一方、こういった災害時の便益は、以下に述べる幾つかの理由から、容易には計算できないことも明らかである。

第一に、発災時においては、複数の交通リンクが同時に被災する。あるリンクの機能は他の交通リンクとの接続関係の中で規定されるという交通ネットワークの性質上、当該リンクが災害時に機能することでもたらされる社会的厚生は、他のリンクの被災パターンが事前に分かっていると計算できない。

第二に、発災後に生じる災害時特有の交通需要は、上述した避難だけでなく、物資の支援、土砂・瓦礫の搬出、ボランティア需要、被災者の復興・復旧活動など、多岐に渡る。加えて、これらの災害時交通需要は災害の規模・種類に依存する上、災害対応フェーズの推移に伴いダイナミックに変化する。さらには、物資を届ける、土砂を搬出する、ボランティア活動をするといった一つ一つの活動の価値の計測にも大きな困難が伴う。

第三に、第一点目の交通供給に関わる議論と、第二

点目の交通需要に関わる議論はそれぞれ独立ではなく、災害時に交通供給が効果的 (effective) な機能を果たすかどうかは、交通需要の発生パターンに依存する。加えて、災害時における交通供給の有効性 (effectiveness) は、発災後の交通マネジメントの意思決定にも依存する。例えば、緊急通行車両等の災害応急対策に従事する車両以外は通行不可とする対策は、限られた供給を特定の需要にのみ割り当てることを是とする価値判断を伴う対策であり、この判断は、特定の需要にすべての供給を割り当てた場合に得られる社会的厚生の増大が、残りの交通需要をキャンセルすることによる社会的厚生の減少を上回るときに正当化される。

以上のように考えたとき、災害対策を念頭に置いた交通投資の判断は、トランスサイエンス的な問題の様相を呈する。とりわけ大規模災害はノンリカレントな事象であるとともに、保証原理が成立しないため、予防原則的に施策を講じることが必要であろう。一方、政策判断として予防原則を採用せざるを得ないとしても、判断の科学的合理性を探究することの重要性は変わらず、問題の複雑さをでき得る限り丁寧に理解・共有できる概念装置を持つこと、(明確な仮定の下で) 可能な限り価値判断に有用と思われる科学的証拠を提示することが求められる。

既往の研究の多くは、上の問題の特定の側面 (e.g. 緊急車両の通行、災害時の交通需要分析 etc.) を切り出して分析した研究が多く、上述の複雑な様相を有する全

体像の中にその研究成果と限界がうまく位置付けられていないことが多い。本研究では、各々の研究成果を実際の政策決定に役立つものにするには、全体における個別研究の位置付けを理解することが重要との認識に立ち、災害時に交通ネットワークがもたらす社会的厚生について、出来る限り包括的に見直し良く全体を整理することを目指す。具体的には、(1) 災害時における供給と需要の双方の観点から交通ネットワークのレジリエンスとそれに影響を及ぼす復旧戦略を概念的に整理するとともに、(2) いくつかの事例への適用を通じて実際にとられた復旧戦略の帰結について知見を深めるとともに、今後取り組むべき交通レジリエンス研究の方向性を議論したい。なお、本稿は著者 3 人がオンライン上で議論しながら暫定的に整理したものであり、引き続き議論を深めていく必要がある。本稿の発端として多くの研究者・実務者のご意見を賜りたい。

2. 災害時交通レジリエンス評価の試案

(1) レジリエンス評価のフレームワーク

交通ネットワークにおいて破損を想定するのは構成物であるノードかリンクである。ネットワーク中のリンク集合を A 、ノード集合を N 、ネットワークを $G(N, A)$ 、OD ペア $w \in W$ 、その交通量を $d_w \in D$ で表記しよう。あるハザードにより交通ネットワークに異常が生じる。この生じた異常は各リンクの性能低下の組み合わせとして記述できることとして、その組み合わせを $s \in S$ としよう。全てのリンクに性能低下が生じないシナリオを $s = 0$ とする。災害後に道路ネットワークに求められる役割は多岐に及び、救急救命など速達性を要するものも含まれる。多々納はこれらの道路ネットワークに求められる機能を表-1 のように整理している。ただし、避難および 2 行目の道路啓開については筆者らが追記した。このように災害直後はアクセシビリティや連結性、すなわち 2 点間の接続が重要な時期、復旧期、復興期は多くの需要を処理する能力と、災害後のフェーズに応じて異なる能力が求められる。一連のフェーズに応じた能力はいずれも欠かすことができない、全ての能力が軽微な外力によって毀損されることがないように備えておくことが望まれる。

表-1 災害時に道路ネットワークが求められる性能

時間経過	災害対応の段階	指標の例
発災直後	避難	避難所までの ACC
数日	救急救命・道路啓開	拠点病院までの ACC
数ヶ月	救援(救援物資輸送)	災害拠点から避難所等への ACC
数ヶ月	復旧活動	交通容量, 消費者余剰
数年	経済活動の継続・復興	交通容量, 消費者余剰

※ ACC はアクセシビリティを指す

道路網の能力を示す尺度については様々な指標が提案されている。災害直後に近いフェーズで求められる 2 点間の接続性に関連するものであれば、OD 間最短経路所要時間に基づくアクセシビリティや OD 間の連結状態を示すコネクティビティ、OD ペア間の非重複経路数¹⁾ が挙げられるだろう。復旧期、復興期に求められる多くの需要に対応する処理能力に関連するものであれば、ネットワーク中の総走行時間やネットワーク最大容量²⁾、Reserve capacity³⁾ などの指標が挙げられる。これらのネットワークの供給能力、および需要を考慮した道路システムの状態を示す指標のことを総称して Effective Network Functionality (以下、ENF) と呼ぼう。各フェーズにおいて求められるネットワークの性能は ENF を用いることで定量的に計測でき、これに基づけばネットワークの異常に対する性能変化を把握することが可能となる。災害による道路ネットワークへの影響は、図-1 のように表現できる。

これは、Bruneau et al.⁴⁾ のコンセプトを元に筆者らが加筆したものであり、同様の図は McDaniels et al.⁵⁾ 等でも示されている。ここでは、任意の ENF 指標を一つ取り上げ、縦軸に表現する。災害により生じた任意のシナリオ $s \in S$ をとりあげよう。シナリオ s におけるネットワークの状態を $G(N(s), A(s))$ とする。ネットワークの劣化状態が著しいときには需要量が日常から大きく減少することも生じ得ることに加えて、需要のパターンも日常から大きく乖離することも容易に想定できる。したがって、ここでは交通需要がシナリオに依存すると考えて交通需要の状態を $D(s)$ とする。この入力に対して、ある 1 つの ENF 指標 (サフィックスを θ とする) を計測する関数を $f_\theta(\cdot)$ としたとき、性能を定量評価した値を以下で記述する。

$$\omega_\theta(s) = f_\theta(G(N(s), A(s)), D(s)) \quad (1)$$

ENF がアクセシビリティやコネクティビティなど、ネットワークのトポロジーのみに依存する指標のときには、OD を考慮するか否かを 0, 1 で与えて入力するこ

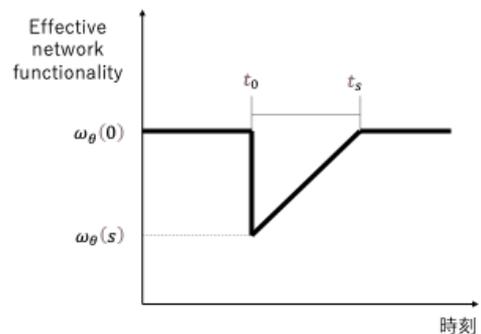


図-1 ENF に基づく道路性能低下および復旧の時間推移

とが可能であること鑑みればこの定式は一般性を失わない。ネットワークが通常時から変化しないシナリオは $s=0$ であるから、変化量は $\omega_\theta(s) - \omega_\theta(0)$ で記述できる。したがって、ENF を用いれば変化量は計測でき、Taylor et al.⁶⁾, Martín et al.⁷⁾ および Jenelius et al.⁸⁾ などの研究ではあるシナリオを与えたときの式の値の特定を実証的に試みている。ネットワーク性能の回復をモデル化、最適化する研究も広く蓄積されており、Çelik¹⁷⁾ により広範のレビューが提供されている。ここで関連する研究を、瓦礫の一時撤去、収集、ネットワーク構成物の物理的修復の各計画手法の分類、および ENF を含む目的関数の種類に関する分類についても整理している。これらはリンクの状態 $G(N(s), A(s))$ を通常時 $G(N(0), A(0))$ に復旧させるまでの手順を ENF や所要コストに基づいて最適化する問題について取り扱っている。

リンクの状態が復旧されたときの時刻を t_s とする。回復までの時間 $t_s - t_0$ は災害により低下したネットワークの状態と、復旧のために投じられるリソースによって規定されると考えよう。多くのネットワーク性能の回復に関する研究もこの 2 つを入力としたモデル化が試みられている。復旧のための政策が投じられるリソース r によって規定されると仮定して、復旧順序等を示すある政策を $k(r)$ とよび、その集合を $K(r)$ とする。復旧政策 $k(r)$ において復旧過程の時刻 $t|t_0 \leq t \leq t_s$ における ENF を記述するため式を拡張し、下記で表現する。

$$\omega_\theta(s, t, k(r)) = f_\theta(G(N(s, t, k(r)), A(s, t, k(r))), D(s, t, k(r))) \quad (2)$$

ハザードによって毀損した ENF の時系列に関する積分量を $\zeta_{s, k(r)}^\theta$ とし、以下で記述できる。図-2 では、この値は $(\omega_\theta(0), t_0), (\omega_\theta(s), t_0), (\omega_\theta(s), t_s)$ で囲まれた領域の面積に対応し、回復する ENF を線形で特定しない一般化された表現である。

$$\zeta_{s, k(r)}^\theta = \int_{t_0}^{t_s} \omega_\theta(0, t, k(r)) - \omega_\theta(s, t, k(r)) dt \quad (3)$$

そして、最適な復旧戦略 $\dot{k}(r)$ は以下の式で表される。

$$\dot{k}(r) = \arg \max_{k(r)} [\zeta_{s, k(r)}^\theta] \quad (4)$$

ここで、復旧が完了する時刻 t_s は $\dot{k}(r)$ に依存することに留意されたい。以降、全て復旧施策は与えられたシナリオ s において投入可能なリソース r の下で最適な戦略 $\dot{k}(r)$ を取ることを前提に記述する。

(2) 災害施策効果

災害に対する道路施策効果について検討しよう。ある任意の施策を考え、災害によって生じる ENF の劣化を軽減するよう、ネットワークの構成物の増強戦略、

あるいは需要パターンを変化させる戦略 η をとったときの $ENF\omega_\theta^\eta$ を以下で記述しよう。

$$\omega_\theta^\eta(s, t, \dot{k}(r)) = \begin{cases} f_\theta(G(N(\cdot), A^\eta(\cdot), D(\cdot))) & \text{if } \eta \in \Upsilon \\ f_\theta(G(N(\cdot), A^\eta(\cdot), D^\eta(\cdot))) & \text{if } \eta \in \Phi \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 Υ は例えば事前防災政策として、リンク新規建設や改良工事、耐震補強等の耐災化によりリンクを増強する戦略集合が該当する。災害事後の施策としては簡易的な仮設道路の供用や、臨時航路の供用など他モードによるリンクの付与が考えられる。一方で Φ の事前防災政策は住み替え誘導や事前交通マネジメント施策などの交通需要をコントロールする戦略集合である。災害事後の施策としては、災害時において災害対策基本法 76 条等で定められている緊急通行車両以外に課される交通規制等による需要の制御が考えられる。この戦略 η をとったときに軽減される ENF 指標低下の集計量 $u(s, t, \dot{k}(r), \eta)$ は以下で定義できる。ただし、何も事前施策をしない場合の ENF の値を $\omega_\theta^0(s, t, \dot{k}(r))$ で表記する。

$$u(s, t, \dot{k}(r), \eta) = \int_{t_0}^{t_s} \omega_\theta^\eta(s, t, \dot{k}(r)) dt - \int_{t_0}^{t_s} \omega_\theta^0(s, t, \dot{k}(r)) dt \quad (6)$$

$u(s, t, \dot{k}(r), \eta)$ は図の網掛け部の面積で表現できる。左図は施策によりシナリオ生起によるインパクト $\omega_\theta^0(s, 0, \dot{k}(r)) - \omega_\theta^\eta(s, 0, \dot{k}(r))$ を小さくし、復旧までの総損失が軽減したことが表現されている。右図は交通マネジメント施策等により、復旧過程の ENF 指標に基づく損失が小さくなることで、総損失を軽減した状況を表現している。

ここまでは、ある任意のシナリオについて取り上げた表現法を提供した。しかし、一つの施策は、ある任意のシナリオだけでなく、起こりうる全てのシナリオに対して効果を発現させると考えられる。全てのシナリオについて発生確率が与えられるとき、施策の効果を定量評価可能な指標として ENF 損失の軽減量期待値を考える。施策なしのシナリオのある単位期間における生起確率は $p(s, 0)$ で表記しよう。リンクの耐震戦略等の事前施策はシナリオの発生確率を変化させることが想定される。そこで、 $p(s, \eta)$ は事前施策 η 下においてシナリオ s が生起する確率である。任意の事前施策により得られる単位期間あたりの ENF 損失の期待軽減量 $v(\eta)$ は以下の通りで与えられる。

$$v(\eta) = \sum_{s \in S} \left(p(s, \eta) \int_{t_0}^{t_s} \omega_\theta^\eta(s, t, \dot{k}(r)) dt - p(s, 0) \int_{t_0}^{t_s} \omega_\theta^0(s, t, \dot{k}(r)) dt \right) \quad (7)$$

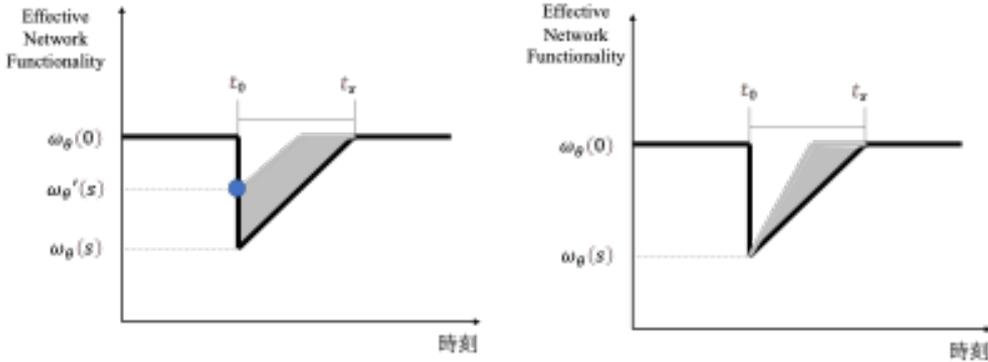


図-2 施策による ENF 損出の軽減

$v(\eta)$ に対して、なんらかの金銭評価可能な関数 δ^θ が存在するとすれば、この施策効果は期待被害額の軽減効果の金銭評価した値となり、式で評価可能となる。

$$B = \delta^\theta(v(\eta)) \quad (8)$$

ここで、 $\delta^\theta(\cdot)$: ENF の総損失軽減量期待値を金銭評価するための関数。例えば $f_\theta(\cdot)$ が総走行時間 (台・分) であれば、時間価値 τ (円/分) などを想定することができ、 $B = \tau v(\eta)$ で単位期間あたりの施策効果が計測可能である。プロジェクトライフおよび社会的割引率を考慮し、施策コストに対して得られた B が十分であれば投資効率の正当性は主張できるだろう。さて、以降ではこの定式化に沿って交通ネットワークにおいて期待被害額の減少量評価に基づく政策意思決定に向けた課題について整理しよう。

3. 提案評価のケーススタディ検証と考察

以下では、2章の議論をもとに、広島都市圏における平成 30 年 7 月豪雨をケーススタディとして考察を加える。豪雨時の災害対応の詳細については、広島・呉・東広島都市圏災害時交通マネジメント検討会資料等¹⁸⁾を参照されたい。

(1) ネットワークの被害実態： $G(N(s), A(s))$

図-3 に、平成 30 年 7 月豪雨直後の主要道路・鉄道の被害状況を示す。図より、呉市を中心にアクセスができないエリアが広がっていることが確認できる。呉市では、広島呉道路や JR 呉線をはじめ、市域と近隣自治体を連絡する幹線道路・鉄道網が同時に被災し、交通需要が国道 31 号に集中、激しい渋滞が発生した。段階的にネットワークの復旧作業が進められたものの、JR 呉線 (呉～広島間) の復旧は同年 9 月 9 日、広島呉道路の復旧は平成 30 年 9 月 27 日と、復旧に 2ヶ月以上の時間を要した。呉市の道路ネットワークの脆弱性は、Santos et al.²⁵⁾ が行った 69 都市の比較結果からも明ら

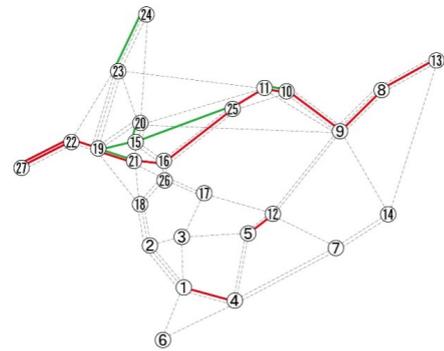


図-3 平成 30 年 7 月豪雨直後の広島都市圏の交通ネットワーク (主要道路・鉄道のみ)

かであり、例えば 5% の道路リンクがランダムに被災した場合の道路ネットワークの性能 (リンク切断に伴う最短経路旅行時間の増分により評価) の低下は 69 都市中ワースト 3 位である。関連して Santos et al.²⁶⁾ は、降雨パターン、地質学的な要因から各道路リンクの被災確率を求め、モンテカルロシミュレーションを通じて、様々な道路網被災パターン下における道路ネットワークの性能の低下について考察している。その結果、平成 30 年 7 月豪雨により発生した道路網被災パターンは、道路ネットワークの性能の大きな低下をもたらす稀な事象であった可能性を指摘している。図-4 に図-3 の道路・鉄道リンクの復旧過程を示す。図より、道路リンクについては災害直後より道路の啓開が進み、極めて迅速に復旧が進んでいる一方、鉄道リンクの復旧には時間を要したことが分かる。こういった交通ネットワークの被害を、単純に、災害によって混雑等が発生せず、自由流旅行時間ベースで経路変更による旅行時間の増加のみが災害前と同じ交通需要に対して発生していたとして計算すると、発災後、約 6 億円の損害が発生したことになる²⁷⁾。当然のことながら、渋滞を考慮していない、キャンセルしたトリップへの影響を考慮していない、災害時の交通に対する時間価値の変化を考慮

していない等を踏まえると、上記の 6 億円は損失を過少に推計した結果といえる。加えて、上述したように、交通ネットワークに求められる性能は、災害後のフェーズによって異なるため、上記の旅行時間の増分に基づく評価が不適切な需要（例えば緊急搬送）も存在する点に注意する必要がある。

(2) 交通需要の実態： $D(s)$

平成 30 年 7 月豪雨時の交通需要の変化については、例えば株式会社ドコモ・インサイトマーケティングが提供するモバイル空間統計を用いた力石ら¹⁹⁾の研究がある。これらの研究の成果から分かる特徴的な需要の変化は以下のとおりである。

- 被災エリアに居住する住民については、災害直後に発生、集中、内々交通量が減少、その後、二ヶ月をかけて徐々に元の水準まで増加。
- 住民以外の交通量については、災害直後に発生・集中交通量は災害前の約 1.5 倍に増加。内々交通量については、発災 1 カ月後より急増。前者はボランティア活動目的の移動が、復旧・復興活動の進展に伴う災害拠点（呉ポートピアパーク）と被災地の間を行き来する交通の増加が原因である可能性が高い。

以上の交通需要は、被災した交通ネットワークのもとで観測されたものであり、交通ネットワーク性能の低下により、交通需要が潜在化している可能性が残ることに注意が必要である。また、携帯電話基地局データ、ETC2.0、商用車プローブ、車両感知器データなど、様々なパッシブデータにより需要の状態が観測できるようになりつつあるが、緊急車両、土砂・瓦礫搬出車両、ボランティア交通を識別するといった、価値計測上重要な需要の分類が可能な交通需要のデータは筆者らの知る限りほとんど存在しない。なお、広島県南部の推定流出土砂量は 800 万 m^3 に及ぶことから、少なくない土砂搬出の交通需要があった。なお、筆者らの一人が参加した広島・呉・東広島都市圏災害時交通マネジメント検討会の会議において、不完全な交通需要の情報が供給側の災害時交通マネジメントに関する意思決定を困難にしているとの指摘が繰り返されたことを付記したい。

(3) ENF： $f_{\theta}(G(N(s)), A(s)), D(s)$

Safitri and Chikaraishi²⁷⁾ は、平成 30 年豪雨災害時に見られた交通ネットワークの被災と交通需要の関係を分析し、交通ネットワークの復旧が進むにつれ交通需要も増加することを定量的に示している。言い換えると、需要の幾ばくかは、交通ネットワークの被災により潜在化する。また、土砂の搬出やボランティア活動



図-4 平成 30 年 7 月豪雨直後の広島都市圏の主要道路・鉄道リンクの復旧過程

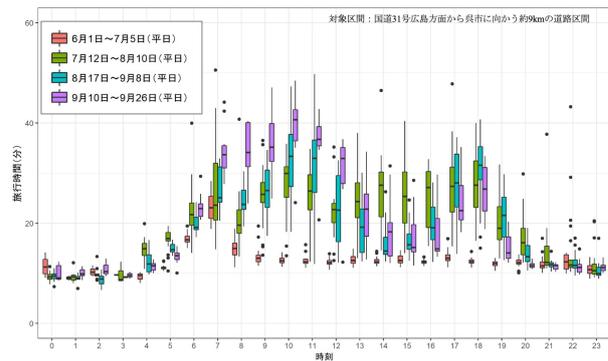


図-5 旅行時間の経時変動

が活発になると、道路本体はダメージを受けておらずとも、道路の交通処理能力は低下する可能性が高い²³⁾。実際、国道 31 号に設置してある車両感知器のデータから発災後の QK 図の変化を確認したところ、発災直後は（道路本体としては被災していないに関わらず）交通処理能力が低下している状況が確認された。すなわち、ネットワーク本体は被災していないとしても、需要の構成にその性能は左右され得る。加えて、災害対応拠点と被災地の間の約 500m 区間を行き来する災害対応の交通需要が発生することで、当該区間の交通容量は、平時であれば約 1,000 台/時であったものが、最大で約 300 台/時にまで落ち込むことが確認されている²²⁾。その結果、交通ネットワークが概ね復旧した発災後 2 カ月後時点においても、国道 31 号の被災地周辺のある道路区間において、慢性的な混雑が生じていたことが確認されている（図-5）。以上の結果は、ENF の計測においては、需要と供給の関係が平時とは大きく異なり得ることにも配慮する必要性を示唆している。また、上記の交通容量の落ち込みは、災害対応拠点の配置場所によっては回避でき得るものであることから、事前に交通への影響にも配慮した災害対応拠点を検討しておくことも重要であろう。

(4) 復旧戦略： $k(r)$

以上の発災後の交通ネットワークの被災，交通需要の変化に対し，種々の対応がとられた。対応は，大きく分けて3つに分類できる（図-6）。一つ目はインフラに関する復旧戦略であり，道路の啓開や鉄道の復旧など，本来の供給水準に戻すことを企図した対策が含まれる。二つ目は交通サービスに関する復旧戦略であり，災害時 BRT の提供，代行バスや臨時船の運行，交差点改良，右左折レーンの延伸などが挙げられよう。三つ目は交通運用に関する復旧戦略であり，有料道路の無料開放，割引などの需要側に対する働きかけになる。以下では，平成 30 年 7 月豪雨発災後にとられた上記 3 つの対応について順に考察する。

a) インフラに関する復旧戦略

上述したように，呉市は極めて脆弱な道路ネットワークを持つ都市の一つであることから，リダンダンシーを確保するネットワーク整備を継続することが重要であることは論を待たない。ただし，東日本大震災以降「くしの歯作戦」が定着し，また，建設業界との災害協定といった制度面の整備が進んだことから，道路の啓開については極めて短期のうちに実行できる体制が整ってきており，極めて優れた事後対応のスキームは確立しつつある。ただし，どの交通リンクから復旧させるべきかについては，更なる検討が必要である。様々な方法論的・実務的課題が残るが，特に我が国において顕著な課題として，道路管理者，交通事業者をまたいだ，包括的な交通ネットワーク復旧戦略の策定が難しい点を指摘しておく。都市の交通システム全体を一定の権限を持って意思決定できる主体が存在しない現在の体制は，災害時の交通ネットワーク復旧戦略を立てる際にも大きな障害となりえる。

b) 交通サービスに関する復旧戦略

平成 30 年 7 月豪雨において臨時に提供された交通サービスの中でも特に重要な役割を果たしたのが災害

時 BRT といえよう。限られた交通供給を有効に活用できる大量輸送手段（バス）の利用，速達性・所要時間信頼性を向上させるためのバス専用レーンの導入，それらを可能にする自動車専用道路上での転回や，自動車専用道路上でのバスレーンの導入といった前例のない取り組み，関係機関の迅速な連携など，次の災害時も活かせるアイデアが複数導入された実現した事例といえる²²⁾。また，呉市は海に面していることから，船を活用した臨時交通サービスも極めて重要な役割を果たした。以上のことは，災害時の交通システムの性能は，こういった臨時交通サービスをどの程度提供できるかにも依存することを示唆している。道路整備といったインフラ投資は長期の時間が必要であることから，一時的な対策として，発災に伴う交通システムの性能低下を，臨時交通サービスで部分的にでもカバーする計画の立案も検討の余地がある。

c) 交通運用に関する復旧戦略

平成 30 年 7 月豪雨災害後の交通運用に関しては，災害対策基本法等に基づく交通規制や信号制御パターンの変更，高速道路の割引，無料開放などの公的な機関による交通運用の対策に加えて，企業や通勤・通学者による始業時刻の変更，出発時刻の変更などの民間企業や住民による自発的な取り組みが多くみられた。信号制御パターンの変更については，広島県警が国道 31 号に対する青現示を最大限延長するなど，主道路の混雑解消を最大限試みたものの，上述したように，渋滞の原因が災害対応関係の短距離交通需要に起因していたこともあり，渋滞の改善はほとんど見られなかった。また，並行して走る道路リンクが被災したことから，広島熊野道路を無料開放するとともに，国道 31 号への交通集中を避けるため，広島-呉間を，東広島を経由する迂回ルートに対して割引する対応がとられた。この対応については，価値の高い車両（物流など）に対して優先的に限られた容量を割り当てる必要なかったのか等，見当の余地が残る。この検討のためには，2 章にて議論したように，道路が果たす複数の役割を比較する必要があるが，緊急時車両の需要がどの程度あったのか等の観測の困難さに起因して，判断の妥当性の考察は現時点では難しい。また，発災後，約 2 割の企業始業時刻を変更し，多くの通勤者が出発時刻を変更していたことが調査より明らかとなっている²⁴⁾（通勤者の出発時刻変更については図-5 参照）。上述したように，復旧・復興に関する交通需要がダイナミックに変化することも相まって，旅行時間を推測することが難しいことも出発時刻を早める大きな要因になっているように思われるが，Matsumoto et al.²²⁾ が示したように，闇雲に出発時刻を早める行動変容は，反って総旅行時間を増加させてしまう可能性が残る。企業の始業時刻，旅

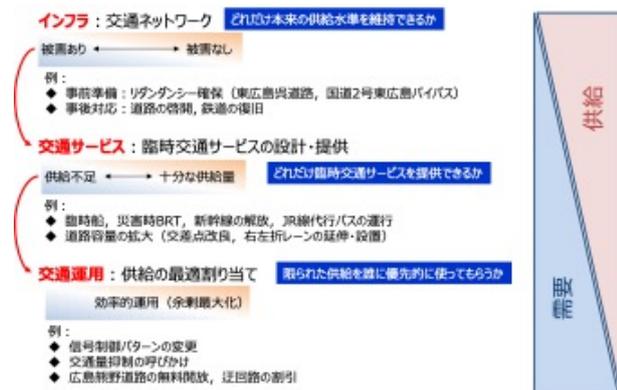


図-6 災害時の交通需給マネジメント

行者の出発時刻を適切にマネジメントするための対策も重要といえよう。

4. 交通レジリエンス研究の高度化に向けて

本研究では、災害時の道路ネットワークのレジリエンス評価に向けて、有効性に着目したタイムライン上での道路性能の低下および復旧プロセスに基づく分析のフレームワークを提示し、広島都市圏における平成 30 年 7 月豪雨を対象にケーススタディとした定性的な評価を試みた。ここでは、交通レジリエンス研究のさらなる高度化・深度化を念頭に、引き続き取り組むべき課題を整理して、今後の研究展望として示したい。

(1) 状態空間とその生起確率の推定

施策効果を評価するためには、全てのシナリオを評価する必要がある。例えば通行可能、不可能という二値の状態を仮定すると、シナリオの総数は $|S| = 2^{|A|}$ である。さらに状態数を増やせばそれだけ組み合わせ数が爆発的に増大する。これらの全てについて ω_a^l を算出することは計算負荷が比較的小さい評価関数、例えばアクセシビリティを評価関数としてもネットワークサイズが大きくなれば容易でない。また、それぞれのシナリオについてその生起確率を精度良く推定することも容易でない。仮に全てのリンクにおいて単位期間に任意の水準 l に劣化する確率 $\rho_{al} | a \in A, l \in L$ が与えられるとき、シナリオの生起確率はシナリオで規定されるリンク水準の組み合わせにおける ρ_{al} の総乗で得られる。この場合であれば、特定しなければならないのはリンク、劣化水準の単位期間における生起確率である。リンクの劣化が統計的に分析可能となる頻度で記録されていれば、この値の導出も可能となろう。しかしながら大規模災害のようなイベントを対象とすれば、分析のために十分な頻度でリンクの劣化を経験していること自体が稀である。さらにリンクの空間的な配置により劣化が相関をもつ場合を想定しようとするれば、シナリオ生起確率の統計的な分析はより困難となるだろう。以上のことから、現実的には限定的なシナリオを取り扱い、部分的な期待被害額の低減量を計測する方法が考えられる。大津ら、大津らや、高木らはネットワーク中のある 1 つのリンクが被災する確率を与え、事前施策による期待被害額の軽減量を計測している。彼らは比較的生じやすい道路沿線にある斜面からの落石を対象として、実際に生じた落石事故等のサンプルから生起確率を与えている。この値はあくまで生じうる全てのシナリオのうち、任意の 1 つのリンクでの劣化という極めて限定的なシナリオのみを取り出した過小評価であることから、事前施策による効果のごく一部で

あることに留意が必要である。それでも投資コストに見合う効果が期待できるのであれば、これらの評価法に基づいた投資意思決定が有用である。一方で、ある任意の施策が極めて限定されたシナリオのみを取り出して評価された期待被害額の軽減量がコストに見合わないとしても、それは部分的な評価に過ぎないのであり、投資すべきでないとは判断するのは尚早である。他の膨大なシナリオを考慮すれば投資する価値を合意可能な事前施策も存在しうる。一方、我が国の道路事業評価に適用されている防災機能評価では、既往の災害事例や予測シミュレーション分析等から最も生じやすいと思われるハザードを設定し、道路リンクに未耐震橋梁を含むか否かといった if-then ルールによる確定的な被災パターンを組み合わせたシナリオを作成して分析を行っている。これは、生起確率の設定が困難であることを前提とした上での工学的な判断に基づく設定であると解釈できる。

(2) デマンドの種類について

表 (tatano) に示すように、災害後の各フェーズにおいて注視すべきネットワークの性能は異なることはここまで述べたとおりである。これはすなわち災害後に特に注視すべきネットワーク上の交通需要がフェーズによって異なることに他ならない。この点が通常時の道路ネットワークのシステム性能を計る手法論と大きく異なる。例えば災害直後、避難時においては、避難者が発災時に位置する地点からリスクの低い地点までの避難需要が生じる。これは通常時とは全く異なる需要パターンであり、ごく短い時間で多数生じる避難需要の輸送について議論する必要がある。救援物資の配送では、各支援拠点から受援拠点までの輸送需要が生じる。救命救急においては傷病者の地点から拠点病院等までの輸送需要について議論するべきであろう。このように表に示した注視されるべき輸送におうじて、ENF 指標の算出に入力すべき需要は異なる。しかしながら、災害時に生じる需要について詳細に検討した事例は多くない。したがって、各フェーズに対応する需要パターンおよびその量の特定、および観測方法は今後の蓄積が望まれる。あるいは、事前検討のために災害後想定される需要の分布を推定するような方法の構築も有用であろう。

(3) Effective Network Functionality の定義

表で示したように、道路ネットワークが求められる性能は災害後のフェーズによって推移する。各フェーズにおいて求められるネットワーク性能をどの指標に基づいて評価すべきかの統一的な見解は見当たらない。これらの設定は政策意思決定のために今後重要な検討

課題であろう。また、任意のネットワーク指標においても、ネットワーク全体の評価にあってはどのように集計すべきか検討の余地がある。例えば、二点間の接続性についてアクセシビリティを採用することを考える。施策評価のためにネットワークで集計的な値を用いるとき、アクティビティの量（あるいは OD 交通量）を考慮し、総和をとることとすれば、アクティビティの小さな特定の OD ペアへの深刻な影響を与えるシナリオの評価で課題が生じる。一部のアクティビティの小さな OD ペアのみが深刻な影響を受けるとき、救急搬送において著しい輸送時間の増大が見込まれるが、ネットワーク集軽量への影響は相対的に小さいため、軽視される。すなわち、住民のうける影響に偏りが生じ得る。小林・秀島は期待被害額の住民感における偏在を是正する施策をまず優先すべきではないかと指摘している。このように全体にとって効果的な施策であることは当然のこと、利用者への影響の偏在にも配慮したネットワーク性能の評価指標が求められるだろう。

(4) 金銭評価関数

金銭評価関数は一般的に支払意思額に基づいて定義・計測される。各 ENF 指標に対応する金銭評価関数はこれまで検討されていないのではないのではなかろうか。例えばアクセシビリティを取り上げたとき、災害時における単位アクセシビリティ確保に対する支払意思額金銭評価関数は見当たらない。道路投資の費用便益分析では総走行時間、総走行距離、交通事故減少便益の 3 種が考慮されており、災害事前施策の投資評価においても安直に援用することも考えられる。しかしながら、災害時にあってはこれらの価値基準では適切な評価ができないと考えられる。特に災害発生に近いフェーズでは人命に関わる輸送を取り扱うこととなるため、上記の費用便益分析で用いられる金銭評価関数とは異なる価値基準を導入する必要があるだろう。小坂らや高木らでは橋本らに基づいて救命患者の救命率と統計的生命の価値を利用した評価を試みている。輸送の価値基準としてこの手法を採用する妥当性が確保できるのであればこれらの適用も可能となろう。

参考文献

- 1) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto, Y.: Network Evaluation Based on Connectivity Vulnerability, *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*, pp.637-649, 2009.
- 2) 赤松隆, 宮脇治: 利用者均衡条件下での交通ネットワーク最大容量問題, *土木計画学研究・論文集*, Vol.12, pp.719-729, 1995.
- 3) Wong, S.C., Yang, H.: Reserve capacity of a signal-controlled road network, *Transportation Research Part B*, Vol.31, No.5, pp.397-402, 1997.
- 4) Bruneau, M., Chang, S., Eguchi, R., Lee, G., O' Rourke,

- T., Reinhorn, A., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W., von Winterfelt, D.: A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *EERI Spectra Journal*, Vol.19, No.4, pp.733-752, 2003.
- 5) McDaniels, T., Chang, S., Cole, D., Mikawoz, J., and Longstaff, H.: Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation, *Global Environmental Change*, Vol. 18, 2, 2008.
- 6) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. and D'Este, G.M.: Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks. *Netw Spat Econ* 6, pp.267-291, 2006.
- 7) Martín, B., Ortega, E., Cuevas-Wizner, R., Ledda, A., De Montis, A.: Assessing road network resilience: An accessibility comparative analysis, *Transportation Research Part D*, Vol.95, 102851, 2021.
- 8) Jenelius, E., Petersen, T., Mattsson, L-G. Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A*, Vol.40, pp.537-560, 2006.
- 9) 高木朗義, 本城勇介, 倉内文孝, 浅野憲雄, 原隆史, 沢田和秀, 森口周二, 北浦康嗣, 八嶋厚: 岐阜県飛騨圏域を対象とした道路斜面のリスクマネジメント: 落石災害を対象として, *土木学会論文集 F4*, Vol.68, No.2, pp.109-122, 2012
- 10) 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 李圭太: 金融工学理論に基づく地盤リスク評価に関する一考察, *土木学会論文集*, Vol.742, pp.101-113, 2003.
- 11) 大津宏康, 大西有三, 水谷守, 伊藤正純: 地震に伴う災害リスク評価に基づく斜面補強の戦略的立案方法に関する一提案, *土木学会論文集* Vol.679, pp.123-133, 2001.
- 12) 小坂宏彰, 高木朗義, 倉内文孝, 北浦康嗣: 道路途絶による社会経済損失を考慮した斜面災害リスク評価モデル, *土木計画学研究・講演集*, Vol.41, CD-ROM, 2010.
- 13) 高木朗義, 本城勇介, 倉内文孝, 浅野憲雄, 原隆史, 沢田和秀, 森口周二, 北浦康嗣, 八嶋厚: 岐阜県飛騨圏域を対象とした道路斜面のリスクマネジメント: 落石災害を対象として, *土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)*, 68(2), pp.109-122, 2012.
- 14) 橋本孝来, 栗原正紀, 井上健一郎, 岩崎義博, 藤本昭: 救急患者収容所要時間と救命率の関係, *日本臨床救急医学会雑誌*, Vol.5(3), pp.285-292, 2002.
- 15) Twumasi-Boakye, R., Sobanjo, J.: Civil infrastructure resilience: state-of-the-art on transportation network systems, *Transportmetrica A: Transport Science*, Vol.15, No.2, pp.455-484, 2019.
- 16) 古田均, 中津功一郎, 野村泰稔: 不確実性を考慮した被災ネットワークの復旧計画策定
- 17) Çelik, M: Network restoration and recovery in humanitarian operations: Framework, literature review, and research directions, *Surveys in Operations Research and Management Science*, Vol.21, No.2, pp.47-61, 2016.
- 18) 広島・呉・東広島都市圏災害時交通マネジメント検討会資料, URL <https://www.cgr.mlit.go.jp/emergency/koutsuumanagement.htm> (最終アクセス 2021 年 10 月 1 日)
- 19) 力石真: 西日本豪雨災害における災害時交通需給マネジメント, 日本都市計画学会中国四国支部学術講演会, 2018 年 10 月 26 日, 広島市まちづくり市民交流プラザ, 2018.
- 20) 平井健二, 山下大輔, 吉野大介, 力石真 (2019) プロローブ パーソン調査を活用した災害時の行動モニタリングと交通サービス設計, *土木計画学研究・講演集*, Vol. 60 (CD-ROM).
- 21) 力石真, 浦田淳司, 吉野大介, 藤原章正 (2019) 交通ネットワーク被災時の発生・集中・内々交通量及び旅行時間の変動特性, *土木学会論文集 B1*, 75 巻 1 号, 214-230.

- 22) 神田佑亮, 藤原章正, 塚井誠人, 力石真, 三村陽一 (2019) 平成 30 年 7 月豪雨時の広島～呉間の公共交通サービスの確保・向上策とその効果検証, 土木学会論文集 B1, 75 巻 1 号, 340-349.
- 23) Chikaraishi, M., Garg, P., Varghese, V., Yoshizoe, K., Urata, J., Shiomi, Y., Watanabe, R.: On the possibility of short-term traffic prediction during disaster with machine learning approaches: An exploratory analysis, *Transport Policy*, Vol.98, pp.91-104, 2020.
- 24) Matsumoto, N., Chikaraishi, M., Fujiwara, A., Kanda, Y.: Exploring firms' adaptive behavior on work start time during disaster with the consideration of traffic congestion and temporal agglomeration economies, *Paper presented at the 100th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January 25-29, online conference, 2021.
- 25) Santos, J.R., Safitri, N.D., Safira, M., Varghese, V., Chikaraishi, M.: Road Network Vulnerability and City-level Characteristics: A Nationwide Comparative Analysis of Japanese Cities, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2021 (Accepted).
- 26) Santos, J.R., Varghese, V., Chikaraishi, M., Uchida, T.: An Integrated Framework for Risk and Impact Assessment of Sediment Hazard on a Road Network, *Transportation Research Record*, 2021.
- 27) Safitri, N.D., Chikaraishi, M.: Impact of Transport Network Disruption on Travel Demand: A Case Study of July 2018 Heavy Rain Disaster, *Japan, Asian Transport Studies*, 2021 (under review).

(2021. 10. 1 受付)

THE PROSPECTS FOR TRANSPORTATION RESILIENCE STUDY UNDER A DISASTER

Satoshi SUGIURA, Makoto CHIKARAISHI and Hideki YAGINUMA