

# 救命救急機能を対象とした道路ネットワークのレジリエンス指標の提案

堀野 泰樹<sup>1</sup>・多々納 裕一<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 非会員 アクシビジョン株式会社 東京オフィス (〒113-0033 東京都文京区本郷 4-1-3-4F)

E-mail: Taiki\_Horino@axivision.co.jp

<sup>2</sup> 正会員 京都大学防災研究所教授 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: tatano.hirokazu.7s@kyoto-u.ac.jp

東日本大震災を契機としてレジリエンスという概念が災害の分野で注目されている。レジリエンスは「抵抗力」と「回復力」で構成される概念である。Bruneau らのレジリエンス評価の考え方にに基づき、救命救急の観点から道路ネットワークの機能性を定義しレジリエンスの評価手法を提案する。東日本大震災における通行規制情報をもとに道路啓開作業の速度を算出を試みる。提案した評価方法に基づき、和歌山県においてケーススタディを実施し、和歌山県的高速道路の未整備区間における道路整備実施によるレジリエンスの比較を行うことで道路整備の有効性を検討することとする。

**KeyWords:** *resilience, highway network, tsunami, Wakayama,*

## 1. はじめに

東日本大震災を契機として、レジリエンスという概念が注目され、我が国の災害研究ならびに災害被害軽減の実践を担う実務の分野において脚光を浴びている。レジリエンスは強靱化と翻訳され、国土強靱化基本計画<sup>1)</sup>などの実施によって国家戦略としてその社会実装が進みつつある。平成 25 年には国土強靱化基本法が制定され、大規模自然災害等に対する脆弱性を評価した上で、国では国土強靱化基本計画を、地方では国土強靱化地域計画を策定することとなった。そこでは、最大限に人命の保護を図りつつ、国家及び社会の重要な機能が致命的な損害を受けずに維持され、我が国の政治、経済及び社会の活動が持続可能なものとなることを目指した計画が志向されている。その実現のためには、官民一体となった多方面にわたる取り組みが必要であるが、交通政策の分野においては、代替輸送ルートの確保や高速道路ネットワークの整備などのハード面の政策や、道路啓開計画を策定し交通事業者間の連携強化や啓開訓練を実施するなどのソフト面の対策が行われようとしている。

レジリエンスは、その語源をラテン語の動詞 *resilire* にもち、原義的には、「元に戻ること」(*bounce back*)を意味する。内閣府も「国土強靱化とは」という国民向けのパンフレット<sup>2)</sup>において、その構成要件として、「抵抗力」と「回復力」を挙げ、「強靱化とは『強くてしなや

かな』という意味である」と定義している。このように、レジリエンスは「抵抗力」と「回復力」の二つで構成されていると解釈することができる。抵抗力は災害発生時におけるシステムの損失を抑える能力、回復力は損なわれた機能を迅速に元の状態へ戻す能力と定義することができよう。

当然のことながら、レジリエンスを定量的に評価することはレジリエンスを高める施策の有効性を示すために不可欠である。このような要請に対応して、国土交通省は道路ネットワークの耐災害性照査手法を提案し、道路ネットワーク構造の強靱化を進めようとしている<sup>3)</sup>。そこでは代替路が存在せず、何らかの災害リスクに曝されているリンクが、耐災害性が低いと認定され、冗長性(リダンダンシー)の向上など耐災害性を向上させるべきリンクの抽出が試みられるようになってきている。しかしながら、この手法では災害発生時における道路ネットワークの機能性を評価するにとどまり、抵抗力を指標化することに主眼が置かれ、回復過程を含んだ概念であるレジリエンスに関する定量的な評価手法としては不十分であると言わざるを得ない。このことは、道路啓開計画等、回復性を高めるソフト施策を導入したとしても、その効果が評価指標に反映されないという問題点を有している。実際に講じられようとしているハード・ソフト両面にわたる総合的な強靱化施策を適切に評価するためには、抵抗性の評価にとどまらず回復性も合わせて実施可能な評価指標の開発が必要である。

以上の問題意識のもと、本研究では道路ネットワークにおける災害レジリエンスの定量的な評価方法を提案するとともに、和歌山県を対象としたケーススタディを通じて提案した方法の適用可能性を明らかにする。その上で、和歌山県道路啓開計画の導入により、レジリエンスの向上への効果が実際に計量化されることを示し、提案した評価方法の有効性を検証することを本研究の目的とする。

以下に 2. では本研究における道路ネットワークの災害レジリエンスの定量化の考え方について述べる。3. では本研究で提案するレジリエンス評価の定式化について解説する。4. では東日本大震災時の道路復旧データをもとに、津波被害を受けた地域における道路啓開作業速度を算出する。5.では、和歌山県道路啓開計画の対象道路ネットワークを対象としてケーススタディを実施する。最後に、5.で本研究で得られた知見と今後の課題に言及し、まとめとする。

## 2. 道路ネットワークにおける災害レジリエンスの定量化の考え方

### (1) レジリエンスに関する研究レビュー

#### a) Bruneau らの研究

地震工学の分野において Bruneau ら<sup>4)</sup>はシステムのレジリエンスの定量的評価の枠組みについて述べている。災害時におけるシステムの機能性を時間の関数として  $Q(t)$  とおく。  $Q(t)$  は果たすべき機能の充足度を表し、その取り得るあたいは 0 から 1 までの範囲である。図-1 のように災害発生時  $t_0$  において機能性が低下しており、その後システムの修繕が行われることで機能性が徐々に回復する。  $t_1$  で果たすべき機能が全て戻ったことを表している。この時レジリエンス  $R$  は

$$R = \int_{t_0}^{t_1} \{1 - Q(t)\} dt \quad (1)$$

と定義される。災害によって機能が損なわれた部分を時間で積分することで評価され、図-1 における色付きの部

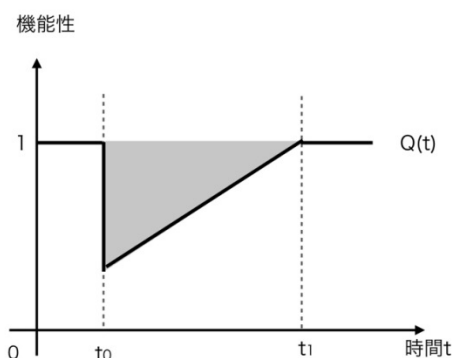


図-1 Bruneau のレジリエンス

分がレジリエンス  $R$  に相当する。  $R$  の値が小さいほどレジリエンスが高いと評価される。

またレジリエンスを規定する要因は、抵抗力 (Robustness)、冗長性 (Redundancy)、資源性 (Resourcefulness)、迅速性 (Rapidly) の四つである。抵抗力は災害発生初期に外力から耐え、機能低下による損失を抑える能力である。冗長性はあるシステムが損傷を受けた時に代替となるシステムの量を表している。資源性は被災箇所の特定制及び構造物の修復のできる移動可能な人的あるいは物的資源の量である。迅速性は災害発生時に生じた機能損失の修復の速さである。

#### b) 道路ネットワークの機能性の評価に関する研究レビュー

庄司ら<sup>5)</sup>は道路ネットワークの機能性不全により影響を受ける主体の機能損失コストを算出し道路ネットワークの構造被害と機能損失の関連に関する分析を行っている。矢野ら<sup>6)</sup>は緊急活動に対して道路ネットワークが提供する機能に着目して、道路ネットワークの耐震性を定量的に評価している。古田ら<sup>7)</sup>は道路ネットワークの信頼性分析手法を用いて、レジリエンスを向上させる施策の有効性を示している。これらの研究により道路を構成する構造物の耐震性の向上や道路ネットワークのリダンダンシーの向上など、ハード整備に伴うレジリエンスの指標に関する評価は可能となっている。しかしながら、これらの研究はレジリエンスのもう一方の重要な側面である回復度に関しては評価できていない。

回復度を反映した指標とするためにはネットワークの修復・復旧過程を明示的に考慮する必要がある。そこで本研究では、東日本大震災の事例をもとに、道路ネットワークの復旧に関する知見を収集するとともに、被災状況に対応付けて回復に要した時間を分析することで、道路ネットワークの復旧速度に関する整理する。ここでいう復旧速度とは通行不能となった道路を単位復旧時間あたりに通行可能な状態に戻すことのできる道路長で表される。

### (2) 耐災害性に着目した道路システムの機能

道路の機能としては、ネットワーク機能と空間機能が挙げられる。ネットワーク機能としては、連結性、速達性、時間信頼性などがあげることができる。多々納<sup>8)</sup>は、災害時を想定して、その際のニーズを整理し、耐災害性の観点から必要とされる機能を検討している。ここでは、災害からの経過時間と重点が置かれる災害対応に関連付けた災害マネジメントサイクルに着目し、表-1 に示すような救命救急、救援物資輸送、復旧活動に関連した交通、経済活動の継続のための交通等、複数の機能指標を設定し、レジリエンスを多角的に定量化することが必要であろうと主張している。

表-1 災害レジリエンスの機能性指標の例

発災時から の経過時間	災害対応の 段階（機能 性に対応）	指標（例）
数日	救命救急	拠点病院などへのアクセシビリティ
数ヶ月	救援（救援物資輸送）	災害拠点から避難所等へのアクセシビリティ（連結性・所要時間）
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

ここで、救命救急の機能に着目すれば、1車線のみの仮復旧であっても緊急車両等の通行が許可され連携性が確保されれば、拠点病院などへのアクセスは可能であるので、この機能に関しては回復したとみなすことができる。しかし、経済活動の維持の機能に関しては、この段階ではまだ一般車両の通行は認められないので、この機能は回復していないということになる。したがって、複数のレジリエンス機能に着目する場合、機能充足度はそれぞれ段階の機能ごとに異なると考えるべきであることも指摘している。

本研究では、道路ネットワークのレジリエンス指標を提案するに際して、救命救急に関するレジリエンス指標を取り上げる。これらの指標はまずもって連結性が重要であり、復旧の程度に応じて拠点病院へのアクセシビリティの改善を計量化することが必要となる。

### 3. 道路ネットワークの災害レジリエンスの指標の定式化

#### (1) 救命救急活動に着目した道路の機能性の評価方法

先述したように道路の機能は交通機能と空間機能に大別される。交通機能を表す指標とし連結性、速達性、交通容量などが挙げられ、様々な観点から道路の機能性の指標化がなされてきている。ここでは、災害発生後に必要とされる道路の機能について整理してみる。災害発生直後の段階では、まず救命救急活動が行われ、それに順じて救援物資輸送、復旧活動、経済活動などの順に道路に必要な機能が時間を経るごとに求められるようになる。したがって、救命救急活動支援機能、緊急物資輸送支援機能、復旧活動支援機能、経済活動支援機能といった、災害発生時から平常時に向かって変化する道路システムの機能それぞれに対して評価指標を構築する必要がある。

前章で示したように本研究ではこのうち救命救急活動

に着目する。この場合には、必要な道路の機能は被災地域へのアクセスであり、1線分の仮復旧であっても道路の機能を果たせたとみなせる。

被害を受けると想定されるある地域に着目して、地域内における人命救助活動について道路ネットワークが果たすべき機能について考えよう。救助班は被災地域へアクセスし、救助活動を行なったのちに、救護者は災害拠点病院へ送られる。このことから、被災地と災害拠点病院が相互にアクセス可能な状態になって初めて道路ネットワークは機能を果たしたと言える。

対象地域において、病院へアクセスできる人口の割合  $Q_i(t)$  を道路ネットワークの機能性を表す指標として次式のように定式化しよう。ここで、 $p^i(t)$  は時刻  $t$  において対象地域  $i$  から病院へアクセス可能な人口であり、 $P^i$  は総人口を表す。

$$Q_i(t) = \frac{p^i(t)}{P^i} \quad (2)$$

一般的に人口分布は均一でなく、同じ地域内においても人口密度に差がある。

ここで、地域  $i$  内のある区域  $j$  における道路の全長を  $L_j^i$ 、拠点病院へアクセス可能な道路延長を  $l_j^i(t)$ 、同一区域内の人口  $p_j^i$  とすると区域内で救助可能な人口  $p_j^i(t)$  は次のようになる。

$$p_j^i(t) = p_j^i \frac{l_j^i(t)}{L_j^i} \quad (3)$$

$p^i(t) = \sum_j p_j^i(t)$  に留意し、式(2)を用いれば、病院へアクセスできる人口の割合  $Q_i(t)$  は次式のように変形できる。

$$Q_i(t) = \frac{1}{P^i} \sum_j p_j^i \frac{l_j^i(t)}{L_j^i} \quad (4)$$

いま、地域  $i$  内の人口に対する区域  $j$  内の人口の比率  $\omega_j^i$  を

$$\omega_j^i = \frac{p_j^i}{P^i} \quad (5)$$

と定義すると、地域  $i$  内の道路ネットワークの機能性は

$$Q_i(t) = \sum_j \omega_j^i \frac{l_j^i(t)}{L_j^i} \quad (6)$$

と表せる。

図-2のような単一路線の場合を考える。この場合、道路ネットワークは線状構造となっているため、対象とする地域内から病院へのアクセス可能な人口を求める必要がある。図-3のように復旧の終了した道路の区域から道路に垂直な方向に救助活動が進められるものとする。このとき、復旧が終了した道路区間にアクセス可能な範囲が救助活動を行える範囲と見なすことができる。この区間内における人口分布が一様であると仮定すれば、道路の

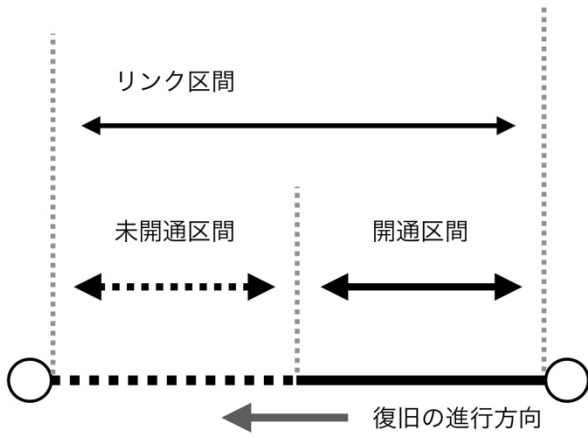


図-2 道路リンクの復旧

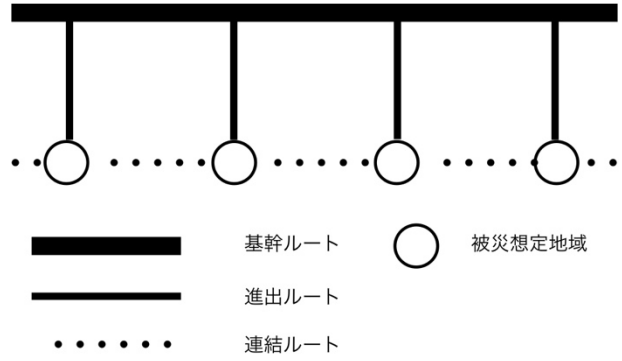


図-4 くしの歯作戦を想定した道路啓開ルート

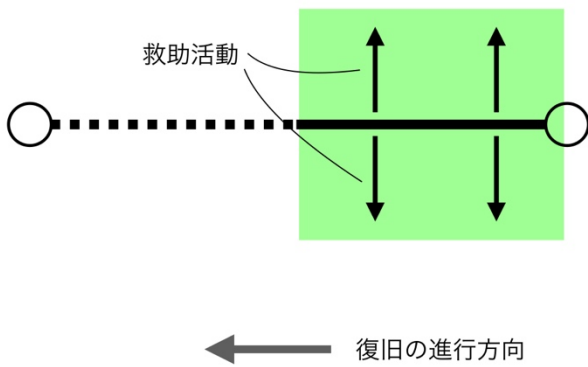


図-3 救命活動が行える範囲

機能性は開通区間に比例することがわかる。右端のノードから病院へのアクセスが可能であるとする、道路リンク  $j$  の長さを  $L_j$ 、そのうち復旧が完了した長さを  $l_j(t)$  とすると、道路リンクの機能性  $Q_j^i(t)$  は次のように表せる。

$$Q_j^i(t) = \frac{l_j^i(t)}{L_j} \quad (7)$$

よって救命救急に関する道路ネットワークの機能性は、道路リンクの機能性  $Q_j^i(t)$  を用いて

$$Q_i(t) = \sum_j \omega_j^i Q_j^i(t) \quad (8)$$

と表せる。

図-2 で示す道路リンクの右端ノードから復旧されるとする。図-2 の開通区間と表せる。と未開通区間の境界で復旧作業が行われており、未開通区間が徐々に開通区間へ変化していく。ここで単位時間当たりに復旧ができる道路距離を復旧速度  $v$  と定義すると、復旧中の時点  $t$  における道路リンクの開通区間長  $l_j^i(t)$  は次式のように復旧速度の関数として

$$l_j^i(t) = vt \quad (9)$$

と表せる。

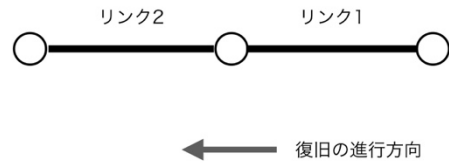


図-5 直列で繋がれた道路

機能性

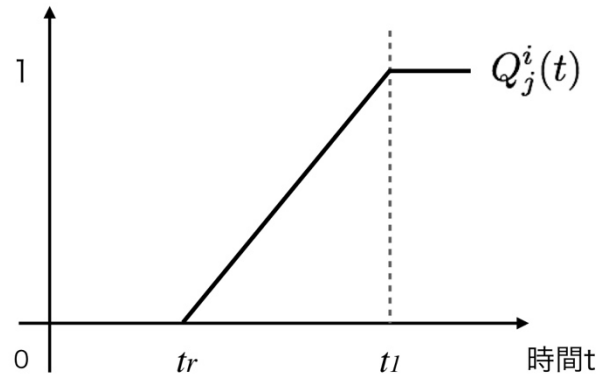


図-6 道路資源投入を考慮した機能性

## (2) 道路ネットワークの設定方法

南海トラフ地震や首都直下型地震を想定した道路啓開計画が各地域において策定されており、その多くは東日本大震災におけるくしの歯作戦を参考に行っている。これらの計画は人命救助活動において生存率が急激に低下するとされる 72 時間の壁を基準として啓開作業完了の目標が立てられている。啓開ルートは対象となる地域において十分な人命救助が行えるような道路ネットワークに設定する必要がある。災害時には道路の管理者や協定を結んだ建設事業者等は選定された啓開ルートに対して優先的に啓開作業を行う。啓開ルート設定方法は被害が比

較的小さいと想定される都市間を連結する広域的な幹線道路を基準として、被害想定の大い都市に通じる道路が選定される。

以上を踏まえ、本研究では図4のようなくしの歯状の道路ネットワークを設定する。被害の小きく広域的に伸びる幹線道路を基幹ルート、基幹ルートから被災地域へ進む道路を進出ルート、被災地域間を接続する道路を連結ルートとする。基幹ルートは他のルートに比べ極めて頑健性が高く、災害による影響を受けないものと仮定する。基幹ルートは啓開作業に必要な資源の運搬に利用されることにより、災害発生と同時に基幹ルートと接続している進出ルートの啓開作業を行うことができるものとする。

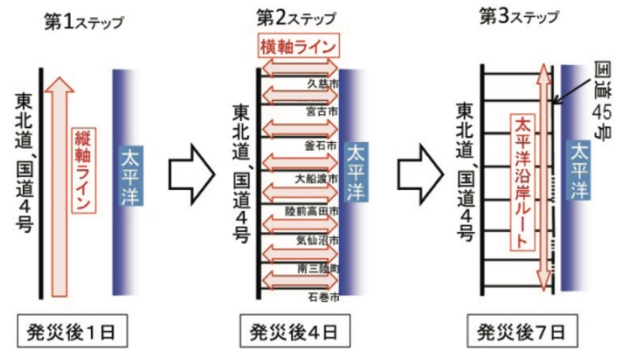


図-7 くしの歯作戦

### (3) 資源投入箇所を考慮した道路リンクの機能性の設定

3.1.で道路リンクの機能性について言及したが、資源の投入可能性については言及しなかった。道路リンクの端点が到達不可能である場合、当該道路リンクは復旧開始できない。そのため、資源の投入箇所を鑑みて、復旧が開始できる時刻を求める必要がある。図-5のように二つ直列に繋がれた道路において、リンク1の端点からのみ道路復旧が開始できるとすれば、リンク2はリンク1の道路の復旧が完了するまで道路の機能は回復できない。このことを考慮すると、道路リンクの機能性 $Q_j^i(t)$ の図-6のようになる。 $t_r$ は道路リンクの到達時刻であり、復旧が開始できることを意味している。 $t_r$ は道路リンクごとに異なる値であるため、リンクごとに求める必要がある。

### (4) レジリエンスの評価

2でも述べたように、Bruneauら<sup>4)</sup>が提唱した計算方法を用いてレジリエンスを評価する。道路ネットワークの機能性は式(8)で示した。これを式(8)を式(1)に代入することで式(10)が得られる。

$$R_i = \int_0^{t_1} \{1 - \sum_j \omega_j^i Q_j^i(t)\} dt \quad (10)$$

この指標を用いて道路ネットワークのレジリエンスを評価する。

## 4. 東日本大震災における道路ネットワークの被害と回復過程

### (1) 被災状況

2011年に発生した東日本大震災では太平洋沿岸地域において津波による甚大な被害が生じた。青森県、岩手

県、宮城県、福島県、茨城県、千葉県にかけての6県における津波到達面積は約535km<sup>2</sup>におよぶとされている。段差や盛土崩壊などの路面損傷や津波の堆積物によって、道路の寸断が東北地方全域で見られた。

### (2) くしの歯作戦

くしの歯作戦の特徴として、啓開作業を行う対象となる道路に優先順位をつけ、そこに啓開作業に必要な資源を集中的に投入したことと言える。人命救助が行える体制の確保を最優先とし、被害の大きかった沿岸都市へのアクセスする救護ルートを確認することだった。

くしの歯作戦の道路啓開は三つのステップに分かれている<sup>9)</sup>(図-7参照)。第一ステップでは東北地方を縦断する内陸部の東北自動車道、国道4号の縦軸ラインの通行を確保である。

第二ステップでは縦軸ラインから太平洋沿岸都市へ走る横軸ラインの確保である。第三ステップでは太平洋沿岸を縦方向に通る国道6号、国道45号の確保することである。地震発生した3月11日に道路啓開ルートが設定され、横軸ラインとして16ルートが選定された。12日の段階で11ルートが確保され、15日には原発事故により啓開作業が中止された1ルートを除く、15ルート全てが確保された。18日には国道6号、国道45号のうち97%が通行可能となり、啓開作業が完了し応急復旧の段階へ移行した。

### (3) 回復過程

東日本大震災が発生して以降、国土交通省は災害情報を随時発表しており、その災害情報には道路の通行規制に関する情報が含まれていた<sup>10)</sup>。通行規制情報には、路線名、規制区間、被災状況がある。路線名は高速道路と国道の路線番号、規制区間はキロポストや地名で表記され、被災状況は法面崩壊や段差、津波などの被害形態別に分類されていた。これらの情報に基づき以下の要領で

表-2 道路啓開速度

路線名	規制区間	区間長 (km)	復旧期間 (h)	復旧速度 (km/h)
国道 45号	宮城県塩釜市 旭町-宮城郡利府町赤沼	6.4	80.5	0.08
国道 45号	宮城県塩釜市 杉の入-越の浦	0.7	4.5	0.156
国道 45号	宮城県東松山市 鳴門大橋 (39.5kp)以北	9.2	8.9	0.103
国道 45号	宮城県東松山市 鳴門大橋 (43.4-44.7kp)以北	1.3	22	0.059
国道 45号	宮城県石巻市内	9	40.5	0.222
国道 45号	岩手県宮古市 (255.5kp)	3.9	53.5	0.073
国道 45号	岩手県宮古市 (276-278kp)	2	2.4	0.083
			平均速度	0.111
			標準偏差	0.058

道路復旧速度を求めた。

公開されている道路規制区間を被災状況別に分類する。そのうち復旧開始時刻、開通時刻、規制区間の長さの三つが推定できるものを選定した。規制区間の長さを復旧開始時刻と規制解除時刻の差分で除したものを道路復旧速度とした。津波浸水被害に関しては災害情報に加え、国土地理院が公開している 10 万分 1 浸水範囲概況図を参考にし、浸水区間を道路啓開の区間長とした。

津波による被害では表-2 に示す結果となった。津波による被害以外では、計算結果にばらつきが大きく、復旧速度を求めることができなかつた。路面の損傷や橋梁部の損傷については、損傷した箇所や損傷度が異なるため、計算結果に差が生じたものと考えられる。

以下、本研究では道路啓開速度として表-2 で求めた算出結果の平均速度を用いる。

## 5. 和歌山県沿岸地域における災害レジリエンス

### (1) 道路啓開計画に基づく道路ネットワークの設定

南海トラフ地震が発生すると和歌山県沿岸部に津波が到来するとされている<sup>11)</sup>。和歌山県地震被害想定調査によると、1 万年に 1 度と想定される M9 クラスの巨大地震が発生した際に、津波による浸水想定区域は 12,620ha に及ぶとしており、和歌山県沿岸部での津波による甚大な被害が懸念されている。和歌山県沿岸部における道路啓開計画の啓開ルートは以下の要領で策定される<sup>12)</sup>。

表-3 地域区分

地域	対象地域	病院数
地域 1	和歌山市, 海南市	6
地域 2	有田市, 湯沢市, 広川町, 有田川町	2
地域 3	由良町, 日高町, 美浜町, 御坊市, 印南町	3
地域 4	みなべ市, 田辺市, 白浜町, すさみ町	4
地域 5	串本町, 那智勝浦町, 新宮市	3

道路ネットワーク内に基幹ルート、連結ルート、進出ルートの三種類の道路を設定する。和歌山県の道路ネットワークでは、大阪府から伸びている阪和自動車道や紀勢自動車道が基幹ルートとしての役割を担っている。国道 26 号や国道 42 号は連結道路とし、基幹ルートと連結ルートを接続する道路を進出ルートとする。

災害救助活動において被災地から離れた病院へ搬送されることは考え難い。救助された場所からできるだけ近い病院へ運ばれることが望まれる。そのため被災地域ごとに搬送すべき病院を制限する必要がある。和歌山県地域防災計画では二次保健医療圏ごとに災害医療体制の整備が取られている<sup>13)</sup>。二次保健医療圏を参考にし、和歌山県道路啓開計画で啓開ルートが定められている地域を表-3 のように 5 つ地域に区分する。それぞれの区分内で救助されたものは区分内のいずれかの災害拠点病院もしくは災害支援病院へ搬送されるものとして考える。

和歌山県道路啓開計画で 72 時間以内に道路啓開を完了することを目標としている。しかしながら、基幹ルートとしている紀勢自動車道はすさみ IC 以東において整備されていない。未整備区間では県道 38 号などの山間部を通り、一車線のみで道路幅が狭い道路が基幹道路としての役割を担っている。そのため、復旧資材を搬入することができない可能性があり、72 時間以内の道路啓開完了は困難であると考えられる。図-8 は串本町における道路整備を表している。右の図は整備後の地図を表しており、図中の赤いノードが新たに復旧班の投入が可能となった地点である。

本研究では、紀勢自動車道の未整備区間において未整備の状態と整備された状態の二つのケースにおけるレジリエンスの算出を行い、それらを比較することで道路整備がもたらすレジリエンスへの影響を検討する。

### (2) 道路ネットワークの機能性

和歌山県では南海トラフ地震によって生じる津波被害が懸念されており、和歌山県道路啓開計画では津波浸水による被害を想定している<sup>11)</sup>。そのため本研究では、津波浸水想定内にある道路を対象に道路の機能性を評価し

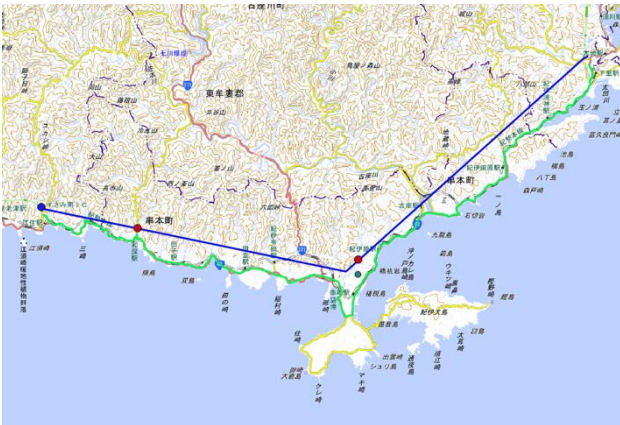


図-8 串本町における高速道路整備

た。津波警報区域では警報が解除されるまで啓開作業を開始できないため、復旧班は津波警報が解除されるまでの間、警報区域手前で待機することが求められる。津波警報解除は地震発生から約 30 時間後を想定している。本研究では津波被害地域を対象にしており、地震発生時刻を 0 とし、その時点から津波警報解除までの 30 時間において道路ネットワークの機能性を 0 とする。道路啓開速度は 4.3 で示した結果を用いる。なお本研究において津波浸水想定外の道路の被害はなく、道路啓開作業が行われないと仮定する。

人口重みは式(5)で示すように地域*i*内の人口と道路リンク*j*から救助できる人口の比で表せられる。ここで、地域内での人口分布が一樣であると仮定すると、地域内の道路全長*L<sup>i</sup>*と道路リンク*j*の長さ*L<sub>j</sub><sup>i</sup>*の比で表すことができる。各地域内における道路ネットワークのレジリエンスは次の式で表される。

$$R_i = \int_0^{t_1} \{1 - \sum_j \frac{L_j^i}{L^i} Q_j^i(t)\} dt \quad (11)$$

式 (11)に基づき道路ネットワークのレジリエンスを算出する。

### (3) 病院へのアクセシ性

地域内の災害拠点病院または災害支援病院へのアクセスが確保されない限り道路ネットワークの機能が果たせ

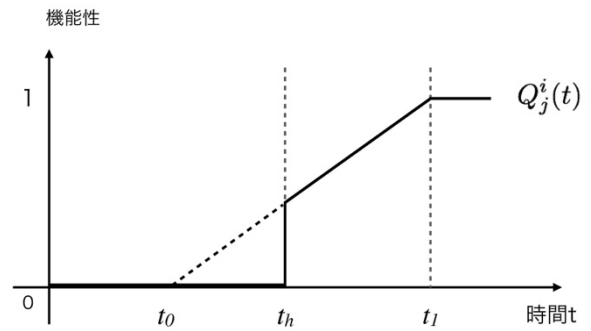


図-9 病院までの開通時刻

表-4 病院までの啓開時間

地域	病院名	浸水被害	開通時刻(h)
1	国保野上総合病院	なし	-
1	海南医療センター	あり	40.7
1	和歌山労災病院	あり	58.0
1	済生会和歌山病院	なし	-
1	赤十字和歌山医療センター	なし	-
1	和歌山県立医科大学付属病院	あり	79.6
2	有田市立病院	あり	90.7
2	済生会有田病院	なし	-
3	国保日高総合病院	あり	61.9
3	北出病院	あり	60.7
3	和歌山病院	あり	64.7
4	紀南病院	なし	-
4	南和歌山医療センター	なし	-
4	白浜はまゆう病院	あり	116.7
4	国保すさみ病院	あり	40
5	くしもと町立病院	なし	-
5	那智勝浦町立温泉病院	あり	46.8
5	新宮市医療センター	なし	-

られていると言えないため、拠点のいずれかがアクセス可能となるまでは道路ネットワークの機能性は 0 とする。災害拠点病院または災害支援病院のいずれかの病院へアクセス可能となった時点から、道路の機能性が果たせられると考える。病院へのアクセスが可能となる時刻を算出することにより対象地域における病院へのアクセシ性を定義する。

病院までの啓開作業経路長を 4. で求めた道路啓開速度で除することで、病院へのアクセスが可能となる時刻を求める。地域内の病院のうちアクセス可能となる時刻が最も早いものを病院アクセス可能時刻とする。病院への道路啓開作業が完了しない限り、他の道路が啓開されたとしても道路の機能は 0 のままとなる。そのため、道路ネットワークの機能性は図-9 で表される形となる。t<sub>0</sub> は津波啓開解除の時刻、t<sub>h</sub> は地域内の病院へのアクセスが可能となる時刻を表している。

それぞれの区分における病院へアクセス可能となる時

刻は表4で示す結果となった。

**(4) レジリエンスの評価結果**

それぞれの地域におけるレジリエンスは表-5、機能性を図-10で示す結果となった。図-10のグラフでは地震発生から30時間後までの間は津波警報が発令されていると想定されているため、道路啓開作業が行われず、道路の機能は回復しない。津波警報が解除される30時間後から道路啓開作業が開始され道路の機能が回復する。地域3における道路の機能性は病院までの啓開が完了するまでの間救命救急の機能が果たせられないため、道路啓開が完了する約60時間後から道路の機能が回復している。

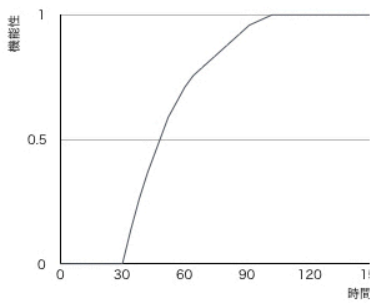
グラフの傾きは道路ネットワークの回復の速さを表している。道路啓開速度が一定であると想定しているため、啓開作業が行われている箇所が多いほどグラフの傾きは大きく回復力が高いと考えられる。啓開作業が開始された初期段階では、啓開作業が行われている箇所が多く、道路リンクの啓開作業が完了していくにつれて道路啓開作業が行える箇所が少なくなっていくため、啓開作業の終期段階ではグラフの傾きは小さくなっていると考えられる。

地震発生から72時間以内の救助が重要とされている。

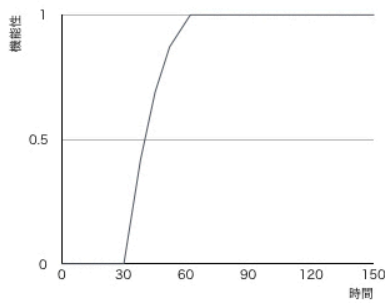
そのためレジリエンスの値が72以下となるのが最低限確保すべき水準である。救命救急活動を行うための時間を考慮すると地震発生から48時間以内に道路が啓開されることが望ましいと考えられる。そのため道路ネットワークはレジリエンスの値が48以下である状態が望ましい。

以上の観点から考えると地域2における道路ネットワークのレジリエンスは十分であり、地域1、地域3及び地域4の道路ネットワークでは十分とは言えないものの最低限確保すべき道路ネットワークのレジリエンスは保有しているといえる。地域5においては他の区間に比べて機能回復に時間がかかっており、72時間では機能回復度は50%にも満たない。これは、この区間は紀勢自動車道の未整備区間であり、道路啓開のための資源が区間の両側からしか投入できないために啓開作業に時間がかかっているためである。

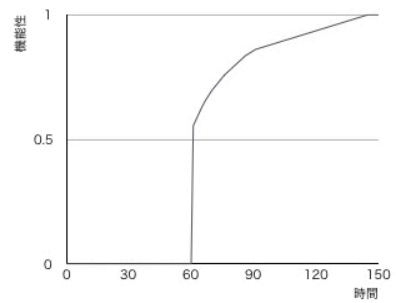
地域3では災害拠点病院および災害支援病院のすべてが浸水想定区域内に立地しており、病院までのアクセスを確保するために時間を要したため、災害発生後60時間は救命救急機能の回復は生じず、レジリエンス指標の値も高くなる。本研究では道路が開通されれば病院の機能が果たせると仮定した結果であるが、浸水による病院の医療機能の低下も懸念される。



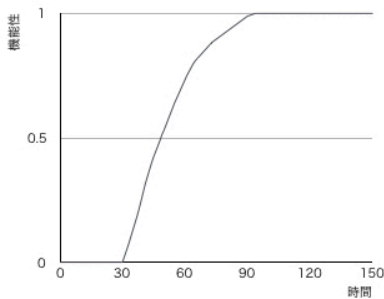
地域1



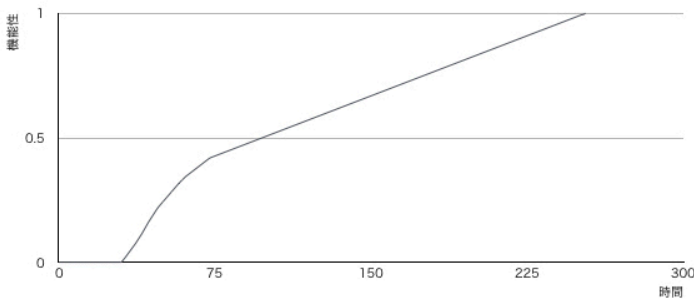
地域2



地域3



地域4



地域5



表-5 各地域におけるレジリエンスの算出結果

地域	啓開作業完了時刻(h)	レジリエンス(h)
地域 1	102	52.9
地域 2	62	41.6
地域 3	145	72.4
地域 4	94	51.6
地域 5	255	114.9

表-6 道路整備によるレジリエンスの変化

	啓開作業完了時刻(h)	レジリエンス(h)
整備前	255	139.5
整備後	126	70.7
差	129	68.8

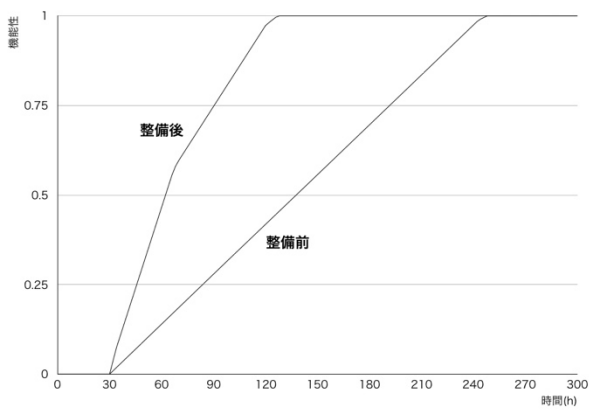


図-11 整備前後の道路網の機能性

### (5) 高速道路整備によりレジリエンスの影響

幹線自動車道の未整備区間における整備前と整備後のレジリエンスは表-6で示す結果になった。高速道路の整備により、啓開作業完了時刻が129時間、レジリエンスが68.8時間短縮する結果となった。これは道路の未整備区間に住んでいる人々が病院までのアクセスが可能となる時刻を平均して68.8時間短縮したことを意味している。このことにより、高速道路の整備がレジリエンス向上する効果があることが示すことができる。

救命救急段階において高速道路が果たすべき役割は救護者の搬送と道路啓開作業に必要な資源の運搬であるといえる。高速道路の整備により、道路啓開作業の資源運搬機能が向上したことで、道路の回復力が向上したと考えられる。高速道路の整備を行うことにより道路啓開作業に必要な資源の投入できる箇所が増え、道路啓開作業を開始できる箇所が増えたため、道路ネットワークの回復力が向上し、レジリエンスの改善につながったと考えられる。表-6の結果からも、高速道路が持つ復旧作業に必要な資源を運搬する機能は道路ネットワークの回復力

を大きな影響を与えることがわかる。

本研究では高速道路のインターチェンジから無限に資源が投入できることを想定した。しかしながら、実際には道路啓開にかかる資源は有限である。本研究において高速道路の整備によりレジリエンスが向上することを示したのは、資源が確保されている前提である。資源量が有限であることを考慮すると、全てのインターチェンジから道路啓開が開始できない可能性がある。そのため本研究で示した結果はレジリエンスを過大評価している可能性がある。

## 6. まとめ

本研究ではBruneauら<sup>4)</sup>のレジリエンスの評価の考え方に基づき、道路ネットワークのレジリエンスの評価手法を提案した。その際、災害発生後において必要とされる道路ネットワークの機能性について整理し、その中でも救命救急の観点から救助可能な人口割合として道路ネットワークの機能性を定義した。道路啓開による道路ネットワークの回復力を表す指標として道路啓開速度を定義し、東日本大震災の災害情報を元に道路啓開速度の算出を行った。提案した手法に基づき、和歌山県道路啓開計画で定められている啓開ルートにおいてケーススタディを実施した。和歌山県でのケーススタディを実施する際、分割した地域内において人口分布が一樣だと仮定して人口の重みの算出を行った。本研究により以下の知見が得られた。

1)国土交通省が公開している東日本大震災の災害情報の通行規制情報に基づき浸水地域における道路啓開速度を求めることができた。

2)提案する手法に基づき、救命救急に着目した道路ネットワークの機能性を定義することでレジリエンスを定量的に評価することができた。

3)道路整備の実施前と実施後のレジリエンスの差を比較することで、高速道路整備の有効性をレジリエンスの観点から示した。

今後の課題として以下のような課題が挙げられる。

1)本研究では救命救急の段階において道路ネットワークの機能性を定義したが、救援物資輸送や復旧復興段階における道路ネットワークの機能性は定義されていない。全ての段階において道路ネットワークの機能性を表す指標を定義する必要がある。

2)東日本大震災における通行規制状況から道路啓開速度の算出を試みたが、その精度はあまり高くはなかった。道路啓開計画において一車線分を暫定的に開通することを目標としているが、東日本大震災の例では二車線以上の啓開作業が行われている区間もあったことも考えられる。そのため、より精度が高く道路啓開計画に応じた道

路啓開速度の算出方法を提案する必要がある。

3)本研究では人口分布が均一であると仮定して道路ネットワークの機能性を定義したが、実際には人口分布には差があるため、正確な算出結果になっていると言いはない。人口分布の考慮したレジリエンスの算出を行うべきである。

4)復旧班の投入箇所は基幹ルートと進出ルートの接続点のみに限定し、そこから道路啓開作業にかかる資源が無限に投入できる状況を想定してレジリエンスの算出を行った。実際には資源が有限であるため、この想定ではレジリエンスを過大に評価してしまう恐れがある。資源投入量を制限することでより現実に近い想定でレジリエンスの評価を行うことができると考えられる。

5)道路啓開計画において、地域内にある事業者と協定を結ぶことで復旧にかかる資源の確保が図られている。協定の有無による道路ネットワークのレジリエンスを評価することができると考えられる。

## 謝辞

本研究を遂行するに当たり、近畿地方整備局から資料提供を受けた。また、研究の遂行に当たり、近畿地方整備局、京都大学防災研究所共同利用・共同研究、文部科学省科学研究費等から支援を受けた。ご支援をいただいた関係各位に感謝の表すものである。

## 参考文献

- 1) 内閣官房国土強靱化推進室：国土強靱化基本計画
- 2) 内閣官房国土強靱化推進室：国土強靱化とは
- 3) 国土交通省：道路ネットワークの防災機能向上効果計測

マニュアル

- 4) Bruneau M. et.al.: A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, vol.19, No.4, pp.733-752, 2003.
- 5) 庄司学, 笛木孝哲: 地震災害時における道路ネットワーク機能損失評価モデル, *土木学会地震工学論文集*, 28 巻, pp.138-147, 2005.
- 6) 矢野和彦, 杉田秀樹, 野崎智文: 道路ネットワークの耐震性指標を用いた道路耐震化計画のあり方, pp.1041-1044, 1999.
- 7) 古田均, 中津功一朗, 高橋亨輔, 石橋健, 香川圭明: 地域レジリエンスを考慮した道路網の信頼性解析に基づく地震対策の評価, *土木学会論文集 F6 (安全問題)*, Vol.70, No.2, I\_73-I\_80, 2014.
- 8) 多々納裕一: 道路ネットワークのレジリエンスの計量化に向けて, *高速道路と自動車*, 60(9), pp.5-8, 2017.
- 9) 国土交通省東北地方整備局: 「くしの歯作戦」について
- 10) 国土交通省: 東日本大震災, 第1報-第72報
- 11) 和歌山県: 和歌山県地震被害想定調査報告書(概要版), 2014.
- 12) 和歌山県道路啓開協議会: 南海トラフ地震に伴う津波浸水に関する和歌山県道路啓開計画
- 13) 和歌山県防災会議: 震災時医療体制確保計画, 和歌山県地域防災計画・津波災害対策計画編, pp.128-129, 2016.
- 14) 静間俊郎, 中村孝明, 吉川弘道: ラダー系システムを用いた高速道路の地震時車両通行機能性評価, *土木工学論文集 A1 (構造・地震工学)*, 67 巻 1 号, p.84-94, 2011.
- 15) Holing C.: Resilience and Stability of Ecological System, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, pp.1-23, 1973.
- 16) 内閣府: 国土強靱化推進について, 平成 25 年版防災白書第 1 部第 4 章 4.

(2018.4.27 受付)

# PROPOSAL OF HIGHWAY NETWORK RESILIENCE INDEX FOR THE ACCESSIBILITY TO MEDICAL CARE FACILITIES

Taiki HORINO and Hirokazu TATANO

The concept of "resilience" has been attracting attentions in the field of disasters research and administration of disaster risk reduction, especially after the 2011 Great Eastern Japan Earthquake. "Resilience" concept is composed of "resistance" and "recoverability." Brauneau, et.al.(2003) proposed resilience index to capture these two features of resilience by introducing "loss of functionality" the regeneration into the definition of the resilience index. Based on Brauneau, et.al.(2003)'s work, the paper proposes a method of evaluating resilience of the highway network against Tsunami focusing on its functionality related to the search and rescue activities. The paper also provides the estimate of speed of functionality recovery based on traffic regulation data obtained in the 2011 Great East Japan Earthquake. A case study is conducted at Wakayama Prefecture, Japan. It is shown that our resilience index can successfully capture the differences of recoverability from Tsunami in terms of functionality related to search and rescue activities. Remarkable contribution of a new expressway for improvement of resilience is illustrated.