

アクセシビリティ指標を用いた自然災害時の 道路網の復旧順位設定手法に関する研究

大澤 脩司¹・中山 晶一郎²・藤生 慎³・高山 純一⁴・溝上 章志⁵

¹学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: s.osawa.ku.sed@gmail.com

²正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: fujii@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴フェロー 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

⁵正会員 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2丁目39-1)
E-mail: smizo@gpo.kumamoto-u.ac.jp

自然災害が発生すると、それに伴う道路被害の発生によって様々な影響が生じる。被災者の早期の生活再建、被災地の復旧・復興のためには、これら被災道路を効果的に復旧していくことが重要である。本研究では自然災害による被災道路網の復旧戦略策定のための道路網評価手法として、ポテンシャル型アクセシビリティ指標に着目した手法を提案し、平成28年熊本地震で被災した熊本都市圏道路ネットワークを対象に、その手法の適用性を検討した。その結果、享受可能なサービスの機会数を反映した被災道路の復旧順位を設定できる可能性が示された。

Key Words : *natural disaster, accessibility, road network, restoration rank, restoration strategies*

1. はじめに

地震をはじめとする自然災害が頻発する我が国では、自然災害に対する事前・事後対策は被害の防止・軽減のために必要不可欠である。自然災害は未だ未知な部分も多く、被害を完全に防止することは困難である。このため、自然災害による被害をいかに軽減するかが重要となる。被害を軽減するためには被災地への人的・物的資源の輸送、救急・救助活動、避難活動などを円滑に行うことが重要となる。このためには被災地の道路網が災害発生後も機能を維持していることが求められる。また、道路網の機能が維持されていることは、これら発災直後の円滑な活動という視点だけでなく、自然災害からの復旧・復興を迅速に行う上でも重要である。被災地内の重要な道路に通行不能な区間が多数存在する状況下では、復旧・復興活動が大きく制限されるばかりでなく、被災地域に居住する人々の生活水準も大きく低下することは想像に難しくない。

実際に、2016年4月14日に前震が、同16日に本震が発生した平成28年熊本地震においては、緊急輸送道路を含む重要な道路が多数被災し、通行不能となったことから、発災直後の緊急輸送や避難活動に支障をきたしただけでなく、発災数日後から熊本市内などで平時には見られなかった渋滞が発生している¹⁾。また、一部の地域では発災から数ヶ月経過した段階でも通行止めが解消されておらず、長大な迂回が必要となるために日常生活に支障を生じたことも報告されてる²⁾。

このように、自然災害が1度発生すると、複数の重要な道路が通行止めになったり通行規制が行われるなどにより、被災地の道路交通に多大な影響を生ずる。この影響を最小限に抑制するためには、事後的な対策として、被災した道路網の効果的な復旧計画を策定し実行することが重要であると言える。しかし、このような復旧計画を策定するための学術的な知見の蓄積は十分とは言えないのが現状である。

従来、復旧優先順位の検討における道路網評価では、

移動時間や交通量などの発災前の道路交通状態との乖離度合いに着目して復旧効果が評価されてきた。しかしながら、自然災害発生後の交通需要パターンは移動目的の変化や新たな交通需要の発生によって、発災前の状態から変化を生じる場合がある。このため、発災後の道路交通状態に応じた道路網の復旧計画を検討することが求められる。そこで本研究では、被災者の移動目的に対するアクセシビリティを改善することに着目した被災道路網の復旧順位設定手法を構築する。具体的には、まず被災地の道路利用者が享受するサービス機会を考慮した道路網の評価指標として、被災道路の復旧によるアクセシビリティ改善量を定義し、道路の復旧優先順位の設定手法を提案する。次に仮想ネットワークに提案手法を適用し、道路網の評価指標の特性の把握を試みるとともに提案手法の計算手順を例示する。さらに熊本都市圏の道路網に提案手法を適用し、その結果を考察する。

2. 既往研究の整理及び本研究の位置付け

本章ではまず、自然災害などにより被災した道路網の復旧優先順位に関する既往研究を整理し、道路網の復旧計画策定のための課題を示す。次に、それら課題に対し、ポテンシャル型アクセシビリティ指標を活用することを提案するとともに、関連研究を整理し、本研究の位置付けを示す。

(1) 被災道路網の復旧優先順位に関する研究

堀井³⁾は計量地理学において任意の地点間の理想的な距離と実際の距離との隔たりを表す指標として用いられる迂回度に着目し、自然災害における旅行時間の増加割合を表現し、道路網の代替機能を簡便に評価する手法を示している。更にここで示した指標を拡張し、被災道路の復旧による代替機能の回復度合いを考慮した復旧優先順位を検討することを提案している⁴⁾。山田ら⁵⁾は特に地震を対象とした発災後の道路網の復旧シミュレーション手法を示している。山田ら⁵⁾はこの中で、復旧の進展状況に応じて総交通量の平常時からの減少量、平均走行時間、換算交通量損失の3つの道路網の評価指標を提案している。有村ら⁶⁾は復旧班数とその復旧能力を制約条件とした組合せ最適化問題として定義した復旧順位決定モデルを構築している。この研究では累積頻度分布曲線（累積機会指標）を用いたアクセシビリティ指標をもとに道路網全体での復旧時間の短縮化と復旧早期でのアクセシビリティの効果的な回復が見込める復旧スケジュールを構築している。杉本ら⁷⁾は有村ら⁶⁾に対し更に復旧班の協力体制を考慮した復旧モデルへの拡張を行っている。小西ら⁸⁾は交通流シミュレーションに基づく災害時

の道路網の復旧優先順位設定手法を提案している。ここではシミュレーションによって算出した平常時の移動時間に対する災害時の移動時間の比を、道路利用者がどれだけ現状の移動に満足しているかを表す総満足度と定義して道路網評価を行っている。

これら既往研究では、被災道路網の復旧優先順位をどのように決定するかという点では個々に特徴があるが、優先順位を決定するために道路網評価を行っているという点では一致する。これは、復旧優先順位を決定するためには、ある被災道路の復旧によって、道路網の機能がどの程度回復するかを把握することが不可欠なためである。すなわち、被災道路網の復旧優先順位決定においては道路網の評価が非常に重要な意味を持つと言える。被災した道路網を効果的に復旧するためには、各復旧段階において「道路交通のサービス水準の回復度合いが可能な限り大きくなるような道路を復旧させること」が求められる。この観点で捉えると、以下の2点が被災道路網の復旧優先順位を検討するための道路網の評価基準になると考えられる。

- i) 復旧によって各地域（地点）間の時間的距離あるいは空間的距離が平時に近くなる道路ほど復旧効果が高い。
- ii) 復旧によって各地域（地点）におけるサービス機会への時間的あるいは空間的近接性が平時に近くなる道路ほど復旧効果が高い。

これら評価基準に着目して既往研究を整理すると、堀井^{3,4)}、小西ら⁸⁾ではi)は考慮されているがii)は考慮されていない。山田ら⁵⁾は平均走行時間指標でi)を、換算交通量損失指標でii)をそれぞれ考慮していると言えるが、平均化することで復旧効果の差を確認しづらくなる可能性がある。また、換算交通量損失指標については算定の際に平均走行時間の単位増加量あたりの経済的損失が所与である必要があるが、復旧計画の策定時点ではこのような経済的損失を定量的に把握することは必ずしも容易ではないと考えられる。有村ら⁶⁾、杉本ら⁷⁾はある時間距離で到達可能な都市数に関する累積頻度分布曲線を用いたアクセシビリティ指標を用いているため、i)およびii)を考慮していると言える。しかし、都市が提供するサービス機会は都市によって異なると考えられるが、単純な都市数のみでの評価ではこの点を十分考慮できていないと考えられる。

本研究ではアクセシビリティ指標の1つであるポテンシャル型アクセシビリティ指標に着目し、これら課題への対応を試みる。

(2) ポテンシャル型アクセシビリティ指標に関する研究

ポテンシャル型アクセシビリティ指標とは、ある地域の全地域のサービス機会への近接性を、各地域のサービ

ス機会の大きさと他地域までの交通抵抗によって表す指標である⁹⁾。ポテンシャル型アクセシビリティ指標は一般的に式(1)のように定義される。これは各地域で提供されるサービス機会数が交通抵抗によって低減することを重力モデルの形式で表現している。

$$A_i = \sum_j D_j f(c_{ij}) \quad (1)$$

ここで、 A_i ：地域 i のポテンシャル型アクセシビリティ、 D_j ：地域 j のサービス機会数、 c_{ij} ：地域 ij 間での移動に関する交通抵抗、 $f(c_{ij})$ ：交通抵抗関数である。なお、交通抵抗関数には以下の形式がよく用いられる¹⁰⁾。

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-\gamma} \quad (2)$$

$$f(c_{ij}) = \exp(-b \cdot c_{ij}) \quad (3)$$

$$f(c_{ij}) = \alpha c_{ij}^{-\gamma} \exp(-b \cdot c_{ij}) \quad (4)$$

ここで、 α 、 γ 、 β はパラメータである。

ポテンシャル型アクセシビリティ指標を用いるにあたり、サービス機会の与え方を検討する必要がある。この与え方には様々考えられるが、例えば、地方都市での交通利便性評価を行った加知ら¹¹⁾は企業の従業員数、高校・大学の定員、病院の病床数、大規模小売店店舗の延床面積から与えている。また、災害の発生を想定した道路網整備・医療施設配置に関する研究である近藤ら¹²⁾では、医療施設配置の検討を目的としているため、病床数によってサービス機会を与えている。本研究のように、自然災害で被災した道路の復旧計画の策定を目的とした道路評価を実施する場合、発災後の時期に復旧を実施するかによって設定すべきサービス機会は変化するものと考えられる。例えば、発災後初期の段階では救助・救急活動や緊急輸送などの災害対応活動のための道路啓開が目的とされることから、避難施設数や避難者数などが考慮される必要がある。一方で、本格的な復旧・復興期を対象とした場合には、被災者の生活行動は被災前の状態に戻っていく時期であるため、平時の交通需要を参考としたサービス機会の設定が考えられる。

以上のようなポテンシャル型アクセシビリティ指標を用いた道路評価により、2.(1)に示した復旧優先順位を検討するための2つの道路網の評価基準を満たすことができると考えられる。

3. ポテンシャル型アクセシビリティ指標を用いた被災道路網の評価手法

(1) 道路網の評価指標の定式化

本研究ではアクセシビリティを、対象道路網における

代表的な地域（ノード）におけるサービス機会への近接性を評価する指標として考える。交通抵抗関数は既往研究^{11) 12)}にない式(2)の指数型の関数を用いて式(5)のように定義する。ここで式中 b は時間的・空間的距離に対する感度を表している。すなわちこの値が大きいほど、単位距離あたりの交通抵抗は大きく評価される。近藤ら¹²⁾で述べられているように、想定する状況に応じた設定が必要となる。例えば災害時の重症患者の搬送や被災した道路網の復旧など緊急・迅速な対応を要する状況を想定する場合には大きく設定する必要がある。

$$A_i = \sum_{j=1}^J D_j \exp(-bc_{ij}) \quad (5)$$

道路網評価はある地域だけでなく道路網全体としての評価も重要である。そこで、式(5)について対象地域すべてのアクセシビリティ A_i の総和をとり、式(6)で道路網全体でのアクセシビリティ TA (Total Accessibility) を定義する。

$$TA = \sum_{i=1}^I A_i = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_j \exp(-bc_{ij}) \quad (6)$$

本研究では被災道路網の復旧優先順位の検討が目的である。このため、各被災道路の復旧によるアクセシビリティ指標の改善量を比較し、各復旧段階における復旧道路を決定する必要がある。復旧段階 R_n における被災道路リンク dl_k ($k = 1, 2, \dots, K$) の復旧によるアクセシビリティの改善量 AIA (Accessibility Improvement Amount) を式(7)で定義する。

$$AIA_{dl_k}^{R_n} = TA_{dl_k}^{R_n} - TA^{R_n} \quad (7)$$

ここで、 TA^{R_n} ：復旧段階 R_n における道路網全体でのアクセシビリティ、 $TA_{dl_k}^{R_n}$ ：被災道路リンク dl_k を復旧させた際の道路網全体でのアクセシビリティである。

また、被災道路網において改善させるべきアクセシビリティの総量 $TAIA$ (Total Accessibility Improvement Amount) は、平常時 R^N における道路網全体でのアクセシビリティと、道路リンクが被災時のまま1つも復旧されていない状態 R_0 での道路網全体でのアクセシビリティの差として式(8)で定義できる。

$$TAIA = TA^{R^N} - TA^{R_0} \quad (8)$$

これを活用すれば、各復旧段階において、被災初期の状態からのアクセシビリティの改善率 AIR (Accessibility Improvement Ratio) は式(9)で定義される。

$$AIR^{R_n} = \frac{ARA_{dl_k}^{R_n}}{TAIA} = \frac{TA_{dl_k}^{R_n} - TA^{R_0}}{TA^{R^N} - TA^{R_0}} \quad (9)$$

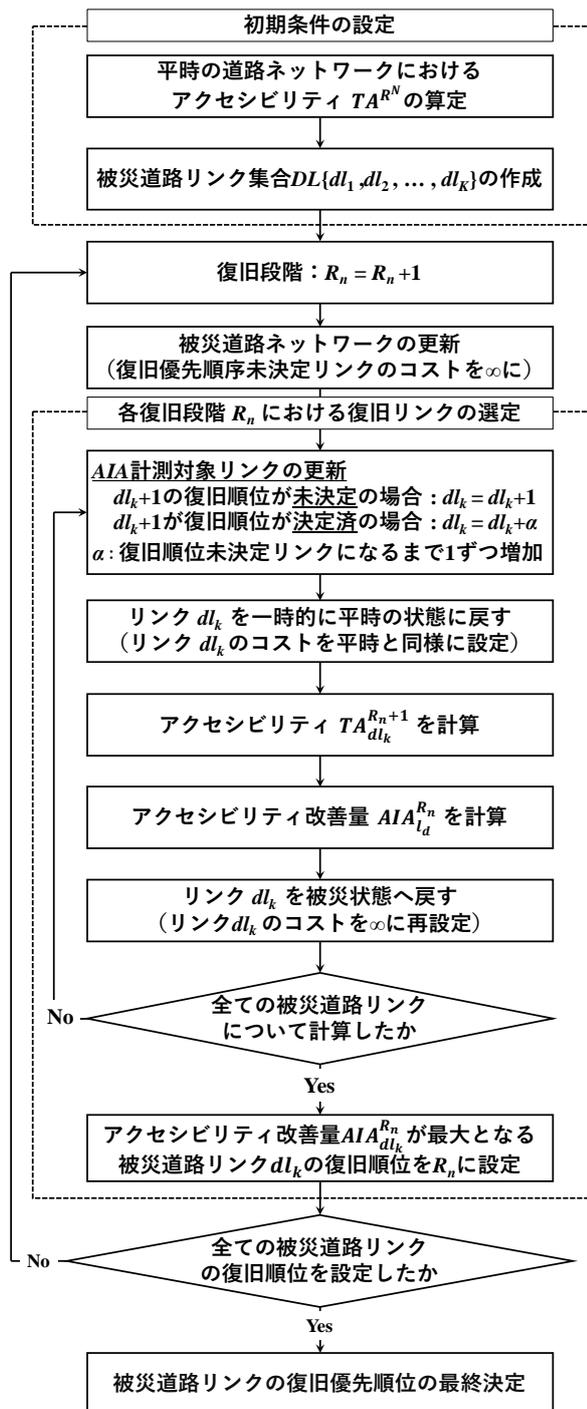


図-1 被災道路リンクの復旧優先順位の決定フロー図

(2) 復旧優先順位の決定方法

実際の道路網の復旧作業においては、複数の被災道路リンクを同時に復旧させることが想定される。しかし、復旧道路リンクの組合せ数は被災道路リンク数 K に対して $K!$ 通りの膨大な数となるため、そのすべてを検討することは困難である。本研究では提案した道路網の評価指標を用いた場合の復旧優先順位設定手法の特徴及び課題を明らかとすることを目的とし、各復旧段階での復旧道路リンク数を1とする簡便な条件設定下で評価する。

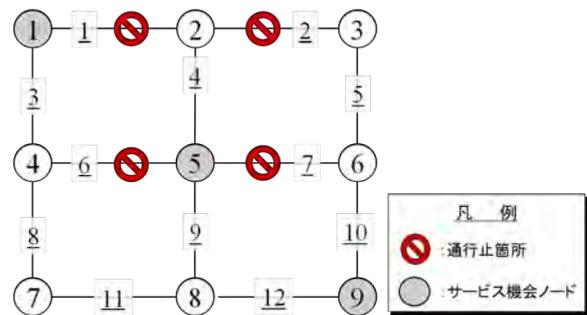


図-2 仮想ネットワーク概要図

表-1 仮想ネットワークリンク自由旅行時間

リンク	自由旅行時間
1	10.5
2	11.0
3	11.5
4	12.0
5	12.5
6	13.0
7	13.5
8	14.0
9	14.5
10	15.0
11	15.5
12	16.0

復旧優先順位は、各復旧段階においてアクセシビリティの改善量 AIA が最も大きくなる被災道路リンク ld_k を復旧させるという方針で決定する。また、アクセシビリティの算定対象である代表地域（ノード）間の距離は経路旅行時間により時間的距離で計測する。この際、経路旅行時間は経路上の各リンクの自由走行時間の総和で定義する。また、移動経路は最短経路探索によって決定するものとする。以上のような条件設定における復旧優先順位の決定フローは図-1のようになる。

4. 道路網評価指標の仮想ネットワークへの適用

本章では3章に示した道路網の評価指標の特性を把握するとともに、計算例を示すため、仮想ネットワークを用いた分析を行う。

(1) 仮想ネットワークでの分析の条件設定

分析を行う仮想ネットワークは図-2に示すように、9ノードで構成される12リンクのネットワークとする。各ノード及びリンクは、ノード・リンクの中央部にそれぞれ記載した数字によって識別する。なお、リンク番号に

表-2 仮想ネットワークにおける復旧優先順序

復旧優先順位	復旧リンク
1	1
2	7
3	2
4	6

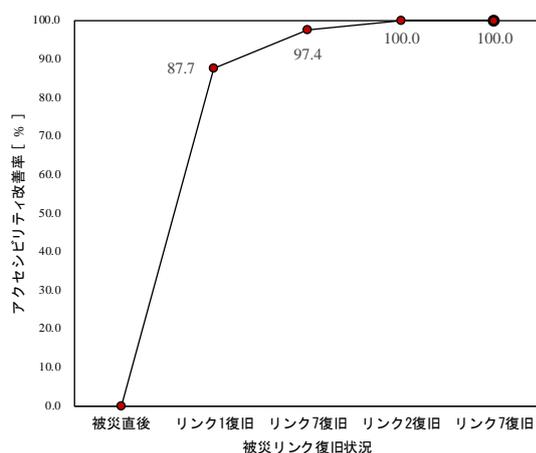


図-3 復旧段階ごとのアクセシビリティの改善率

表-3 各復旧段階での仮復旧リンクごとの道路網全体でのアクセシビリティ値

復旧段階	復旧リンク			
	1	2	6	7
1	845.2	735.1	830.1	744.3
2	-	851.4	845.2	857.3
3	-	860.6	857.3	-
4	-	-	860.6	-

についてはノード番号との混同を避けるために番号に下線を併せて記載している。式(6)によるポテンシャル型アクセシビリティ指標を算定するにあたり必要となるサービス機会を有するノード（サービス機会ノード）は、図-2において灰色に着色したノードとして示した。すなわち、サービス機会ノードはノード1, 5, 9に設定した。各サービス機会ノードが有するサービス機会数についてはすべて一律200とする。復旧の対象である通行不能なリンクはリンク1, 2, 6, 7に設定した。各リンクの自由旅行時間を表-1に整理した。ここで、各サービス機会ノードのサービス機会数を一律に設定したため、対称な仮想道路ネットワークではどの通行不能区間を復旧しても復旧効果が同様あるいはほぼ変化しないことが想定されたことから、各リンクの自由旅行時間は一律に設定していない。交通抵抗関数の距離に対する感度のパラメータ b については近藤ら¹³⁾の仮想ネットワークによる数値実験と同様に0.05に設定した。

(2) 復旧優先順位とアクセシビリティの改善率の評価

通行不能・要復旧区間として設定したリンク1, 2, 6, 7の復旧優先順位は表-2のように決定された。また各復旧段階におけるアクセシビリティの改善率は図-3のような結果となった。本分析ではサービス機会数を一律同値としているため、目的地までの到達時間が短くなるようなリンクを復旧する方が復旧の効果は大きく出ることになる。表-3に各復旧段階において、各被災リンクを仮復旧させて計測した道路網全体でのアクセシビリティ $TA_{id}^{R_n}$ の値を示す。復旧優先順位が1位となったリンク1は、復旧した場合はノード1とノード5間およびノード1とノード9間のアクセス性を改善することができる。次点の復旧候補であるリンク6も同様のOD間についてアク

表-4 第1復旧段階におけるリンク1とリンク6の復旧による移動時間の短縮効果の比較

復旧リンク	発ノード	着ノード	復旧後最短経路	復旧後移動時間	復旧前移動時間	短縮移動時間	総短縮移動時間
リンク1	1	5	1→4	22.5	55.5	33.0	212.0
	1	9	1→4→9→12	53.0	106.0	53.0	
	5	1	4→1	22.5	55.5	33.0	
	5	9	9→12	30.5	50.5	20.0	
	9	1	12→9→4→1	53.0	106.0	53.0	
	9	5	12→9	30.5	50.5	20.0	
リンク6	1	5	3→6	24.5	55.5	31.0	204.0
	1	9	3→6→9→12	55.0	106.0	51.0	
	5	1	6→3	24.5	55.5	31.0	
	5	9	9→12	30.5	50.5	20.0	
	9	1	12→19→6→3	55.0	106.0	51.0	
	9	5	12→9	30.5	50.5	20.0	

セシ性を改善することができるが、表-4に示すように、リンク1を復旧させた場合の方が移動時間の短縮効果が大きいと評価されている。表-3より、第1復旧段階では、リンク6の復旧効果はリンク1の次点であった。しかし、次の復旧段階では、リンク1を復旧したことで道路網の状況が変化し、先ほど次点の復旧候補として考えられたリンク6ではなくリンク7の方が復旧効果が高くなっている。これは、リンク1が通行できた場合には、リンク6を復旧してノード1とノード5間のアクセス性を改善するより、リンク7を復旧してノード1とノード9間及びノード5とノード9間の2つのODペア間のアクセス性を改善する方が移動時間の短縮効果が大きいと評価されている。ただし、今回はサービス機会数を一律に設定しているため、単純な移動時間の差で比較することができたが、各ノードのサービス機会数が異なる場合にはリンク6を復旧させる方が効果が高いと評価される場合もあり得る。以上のように、ある復旧段階では、最良の復旧リンクの次点として復旧の候補にあがるようなリンクであっても、復旧が進むにつれて復旧効果が薄くなるような現象についての評価可能性を有することが分かる。

また、被災初期の道路網全体でのアクセシビリティに対する改善率に着目すると、リンク1を復旧した時点で、平時の87.7%ほどまでアクセシビリティを改善できている。第2復旧段階でリンク7を復旧した時点で改善率は97.3%であり、第3復旧段階でリンク2を復旧した時点で、アクセシビリティでの評価上は、道路網は平時とほぼ同様の機能を発揮していることが分かる。実際の道路網を対象とした場合にはこのような急激なアクセシビリティの改善は見られないと考えられるが、あるリンクを復旧した場合に、道路網全体としてはどの程度まで機能を回復するのかという点は、復旧計画を検討する際の重要な示唆の1つとなりうると考える。

実際の道路網では、発災からの時間経過によって交通需要パターンが変化し、設定すべきサービス機会が変化することが想定されるが、本章の分析ではサービス機会数の時間的な変化に伴う設定の変更を行っていない。復旧計画の策定段階で復旧完了時点までの交通需要パターンの変化を予測することは困難であるが、ある時点での交通需要パターンは観測可能である。そこで、復旧計画の策定時点での交通需要パターンを用いて復旧計画の初動を決定し、復旧の進展とともに交通需要パターンの変化が観測されれば、その時点での交通需要パターンを用いて復旧計画を見直すことで、必ずしも復旧完了までの交通需要パターンの予測を復旧順位の評価に含める必要はないと考える。

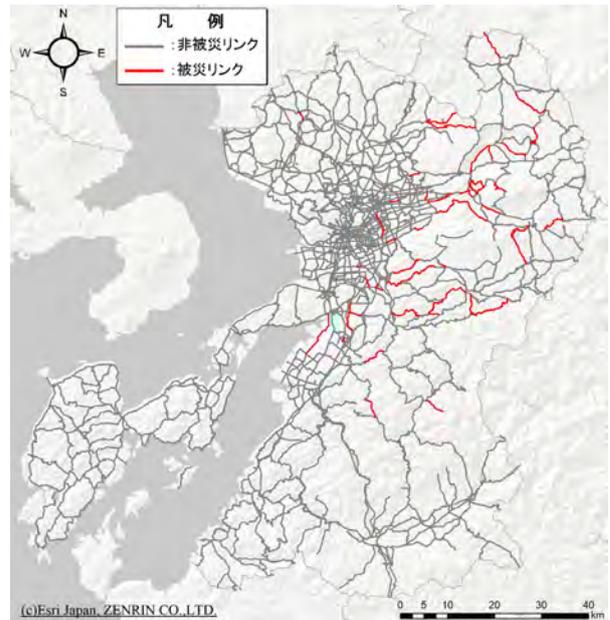


図-4 熊本都市圏道路ネットワーク図

5. 道路網評価指標の実道路ネットワークへの適用

(1) ケーススタディの位置付け

本研究では、道路網の復旧優先順位を決定するための手法として、新たにポテンシャル型アクセシビリティ指標の活用を提案した。このため、まずは提案する手法が現実の道路網の復旧計画問題への活用可能性を有するかを検討・検証することが重要であると考える。そこで、本章では現実の道路網として平成28年熊本地震で被災した熊本都市圏の道路ネットワークを対象としたケーススタディを行い、分析の条件設定に対して提案手法が示す結果の妥当性を検討することで、復旧計画問題への手法としての本研究の適用可能性を考察する。なお、熊本都市圏の道路ネットワークは、平成28年熊本地震において高速道路や緊急輸送道路を含む重要度の高い道路が多数被災し、被災地の道路交通に多大な影響が生じた^{1),2)}。このため被災道路の復旧は被災地の復旧・復興上重要な役割を持つことから、ケーススタディの対象に選定した。

本分析で対象とした熊本都市圏の道路ネットワークを、図-4に示すようなリンク数3,142、ノード数2,106のネットワークとしてモデル化した。また、2016年4月14日時点での通行規制情報をもとに、通行不能であった区間のすべてを被災リンクとして設定し、復旧優先順位を検討する。なお、通行不能区間は図-4中に赤線で示しており、総数は54リンクである。

(2) ケーススタディの条件設定

本分析では、サービス機会数を設定するサービス機会ノードについて、交通量配分において用いられる発集ノ

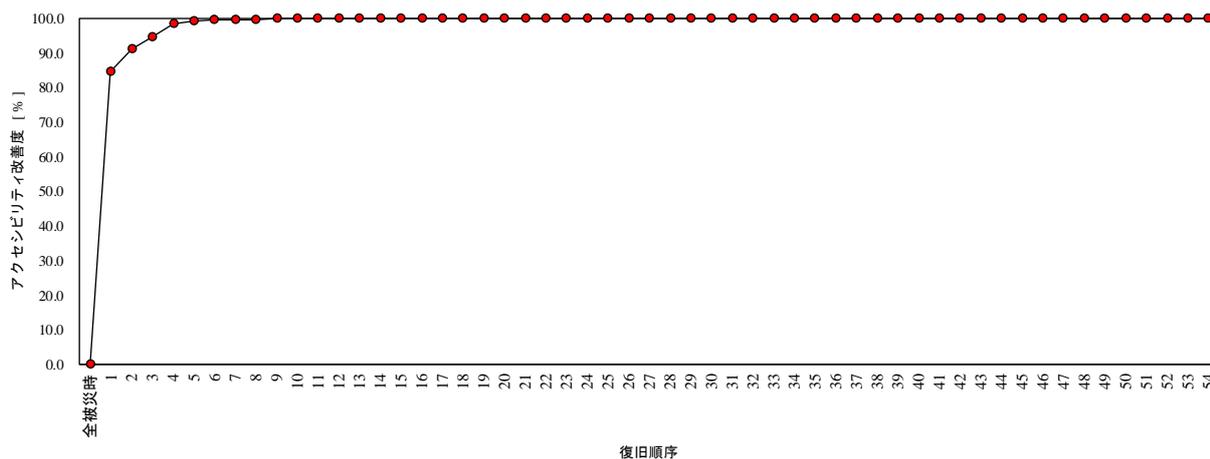


図-5 熊本都市圏道路ネットワークにおける被災道路リンクの復旧優先順位と復旧時のアクセシビリティの改善度

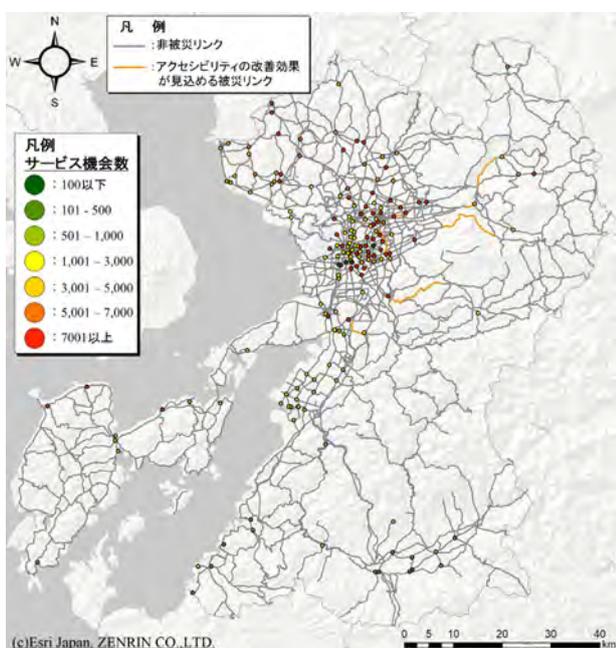


図-6 アクセシビリティの改善度が100%に到達するまでの復旧リンクの分布

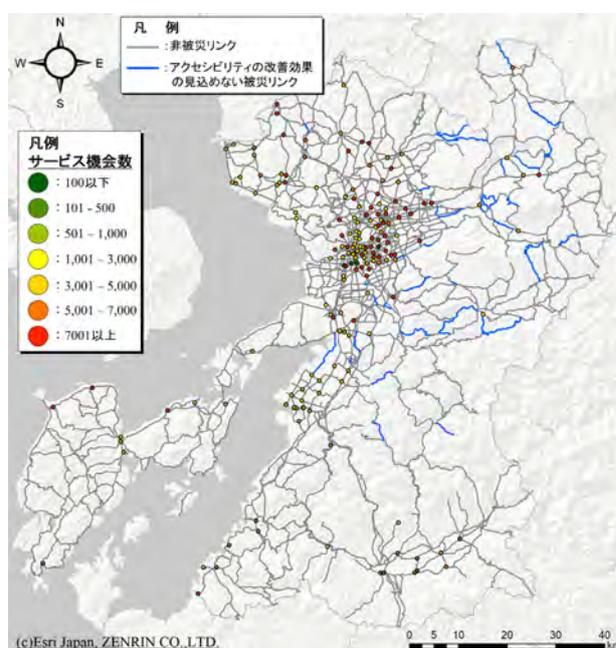


図-7 アクセシビリティの改善度が100%に到達して以降の復旧リンクの分布

ードをもとに設定を行う。発集ノードはその地域の代表的なノードとして考えることができるため、サービス機会ノードとして設定することは妥当であると考えられる。サービス機会数の設定については、2章に述べたように、災害発生後は平時と異なるサービス需要が発生することから、設定には困難が伴う。このような設定の精緻化については、本研究において復旧計画策定に向けた道路評価指標に関する示唆が得られた後に取り組むべき課題として捉え、本研究では便宜的に各発集ノードから出発するOD交通量を集計し、その値をサービス機会数として定義した。また、式(6)における交通抵抗関数の距離に関する感度パラメータ b は0.05に設定した。近藤ら¹²⁾は実証分析ではパラメータ b を0.1と設定しているが、ここ

では負傷者搬送など緊急を要する状況も視野に含めており、被災後の道路網の復旧問題を対象とする本研究よりも緊急性の高い問題を対象としていると考えられる。これを参考に、本研究では近藤ら¹²⁾の設定より小さな値として0.05をパラメータ b の設定値とした。

(3) 復旧優先順序の検討結果

図-5に復旧リンクごとの道路ネットワーク全体でのアクセシビリティの改善率の推移を示す。なお、図中横軸は検討した復旧順位の昇順に並んでいる。また、図-6に道路網全体でのアクセシビリティの改善度が100%に達するまでの復旧リンクの道路ネットワーク上での分布及びサービス機会ノードの位置及びサービス機会数を示し、

図-7には道路網全体でのアクセシビリティの改善度が100%に到達して以降の復旧リンクの分布及びサービス機会ノードの位置及びサービス機会数を示す。

図-5より、復旧開始から54リンクある被災リンクのうち9リンク目を復旧させた時点で、アクセシビリティでの評価上は平時と同程度まで道路網の機能が回復していることが読み取れる。これについて、図-6及び図-7を併せて観察すると、復旧によるアクセシビリティの改善効果が高い被災リンクはサービス機会ノードの密集している都市圏中心部付近に位置していることが分かる。本研究の条件設定では、平時の交通量配分で用いられる発集ノードをサービス機会ノードとして設定している。すなわち、都市圏の中心部は郊外部に比べて通勤・通学・買い物等の交通需要が多いことから、サービス機会数が多く設定されている。このことから、これら都市圏中心部へのアクセス性を改善するような道路の復旧優先順位が高く評価されたと考えられる。これは、本手法ではサービス機会数の高いノード（地域）へのアクセス性を改善する道路の復旧優先順位が高くされることを示唆していると考えられ、自然災害発生後の交通需要パターンの変化を適切にサービス機会数に反映できれば、効果的な復旧優先順位の設定が可能になることが期待される。

一方で、復旧順序7番目から8番目にかけてはアクセシビリティ改善効果は横ばいになっている。これは8番目に復旧したリンクは単独では復旧効果を持たないが、9番目のリンクと同時に復旧することで、アクセシビリティが改善されることを示している。すなわち、複数のリンクを同時に復旧することで効果を発揮するような被災リンクのペアに関する検討が必要であると言える。

図-5より仮想ネットワークでの分析と同様に第1段階目の復旧でアクセシビリティの大幅な改善が見られる。本研究の条件設定ではサービス機会ノード間の移動経路は最短経路のみを仮定しており、特定のリンクが多数のサービス機会ノードペアの移動経路として選択されることにより、そのリンクの復旧効果が大きくなったと考えられる。このことから、サービス機会ノード間の移動経路に最短経路を仮定した場合、特に重要なリンクの優先順位が高く評価されることが示唆されたと考えられる。

復旧によるアクセシビリティの改善効果が見込めない被災リンクは、サービス機会ノード間の移動に関連しない場所や、道路ネットワーク上の縁に存在しているケースがほとんどであるために、復旧による効果が現れなかったと考えられる。ただし、サービス機会ノード間の移動経路に複数経路を考慮した場合、道路のネットワークの縁に位置する被災リンクを除いて、復旧による効果が現れる可能性がある。

6. まとめと今後の課題

本研究では自然災害による被災道路網の復旧計画策定のための、被災道路の復旧優先順位の設定手法について、ポテンシャル型アクセシビリティ指標を道路網評価に用いることで、従来考慮されていなかった享受可能なサービスへの近接性を評価に組み込むことを提案した。提案した道路網評価手法を平成28年熊本地震によって被災した熊本都市圏道路ネットワークを対象に、実際の道路網への適用を行った。その結果、ポテンシャル型アクセシビリティを用いた道路評価手法を用いることで、サービス機会数を踏まえて、被災者が早期に高い水準でサービスを享受可能となるような道路リンクの復旧優先順位を設定できる可能性を示した。

一方で、実際に提案手法を復旧計画策定の場面に活用するためには、サービス機会数をどのように定義するか、サービス機会ノードをどのように設定するかという点は課題である。また、リンクの復旧順序について、実際には被害規模に応じて、復旧効果は大だが復旧までに時間がかかるため、復旧時間の短いリンクを並行して復旧するなどの対応も必要であり、復旧に要する時間を復旧順序の評価において検討することが求められる。

本研究で実施した分析では、移動時間については自由旅行時間を用いることで、道路ネットワークの構造面から復旧上重要となる復旧対象リンクを評価した。しかし、実際には道路の被災による一部道路への交通量の集中による混雑が想定されることから、リンクコストについてこうした交通混雑についても評価に取り入れることが必要である。また、同様に、分析においては短経路探索によって目的地までの経路を1経路に限定して分析を行ったが、実際には同じ出発地、同じ目的地であっても複数の経路が利用されることが想定されることから、複数経路に関する検討も必要であると考えられる。加えて、5.(3)に示したように、複数の被災リンクを同時に復旧させることでアクセシビリティ改善効果を発揮するような被災リンクを評価に含めることも求められる。

参考文献

- 1) 辻芳樹, 久保田瑠衣: 熊本地震の発生に伴う道路交通への影響分析, 平成 28 年度九州国土交通研究会, 2-16, 2016.
- 2) 国立国会図書館調査及び立法考査局: 平成 28 年熊本地震への対応 (下) —復旧・復興に向けた課題—, 調査と情報—ISSUE BRIEF—, No. 915, 2016.
- 3) 堀井雅史: 迂回度を用いた自然災害時における道路網の代替機能に関する評価方法, 都市計画論文集, Vol. 31, pp. 769-774, 1996.
- 4) 堀井雅史: 代替機能を考慮した自然災害時における道路網復旧優先順位設定方法に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 15, pp. 337-344, 1998.

- 5) 山田善一, 野田茂, 五十嵐晃: 震後の道路交通機能の実用的な復旧予測シミュレーション, 土木学会論文集, No. 392/I-9, pp. 385-394, 1988.
- 6) 有村幹治, 上西和弘, 田村亨, 杉本博之, 榎谷有三: 都市間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol. 14, pp. 333-340, 1997.
- 7) 杉本博之, 田村亨, 有村幹治, 斎藤和夫: 復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデルの開発, 土木学会論文集, No. 625/IV-44, pp. 135-148, 1999.
- 8) 小西秀和, 藤光武志, 徳丸正孝, 村中徳明, 今西茂: 交通流シミュレーションによる災害時の道路復旧への支援, 情報書影学会研究報告知能と複雑系(ICS), 29 (2003-ICS-135), pp. 61-64, 2004.
- 9) Geurs, K. T. and Ritsema van Eck, J. R. : Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation sections, and related social and economic impact, RIVM report 408505 006, 2001.
- 10) 土木学会: 道路交通需要予測の理論と適用 第 I 編 利用者均衡配分の適用に向けて, pp. 29-30, 土木学会, 2003.
- 11) 加知範康, 岑貴志, 加藤博和, 大島茂, 林良嗣: ポテンシャル型アクセシビリティに基づく交通利便性評価指標群とその地方都市への適用, 土木計画額研究・論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 675-686, 2006.
- 12) 近藤竜平, 塩見康博, 宇野伸宏: アクセシビリティと連結信頼性を考慮した道路網・医療施設計画モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol. 27, No. 3, pp. 579-588, 2010.

(2017. 2. 24 受付)

A STUDY ON DECISION METHOD FOR RESTORATION PRIORITY RANK IN ROAD NETWORK BASED ON ACCESSIBILITY INDEX AFTER NATURAL DISASTER

Shuji OSAWA, Shoichiro NAKAYAMA, Makoto FUJIIU, Jun-ichi TAKAYAMA
and Shoshi MIZOKAMI

Various influences occur due to occurrence of road damage caused by natural disaster. To early life reconstruction, restoration and reconstruction, it is important to recover effectively such damaged roads. In this study, it is proposed and applied the road evaluation method for formulation of restoration strategy of damaged road network. Consequently, there are the possibility that it can be set the restoration priority rank which reflected number of opportunities for services in road network.