

自然災害時の被災道路復旧優先順序設定手法 に関する研究

大澤 脩司¹・中山 晶一郎²・高山 純一³・藤生 慎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

⁴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: fujju@se.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

自然災害がひとたび発生すると、被災地域では様々な要因によって、通行が制限される道路が発生する。道路は災害時には避難活動、救急・救援活動、物資輸送、復旧・復興活動等を円滑に行うために重要な役割を果たす。そこで、自然災害後には適切な復旧計画のもと、道路の復旧に取り組むことが必要となる。本研究では災害後の道路の復旧計画の策定に資するため、道路の復旧効果に関する評価指標を平時の交通量、復旧に伴う旅行時間及び移動距離の短縮、交通容量に着目した指標を提案し、これらの評価指標による解析結果が有する特徴を整理することを目的としている。本論では提案した指標のうち平時の交通量に基づく復旧計画の分析を、2016年4月14日、16日の熊本地震により被災した熊本都市圏の道路ネットワークを対象に解析を行い、指標の妥当性・適用性を評価した。

Key Words : *restration scheduling restration order., transportation network evaluation, natural disaster, disaster planning,*

1. はじめに

自然災害がひとたび発生すると、被災地域では様々な要因によって損傷を受け、通行が制限される道路が多発する。道路は災害時の避難活動、救急・救援活動、物資輸送等を円滑に行うためには重要不可欠な社会基盤であり、人々の生命を守る重要な役割を担っている。わが国では地震をはじめとする自然災害が多発しており、また今後も南海トラフ地震や首都直下地震など大規模な災害の発生が予測されており、予断を許さない状況下にある。道路が被災すると、社会的にも経済的にも人々の生活の水準が低下することが想定される。したがって、道路の被害を最小限にとどめるための対策を日々行っていくことに加え、被害を受けた場合にどのように復旧作業を進めていくかを検討しておく必要がある。しかし、迅速な復旧を行いたいと考えても、実際には人員や予算等の制約を受け、少しずつ復旧を進めていかなければならないのが現状である。そこで、いかに効率よく復旧の効果が

ある道路を復旧させていくかが求められる。しかし、この効率よく効果を上げるための復旧手順を判断するのは容易なことではない。復旧の効果を判断するための指標が複数存在することが推測されるためである。

これまで災害による被害予測や被害軽減方策に関して多くの研究がなされてきた^{例えば}。これら防災対策的視点での研究と同様に、被災後にどのように道路の復旧を進めていくかという研究も非常に重要である。本研究では災害後、特に地震後など道路の通行が長期間制限される状況を想定し、これらの復旧計画を策定するための道路の復旧優先順序設定手法について検討する。前述したように、復旧優先順序を判断するための指標は唯一無二ではないことから、複数の指標を用いて検討を行い、各指標によって得られる結果が有する特徴を整理することを目指す。

2. 既往研究及び本研究の位置づけ

山田ら⁴⁾はネットワーク上を走行する全車の平均旅行時間が道路の復旧にともなって短くなることに着目した道路交通網の機能評価指標を提案し、復旧優先度を検討する手法を示している。この研究では対象とする道路ネットワークにおいて、すべてのリンクが交互通行など、1台ずつでも車が走行可能な状態となっていることが前提とされている。堀井⁵⁾は、道路ネットワークはある区間がなんらかの原因で遮断された場合でも、遮断前の状態と比較して、なるべく少ない時間的増分で迂回が可能であるという代替性に着目した迂回度指標を提案し、これに基づいた復旧優先度設定手法を提案している。

山田ら²⁾、堀井³⁾の研究では、復旧戦略の工学的決定や意思決定者の復旧計画策定のための情報提供に重点を置いている。こうした研究に対し、道路の復旧問題を組み合わせ最適化問題としてとらえ、復旧を行うことのできる人員やその復旧能力値を考慮し、最適な復旧順序を導くことを目的とした研究も行われている。小西ら⁶⁾は交通シミュレーションによって道路利用者の移動時間的な満足度を算出し、これに基づいて最大勾配法及びタブー探索法を用いて最適な復旧順序を探索している。古田ら⁷⁾は遺伝的アルゴリズムを用いて復旧計画問題を解くことによって、頑健性のある復旧計画策定を目指している。遺伝的アルゴリズムを活用した研究は他にも多くあるが例えば、⁶⁾、古田ら⁸⁾は被災後の動的環境によって、実際の工事施工の際に発生する「遅延」を不確実性としてとらえ、これを考慮した復旧計画の策定を目指している。

本研究では、最終的には意思決定者が様々な情報を総合的に判断し、復旧計画を策定すればよいという立場から、最適な復旧計画を提案するのではなく、復旧順序を検討するための情報提供を行うことを目的とする。この天では山田ら²⁾や堀井³⁾と同様の立場であるが、両者が単一の評価指標をもとに復旧順序に関する分析を行っているのに対し、本研究では複数の評価指標を用いて分析し、各指標に基づく復旧順序の分析結果に加え、各指標が有する特徴まで整理することを目的としている。

3. 復旧順序の評価指標及び評価手法

(1) 被災リンクの平時の交通量による評価

復旧順序の簡便な評価指標の1つとして、被災道路区間の平時の交通量の大小によって決定するという方法が考えられる。平時の交通量が多い道路区間とは、その地域にとっては重要度の高い道路であることは明白である。また、交通量が多い道路区間が被災後長期間通行不能のままであると、人々の生活が回復し、交通量が被災前の水準に回復するにしたがって、本来は被災道路区間に流

れたいはずの交通量が周辺の道路に流出することになり、平時では発生しえなかった交通混雑を引き起こし、道路ネットワーク全体のサービス水準が低下することが考えられる。したがって、道路の通行不能状態が長期化し、地域内の交通が回復する時期と復旧が重なるケースなどでは有用な指標の一つとなると考えられる。

ところで、交通量を定期的に観測しており、容易に平時の交通量を把握できる道路区間には限りがある。したがって、対象とする道路ネットワーク全域の平時の交通量を把握するためには、交通量配分などを行う必要がある。解析例として、図-1のような単純仮想ネットワークを用いた例を示す。今、ノード1、ノード5、ノード9、ノード11からノード16を目指すOD交通量がそれぞれ1,000与えられたとする。このとき、すべてのリンクの自由走行時間、交通容量が同様である場合、交通量配分を行った結果、各リンクの平時の交通量が表-1のようを得られたとする。本評価指標は、平時の交通量が多い順から被災リンクを復旧することを考えるので、被災したリンク1、リンク10、リンク12、リンク13、リンク21、リンク23の復旧順序は表-2のようになる。また、交通量

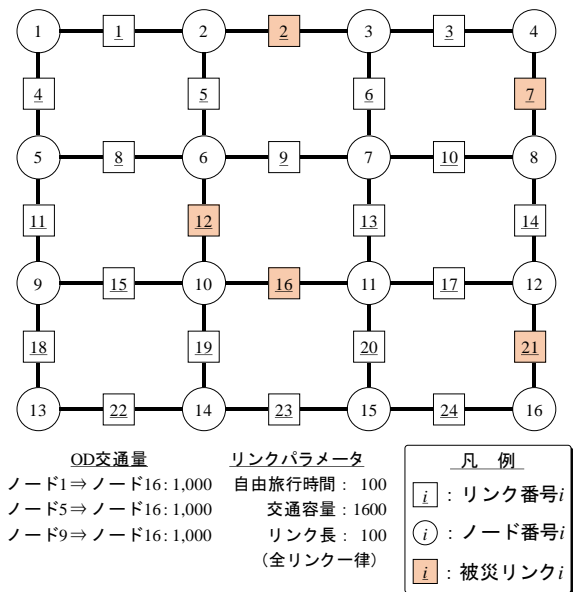


図-1 単純仮想ネットワーク図 (その1)

表-1 平時の配分リンク交通量

リンクNo	配分交通量	リンクNo	配分交通量
1	808	13	546
2	650	14	774
3	355	15	771
4	192	16	783
5	158	17	713
6	296	18	615
7	355	19	281
8	806	20	616
9	669	21	1487
10	420	22	615
11	386	23	897
12	294	24	1513

配分には道路利用者がネットワークの状況について完全な情報を持ち最短経路を選択することを仮定している利用者均衡配分と、利用者の経路選択行動のばらつきを考慮した確率的利用者均衡配分とがあるが、状況に応じて分析者が使い分けることが望ましい。

表-2 平時の交通量に着目した被災リンクの復旧順序

リンクNo	復旧優先度	平時交通量
21	1	1487
16	2	783
2	3	650
7	4	355
12	5	294

(2) 旅行時間に着目した評価指標

災害によって道路が被災した場合、平時には利用できていた道路が一部使用不能になることで、ネットワーク全体で目的地までの旅行時間は増加することが容易に想定される。目的地まで旅行時間が長大なままでいることは、被災地域の住民の生活再建及び復興の阻害要因にはかならない。したがって、対象地域内の交通が円滑に行われるように、旅行時間に着目することも、復旧計画の策定において重要な検討事項の一つである。

被災した道路の復旧が進めば、それに伴って道路利用者の旅行時間は短くなるのが推測される。ここで、簡単のため交通需要は被災前から変化しないと仮定すると、最終的には道路利用者の旅行時間は被災前と同様の値に収束すると考えられる。以上を踏まえ、式(1)、(2)のように道路の復旧に伴う旅行時間の短縮に着目した道路機能の評価指標 TI を定義する。

$$TI_i = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^J \left(\frac{c_{ij}^{LC} - c_{ij}^t}{c_{ij}^{LC} - c_{ij}^{NT}} \right) \quad (1)$$

$$TI = \frac{1}{n_{OD}} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\frac{c_{ij}^{LC} - c_{ij}^t}{c_{ij}^{LC} - c_{ij}^{NT}} \right) \quad (2)$$

c_{ij}^{LC} : 復旧開始前の出発地 i 到着 j 間の旅行時間

c_{ij}^{NT} : 平常時の出発地 i 到着 j 間の旅行時間

c_{ij}^t : 時刻 t における出発地 i 到着 j 間の旅行時間

n_j : 到着地 j の数

n_{OD} : 対象ネットワークにおけるOD数

式(1)は右辺括弧内の分母が道路の被災によって生じる出発地 i 、到着地 j 間の旅行時間の増加量を、右辺括弧内の分子がある道路区間の復旧によって改善される旅行時間の減少量を示している。したがって、右辺括弧内は道路の被災によって生じた旅行時間の損失が復旧作業によってどの程度改善したかを表しており、式(1)全体としては、出発地が i である各ODの改善度の平均値を示している。これを対象ネットワーク全体の評価に拡張したものが式(2)である。また、本指標は値が1に近づくほど旅行時間の改善度が高いことを示している。

解析例として、図-1に示したネットワークにおいて、被災リンクの復旧優先順序の検討を行った。復旧させるリンクの重複のない組合せとしては、同時に復旧できる被災リンクの本数別に、表-3のような組合せが考えられる。また、OD数は3であるので、式(1)による評価値は各復旧ケースで3つ存在することになる。なお、解析では各復旧ペアに示されたリンクを復旧させたネットワークで逐一交通量配分を行い、その交通量に基づいて旅行時間を更新している。

評価値を表-4に示す。また、復旧可能リンク本数ごとの各復旧リンクペアの復旧優先順序を表-5に示す。ネットワーク全体の評価である TI で見た場合、1本のリンクの修復では復旧ペアNo3のように復旧したものの、旅行時間の削減に全く効果が出ない場合がある一方、復旧ペアNo.6のように、1本の復旧でネットワーク全体の旅行時間を大きく改善させる効果があるリンクがある。また、同時に復旧可能なリンク数が増加するに伴って、ネットワーク旅行時間の短縮効果は大きくなっているが、復旧ペアNo.27のように、4本同時に復旧してもほとんど効果がない組合せも存在することがわかる。以上より、リンクの復旧による旅行時間の改善効果を評価することに対する本指標の妥当性が示されたといえる。

表-3 同時復旧可能リンク数別の復旧リンクの組合せ表 (その1)

0		1		2		3		4		5	
ペアNo	ペア	ペアNo	ペア	ペアNo	ペア	ペアNo	ペア	ペアNo	ペア	ペアNo	ペア
1	復旧なし	2	2	7	2, 7	17	2, 7, 12	27	2, 7, 12, 16	32	2, 7, 12, 16, 21
		3	7	8	2, 12	18	2, 7, 16	28	2, 7, 12, 21		
		4	12	9	2, 16	19	2, 7, 21	29	2, 7, 16, 21		
		5	16	10	2, 21	20	2, 12, 16	30	2, 12, 16, 21		
		6	21	11	7, 12	21	2, 12, 21	31	7, 12, 16, 21		
				12	7, 16	22	2, 16, 21				
				13	7, 21	23	7, 12, 16				
				14	12, 16	24	7, 12, 21				
				15	12, 21	25	7, 16, 21				
				16	16, 21	26	12, 16, 21				

表-4 各復旧リンクペアの旅行時間に評価値 TI_i 及び TI

復旧 ペアNo	OD	評価値 TI_i	評価値 TI	復旧 ペアNo	OD	評価値 TI_i	評価値 TI	復旧 ペアNo	OD	評価値 TI_i	評価値 TI
1	1→16	0.0000	0.00000	12	1→16	0.0327	0.04242	23	1→16	0.0816	0.79650
	5→16	0.0000			5→16	0.0358			5→16	0.0815	
	9→16	0.0000			9→16	0.0588			9→16	0.0758	
2	1→16	0.0368	0.34340	13	1→16	0.8732	0.87427	24	1→16	0.8735	0.87488
	5→16	0.0352			5→16	0.8740			5→16	0.8748	
	9→16	0.0311			9→16	0.8757			9→16	0.8763	
3	1→16	0.0000	0.00000	14	1→16	0.0816	0.79650	25	1→16	0.9478	0.95646
	5→16	0.0000			5→16	0.0815			5→16	0.9515	
	9→16	0.0000			9→16	0.0758			9→16	0.9700	
4	1→16	0.0079	0.00435	15	1→16	0.8735	0.87488	26	1→16	0.9717	0.97305
	5→16	0.0073			5→16	0.8748			5→16	0.9727	
	9→16	-0.0021			9→16	0.8763			9→16	0.9748	
5	1→16	0.0327	0.04242	16	1→16	0.9478	0.95646	27	1→16	0.0903	0.08672
	5→16	0.0358			5→16	0.9515			5→16	0.0889	
	9→16	0.0588			9→16	0.9700			9→16	0.0809	
6	1→16	0.8732	0.87427	17	1→16	0.0427	0.03769	28	1→16	0.9611	0.95972
	5→16	0.8740			5→16	0.0408			5→16	0.9605	
	9→16	0.8757			9→16	0.0296			9→16	0.9576	
7	1→16	0.0368	0.34340	18	1→16	0.0543	0.05862	29	1→16	0.9949	0.99654
	5→16	0.0352			5→16	0.0540			5→16	0.9951	
	9→16	0.0311			9→16	0.0675			9→16	0.9996	
8	1→16	0.0427	0.37690	19	1→16	0.9618	0.96030	30	1→16	0.9949	0.99456
	5→16	0.0408			5→16	0.9614			5→16	0.9942	
	9→16	0.0296			9→16	0.9576			9→16	0.9946	
9	1→16	0.0543	0.05862	20	1→16	0.0903	0.08672	31	1→16	0.9717	0.97305
	5→16	0.0540			5→16	0.0889			5→16	0.9727	
	9→16	0.0675			9→16	0.0809			9→16	0.9748	
10	1→16	0.9490	0.94790	21	1→16	0.9494	0.94777	32	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	0.9487			5→16	0.9491			5→16	1.0000	
	9→16	0.9460			9→16	0.9448			9→16	1.0000	
11	1→16	0.0079	0.00435	22	1→16	0.9878	0.98987				
	5→16	0.0073			5→16	0.9882					
	9→16	-0.0021			9→16	0.9936					

表-5 同時復旧可能リンク数別の復旧優先順序
(評価指標 TI の場合)

復旧 優先順序	同時復旧可能リンク数				
	1	2	3	4	5
1	6	16	26	29	32
2	2	15	25	30	
3	5	14	24	31	
4	4	13	23	28	
5	3	12	22	27	
6		11	21		
7		10	20		
8		9	19		
9		8	18		
10		7	17		

次に、OD別の旅行時間の改善度の放火指標である TI_i で見ると、全体的に TI と同様の傾向があるが、復旧ペア No.4や11ではノード9からノード16へのODの評価値がマイナスとなっている。これは、復旧させる組合せによっては、交通量の増大によって、かえって旅行時間を低下させてしまう場合がありうることを示している。このことは復旧計画の策定上、重要な示唆であると考えられる。

(3) 迂回距離に着目した評価指標

災害によって道路が被災し、利用不能な道路区間が発

生することで、ネットワーク全体で増大するのは前述した旅行時間だけではない。目的地まで本来の最短経路を利用できなくなることで、移動距離が増大することも想定される。したがって、移動距離に着目した道路機能の評価も必要であると考えられる。

移動距離に着目した道路機能の評価指標として、堀井³⁾は式(3)の基準化迂回度を提案している。これは、出発地 i 、到着地 j 間の望ましい移動距離に対して、道路の被災によって生じた迂回によって、移動距離が何倍に増加しているかを表している。なお、堀井³⁾は望ましい距離とは、災害復旧時には早急に平常時の道路ネットワークに戻ることが先決であると考え、平常時の道路ネットワークにおける距離と解釈している。本研究ではこれを参考に以下の式(4)、(5)によって移動距離に着目した道路機能を評価する。

$$C_i^* = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^J \left(\frac{d_{ij} - e_{ij}}{e_{ij}} \right) \quad (3)$$

d_{ij} : 出発地 i 、到着地 j 間の実際の距離

e_{ij} : 出発地 i 、到着地 j 間の望ましい距離

表-6 同時復旧可能リンク数別の復旧リンクの組合せ表 (その2)

同時復旧可能リンク数											
0		1		2		3		4		5	
ペアNo	ペア	ペアNo	ペア	ペアNo	ペア	ペアNo	ペア	ペアNo	ペア	ペアNo	ペア
1	復旧なし	2	1	7	1, 8	17	1, 8, 15	27	1, 8, 15, 17	32	1, 8, 15, 17, 24
		3	8	8	1, 15	18	1, 8, 17	28	1, 8, 15, 24		
		4	15	9	1, 17	19	1, 8, 24	29	1, 8, 17, 24		
		5	17	10	1, 24	20	1, 15, 17	30	1, 15, 17, 24		
		6	24	11	8, 15	21	1, 15, 24	31	8, 15, 17, 24		
				12	8, 17	22	1, 17, 24				
				13	8, 24	23	8, 15, 17				
				14	15, 17	24	8, 15, 24				
				15	15, 24	25	8, 17, 24				
				16	17, 24	26	15, 17, 24				

$$DI_i = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^J \left(\frac{d_{ij}^{LC} - d_{ij}^t}{d_{ij}^{LC} - d_{ij}^{NT}} \right) \quad (4)$$

$$DI = \frac{1}{n_{OD}} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\frac{d_{ij}^{LC} - d_{ij}^t}{d_{ij}^{LC} - d_{ij}^{NT}} \right) \quad (5)$$

d_{ij}^{LC} : 復旧開始前の出発地 i 到着 j 間の移動距離

d_{ij}^{NT} : 平常時の出発地 i 到着 j 間の移動距離

d_{ij}^t : 時刻 t における出発地 i 到着 j 間の移動距離

n_j : 到着地 j の数

n_{OD} : 対象ネットワークにおけるOD数

式(4)及び式(5)はそれぞれ式(1), 式(2)と同様に解釈できる。したがって, 式(4)はある復旧作業に対する出発地 i の各ODに対する移動距離の改善度の平均値を示しており, 式(5)はネットワーク全体でのある復旧作業に対する移動距離の改善度の平均を示している。改善度に関する指標であるため, 指標値が1に近いほど復旧の効果が大きいことを示す。

本指標の場合, 図-1に示したネットワークでは, 目的地までの距離が変化せず, すべての評価値が1になってしまうため, 図-1のネットワークから被災リンクを変更した図-2に示したネットワークで解析を行う。この場合, 重複のない重複のないリンク復旧の組合せは表-6のようになる。本指標では交通量を扱う必要はないため, 評価指標IIの時のように, 復旧ペアごとに交通量配分は行わず, 代わりに復旧リンクの組合せ表に記載されているリンクのペアを被災ネットワークから復旧させたうえで, 移動距離に関して最短経路探索を行う。

表-7に評価値を示す。また, 復旧可能リンク本数ごとの各復旧リンクペアの復旧優先順序を表-8に示す。ネットワーク全体の評価値である DI で見ると, 同時に復旧できるリンク数が増加するにつれ, 評価値が上昇している傾向がわかる。一方で, 復旧ペアNo.6のように1本のリンクのみの復旧であってもネットワーク全体の移動距離を被災前の水準に戻す効果を有するリンクも存在している。このことから, 本指標は被災した道路ネットワー

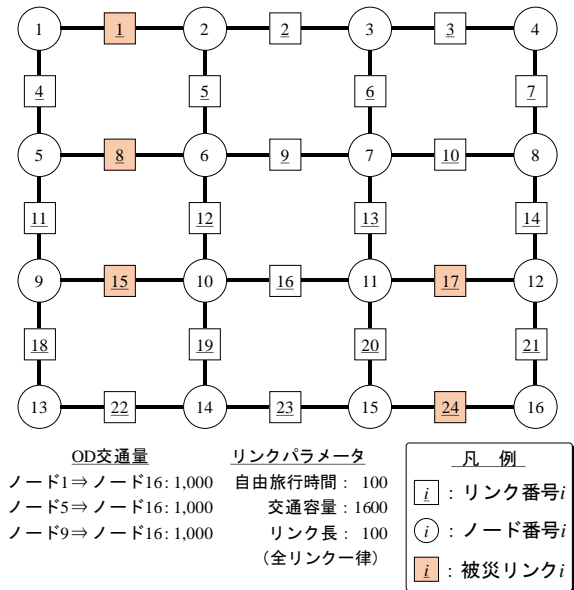


図-2 単純仮想ネットワーク図 (その2)

クにおいてクリティカルなリンクを発見することにつながる可能性が示唆された。また, 今回の解析からは得られなかったが, 反対に復旧してもネットワーク内の移動距離の短縮効果が少ないリンクの発見につながることも考えられる。一方で, 今回のような対象な道路ネットワークなど, ネットワーク形状によっては, 復旧優先度を決定する際に, 似たような評価値に偏ってしまう可能性も考えられる。したがって, 本指標はネットワークにおいてクリティカルなリンクを発見することや, 被災リンクによって長大な距離を迂回せねばならないような地域を救済するための復旧案を模索する際などでの活用が期待できる。

(4) 交通容量に着目した評価指標

ここまで, 交通量, 旅行時間, 移動距離に着目した指標を取り扱ってきた。しかし, これら3つの指標では考慮されていないものとして, 交通容量の問題が挙げられる。交通需要が平常時から変化せず, しかし道路ネットワークに通行不能区間が生じると, 本来は通行不能区間を通過していたはずの交通量が別の区間に流れることに

表-7 各復旧リンクペアの評価値 DI_i 及び DI

復旧 ペアNo	OD	評価値 DI_i	評価値 DI	復旧 ペアNo	OD	評価値 DI_i	評価値 DI	復旧 ペアNo	OD	評価値 DI_i	評価値 DI
1	1→16	0.0000	0.00000	12	1→16	1.0000	0.83333	23	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	0.0000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	0.0000			9→16	0.5000			9→16	1.0000	
2	1→16	1.0000	0.50000	13	1→16	1.0000	1.00000	24	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	0.5000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	0.0000			9→16	1.0000			9→16	1.0000	
3	1→16	1.0000	0.83333	14	1→16	1.0000	1.00000	25	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	1.0000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	0.5000			9→16	1.0000			9→16	1.0000	
4	1→16	0.5000	0.50000	15	1→16	1.0000	1.00000	26	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	0.5000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	0.5000			9→16	1.0000			9→16	1.0000	
5	1→16	0.5000	0.50000	16	1→16	1.0000	1.00000	27	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	0.5000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	0.5000			9→16	1.0000			9→16	1.0000	
6	1→16	1.0000	1.00000	17	1→16	1.0000	0.83333	28	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	1.0000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	1.0000			9→16	0.5000			9→16	1.0000	
7	1→16	1.0000	0.83333	18	1→16	1.0000	0.83333	29	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	1.0000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	0.5000			9→16	0.5000			9→16	1.0000	
8	1→16	1.0000	0.66667	19	1→16	1.0000	1.00000	30	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	0.5000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	0.5000			9→16	1.0000			9→16	1.0000	
9	1→16	1.0000	0.66667	20	1→16	1.0000	1.00000	31	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	0.5000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	0.5000			9→16	1.0000			9→16	1.0000	
10	1→16	1.0000	1.00000	21	1→16	1.0000	1.00000	32	1→16	1.0000	1.00000
	5→16	1.0000			5→16	1.0000			5→16	1.0000	
	9→16	1.0000			9→16	1.0000			9→16	1.0000	
11	1→16	1.0000	0.83333	22	1→16	1.0000	1.00000				
	5→16	1.0000			5→16	1.0000					
	9→16	0.5000			9→16	1.0000					

表-8 同時復旧可能リンク数別の復旧優先順序 (評価指標 DI の場合)

復旧 優先順序	同時復旧可能リンク数				
	1	2	3	4	5
1	6	10, 13, 14, 15, 16	19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26	27, 28, 29, 30, 31	32
2	3	7, 11, 12	17, 18		
3	2, 4, 5	8, 9			

なる。このような場合、平常時では発生しえなかった交通混雑が生じ、予期せぬ旅行時間の低下を招くおそれがある。したがって、対象とする道路ネットワークにおける交通需要に十分に対応できる交通容量が確保されるような復旧計画の検討が必要な状況も考えられる。そこで、式(6)のように交通容量に着目した評価指標 CI を定義する。

$$CI = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^N \left(\frac{x_a^t}{C_a} \right) \quad (6)$$

x_a^t : 時刻 t におけるリンク a の交通量

C_a : リンク a の交通容量

n : 対象ネットワークのリンク数

式(6)の右边括弧内は、ある復旧段階の時刻 t におけるリンク a の混雑度を示す。したがって、式(6)は各リンクの混雑度の平均値を表す。また、本指標は各道路の交通容量に対する実際の交通量の比であるので、評価値が1未満であれば容量には余裕があり、評価値が1を超えると容量を上回っており、混雑した状態であることを示す。

解析例として、図-2に示したネットワークにおける分析結果を示す。重複のないリンク復旧の組合せは表-6を使用する。本指標による評価では、評価指標 II の場合と同様に、被災リンクを復旧させるごとに逐一交通量配分を行い、ネットワークの変化に対応した交通量を求め、分析を行う。

表-9に評価値を示す。また表-10に復旧優先順序を示す。

本指標は評価値が1未満で0に小さいほど、交通容量としては余裕がある状態を示しているため、いずれのケースでも容量的な問題は発生しないことがわかる。また、同時に復旧可能なリンク数が増加するごとに容量的にも余裕が生まれる傾向があることがわかる。一方、復旧ペアNo.8,9及びNo.17,18のように、同じ復旧リンク数でも、他の復旧パターンと比較して交通容量への寄与が少ない場合がある。今回の解析ではすべてのリンクの交通容量は一律としていることから、復旧によって一部のリンクへ交通量が集中していることが要因であると考えられる。このことは、実際のネットワークを対象とした場合には、復旧させる道路の選択を誤ると、一部の道路で渋滞を招きかねないことを示唆していると考えられる。

表-9 各復旧リンクペアの評価値 CI

復旧 ペアNo	評価値 CI
1	0.7240
2	0.5469
3	0.5070
4	0.5896
5	0.5692
6	0.4259
7	0.4446
8	0.4949
9	0.4949
10	0.4012
11	0.4693
12	0.4427
13	0.3907
14	0.4545
15	0.4157
16	0.4335
17	0.4427
18	0.4427
19	0.3907
20	0.3962
21	0.3907
22	0.4034
23	0.3907
24	0.3908
25	0.3907
26	0.3906
27	0.3906
28	0.3907
29	0.3907
30	0.3906
31	0.3906
32	0.3906

表-10 同時復旧可能リンク数別の復旧優先順序
(評価指標 CI の場合)

復旧 優先順序	同時復旧可能リンク数				
	1	2	3	4	5
1	6	13	26	27, 30, 31, 32	32
2	3	10	19, 21, 23, 25	28, 29	
3	2	15	24		
4	5	16	20		
5	4	12	22		
6		7	17, 18		
7		14			
8		11			
9		9, 8			

4. 実際問題への適用

本章で解析の対象としたのは、2016年4月14日および16日の熊本地震により被災した熊本都市圏の道路ネットワークである。この地震では14日夜に及び16日未明に震度7を観測する地震が発生し、地震による建物の倒壊や土砂崩れ、法面崩落、路面陥没・ひび割れ、橋梁の損傷や落橋等により、被災地内で多くの通行止めが発生する事態となった。また、一連の地震活動の中で震度7が2度観測されたのは初めてのことであり、このことが被害が拡大した大きな要因の1つである。

対象地域の道路ネットワークを図-3のようにモデル化した。モデル化した道路ネットワークはリンク数10829、ノード数9791である。このうち2016年4月14日時点では図-3に赤線で示した63のリンクに通行規制がかけられており、本研究ではこの時点での通行止めの情報を解析に使用した。

これらのデータを用いた解析結果については、紙面の都合上、平時の交通量に着目した場合の復旧優先度について示す。3. に示した指標はいずれ平時の各リンクの交通量を使用する必要があるため、まず平時の道路ネットワークを対象に交通量配分を行う。このとき、配分交通量は利用者均衡配分をFrank-Wolfe法を用いて解くことで求めている。配分の結果、ネットワーク全体の交通量は図-4のようになった。配分交通量の妥当性を検討するため、H22年度道路交通センサスに基づく観測リンク交通量と、配分リンク交通量との比較を行った。その結果が図-5である。配分リンク交通量と観測リンク交通量の相関係数は0.7240であり、配分結果の妥当性が確認できる。ここで、観測リンク交通量が設定されているものの、配分リンク交通量が0となっているリンクがいくつか存在するが、これらは発集ノードの設定上、配分時に利用される見込みがないリンクも含まれていることが要因である。

以上の配分結果に基づいて復旧優先度を検討すると、表-11のような結果となった。表より、復旧優先順序の上位には九州縦貫自動車道や国道など、重要度の高い道路が選ばれていることから、本指標の妥当性が確認できる。

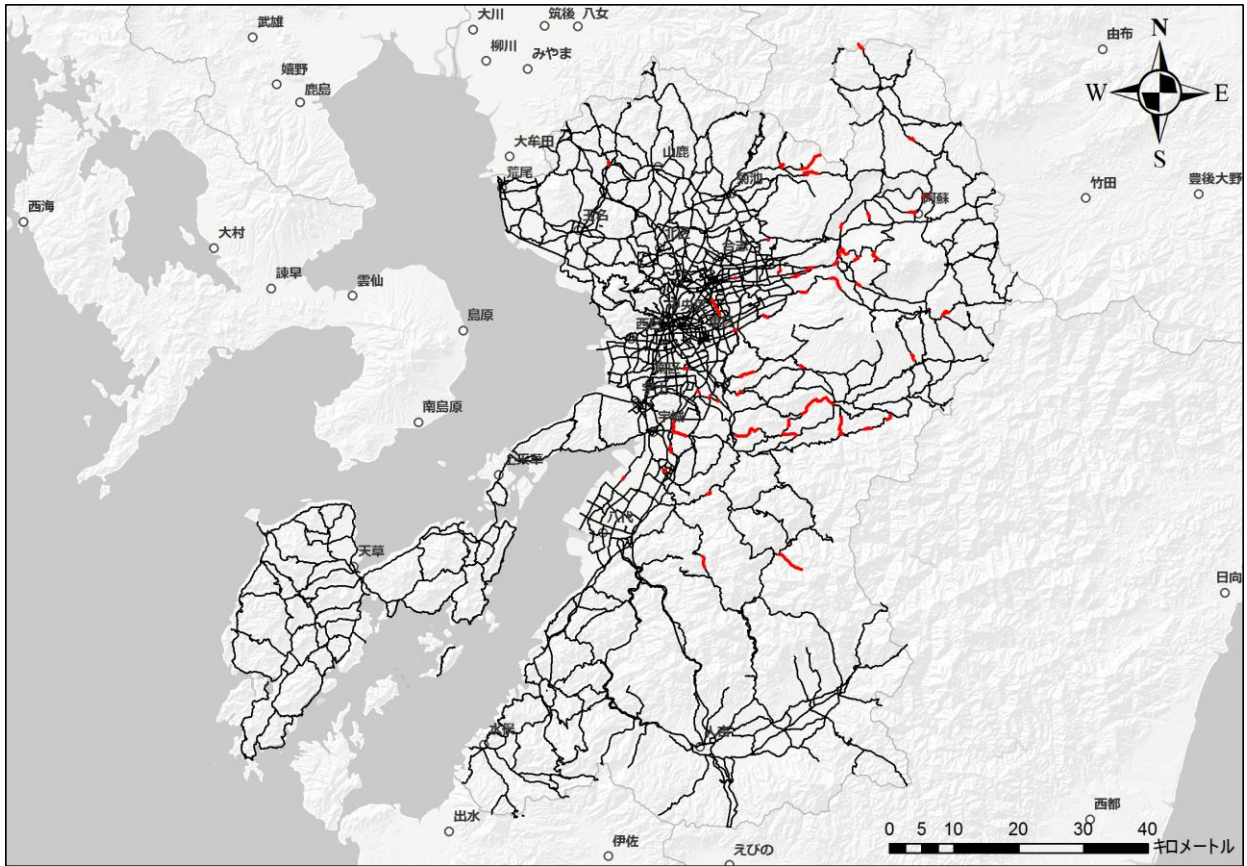


図-3 対象道路ネットワーク図

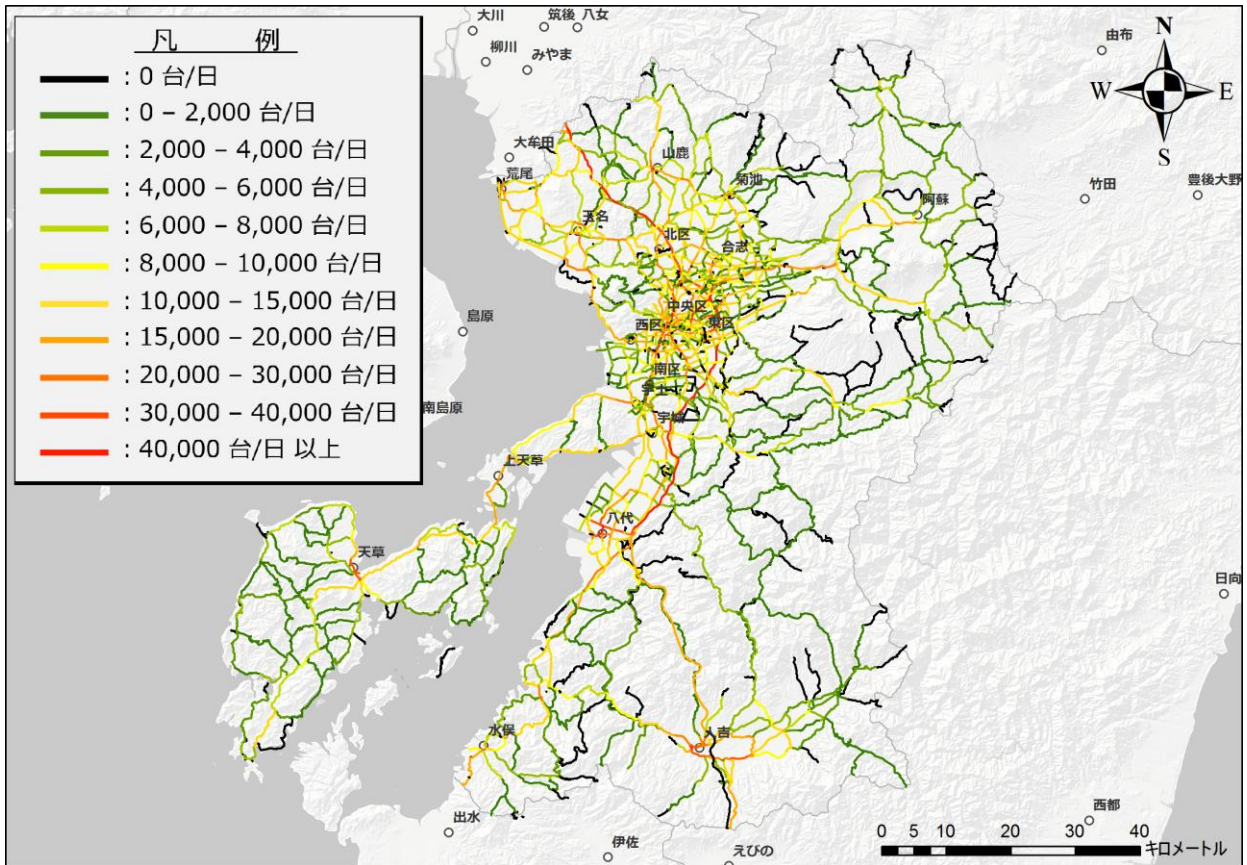


図-4 交通量配分結果

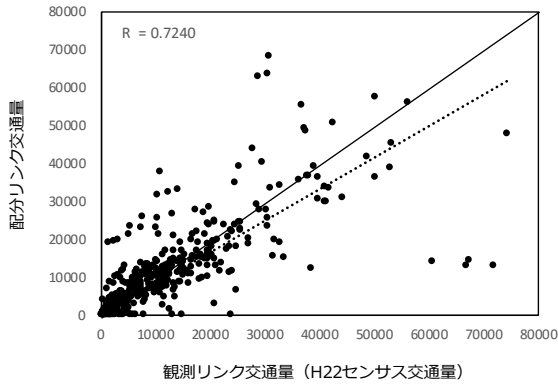


図-5 配分リンク交通量と観測リンク交通量の比較

表-11 平時の交通量に基づく復旧優先順序

優先 順序	リンク No	路線名	配分 リンク交通量
1	8804	九州縦貫自動車道	62,900.00
2	6726	国道57号	22,400.00
3	8178	国道325号	16,500.00
4	8938	熊本高森線	15,500.00
5	10458	熊本高森線	15,500.00
6	6685	瀬田竜田線	15,100.00
7	7629	国道218号	13,100.00
8	8939	熊本高森線	12,700.00
9	1843	八代不知火線	10,800.00
10	7846	国道445号	10,200.00
11	10032	国道445号	10,200.00
		⋮	
57	1698	久連子落合線	0.00
58	2027	困砥用線	0.00
59	3578	原立門線	0.00
60	3615	仏原高森線	0.00
61	3742	阿蘇公園下野線	0.00
62	3816	内牧停車場線	0.00
63	8712	国道212号	0.00

ただし、実際に復旧を行う際には、このようにリンクを1本ずつ復旧するという事は現実的とはいえ、複数同時に復旧することが想定される。また、平時の交通量は少なくとも、孤立地域の解消に寄与するようなリンクは優先的に復旧されるべきであり、本指標ではそういったリンクは反映されていない。このことから、復旧計画を考える上で、優先順序の高い道路のスクリーニング等への活用に向けた指標であると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、災害によって被災した道路の復旧計画を策定する上で、道路の復旧優先度を検討するための評価指標を、平時の交通量、復旧にともなうネットワーク全体の旅行時間の短縮、移動距離の短縮、道路の交通容量を考慮した指標を提案し、単純仮想ネットワークを対象とした解析を行った。その結果、復旧によってネット

ワーク全体の旅行時間の短縮への寄与が少ない被災リンクと寄与が大である被災リンクを分類することが可能であり復旧による旅行時間の短縮効果の妥当な評価が可能指標であることが確認できた。また、復旧するリンクによっては一部で交通量の集中を招き、逆に旅行時間を増加させてしまう可能性があるという示唆を得た。移動距離に着目した評価指標では、ネットワーク内でクリティカルなリンクの発見や、長大な迂回距離を強いられる地域を救済するための復旧案の検討等への活用が見込まれることを確認した。交通容量に関する評価指標では、ネットワーク内の交通混雑の様子を把握することが可能であることを確認した。また、復旧するリンクによっては一部のリンクへの交通量の集中を招き、予期せぬ混雑を発生させてしまう可能性があることの示唆を得た。

また、実際問題への適用として、2016年4月14日及び16日の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に、平時の交通量に着目した指標による復旧優先度の検討結果を示した。この結果、九州縦貫道や国道など、平時においても対象道路ネットワークの核をなすような重要なリンクが復旧優先度上位に選定されていることから、指標の妥当性が確認されたと考える。しかし、本指標では、平時の交通量は少ないが、孤立地域の解消に寄与するなど、平時の交通量からは図ることのできない効果を有するリンクの復旧効果を測定することはできないことから、復旧優先度の絶対的な指標ではなく、復旧優先道路のスクリーニングに向けた指標と言えることを確認した。今後は他の3指標を含めた復旧優先度の評価指標を、それらが有する特徴に関して更に検討をすすめていく。

謝辞：本研究は国土交通省・道路政策の質の向上に資する技術研究開発の支援を受けて実施した。ここに記して、感謝いたします。

参考文献

- 1) 文部科学省：大都市大震災軽減化特別プロジェクト総括成果報告書，2007。
- 2) 山田善一，家村浩和，野田茂，伊津野和幸：道路交通網の最適な震後復旧過程の評価，土木学会論文集，第368号，I-5，pp.355-362，1986。
- 3) 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序設定方法に関する基礎的研究，土木計画学研究・論文集，No.15，pp.337-344，1998。
- 4) 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，情報処理学会研究報告知能と複雑系(ICS)，Vol.2004，No.29，pp.61-64，2004。
- 5) 古田均，中津功一郎，野村康稔：不確実性を考慮した被災ネットワークの復旧計画策定，土木学会論文

集 A, Vol.64, No.2, pp.434-445, 2008.

ライフライン網の最適復旧過程に関する研究

- 6) 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.
- 7) 砂糖忠信, 一井康二: 遺伝的アルゴリズムを用いた

(??.?受付)

A STUDY ON A METHOD FOR ROAD RESTRATION IN NATURAL DISASTER
Shuji OSAWA, Shoichiro Nakayama, Jyunichi TAKAYAMA, Makoto FUJIU
and Shoshi MIZOKAMI