

接続性確保に着目した道路ネットワーク防災機能の便益評価

原田 剛志¹・倉内 文孝²・高木 朗義³

¹学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: harada@gu-rsp.org

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

³正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: a_takagi@gifu-u.ac.jp

道路網の一部が不通となっても、到達可能な経路が存在すれば災害時の影響は小さくなるが、現行の道路整備評価では、このような災害時の機能は十分に評価されていない。東日本大震災を踏まえ、国土交通省では災害時の道路機能評価手法を提案しているが、貨幣単位の指標ではなく、従来の便益評価と整合的とはいえない。本研究では、従来の道路整備評価に合算可能な防災機能の便益評価手法を提案する。具体的には、道路利用者の経済損失（災害時の迂回損失・機会損失）の軽減と、地域住民の孤立に対する平常時の心理不安の軽減に着目し、それぞれの便益評価手法を構築した。経済損失は、需要変動型利用者均等配分に基づき評価し、心理不安の軽減便益は、等価的偏差EV（受取補償額）を用い便益計測を行った。岐阜県飛騨圏域のネットワークで実用性検証を行った結果、新規道路建設により災害時に接続を確保することの便益を貨幣単位で評価することができた。また、代替経路確保のパラメータに対して、非線形に便益が変化し、結果として整備の優先順位が変わる可能性があり、孤立可能性のある集落の便益をより重視できる可能性が示された。

Key Words : connectivity, distinct paths, benefit evaluation, disaster reduction

1. はじめに

1.1. 道路ネットワーク防災評価の課題

低頻度かつ影響度の大きな災害に備え、余力ある道路網を確保する必要がある。道路網のシステム低下が生じると、災害そのものによる直接的な被害だけでなく、経路途絶や長大な迂回、深刻な交通渋滞などネットワーク機能が損なわれたことによる間接的な被害が発生し、より被害が拡大する可能性がある。災害時の影響を「道路ネットワーク」の観点から減少させるには、間接的な被害の減少に着目することが重要である。仮に、災害によって、道路網のみが被災するとすると、その影響は、道路利用者に帰着する。

災害時の道路機能について、現行の2つの道路評価手法、「道路整備評価マニュアル」¹⁾と「道路防災機能の評価手法（暫定案）」^{2) 3) 4)}での記述をみてみよう。現行の道路整備評価マニュアルでは道路の防災機能に関する便益は明記されていない¹⁾。災害時に発生する便益があるにもかかわらず、費用便益比(B/C)が基準値を下回るもの、すなわち平常時における費用対効果の小さいものは実施が見送られている。また、道路防災機能の評価手法（暫定案）は、東日本大震災を踏まえ検討が進められているものである。しかし、道路の必要性・有効性を評価するための手法であり、評価は貨幣単位で計測されず、費用と効果の関連が明確ではない。限られた予算のもと、災害時に有効な道路

整備を実施していくためには、費用と効果の関係を明らかにする必要がある。これらの理由により現行の評価方法は、災害時の機能について、適切には評価が難しいと考えられる。平常時の機能は「道路整備評価マニュアル」によって貨幣単位で評価されているため、災害時の機能も貨幣単位で評価し、公平に比較することが望ましいといえる。

1.2. 研究目的と位置づけ

道路の平常時機能にあわせ、災害時に発揮される道路機能便益として貨幣単位で評価することが重要なことは明らかである。そのため、費用対効果を適切に計算するための道路の防災機能評価手法の確立が重要といえる。本研究では、災害時の道路機能について、貨幣単位で評価可能な手法を構築することを目的とする。

本稿は、次のように構成されている。本章では、現行の評価手法に関する課題および本研究の位置づけを述べた。2.では便益項目の全体像と評価項目の採用理由について述べる。3.では、2.で述べた前提に基づく評価手法について説明する。4.では、それらの手法を実ネットワークに適用しその挙動を述べる。5.では、本稿の結論と課題を述べる。

2. 道路網における災害時の便益評価項目

2.1. 災害時の便益評価項目

『公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）』⁵⁾によれば、防災事業の便益評価に

は、「期待被害額の軽減」の他に「心理的不安感の軽減」も評価すべきとされている。本研究においても、この2つの観点からの評価を進める。

道路網における期待被害額の軽減効果は、道路利用者に帰着する経済損失の軽減効果と考えられる。すなわち、長大な迂回・深刻な渋滞による「時間損失」と、トリップ中止による「機会損失（機会費用）」である。現行の道路整備評価では、走行時間短縮効果は、短縮した総走行時間（台分）に、自動車1台あたりの時間価値の原単位（円／分）を乗じることで貨幣換算している。災害時における道路利用者の被害額は、平常時に比べ遅延した総走行時間（台分）に時間価値を乗じることで算出できる。一方、機会費用を算出することは容易ではない。計算するための考え方を次節で述べる。

心理的不安感の軽減について、道路網整備について防災投資の観点から考えたとき、整備によって災害時の影響に対する不安感の減少効果は発生する。たとえば、新規道路整備によって集落の孤立が解消されるならば、孤立への不安感は減少するだろう。そのため、地域住民に帰着する経路確保の便益を心理的不安感の軽減便益とする。

本節で述べた便益項目（心理的不安の軽減・交通損失の軽減）は、上田ら⁶⁾が示した道路整備の便益帰着構成表と整合する。表1は、上田ら⁶⁾が示した道路整備の便益帰着構成表の一部である。本研究に関連する項目について、網掛けを施した。各列には関連主体、各行には発生する便益が列挙されており、行列の要素には各主体が最終的に享受する余剰（便益）が示されている。消費者余剰と生産者余剰それぞれの変化分の和が社会的余剰の変化分、すなわち道路整備によって生じる便益となる。従来の便益評価では、道路利用者に帰着する便益のみを計測している。一方で、本研究で取り上げる心理不安の軽減便益は、代替経路確保の便益と解釈できる。この便益項目は従来評価において算出されていないため、合算が可能となる。さらに、便益帰着構成表によれば、代替経路確保の便益は地域住民に帰着するが、道路利用者には、代替経路確保の便益は帰着しない。これは、走行時間など道路利用とは別の側面から評価がなされる項目であるためと解釈できる。これらの議論を

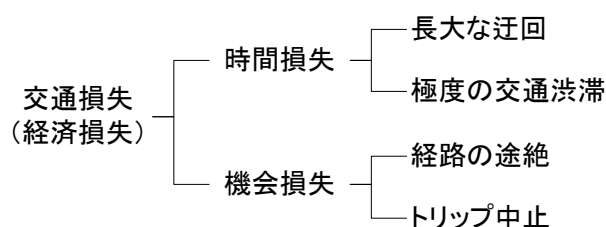


図1 道路網の災害時損失の分類

踏まえ、期待被害額の軽減便益として、道路利用者の経済損失、すなわち迂回・渋滞による時間損失および、目的地へ到達できなかった機会損失の軽減を評価する。また、心理的不安の軽減便益として、経路途絶に対する地域住民の不安感の軽減を評価することとする。

2.2. 道路利用者の経済損失軽減の便益

本研究では、長江ら⁷⁾の研究を参考にして、図1に示した4項目（長大な迂回、極度の交通渋滞、経路の途絶、トリップの中止）を評価することとする。経路の途絶は、移動が不可能であること、トリップの中止は、移動は可能であるものの渋滞による走行時間の遅延によりトリップを取りやめることを意味している。

a) 時間損失

時間損失は、利用者均衡配分を行うことで、迂回と交通渋滞の影響を考慮できる。利用者均衡配分によって得られたリンク所要時間とリンク交通量を用いることでネットワーク全体の総走行時間が得られる。道路利用者それぞれへの影響は、集計値として評価される。長大な迂回が発生すると、1台の車両がより多くのリンクを走行することになり、総走行時間の定義（式(1)）から、総走行時間が増える。極度の交通渋滞が生じた場合は、各リンクあたりの走行時間が増加し、総走行時間が大きくなる。

$$T = \sum_a t_a z_a \quad (1)$$

ここで、 T ：総走行時間、 t_a ：リンク a の所要時間、 z_a ：リンク a の交通量。

b) 機会損失

機会損失は、利用者均衡配分において、長大な所要時間であるためトリップを取りやめることを

表1 道路整備の便益帰着の例（上田ら⁶⁾が示した表の一部を抜粋）

(注釈)		道路利用者		歩行者	生活者			生産者			道路占有者	土地所有者	公共			世界	合計	
		対象道路	代替道路		消費者	被雇用者	土地需要者	住居者	生産者	雇用者			土地需要者	他地域	市町村			都道府県
＋：正の効果，－：負の効果，±：不明 ◎：金銭的計測可能， ○：計測可能ただし精度上は問題 △：計測困難		道路事業者																
出典：道路投資の評価に関する指針（案）																		
直接	道路利用者	道路利用	走行時間短縮	+◎	+◎												+◎	
			走行費用減少	+◎														+◎
			交通事故減少	+◎	+◎													+◎
			走行快適性の向上	+○	+○													+○
			歩行の安全・快適性の向上			+△												+△
間接	地域社会	住民生活	利用料負担	-◎													-◎	
			道路空間の利用										+△					+△
			災害時の代替路確保						+△	+△	+△							+△
			交流機会の拡大						+△	+△								+△
			公共サービスの向上						+△									+△
			人口の安定化				+△									+△		

考慮することで、経路の途絶とトリップの中止を取り扱う。このモデルでは、トリップを中止した交通が流れる仮想リンクを起終点間に設定することで、トリップ取りやめ交通量を求めた。なお、機会損失を表現するためには、目的地に到達するために費やしてもよい最大の時間（閾値）を考える必要がある。この閾値に自動車1台あたりの時間価値を乗じることで、機会費用の貨幣換算値が得られる。

c) 交通損失の軽減便益

交通損失の軽減便益は、以下の式(2)～(5)を用いて表現する。時間損失（式(2)）と機会損失（式(3)）の和を交通損失と定義し、その期待値（式(4)）を算出し、整備有無の差分を便益（式(5)）とする。式(2)では、整備 w における災害時の総走行時間 T_i と整備 w における平常時の総走行時間 T_0 の差分をとっている。時間価値 v を乗じることで、貨幣単位に変換する。

$$L_{iw1} = (T_{iw} - T_{0w}) \times v \quad (2)$$

$$L_{iw2} = \tau \times \sum_e (q_{eiw} - q_{e0w}) \times v \quad (3)$$

$$L_w = \sum_i P_i (L_{iw1} + L_{iw2}) \quad (4)$$

$$B^{Loss} = L_0 - L_w \quad (5)$$

ここで、 L_{iw1} ：時間損失、 i ：被災状態を表す添え字で $i=0$ のとき平常時を表す。 w ：整備案を識別する記号で $w=0$ のとき整備なしを表す。 T ：ネットワーク全体の総走行時間（台・分/日）、 v ：1台あたりの時間価値（円/分）、 L_{iw2} ：機会損失、 τ ：トリップ中止の閾値（分）、 q_{eiw} ：整備 w 災害 i 仮想リンク e における交通量（トリップを中止した交通量）、 P ：災害 i の発生確率、 L_w ：道路利用者の経済損失（交通損失）の期待値、 B^{Loss} ：整備便益。

2.3. 地域住民の代替経路確保の便益

a) 便益評価の考え方

地域住民に帰着する経路確保の便益は、経路確保の水準に対する効用を計測することで評価する。すなわち、ある個人の効用関数に代替経路確保の水準に対する選好を定義し、被災状態 i における経路確保の水準 n の低下を効用の低下と表現することで計測する。計算方法の詳細は3章で述べる。式(6)の効用関数では、財消費量 x による効用 $f(x)$ と経路確保の水準 H により効用が計算でき、水準 H の低下により、図2のように効用低下を表現できる。

$$U_{iw} = f(x) \times H_{iw} \quad (6)$$

ここで、 x_k ：財 k の消費量、 H ：被災状態 i ・整備 w における経路確保の水準、 $f(x)$ ：効用関数。

b) 経路確保の水準

代替経路確保の水準 n は、先行研究⁸⁾で提案された指標「非重複経路数」を用いる。この非重複経路の概念を説明しよう。図3ではAからBに至る全経路を示している。一般的な方法で数える場合、6通りの経路がある。しかし、中心に位置するリンクDは6通り全ての経路で使われている。この区間が不通となるとAとBの間の経路が0本となる。一

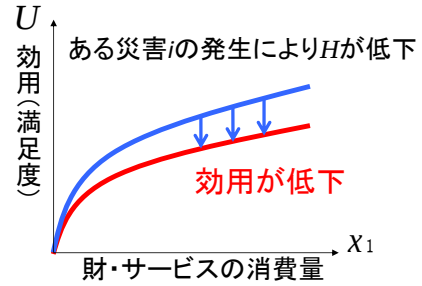


図2 経路確保の水準 H の低下に対する効用

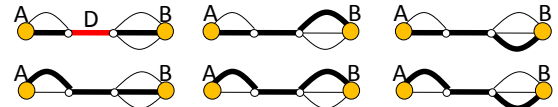


図3 経路6パターン（非重複経路は1本）

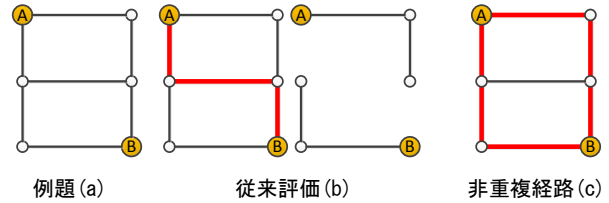


図4 従来の方法と非重複経路の違い

般的な方法で数える場合の経路数は、その多さに意味がないことがわかる。図3では、リンク重複のない経路数は1本と評価される。 k 本の非重複経路が存在するならば $k-1$ 本の途絶に対して必ず1本残ることを保証でき、到達の可能性を評価することができる。ただし、6通りのうち非重複経路は一意に定義されないため、その走行時間の和が最小となる非重複経路を用いて、一意に定める⁸⁾。

次に、従来の経路の数え方に比べ、非重複経路の数え方が優れている点を述べる。従来の方法との差異は、複数経路の扱い方にあり、存在する複数経路を適切に評価しているといえる。図4(a)のネットワークを用いて簡単な例で説明する。AB間の移動を考え、図4(b)左に示した経路が最短経路とする。従来の方法で代替経路を求める場合は、図4(b)右のように最短経路を全て削除した上で、次の最短経路を探索する。しかし、図4(b)右には経路が存在しないことがわかる。一方、先行研究⁸⁾で示されている方法でリンク重複のない最短の二本経路を求める場合、図4(c)に示す2本となる。このため、従来の方法では1本とみなされたAB間に経路が2本存在する。図4(b)と図4(c)より、先行研究⁸⁾で示した方法が代替経路の評価指標として適切と考えられる。このため、本研究では先行研究⁸⁾で示された方法を用いて、代替経路を評価する。

3. 災害時道路網機能の便益評価手法構築

3.1. 交通損失の軽減便益評価手法の構築

2.で述べた考え方に基づき、需要変動型の利用者均衡配分を適用することで、機会費用を考慮した総走行時間を算出し、道路利用者の時間損失と機会損失を求める。総走行時間の計算方法は、長

江ら⁷⁾を参考にした．仮想リンクに，図5に示した階段型の需要関数を設定し，通常の利用者均衡配分を適用することでトリップ取りやめを考慮することが可能となる．全起終点間のそれぞれに対して仮想リンクを作るとその総数が膨大になるが，図6で示した仮想ノードを経由地として設定すると起終点の数となり，扱いが容易となる．配分計算には Frank-Wolfe 法を用いる．

リンクパフォーマンス関数(式(7))には，表2のパラメータを用いる．現実リンクとは，仮想リンク以外のリンクを指している．現実リンクの値として，土木学会 交通需要予測技術検討小委員会⁹⁾が全道路種類別共通の標準パラメータとして提案している松井式¹⁰⁾のパラメータを採用する．料金抵抗 F_a は，道路交通センサスに基づいてリンクごとと車種ごとに設定する．一方，仮想リンクのリンクパフォーマンス関数は， α に0を設定することで，交通量によらない関数となる．また，信号などの要因による遅れ時間は，設定は可能であるものの，リンクごとに確定値を定めることは困難であるため恣意性を排除するため0とする．

$$t_a(z_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{z_a}{C_a} \right)^\beta \right\} + F_a + D_a \quad (7)$$

ここで， t_{a0} :自由流の場合の所要時間， C_a :リンク a の容量， z_a :リンク a の交通量， F_a :交通量によらない料金抵抗， D_a :交通量によらない遅れ時間

式(8)では，現実リンクと仮想リンクの交通量，所要時間を統合しており，機会損失と時間損失とが統合されている．式(9)では，交通損失の軽減の期待値として評価する(式(4)と式(5)を統合した)．

$$L_{iw} = \sum_j \sum_a v_j \Delta y_i (t_{aiw} z_{aijw} - t_{a0w} z_{a0jw}) \quad (8)$$

ここで， L_{iw} :災害 i 整備 w の場合の交通損失， v_j :車種 j の時間価値， Δy_i :災害 i による被災状態の継続日数， t_{aiw} :災害 i 整備 w におけるリンク a の所要時間， z_{aiw} :災害 i 整備 w におけるリンク a の交通量

$$B_w^{Loss} = \sum_i P_i (L_{i0} - L_{iw}) \quad (9)$$

ここで B_w^{Loss} :交通損失軽減便益， P_i :災害 i の生起確率

本節で述べた評価手法を適用するにあたり，仮定する前提を述べる．

1. OD 所要時間が τ 分を超える場合はトリップをとりやめる．
2. トリップを行う道路利用者は，一般化交通費用が最も小さい経路を選択する．
3. 一般化交通費用は，有料道路の料金と車種別の時間価値を用いて算出される．
4. すべての道路利用者はリンク途絶の有無や交通需要関数に関する完全な情報を持っており，自らの交通行動に対して他のすべての利用者の反応を完全に予測できる．
5. 機会費用の閾値 τ を 8 時間に設定する．これ

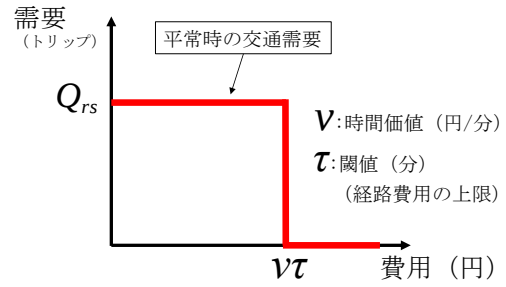


図5 超過需要関数 (出所: 長江ら⁷⁾)

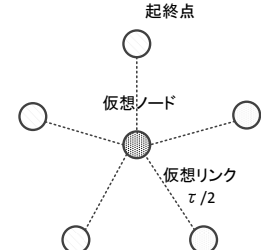


図6 起点と終点を統合

表2 リンクパフォーマンス関数のパラメータ

	α	β	D_a
現実リンク	0.48	2.82	0
仮想リンク	0	1	0

は長江ら⁷⁾を参考にして，1日(24時間)のうちに往復を行うと仮定したとき，睡眠時間8時間を除く16時間を往復それぞれ8時間ずつに充てたと想定している．到着地では8時間の時間価値を支払ってでも享受したい価値があると仮定しており，8時間を超えるような場合は，8時間の機会費用が発生したと考える．

6. 非常時の OD パターンを設定することは困難であるため，平常時のものを使う．平常時 OD を使うことは，評価の規範を「平常時」としており，災害時の交通状況を平常時(理想状態)に近づけるよう評価を下していると解釈できる．
7. 災害時に，道路ネットワークのみが被災し，人的な被害やノードの被害は考慮しない．このため災害時の損失として交通損失のみを評価する．この前提に立つと，災害時特有の移動目的(災害による負傷者搬送や治安・消防・物資輸送)は考慮しなくてよいとため，平常時の OD を使って分析が可能となる．本来であれば，被災時の道路ネットワークへの要求としては，平常時の OD 交通量に加え，被災時に新たに発生する OD 交通量を処理することが求められる．
8. 道路容量の低下も考慮できるが，本研究においては全面通行止めのみを扱う．

3.2. 代替経路確保の便益評価手法の構築

災害時に経路が確保される便益は，防災投資の便益評価¹¹⁾を参考にし，便益定義の1つ，等価的偏差 EV (受取補償額) を用いて算出する． EV はプロ

ジェクトをあきらめるために必要な最小の補償額であり、式(10)の等号を満たす EV 、すなわち整備なしの期待効用と整備ありの期待効用とが釣り合う補償額と定義される。式(10)の間接効用関数 $V(\cdot)$ は所得 Ω と財価格 m と環境 H （生活環境を表現する状態変数）の場合に得られる最大効用を意味する。

$$\sum_i P_{io} V(H_{io}, m_{io}, \Omega_{io} + EV) = \sum_i P_{iw} V(H_{iw}, m_{iw}, \Omega_{iw}) \quad (10)$$

ここで、 o ：整備なしの場合(without)、 w ：整備ありの場合(with)を示す記号。 P_i ：災害 i の発生確率、 $V(\cdot)$ ：間接効用関数、 H ：環境水準、 m ：財・サービスの価格、 Ω ：所得、 EV ：全災害シナリオに対し一つ定まる補償額

等価的偏差 EV を用いることは、道路整備を実施した場合と等価な補償額は、道路整備の価値を表すと仮定していることになる。環境水準 H の低下による効用低下を心理的不安の増加と解釈したとき、式(10)により得られる EV は心理不安の軽減便益を表す。

本研究では、環境水準 H に含まれる様々な要因のうち「代替経路確保の水準」に着目する。環境水準 H は、災害時の拠点となりえる場所までの代替経路確保の水準、非重複経路数 n の関数とする。

$$H_{iw} = f(n_{iw}) \quad (11)$$

ここで、 i ：被災状態を表す添え字で $i=0$ のとき平常時を表す。 w ：整備案を識別する記号で $w=o$ のとき整備なしを表す。 $f(\cdot)$ ：代替経路に対する評価関数、 H ：環境水準

式(10)を計算するため、地域の代表的個人の消費行動に、一般的な効用関数（式(12)）を仮定する。交通サービス（財1）と合成財（交通サービス以外の財・サービスをまとめた財2）の2つを考える。所得のうち割合 ϕ だけ交通サービスを利用する。

γ は、環境 H による不安感が、効用に与える影響の大きさを意味するパラメータである。

$$U = x_1^\phi x_2^{(1-\phi)} H^\gamma \quad (12)$$

ここで、 x_1 ：交通サービスの消費量、 x_2 ：合成財の消費量、 ϕ ：交通サービスの消費割合、 γ ：環境水準に対する重み、 m_1 ：交通サービスの価格、 m_2 ：合成財の価格

式(12)の対数を取り、予算制約付き効用最大化問題として式(13)を定式化し、ラグランジュ未定乗数法により、式(14)の需要関数が求められる。

$$\max V = \ln U = \phi \ln x_1 + (1-\phi) \ln x_2 + \gamma \ln H \quad (13)$$

$$\text{s.t. } m_1 x_1 + m_2 x_2 = \Omega$$

$$x_1 = (\phi/m_1) \Omega, \quad x_2 = \{(1-\phi)/m_2\} \Omega \quad (14)$$

式(5)を式(4)の目的関数に代入し次式を得る。

$$V = \ln \Omega + \gamma \ln H + C \quad (15)$$

ただし、交通サービス価格 m と消費割合 ϕ は、道路利用者の便益との二重計測を避けるため、災害前後・整備有無によらず一定と仮定し、定数項 C にまとめている。この仮定は、代替経路確保の効果のみに着目し、他の値を固定していると解釈する。

式(15)を式(10)に代入し EV について解くと、次式を得る。

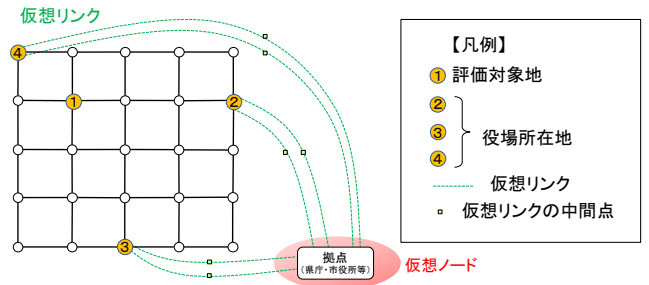


図7 仮想リンクの設定（経路確保の便益）

$$EV = \left[\left\{ \prod_i \left(\frac{H_{iw}}{H_{io}} \right)^{P_i} \right\}^\gamma - 1 \right] \Omega \quad (16)$$

これにより、環境水準 H と状態 i の生起確率 P_i と所得 Ω で表される便益評価式を導出できた。式(16)は、整備による地域住民1人あたりの受取補償額であり、心理不安の軽減分を意味する。所得 Ω により金銭単位に変換されている。 EV は所得 Ω に比例して大きくなる。これは所得が大きいくほど式(10)の期待効用は高い水準にあるため、式(10)の等式を満たすために多くの補償額が必要であることを意味する。

代替経路確保の状況は地域ごとに異なるため、それぞれの地域について式(16)を適用する。各地域の世帯数と世帯あたりの受取補償額との積和により、代替経路確保の便益が算出できる。

$$B_{resident} = \sum_r (G_r \times EV_r) \quad (17)$$

ここで、 $B_{resident}$ ：地域住民の代替経路確保の便益、 G_r ：地域 r の世帯数、 EV_r ：地域 r の1世帯の受取補償額（円）

ここで、式(16)を計算するため、経路確保の水準 H について、式(18)の関数を定義する。最寄りの拠点への非重複経路数 n の対数を取り評価逓減を表現し、途絶日数 κ で重みづけしている。

$$H_{iw} = \kappa_i \ln(n_{iw} + 1) + 1 \quad (18)$$

ここで、 n ：拠点までの非重複経路数、 κ ：途絶日数

さらに、異なる目的地への非重複経路を考慮するため、図7に示したように仮想リンクを設定する。全ての到着地と、最終到着地を意味する仮想ノードとが仮想リンクで接続していれば、異なる目的地への非重複経路が考慮できる。

以上本研究で提案する代替経路確保便益の評価手法を提案してきたが、この方法には、下に記す前提がある。

1. 地域住民は孤立可能性に対して、不安感を持っており、自分の地域と災害時に拠点となりえる場所（たとえば市役所・県庁など）までの経路数が増えると満足度が向上する。
2. 地域住民は災害と道路整備に関する完全な情報を持っており、災害がどの程度の確率で発生し得るのか、災害発生時にネットワークがどのような被災状況になるのか（どのリンクが通れなくなるか）、どの程度不通期間が続

くのかを知っている。また、道路整備を実施した際に経路が増えるか否か知っている。
(完全情報の仮定)

3. ネットワークの状態 i の生起確率 P_i がわかっており、整備有無に関わらず変化しない。 P_i は後述する最尤被災パターン法を適用する。災害発生確率とリンク途絶確率は別で定義される。道路斜面や橋梁の補強など道路の強靱化施策によって、道路途絶が起こりにくくなる場合は、リンク途絶確率が低くなる。
4. 災害時の交通サービス価格 m_{iir} と災害時の交通サービスの消費割合 ϕ_r 、災害時の所得 Ω_{ir} は整備有無で変化しない。この仮定は、便益の二重計測を避けるため、所要時間短縮効果を別の方法で評価するために設定する。したがって、道路整備の有無の比較では、代替経路確保の効果のみに着目する。
5. 環境水準には、生活環境の水準を示す様々な指標が考えられるが、政策によって変化する非重複経路数 n のみに着目する。
6. EV_r を地域 r の住民 1 人あたりの受取補償額を表すオプション価格 (OP_r) と定義する。道路整備をしなかった場合に、整備ありと同じ効用を保証するために、いくらの補償額が必要かを計算し、地域住民の孤立に対する不安感の軽減を評価する。
7. 災害リスク回避の選択肢として、立地選択を考慮しない。このため、地域ごとの人口を用いて地域ごとの受取補償額 EV_r を算出しても不整合は生じない。
8. 交通プロジェクトの便益評価を効用関数によって評価する場合、所得制約と時間制約を考慮することが一般的である（例えば応用都市経済モデル）。時間資源を考慮する場合は、本稿で提案するオプション価格の計算式における所得 Ω が余暇時間の関数となり、地域住民の便益に所要時間の差異が反映されることになる。しかし、これは走行時間短縮便益の二重計測となる。走行時間短縮は、道路利用者の便益として計上しているため、地域住民の便益には所要時間短縮の効果を含めるべきではない。本研究で提案する評価方法では、交通サービスを受けられるか受けられないかに焦点を当てている。接続性の効果を評価するため、時間制約の影響を排除する。本研究で提案するオプション価格は、非重複経路数 n と状態発生確率 P で表わされる関数となる。このため、どのような値をおいたとしてもオプション価格を求める際にキャンセルアウトされるため、本研究で提案する手法の中で、交通価格の値をあらかじめ設定しておく必要はない。ただし、もとの効用関数に立ち返って各項の大きさを比較するために、何を表わしているかを定義しておく必要がある。この

ため、消費額を財の消費量とし、各財の価格を 1 とする。

9. ある災害時に複数の経路が確保されていることは、さらに未知の災害・事故等が発生した場合にも対応可能な経路が残されていることを意味している。即ち、災害時にも余力のあるネットワークが残されていることを評価している。

3.3. 最尤被災パターン法の適用

災害を考慮した適用計算を行う場合、まずはあるレベルの災害が発生する確率を考慮するとともに、その災害が発生した際の各構造物の被災確率を考慮し、最終的な被災パターンを考えるのが一般的である。しかしながら、このような方法をとれば、1つの災害シナリオについて多くの計算を実行する必要がある、多大な計算時間を要する。本研究では、長江ら⁷⁾が提案した最尤被災パターン法の考え方にに基づき、ある災害シナリオ i の発生により、最も発生する確率の高いリンク途絶パターンが生じると仮定する。すなわち、1つの災害シナリオについて、1つの途絶シナリオを考えることで膨大な被災パターンを省略し、災害時の影響を近似することとする。

4. ケーススタディ

4.1. ケーススタディの設定

構築した評価手法を岐阜県飛騨圏域に適用する。岐阜県飛騨圏域（高山市、飛騨市、下呂市、白川村）は岐阜県北部に位置する中山間地域であり、斜面の落石崩壊や集中豪雨発生時の土砂災害の危険性の高い場所が数多く存在する。降雨時に落石や法面崩壊などの恐れがある区間について通行規制区間が定められている。平成23年10月1日現在の状況では、県管轄の道路で96か所522kmの通行箇所が指定されている¹²⁾。他にも、国直轄の雨量規制区間として、飛騨圏域の交通の骨格を担う国道41号があり、豪雨による不通が、岐阜県の交通や飛騨圏域の地域住民に大きな影響を与えている。

ケーススタディにおいて、豪雨災害を想定し、過去21年間の豪雨履歴により豪雨発生エリアおよび豪雨発生確率を設定する。岐阜県の雨量規制箇所には、時間30mm以上や2時間60mm以上といった基準が設けられているが、簡単のため、豪雨の定義を時間降水量50mm以上とし、豪雨が発生した場合は、1日の通行止めが行われるとする。飛騨圏域に関連するアメダスとして、岐阜県内15、富山県内1の計16地点を抽出した。観測所の地点の座標は公表されており、それらの地点をボロノイ分割することにより、それぞれの観測地点のカバーする範囲が得られる。このボロノイセルにより、アメダスの観測データを用いて、あるエリア区画の豪雨の有無を判定する。

16個のボロノイセルを1つの集合体（飛騨圏域）

表3 降雨パターンより作成した豪雨シナリオ

i	ボロノイセルのID																頻度	確率
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	0.00078
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0.00065
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0.00039
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0.00026
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0.00026
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.00013
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.00013
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.00013
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.00013
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.00013
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.00013
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0.00013
13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0.00013
14	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.00013
15	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0.00013

とし、その集合体の範囲内において、過去21年間で豪雨と判定されたのは28日であった。この28日の日付は特定できており、その日に、どのボロノイセルに降雨があったかを特定できる。この豪雨発生頻度（日/21年）は、ある1つのボロノイセルにおいて、複数の時間帯にわたって50mm以上の降雨が観測されても1と数えられている。また、同日・同時帯において、複数のボロノイセルで豪雨が観測されても、1と数えられている。即ち、本研究における豪雨発生頻度は、「豪雨」という事象が年間に何日発生したかを表す指標である。

表3では、過去28回発生した豪雨（時間降水量50mm以上の降雨）をボロノイセルの組み合わせにより分類した結果を示しており、15種類に分類できた。過去21年間に、最大で6回の頻度で発生している。この過去実現した15パターンの豪雨シナリオを想定する。

計算ネットワークは、2005年の道路交通センサスに基づいており、2030年の将来ネットワークより、2012年1月現在に供用しているリンクを追加している。交通損失の軽減便益と代替経路確保の便益の算出するネットワークは同じであるが、計算する範囲が異なる。代替経路確保の便益は、岐阜県を中心として、周囲の地域に北陸と長野県を含む中部圏のネットワーク（図8）で計算する。一方、交通損失の軽減便益は、岐阜県内の通過交通を考慮するため、関東地方から中国地方までを含む道路網（図9）で計算を行う。経路確保の便益には、交通量の概念がないため、全国ネットワークまで広げなくとも問題にならない。経路確保の便益を算出するために必要な「非重複経路数」は、数値計算ソフトウェアのMATLABを用いる。リンク数27,076、ノード数9,474のネットワークで非重複経路数の最大化問題を解く。交通損失の軽減便益を算出するために必要な「リンク所要時間」と「リンク交通量」は、交通需要予測パッケージJICA STRADAを用いる。リンク数17,345、ノード数11,443のネットワークで交通量配分を行う。

代替経路確保の便益は、図8に示した評価対象地

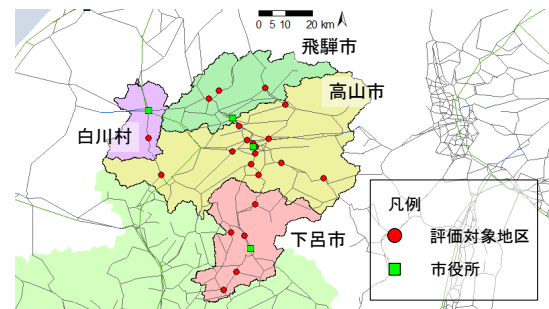


図8 代替経路確保の便益 対象ネットワーク

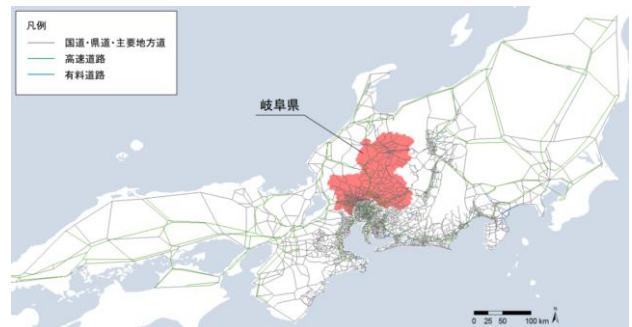


図9 交通損失の軽減便益対象ネットワーク

区について、自都市の拠点（市役所）までの非重複経路数を用いて、心理的不安の軽減分を計算する。世帯あたり所得は、総務省の全国消費実態調査から、世帯数は、国勢調査から設定する。

交通損失軽減便益は、広範囲に及ぶと考えられるため、飛騨圏域だけでなく岐阜県全体の道路利用者を対象とする。収束判定の基準は、リンク交通量の誤差を5%とする。

図10では16のボロノイセルと雨量規制のリンクを示している。図11では評価対象の3通りの道路整備を示しており、図の番号と整備IDは数値で対応している。例えば1はw=1と対応する。

図12では、本ケーススタディで計算する便益評価の全体像を示している。従来の走行時間短縮便益に加えて、新しい便益として、代替経路確保の便益と交通損失の軽減便益を算出し、数値計算例を示す。

4.2. 評価結果

図13と図14では、それぞれの道路整備について、図12に示した項目の評価結果を示している。従来の走行時間短縮便益を水色、今回追加した便益（道路利用者の経済損失（交通損失）軽減と地域住民の経路確保）を紫で色分けしている。図13では地域住民の不安に対する重み γ を1としたときの代替経路確保の便益評価結果を示しており、図14では γ を10にした場合の結果を示している。 γ が1の場合は、追加便益の大きさは、従来便益に比べ小さい。 γ の値が大きくなると、従来評価と同程度の便益となる場合がある。 γ の大きさは、地域住民の不安の大きさを表わしているため、住民の不安が大きい場合は、発生する便益が大きくなると解釈できる。

図15では、交通損失の軽減便益の評価結果および γ が1の場合の経路確保の便益を示している。交通損失の軽減便益は、どの整備も同様の結果を示す一方で、経路確保の便益は、 $w=3$ が高く、 $w=1$ が小さくなっている。このため、経済損失の観点からは、それぞれの整備案は同等の効果を発揮する一方、代替経路確保の観点からは、評価が異なることがわかる。整備による経路確保の際を評価できるといえる。

図16では、交通損失の軽減便益の評価結果および γ が10の場合の経路確保の便益を示している。パラメータ γ は経路確保のみに寄与するため、交通損失軽減は、当然変化しない。経路確保の便益は概ね10倍となっていることがわかる。このため、不安感を表わすパラメータ γ の大きさによって、便益が大きく変わりうるということがわかる。

図15と図16において僅かな差異ではあるが、それぞれの整備案の便益を比べると、 $w=3$ が災害時に効果の高い整備といえる。

表4では、 $\gamma=1$ における代替経路確保の便益について、それぞれの地域に帰着する便益を示している。それぞれの整備案において、地域20に大きな便益が発生することがわかる。また、 $w=3$ の場合に地域18と地域22にも便益が発生することがわかる。よって、 $w=3$ の整備は、より広範囲に影響を与えることがわかる。

図17と図18、図19では、 $w=1$ と $w=2$ 、 $w=3$ について、雨量規制区間との位置関係を示している。 $w=1$ は、2012年7月に開通した区間であり、 $w=2$ は建設が予定されている区間である。 $w=3$ は本研究において追加した区間であり、実際の計画には存在しない。評価対象地区（地域20）は雨量規制区間に囲まれており、道路整備によって、経路が確保される。災害シナリオ1において、ボロノイセルの15に豪雨があり、災害シナリオ12においてボロノイセルの14と15が同時に被災する。 $w=2$ の延伸により、雨量規制のないリンクに接続することができる。また、 $w=3$ の延伸により、雨量規制区間を避けることができる。このため、不通区間が生

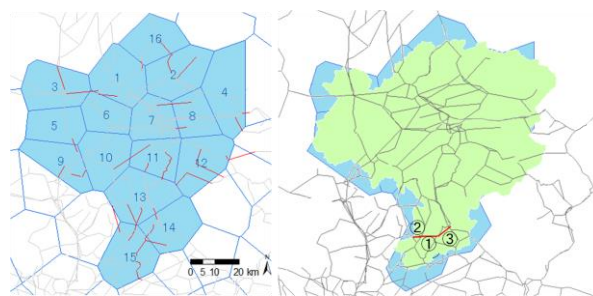
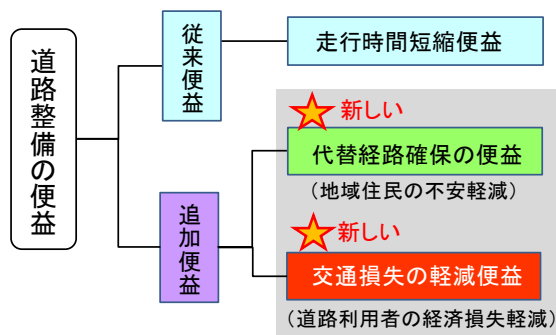


図10 豪雨発生エリア

図11 道路整備区間



※本来、従来便益には、走行経費減少と交通事故軽減が含まれるが、簡単のため、本研究では省略した。

図12 評価の全体像

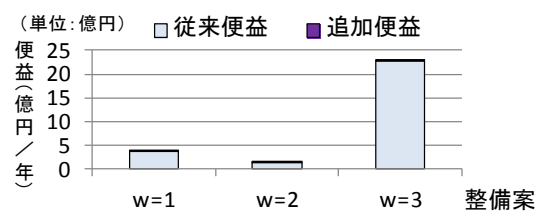


図13 便益評価結果 ($\gamma=1$)

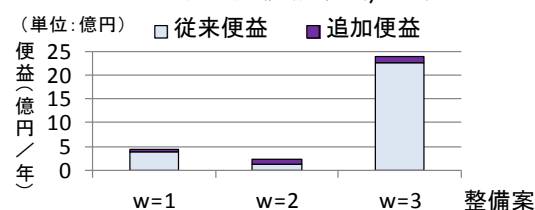


図14 便益評価結果 ($\gamma=10$)

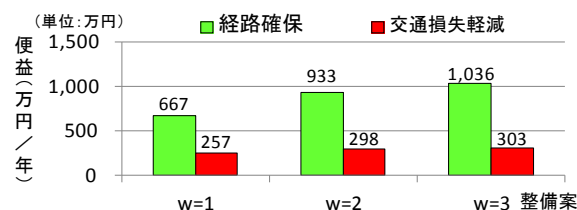


図15 追加便益の内訳 ($\gamma=1$)

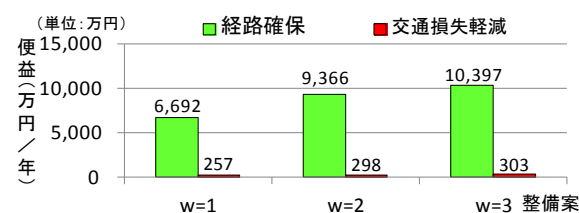


図16 追加便益の内訳 ($\gamma=10$)

表4 代替経路確保の便益 ($\gamma=1$) (万円/年)

		地域No.																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	合計
整備 案	w=1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	667	0	0	0	0	667
	w=2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	933	0	0	0	0	933
	w=3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83	0	933	0	20	0	0	1,036

じた際に経路を確保することが評価されているとわかる。よって、ある災害シナリオにおいて、経路が増加する場合は、新規リンクが不通区間の代替経路となっているといえる。図20と図21、図22では、整備の有無について、確保される非重複経路の本数を示している。図20では、w=1の場合に地域20において確保される非重複経路数を表わしており、災害シナリオ1, 12以外では経路が増加している。図21では、w=2の場合に地域20において確保される非重複経路数を表わしており、設定した全ての災害シナリオにおいて、経路が増加する。図22では、w=3の場合に地域18と22において確保される非重複経路数を表わしており、災害シナリオ2, 12において、経路が2本から3本に増加する。すでに2本確保されている状況において3本目が増える効果を評価している。確保される本数が多いほど、評価が伸びない関数（非重複経路数の対数）を採用しており、このことが評価が低い原因の1つと考えられる。

地域20において、w=1とw=2、w=3の整備は、ほぼ全ての災害シナリオで経路増加が起きている。ただし、w=1では、災害シナリオ1と12で経路増加が起きている。特に、災害シナリオ12では拠点までの経路がなくなっている。また、災害シナリオ1では、整備なしにおいて1本しかない状況が整備することにより複数経路を確保できている。災害時にも余力あるネットワークが確保されたことがわかる。

地域20の非重複経路数を用いて感度分析を行う。図23では、世帯あたり所得 Ω を400万円に固定し、経路確保に対する重みパラメータ γ と世帯数を変化させたときのグラフを示している。世帯数が多くなるに従い、パラメータ γ の影響がより大きくなることがわかる。世帯数には線形で影響を受け、パラメータ γ には非線形で影響を受けることがわかる。このことから、 γ が一律の場合には、人口と所得の影響が評価結果に表れる。しかし、 γ の値が地域ごとに異なる場合には、その地域の特性（非重複経路数に対する重みを意味するパラメータ γ ）を反映した評価結果となりうることを示唆している。また、経路確保の状況に応じて、パラメータの感度に差があらわれている。

図24では、整備なし（w=0）とw=1、w=2、w=3について、交通損失の期待値の内訳を示している。確率が乗じてあるため、同色の矩形の和が交通損失の期待値となり、整備なしと整備ありとの期待交通損失の差分が交通損失の軽減便益である。整備なしの場合、災害シナリオ2（ボロノイセル14が

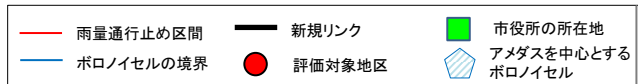


図17 w=1 と雨量規制区間との位置関係

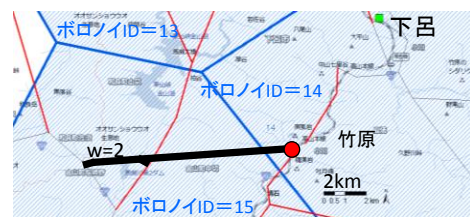


図18 w=2 と雨量規制区間との位置関係

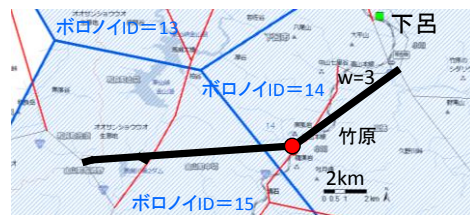


図19 w=3 と雨量規制区間との位置関係

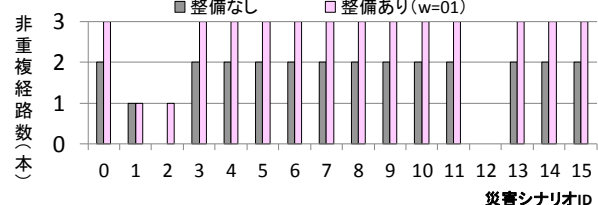


図20 w=1 の場合の非重複経路数 (地域 20)

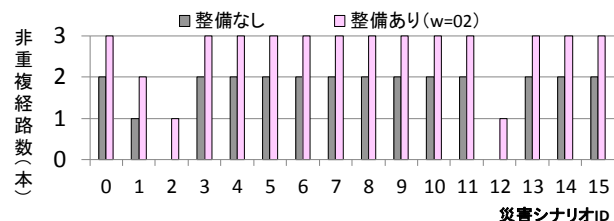


図21 w=2 の場合の非重複経路数 (地域 20)

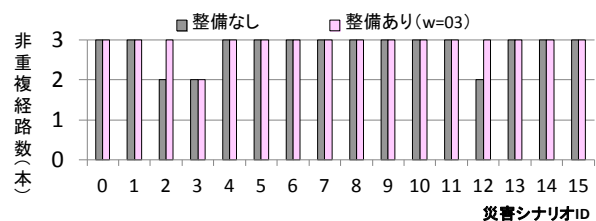


図22 w=3 の場合の非重複経路数 (地域 18,22)

被災)のときに交通損失が大きいですが、整備によって交通損失が軽減されていることがわかる。災害シナリオ2の場合には、 $w=1$ と $w=2$ 、 $w=3$ において差異は僅かである一方で、災害シナリオ12において整備案ごとに差異がある。

5. おわりに

本研究では、道路利用者に帰着する経済損失(時間損失・機会損失)の軽減と、地域住民に帰着する孤立に対する心理不安の軽減に着目し、それぞれの便益を貨幣単位で評価する手法を構築した。岐阜県飛騨圏域のネットワークで実用性検証を行った結果、災害時の経路確保に寄与する道路が存在することが確認でき、実務への適用の意義を示した。

本研究で提案した手法で計算した場合に、濃飛横断自動車道($w=1$, $w=2$, $w=3$)は、災害時において経路確保と交通損失軽減の両面から有効に機能する道路であることが明らかとなった。

交通損失の軽減便益は、発生確率の小ささに影響を受けており、従来評価と比べると微小である。

経路確保の便益は、経路数に対する不安感を意味するパラメータ γ に対して、非線形に変化する。ゆえに、不安感の程度によって、整備の優先順位が変わる可能性がある。パラメータ γ の大きさにより、孤立可能性のある集落の便益をより重視できるといえる。

最後に、今後の課題をとりまとめる。経路確保の便益のパラメータ γ について、十分検討できておらず、妥当な評価と結論付けられるようなパラメータ γ の大きさの決め方は、わかっていない。アンケート調査から代替経路の存在価値を推定するか、地域住民は潜在的な不安を持っていると仮定して評価を行うのか。このパラメータに関して、今後検討する必要がある。

さらに、より多くの災害を考慮する必要がある。本研究では、豪雨災害のみを対象としたが、地域全体を評価するためには、起こりうる災害全てを対象とする必要がある。特に今回対象とした地域においては、地震災害の発生も懸念されており、それらのシナリオの追加が望まれる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)「脆弱性の概念によるロバストな道路ネットワークデザイン手法の開発とその実用性検証」(課題番号: 23360221, 期間: 平成23~25年, 研究代表者: 倉内文孝)として実施された。ここに記して謝意を表する。

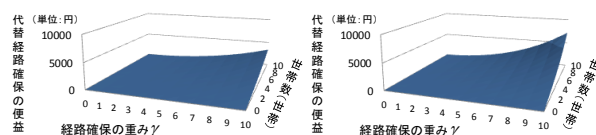


図23 w01 と w02 の感度分析結果

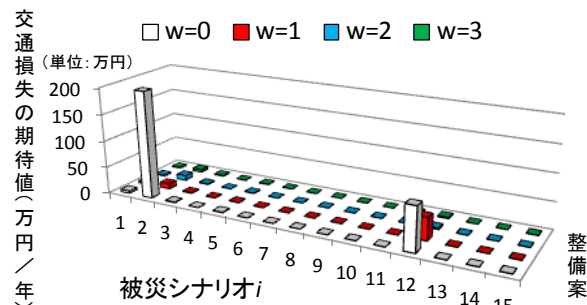


図24 交通損失の期待値

参考文献

- 1) 国土交通省道路局, 費用便益分析マニュアル, 2008
- 2) 国土交通省道路局, 道路の防災機能の評価手法(暫定案), 平成23年
- 3) 国土交通省道路局, 主要都市・拠点間等の防災機能向上に関する計測マニュアル(暫定案), 2011.9
- 4) 国土交通省道路局, ネットワーク全体の防災機能向上に関する計測マニュアル(暫定案), 2011.9
- 5) 国土交通省, 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針(共通編), 2009
- 6) 上田孝行, 高木朗義, 森杉壽芳, 小池淳司, 便益帰着構成表アプローチの現状と発展方向について, 運輸政策研究, Vol.2 No.2, pp.1-12, 1999
- 7) 地震工学委員会耐震基準小委員会, 経済性照査に基づく新しい耐震設計法の実施に向けての検討—経済性照査ワーキング活動報告書一, 土木学会, 2008
- 8) 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.
- 9) 土木学会交通需要予測技術検討小委員会, 『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』, 土木学会, 2003
- 10) 松井寛, 山田周治, 道路交通センサスデータに基づくBPR関数の設定, 交通工学, vol.33, pp.9-16, 1998
- 11) 多々納裕一, 高木朗義, 『多々納裕一・高木朗義(編著)防災の経済分析』勁草書房, 第4章, pp.72-87, 2005
- 12) 岐阜県 HP, <http://www.pref.gifu.lg.jp/kendo/michikawa-sabo/doroiiji/doro-no-FAQ/> (access:2012.11.1)

Benefit Evaluation of Disaster Reduction Capability of Road Network by Enhancing Connectivity

Tsuyoshi HARADA, Fumitaka KURAUCHI and Akiyoshi TAKAGI

Impacts of network degradation may not be large when the area in concern is not disconnected with other areas, even several links may be degraded and disconnected. In response with East Japan Great Earthquake, the Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism has proposed the evaluation method of the function of road in emergent situation. In the proposed method however the benefit of such function is not evaluated by the monetary term and the method is therefore not consistent with the conventional benefit evaluation method. Based on the above background, we propose a benefit evaluation method of disaster prevention capability of road network consistent with the conventional benefit evaluation method. In concrete, we define the benefit of disaster prevention capability of the road as a sum of reduction of economic loss by detouring and losing opportunity, and reduction of anxiety of being disconnected for local citizen. The economic loss is quantified by user equilibrium assignment with variable demand, and the anxiety reduction is quantified by the compensating valuation. The proposed method is applied to the road network in Hida area of Gifu Prefecture, and the benefit of enhancing connectivity by new road construction is quantified by the monetary term. It is also found that the benefit may change non-linearly by parameter γ determining the relative weight of enhancing connectivity to the other terms. This result suggests that the benefit of avoiding disconnection for the local small village can be evaluated, when the parameter is properly set.