道路ネットワーク防災機能の 便益評価に関する研究

原田 剛志¹・小野 剛史²・倉内 文孝³・高木 朗義⁴

¹正会員 エム・アール・アイリサーチアソシエーツ株式会社 (〒101-0047 千代田区内神田1-13-1)
E-mail: harada@mri-ra.co.jp

²正会員 (一社) システム科学研究所 (〒600-8392 下京区新町通四条上ル小結棚町428)
E-mail: ono@isst-kyoto.or.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: kurauchi@gifu-u.ac.jp

⁴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

現行の道路整備評価では、災害時の機能は十分に評価されていない。東日本大震災を契機として、国土交通省は道路の防災機能の評価手法を公表したが、貨幣単位で評価がされておらず、従来の便益評価と整合性には課題が残る。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。新しい経路が確保されることにより、道路利用者の経済損失（災害時の迂回損失・機会損失）が軽減されることと、地域住民の孤立に対する平常時の心理不安が軽減されることに着目し、それぞれの便益評価手法を構築した。岐阜県飛騨圏域を対象とし、道路整備により雨量規制による孤立が解消されたケースについて試算を行い、災害時の便益がほとんど発生しない道路整備がある一方で、経路確保の便益が少なくなない道路整備が存在することを確認した。

Key Words : *disaster reduction, roads benefit evaluation, connectivity enhancement, conjoint analysis, distinct path*

1. はじめに

(1) 道路整備およびその評価の課題

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。たとえば、道路途絶により中山間地域の孤立集落への物資輸送が困難となりうる。救命救急活動時の大幅な迂回は、命に関わる深刻な問題となる可能性がある。道路は災害時に重要な役割を果たすため、深刻な機能不全とならないような道路ネットワークの構築が必要といえる。

しかし、災害時の道路機能について十分に評価されているとは言い難い。道路の整備効果を評価する際には一般的に、「道路整備評価マニュアル」¹⁾に準じて費用便益分析を行う。その評価では、十分な計

測精度が確保されている3便益（走行時間短縮、走行費用減少、交通事故減少）により評価されているが、災害時の便益は、その存在は取り上げられているものの具体的な計測方法が示されていない。東日本大震災を契機とし、国土交通省の社会資本整備審議会（道路分科会事業評価部会）にて「道路の防災機能の評価手法（暫定案）」^{2), 3), 4)}が検討され、必要性、有効性、効率性の側面から道路の防災機能の評価し、防災機能の高い道路整備は優先して道路整備を進めることができる方法が示されているが、道路の防災機能について、評価結果が貨幣単位でないため、費用便益分析の俎上に載せることができない。

(2) 研究目的

限られた予算の中で災害時にも機能する有効な道路を整備するためには、平常時の機能に併せて、災害時の機能を計上し、費用対効果を検証することが重要である。本研究では、従来計測されてきた便益

との二重計測を避け、道路網の防災機能を貨幣単位で評価する手法を構築することを目的とする。

(3) 本稿の構成

本稿は次のように構成される。1章では、本稿の問題意識を述べるとともに、本研究の位置づけを示す。2章では、道路の防災機能として2つの便益評価項目を明示し、その便益の考え方と評価手法を示す。3章では、2章で説明した方法を用いる際に必要なパラメータについて、アンケート調査より推定した結果を報告する。4章では、岐阜県飛騨圏域を対象として、雨量規制区間の代替経路となりうる新規道路整備について、2章で説明した評価手法と3章で推定したパラメータを用いて防災便益を試算し、本研究で構築した手法の実用性を確認する。5章では、結論と課題をまとめる。

(4) 既往研究と本研究の位置づけ

a) 災害時に求められる道路機能と評価の観点

既往研究から過去の災害の状況を把握し、災害時の道路機能を評価する際の観点を考察する。片倉⁵⁾は、関東大震災を例に、地震による道路・交通サービスの機能低下が救援活動などの妨げになり、より被害が大きくなることを指摘した。緊急車両の経路を確保することの重要性が示唆されているといえる。若林・亀田⁶⁾は、ロマ・プリエタ地震後に実施された車線増幅策について、配分モデルを用いて分析し、車線増幅策には限界があることを示し、余力のある経路を確保しておくことの重要性を述べている。若林・亀田⁶⁾の言及は、道路幅員に関してのみであるが、新規道路整備も余力のある経路を確保する政策の1つと考えられる。中川・小林⁷⁾は、阪神淡路大震災を対象とした研究と、震災直後の状況が記されている文献(経験談や手記など)を整理し、震災直後の交通状況を明らかにしている。大渋滞の発生していた神戸市の東側西側の断面とは対照的に、六甲山脈の連なる北側断面では交通混雑は発生しておらず、緊急輸送に重要な役割を果たしたことが指摘されており、普段の利用の少ない道路であっても緊急輸送ルートとなりえるため、災害時に有効な道路は構造を強化しておくことが重要と述べている。藤田・三田村⁸⁾は2000年の東海集中豪雨についてアンケート調査を行い、自動車交通の状況を分析している。不通区間が多数存在したことにより、通行可能な道路に車両が集中し、極度の交通混雑が発生したことや、道路冠水や渋滞のため走行を断念し、出発地に戻るなどして、目的地に未到達の交通(トリップのとりやめ)が生じたことが確認できる。朝倉ら⁹⁾は、このよ

うな災害発生後のトリップ中止に関する実証分析を行っており、5%のドライバーが通行規制に遭遇したとしてもトリップを中止することなく迂回ルートを利用すること、経路変更の際には約7割のドライバーがリスクの高いルートへの変更を行っていることなどが述べられている。このことから、迂回が生じたとして多くの道路利用者はトリップを続ける可能性があり、迂回することによって生じる経済損失を評価する必要がある。

以上の文献から災害時の状況を鑑みるに、災害時に到達可能な経路を十分確保することができれば、交通混雑を軽減できるだけでなく、トリップをあきらめることによって生じる機会費用を軽減することができ、迂回や走行断念の結果生じていた2次被害の拡大を防止することができると考えられる。道路網評価の際に、余力あるネットワークを確保する観点から評価する必要がある。

b) 防災機能の便益評価の観点と本研究の位置づけ

道路整備を防災投資と捉えた場合の便益評価方法について考える。リスクは、防災の文脈では、「事象の生起確率」と「事象が生起した結果生じる影響度」の積として定義され、期待被害額として表現されるのが一般的である。国土交通省の「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針(共通編)」¹⁰⁾によれば、防災事業の便益評価には、期待被害額の軽減分の他に、心理的不安感の軽減分も評価すべきとされている。期待被害額と心理不安感それぞれの軽減という側面から道路網を評価する必要がある。

高木ら¹¹⁾は、道路斜面の落石による経済損失として、復旧費用、人身損失、迂回損失、救急医療損失、孤立集落損失のリスクを評価しており、そのうち孤立集落損失が、落石による道路途絶の結果生じる孤立集落への心理的不安感の軽減分として考慮されている。一方で災害による直接的な被害(復旧費用、人身損失)と間接的な被害(迂回損失、救急医療損失、孤立集落損失)とが合算されているが、本研究では、新規道路整備によりネットワークが形成されることの純粋な便益を求めるため、道路ネットワークのみが被災し、人や道路構造物等の資産への被害は発生しないと仮定し、道路利用者への影響に着目する。高木ら¹¹⁾の示した経済損失のうち、道路利用者が被る迂回の影響として、迂回損失を扱う。孤立集落損失は、電気ガス水道を含んだライフラインの途絶の回避に対する支払意思額を求めており、道路整備以外の影響が含まれているため、本研究では異なる方法を採用する。また、高木ら¹¹⁾は防災対策の優先順位を決定するモデルを報告しているのに対し、本研究は平常時の評価までを含めた従来の道路整備の便

益評価の枠組みにこの迂回損失の考え方を導入する点異なる。

心理的不安感の軽減効果は、仮想的評価市場法 (CVM) や保険市場データを用いた手法による、リスクプレミアムの推定が研究されている¹²⁾。CVMによる便益計測の指針¹³⁾が公表されているが、さらなる研究蓄積が必要との方針が示されている。保険市場データを用いた推定では、特定の災害のみ関する支払意思額を求めることが困難なことや再保険市場の特性も配慮する必要があり¹²⁾、その適用は容易ではない。CVMとよく似た手法にコンジョイント分析があるが、CVMが属性別の評価値の整合性を図ることが難しいのに対し、コンジョイント分析は、複数の要因・属性別に分析することができる。本研究では、不安感を抱く原因となる災害の発生頻度や災害が発生した際に使用できる経路本数といった要因を考えることを想定し、複数の属性・要因について分析可能なコンジョイント分析を用いる。また、便益評価額は、厚生経済学の便益定義から算出することとし、コンジョイント分析は効用関数のパラメータを求める際に使用する。

災害時の道路ネットワークを考える際、災害時の道路利用者のトリップ中止による機会費用（あきらめた選択肢の最大価値）も災害時に発生する経済損失の一つと考えられる。目的地に到達できないことによって生じる機会費用を推定する方法として、需要変動型の利用者均衡配分モデルを活用する方法がある。長江ら¹⁴⁾は、道路損壊時に道路利用者が被る不便益として、3つの不便益（1. 交通混雑増大による不便益、2. 起終点間が途絶する利用者が支払う機会費用、3. 旅行費用の増大によってトリップを中止する利用者の機会費用）を評価可能な手法を提案している。このうち、1. 交通混雑増大による不便益は、高木ら¹¹⁾が評価している迂回損失と同等の概念であり、ガソリン代等の走行経費が長江ら¹⁴⁾の不便益に考慮されていない点が高木ら¹¹⁾と異なっている。他の2つの不便益は、起終点の途絶とトリップ中止を分けて説明がなされているが、どちらも機会費用であり、長江ら¹⁴⁾においても計算上はまとめて計算されている。起終点が途絶し経路が存在しない場合も、機会費用を支払って、トリップとりやめを選択すると仮定することで、それらの交通をまとめて利用者均衡配分を行うことができる。本研究では長江ら¹⁴⁾がわけて定義している機会費用の定義をまとめて機会損失として扱っている。長江ら¹⁴⁾の研究では、期待被害額の軽減のみの評価となっており、心理不安感の軽減分については言及されていない。本研究で

は、長江ら¹⁴⁾の提案する手法に加えて、心理不安感の軽減分をも評価する点異なる。

他にも災害時の信頼性を需要変動型利用者均衡配分により扱った研究として、Nicholson and Du¹⁵⁾の研究がある。トリップ取りやめが一定以下となるような確率を Flow Decrement Reliability と定義し、ネットワークの災害に対する信頼性を評価する方法を提案しているが、貨幣単位での経済損失の評価はされていない。

交通ネットワークの分野では、ネットワーク信頼性とネットワーク脆弱性の観点からリスク評価が行われている。これらの研究に関して、初期（1980年頃）から90年代前半の研究について整理した岡田ら¹⁶⁾、最近（2011年）までの研究を整理した中山¹⁷⁾、研究課題のフレームを整理した倉内ら¹⁸⁾のレビューが詳しい。これらの道路ネットワークの指標に基づいた便益評価手法が、中山¹⁷⁾によって提案されている。連結信頼性と所要時間信頼性を統合した信頼性向上に関するモデルで、ログサム変数に基づく期待最少コストの変化分により新規道路整備の便益を評価する手法が説明されている。時間信頼性は、走行時間短縮便益に相当すると考えられ、その手法は従来評価にとって代わるべき評価手法と考えられる。本研究では、従来の便益評価に合算することを目指し、中山¹⁷⁾とは異なる手法を構築する。

本項では、関連研究について、本研究との違いについて言及することで、本研究で構築した手法の特徴を示した。本研究は、従来の道路整備便益算定手法と整合性のある防災機能評価手法を構築し、防災機能による期待被害額の軽減という観点から、道路利用者の経済損失（迂回による時間損失と道路途絶・渋滞によるトリップ中止による機会費用）を評価し、心理的不安感の軽減という観点から、経路が確保されることの価値を定量化する。

2. 防災機能の便益評価手法の構築

(1) 評価項目

本研究では、道路の防災機能の便益について「期待被害額の軽減」と「被災に対する不安感の軽減」の2つの観点から評価する。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。道路利用者の経済損失は、道路の途絶による長大な迂回や過度の交通渋滞によって失われる「時間損失」と、移動ができないことで生じる「機会損失」に分類できる。本研究では、この2つをあわせて交通損失とし、この交通損失の軽減効

果を便益とする。

次に、道路網における「被災に対する不安感の軽減」効果は、地域住民に帰着する道路途絶への不安感の軽減効果と考えられる。たとえば、道路整備により災害時の集落の孤立を防げるならば、平常時に感じている災害への不安感が軽減される。この経路が確保されることにより減少する心理的不安感の軽減効果を便益とする。

本節で述べた便益項目（交通損失の軽減・心理的不安の軽減）は、上田ら¹⁹⁾が示した道路整備の便益帰着構成表と整合する。表-1は、その便益帰着構成表の一部であり、本研究に関連する項目に網掛けを施した。各列には関連主体、各行には発生する便益が、行列の要素には各主体が最終的に享受する便益が示されている。これらの便益の総和が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、本研究で着目する心理的不安の軽減便益は、表中の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、合算が可能である。さらに、この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考えられる。

交通損失の軽減便益は、走行時間短縮便益と時間短縮という意味で一部重複していると考えられるが、走行時間短縮便益が平常時のみを評価している限り、災害時のみの効果を計測した交通損失の軽減便益を合算しても二重計測が発生しないと考えられる。表-1の走行時間短縮便益が平常時の評価項目とみなすと、表中に記載はないが、災害時の交通損失の軽減という便益項目を記載できると考えられる。

(2) 交通損失の軽減便益

a) 便益評価の考え方

本研究では、長江ら¹⁴⁾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）にて評価する。ここでの経路の途絶は移動が不可能であることを意味し、トリップの中止は移動が可能であるが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する。

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を求めることができる。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、総走行時間が増える。極度の交通渋滞が発生した場合には、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。

機会損失は、利用者均衡配分により、長大な所要時間となるトリップを取りやめることを考慮することで、経路の途絶とトリップの中止を取り扱う。

時間損失（式(1)）と機会損失（式(2)）の和を交通損失と定義する。また、その期待値（式(3)）を算出し、整備有無の差分を便益（式(4)）とする。式(1)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。

$$L_{iw1} = (T_{iw} - T_{0w}) \times v \quad (1)$$

$$L_{iw2} = \tau \times \sum_e (q_{eiw} - q_{e0w}) \times v \quad (2)$$

$$L_w = \sum_i P_i (L_{iw1} + L_{iw2}) \quad (3)$$

$$B^{Loss} = L_o - L_w \quad (4)$$

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

図-1 道路網の災害時損失の分類

表-1 道路整備の便益帰着の例（上田ら¹⁹⁾が示した表の一部を抜粋）

(注釈)		道路利用者		生活者				生産者				道路		公共		世界	合計
+	正の効果、-：負の効果、±：不明	道路事業者	代替道路	歩行者	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	道路占有者	土地所有者	市町村	都道府県	国
◎	金銭的計測可能、																
○	計測可能ただし精度上は問題																
△	計測困難																
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														+
			利用料負担	-													-
間接	地域社会	住民生活	道路空間の利用										+				+
			災害時の代替経路確保						+	+	+						+
			交流機会の拡大						+	+							+
			公共サービスの向上						+								+
			入口の安定化						+								+

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_{iw} : 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.

b) 便益評価手法の構築

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¹⁴⁾および土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会の報告書²⁰⁾を参考にした. 仮想リンクに, 図-2 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-3 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(5)) 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²¹⁾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²²⁾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り, 恣意性を排除するため 0 とする.

$$t_a(z_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{z_a}{C_a} \right)^\beta \right\} + F_a + D_a \quad (5)$$

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, x_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(6)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(7)では, 交通損失の軽減の期待値として評価する (式(3)と式(4)を統合した).

$$L_{iw} = \sum_j \sum_a v_j \Delta y_i (t_{aiw} z_{aijw} - t_{a0w} z_{a0jw}) \quad (6)$$

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_{aijw} : 災害 i 車種 j 整備 w におけるリンク a の交通量.

図-2 超過需要関数 (出所: 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会²⁰⁾)

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

$$B_w^{Loss} = \sum_i P_i (L_{i0} - L_{iw}) \quad (7)$$

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, 設定する仮定を述べる.

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. したがって, 利用者均衡状態が成立している.
5. 機会費用の閾値 τ を 8 時間に設定する²⁰⁾. 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, 片道 8 時間を超えるような場合はトリップを取りやめるため, 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）を評価から切り離すことができるため、平常時の OD を使って分析が可能となる。本来であれば、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が、これについては今後の課題に位置づける。
8. 道路容量の低下も考慮できるが、本研究においては簡単化のため、全面通行止めのみを扱う。

(3) 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。

代替経路確保の水準 n は、Kurauchi et al.²³⁾で提案された指標「非重複経路数」を用いる。この非重複経路について図-4と図-5を用いて説明する。図-4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ため、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。そのため、一般的な方法で数える場合は経路数の多さに意味がないことがわかる。図-5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²³⁾。

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点である。図-5(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-5(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-5(b)右のよう

図-4 経路6パターン（非重複経路は1本）

図-5 従来の方法と非重複経路の違い

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-5(b)右には経路が存在しないことがわかる。一方、Kurauchi et al.²³⁾で示されている方法でリンク重複のない最短の2本経路を求める場合、図-5(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-5(b)と図-5(c)より、非重複経路の考え方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Kurauchi et al.²³⁾で示された方法を用いて、代替経路を評価する。

b) 便益評価手法の構築

災害時に経路が確保される便益を、例えば道路整備プロジェクトを行うために必要な最大の支払意思額と定義すると、整備をしない場合の期待効用と整備した場合の期待効用とがつり合う支払意思額で評価できる。式(8)に整備なし（左辺）と整備あり（右辺）のそれぞれの期待効用を示す。式中の間接効用関数 $V(\cdot)$ は所得 Ω 、価格 m 、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。

$$\sum_i P_{io} V(H_{io}, m_{io}, \Omega_{io}) = \sum_i P_{iw} V(H_{iw}, m_{iw}, \Omega_{iw} - CV) \quad (8)$$

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, CV : 支払意思額。

環境水準 H は、式(9)のように定義した。災害時に拠点となりえる最寄りの市役所や県庁までの非重複経路数 n の対数をとることで評価通減を表現し、途絶日数 κ で重みづけている。

$$H_{iw} = \kappa_i \ln(n_{iw} + 1) + 1 \quad (9)$$

ここで、 n : 市役所・県庁までの非重複経路数, κ : 途絶日数。

式(8)を計算するため、ある地域の代表的個人の消費行動に、効用関数（式(10)）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。

$$U = x_1^\phi x_2^{(1-\phi)} H^\gamma \quad (10)$$

ここで、 x_1 : 交通サービス消費量, x_2 : 合成財消費量, ϕ : 交通サービスの消費割合, γ : 環境水準に関するパラメータ, m_1 : 交通サービス価格, m_2 : 合成財価格。

式(10)の対数を取り、予算制約付き効用最大化問題として式(11)(12)を定式化する。

$$\max V = \ln U = \phi \ln x_1 + (1-\phi) \ln x_2 + \gamma \ln H \quad (11)$$

$$s.t. \quad m_1 x_1 + m_2 x_2 = \Omega \quad (12)$$

ラグランジュ未定乗数法により最適性条件を記述することで需要関数(13)(14)を得る。

$$x_1 = (\phi/m_1) \Omega \quad (13)$$

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

これらの需要関数を式(11)に代入し、式(15)を得る。なお、交通サービス価格 m_1 と消費割合 ϕ は、災害前後・整備有無によらず一定と仮定し、定数項 $C (= \phi(\ln \phi - \ln m_1) + (1-\phi)(\ln(1-\phi) - \ln m_2))$ にまとめている。この仮定は、代替経路確保の効果のみを計測するため、他の値を固定していることと解釈できる。この結果、道路利用による便益を除くことができ、従来計測されている便益との二重計測を避けることができる。

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

式(15)を式(8)に代入し、支払意思額 CV について解くと、次式(16)を得る。

$$CV = \left[1 - 1 / \left\{ \prod_i (H_{iw}/H_{io})^{\beta_i} \right\}^\gamma \right] \Omega \quad (16)$$

式(16)は、所得 Ω が掛け合わされていることで、貨幣単位に変換されており、所得 Ω に比例して大きくなる。

居住地域の特性を加味することで、地域ごとに異なる経路確保の状況を考慮することができるため、それぞれの地域に式(16)を適用する。式(16)は個人1人あたりの最大支払意思額を表しているため、各地域の人口と1人あたりの支払意思額との積和により代替経路確保の便益が算出できる(式(17))。

$$B^{resident} = \sum_r (G_r \times CV_r) \quad (17)$$

ここで、 $B^{resident}$: 地域住民の代替経路確保便益, G_r : 地域 r の人口, CV_r : 地域 r の1人当たりの支払意思額(円)。

式(16)の環境水準に関するパラメータ γ の値の検証については3.にて詳細を述べる。

本研究で提案する代替経路確保便益の評価手法は、次に記す前提の上で成立することに留意する必要がある。

1. 地域住民は孤立可能性に対して、心理的不安を

持っており、自分の地域と災害時に拠点となる場所(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。

3. 道路ネットワーク上に発生する災害 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。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_{1ir} と災害時の交通サービスの消費割合 ϕ_{ir} 、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、政策によって変化しうる非重複経路数 n と道路途絶日数に着目する。

6. CV_r を地域 r の住民1人あたりの支払意思額を表すオプション価格(OP_r)と定義する。道路整備をした場合に、整備なしと同じ効用水準に保つために、いくらの支払額が必要かを計算し、経路が増えたことによる地域住民の孤立に対する心理的不安の軽減を評価する。

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支払意思額 CV_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、本研究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が、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と考える。

9. 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 , 途絶日数 κ で表わされる関数となる。便益を算出する際、財価格にどのような値をおいたとしても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する必要がある。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。
10. 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する。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. 代替経路の存在価値の定量化

(1) パラメータの推定方法

2.(3)で構築した代替経路確保便益の環境水準に関するパラメータ γ (式(10)および式(16)参照) を推定する。式(10)に示したパラメータ γ は、環境水準（経路本数、途絶日数）による不安感が、地域住民の効用を与える影響の大きさを意味する。代替経路が確保されることで、集落の孤立への不安感が軽減されることを想定して、この γ を推定することは、地域住民が認識している代替経路の存在価値を推定することと同じである。本研究では、評価対象の存在価値を推定可能な手法のひとつであるコンジョイント分析を用いた。コンジョイント分析は、アンケート調査によって評価対象の価値を属性単位で推定することが可能である²⁴⁾。

孤立に対する心理的不安を定量化する際に、2.で説明した評価手法の式を使ってモデル式を作成する。まず、式(8)を整備なしの期待効用 (EU_o) と整備ありの期待効用 (EU_w) にそれぞれわけると式(18), (19)となる。

$$EU_o = \sum P_i V(H_{io}, m_{io}, \Omega_o) \quad (18)$$

$$EU_w = \sum P_i V(H_{iw}, m_{iw}, \Omega_w - CV) \quad (19)$$

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 ($i=0$ のとき平常時を表わし, $i \neq 0$ のとき災害時を表わす), $V(\cdot)$: 間接効用関数, H : 環境水準, m : 財・サービスの価格, Ω : 所得, CV : 支払意思額。

式(18), (19)に、式(15)の間接効用関数 $V(\cdot)$ をそれぞれ代入すると、式(20), (21)を得る。

$$EU_o = \sum P_i (\ln \Omega + \gamma \ln H_{io} + C) \quad (20)$$

$$EU_w = \sum P_i \{ \ln(\Omega - CV) + \gamma \ln H_{iw} + C \} \quad (21)$$

定数項 C は、交通サービス価格 m と消費割合 ϕ をまとめている。 EU_o と EU_w の C は同値であり (2.(3)b)), $EU_o = EU_w$ の等式が成立し、キャンセルされる。期待効用 EU_o , EU_w から C を除いた効用、すなわち環境水準のみに関する期待効用をそれぞれ y_o , y_w とし、災害 i の場合の効用を災害発生確率 P_i で重みづけした加重平均の要素 y_{io} , y_{iw} に着目する。さらに、ここでは提示された負担額 AoE (Amount of Expense) に対し、賛成・反対を質問しているため、 CV を AoE と表記し、次の式(22), (23)に変形する。

$$y_{io} = \gamma (P_i \ln H_{io}) + (P_i \ln \Omega) \quad (22)$$

$$y_{iw} = \gamma (P_i \ln H_{iw}) + \{ P_i \ln(\Omega - AoE) \} \quad (23)$$

以上を踏まえ、アンケート調査結果より、ロジットモデルを用いてパラメータ γ の値を推定する。

一般的なロジットモデルにおいては、効用の単位が不定のため、分散パラメータ θ を 1 に設定しパラメータを推定する。説明変数は、災害発生確率 P_i , 環境水準 H_{io} , H_{iw} , 所得 Ω , 年間負担額 AoE から求められる $P_i \ln H_{io}$, $P_i \ln H_{iw}$, $P_i \ln \Omega$, $P_i \ln(\Omega - AoE)$ であり、これらの値を各調査時の設定条件により計算した上で、その条件における被験者の賛否によりパラメータを同定する。なお、本研究においては間接効用関数 $V(\cdot)$ が貨幣単位である。そのため、推定の際には、式(24), (25)のように、第 2 項にもパラメータを設定し、 $\theta=1$ と仮定して α と β の値を求めてから、式(26)のように α を β で除して γ を求める。

$$y_{io} = \alpha (P_i \ln H_{io}) + \beta (P_i \ln \Omega) \quad (24)$$

$$y_{iw} = \alpha (P_i \ln H_{iw}) + \beta \{ P_i \ln(\Omega - AoE) \} \quad (25)$$

$$\gamma = \alpha / \beta \quad (26)$$

ここで、 α : 環境水準のパラメータ, β : 年間所得のパラメータ, o : 整備なしの場合(without), w : 整備ありの場合(with). P_i : 災害 i の発生確率 ($i=0$ のとき平常時を表わし, $i \neq 0$ のとき災害時を表わす), H : 環境水準, Ω : 所得, AoE : 年間負担額。

災害発生確率 P_i と環境水準 H , 負担額 AoE はアンケートの調査票で回答者に提示した内容から設定する。世帯所得 Ω はアンケートで尋ねる。

(2) アンケート調査の概要

アンケート調査の概要を表-3 に示す。アンケートは、岐阜県、新潟県、長野県に居住する 20 歳以上の男女を対象に、Web アンケート調査方式を採用した。

本調査では、孤立予想集落に居住する住民を対象とするため、予備調査にて災害時に孤立危険性のある地域に居住するか否かを質問し、孤立予想集落の

住民を抽出した。そのうえで、孤立予想集落の住民と、それ以外の地域の住民とで比較を行うためにサンプルの割り付け回収を行い、孤立予想集落の住民のサンプル数を全体の6割確保した。表-4にアンケート回答者の基本属性を示しておく。

本調査では、災害発生時の影響（孤立の発生とその途絶日数）と、新規道路整備の効果（孤立が発生しない）、その整備にかかる負担金を示し、賛成か反対かを質問した。評価モデルの中から γ の推定に必要な要素を抽出し、表-5のように属性と水準を設定した。質問項目は、実験計画法L¹⁶の直交表に当てはめて16パターン作成した。なお、各被験者に対して16パターンについて回答してもらうのは負担と考え、それら16の質問を2つのグループにわけ、被験者ひとりあたり8問の設問に回答してもらうこととした。なお、経路本数については、整備が施された場合にはその道路は必ず途絶しないと仮定しており、経路数が1本増加すると仮定している。したがって、環境水準 H を表現する経路数としては、0, 1, 2の3種類が存在する。

なお、本調査においては、離散選択の形式で回答を得ていること、同一個人から複数回の回答を得ているため、それらの回答群には系列相関が生じうることを考慮し、離散選択モデルの1種であり、系列相関をランダムパラメータとして表現できるmixed logitモデルを用いてパラメータ推定を行うことが妥当と判断した。定数項にランダムパラメータを設定することで、個人による嗜好の差を考慮することとなる²⁵⁾。推定に際しては、スイス連邦工科大学ローザンヌ校のMichel Bierlaire教授が中心となって開発しており、無料で利用できるBIOGEME²⁶⁾を使用した。

(3) 推定結果

代替経路確保の便益は、代替経路を必要としている人々、すなわち中山間地域の経路数の少ない地域の住民に発生すると考えられる。そのため、今回は孤立予想集落に居住する住民のデータを利用する。また、今回の調査では、岐阜県、長野県、新潟県の3県で調査を行っており、3県の地域別にパラメータを推定した。推定結果を表-6に示す。表より、年間所得のパラメータである β に関しては、5%有意でないものもあり、地域差に関しては、統計的有意差は確認できなかった。そのため、推定パラメータについて地域による差はないものとして扱う。

被災経験がない場合、回答者が仮想的な状況をイメージできない可能性があるため、被災経験の有無別にパラメータを推定した。推定結果を表-7に示す。

表-3 アンケート概要

対象地域	岐阜県, 新潟県, 長野県
調査方法	Webアンケート調査
実施期間	2013年12月19日～12月20日

表-4 アンケート回答者の基本属性

属性	サンプル数	比率
性別	男性	454 55%
	女性	372 45%
年齢	20代	71 9%
	30代	200 24%
	40代	268 32%
	50代	191 23%
	60才以上	96 12%
職業	公務員	31 4%
	経営者・役員	30 4%
	会社員(事務系)	102 12%
	会社員(技術系)	97 12%
	会社員(その他)	98 12%
	自営業	117 14%
	自由業	16 2%
	専業主婦(主夫)	113 14%
	パート・アルバイト	118 14%
	学生	10 1%
	その他	35 4%
	無職	59 7%
都道府県	新潟県	275 33%
	長野県	259 31%
	岐阜県	292 35%
地域	孤立予想集落	516 62%
	それ以外の地域	310 38%
年間世帯所得	被災経験あり	537(万円/年)
	被災経験なし	485(万円/年)

表-5 属性と水準

属性	災害発生頻度	途絶日数	整備なしの経路数	提示金額	
水準	5年に一度	1日	0本(孤立)	500円	1000円
	100年に一度	1週間	1本	5000円	1万円
				3万円	5万円
				10万円	15万円

表-6 地域別の推定結果

説明変数	係数
尤度比	0.12
α (環境水準)	3.44 **
β_1 (年間所得:新潟県)	133 *
β_2 (年間所得:長野県)	140
β_3 (年間所得:岐阜県)	291 *
分散	1.46 **
β_1 - β_2 の差	0.018
β_1 - β_3 の差	0.021
β_2 - β_3 の差	0.026
γ_1 (新潟県)	0.026
γ_2 (長野県)	0.025
γ_2 (岐阜県)	0.012

** : 1%有意 * : 5%有意

表より全てのパラメータにおいて、5%有意となっている。被災経験のないサンプルから得られた γ_1 と被災経験のあるサンプルから得られた γ_2 の推定値の同一性を検定したところ5%有意となった。被災経験の

有無により支払意思に統計的な有意差が生じることが明らかとなった。被災経験のある人は被災経験のない人と比較し、 γ の値がおよそ3倍の値になっている。

4.のケーススタディにおいては、災害時の状況を具体的にイメージされたと考えられる被災経験ありのサンプルから得られた環境水準に関するパラメータ γ の値 0.0438 を用いて計算を行う。この値を用いることは、評価対象の新規道路整備が影響する地域住民全員が災害時の状況を具体的にイメージし、代替経路の存在価値を少なからず認識していると仮定していることになる。

4. 岐阜県飛騨圏域への適用

(1) ケーススタディの設定

3.で求めたパラメータを用いて 2.で構築した評価手法を岐阜県飛騨圏域の道路ネットワークに適用する。飛騨圏域は岐阜県北部に位置する中山間地域であり、豪雨発生時に土砂災害の危険性の高い場所が数多く存在する。岐阜県の管轄道路のうち、降雨時に土砂災害が発生する恐れのある道路区間について、平成26年1月1日現在で86カ所500.8km²⁷⁾もの事前通行規制区間が指定されている。岐阜県の管轄道路の総延長が4,184.3kmであるため、およそ1割の道路が雨量規制区間に指定されているといえる。また、飛騨圏域の交通の骨格を担う国道41号においても、雨量規制区間が定められており、豪雨による不通が、岐阜県内の道路利用者や飛騨圏域の地域住民に大きな影響を与えている。

ケーススタディでは、豪雨災害を想定し、過去21年間(1991年1月～2011年12月)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。豪雨の定義は時間降水量50mm以上とし、豪雨が発生した

場合は、そのエリアの雨量規制区間に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、それらの地点をボロノイ分割することでそれぞれのアメダスの観測値が代表している地理範囲(以降、ボロノイセルと表記する)を得た。気象庁のWebサイトから取得したアメダスの観測データを用いて、各ボロノイセルの豪雨の有無の判定を行う。表-8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

表-7 被災経験別の推定結果

説明変数	係数
尤度比	0.12
α (環境水準)	3.51 **
β_1 (年間所得:被災経験無し)	263.00 **
β_2 (年間所得:被災経験有り)	80.10 *
分散	1.45 **
β_1 - β_2 の差	0.039 *
γ_1 (被災経験無し)	0.013
γ_2 (被災経験有り)	0.044

** : 1%有意 * : 5%有意

図-6 雨量規制区間

表-8 降雨パターンより作成した豪雨シナリオ

		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		
災害ID	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	0.28571
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0.23810
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0.14286
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0.09524
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0.09524
	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.04762
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.04762
	8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.04762
	9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.04762
	10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.04762
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.04762
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0.04762
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0.04762
	14	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.04762
	15	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0.04762

示しており15種類に分類できた。この過去実現した15パターンを災害シナリオとして設定する。図-6は飛騨圏域のボロノイセルと雨量規制区間を示している。豪雨が発生した場合は、豪雨が発生したボロノイセル内の雨量規制区間を通行不可とする。

図-7に評価対象の道路整備を4通り示す。w1は、濃飛横断自動車道の一部区間として2012年7月に開通した区間（ささゆりトンネル）である。w2はw1に加え、西進する整備中の濃飛横断自動車道と、国道41号下呂市保井戸ー三原区間の雨量規制区間を避けるためのバイパスを整備したケースである。w3は飛騨市宮川の雨量規制区間を避けるためのバイパス、w4は白川村西部から石川方面に至る小松白川連絡道路である。

道路ネットワークは、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。代替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、Kurauchi et al.²³⁾で提案された手法を用いて数え上げる。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。一方で、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）で計算する。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を用いてリンク数17,345、ノード数11,443のネットワークで交通量配分を行う。JICA STRADAにインプットするネットワークがMATLABにインプットするネットワークに比べてリンク数が少ないのは、1つのリンクが両方向の車線を表していることによる。

交通量配分の収束判定の基準は、リンク交通量の誤差を使用する。ここで、図-10は交通量配分の収束判定の基準別のリンク交通量の平均誤差率をと算時間を示したものである。誤差率は、収束条件1%におけるリンク交通量の値を真値とし、その値からの乖離の程度を誤差率として計算した。図-10より、リンク交通量の誤差の大きさと計算時間の関係から、本研究では収束判定の基準として2.5%を使用することとする。

代替経路確保の便益は、図-8に示した評価対象地

図-7 新規道路整備区間

図-8 代替経路確保の便益の対象ネットワーク

図-9 交通損失の軽減便益 対象ネットワーク

図-10 収束条件別の誤差率と計算時間

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。その際に必要となる各種データについて、世帯あたり所得および財の消費割合は、総務省の全国消費実態調査から、環境水準（経路本数、途絶日数）による不安感のパラメータは3.のアンケート調査結果から設

定した。孤立予想集落の世帯数は、地区内の孤立予想集落の居住有無別の詳細なデータが存在しないため、国勢調査の小地域（町丁・字等）別の総世帯を用いて設定した。

図-11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、防災機能の便益として、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。本来であれば従来便益の中には、走行経費減少と交通事故減少が含まれるが、本研究では簡単化のため、従来便益は走行時間短縮便益のみとする。

(2) 評価結果

図-12に全体の便益評価の結果を示す。従来の走行時間短縮便益を青色、今回追加した防災機能の便益を橙色で色分けしている。整備w1では、従来評価の便益より防災機能の便益の方が大きくなっている。w4は防災機能の便益はほとんど存在せず、従来評価の便益で35億円程度存在する。w2は従来評価の便益だけでは20億円程度だが、防災機能の便益を含めることで32億円程度とw4と同程度の便益が生じる。w3は従来の評価便益と防災機能の便益ともに負の値を示した。

w3が従来便益から既に負の値を示しているのは、収束条件の影響とも考えられるが、山間部の疎なネットワークに位置し（図-7）、交通容量の小さいリンク（片側1車線）であったためとも考えられる。整備区間と同等の容量の道路が平行して供用されているが、w3の延長の方が短い。交通混雑が発生しなければ、所要時間短縮が見込まれる。しかし、交通混雑が発生した場合、道路整備しなかった場合に比べて所要時間が長くなる場合があり得る（道路整備により、かえって所要時間が長くなることをBraessのパラドックス²⁸⁾という）。

w1は山で隔てられた地域を結ぶ経路として利用できる区間であり、所要時間短縮効果が得られる。w2は、w1に比べてより長い区間が利用可能であるためw1よりも所要時間短縮効果が高い。

w3は、1本の経路の途中で枝分かれして、また1本の経路に戻るため、ネットワーク全体で新しい経路が生まれるような整備でないため、短縮効果がほとんどないと考えられる。

w4は、白川村から福井県に至る経路に利用可能である。平行する区間に比べて延長が短く所要時間短縮が生じたと考えられる。雨量規制区間が周囲にならないため、豪雨発生時に経路を増やす働きをせず、防災機能の便益が発生しないと考えられる。

図-13は、防災機能便益の内訳を示している。黄色が交通損失の軽減便益を示し、赤色が経路確保便益を示している。経路確保便益を見ると、w1, w2では比較的便益が大きい。w3では経路確保の便益がわずかに確認できるが、w4では0である。交通損失の軽減便益は、w1, w2では大きいですが、w4では微小であり、w3では負の値となっている。従来便益は大きいものの防災機能の便益が発生しない道路整備や、従

図-11 評価の全体像

図-12 便益評価結果

図-13 防災機能の便益の内訳

図-14 w1の場合の非重複経路数(地域20)

表-9 代替経路確保の便益(百万円/年)

		地域No.																												合計
整備案	w1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
	w2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	165
	w3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	w4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

来便益は大きくないものの防災機能の便益が大きい道路整備が存在することが確認でき、防災機能の便益を評価する意義が確認できる。

次に、表-9 は、整備案ごとの便益を地域別に示している。図-14～図-17 は、整備の有無により変化する非重複経路数を示している。図-14 より、地域 20 は w1 の整備により、災害シナリオ 1, 12 以外において経路数が増加している。同様に、図-15 より地域 20 では、w2 の整備により、すべての災害シナリオにおいて経路が増加している。なお災害シナリオ 1 では、整備なしにおいて非重複経路が 1 本しかない状況が、整備することで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。また、図-16 より地域 18, 22 は、災害シナリオ 2, 12 において経路が増加している。図-17 より地域 15 では w3 の整備により、災害シナリオ 11 のときのみ経路が増加している。このように、防災機能の便益が高い w2 のケースにおいては、特に地域 20（門原地区）における経路数の増加が顕著であり、それが便益につながっていることが確認できる。さらに、効果が大きい整備 w1, w2 の詳細を見る。図-18、図-19 は整備 w1, w2 と雨量規制区間との位置関係を示している。地域 20（門原地区）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。たとえば、災害シナリオ 1 では、道路整備がない場合には孤立してしまうが、w1 あるいは w2 の整備により接続性が確保される。また、災害シナリオ 12 のポロノイセル 14 と 15 が同時に被災するケースでは、w1 の整備では接続性が失われるが、w2 であれば 1 本の経路が確保されることが確認できる。

図-20 は、整備 w1, w2, w3, w4 について、交通損失軽減便益の期待値を災害シナリオごとに示している。整備 w1, w2 における災害シナリオ 2, 12 に対する整備効果が特に大きいことがわかる。他のシナリオについても軽減便益は存在するが微小であるため、整備効果がほとんどなかった。w3, w4 は交通損失の軽減便益がほとんどない。w3 は雨量規制区間をさせるバイパスであるが、災害シナリオ 11 のみにしか有効でないため、効果が低い。w4 は、雨量規制区間を回避するためのバイパスでないため、今回の災害想定では防災機能が発揮されておらず、評価することができない。

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

図-15 w2 の場合の非重複経路数 (地域 20)

図-16 w2 の場合の非重複経路数 (地域 18, 22)

図-17 w3 の場合の非重複経路数 (地域 15)

図-18 w1 と雨量規制区間の位置関係

図-19 w2 と雨量規制区間の位置関係

図-20 交通損失の軽減便益の期待値

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。これらの便益は、従来評価の便益とは重複することなく加算可能なものである。そして、Webアンケート調査によ

り、代替経路確保便益の算出に必要な地域住民の効用関数のパラメータを推定した。パラメータの推定結果より、被災経験の有無や孤立危険性のある集落に居住しているかで災害時の環境水準（経路本数、途絶日数）による不安感に差異があることを確認できた。さらに、岐阜県飛騨圏域で豪雨災害を対象に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。本研究で構築した手法で計算した場合に、濃飛横断自動車道（w1, w2）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。

最後に、今後の課題をとりまとめる。まず、交通損失の算定においては、利用者均衡配分を用いたが、利用者均衡配分は、ネットワーク条件によっては、Braessのパラドックスが指摘されている。Braessのパラドックスについては、現実の世界でも生じているという指摘がある一方で、確定的利用者均衡配分において生じる現象であることから、そこに内在している仮定の影響ともいわれている。確率的利用者均衡配分など他の手法を適用した際の結果と比較するなどを行い、安定した交通損失の計算方法を構築する必要がある。また、機会損失の計算方法についても検討の余地がある。本研究では、24時間の活動を想定し、8時間を越える交通は移動しない、という簡単な仮定を用いたが、その他所要時間の定数倍を用いたり、あるいは何らかの方法で需要関数を求めることで、Nicholson and Du¹⁵⁾が示したような需要変動型利用者均衡配分を適用したりすることも考えられるだろう。その他、環境水準の関数式の形状や、道路本数以外の環境が不変であることなど本研究で設定した仮定の妥当性についてもさらなる検討が必要であろう。さらに、本研究ではアメダスのデータを活用し通行規制確率を設定したが、他のデータの活用や、あるいは実際の交通規制実績を用いることでより詳細な確率を推定することが可能となる。さらに、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。地震災害のように発生頻度が低く不確実性が高い災害の場合に、様々なシナリオの発生確率をどのように設定するかについて、今後検討を進める必要がある。

さらに、代替経路確保の便益を算定する際に必要となる世帯数について、効用関数のパラメータの意味を踏まえると孤立予想集落の居住有無を区別して

用いる必要があると考えられるが、データ不足のため、孤立予想集落の居住有無によらず地区内の総世帯数で計算した。そのため、過大評価となっている可能性がある。より詳細なデータがあれば、正確な推定が可能となる。今後より詳細かつ正確な便益算定を進めるとともに、各事業の費用積算を行い、費用便益分析を実施することで災害に強い道路ネットワーク構築に役立てていくことが重要と考える。

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）の一部として実施された。また、本研究を遂行するにあたり、法政大学准教授北浦康嗣氏より、数々の有益なコメントをいただいた。ここに記して謝意を表す。なお、本研究の内容は、第一著者の勤務先とは無関係（岐阜大学研究グループの研究活動と第一著者の個人活動）であり、勤務先の意見や立場を代表していない。本稿の見解と含まれる誤りについては筆者ら研究グループに責任の所在がある。

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），2011.
- 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），2013.4.
- 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），2013.4.
- 5) 片倉正彦：地震と交通，国際交通安全学会誌，Vol. 8, No. 4, pp. 23-29, 1982.
- 6) 若林拓史，亀田弘行：ロマ・プリエタ地震後のサンフランシスコ沿岸地域の道路網運用の効果分析と災害時の道路網計画，都市計画学会論文集，Vol. 30, pp. 91-96, 1995.
- 7) 中川大，小林寛：大都市における震災時の交通対応策に関する研究 阪神淡路大震災の教訓と現状の課題，土木学会論文集 D, Vol. 62, No. 1, pp. 187-206, 2006.
- 8) 藤田素弘，三田村純：東海集中豪雨下における自動車帰宅交通状況と走行経路解析，土木学会論文集，No. 751/IV-62, pp. 127-137, 2004.
- 9) 朝倉康夫，柏谷増男，高木一浩，藤原健一郎：災害による道路通行規制時の交通選択行動に関する実証的分析，土木計画学研究・論文集，Vol. 14, pp. 371-380, 1997.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 国土交通省公共事業評価手法研究委員会分科会：不確

- 実性に係る便益の評価について, 第2回公共事業評価手法研究委員会分科会, 資料5, 2009.
- 13) 国土交通省: 仮想的市場評価法 (CVM) 適用の指針, 2009.
 - 14) 長江剛志, 藤原友, 朝倉康夫: GISと需要変動利用者均衡配分を用いた道路ネットワーク耐震化の便益評価, 土木計画学研究・論文集, Vol. 24, pp. 233-242, 2007.
 - 15) Nicholson, A. and Du, Z. P.: Degradable transportation systems: Sensitivity and reliability analysis, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 3, pp. 225-237, 1997.
 - 16) 岡田憲夫, 若林拓史, 多々納裕一: レビュー研究 社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析的アプローチ, 土木学会論文集, No. 464/IV-19, pp. 33-42, 1993.
 - 17) 中山晶一朗: ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察, 土木学会論文集D, Vol. 67, No. 2, pp. 147-166, 2011.
 - 18) 倉内文孝, 宇野伸宏, 嶋本寛, 山崎浩気: 交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, 234, 2007.
 - 19) 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.
 - 20) 土木学会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—, 地震工学委員会耐震基準小委員会, 土木学会, 2008.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) 伊多波良雄: 公共政策のための政策評価手法, 中央経済社, 2009.
 - 25) Michiel Bierlaire, “Estimation of discrete choice models with BIOGEME 1.8”, <http://biogeme.epfl.ch/archives/v18/tutorialv18.pdf>, 2016/10/07 アクセス.
 - 26) BIOGEME Web サイト, <http://biogeme.epfl.ch/index.php>, 2014/4/23 アクセス.
 - 27) 岐阜県 Web サイト, <http://www.pref.gifu.lg.jp/kendo/michi-kawa-sabo/doroiiji/doro-no-FAQ/>, 2014/7/29 アクセス.
 - 28) 土木学会交通ネットワーク出版小委員会: 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 土木学会, pp. 47-48, 1998.

(2016. 8. 23 受付)

BENEFIT EVALUATION OF DISASTER REDUCTION CAPABILITY OF ROAD NETWORK

Tsuyoshi HARADA, Tsuyoshi ONO, Fumitaka KURAUCHI and Akiyoshi TAKAGI

In response with East Japan Great Earthquake, the Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism has announced the evaluation method of the function of road in emergent situation. In the announced 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 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. We found that there are effective roads and low effective roads under disaster.