

道路ネットワーク評価のための孤立危険性軽減便益の定量化に関する研究

小野 剛史¹・倉内 文孝²・高木 朗義³・原田 剛志⁴

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: t3121008@edu.gifu-u.ac.jp

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

⁴正会員 エム・アール・アイ リサーチアソシエーツ株式会社

災害発生時において、道路は重要な役割を担うため、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、現行の道路整備評価手法は、平常時の便益を評価しているにすぎず、災害時の道路の機能について評価できているとはいえない。このような背景のもと、本研究では、孤立に対する不安感を定量化することで、先行研究である道路整備による災害に対する耐災性向上便益の評価手法の確立をめざす。孤立の不安感を定量化するにあたって、様々な災害シナリオの元、道路整備に対する年間負担額を質問し、その賛否に関する回答を収集した。得られたデータを活用し、ロジットモデルを用いて推定を行うことで、孤立に対する不安感の大きさのパラメータを推定することができた。

Key Words : *Isolated risk , Roads benefit evaluation, Conjoint analysis*

1. はじめに

1.1 研究背景

災害発生時において、道路は救命救急活動路や物資輸送路として利用され、重要な役割を持っている。しかし、2004年に発生した新潟県中越地震や、2008年に発生した岩手・宮城南部地震では、中山間部において道路が途絶することで孤立集落が発生し、大きな問題となった。平成21年の「全国における孤立集落発生の可能性に関する状況調査」¹⁾によれば、全国に17,451の集落が孤立危険にさらされている。また、孤立集落の問題だけでなく、重傷者を搬送中する際に、道路途絶により大幅な迂回を強いられた場合、命の危険にかかわる深刻な問題が生じる可能性がある。このように、道路は重要であり、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

が必要である。一般的に道路の整備効果を評価する際には、「道路整備評価マニュアル」²⁾に準じて費用便益分析を行う。道路整備評価マニュアルでは、平常時の便益について走行時間短縮・走行経費減少・交通事故減少の主に3つの便益について評価しているが、災害時の道路機能については対象としていない。一方で、東日本大震災発生後にとりまとめられた、「道路の防災機能の評価手法(暫定案)」³⁾では、道路の必要性・有効性・効率性をもって災害時の道路機能の評価しているが、この中では道路整備により孤立の恐れが回避される道路は費用便益比にかかわらず整備を行う形となっており、孤立の危険性が緩和される効果について貨幣単位で計測されているわけではない。しかしながら、限られた予算の中で効率的に道路整備を行うためには、災害時の道路機能を便益算定し、貨幣単位で示すことで他の便益と

総合的に評価することが必要である。

1.2 本研究の位置づけと目的

先行研究において、原田ら³⁾は、「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）」⁴⁾の評価方法を考慮し、「期待被害額の軽減」と「不安感の軽減」の二つの観点から災害に対する耐災性向上便益について、貨幣単位で評価する手法を提案した。「期待被害額の軽減」は交通損失の軽減として考え、「不安感の軽減」は孤立に対する心理的不安の軽減に着目し、代替経路を確保することで不安感の軽減を評価した。この原田らの提案した災害時の道路機能確保便益は、図1に示すように従来の便益評価に合算可能な防災機能の便益である。

しかし、この研究では便益評価方法論を提案するにとどまっており、心理不安の軽減に関しては孤立に対する不安感のパラメータの評価が課題として残されている。本研究の目的は、原田らの研究成果に則り、集落の孤立に対する不安感を定量化することで、孤立に対する心理不安の軽減便益の評価手法の確立することである。また、アンケート調査の質問方法の信頼性を鑑み、原田の提案した手法を一部改良する。

2. 代替経路確保便益定量化手法の検討

2.1 便益評価手法

本研究では、集落の孤立に対する不安感を評価したい。心理的不安は市場で取引される財でないため、仮想的な市場を作成し、アンケート調査を行うことで不安感の定量化を行う。

原田ら³⁾は、災害時に経路が確保される便益を、等価的偏差 EV 、すなわち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評価することを提案している。それは、 CV が符号保存性をのみを有しているのに対し、 EV は、符号保存性と順序保存性を有しているからである。一方で、NOAAガイドライン⁶⁾によると、アンケート調査により受取補償額あるいは支払意思額を定量化する場合、受取補償額で質問する過大

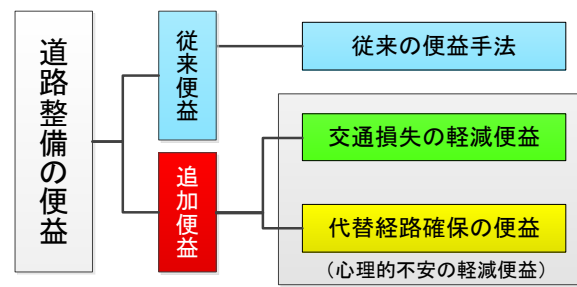


図1 道路整備評価の全体像

に評価される懸念があり、支払意思額を用いる方が適切と記されている。そのため、原田らの提案した EV による定量化手法を CV によるものに改良する。

2.2 代替経路確保の便益評価手法の改良

災害時に経路が確保される便益は、プロジェクトを行うために必要な最大の支払額であり、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釣り合う支払額で評価される。式(1)にそれぞれ対策前(左辺)と対策後(右辺)の間接効用関数を示す。 $V(\cdot)$ 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。

$$\sum_i P_{io} V(H_{io}, m_{io}, \Omega_{io}) = \sum_i P_{iw} V(H_{iw}, m_{iw}, \Omega_{iw} - CV) \quad (1)$$

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(2)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 で重みづける。

$$H_{iw} = \kappa_i \ln(n_{iw} + 1) + 1 \quad (2)$$

ここで、 n : 市役所・県庁までの非重複経路数、 κ : 途絶日数。

式(1)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(3))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。

$$U = x_1^\phi x_2^{(1-\phi)} H^\gamma \quad (3)$$

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 ：環境水準に対する重み、 m_1 ：交通サービス価格、 m_2 ：合成財価格。

式(3)の対数を取り、予算制約付き効用最大化問題として式(4)を定式化する。

$$\max V = \ln U = \phi \ln x_1 + (1-\phi) \ln x_2 + \gamma \ln H \quad (4)$$

$$s.t. \quad m_1 x_1 + m_2 x_2 = \Omega \quad (5)$$

$$x_1 = (\phi/m_1) \Omega \quad (6)$$

$$x_2 = \{(1-\phi)/m_2\} \Omega \quad (7)$$

さらに、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(8)を得る。

$$V = \ln \Omega + \gamma \ln H + C \quad (8)$$

なお、交通サービス価格 m_1 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、純粋に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。

式(8)を式(1)に代入し CV について解くと、次式(9)を得る。式(1)の CV は以下の式(9)のように求めることができる。

$$CV = \left[1 - 1 / \left\{ \prod_i (H_{iw} / H_{i0})^{p_i} \right\}^\gamma \right] \Omega \quad (9)$$

式(9)は、所得 Ω が掛け合わされていることで、金銭単位に変換されている。また、式(9)より、 CV は所得 Ω に比例して大きくなる。

さらに、式(9)はある地域の個人あたりの支払意思額である。そのため、地域ごとで経路確保の状況は異なるため、それぞれの地域に式(9)を適用する。代替経路確保の便益は、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算出できる。

$$B_{resident} = \sum_r (G_r \times CV_r) \quad (10)$$

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人あたりの支払意思額(円)。

以上のように、代替経路確保便益評価のためのモデルの改良を行った。さらに、式(9)のパラメータ γ の値をアンケート調査から推定する。

3. アンケート調査

3.1 調査手法

本研究では、災害時の孤立に対する心理的不安感を計測するため、道路整備を行うことに関して住民がどれほど必要と感じているかを評価の対象とする。そのためには、実際に市場で取引されない公共財について仮想的な市場を作成し、対象の価値を直接的に尋ねる手法である、表明選好法が適していると考えられる。

表明選好法は、大きく分けて *CVM* (仮想評価法) とコンジョイント分析に分けることができる。*CVM* とコンジョイント分析を比較すると、コンジョイント分析は、評価対象の価値を属性単位で評価可能であり、かつ属性別の評価にあたっては、個別に尋ねなくてもアンケート調査結果から間接的に推定が可能である。これに対し、*CVM* で属性単位の評価を行うと、属性に対して個別に支払意思額を尋ねる必要があり、各属性の評価値に対する二重計測の可能性がある。また、属性間の評価値の整合性を図ることも難しい⁷⁾。

上記のように、コンジョイント分析の方が優れている点が多い。さらに、本研究では住民が孤立に対して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道路の本数といった要因も評価したい。そのため、複数の評価が可能なコンジョイント分析を採用することとした。

3.2 調査シナリオ

アンケート調査の概要を表1に示す。対象者は、岐阜県、新潟県、長野県に居住する20歳以上の方に対して行う。Webアンケート調査方式を採用し、予備調査で回答者が災害時に孤立危険性のある地域に居住するかどうかを聞くことで、孤立予想集落に居住する住民を重点的に抽出した。そのうえで、孤立予想集落に居住している人と、それ以外の地域のひとでサンプルの割り付け回収を行い、孤立予想集落に居住する人のサンプル数を全体の6割を確保した。

本調査は、災害発生時に失われる道路の接続性と道路整備にかかる負担金を示し、その道路整備の政策が賛成か反対かを聞くことで集落の孤立に対する心理的不安の定量化を行うことを目的とする。本調査におけるシナリオは、評価モデルの中から γ の推定に必要なものを抽出し、表2のように設定した。災害発生確率、途絶日数、整備を行わない場合の災害発生時の残存経路数を2水準、負担金を8水準とし、実験計画法 L16 の直交表に当てはめて 16 パターンの質問項目を作成した。

表1 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	
有効サンプル	孤立予想集落	516サンプル
	それ以外の地域	310サンプル
	合計	826サンプル

表2 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	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

4. パラメータの推定

4.1 推定方法

孤立に対する不安感を定量化する際に、2章で説明した評価手法の式を使ってモデル式を作る。まず、式(1)を政策前の期待効用 (EU_{i0}) と政策後の期待効用 (EU_{iw}) とにそれぞれ分けると式(11), (12)となる。

$$EU_{i0} = P_i V(H_{i0}, m_{i0}, \Omega_{i0}) \quad (11)$$

$$EU_{iw} = P_i V(H_{iw}, m_{iw}, \Omega_{iw} - CV) \quad (12)$$

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 (道路整備の価値)。

式(11), (12)に、式(8)に述べられている間接効用関数 $V(\cdot)$ をそれぞれ代入すると、式(13), (14)を得る。

$$EU_{i0} = P_i (\ln \Omega + \gamma \ln H_{i0} + C) \quad (13)$$

$$EU_{iw} = P_i \{ \ln(\Omega - CV) + \gamma \ln H_{iw} + C \} \quad (14)$$

また、 C は、交通サービス価格 m と消費割合 ϕ を示している。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ているため、 EU_{i0} と EU_{iw} の C は同値であるため無視できる。さらに、 EU_{i0} と EU_{iw} とが同一となるような値が CV であるが、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。よって、次の式(15), (16)のように変形できる。

$$EU_{i0} = \gamma(P_i \ln H_{i0}) + (P_i \ln \Omega) \quad (15)$$

$$EU_{iw} = \gamma(P_i \ln H_{iw}) + \{P_i \ln(\Omega - AoE)\} \quad (16)$$

以上を踏まえ、アンケート調査結果を使い、ロジ

ットモデルを用いてパラメータ γ の値を推定する。

アンケート調査は、ある1つのシナリオに対して負担金が示され、負担金を払って道路整備の政策を行いたいと回答したのであれば整備をする際の期待効用の方が高く、そのまま良いのなら整備しない方の期待効用が高い、と解釈できる。また、各効用のランダム項が同一で独立なガンベル分布に従うと仮定すると、ある設定された条件に対して賛成する確率は、以下の通り記述できる。

$$\text{Prob(Yes)} = \frac{\exp(\theta EU_{iw})}{\exp(\theta EU_{i0}) + \exp(\theta EU_{iw})} \quad (17)$$

ここで、 Prob(Yes) : 政策を行うことに賛成する確率, θ : 分散パラメータ, EU_{i0} : 政策前の期待効用, EU_{iw} : 政策後の期待効用。

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。しかし、本研究においては間接効用関数 $V(\cdot)$ が金銭単位である。そのため、推定の際には、式(18), (19)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(5.10)のように α を β で除して γ を求める。

$$EU_{i0} = \alpha(P_i \ln H_{i0}) + \beta(P_i \ln \Omega) \quad (18)$$

$$EU_{iw} = \alpha(P_i \ln H_{iw}) + \beta\{P_i \ln(\Omega - AoE)\} \quad (19)$$

$$\gamma = \alpha / \beta \quad (20)$$

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)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), H : 環境水準, Ω : 所得, AoE : 年間負担額。

説明変数については、災害発生確率 P_i と環境水準 H_i 、負担額 AoE はアンケートの調査票から設定する。アンケート調査により世帯所得 Ω を聞くことで、環境水準を表す説明変数の項 ($P_i \ln H_{i0}$, $P_i \ln H_{iw}$) と年間所得を表す説明変数の項 ($P_i \ln \Omega$, $P_i \ln(\Omega - AoE)$) を作成する。

なお、Web アンケート調査においては、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。ここでは個人差を考慮するための平均ゼロのランダムパラメータを導入している。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 BIOGEME⁸⁾を使用した。

4.2 推定結果

表 3 は、孤立予想集落に居住しているかどうかによって年間所得に関するパラメータを個別に設定しモデルを推定した結果である。まず、パネルデータに起因する系列相関を考慮するために導入した分散が有意であることより、パネルデータバイアスの考慮が必要であることが確認された。また、全てのパラメータが統計学的に有意となっている。さらに、 $\beta_1 = \beta_2$ の帰無仮説によるパラメータ推定値の差の検定も併せて行ったところ、 t 検定量が -3.07 となり、有意水準 5% で統計的に有意となった。これより、 γ の値については、孤立予想集落の γ の値はそれ以外の地域の γ の値のおよそ 3 倍の値になることという結果となった。以上のことから、孤立予想集落の住民にとっては、その他の地域より約 3 倍大きく γ を評価しているといえる。

次に、表 4、5、6 は、調査時にコントロール要因として設定した、途絶日数、残存経路本数、災害発生確率に関して、パラメータを分けて計算した結果である。途絶日数、残存経路本数ともに差がないという結果になり、この関数式を用いて問題ないという結果になった。発生確率は、効用関数に乗じているためパラメータは類似した値にはならず、もし想定している関数式に齟齬がなければ、その比は発生確率の比 20 に近い値をとるはずである。表 6 より、 γ の比が 17.98 で、20 に近いため発生確率に関して

表 3 居住地域別の推定結果

説明変数	係数
尤度比	0.122
α (環境水準)	3.57 **
β_1 (年間所得：孤立集落)	168 **
β_2 (年間所得：その他の地域)	483 **
分散	1.37 **
$\beta_1 - \beta_2$ の差	0.0416 **
γ_1 (孤立集落)	0.02125
γ_2 (その他の地域)	0.00739

表 4 途絶日数別の推定結果

説明変数	係数
尤度比	0.115
α (環境水準)	3.32 **
β_1 (年間所得：1日)	178 *
β_2 (年間所得：7日)	153 *
$\beta_1 - \beta_2$ の差	0.11
γ_1 (孤立集落)	0.01865
γ_2 (その他の地域)	0.02170

表 5 残存経路本数別の推定結果

説明変数	係数
尤度比	0.115
α (環境水準)	3.42 **
β_1 (年間所得：0本)	183 *
β_2 (年間所得：1本)	154 *
$\beta_1 - \beta_2$ の差	0.323
γ_1 (0本)	0.01869
γ_2 (1本)	0.02221

表 6 災害発生確率別の推定結果

説明変数	係数
尤度比	0.144
α (環境水準)	2.94 **
β_1 (年間所得：100年に一度)	3130 **
β_2 (年間所得：5年に一度)	174 **
$\beta_1 - \beta_2$ の差	0.801 **
γ_1 (100年に一度)	0.00094
γ_2 (5年に一度)	0.01690

** : 1%有意 * : 5%有意

も想定した関数式を用いることに問題はないことが確認できた。

以上より、推定値は安定しており、提案した評価関数式は妥当であることが確認できた。一定の信頼性をもって γ の値を推定することができたといえる。

5. おわりに

本研究では、先行研究で提案されていた災害時を考慮した便益評価手法を確立するため、代替経路確保便益の孤立に対する不安感を表現するパラメータの推定を行った。まず、アンケート調査に適した質問形態とするために、等価的偏差による便益評価となるようにモデルを改良するとともに、孤立に対する心理的不安を定量化するための Web アンケート調査を行い、コンジョイント分析により孤立に対する不安感の定量化を行った。推定結果は、パネルデータバイアスを考慮することの意義、孤立予想集落に住む方とそうでない方で推定結果が3倍程度異なること、想定した評価関数が妥当であることなどの知見を得た。このことより孤立に対する不安感の大きさを正しく評価できているといえる。一方で、今回推定したパラメータの値が、先行研究の原田らが想定していた値よりもかなり小さな値となってしまった。当然ながら、本来この便益項が小さい可能性も否めないが、その一方で推定方法やデータの切り分け方法などについて、さらなる検討が必要と考えられる。

最後に、今後の課題についてまとめる。まずは、得られた値を用いた便益の試算である。本研究では、パラメータの推定までしか行うことができなかったが、この値により推定される孤立危険性に関する便

益がどの程度なのか、今後ケーススタディを行って検討をする必要があるといえる。また、個人属性などの考慮もあげられる。今回は、孤立予想集落か否かでしかデータ分類ができなかった。今回のアンケート調査はインターネット方式を採用したため、回収した年齢層が実際に住んでいる人の年齢層と差があると考えられる。そのため、年齢などの基本属性の考慮を行い、正確な便益算定を試みる必要がある。

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。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府政策統括官(防災担当)：中山間地域の集落散在地域における孤立集落発生の可能性に関する状況フォローアップ調査 調査結果，平成22年1月
- 2) 国土交通省道路局都市・地域整備局：費用便益分析マニュアル，平成20年
- 3) 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
- 4) 原田剛志，倉内文孝，高木朗義：“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”，土木計画学研究・講演集，Vol.47，CD-ROM，2013
- 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)，平成21年6月
- 6) 栗山浩一，公共事業と環境の価値—CVMガイドブック—，築地書館，1997
- 7) 伊多波良雄(編)：公共政策のための政策評価手法，中央経済社(2009)
- 8) BIOGEME Web サイト：<http://biogeme.epfl.ch/index.php>，2014/4/23 アクセス。

QUANTIFICATION OF ISOLATION RISK IMPROVEMENT BENEFIT FOR ROAD NETWORK EVALUATION

Tsuyoshi ONO, Fumitaka KURAUCHI, Akiyoshi TAKAGI and Tsuyoshi HARADA

It is important to construct a road network which may function by the certain level, even a large disaster occurs. Traditional benefit evaluation method, however, do not consider the function of the road under emergent situation. This paper attempts to establish a novel benefit evaluation method of disaster prevention capability of road network consistent with the conventional benefit evaluation method, by quantifying the anxiety against isolation. We carried out a conjoint analysis to estimate the parameter for isolation risk, using data obtained by web-based questionnaire survey.