

不確実性下の選択を考慮した脆弱性改善の便益評価に関する考察

首都大学東京 朝日ちさと*
佛教大学 萩原清子

1. はじめに

社会資本整備のストック効果のひとつは、災害時や緊急時における安全や普段の生活における安心という便益をもたらすことにある。現在、2011年の東日本大震災における津波被害、インフラの老朽化による事故や供給障害など、それらの安全・安心は懸念される状況にある。そのような背景のもと「防災・減災等に資する国土強靱化基本法案」が2013年5月国会提出されるなど、既存ストックの有効活用を謳いつつも新たな整備や維持更新への投資が見込まれる。一方、2008年以降、世界経済危機、東日本大震災の復興対策費、2012年の政権交代後の経済政策により大規模な財政政策が発動され続けており、財政健全化へのハードルがますます高くなっていることが指摘されている。

社会資本への投資を行う際には、事業の事前評価における費用便益分析により効率性が判断されるが、安全の便益の評価手法には課題が多い。環境、健康、災害などに対する安全性改善の便益は、一般的に①非市場価値である、②リスクや不確実性を伴う、という2つの特徴を持つ。①の特徴により、便益は被害への回避行動や仮想市場での回答によって測定されるが、その顕示選好・表明選好には②の特徴であるリスクや不確実性に対する認知や選択の特性が反映される。朝日・萩原(2013)では、個人のリスクに対する事前の選択が客観的リスクと異なることによる厚生の低下分を脆弱性評価モデルとして提示するとともに、不確実性や曖昧性下における個人の意思決定過程を厚生評価に反映させる必要性が課題とされた。

本稿では、不確実性やリスク下の意思決定を反映する、より一般化された脆弱性評価モデルを提示するために、社会資本整備におけるリスクの便益評価理論の課題を整理することを目的とする。社会資本整備に関する脆弱性とその評価の概念を整理し、便益評価の理論的基礎として、プロスペクト理論の適用の可能性を検討する。

2. 社会資本によるサービスの脆弱性の概念と評価

2.1 インフラストラクチャーに関する脆弱性

脆弱性の概念は貧困、災害マネジメント、食糧安全保障などの問題に対して、開発経済学、社会学、環境科学、防災などの分野で用いられているが、その定義や特徴は分野によって異なる。Alwang, et al.[1](2001)は、さまざまな分野の脆弱性概念に共通する要因を3点に整理している。すなわち、第一に、リスクあるいはリスクを伴う事象であり、第二に、リスクをマネジメントするための手段、あるいはリスクへの対応能力、第三に、厚生の損失でとらえられる状態の結果、である。朝日[2](2010)のレビューによれば、「家計が直面するリスクに対して、家計自身のリスクマネジメント手段を考慮に入れながら、外生的に定められた絶対的水準と比較した厚生損失を、現時点における将来の状態について評価したもの」が脆弱性となる。

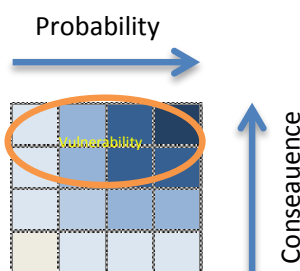
インフラ¹の分野では、Murray & Grubestic[3] (2007) が、Critical infrastructure (重要な、あるいは緊急時に必要なインフラ) が災害、事故、意図的な攻撃に曝されている中でサービスの供給を維持するために必要な特性として、信頼性 (Reliability) と脆弱性 (Vulnerability) の概念を挙げている。すなわち、信頼性と

¹本稿で想定する社会資本は「日本の社会資本2012」(内閣府政策統括官)で推計の対象とされるものとし、概ねインフラストラクチャー(インフラ)の用語を社会資本と同義で用いる。

は「重要なインフラシステムを構成するある要素が正常に機能する確率」であり、他方の脆弱性とは「インフラシステムの構成要素が機能を維持する能力に影響する脅威やハザードに対する感受性」である。朝日[2](2010)では、リスクマネジメントの概念により信頼性と脆弱性を検討すると、脆弱性は信頼性を包摂する概念であると整理している。

さらに、Taylor and D'Este[4] (2007) は、交通ネットワークのインフラを対象として、リスク・信頼性と脆弱性の相違について検討している。一般に、リスクマネジメントのために注目される要素は 2 つである。すなわち、負のインパクトをもたらす事象が生じる確率と、その事象による負のインパクト（被害）の深刻さ（被害規模）である。図 1 は、この 2 要素によるリスクの大きさとマネジメントとの関係を示すマトリックスである。図の右ほど負のインパクトをもたらす事象の生起確率が大きく、上に行くほど被害規模が大きくなる。図の色は大きく 3 段階に分かれているが、リスクマネジメントでは一般的に、右上の濃い部分では禁止や代替といった政策・規制が採用され、中間の色の部分ではリスク低減策が、薄い色の部分は許容可能なリスクとしてリスク対策の必要性は低いと分類される。これに対し、Taylor and D'Este[4] (2007) は、交通などのネットワークの特性を持つインフラの場合、ネットワークが途絶した場合の地域や社会経済に与える影響は、確率よりも被害規模に大きく依存すると述べている。たとえば、A 地点と B 地点を直接結ぶリンクが洪水等により途絶したとしても、他の迂回リンクがつながっていれば A から B に到達することは可能であり、ネットワークとしての信頼性はそれほど損なわれないと評価される。対して脆弱性は、リンクが全体として機能する確率のみではなく迂回による損失の大きさを含めて評価されるため、脆弱性が高いと評価されることになる。リスクマネジメントの図 1 では、確率と被害規模の双方が大きい右上が禁止やリスク低減の政策の対象となるのに対し、脆弱性では被害規模が大きければ、確率が小さくても脆弱性が高いと評価されることになる。

このように、インフラに関する脆弱性は、従来、供給者が供給リスクとして分析・対策してきた際の概念を、より需要者（家計）側の視点から、すなわち家計が経験する不効用（被害）、家計自身の対策能力、確保すべきサービス水準などを明示的に扱う概念となっている。



出典：Taylor and D'Este[4] (2007) をもとに著者作成

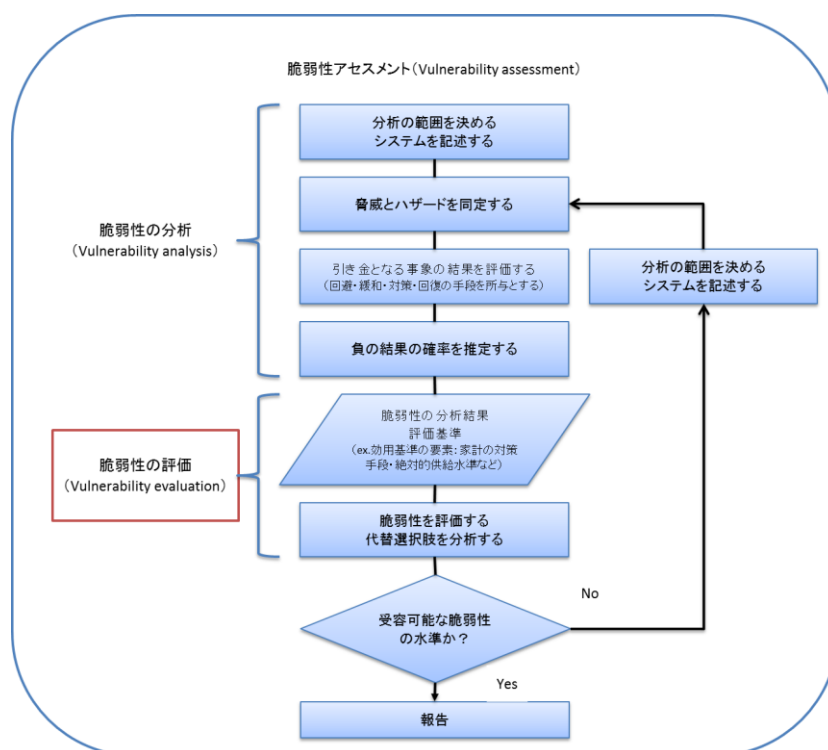
図 1 リスク概念・脆弱性概念とマネジメントのマトリックス

2.2 脆弱性アセスメントの枠組み

インフラに関する脆弱性を評価する枠組みは、Holmgren[5] (2007) に基づき、図 2 のように整理される。この枠組みは 2.1 項のリスクマネジメントにおける評価の枠組みに準じており、シナリオの分析と、ある意思決定基準に照らした評価とにより全体的なアセスメントが形成される。すなわち、政策を所与として脆弱性をもたらすシナリオを分析する「脆弱性分析 (Vulnerability analysis)」、定量化された脆弱性を以下に述べる特定の基準で評価する「脆弱性評価 (Vulnerability evaluation)」、評価に基づいて、脆弱性が社会的に受容可能であるか否かを判断し報告する「脆弱性アセスメント (Vulnerability assessment)」の流れとなっている。

脆弱性評価における意思決定基準は、評価の目的に応じて決められる。代表的な基準として、定量的に定められた基準値や規制値と比較する権利基準、最もよい改善結果をもたらす技術という観点から評価する技術基準、そして費用便益分析や厚生分析のための効用基準などがある。これらの意思決定基準によって分析された脆弱性の水準が社会的に受容可能でないと評価された場合、所与の政策や規制の改善等がなされることになる。特定の活動を回避したり禁止したりする脆弱性の「回避」戦略、潜在的な被害を許容可能であるとして特別に対策をしない「現状維持」戦略、インフラによる防御を改善する「低減」戦略、保険などで他の主体に責任を移転する「分配」、また合同により現状維持と移転を組み合わせる「共有」などの選択肢がある。

2.1 項で述べたように、脆弱性の概念はより需要側の視点を重視したものであり、脆弱性の分析と評価の各段階において、家計あるいは消費者の状態や認知の果たす役割が大きくなると考えられる。



出典：Holmgren[5] (2009) をもとに著者作成

図 2 脆弱性評価の枠組み

3. 脆弱性の便益評価の理論的基礎

インフラによる脆弱性改善の便益評価とは、2.2 項における脆弱性アセスメントの枠組みの脆弱性の評価段階において、分析された脆弱性を資源配分の効率性の基準、すなわち効用基準で評価することである。将来が不確実な状況で家計が意思決定を行う場合の便益評価は、伝統的に期待効用理論を用いたリスク下の便益評価モデルが用いられてきた。しかしながら、現実の不確実な状況における選択は期待効用理論に従わない事例が体系的に観察され、期待効用理論の公理的なアプローチとの乖離が問題となってきた。それに対し、近年の行動経済学の発展により、期待効用理論に従わないシステマティックな選択の一部は、プロスペクト理論により実験的あるいは実証的に説明可能となり、プロスペクト理論が期待効用理論の代替的な位置をなすとの認識が形成されつつある²(Wakker[6],2010)。ここでは、リスク下の厚生評価とプロスペクト理論の特徴を概観する。

² ただし、プロスペクト理論による厚生評価への応用は未だ少なく、その規範的な意味付けは確定していない。

3.1 リスクの便益評価

リスク下の便益評価は、Boadway and Bruce[7](1984)によれば、期待される消費に対して、効用関数がある程度凹の性質を持つか（絶対的リスク回避度）と消費の分散とによって表現される。リスク回避度が高いほど、また可能な消費の分散が大きいほど、リスク対策に対する支払意思額は大きくなる。効用関数は観察可能ではないため、支払意思額の推計には顕示選好法や表明選好法が用いられる。たとえば、Freeman[8](2003)は、顕示選好法の回避行動モデルを用いて公的なリスク対策に対する支払意思額の評価モデルを提示し、朝日・萩原[9](2013)では、水道水質リスクの評価を導出している。

3.2 プロスペクト理論

プロスペクト理論は不確実な状況における意思決定理論であるが、経済主体のリスク回避の構成は、Wakker[6] (2010) によれば次の3つに整理される。すなわち、①効用関数のカーブ、②確率の重みづけ、③参照点 (reference point) に関する損失回避である。期待効用理論では、効用関数のカーブの度合いがリスク回避度の主要要素であったが、プロスペクト理論では効用関数（プロスペクト理論における価値関数）のカーブのみではリスク回避度を説明できない。むしろ③の損失回避がリスク回避の半分以上を説明するとされる。

これらの特徴は、不確実性下の選択に関する実験結果が期待効用理論による選択に対してパラドックスとなる事例の蓄積により理論化されたものである。経済学では、効用関数は主観的な選択であり、単調性や凹の前提が満たされていれば、どのような効用関数かは問題とならない。しかしながら、選択実験の結果から効用関数を同定すると、「少額の領域に対してのみ線型となる」「reference point を想定しないとあり得ないほどの凹関数となる」などの結果が得られ、分析者の主観による効用関数の想定では実際の選択との乖離が大きいことが明らかとなっている。

プロスペクト理論の一般的な特徴を表 1 に示した。それらの特徴に基づく価値関数の表現は次のようになる。価値関数 $v(c)$ は、reference point からの所得の変化、 $c_i = y_i - \bar{y}_i$ に対して、以下の性質を持つ。

$$v' > 0, \quad v'(-c) \geq v'(-c), \quad v > 0 \text{ for } c < 0, \quad v < 0 \text{ for } c > 0$$

$v'(-c) \geq v'(-c)$ は損失回避とともに、 $c=0$ でキンクし、微分可能ではないことを表す。

表 1 プロスペクト理論の特徴

Reference Dependence	厚生 の 測 度 は 所 得 水 準 で は な く、reference point から の 変 化 に 基 づ く。
Loss aversion	負 の 変 化 は 同 量 の 利 得 より も、厚 生 に 対 し て 大 き な イ ン パ ク ト を 与 え る。
Diminishing sensitivity	価 値 関 数 は、損 失 領 域 で は 凸 で あ る。
Subjective probability	客 観 的 確 率 分 布 に 代 わ り 主 観 的 確 率 を 用 い る。め っ た に 生 じ な い 結 果 の 確 率 の 重 み づ け が 大 き く な る。

出典：Jantti, et al.[10](2012)

4. インフラの脆弱性評価における課題

リスク下の便益評価理論においても、期待効用理論の限界を踏まえ、非期待効用理論に基づく便益導出のモデルが提示されてきた。ここでは、その一例である Freeman[8](2003)の一般選好指標による回避行動モデルを概観し、それに基づく朝日・萩原[9] (2013) の評価モデルの予備的検証結果を検討することにより、イン

Jantti, et al.[10](2012)は、貧困に関して提示した脆弱性の厚生評価について、その倫理的な意味づけは留保するが、それによって政策に対する利害関係者間の見解の相違の原因を部分的に明らかにすることができる旨を述べている。

フラに関する脆弱性の便益評価モデルが考慮すべき要素を整理する。また、2.1 項で見たインフラの脆弱性に関するその他の特性も踏まえ、プロスペクト理論に基づく便益評価モデルの可能性を検討する。

4.1 一般選好指標による脆弱性評価モデル

Freeman[8](1991)では、非期待効用理論に基づくリスクの便益評価モデルを提示している。期待効用ではなくても所得、価格、そして将来の状態についての確率と被害規模に基づく選好（一般選好指標）が設定でき、それを最大化する選択問題であるならば、観察不可能な消費者の不確実性下の意思決定過程に抛らず、観察可能な顕示選好の情報のみで支払意思額を導出できることを示している。その一例として、期待効用理論に代わり Kahneman and Tversky[11](1979)のプロスペクト理論に基づくモデルを用いている。以下に概要を示すが、このモデルではプロスペクト理論の特徴のうち、主観的な確率の重みづけのみを導入している。

一般選好指標を $I = f(M, A, \pi)$ と表す。M は所得、A は被害規模、 π は被害をもたらす事象の生起確率を表す。一般選好指標を 2 状態モデルで次のように特定化する。

$$I = g(\pi) \cdot v(M, A^*) + g(1 - \pi) \cdot v(M, 0)$$

$v(\cdot)$ は所得 M と被害規模（金銭評価された）に対する価値関数である。g は確率に対する主観的なウェイトを表す関数であり、次の条件を満たすものとする。

$$g(0) = 0, g(1) = 1, g(\pi) + g(1 - \pi) < 1 \text{ for } 0 < \pi < 1$$

リスクの要素である A あるいは π をコントロール可能なインフラの整備水準を G とし、G の限界的な増加に対する支払意思額を求める。ここでは、G の効果を代替することが可能である私的な対策があるとし、それへの支払いを R で表す回避行動モデルを想定する。

$$\pi = \pi(R, G), A = A(R, G)$$

消費者が一般選好指標を最大化するように私的な対策 R を選択するとき、包絡線定理により、公的なインフラ整備水準への限界的評価が、被害規模あるいは確率に関する私的投資と公的投資と限界的効果の比として表現できる。

$$\frac{dM}{dG} = -\frac{\partial A^*/\partial G}{\partial A^*/\partial R} \quad \frac{dM}{dG} = -\frac{\partial \pi/\partial G}{\partial \pi/\partial R} \quad (1)$$

これらの右辺を顕示選好で推計することができれば支払意思額を計算することができる。しかしながら、この評価モデルの問題は、モデルの想定のように消費者が確率を π ではなく $g(\pi)$ と認識して行動しているならば、(1)式の各右辺は観察可能でないと考えられることである。その場合、消費者の客観確率に対する重みづけ関数 $g(\pi)$ を明らかにする必要がある。

朝日・萩原[9] (2013) では、前項の Freeman の回避行動モデルを拡張し、水道の水消費が一定の絶対的な水準を下回るリスクに関して、私的な対策行動の際に認識する確率を事前確率、客観的な被害確率を事後確率と設定し、それが一致しない場合を脆弱性とする脆弱性の評価モデルを提示した。その際に、消費者の事前確率・事後確率と私的な対策行動との関係をアンケート調査および水道業務指標データによって検証した。すなわち、前項の一般選好指標モデルの前提を検証した。

その結果、水質事故と施設事故による断水リスクについては、事前確率と対策行動との関係は有意であったが、事後確率との関係は有意ではなかった。検証結果はデータ制約により限定的に解釈されなければならないが、私的投資による事後確率の限界的な変化が観察可能ではないため、消費者の客観確率に対する重みづけ関数 $g(\pi)$ の情報が必要であることが示唆されたことになる。

4.2 プロスペクト理論とインフラの脆弱性評価

インフラに関する脆弱性の便益評価は家計の不確実性下の選択に基づくことから、一般的な意味で、不確

実性下の選択としてより記述的な適合度の高いプロスペクト理論を基礎とすることが望ましいと言えるが、さらに①reference point からの損失回避、②確率の主観的な重みづけ、の2点の特徴において、プロスペクト理論を積極的に適用すべき理由があると考えられる。

生活の安全や安心を確保するインフラは、公共財として供給される場合、追加的な利用料金の支払いがないか、税などにより利用量に対応しない負担となっているか、または必需財としての性格により低負担であるため、利用の便益を意識しにくいと考えられる。他方、供給が途絶した場合の不効用は、2.1節の Taylor and D'Este[4](2007)が被害規模に対する反応の大きさを指摘するように大きいと考えられる。そしてその不効用は、現状の整備水準やシビルミニマムなど何等かのベンチマークに比べてマイナスの消費量であることによって生じる。よって、①reference point からの損失回避を明示的に表現することの有用性が大きいと考えられる。

さらに、消費者が直面する不確実性を確率として認識する際の問題が挙げられる。消費者がインフラによるサービスを消費する際の不確実性は複合的な構造であると考えられる。水道による水供給のリスク構造を例にとれば、水量の不足（断減水）や水質の劣化が被害として顕在化する過程には危険事情（hazard）である施設の老朽化・系統間の連絡状況・訓練の不足などと、危険事象（peril）である地震・渇水・有害排水・施設損傷などがあり、それぞれに生起確率がある。消費者が自らの消費選択にあたってそれらを認識する過程では、その複雑な構成に対して何等か主観的な構造化がなされていると考えることができる。また、たとえばインフラによるリスク対策について問題となる「想定外」のリスクとは、客観的には生じ得る事象に対し、主観的にゼロのウェイトを付与していると表現することが可能である。以上のような家計の確率認識が評価に影響することから、②確率の主観的な重みづけをモデル化可能であることの有用性は高いと考えられる。

【参考文献】

- [1] Alwang, J., Siegel, P.B., Jorgensen, S.L., "Vulnerability: A View from Different Disciplines", Social Protection Discussion Paper Series, No.0115, 2001, Social Protection Unit, The World Bank.
- [2] 朝日ちさと, "社会資本整備が脆弱性をもたらす効果の経済学的評価に関する一考察", 『都市政策研究』第4号, 2010年3月, pp.156-127.
- [3] Murray, A.T. and Grubestic, T.H., "Overview of Reliability and Vulnerability in Critical Infrastructure", in "Critical Infrastructure-Reliability and Vulnerability", ch.1, pp.1-8, 2007, Springer.
- [4] Taylor, M.P. and D'Este, G.M., "Transport Network Vulnerability: A Method for Diagnosis of Critical Locations in Transport Infrastructure Systems", in "Critical Infrastructure-Reliability and Vulnerability", ch.2, pp.9-30, 2007, Springer.
- [5] Holmgren, A.J., "A Framework for Vulnerability Assessment of Electric Power System", in "Critical Infrastructure-Reliability and Vulnerability", ch.3, pp.31-56, 2007, Springer.
- [6] Wakker, P.P., "Prospect Theory for Risk and Ambiguity", 2010, Cambridge.
- [7] Boadway, R. and Bruce, N., "Social Welfare Orderings: Requirements and Possibilities", in "Welfare Economics", pp.137-169, 1984, Blackwell.
- [8] Freeman, A.M., "Values in an Uncertain World", in "The Measurement of Environmental and Resource Values", ch.8, pp.238-240, 2003, REF.
- [9] 朝日ちさと・萩原清子 "社会資本整備（上水道）における脆弱性の厚生評価に関する考察", 『地域学研究』第42巻3号, 2013年1月.
- [10] Jantti, M., Kanbr, R., Nyssola, M. and Pirttila, J., "Poverty and Welfare Measurement on the Basis of Prospect Theory", Working Paper No.2012/109, UNU-WIDER, United Nations University, 2012.
- [11] Kahneman, D. and Tversky, A., "Prospect Theory: An Analysis of Decisions under Risk", *Econometrica* 47(1), pp.263-291, 1979.