

○ [土] 相沢 圭俊 (日本大学大学院) [土] 金子雄一郎 (日本大学)

Vulnerability evaluation of inter-city transportation networks

Takatoshi AIZAWA, Nihon University
Yuichiro KANEKO, Nihon University

The objective of this study is to evaluate vulnerability of inter-city transportation networks in the virtual case of the Tokaido Shinkansen visited by Tokai earthquake. Two vulnerability indices (generalised travel cost and log-sum model) are used for the evaluation. As a result, it revealed what was necessary for the improvement of the degraded transportation network.

KeyWords : Inter-city transportation, Vulnerability analysis

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災は、鉄道、道路等の交通基盤施設に多大な影響を及ぼした。特に輸送量の大きい東北新幹線が約1ヶ月にわたり運休したため、首都圏と東北圏間の移動性は大きく低下した。

一方、震災直後から航空や高速バスの増便あるいは臨時便が設定されたことで、首都圏と東北圏間の輸送量にある程度確保できたことが報告されている¹⁾。このことから、災害によっていずれかの交通手段が利用不能となった場合においても、交通ネットワーク全体としての機能が完全に喪失しないように、あらかじめ代替性を確保しておく必要があると考えられる。

都市間交通ネットワークを対象にこのような代替性の確保を検討するにあたっては、脆弱な交通手段を把握し、その代替交通手段を確保することで、どの程度影響を軽減できるかを検討することが重要である。

そこで本研究では、今後発生が想定されている東海地震を対象に、複数の交通手段から構成される都市間交通ネットワークの脆弱性を評価することを目的とする。

なお、ここでの脆弱性とは、災害やテロのように発生する確率は低いが、発生した際の影響が大きい事象について取り扱うことを意味している。そのため、確率的な観点から交通ネットワークの評価を行う信頼性とは異なり、交通ネットワークを確定的に途絶させた際の影響を評価することに主眼を置いている。

2. 既往研究の整理

これまで震災時の都市間交通ネットワークへの影響を分析した研究や、交通ネットワークの脆弱性の評価指標を検討した研究は多く存在する。例えば高橋²⁾は、地震の発生によって全国の交通ネットワークが確率的に損壊すると仮定し、日本全国にランダムに地震を発生させるシミュレーションを行っている。そして、地震発生シミュレーションの結果より、ネットワークを構成するリンクの被害状況と、全国規模の旅客流動が被る影響の分析を行っている。

また、黒田³⁾は、大地震発生後の旅行者の行動を経路選択行動モデルにより表現し、鉄道ネットワークの途絶が中・長距離の旅客流動に与える影響を、OD交通量の減少

という指標を用いて表現している。さらに、鉄道ネットワークの途絶により発生するOD交通量の減少を、臨時便も含めた航空輸送によってどの程度まで補うことが可能であるかの検討も行っている。

谷口⁴⁾は、あらかじめ新幹線が途絶する箇所を確定的に決めておき、新幹線が途絶した際に生じる潜在需要全体をすべて航空旅客への負荷になると仮想することで、新幹線途絶による影響を定量的に示している。具体的には、新幹線途絶による旅行の取り止めや、自動車利用に転じたトリップもすべて航空旅客としてカウントすることにより、航空旅客数という共通の脆弱性指標を作成し、途絶の影響の大きさを簡便に比較することを可能としている。

これらの既往研究は、震災時の都市間交通ネットワークのあり方を検討する上で有益な情報を提供するものであるが、対象交通機関に高速バスが含まれていない。上述した通り、東日本大震災時には、途絶した東北新幹線の代替手段として輸送力増強に寄与した実績があることから、高速バスの利用も考慮する必要があると考えられる。

一方、交通ネットワークの脆弱性の評価指標に関する既往研究として、Taylor et al.⁵⁾は、道路ネットワークの脆弱性評価指標について整理しており、ネットワークが途絶した際の一般化費用の変化やアクセシビリティ指標の変化を脆弱性指標として用いることを提案している。そして、オーストラリアの高速道路の特定の箇所を途絶させ、これらの指標を用いて脆弱性を評価している。

また、Chen et al.⁶⁾は、脆弱性評価指標として、複数の選択肢における最大効用の期待値であるログサム変数を用いる方法を提案し、テストネットワークを対象に、特定のリンクが途絶した際の平常時と途絶時のログサム変数値の変化を示し、脆弱性の評価を行えることを示している。

これらの既往研究では、複数の交通手段の利用を想定した脆弱性評価は行われていない。上述した通り、東北新幹線が途絶した東日本大震災においては、航空や高速バスといった代替交通手段によって、都市間の移動をある程度確保することができたと報告されている。そのため、複数の交通手段によるネットワークの多重性も考慮した脆弱性評価を行うことが必要であると考えられる。

以上を踏まえ本研究では、今後発生が想定されている東

海地震を対象に、既往研究で提案されている一般化費用とログサム変数の2つの脆弱性指標を用いて、都市間の交通ネットワークの脆弱性を評価することを目的とする。なお、交通手段については、航空・新幹線・高速バスの3つの公共交通機関を対象とする。

3. 脆弱性評価指標の概要

3.1 一般化費用を用いた指標⁵⁾

特定のリンクが途絶した場合の2地点間の最小一般化費用の変化分と流動量の積を脆弱性指標としたものであり、式(1)のように表現される。

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} v_{ijrs} \quad (1)$$

ここで、

V_{rs} : リンク e_{rs} が途絶した場合に低下する利便性

d_{ij} : ノード i から j への交通量

v_{ijrs} : リンク e_{rs} が途絶した際のノード i から j への最小一般化費用の変化量

である。

なお、一般化費用の計算における時間価値については、「長期需要予測に関する調査報告書」⁷⁾の地域間旅客交通機関分担予測モデルのパラメータより算出した171円/分を用いる。また、交通量については、国土交通省が2005年に実施した全国幹線旅客純流動調査より、代表交通機関別(航空及び鉄道)の流動数を用いることとする。

3.2 ログサム変数を用いた指標⁶⁾

この評価指標は、一般的にアクセシビリティ指標としても利用されているログサム変数を脆弱性評価に用いた手法である。ここでログサム変数とは、交通機関選択モデルにロジットモデルを用いた場合、複数の選択肢における最大効用の期待値として表せる指標であり、式(2)、(3)のように表現される。なお、本研究では、ロジットモデルの効用関数及びパラメータについては、Kato et al.⁷⁾における検討結果を用いる。

$$\Lambda = \ln \sum_m \exp(U_m) \quad (2)$$

$$U_{ijm} = \sum_k \beta_k \cdot X_{km} \quad (3)$$

ここで、

Λ : ログサム変数の値

U_m : 交通機関 m による ij 間の効用

X_{1m} : 総所要時間(分)(共通変数)

X_{2m} : 総費用(円)(共通変数)

X_{3m} : 乗換回数(回)(鉄道)

X_{4m} : 1/頻度(回)(鉄道)

β_k : パラメータ

である。

表1 各パラメータの値⁷⁾

	総所要時間 (分)	総費用 (円)	乗換回数 (回)	1/頻度 (回)
鉄道	-0.2001 (-150.3)	-0.000155 (-53.8)	-0.2386 (-26.8)	-2.2575 (-30.0)
高速バス			-	-
航空		0.0000246 (-11.8)	-	-

(括弧内:t値)

4. 都市間ネットワークの脆弱性評価結果

4.1 評価対象及び前提条件

本研究の脆弱性評価における評価対象と前提条件について、以下の通り設定する。

- ・東海地震による影響として、東西間の大動脈である東海道新幹線の運休を取り上げる。具体的には、最も被害を受けると想定されている静岡県内を含む区間(小田原～豊橋間)が途絶した場合を想定する⁸⁾。
- ・対象地域は、北海道、東北、北陸、関東、中部、関西、中国、四国、九州の9地域とし、これらの地域で人口が最も多い都府県(宮城、新潟、東京、愛知、大阪、広島、愛媛、福岡)と、東海地震によって最も被害を受けると想定されている静岡県の合計10地域間の主要OD交通を対象に脆弱性の評価を行う。なお、起終点は各都道府県庁とする。
- ・評価対象とするODは、東海地震によって被害を受けると想定されている静岡県を通過するODとする。
- ・都市間交通ネットワークを構成する交通手段は、航空、鉄道、高速バスの公共交通機関とする。
- ・各交通機関の運賃や所要時間は、2006年時点でのネットワークを対象に、国土交通省の総合交通分析システム(NITAS)の経路探索機能を用いて求める。そして、一般化費用の変化を用いた評価指標では一般化費用を、ログサム変数を用いた評価指標では所要時間が最小となる経路を探索する。
- ・主要OD間の旅客流動数については、上述した2005年の全国幹線旅客純流動調査より、代表交通機関別の航空及び鉄道の流動数(年間値を365で除した値)を用いる。これを表2に示す。

表2 主要OD間の旅客流動数(人/日)

	静岡	愛知	大阪	広島	愛媛	福岡
北海道	1,551	3,189	4,038	899	351	1,403
宮城	597	984	1,197	205	55	378
東京	33,022	28,211	31,485	7,616	2,405	11,721
新潟	616	595	830	178	88	263
静岡	0	8,981	4,260	838	132	986

注: 代表交通手段別の航空と鉄道の合計値(往復計)

4.2 一般化費用を用いた指標による評価

まず、最小一般化費用の変化分を指標として用いて、主要OD間の脆弱性を評価した結果を図1に示す。これより、札幌～名古屋、東京～名古屋、静岡～名古屋・大阪・松山・福岡の一般化費用が大きく増加することが分かる。この要因としては、上述のOD間には航空の定期便が設定されていないため、東海道新幹線の代替交通手段に表定速度の低い在来線鉄道が選択されることが挙げられる。

これに対して、例えば東京～静岡については、東海道新幹線の代替交通手段として高速バスが選択されるが、新幹線と比較して所要時間が65分長くなるものの、費用が2930円安価であるため、脆弱性指標値が低くなる結果となった。

また、東京～大阪については、代替交通手段として航空が選択されているが、費用が9360円増加するものの所要時間が27分短縮されるため、同様に脆弱性指標値が低くなる結果となった。このことから、OD間における高速バスや航空といった代替交通手段の交通サービス水準(LOS)が、脆弱性の改善に寄与していることが確認された。

次に、一般化費用に加えてOD間の交通量(流動数)を考慮した指標 V_{rs} (式(1)参照)を用いて、主要OD間における脆弱性を評価した結果を図2に示す。これより、一般化費用のみを指標に用いた場合(図1参照)と比較して、東京～名古屋を除いて V_{rs} は減少、すなわち脆弱性は緩和されていることが分かる。この要因としては、東京～名古屋以外のODについては、一般化費用の増分は高いものの、流動数が少ないことが挙げられる。

なお、東京～名古屋間については、東日本大震災時のように航空の臨時便を設定することができれば、OD間の一般化費用の増大を抑制でき、ネットワークの脆弱性の改善が期待される。そうした意味でも、東海地震の被害エリアに含まれる中部国際空港の震災対策や名古屋空港の活用は重要な課題と指摘できる。

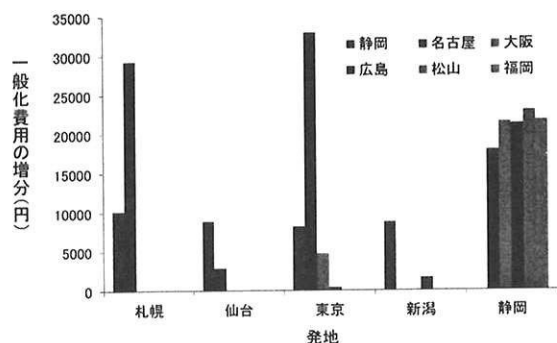


図1 主要OD間の最小一般化費用の変化

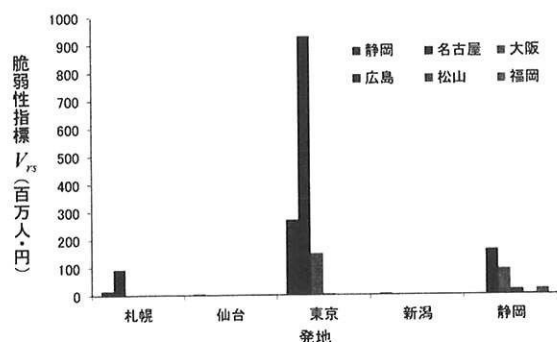


図2 主要OD間の脆弱性評価(一般化費用を用いた指標)

4.3 ログサム変数を用いた指標による評価

次に、ログサム変数値((式(2)及び式(3)参照)の変化分を指標として用いて、主要OD間の脆弱性を評価した結果を図3に示す。これより、東京～名古屋のログサム変数値

の減少割合が最も高いことが分かる。この要因としては、東海道新幹線の代替交通手段となる在来線鉄道の所要時間が420分と大幅に増加することが挙げられる。周知の通り、東京～名古屋間については、2027年を目標にリニア方式による中央新幹線の整備が進められている。開通後の最短所要時間は40分台とされており、脆弱性の緩和に大きく寄与することが期待される。

一方、東京～静岡間については、代替交通手段となる高速バスの所要時間が174分であることから、ログサム変数値の変化は相対的に小さい結果となった。このことから、代替交通手段のLOSが脆弱性に大きな影響を及ぼしていることが確認された。

なお、静岡発着を除く多くのODにおいてログサム変数値は変化していないが、この要因としては、ログサム変数の場合、式の構造上評価結果が最大効用に大きく影響を受ける性質があることが挙げられる。

特に本研究で脆弱性指標の計算に用いたパラメータ(表3参照)は、費用よりも時間に重みが置かれているため、所要時間が最短となる航空の効用が最大となり、航空のLOSに全体の結果が依存する傾向が見られる。これに加えて、本研究で用いた指標は、空港や航空機の容量を考慮できていないため、航空が利用可能なODについては利用が無制限となり、震災時においてもログサム変数に大きな差が生じないという結果となった。この容量制約の設定については、今後の重要な課題である。

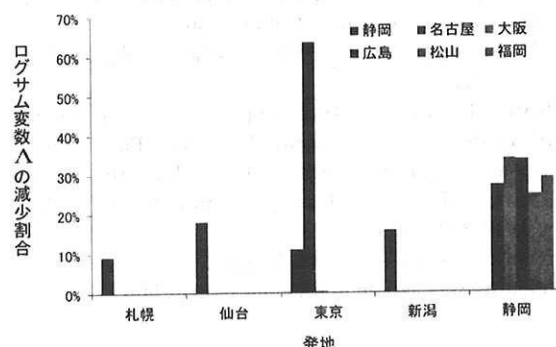


図3 主要OD間の脆弱性評価(ログサム変数を用いた指標)

5. おわりに

本研究では、一般化費用とログサム変数の2つの指標を用いて、東海地震の発生によって東海道新幹線が途絶した場合を想定し、主要OD間の脆弱性指標値を計測した。その結果、代替交通手段の有無やサービス水準によって、指標値が大きく変化することが確認された。この要因としては、都市間交通ネットワークは都市内ネットワークとは異なり、代替経路や代替交通手段が限定されていることが挙げられる。そのため、代替交通手段が存在しない、もしくは仮に存在したとしてもLOSが低いOD間の場合、脆弱性指標が大きくなる結果となった。

今後の課題として、個別交通機関のうち航空については、鉄道や道路等の線路上の施設と異なり、空港が被災を免れれば運航が可能であるため、震災時においても代替交通手段として機能することが期待される。ただし、震災直後においては、救援活動や物資輸送が優先されることから、旅客需要の特性などを踏まえた適切な運用が必要であり、これらを考慮した評価が必要である。また、空港や航空機の容

量制約を考慮したより実行可能な脆弱性の評価指標の考案についても、重要な課題である。

参考文献

- 1) 金子雄一郎, 兵藤哲朗: 東日本大震災による交通システムの機能障害の発生状況と復旧について, 日本都市計画学会誌「都市計画」291号, pp.82-86, 2011.
- 2) 高橋清, 田中伸治, 家田仁, 村木康行: 全国交通ネットワークにおける地震発生リスク及びリンク交通量への影響評価, 土木計画学研究・論文集, Vol.15, pp.345-350, 1998.
- 3) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 正木智也, 長生武志: 兵庫県南部地震後における中・長距離旅客流動に関する分析, 土木計画学シンポジウム「阪神・淡路大震災に学ぶー土木計画学からのアプローチー」, pp.451-458, 1997.
- 4) 谷口守, 阿部宏史, 清水健夫: 潜在的な航空旅客負荷にみる新幹線途絶による影響の基礎的検討, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.4, pp.661-666, 2001.
- 5) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C., D'Este, G.M.: Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks, Networks and Spatial Economics, Vol.6, pp.267-291, 2006.
- 6) Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S., Lee, M.: Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks, Networks and Spatial Economics, Vol.7, pp.241-256, 2007.
- 7) 財団法人運輸政策研究機構: 長期需要予測に関する調査報告書, 2001.
- 8) Kato, H. et al.: Inter-Regional Travel Demand Analysis Using Integrated Model For Practical Travel Demand Forecast, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.9, pp.239-254, 2011.
- 9) 中央防災会議: (想定) 東海地震について
<http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/index.htm>