

全国交通ネットワークにおける地震発生リスクのリンク及びリンク交通量への影響評価*
*Impact of Earthquake Risk on the Nationwide Transportation Network and Traffic Flows**

高橋 清**・田中伸治***・家田 仁**・村木康行****

*By Kiyoshi TAKAHASHI**, Shinji TANAKA***, Hitoshi IEDA** and Yasuyuki MURAKI*****

1. はじめに

阪神・淡路大震災における交通基盤施設の損壊は、被災地域内の交通流動のみならず、全国的な旅客・貨物流動にも、大幅な迂回やトリップの取りやめを余儀なくさせるなど多大な影響を及ぼした。これは、現状の交通ネットワークに代替性確保の面で不十分な地域があり、わずか数リンクの途絶でも、その影響が日本全国に及ぶ可能性があることを示している。そして、この経験を契機に災害に強い交通ネットワークを確立すること、幹線交通体系のリダンダンシーを向上させることの必要性が再認識された。

そこで本研究では、地震の発生によりリンクが確率的に被害を受ける交通ネットワークを想定し、交通流動が受ける影響を予測するツールを開発した。また、このツールを複数の交通機関からなる全国ネットワークに適用し、日本各地で地震が発生するリスクを想定した上で、ネットワークを構成する各リンクの被害状況と全国規模の旅客流動が被る影響について分析した。

2. 既往の研究

災害時の交通ネットワーク信頼性に関する主な研究としては、次のようなものが挙げられる。若林ら¹⁾は、信頼性グラフ解析理論に基づいて交通ネットワークの

信頼性を解析する方法を提案している。これは、各リンクの通行規制確率が与えられたとき、ミニマムパス・カットの概念を用いて、ネットワーク上の任意点間の到達可能信頼度を算出するものである。南ら²⁾は、代替ルートが存在とその所要時間から経路代替性指数を定義している。そしてこの指数をもとに、山口県南部の道路ネットワークにおいて、整備費用最小となるような計画を求めている。川上³⁾は、伊豆半島の道路網を対象に、平常時ネットワーク・地震発生後の被災ネットワークにおけるリンクフローを算出し、その変動を混雑度・犠牲度として表現している。この研究の特徴は、分布交通量の配分を行い、各リンクのフロー変動に着目しているところにある。朝倉ら⁴⁾は、四国の道路ネットワークにおいて、過去の通行規制実績の各状態でネットワーク配分を行い、許容所要時間超過による中止トリップ数の割合から OD ペア間信頼度を求めている。

以上の研究は、1) 連結信頼性に着目した研究、2) 時間信頼性に着目した研究、3) フローの変動に着目した研究、4) OD ペア毎の時間的ロスに着目した研究、という形でまとめることができるが、いずれも地域レベルの道路ネットワークを対象としている。しかし、阪神・淡路大震災の際のように、一地域のリンク途絶の影響が全国に及ぶことを鑑みると、本研究の目的である地震発生リスク下における交通ネットワークの信頼性解析を全国規模で行うことは重要であると考えられる。国土庁⁵⁾は全国の交通ネットワークを対象として、地震災害の影響を一般化費用の増加として求めている。しかし、災害の程度を与件として分析を行っており、被災地域のリンクは全て途絶するといった現実性に乏しい仮定を設けている。

*キーワード：防災計画、リスクマネジメント、交通網計画、交通計画評価

**正員、工博、東京大学大学院社会基盤工学専攻
(113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1、
TEL.03-3812-2111ext.6116, FAX.03-5800-6868)

***学生員、東京大学大学院社会基盤工学専攻

****正員、工修、東日本旅客鉄道(株)

3. 交通ネットワーク分析モデルの構築

本研究で構築するモデルは、図 1 に示した 3 つのサブモデルから構成される。モデルの特徴は次の 3 点に要約される。

- ①発生する地震を地域特性に応じて確率的に決定する。
 - ②都市間幹線交通流動を対象とした全国ネットワークの分析を行うことができる。
 - ③交通機関間の転換量も考慮しており、交通流動への影響を総合的に分析できる。
- 以下、各サブモデルについて説明を行う。

(1) 確率的地震発生サブモデル

本モデルは、地震発生地点及びマグニチュードを確率的に決定するものである。

まず、発生する地震として、活断層型地震・海溝型地震の 2 種類を想定する。活断層型地震については、全国の活断層分布⁹⁾から 760 地点を地震発生可能地点として設定し（図 2 参照）、断層長さ・活動度などに

基づいて発生可能性に重み付けをした。また海溝型地震については、歴史地震⁷⁾の震央分布から 146 地点を地震発生可能地点として設定し、発生時規模に基づいてそれらを重みづけた。そして、この重みを考慮し、発生可能地点のうちの 1 つをランダムに選択することで、地震発生地点を決定する。また、地体構造区分⁸⁾から定められるその地域の最大マグニチュードに基づき、発生規模と頻度の関係 Gutenberg-Richter 式

$$\log n(M) = a - bM \quad (\text{式 1})$$

$n(M)$: 規模 M 以上の地震の発生回数

a, b : 定数

を満たすように、発生マグニチュードを乱数により発生させ、発生地点の最大マグニチュードとの関係から地震を確率的に決定する。日本付近では定数 b がほぼ 1 になることが分かっており、このとき定数 a は最大マグニチュードとなる。

(2) 交通施設被害算定サブモデル

本モデルは、発生した地震の位置と規模に応じて、交通ネットワークを構成する各リンクの被災度を判定するものである。

(1)で求められた発生地震の位置と規模から、各交通施設が存在する地点の震度 I を次の距離減衰式を用いて求める。

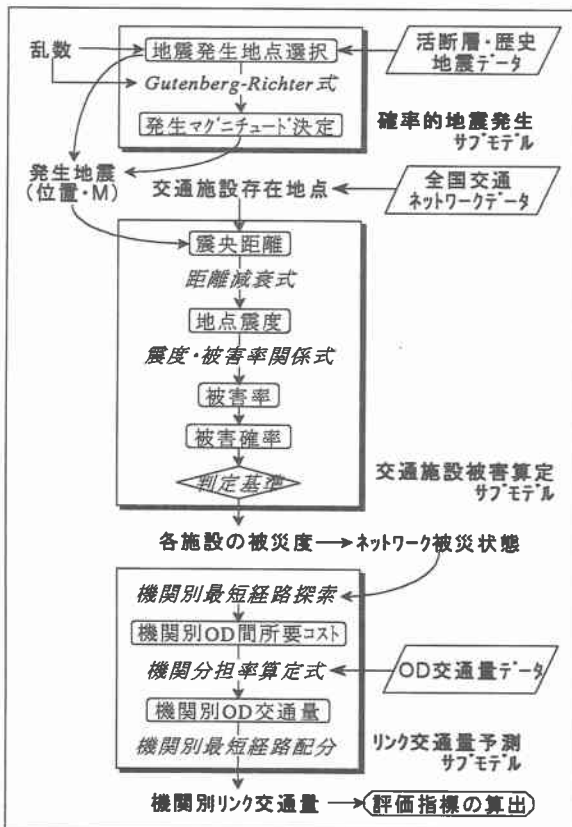


図1 ネットワーク分析モデルの構成

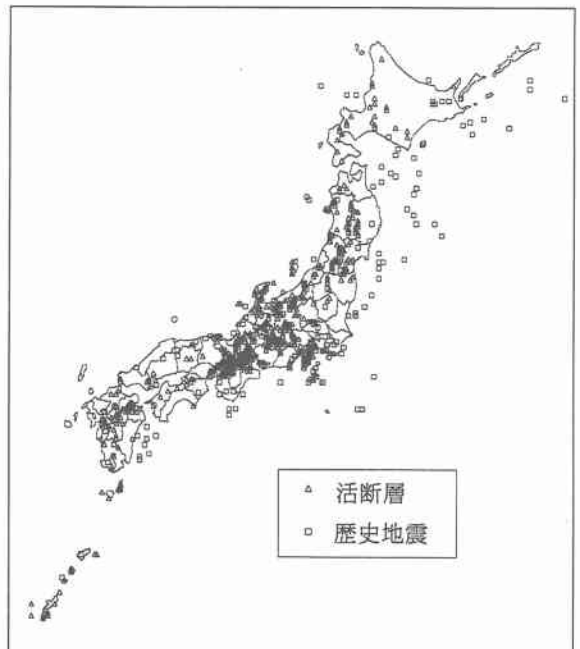


図2 設定された地震発生可能地点

$\Delta \geq 100\text{km}$ のとき (式2)

$$I = M_k + 2\ln(100/\Delta) - 0.00183(\Delta - 100)$$

$\Delta \leq 100\text{km}$ のとき

$$I = M_k + 2\ln(r_0/r) - 0.01668(r - r_0) \quad (\text{式3})$$

M_k : 河角による地震の規模

Δ : 震央距離(km) r : 震源距離(km)

r_0 : $\Delta = 100\text{km}$ における震源距離(km)

次に、過去の地震の被害調査データをもとに作成されている自治体の地震被害想定⁹⁾を参考に、震度に応じた交通施設の被害率 ν を求める。文献9の被害率算定式は施設の地盤種類毎に算定式が求められているが、しかし、本研究においてはすべてのネットワーク下における地盤情報の入手が困難なため、交通施設が最も弱い地盤である第4種地盤に存在すると仮定し、交通機関をひとまとめとして回帰を行い、被害率と震度との関係式(式4)を求めた。

$$\nu = 0.8135I - 3.2138 \quad (\text{式4})$$

ν : 交通施設の被害率(カ所/km)

そして、各被害の発生が独立なポアソン過程に従っているとすると、施設の機能する確率(導通確率)は

$$p = \exp\{-(\nu + \varepsilon)\} \quad (\text{式5})$$

ε : 不確定項(正規乱数)

となる。ここで不確定項は、実際の地震では同じ震度でも交通施設が壊れる場合と壊れない場合があることを考慮して加えたものである。交通リンクは基本的に線状の形態をしており、 k 個の区間(交通施設)から構成されていると考えると、このリンクの被害確率 P は区間 m の導通確率 p_m を用いて

$$P = 1 - \prod_{m=1}^k p_m \quad (\text{式6})$$

と表される。この値と基準値を比較することにより、リンクの被災度を判定する。そして、これをすべての施設について行い、ネットワークの被災状態を算定する。また、今回は交通モードによる被害率は同じであると仮定する。

(3) リンク交通量予測サブモデル

本モデルは、交通ネットワーク被災状態において交通量を配分し各リンクの交通量を算定するものである。

交通ネットワーク被災状態において交通機関毎に最短経路探索を行い、OD間所要コスト X_i を求める。リンクコストには、運賃等の費用と所要時間の組み合わせで構成される一般化費用を用いる。そして、この各機関の所要コストから、次式のような集計ロジットモ

デルを用いて交通機関 i の機関分担率 P_i を求める。

$$P_i = \frac{\exp(-\theta X_i)}{\sum_{j=1}^J \exp(-\theta X_j)} \quad (\text{式7})$$

θ : パラメータ(>0) J : 交通機関選択肢数

この機関分担率を全交通機関の分布交通量に乗じて、交通機関別分布交通量を求める。今回対象とする交通機関は、航空、鉄道及び道路とする。そして、これを各交通機関の最短経路に配分し、各リンクの交通量を求める。

4. シミュレーションによるリンク及びリンク交通量への影響評価

(1) 設定条件

構築したモデルを、航空は国内定期路線、鉄道は新幹線・在来線、道路は高速道路・一般国道からなる全国ネットワークに適用し、シミュレーションを行った。使用したネットワークデータは表1のとおりである。なお、空港へのアクセス手段は道路のみと仮定し、また、各空港の被害を考慮するため仮想のリンク(リンク長3km)を設定し被害率を算定した。

表1 交通ネットワークデータ

モード	レベル	ノード数	リンク数
航空	定期路線	47	191
鉄道	新幹線・在来線	198	596
道路	高速道路・一般国道	572	2496

交通量データには、幹線旅客純流動調査データ(H2)を全国170のゾーン間ODに分割したものを利用した。これらをもとに、全国に位置・規模($M=6.0$ 以上)の異なる500回の地震を確率的に発生させるシミュレーションを行った。

(2) 評価指標の定義

交通ネットワーク及び交通流動への影響を評価するための指標として、以下の3つを定義する。

①交通施設損壊度数: $\sum_{i=1}^n d_i/n$

②リンク配分交通量期待変動量:

$$\sum_{i=1}^n (f_i - f_0)/n$$

③リンク配分交通量期待変動比:

$$\sum_{i=1}^n \frac{f_i - f_0}{f_0} / n$$

n : 地震の発生回数
 d_i : i 回目被災状態(1=被災、0=機能)
 f_i : i 回目リンク配分交通量
 f_0 : 平常時リンク配分交通量

①はある一定の確率的条件での地震の発生に伴う交通施設の損壊度数を表現しており、地震国日本の交通ネットワークが如何なるリスクの上に建設されているかを表現している。

②の値は、日本周辺で発生する様々な地震が交通流動に与える影響の平均、すなわち地震発生リスクが交通流動に与える影響と考えられる。この評価値が正になるということは、災害時にそのリンクが代替経路として重要であることを示し、負になるということは、災害時に迂回を余儀なくされる交通量が大きいことを表している。

③の期待変動比が正になるということは、平常時には利用が少ないが、災害時に代替経路として有効に用いられる路線であることを示している。

(3) シミュレーション結果

ここでは特に、本州中央部を中心に取り上げシミュレーション結果の分析を行う。今回用いたネットワークデータは容量制約を特に考慮していないが、現状の配分結果はおおむね妥当な値を示している。機関分担式として採用したロジットモデルの再現性も自由度調整済み相関係数が0.93と高い値を示している。

以下、モデルを用いたシミュレーションの結果を示す。図3は、交通施設(鉄道)の損壊度数を示したものである。今回のシミュレーションでは、紀勢線における値が最大(0.18)となった。同様の方法で、道路

ネットワークについて算出したものと比較すると、鉄道と道路ではリンク長が異なるため、鉄道の損壊度数が道路よりやや大きくなる傾向がある。この損壊度数の値が、各リンクが保有する被災リスクと考えられる。

次に、ネットワーク被害が交通流動に及ぼす影響を

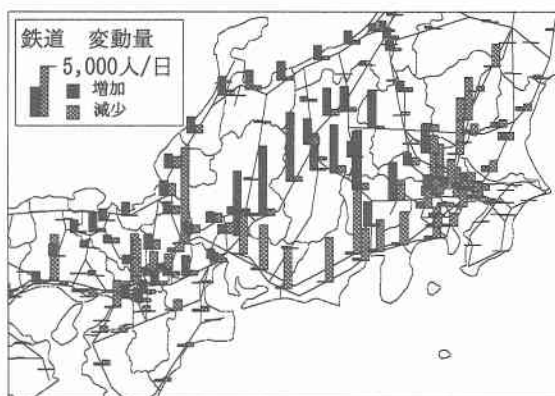


図4 鉄道のリンク配分交通量期待変動量



図5 航空のリンク配分交通量期待変動量

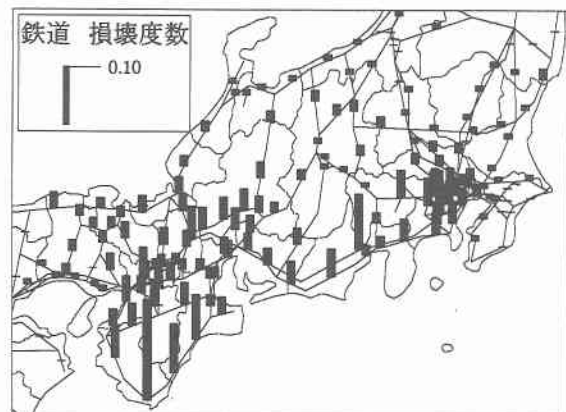


図3 鉄道ネットワークの損壊度数

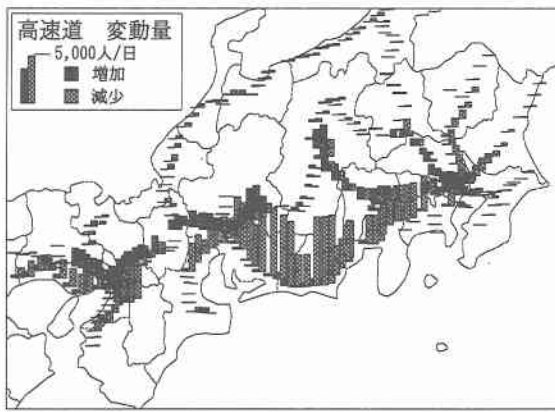


図6 高速道のリンク配分交通量期待変動量

表すリンク配分交通量期待変動量を、図 4～図 6 に示す。なお、変動量・変動比は、平常時リンク交通量に対して増加する場合、減少する場合を分けて指標化している。

鉄道で増加量が多い路線は中央線、信越線、北陸線で、減少量が多い路線は東海道・東北新幹線、東海道線である。航空については、絶対量では鉄道ほど大きくないが、各路線とも増加する傾向が見られる。高速道路については、東名と阪神地域の路線における減少量が多い。

次に、これらの値の平常時交通量に対する比率であるリンク配分交通量期待変動比（増加分）を図 7、図 8 に示す。兵庫県付近の福知山線や播但線で大きな値となっている。また、航空については、東京～富山、大阪～松本などの路線で平常時の 10 倍を超える値となっている。

(4) 評価指標から見た交通ネットワークの考察

図 4 から、東海道新幹線・東海道線で影響を受けた

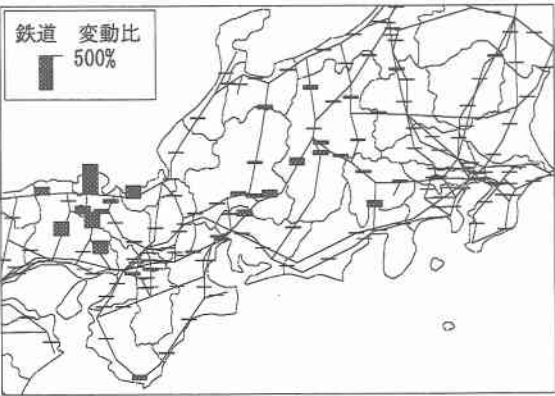


図 7 鉄道のリンク配分交通量期待変動比（増加）

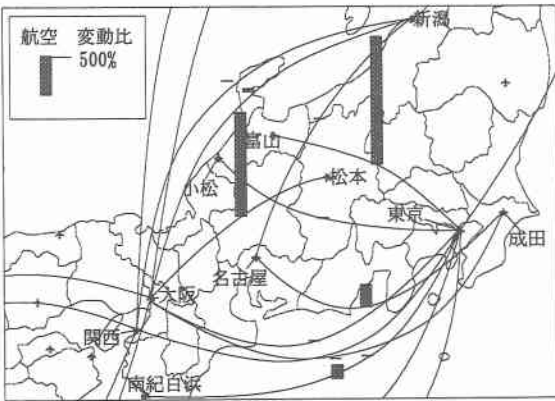


図 8 航空のリンク配分交通量期待変動比（増加）

旅客が中央線に迂回し、また関西以西から東北方面への旅客が北陸線を代替経路に選択していることがわかる。また、航空について示した図 5 において、東京～大阪の増加量が多いことから、鉄道における減少分の一部は航空に転換していると考えられる。なお、交通量が減少している航空路線が一部見受けられるが、この原因としては、空港が被災した場合と隣接県から空港へのアクセスリンク（道路）が被災した場合が考えられる。高速道路については、鉄道ほど明瞭ではないが東名高速道路で減少量が多く、鉄道と同じ傾向があることが図 6 から分かる。これは、平常時この路線に交通が集中しているにも関わらず、被災リスクが大きいことを示している。この減少分は並行する一般道、あるいは他の交通機関に転換したものと考えられる。

図 7 において、期待変動比が大きな値となった福知山線や播但線は、阪神・淡路大震災の際にも迂回ルートとして実際に利用されており、被災時には代替経路として重要な役割を果たすことが期待される路線であるといえる。また図 8 から、被災時には比較的近距离の航空路線も、重要な代替経路として浮上することが読みとれる。この結果は、本州におけるいわゆる「肋骨」系の地上交通ネットワーク整備が不十分であり、地震による影響を受けにくい航空に頼らざるを得ないという実情を示している。

5. まとめ

本研究では、複数の交通機関からなる交通ネットワークが、地震により被害を受けた際の交通流動への影響を予測するモデルを構築し、さらに各地域の地震発生リスクを内包した評価指標を提案した。また、モデルを用いたシミュレーションを通して、地震発生リスクが全国交通ネットワーク及び全国規模の交通流動に与える影響について明らかにした。

その結果、被災しやすい、あるいは代替経路として有効に機能するなど、全国ネットワークを構成する各リンクの特徴を把握することができた。また、交通機関相互の補完性がある路線を示すことができた。地震のリスクを前提としたネットワーク整備を行う際には、これらの特性を十分に認識する必要があると思われる。

今後の課題としては、被害算定を精緻なものとする、貨物流動にも分析を拡大するといったことを通じて、

リスク存在下での交通流動への影響をよりの確に捉え、
その上でネットワークの弱点を指摘すること、効果的

参考文献

- 1) 若林拓史:交通ネットワーク信頼性解析への信頼性信頼性グラフ理論適用の考え方,土木計画学研究・講演集 No.10, pp125~132, 1987.11
- 2) 南正昭・高野伸栄・佐藤馨一:リダンダントな道路網の構成方法に関する基礎的研究,土木計画学研究・論文集 No.13, pp733~742,1996.8
- 3) 川上英二:道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法,土木学会論文報告集 No.327, pp1~12,1982.11
- 4) 朝倉康夫・柏谷増男・為広哲也:災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル,土

な補強箇所を提示することが考えられる。

- 木計画学研究・論文集 No.12, pp475~484, 1995.8
- 5) 国土庁:交通システムの信頼性向上に関する調査, 1996.3
- 6) 活断層研究会:新編日本の活断層-分布図と資料,東京大学出版会,1991
- 7) 宇佐美龍夫:新編日本被害地震総覧,東京大学出版会, 1987
- 8) 萩原尊禮:日本列島の地震-地震工学と地震地体構造,鹿島出版会, 1991.1
- 9) 埼玉県:埼玉県地震被害想定策定調査報告書,1982.3

全国交通ネットワークにおける地震発生リスクのリンク及びリンク交通量への影響評価

高橋 清・田中伸治・家田 仁・村木康行

阪神・淡路大震災では、全国の主要幹線を含む交通ネットワークが地震により破壊され、全国レベルの交通流動に大きな影響を及ぼした。本研究では、全国レベルのネットワークが地震で被災した際の交通流動への影響評価を目的として、列島周辺で発生した地震による施設の被害状況の算出と、機関分担を内在化した交通量配分が可能な交通ネットワーク分析モデルを構築した。そして、本モデルを用いたシミュレーションを行い、日本各地で地震が発生するリスクを考慮した上で、リンク交通量の増減、増減の平常時交通量に対する比などを算出した。その結果、東海道沿線の鉄道・道路で迂回を余儀なくされる交通量が多いこと、航空では比較的短距離の路線も代替経路として重要であることが明らかとなった。

Impact of Earthquake Risk on the Nationwide Transportation Network and Traffic Flows

By Kiyoshi TAKAHASHI, Shinji TANAKA, Hitoshi IEDA and Yasuyuki MURAKI

In the present transportation network without enough substitute routes, not only local but nationwide traffic is highly influenced when a part of the network is damaged. For the purpose of evaluating the function of the nationwide network damaged by earthquakes, the author built a model to assess traffic flow considering the risk of earthquakes around Japan and suggested indices to evaluate the transportation network. The simulation using this model made influences in damaged networks clear, that is, the traffic flow of each link increases or decreases depending on its location with respect to damaged areas.
