

地震時における道路網の機能評価法の開発とその活用について

- flow-independent / dependent な各種の評価指標 -

岐阜大学工学部土木工学科

能島 暢呂

1. はじめに

ここ 10 年間の間に米国と日本は, 1989 年ロマ・プリエタ地震¹⁾ ($M=7.1$), 1994 年ノースリッジ地震¹⁾ ($M=6.8$), 1995 年兵庫県南部地震 ($M=7.2$) という 3 つの地震を経験した。これら 3 地震の背景として共通することは, (1)人口と社会資本が高度に集積し自動車交通に依存した大都市が被災したこと, (2) 両国が耐震工学の面で高度な技術を有すること, (3)マグニチュードが 7 前後ながら大都市近傍を震源とする地震であったために多大な施設被害を生じたこと, などが挙げられる。中でも高速道路を中心とした道路交通施設が大被害を受け, 被災地内外の交通体系に大きな影響を及ぼしたことは, 道路交通施設の耐震性能に対する「信頼感」を根底から揺るがす出来事として大きな衝撃をもって迎えられた。

道路交通施設の被災はそれ自体が多大な損失であると同時に, 人的被害に結びついたり, 交通機能の低下により社会経済活動や被災時の緊急対応が阻害されるなど, 甚大な間接被害の原点ともなる。特に自動車交通への依存度が高い都市域において, 道路交通の円滑な機能を保持することは地震防災上の重要課題である。また逆に, 将来の道路づくりを計画的に進めて行く上で, 被害が同時多発する地震災害への対策に配慮することは, もはや欠くことのできない重要な検討事項となっている。地震工学の分野では 1971 年サンフェルナンド地震以降, ネットワーク形態を有する都市施設を対象とした「ライフライン地震工学」が発展し, 水・ガス・電力の供給系ライフラインを主な対象として, 地震時における物理的・機能的挙動を評価する研究が盛んに行われてきた。一方, 道路交通ネットワークでは, ドライバーの意志が介在する「マルチコモディティー・フロー」を扱うため, 供給系ライフラインとは一線を画した取り扱いを要する。

地震災害時においては, 交通施設の損傷や機能停止および社会的な交通需要の変化に伴って, 交通発生・集中, 交通分布, 交通手段選択, 経路選択のそれぞれの様相が劇変し, さらに緊急活動や復旧・復興の進展とともにダイナミックに推移してゆく。このように関連要因が極めて多く複雑なため, 震災時交通はブラックボックス的な振る舞いをする。その挙動を少しずつ解明することが必要であるが, 交通工学における従来の理論の枠組みで高度な評価・推定モデルを構築し, 現象を再現することは非常に困難である。従って, 道路のネットワーク的特性を重視しつつ, 交通機能の震災時挙動をマクロな観点から評価することが重要となる。その評価指標としては, 可到達性, 最短距離, 所要時間, 処理交通量, 最大フローなど様々なものが目的に応じて採用されている。いずれにおいても, リンク欠損もしくはリンク機能低下を生じたネットワークのシステムの振る舞いを理解することに重きが置かれているため, OD 交通需要の質的・量的変化など多数の影響要因については, モデル化の過程で考慮外とされるか, 大胆な仮定が設定される傾向にある。このように道路施設の被災がサービス水準に与える影響をマクロに評価することは, 効果的な施設改善計画や新規路線の建設を検討するために, 十分意義深いものと考えられる。

こうした背景のもとに筆者は, (1) グラフ理論的アプローチ, (2) ネットワーク理論的アプローチ, (3) 交通工学アプローチ, の 3 種類のアプローチによって, 道路交通ネットワークの機能評価手法を段階的に検討してきた。これらの機能評価を行う際に必要なデータや, モデルパラメータ数, 前提条件, 計算量などは, (1)から(3)の順に増加するので, どの手法を選択するかは, 評価の目的や, 得られるデータ, 簡便さと詳細

さのいずれを重視するか、などによって異なるものと考えられる。本稿の第2～4章では、それぞれのアプローチによる機能評価手法の概要と適用例を紹介することとするが、それに先だって、各手法の狙いを以下にまとめておく。

(1) ネットワーク・トポロジーに基づく flow-independent な機能評価（グラフ理論的アプローチ）^{2), 3), 4)}

この段階では、被災道路網をグラフ理論的に捉えて、復旧過程における機能回復水準をトポロジカルな指標で表現することを狙いとした。供給系ライフラインでは、復旧曲線による復旧過程の表現が容易であることと、施設復旧と機能復旧の関係が比較的単純であることから、復旧曲線を積極的に制御するための最適化問題が盛んに取り扱われてきた。これに対し、道路、鉄道、通信といった交通・通信系ライフラインでは、先に述べたような理由により、交通量や通信量の回復過程を、施設の物理的復旧過程と直接的に結び付けることが困難である。従って、交通流解析を行うことなく、物理的機能回復と機能的機能回復の関係を、簡便な指標で記述する方法論を開発することが必要と考えた。本稿では、提案手法を阪神・淡路大震災における高速道路網の機能評価に適用した事例を挙げることにする。

(2) 最大フローに基づく flow-independent な機能評価（ネットワーク理論的アプローチ）^{5), 6), 7)}

次の段階では、被災道路網をネットワーク理論的に捉えて、基本的なネットワーク性能規範である「最大フロー」を評価指標とした機能評価を検討した。地震被災後に道路網に求められる機能水準は、緊急活動が主体となる緊急対応期～応急復旧期の段階と、社会経済活動が活発化する本復旧期～復興期では大きく異なる。前者では、交通規制が適正に実施されれば、少量の交通容量でも限定された交通需要を満足できるのに対して、後者では、通常交通容量に近い機能水準が求められる。最大フローを指標とした flow-independent な評価法は、交通流解析を要さない簡便法であるが、地震後の道路機能評価法として有力な手段であるといえる。本稿では、ネットワーク上の重要リンクを抽出するために行った確率論的重要度解析の評価基準として、最大フローを用いた事例を示す。

(3) 交通量配分に基づく flow-dependent な機能評価（交通工学的アプローチ）^{8), 9), 10)}

最後に、より交通工学的な特性を重視した評価手法として、交通量配分を適用した flow-dependent な機能評価手法について検討を行った。まず、平常時の道路網を対象とした交通量配分手法として有用な分割配分法を、地震災害時にも適用できるように修正を施した「修正分割配分法」を提案し、配分結果に基づいて、被災道路網の flow-dependent 指標（OD 交通量、走行時間、走行距離、など）を算出する評価手法を提案した。本稿では、モンテカルロ・シミュレーションにより被災パターンを多数生成して、上記手法を適用することにより、機能低下の特性を多面的に考察した事例を示す。

2. ネットワーク・トポロジーに基づく flow-independent な機能評価

ここでは、阪神・淡路大震災における被災地周辺の高速道路ネットワークを対象として、その物理的被災および復旧状況とネットワークが保持した機能水準との関連を、トポロジカルな flow-independent 指標により明らかにする。さらに、数種のネットワーク施設水準を指標化し、ネットワークの機能水準としての自動車交通動態と時系列的な比較検討を行った。

自動車交通量の調査対象としたのは、阪神高速道路全線、中国自動車道（吹田 JCT～美作 IC）、名神高

速道路（大津 IC～西宮 IC）、舞鶴自動車道（吉川 JCT～舞鶴西 IC）、第二神明道路（須磨 IC～明石西 IC）である。期間は震災前の 1994 年 10 月から阪神高速道路 3 号神戸線の全線復旧後の 1996 年 10 月までとした。自動車交通量データについては、調査範囲の境界線および各インターチェンジ（もしくは出入口）において観測された自動車の流入・流出台数が、上下線別に月平均日交通量にまとめられたデータを入手した。これらにインターチェンジ間距離、通行開放状況を加えてデータベース化したうえで、断面交通量の算出や各種指標を算出した。

図 1 は、阪神高速道路 3 号神戸線における上下線合計交通量の断面ごとの変化を图示したものである。地震後、東西交通が完全に分断され武庫川以西の交通量はゼロとなった。1996 年 2 月 19 日に摩耶～京橋間、7 月 17 日に京橋～柳原間、8 月 10 日に深江～摩耶間と部分的に復旧が進んだが、断片的な供用のために交通量はさほど増加していない。しかし 1996 年 8 月 31 日に柳原～月見山間が復旧して第二神明道路と接続した後は、摩耶以西の交通量が激増した。1996 年 9 月 30 日に全線が開通すると、大阪～神戸間の東西交通分断が解消され、平常より若干少ない交通量にまで回復した。このように、寸断された高速道路の利用実態が阪神高速道路 3 号神戸線のデータから明らかとなった。断片的に復旧が進められた期間では利用の伸びが鈍く、大阪～神戸間の連結性が回復するまで、交通機能が大幅に損なわれていた。

全ての路線について、このような通行開放区間と交通量の時系列変化を分析したうえで、ネットワークの施設水準と機能水準を表す以下の 5 種類の指標を算出して比較を行った。

- (1) 通行開放区間数 N (区間) ……通行可能な区間数
- (2) 通行開放区間の延長距離 L (km) ……通行可能な区間の距離の総和
- (3) 連続区間距離の二乗の総和 LC (km^2) ……各路線ごとに連続している（分断されていない）区間延長距離を二乗した値の総和
- (4) 重み付き連続区間距離の二乗の総和 WLC ($\text{台}^2 \text{km}^2$) ……(3)の区間延長距離に地震前交通量で重みを付けて二乗した値の総和
- (5) 区間自動車交通量 \times 区間距離の総和 V (台 km) ……区間自動車交通量とその区間距離の積の総和

(1)～(4)の指標はいずれも施設水準を表すものであるが、迂回による移動距離の増加や所要時間の増加、OD 交通の変化などの交通フロー特性を考慮したものではなく、いわゆる flow independent な指標である。

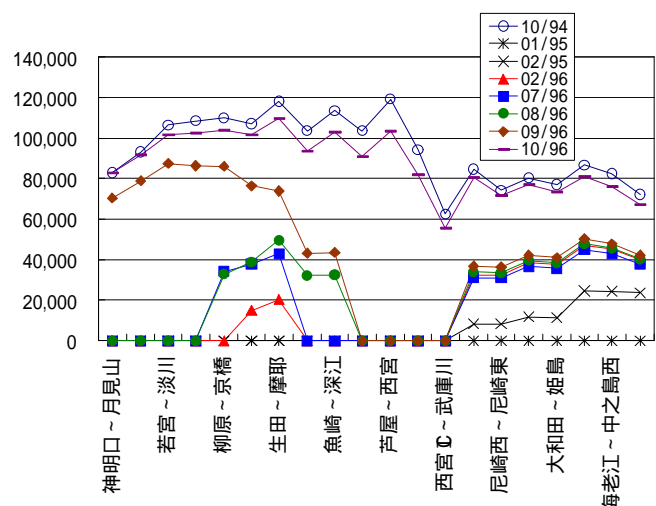


図 1 阪神高速道路 3 号神戸線における出入口間の日交通量の変化（上下線合計）

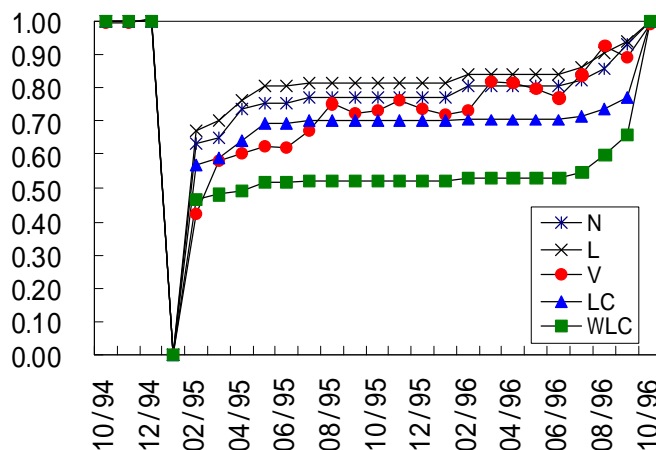


図 2 5 種類の機能評価指標の比較（各指標を地震前 3 ヶ月間の平均値で基準化）

また(5)の V は延べ自動車輸送キロに相当し、高速道路の機能水準を端的に表すと解釈できる指標である。対象としたネットワークは、阪神高速道路については3号神戸線、5号湾岸線、7号北神戸線、16号大阪港線のそれぞれ全線、中国自動車道については吹田 JCT～吉川 JCT、名神高速道路については吹田 JCT～西宮 IC としたネットワークである。

図2は上記の5種類の指標を地震前の3ヶ月間の平均値で基準化して示したものである。施設水準については全期間を通じて、 L 、 N 、 LC 、 WLC の順に大きな値をとっている。機能水準としての V は、地震後 LC にやや近い値をとっているが、5号湾岸線と7号北神戸線への迂回交通が漸増するに従って LC を上回った。その傾向は1996年3月頃からかなり顕著であるが、全体的には L および N をほぼ上限としている。つまり機能水準はほとんどの場合これらの施設水準を下回ると考えて良い。 WLC は地震前交通量が極めて大きかった3号神戸線の寸断の影響を強く反映し、1996年7月頃まではわずか0.5程度の値となっている。

施設水準と機能水準の指標比較の結果、迂回交通の増加傾向を含めて機能水準を施設水準で説明することが困難であるが、両指標が示す傾向の概略が把握でき、交通施設被害による交通機能への影響の評価と予測に役立てることが可能であると考えられる。

3. 最大フローに基づく flow-independent な機能評価

最大フローは、リンク容量が与えられたネットワークにおいて、特定の2点間を通過しうるフローの最大値であり、ネットワーク機能の評価基準として最も基本的な概念の一つである。道路交通網における最大フローは、ネットワークとして処理しうる交通容量に対応し、地震時に損傷を受けた道路ネットワークが、施設として保持しているサービス水準としての解釈が可能である。不明な点の多い震災時の交通需要や OD パターンの問題に立ち入る必要がないことから、被災道路網の機能性能を評価する指標として使用された実績も多い。ここでは、ネットワークの被災状態に対して、最大フロー最小カットの定理に基づく Ford-Fulkerson のアルゴリズムを適用して最大フローを求める。

道路網をリンク数 n のネットワークとしてモデル化して、リンク i の状態を破壊 ($x_i=0$) と非破壊 ($x_i=1$) の二値変数で表し、その期待値を要素信頼度(非破壊確率) p_i とする。道路網全体としてのシステムの状態をベクトル $S^k = \{x_1^k, \dots, x_n^k\}$ 、その発生確率を $Q(S^k)$ 、その場合のシステム評価関数を $G(S^k)$ とする。Li et al.¹¹⁾、¹²⁾ は、総数 2^n にのぼる状態空間の中から発生確率の高い順に状態ベクトルを列挙し、第 m 項 ($m < n$) までの部分的な状態列挙でシステム評価関数の上下限値を得るアルゴリズムを提案したが、リンク数が多い場合には厳密値への収束が極めて遅く、実用に適さなくなることが指摘された。そこで、未列挙の状態空間から限定的にサンプルをとるモンテカルロ・シミュレーションを補足的に適用する方法により、システム評価関数の期待値を次式により推定する。

$$G(m, N) = \sum_{k=1}^m Q(S^k) G(S^k) + \frac{\{1 - \sum_{k=1}^m Q(S^k)\} \sum_{j=1}^N G(S^j)}{N} \quad (1)$$

ここに N はシミュレーションの試行回数、 $G(S^j)$ は j 番目の試行における状態 S^j に対して求められたシステム評価関数の値を表す。

式(1)において、状態 S に対する最大フロー $F_{\max}(S)$ をシステム評価関数 $G(S)$ として用いた場合には、期待最大フローが求められる。また、平常時の最大フロー F_0 に対する機能水準を係数 r で表し、次式の「最大フロー $F_{\max}(S)$ が基準値 rF_0 を充足するか否か」により定められる二値変数システムを評価関数 $G(S)$ として用いた場合には、要求水準 r の達成確率としてのシステム信頼度が求められる。

$$B(S) = \begin{cases} 0 & (F_{\max}(S) < rF_0) \\ 1 & (F_{\max}(S) \geq rF_0) \end{cases} \quad (2)$$

システム信頼度は，特定のリンク i が非破壊のもとでの条件付信頼度 $P(1_i, p)$ と，破壊のもとでの条件付信頼度 $P(0_i, p)$ に分離して求めることが可能である．両者の差は Birnbaum の確率重要度

$$I^B_i = \frac{\partial P}{\partial p_i} = P(1_i, p) - P(0_i, p) \quad (3)$$

に相当し，リンク i の信頼性の改善によるシステム信頼性の改善効果を知るための感度指標として用いることができる．

解析対象とした道路ネットワークは図3に示すように，15 ノード 22 リンクの有向グラフでモデル化したものである．ノード D は被災都市で，図中に記された 2000, 1400, 700(台/時間)の交通容量を持つリンクを介して救援拠点 A, B, C から救援を受ける．被災時の通行可能確率はリンク信頼度 p で表され，被災したリンクの交通容量は 0 とする．A, B, C から D への平常時最大フローは，最小カットを構成するリンク (19, 23, 24) に規定され $F_0 = 5400$ (台/時間) である．被災時の要求水準としては高・中・低の 3 段階 ($r = 80, 50, 20\%$) を考え，被災時最大フローがそれぞれ $rF_0 = 4320, 2700, 1080$ (台/時間) を満たした場合にシステム機能が充足されるものとし，その確率を要求水準 r に対するシステム信頼度とする．リンク信頼度は簡単のため全リンクで一律とし，被災規模によって $p=0.1 \sim 0.9$ のように変化させた．状態列挙数は $m=2000$ ，シミュレーション試行回数は $N=8000$ 回とした．

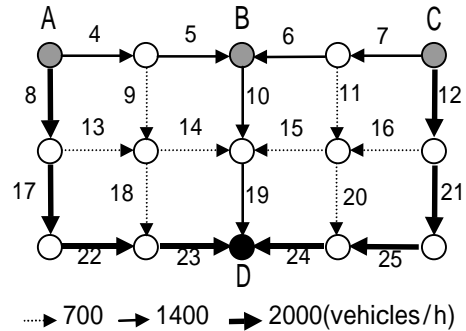


図3 仮想的な道路ネットワーク・モデル

図4はリンク信頼度と期待最大フローの関係を示し，図5は要求水準 $r=20, 50, 80\%$ に対するシステム信頼度を表す．リンク信頼度の低下とともに期待最大フローとシステム信頼度は急速に低下する．要求水準

が $r=20\%$ のように低い場合には，システム信頼度は比較的高い水準を保つことができるが，このような少量の交通容量を緊急時に活かすには，重要交通を優先させる厳重な交通規制が必要となろう．

図6は，リンク信頼度が低く ($p=0.3$)，要求水準も低い ($r=20\%$) ケースについて，確率重要度 I^B の大きなリンクの順に $P(1_i, p)$ と $P(0_i, p)$ を図示したものである．また図7はリンク信頼度と要求水準の種々のペアに対して，高い重要度を示したリンク位置を数本図示したものである．図6において，中容量の2本のリ

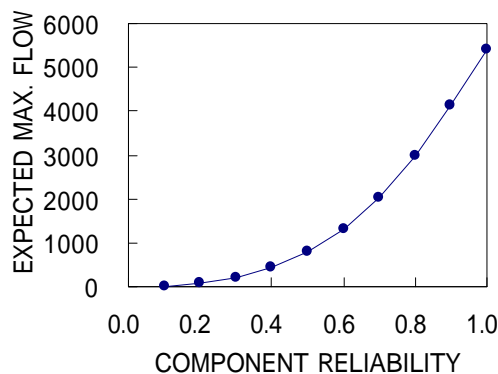


図4 リンク信頼度と期待最大フロー

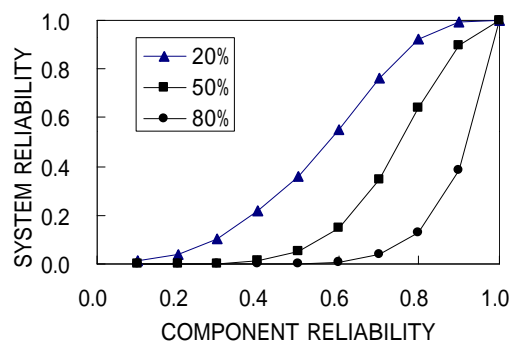


図5 リンク信頼度と要求水準のペアに対応するシステム信頼度

リンク(10, 19)の重要度が高く評価されたのは、この2本だけで救援拠点Bと被災地Dを容量1400(台/時間)で連結でき、被災地Dの孤立防止に効果的であるためである。また図7においては、冗長性の乏しい外郭の大容量リンクと被災地Dに直結するリンク19の重要度が高く評価され、幹線網強化の必要性を示唆している一方、冗長性に富む中央付近のリンクは単独リンクとしての重要度は低い。中信頼度・中要求水準のケース($p=0.6$, $r=50\%$)では、前二者の中間的な結果が得られている。また高信頼度・低要求水準($p=0.9$, $r=20\%$)のケースは、平常時の最大フローを規定する3本のリンク(19, 23, 24)の重要度が高くなっており、ボトルネック発生を回避することが重要であることを示している。低信頼度・高要求水準のケースはシステム信頼度が0.01を下回ることから、重要リンクを表示していない。実現性が低い要求水準であるために、被害許容を強いられる領域であるといえる。

数値計算例を通じて、リンク信頼度とシステムへの要求水準によって、リンク信頼度改善の優先順位が大きく異なることを示した。小規模災害には可能な限り平常時機能を維持し、大規模災害時には最低限の緊急ニーズを充足できるような道路交通システムが地震防災上重要である。システム全体に期待される機能性能の目標を明確に設定し、その実現のための戦略的な施設改善策が検討されるべきであろう。

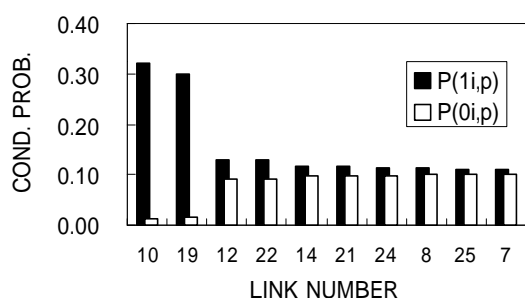


図6 リンクの非破壊・破壊を条件とする条件付信頼度 ($p=0.3$, $r=20\%$)

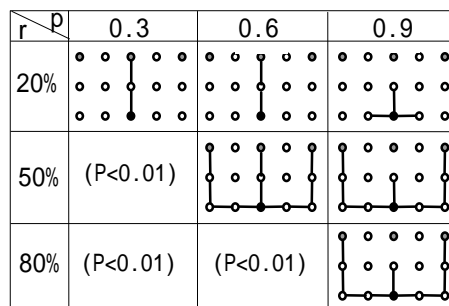


図7 リンク信頼度 (p) と要求水準 (r) のペアに対応する重要リンク (図3参照)

4. 交通量配分に基づく flow-dependent な機能評価

最後に、これまでのような flow-independent な機能評価法とは異なり、分割配分法に基づいた新たな災害時交通量配分手法による flow-dependent な評価指標によって震災時機能評価を行う簡便手法について紹介する。数値計算例として、阪神・淡路大震災において被災した道路ネットワークのモデルを用いたネットワーク機能評価例を示す。評価モデルは以下の3段階よりなる。

(1) 被災パターンの生成

ネットワークを構成する n 本のリンク k ($k = 1, 2, \dots, n$) の状態を、破壊(0)、非破壊(1)の二値変数ベクトル $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ で表し、その期待値としてリンク信頼度を $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} = \{E[x_k]\}$ で定義する。具体的には、被害がランダムに発生すると仮定し、リンク k の長さ d_k と単位長さあたりの期待被害箇所数(被害率) I_k から、 $p_k = e^{-I_k d_k}$ で算出する。これに基づいて、モンテカルロ・シミュレーションによって多数の被災パターンを生成する。

(2) 分割配分法による交通量配分

潜在的な OD 交通量は被災前後で変化しないと仮定し、各被災パターンに対して分割配分法¹³⁾を適用し

て OD 交通量配分を行い，ネットワークが保持しうる最大限の交通機能を推定する．ここでは文献 13)で提案された方法の配分終了条件を震災時に適するよう改変した．具体的な手順を以下に示す．

【Step 1】OD 交通量を N 分割した増分 OD 表を作成し， $i=1$ とする．

【Step 2】それまでのリンク配分交通量（1 回目は自由走行状態）に基づいて，走行時間関数よりリンク走行時間を算出する．容量に達したリンクは除去する（所要時間を無限大にする）．

【Step 3】すべての OD ペアについて時間的な最短経路を求め，到達可能な OD ペアについては最短経路に含まれるすべてのリンクに増分 OD を加算する．

【Step 4】到達不能となった OD ペアは，この回以降の配分対象から除外する．

【Step 5】すべての OD ペアが到達不能となるか， $i=N$ ならば【Step 7】へ．

【Step 6】 $i < N$ ならば $i=i+1$ として【Step 2】へ．

【Step 7】分割配分を終了し，リンク走行時間を算出してネットワーク評価を行う．

(3) 評価指標の算出

配分終了後，以下の評価指標を算出する．(a)，(b)はリンク指標，(c)は断面指標で添字 m は断面番号を表す．(d)，(e)は OD 指標で添字 i, j はセントロイド番号を表す．また(f)，(g)，(h)はネットワーク全体の指標で，「充足トリップ数」は道路網全体の交通処理能力を表し，「延べ走行距離」は充足 OD 交通の内訳と迂回の度合いを反映し，「延べ走行時間」はこれに加えて混雑の度合いを反映した指標である．

(a) リンク配分交通量 h_k ，(b) リンク走行時間 t_k ，(c) 断面交通量 $Q_m^S = \sum_{k \in S_m} h_k$ ，

(d) OD 別充足トリップ数 q_{ij} （発生・集中可能交通量），

(e) セントロイド別充足トリップ数 $Q_i^C = \sum_j (q_{ij} + q_{ji})$

(f) 充足トリップ数 $Q = \sum_i \sum_j q_{ij}$ ，(g) 延べ走行距離 $D = \sum_k h_k d_k$ ，(h) 延べ走行時間 $T = \sum_k h_k t_k$

以下では，図 8 のようにモデル化した阪神・淡路大震災における被災道路網を対象とした数値計算例を示す．ノード数 30（うちセントロイド数 8），リンク数は 100 で，それぞれの道路規格に基づいて設計交通容量と自由走行速度を定めた．走行時間関数は BPR 曲線における係数を $a=0.96$ ， $b=1.2$ とし，可能交通容量（設計交通容量の 1.113 倍と仮定）に達した

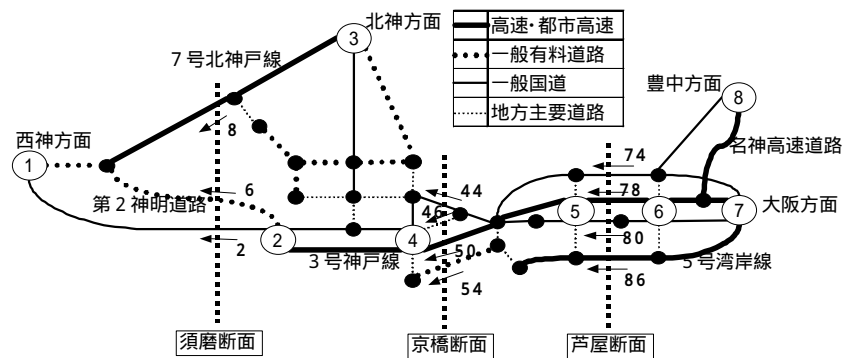


図 8 阪神地域の高速道路網のネットワークモデル

リンクへの配分は行わないとした．OD 交通量は阪神高速道路公団における平成 6 年度センサスを参考にして求めた．このモデルでは，地震前のトリップ総数 $Q=33,200$ （台/時），延べ走行距離 $D=803,389$ （km・台），延べ走行時間 $T=24,637$ （時間・台）である．被害率 I_k を全体で一様と仮定して，モンテカルロ・シミュレーションによりランダムな被災パターンを生成した．被害率は 0.005～0.4 の範囲で 10 種類設定し，それぞれ 500 回，延べ 5000 回の被災パターンに対する配分計算を行った．

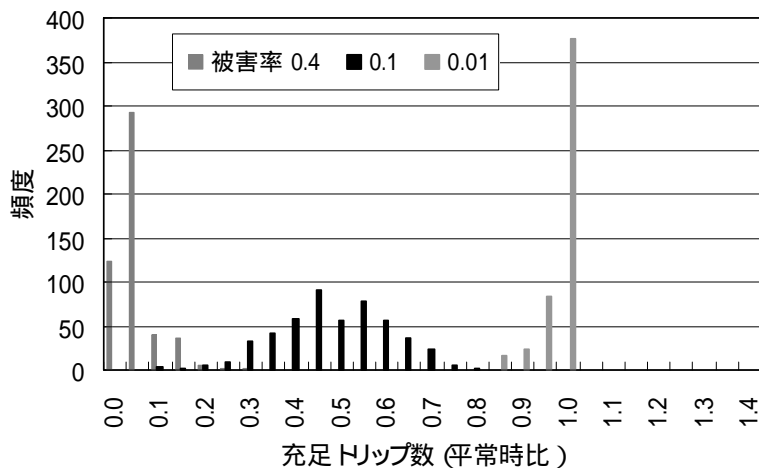


図9 3種類の被害率による充足トリップ数の頻度分布（シミュレーションの試行回数は各500回）

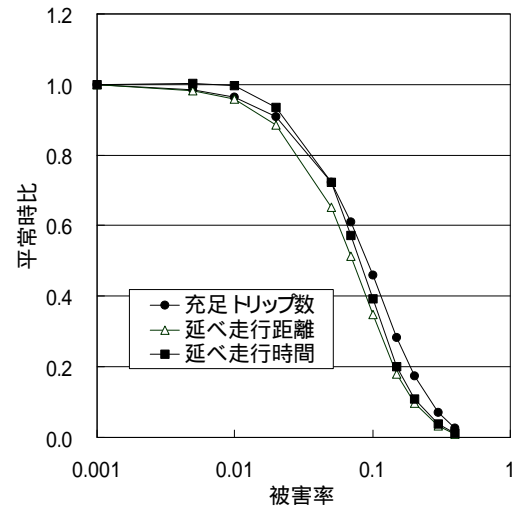
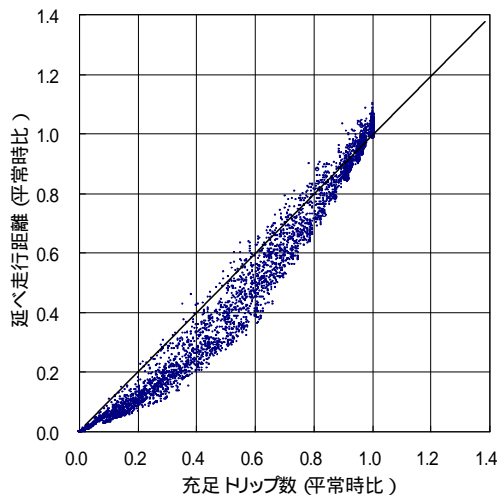
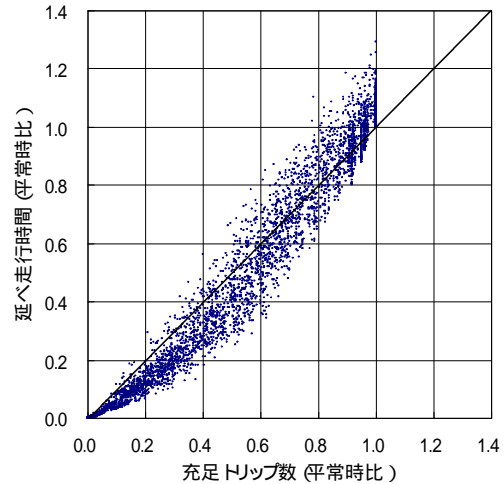


図10 被害率と各評価指標の関係（500回のシミュレーション試行の平均値，平常時の値で基準化）



(a) 充足トリップ数と延べ走行距離



(b) 充足トリップ数と延べ走行時間

図11 充足トリップ数，延べ走行距離，延べ走行時間の相関関係（5000回のシミュレーション試行結果の全プロット，平常時の値で基準化）

図9は，被害率 0.01，0.1，0.4 の3 ケースについて，500 回の試行での充足トリップ数（平常時の値で基準化）の頻度分布である．災害時に平常時の値を上回ることがないため，1 を上限値とした分布である．被害率 0.01 の場合，全トリップが完全に充足された回数が 211 回あった．被害率 0.1 の場合には平均値 46% の周りに広くばらついている．被害率 0.4 ではトリップ数が完全に 0 となった回数が 124 回あった．図10は，各被害率における500回のシミュレーション試行で算出された評価指標(f)，(g)，(h)の平均値（平常時の値で基準化）である．被害率が0.02を超えると著しい機能低下が生じていることがわかる．

図11(a)は5000回のシミュレーション結果を用いて充足トリップ数と延べ走行距離の相関関係を示したものである．被害率が高い領域（図左下）では，長距離トリップの充足率が低下するため1:1線の下方に集中している．一方，被害率が低い領域（図右上）では，充足トリップ数の低下に加えて迂回による延べ走行距離の増加が認められる．図11(b)は充足トリップ数と延べ走行時間の相関である．全体的に，縦軸

の値の下限値は図 1 1 (a)とほぼ同じであるが，上限値は図 1 1 (b)の方が広いばらつきを示す．特に被害率が低い領域（図右上）では 1:1 線の上方のプロットが多く，迂回と混雑の影響がより顕著に現れている．以上により所定の条件下で，ランダムな被災パターンに対して 3 種類の評価指標がとりうる値のおおよその範囲が明らかとなった．つまり，被災に伴う交通挙動として「トリップの中止」，「迂回による走行距離増加」，「混雑による走行時間の増加」を考慮した道路機能のマクロ的な評価を行うことができる．こうした検討を事前に行うことにより，特定の被災パターンにおける交通状況の位置づけを視覚的に明らかにすることが可能になる．この他，図示は省略するが，OD 別評価，断面別評価，リンク別評価により，それぞれ以下のような考察が可能であることが明らかにされている．

- (1) OD 別評価・・・セントロイドごとのトリップ充足率の状況を調べることにより，孤立しやすいノードの特性を明らかにしたり，OD トリップ長とトリップ充足率の関係から，迂回経路の存在とリダンダンシーとの関連について考察することができる．
- (2) 断面別評価・・・断面構成リンクにおける配分率が，被害率によってどのように変化するかを把握することが可能である．またネットワーク機能の低下に伴い，断面交通量の相関関係が弱くなることが明らかにされている．
- (3) リンク別評価・・・直列的に接続されたリンク間では，配分交通量が正の相関を示す一方，並列的に接続されたリンク間では，負の相関を示すことが明らかにされた．ネットワーク内におけるリンクの連携的な機能に注目すると，ネットワーク機能の低下に伴って有機的な結合が失われ，リンク間の相関関係が弱くなることが明らかにされた．

5．おわりに

本稿では，(1) グラフ理論的アプローチ，(2) ネットワーク理論的アプローチ，(3) 交通工学アプローチ，の 3 種類のアプローチに基づく道路交通ネットワークの機能評価手法について，筆者のこれまでの研究を紹介した．個人的には，「震災時道路交通の機能評価および信頼性評価」というテーマについては，1989 年ロマ・プリエタ地震以降，一貫して取り組んできたテーマであるが，阪神・淡路大震災以降，地震工学，交通工学，システム工学などの異分野交流が非常に活発化したことは，研究を進めるにあたって大きな推進力となった．道路施設の耐震設計，耐震補強，復旧戦略などを考える上で，グラフ理論，ネットワーク理論，交通工学，システム工学などの知見は，今後，ますます不可欠の要素となってゆくであろうと考えている．

なお，時間紙面の制約上，それぞれについての詳細に立ち入ることができなかったが，以下に挙げた参考文献のうち，3), 4), 5), 7), 8), 9), 10) については，<http://www.cive.gifu-u.ac.jp/~nojima/works.htm> において PDF ファイルをダウンロードできるので，詳細に興味を持たれた読者はアクセスされたい．

参考文献

- 1) 能島暢呂：交通システムの地震被害と災害対応について - 1994 年ノースリッジ地震と 1989 年ロマ・プリエタ地震の事例 - ，第 1 回地震防災シンポジウム「大都市を襲う地震災害と地震防災の課題 - ノースリッジ地震災害を教訓として」，日本建築学会，1994.10，pp.41-48．
- 2) 能島暢呂：高速道路網の地震災害による交通機能への影響評価，第 2 回都市直下地震災害総合シンポジ

- ウム論文集，文部省科学研究費補助金特定領域研究「都市直下型地震」総括班，1997.11，pp.431-434.
- 3) Chang, S. E. and Nojima, N., "Measuring Lifeline System Performance: Highway Transportation Systems in Recent Earthquakes," Proc. of the 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, USA, 1998, Paper No.70, 12p.
 - 4) Chang, S. and Nojima, N. "Measuring Post-Disaster Transportation System Performance: The 1995 Kobe Earthquake in Comparative Perspective," Transportation Research Part A (in press).
 - 5) 能島暢呂：ネットワーク信頼性解析に基づく道路網の地震防災戦略について，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1293-1296，1997.7.
 - 6) Nojima, N., "Performance-Based Prioritization for Upgrading Seismic Reliability of a Transportation Network," Journal of Natural Disaster Science, Vol.20, No.2, 1999, pp.57-66.
 - 7) 能島暢呂・山中敏裕：道路ネットワークの地震時機能信頼性解析に基づく施設改善の重要度評価，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，1998.11，No.J-12, pp.3205-3210.
 - 8) 能島暢呂：道路交通ネットワークの地震時機能評価モデルの開発，第 3 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，文部省科学研究費補助金特定領域研究「都市直下型地震」総括班，1998.10，pp.513-516.
 - 9) 能島暢呂・杉戸真太・福岡淳也：想定地震による被災道路網の性能評価，第 4 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，文部省科学研究費補助金特定領域研究「都市直下型地震」総括班，1999.10，pp.175-178.
 - 10) Nojima, N. and Sugito, M., "Simulation and Evaluation of Post-earthquake Functional Performance of Transportation Network," Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000，paper No.1927 (CD-ROM).
 - 11) Li, V. O. K. and Silvester, J. A., "Performance Analysis of Networks with Unreliable Components," IEEE Transaction on Communications, Vol.COM-32, No.10, pp.1105-1110, 1984.
 - 12) Lam, Y. F. and Li, V. O. K., "An Improved Algorithm for Performance Analysis of Networks with Unreliable Components," IEEE Transaction on Communications, Vol.COM-34, No.5, pp.496-497, 1986.
 - 13) 飯田恭敬：道路網の最大容量の評価法，土木学会論文報告集，第 205 号，1972.9，pp.121-129.