道路閉塞からみた道路網防災性能の構造の解明

パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の
防災性能評価に関する基礎研究（その4）THE STRUCTURE OF DISASTER MITIGATION PERFORMANCE OF ROAD
NETWORK FROM THE VIEWPOINT OF ROAD BLOCKADEThe basic study on the evaluation of disaster mitigation performance
of the local area road network based on percolation theory

久貝 壽之*, 加藤 孝明**

Toshiyuki KUGAI and Takaaki KATO

We have constructed the evaluation theory to post-earthquake performance of road network on district scale based on Percolation Theory. In this paper, we will apply this theory to the actual urban improvement planning of municipalities. Firstly, we discuss what is suitable to be used as a road network performance index. Secondly, we clarify what kinds of factor in urbanized area explain the performance. Finally, we structurally show the relation between the performance index and the explanatory factors of urbanized area. The derived knowledge will contribute to realize performance-based urban planning.

Keywords : road network , road blockade , activity territory of fire department , percolation theory , finite-size scaling law , evaluation of disaster mitigation performance

道路網, 道路閉塞, 消防隊活動領域, パーコレーション理論, 有限サイズスケーリング, 防災性能評価

1.はじめに

市街地の防災性能の向上は日本の重要な課題である。特に密集市街地の改善は火急の課題であり、都市再生本部では、都市再生プロジェクトにおいて、密集市街地の中でも全国で8,000ha指定されている重点地区を今後10年で最低限の安全を確保することを目標としている。この課題に対して、市街地の性能評価に基づいて適切な計画策定と事業推進を図り、市街地の防災性の向上を効果的、かつ、効率的に行っていく必要がある。一般に、防災都市づくり計画においては、問題のある区域の抽出、その区域での整備方針の策定という二段階で計画づくりが行われる。例えば、東京都の防災都市づくり推進計画では、都領域の大きさでの評価を行い、重点整備地域として重点的に施策展開を行う区域（防災生活圏）を抽出し、その区域において市街地整備のプログラムを作成している。

密集市街地の防災上の問題は、阪神淡路大震災で明らかになったように、市街地火災の危険性と道路閉塞を原因とする緒活動の困難性である。市街地火災に対する防災性能評価については、既に学術研究^{1) 2) 3) 4)}の蓄積があり、実務的な評価においても簡便な指標を使って評価がなされ、市街地整備の計画づくりの中に位置づけられている。しかし一方の道路閉塞による活動困難性については、十分に考慮がなされているとはいいがたい。例えば、東京都の場合、市街地の防災性能として市街地火災の防災性能の代替指標である不燃領域率が用いられているが、道路閉塞による活動障害の性能指標は位置づけられていない。道路閉塞に関する既存研究としては、阪

神淡路大震災における街路の道路閉塞に着目し、周辺市街地と道路閉塞状況との関係を分析したもの⁵⁾、地区レベルの実際の道路網がデータとして与えられたときに道路閉塞状況による道路網の機能障害を評価するもの^{6) 7) 8)}がある。前者は、個々の道路の閉塞を説明しているが、面的に広がる道路網の防災性を評価していない。一方、後者は、データの制約、或いは、計算の煩雑さから、都道府県レベル、全市レベルの領域の大きさを対象とできない。また、市街地の防災性能を精度良く把握できるものの、特定の市街地の固有の問題であり、市街地の空間要素と防災性能の大局的な関係を明確に理解できない。そのため、市街地整備の方針を検討する素材として利用しにくい。これまでの実際の計画づくりの中に道路閉塞による活動障害が位置づけられない理由の一つとして評価技術の限界が挙げられる。市街地整備の計画づくりに必要とされる評価手法は、計画づくりのプロセスに対応したものである。すなわち、都道府県全体、市全体を対象として町丁目程度の領域の大きさを単位に、道路閉塞による活動障害を評価することができ、かつ、防災性能上脆弱であるとされる区域において市街地整備の方向性について指針を与えるものである。

著者らは、拙著^{9) 10) 11)}において道路閉塞からみた道路網の防災性能の評価理論を構築してきた。道路閉塞による活動障害をモデル化し、パーコレーション理論を拠所として客観的に論理を積み上げた評価手法である。既発表論文では、初歩的なモデルによる基礎理論の構築と道路閉塞による活動障害の特性の把握⁹⁾、実際の現象

* 東京消防庁 消防司令・博士(工学)

** 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻
助手・博士(工学)

Fire Captain, Tokyo Fire Department, Dr. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Urban Eng., Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

表 1：読み替え項目

道路網モデル		パーコレーションモデル
交差点		サイト
道路		ボンド
通行可能道路		「占有」されたボンド
理想的な市街地（完全な正方格子）に 対し不足している道路の割合 p_L		ボンドが占有される確率 p
1本の交差点間道路の道路閉塞率 p_b		
通行可能確率 $p = (1 - p_L)(1 - p_b)$		
防災性能	消防車両が対象地域内を通過 できる確率	領域の端から端まで貫通する クラスターが存在する確率： $R(L, p)$
	最大活動可能区域率	最大クラスターの系の大きさに 占める割合＝最大クラスター率： $\theta(L, p)$
	活動可能区域の平均の大きさ	クラスターサイズのボンド 当たりの期待値＝平均クラスター サイズ： $\chi(L, p)$

図 1： $\chi(L, p)$ 同定結果 横軸 $(p - p_c)L^{1/ν}$ 縦軸 $\chi(L, p)L^{-2/ν}$

図 2：一律な通行可能確率分布 図 3：二等辺三角形分布

に即したモデルへの評価理論の拡張¹⁰⁾，そして実際の市街地を対象とした検証により実際の市街地データを対象とした評価が可能であることを実証している¹¹⁾。本評価理論の特徴は、町丁目程度のスケールを評価単位とし、それを単位とする入手が容易な集計データで評価を行うことができること、都道府県、全市レベルの区域を対象とした評価が可能であることである。道路閉塞の観点から市街地整備の計画づくりにおいて有用な手法であると言える。これまでの論文では、評価理論の構築を目的としており、評価理論の客観性を強く意識し、モデル構築、理論構築を主眼として記述されている。その結果、実際の計画策定の現場において活用する際の十分な知見を得たものにはなっていない。

そこで、本稿では、これまで構築してきた評価理論をもとに、実際の計画策定の現場において活用する際に必要とされる具体的な知見を与えることを目的とするものである。具体的には、計画策定の第一段階である都道府県、全市レベルの領域から評価によって防災性能上脆弱な区域を抽出する際に、どのような防災性能指標を用いることが望ましいか、第二段階である抽出された区域において市街地整備方針を検討する際の手がかりとして市街地の防災性能がどの

ような市街地指標によって説明されているか、を明らかにする。前者については、2つの防災性能指標を取り上げ、その特性を明らかにし、計画策定の現場における使い方を提示した。後者については、市街地の防災性能指標と市街地指標との関係を構造的に明らかにし、防災性能を高めるために必要とされる市街地整備の方向性を実務的な視点から読み取ることができるようにした。

2. 前報まで構築された道路網の防災性能評価手法の概要

2.1. 初歩的なモデルによる基礎理論の構築と道路閉塞による活動障害の特性の把握

第一報⁹⁾では、震災時の地区レベル道路網における活動障害の発生とボンド過程のパーコレーションモデル^{12) 13) 14)}との類似性に着目し、道路網を正方格子とし、道路が閉塞する確率を全域一様とした単純なモデル(図2)を用いて地区レベル道路網の防災性能、すなわち道路閉塞による活動障害の特性を明らかにした。表1に示すように防災性能として、パーコレーションモデルの「クラスター」の挙動を表す3つの関数、 $R(L, p)$ 、 $\theta(L, p)$ 、 $\chi(L, p)$ に着目し、これを次のように解釈することによって防災性能を代替するとした。順に「消防車両が対象地域内を通過できる確率」、「最大活動可能区域率」、「活動可能区域の平均の大きさ」という解釈である。また、評価単位の大きさ(格子の大きさ L)の評価結果に与える影響を取り上げ、各関数について「有限サイズスケーリング仮説」が適用範囲で成立することを示し(図1)、任意の大きさの評価対象に対して統一的に評価できることを示した。

2.2. 実市街地における現象に即したモデルへの評価理論の拡張

第二報¹⁰⁾では、第一報で単純にモデル化していたところを実際の市街地の状況に適合するように拡張した。第一報のモデルでは、すべての交差点間の道路(道路リンク)は一律な通行可能確率としていたが、本来、実際の市街地では道路幅員、沿道建物の耐震性等の違いにより一律ではない。このことを考慮することとし、モデルを実態に適用するための検討を行った。まず、道路リンクの通行可能確率 P の分布の特性を実際の市街地を想定したモデルにおいて求め、 P の度数分布の形状が概ね三角形となることが得られた(図3)。さらに、各リンクの通行可能確率がこうした分布に従う場合でも、第一報の単純なモデルの仮定、即ち、すべての道路リンクの通行可能確率が一律に平均値であるとしても評価結果が変わらないことが確認された。同様に有限サイズスケーリング仮説も成り立ち、実市街地モデルにおいても第一報で構築した評価理論が適用可能であることが確認された。

2.3. 実際の市街地を対象とした検証

第三報¹¹⁾では、本評価手法の精度の検証を行った。本手法は、比較的容易に入手が可能な建物や道路等の町丁目等を単位とする集計データから道路網の防災性能を評価する手法である。ここでは、本手法による結果の妥当性を測るため、建物データと幅員付の道路中心データを含む2500分の1のGISデータを用いて、「ミクロなモデル化手法」を構築した。この方法は沿道建物を1棟毎に建物高さ等の属性や位置を特定し、建物倒壊確率を計算する等、詳細なデータを用い、かつ、道路閉塞のメカニズムを反映させた精緻なモデルによって各道路の閉塞確率を導き、実際の市街地の状態に即して道路網の防災性能を評価するものである。評価精度の検証では、ミク

ロ化手法による評価結果を真の値とみなして、本評価理論の評価結果との比較を行った。その結果、両者の評価結果は、平均値としてはほぼ一致し、本評価手法は十分な精度を有していることが検証された。

3. 本論文の目的

本論文の目的は、計画策定の第一段階である都道府県、全市レベルの領域から評価によって防災性能上脆弱な区域を抽出する際に防災性能指標を用いることが望ましいかを明らかにすること、また、計画策定の第二段階である抽出された区域において市街地整備方針を検討する際の手がかりを得るために、市街地の防災性能と市街地指標の関係の構造を明らかにすることの二点である。

まず、都府県レベルの領域の大きさから道路網の防災性能上脆弱な町丁目レベルの地区を抽出するとき、用いる防災性能指標について考察する。第三報で得られた評価値に指標として、道路リンクの本数をベースとする防災性能指標と、道路リンクの長さをベースとする指標について考察する。次に、道路網防災性能の構造について把握するため、道路網の防災性能とそれに寄与する市街地指標との関係を明らかにする。この両者の関係を構造的に理解することができれば、市街地整備計画において行うべき対策の方向性を理解することができる。道路網防災性能に寄与するものは、道路リンクの通行可能確率であり、道路リンクの通行可能確率は、道路リンクの閉塞確率及び道路リンク不足率によって説明され、さらに道路閉塞確率は沿道建物の数や耐震性等と関係している。本稿では、すべての関係を構造的に明らかにする。

4. 道路網の道路閉塞に基づく防災性能指標

4.1. はじめに

市街地整備計画の第一段階では、防災上問題のある区域の抽出を行う。ここでは、どのような防災性能指標を利用すべきかを考察する。前報までに、3つの性能指標 R , χ , θ を示してきた。しかし実際に使う場合、このうち、クラスターの平均の大きさ χ (「活動可能区域の平均の大きさ」)、最大クラスターの大きさ θ (「最大活動可能区域率」) は、再解釈が必要とされる。クラスターの大きさの概念は、交差点 (本研究ではノードと呼ぶ) 間の道路 (本研究ではリンクと呼ぶ) の本数に対応するものである。そのため、震災後の活動可能区域の大きさは、活動できる道路リンクの数ということになる。活動可能区域を総距離で捉えようとすれば、道路リンクの長さがすべての地域で一樣という仮定が必要とされる。この仮定が成り立てば、評価値をそのまま活動区域の総距離と読み換えることが可能であるが、そうでない場合は、同じ評価値であっても活動可能区域の距離は異なる。例えば、都心業務地区のように道路リンクの密度が高い、即ち、道路リンクの短い地域と郊外の耕地整理のみの市街地のように道路リンク密度が小さい、即ち、道路リンクの長い地域では、評価値 (道路リンク本数) が同じであったとしても、震災後の活動区域の総延長距離が同じとは言えない。

一方で、震災時の活動ニーズという観点でみれば、道路が建物からの交通需要に応じて存在すると仮定し、かつ、震災後に必要とされる活動量が交通需要に比例していると仮定すると、1つの道路リンクに対する必要とされる活動量は、両地区で等しくなり、市街地

の防災性能として総距離を考えるよりも道路リンクの本数とする方が妥当と言える。

本章では、計画策定の現場において実際に用いる防災性能指標として上記の二つ、すなわち、道路リンクの本数、並びに道路リンクに距離の概念を入れる場合の特性を分析し、防災性能指標の使い方を提示する。以下では、クラスターの平均の大きさ χ (「活動可能区域の平均の大きさ」) を取り上げて論ずる。

4.2. 道路リンクの本数ベースの防災性能

これまで構築した評価理論で与えられる「活動可能区域の平均の大きさ $\chi(L, p)$ 」を用いて、道路リンクの本数ベースの防災性能を $\chi(L, p)$ 値が各町丁目の全道路リンク数に対し占める割合と定義する。

$$ACLN = \frac{\chi(L, p)}{ALN} \quad [1]$$

$ACLN$: 道路リンクの本数ベースで示す防災性能指標

ALN : 対象領域における道路リンク総本数

この指標は、町丁目内の総道路リンク数に対して地震時に人や車両の活動できる道路リンクのつながりの大きさが全体に対する割合を表すものである。

図4は、東京都特別区及び特別区南部を対象に評価を行った結果である。なお、地表最大速度 PGV は、52.5kine とした。図では、防災性能ランクを防災性能指標値 0~1 を 0.2 刻みで5ランクとし、防災性能が高い方から順に青色から赤色に着色した。

特徴をみると、環状七号線周辺の中野、杉並、目黒、世田谷、大田、足立各区の木造建物密集市街地において性能ランクが低く、一方、千代田区や中央区など耐火造建物が多い地域では性能ランクが高い結果が得られている。東京都特別区南部を拡大してみると、性能ランクが千代田区から港区、品川区へと段階的に変化しており、耐震性が相対的に高い耐火建築物が多い地域から木造・防火建築物が多い地域へ、道路状況が良い地域から悪い地域へというように地域特性の違いを反映したものになっている。道路リンク数をベースに示す防災性能指標は地域の特性を反映したものとなっている。

4.3. 道路リンクの長さベースの防災性能

人の避難の可能性、消防車両の水利部署位置から消火ホース延長可能性等、距離の概念が重要となる場合が少なくない。道路リンク数をベースとする防災性能指標には、道路リンク長さの概念が含まれておらず、距離の概念が必要とされる場合、評価誤差が生じる可能性がある。

そこで、ここでは、防災性能に距離の概念を含ませることとし、各町丁目の道路1本あたりの平均道路リンク長さを道路リンクの本数ベースで示す防災性能指標 $ACLN$ に乗じたものを道路リンクの長さをベースとする防災性能指標と定義し、その評価結果の特性を考察する。

$$ACLL = ACLN \times ALLH \quad [2]$$

$ACLL$: 道路リンクの距離ベースで示す防災性能指標

$ALLH$: 対象領域における平均道路リンク長さ

図5に東京都特別区及び特別区南部を対象とした評価結果を示す。地表最大速度 PGV は 52.5kine とした。道路リンクの本数ベースで

(a) 特別区 (52.5km²)

(b) 特別区南部 (52.5km²)

図4：道路リンクの本数ベースで示す町丁目防災性能ランク結果

(a) 特別区 (52.5km²)

(b) 特別区南部 (52.5km²)

図5：道路リンクの長さで示す町丁目別防災性能ランク結果

示す防災性能の各ランクにおいて得られた町丁目数と同数となるように、道路リンクの長さで示す防災性能結果についてランク分けを行った。赤色から青色になるほど道路網の防災性能としては高い。

図5より、性能ランクの低い地域は環状七号線周辺の品川、中野、杉並、足立各区の木造建物密集市街地や、新宿区や豊島区に一部にもみられる。一方、性能ランクの高い地域は千代田区や中央区など耐火建築物が多い地域や湾岸部、さらに大田区、世田谷区、練馬区など一部の市街地にもみられる。全体の傾向としては図4と同様の結果である。

次に本数ベースと長さベースの評価結果の違いを詳細にみるために、両者のランクの差を比較してみた。図6は、道路リンクの本数ベースの性能ランク（図4）から長さベースの性能ランク（図5）を減じたものである。湾岸部の工業地域、都心の業務地区、団地において長さベースの評価値が上がっている。一方、23区周縁部において、ランクの下がった区域が散見される。いずれも町丁目による平均道路リンク長さの違いを反映したものである。なお、図7は各町丁目における平均道路リンク長さを示したものである。

4.4.まとめ

以上のように本数ベース、長さベースの評価値について、その特徴を述べ、比較を行った。大局的には両者の違いはそれ程大きくなく、いわゆる密集市街地等、道路閉塞による諸活動の障害という観点から脆弱であるとされる区域を抽出することは可能である。ただし、詳細にみると、平均道路リンク長さが大きい町丁目では本数ベースと比較し、長さベースの評価値で性能ランクが高くなるという傾向がある。

結論としては、地域から道路網の防災性能上脆弱な地区を抽出するには、道路リンク数ベースのものでも、距離ベースのものでも利用可能である。評価対象全体の平均道路リンク長さのばらつきが大きい場合、長さベースの評価値の特徴を考慮した上で、評価の目的に応じて利用する指標を選択すればよいといえる。

5.防災性能と市街地指標との関係構造の解明

5.1.はじめに

防災性能上脆弱とされた区域において市街地整備方針を検討する際、市街地の何をどの程度、改善すれば、防災性能を改善すること

(a) 特別区

(b) 特別区南部

図6：リンク数で示すランカーリンク距離で示すランク__比較

(a) 特別区

(b) 特別区南部

図7：平均道路リンク長さ

ができるかが重要な論点となる。市街地の防災性能指標と強い関係のある市街地指標が特定され、両者の関係が構造的に明らかになれば、防災性能を高めるために必要とされる市街地整備の方向性を実務的に読み取ることができるようになる。また、特定された市街地指標は市街地の改善の進捗度を測る指標としても有用と考えられる。

図8：ミクロなモデル化手法による評価値と推定値との比較

5.2.防災性能指標の基本構造

通行可能確率 p と道路網の防災性能指標である活動可能区域の平均大きさ $\chi(L, p)$ との関係は、図1に示す有限サイズスケリング関数で表される。

$$\chi(L, p) = L^{1/\nu} f_{(sc)}((p - p_c)L^{1/\nu}) \quad [3]$$

ただし、 $\nu = 4/3$ ， $\gamma = 43/18$ ，閾値 p_c は、正方格子パーコレーションモデルボンド過程の場合、 $1/2$ である。

図1及び式[3]より、通行可能確率 p の増減が、すなわち道路網防災性能の増減に寄与していることがわかる。防災性能は、図1に示された有限サイズスケリング関数で表されたものが基本である。前章で述べたように本数ベースとするか、距離ベースとするかにより防災性能指標の値は異なるが、基本構造は変わらない。有限サイズスケリング関数は、通行可能確率 p と道路網の格子数 L が変数となっている（図1、式[3]）。道路網の格子数 L は、評価単位の大きさの違いによる補正であることをふまれば、防災性能指標を説明するものは通行可能確率 p と考えてよい。

通行可能確率 p は、本評価理論のモデルの定義により、評価対象町丁目の平均道路閉塞確率 p_b と道路リンク不足率 p_L から求められる。

$$p = (1 - p_b)(1 - p_L) \quad [4]$$

平均道路閉塞確率 p_b 、道路リンク不足率 p_L 、いずれもさらに市街地指標で説明されるものである。平均道路閉塞確率 p_b については、道路閉塞に関する既存研究^{5) 6) 7) 8)}、第三報で検討した「ミクロなモデル化手法」で用いた道路閉塞モデルにみるように、i) 沿道建物棟数、ii) 建物倒壊率（建物構造や老朽度を含む）、iii) 建物階層、iv) 道路幅員、v) 車両幅員、等が考えられる。

$$p_b = f(n, br, bh, rw, cw) \quad [5]$$

沿道建物棟数： n 、建物倒壊率： br 、建物階数： bh 、道路幅員： rw 、車両幅員： cw

道路リンク不足率 p_L については、本評価理論のモデルの定義によれば、実際に存在する交差点数（ノード数）から正方格子の大きさを特定した上で、実際のリンク数と完全正方格子におけるリンクの総数との比と定義されている。したがって、道路リンク不足率 p_L の説明変数は、i) 道路網に関する道路リンク数、ii) 交差点数、iii) 行き止まり点数、となる。

$$p_L = f(l_m, n_m, d_m) \quad [6]$$

道路リンク数： l_m 、交差点ノード数： n_m 、行き止まり点数： d_m

以上が、道路網防災性能と通行可能確率 p との関係、さらに通行可能確率 p と平均道路閉塞確率 p_b および道路リンク不足率 p_L との関係である。防災性能 $\chi(L, p)$ を向上させるために、これら p_b および p_L 値を低減させる必要がある。さらに、 p_b および p_L 値それぞれに寄与する市街地パラメータとの関係が分かれば、防災性能を向上させるためにどの市街地指標を増加させればよいのかの手がかりを得ることができ、市街地整備方針を検討する貴重な基礎資料となり得る。

5.3.平均道路閉塞確率 p_b の構造

本節では、平均道路閉塞確率 p_b と市街地指標との関係を重回帰分析を用いて明らかにする。

第三報でミクロなモデル化手法を構築した市街地データベースには、道路閉塞に関する可能性のある非常に多くの市街地指標がデータ化されている。例えば、構造別築年区分別沿道建物棟数、構造別築年区分別建物倒壊率、建物階数、道路幅員等である。

まず、この中から道路閉塞のメカニズムに即して説明力の高い変数の絞込みを行った。相関係数や主成分分析結果、及び、式[3]にみるように既存の道路閉塞に関する研究成果をふまえつつ絞込みを行った結果、平均道路閉塞確率 p_b に寄与する市街地指標として、以下の3つの変数が選択された。

- i) 1リンクあたり木造建物棟数（昭和45年以前築）
- ii) 平均道路幅員
- iii) 木造建物平均全壊率（昭和45年以前築）

また、既存研究をふまれば、ここで選定された市街地指標と平均道路閉塞確率が線形の関係にないことは明らかであることから、第二報において道路リンクの通行可能確率分布の特性を検討した際に構築した道路リンクの閉塞モデルを参考に、平均道路閉塞確率 p_b を導出するモデル式を構築した。

$$p_{b(w)} = 1 - k_{1(w)}(1 - br)^{k_{2(w)}n/rw} \quad [7]$$

$p_{b(w)}$ ：通行可能幅員 w (m) を考慮した平均道路閉塞確率

w ：消防車両等通行可能幅員：4 m

：歩行可能幅員：2 m

br ：木造建物平均全壊率（昭和45年以前築）

n ：1リンクあたり建物棟数

rw ：平均道路幅員

図9：道路網形状

$k_{1(w)}, k_{2(w)}$ ：回帰係数

ここで、式[7]を次式のように変形し、回帰分析を行った。

$$\log(1 - p_{b(w)}) = \log k_{1(w)} + k_{2(w)} \frac{n}{rw} \log(1 - br) \quad [8]$$

地表最大速度別に、式[8]左辺にはミクロなモデル化手法により得られた $p_{b(w)}$ 値を、式[8]右辺には町丁目毎に得られる br, n, rw をそれぞれ代入して、重回帰分析により、回帰係数 $k_{1(w)}, k_{2(w)}$ を導く。導かれた $k_{1(w)}, k_{2(w)}$ を式[7]に代入して、推定値 $\bar{p}_{b(w)}$ を求め、ミクロなモデル化手法により得られた値 $p_{b(w)}$ と回帰分析を実施する。その結果について表2に示す。この道路閉塞確率は消防車両を考慮し通行可能幅員を4mとして導出したものである。

同様に、人の避難可能性を考慮し通行可能幅員を2mとした場合の道路閉塞確率値について、ミクロなモデル化手法で得られる評価値 $p_{b(w)}$ と推定値 $\bar{p}_{b(w)}$ を比較した結果を図8に示す。さらに評価値と推定値とを回帰分析した結果について表3に示す。

表2および表3に示すとおり、いずれも重相関係数が高いこと、標準誤差が小さいことから妥当性がある結果と判断される。

表2：PGV別回帰係数 ($W=4m$ の場合)

PGV (kine)	k1	k2	標準誤差	重相関係数
45.0	0.968904	3.98854	0.026906	0.930925
52.5	0.947703	3.914041	0.038803	0.917474
60.0	0.924163	3.796889	0.051533	0.915208
67.5	0.897816	3.586142	0.062619	0.913735
100.0	0.77671	2.565173	0.085031	0.885923

表3：PGV別回帰係数 ($W=2m$ の場合)

PGV (kine)	k1	k2	標準誤差	重相関係数
45.0	0.989243	2.822313	0.027271	0.882472
52.5	0.984117	2.908027	0.040795	0.868577
60.0	0.980233	2.890008	0.055019	0.873769
67.5	0.972242	2.733623	0.066804	0.879919
100.0	0.886782	1.924456	0.081366	0.890935

以上のように、平均道路閉塞確率 $p_{b(w)}$ は式[7]に基づき、 br (木造建物平均全壊率 (昭和45年以前築)), n (1リンクあたり建物棟数), rw (平均道路幅員) の3種類の市街地指標で説明することができる。このことは、防災性能向上策には、上記の市街地指標の組み合わせに応じた、例えば、沿道建物棟数密度の減少、老朽建物の耐震化、建て替え、不燃化等建物整備、道路幅員拡張等の様々な方策の組み合わせがあることを示している。

5.4.道路リンク不足率 p_L の構造

本評価理論では、理論構築上、市街地は本来、完全正方格子であるという前提にたつて実際の市街地を正方格子の街路網に置き換えており、道路リンク不足率 p_L は、実際の市街地のリンク数の完全正方格子のリンク数に対する比率と定義されている (式[10])。実際の市街地データに適用する際は、市街地データの道路網のノード数に着目し、ノード数から正方格子のサイズを確定する。例えば、図9(a)の場合、実際の市街地のノード数は16である。この市街地の本来あるべき道路網は、ノード数=16の場合の完全正方格子 (図9(b)) とモデル的にみなしている。完全正方格子におけるノード数 N とリンク数 L の関係は、以下の式で表されることから、

$$L = 2\sqrt{N}(\sqrt{N} - 1) + 4\sqrt{N} \quad [9]$$

道路リンク不足率 p_L は、次式で表される。

$$p_L = 1 - \frac{nL}{nAL} \quad [10]$$

$$p_L = 1 - \frac{nL}{2\sqrt{nN}(\sqrt{nN} - 1) + 4\sqrt{nN}} \quad [11]$$

nL ：市街地道路網全道路リンク数

nN ：市街地道路網全ノード数

nAL ：完全正方格子全道路リンク数

上記の式より、道路リンク不足率に寄与する市街地パラメータは道路網内に含まれる道路リンク数、ノード数および行き止まり点数となることが分かる。道路リンク不足率を低減させるには、道路リンク数または十字路交差点数を増やす方策、袋小路を減らす方策、要は道路線密度を高める方策が必要とされる。

なお、道路網形状に関する道路リンク数、ノード数および行き止まり点数が入手できる場合、上式は使えるが、道路網形状に関するGISデータが必ずしも入手できない場合、何らかの方法で推定する以外方法がない。そこで、ここでは道路リンク不足率を導くために、重回帰分析を行うことにより道路リンク数およびノード数を市街地指標で表すを試みる。

ステップワイズ法により、変数選択を行い、道路リンク数およびノード数の説明変数を選定した。i) 木造建物棟数 (昭和45年以前築)、ii) 非木造建物棟数 (昭和56年以降築)、iii) 全建物棟数、iv) 建築可能土地面積を採用することとなった。これら4つの説明変数を用いて、重回帰分析を実施したところ、道路リンク数については、重相関係数 R は 0.928、自由度調節済み重相関係数の2乗は 0.862 と、大きい相関係数が得られ、定数及び全ての説明変数の偏回帰係数は有意確率が 0.000 と有意水準 5% で有意である。ノード数については、重相関係数 R は 0.911、自由度調節済み重相関係数の2乗は 0.831 と、大きい相関係数が得られた。しかし、偏回帰係数は有意確率が 0.000 と有意水準 5% で有意であるものの、定数は有意確率が 0.136 と有意水準 5% で有意ではない。

求められた道路リンク数、ノード数に関する回帰式は以下の通りである。

$$nL = 16.341 - 0.115x_1 - 0.062x_2 + 0.138x_3 + 2.364x_4 \quad [12]$$

$$nN = 1.592 - 0.089x_1 - 0.068x_2 + 0.102x_3 + 1.873x_4 \quad [13]$$

図 10：防災性能の構造化

x_1 : 木造建物棟数 (昭和 45 年以前築)
 x_2 : 非木造建物棟数 (昭和 56 年以降築)
 x_3 : 全建物棟数
 x_4 : 建築可能土地面積 [ha]
 (=市街地面積 - 空地面積 - 道路面積) ¹⁵⁾

この式により、道路リンク数やノード数のデータが直接入手できなくても、建築可能土地面積や課税台帳から行政内で入手が容易なデータから道路リンク数及びノード数を求め、リンク不足率を求めることができる。なお、この回帰式は、東京都特別区のデータから得られたものであるため、地方都市や山間部を有する地域で適用の可能性については検証が必要とされる。

5.5.まとめ

本章では、道路網の防災性能の基本構造を明確に示し、防災性能指標と市街地指標との関係を構造的に説明した。特に、平均道路閉塞確率と市街地指標との関係については、回帰分析により高い相関関係を示す回帰式を得た。また、道路リンク数、ノード数については道路網に関するデータが入手できない場合に対応するために、精度は若干低いと思われるものの回帰式を導出し、市街地指標と関係づけた。

以上の道路網の防災性能の構造をまとめたものが図 10 である。説明変数、被説明変数の対応関係、さらに相互の関係の間にある、式、或いは、グラフを示している。図 10 右下の平均道路リンク閉塞率の説明変数、及び、道路リンク数、ノード数が市街地整備における対策の変数となる。なお、道路リンク数、ノード数が既存デー

タより入手できない場合に限っては、若干精度に問題があることを意識した上であれば、図 10 右上の市街地指標を対象としてもよい。市街地整備の方針を考えるにあたっては、各市街地指標の値の増減とそれに伴う道路網の防災性能の向上を確認し、さらに実現可能性等の防災性能向上以外の観点も加味した上で、検討することができる。また、現状の各指標の値の組み合わせに応じて、各指標を変化させたときの防災性能の増加率は異なることから、各町丁目の地域特性に応じて防災性能向上の観点からの重視すべき対策の対象も異なる。このことは、地域の特性に応じた市街地整備方針の検討を示唆するものである。

6.まとめ

本論文を含む一連の研究の目的は、道路網の防災性能の評価理論を構築し、防災性能の評価に基づいた市街地整備の計画づくりに寄与することであった。本稿は、計画づくりのプロセスに対応し、都道府県レベル、或いは、都市スケールにおいて道路網の防災性能を評価し脆弱な区域を抽出する際の防災性能指標の特性を考察し、防災性能指標の構造と市街地指標との関係を構造的に整理することによって市街地整備の方針の大局的な方向性を示した。これは、防災性能評価に基づいた計画づくりに資する基礎資料として有用と考えられる。

今後、全国各地ですすめられている防災都市づくり計画において道路閉塞からみた道路網の防災性能という観点が組み入れられ、市街地の防災性能がより効率的、効果的に高められることが望まれる。

参考文献

- 1) 糸井川栄一, 塚越功, 青木義次: 防火地域性と市街地の防火目標に関する一考察, 都市計画学会学術論文報告集, no.26, pp.211-216, 1991.
- 2) 加藤孝明, 小出治: 市街地延焼からみた市街地整備のための性能基準に関する基礎的考察—不燃領域率による性能基準の一般化—, 日本建築学会計画系論文集, vol.516, pp.185-191, 1999.2.
- 3) 加藤孝明, 久貝壽之, 小出治: 市街地延焼からみた市街地整備のための性能基準に関する基礎的考察 (その2) —有限領域への展開—, 日本建築学会計画系論文集, vol.525, pp.241-248, 1999.11.
- 4) 加藤孝明, 久貝壽之, 小出治: 市街地延焼からみた市街地整備のための性能基準に関する基礎的考察 (その3) —建物配置の現実化『逐次充填間引き分布』について—, 日本建築学会計画系論文集, vol.534, pp.163-170, 2000.8.
- 5) 家田仁, 望月拓郎, 上西周子: 地震時に建築物の倒壊等によって生じる街路閉塞の危険度評価法, 国際交通安全学会誌, Vol.23, No.3, pp 6-13, 1998.2.
- 6) 小谷通泰・前野達也・伊藤美由紀: 震災による地区道路網の閉塞状況に関する分析, 第16回交通工学研究発表会論文報告集, pp 89-92, 1996.11.
- 7) 李燕, 塚口博司: 到達可能ノード率による街路網防災性能評価について, 阪神大震災に学ぶ—阪神・淡路大震災調査研究論文集, 土木学会土木計画学研究委員会, pp 407-414, 1997.
- 8) 塚口博司, 李燕, 吉野崇, 田中正浩: 防災性を考慮した街路網構成に関する研究, 阪神大震災に学ぶ—阪神・淡路大震災調査研究論文集, 土木学会土木計画学研究委員会, pp 425-432, 1997.
- 9) 久貝壽之, 加藤孝明, 小出治: パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究, 日本建築学会計画系論文集, vol.549, pp.231-237, 2001.11.
- 10) 久貝壽之, 加藤孝明: 通行可能確率分布を考慮した道路網の防災性能評価手法の構築 パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究 (その2), 日本建築学会計画系論文集, vol.593, pp.139-144, 2005.7.
- 11) 久貝壽之, 加藤孝明: 地域レベルの領域から道路網防災性能上脆弱な地区を抽出する評価手法の確立 パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究 (その3), 日本建築学会計画系論文集, vol.600, pp.105-112, 2006.2.
- 12) G. Grimmett: Percolation. Springer, 1989.
- 13) Stauffer: Introduction to percolation theory, second edition, 1992.
- 14) Stauffer: Introduction to percolation theory, 1985. (邦訳) 小田垣孝: パーコレーションの科学, 裳華房, 1993.
- 15) 東京消防庁: 東京都の市街地状況調査報告書 (第6回), 2000.3.

(2006年7月10日原稿受理, 2007年1月12日採用決定)