復旧優先度指標による震後復旧優先道路形状に関する数理的研究

Road restoration process and network configuration determined by restoration priority indices

渡辺泰弘*・鈴木 勉**
Yasuhiro Watanabe*, Tsutomu Suzuki**

The purpose of this paper is to evaluate the road which should be maintained stronger under risk of seismic hazard. We establish a restoration model in which blockade road is restored by choosing a restoration road that minimizes average time within each phase of the process. By the model, we simulate the process of restoration in various patterns of road blockade, and evaluate the restoration priority of road with four priority indices. First, we clarify that restoration priority depends on the location of disaster responding bases and that priority is significantly affected by main road. Second, we prove that the road network with hierarchy is more robust than that without hierarchy. Third, by applying the model to road network in Nakano ward, Tokyo, we reveal that high priority roads cluster around disaster responding bases and also form skeletal structure that connects those clusters.

Keywords: earthquake, restoration, priority, disaster responding base, hierarchy
地震，復旧，優先度，防災拠点，階層

1. はじめに

1995 年に発生した阪神・淡路大震災は死者 6,434 人，負傷者 43,792 人，全壊及び半壊棟数 249,180 棟と甚大な被害をもたらした．それらとともに，高速道路の倒壊，街路の閉塞，土砂崩れによる鉄道の機能停止といった交通網の被害も甚大であった．これらは，救援物資の輸送やライフラインの復旧を遅らせる要因ともなった．このような閉鎖した道路や鉄道に対する復旧計画では，被害の状況を有機的かつ迅速に把握した上で，復旧優先順位を決定することが重要である [1)]．

しかし，道路閉鎖はどこで発生するか事前にはわからないといった不確実性がある．阪神・淡路大震災のときがそうであったように，人命救助を優先するために，被災状況の情報を得ることが困難になることが考えられる [1)]．このような状況に対しては，そもそも物理的な被災を最小限にする頑強な交通ネットワークの構築といった震前対策，また道路の復旧順序を迅速に示すことができるような震後対策が重要である．また，21 世紀の国土のグランドデザインでも，安全な国土づくりに資する交通体系を形成することが謳われており，都市における頑健なネットワークの構築は必要性を増している [2)]．

そこで本研究では，大地震後における道路閉鎖のリスクを考慮して震前対策として頑強に整備すべきネットワークを抽出するために，道路網の復旧優先度を決めるための基礎指標を提案し，優先順位の高い道路の形状や防災拠点・幹線道路との関係を数理的に明らかにすることを目的とする．2 章では仮想都市空間を設定し，道路網の復旧優先度の基礎指標の設定と格子状道路網における復旧優先度を明らかにする．そして 3 章では実際の道路網を対象に，その形状に着目して復旧優先度を考察する．4 章で本論文の結論と今後の課題をまとめる．

関連する研究としては，まず山田ら(1986)の，地震で被災した道路交通網に対して復旧に要する作業量を基準とした被害評価を行い，交通ネットワーク上を走行する全車の平均走行時間を用いて，交通網の機能性を評価したものがある [3)]．5×5 の正方格子上の 25 個のノード，24 本のリンクを設定し，交通量と閉塞した道路の本数を一様乱数で与え，復旧効果が最大となる道路を逐次的に復旧させることによって最適な復旧過程を示しており，復旧度が一定の水準に達する早さは復旧順序によって大きな違いがあるという興味深い結果を得ている．また，山田ら(1988)は，震後の道路交通網の復旧戦略を検討するため，新しい復旧モデルと実用的な復旧シミュレーションのアルゴリズムを考察し，これを伊豆半島の道路網に適用して，復旧戦略の相違が道路交通機能に与える影響について比較することにより，この手法の妥当性を検討している [4)]．一方，久貝ら(1999)は，パーコレーション理論を用いて道路閉塞からみた街路網の防災性能評価の定量的な手法の開発を目的とし，道路幅員，道路に面する建物の耐震性，ノード（交差点）間距離，ネットワーク構成の 4 つを防災性能に影響を与える指標として分析している [5)]．道路の通行確率によって，有限領域内を端から端まで通れる確率を算出し，また，いくつかのサンプル地区を対象に，街路網の防災性能について比較・検討を行い，地区内の道路閉塞確率の違いによって消防車両の通行可能性に差違があることを明らかにしている．宮川(2005)は，震災時における施設閉鎖と道路閉鎖を対象とし，それらの不確実性に対し都市全体の頑健性を評価することを目的とし，施設閉鎖，道路閉鎖は任意で与えられ，各需要点から最寄りの施設までの距離を評価指標としたときの迂回距離をもとに都市全体にもたらす損失を把握して

*正会員　中日本高速道路（株）(Central Nippon Expressway Co., Ltd.)
**正会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科 (University of Tsukuba)

いる [6]. 谷脇(2007)は，実際の震災状況を反映させたいくつかの制約条件を設定して，被災道路復旧計画問題を定式化し，遺伝アルゴリズムによってその解を求めている．対象空間と道路閉塞確率は任意に与え，道路の復旧に要する日数と人員を考慮し，最適な復旧計画を算出している [7].

以上のように,様々なアプローチで道路閉塞の被害評価，防災機能の評価，復旧戦略などに関するモデル化と分析が行われており，逐次的評価による最適な復旧過程や道路閉塞の確率による通行可能性，道路閉塞時の迂回距離などが明らかにされている．しかし，震後被災時においては，区役所や消防署，病院，備蓄倉庫などの複数の拠点を起点とする移動や輸送が重要である．また，ネットワークに階層性を持たせることは都市を頑健にすると考えられており [2]，その防災上の効果を定量的に把握することは重要である．そこで，本研究では，避難所までの位置や幹線道路との位置関係，道路網の階層性に関する考察に主眼をおき，複数の拠点から避難所までの移動，避難所と幹線道路の位置関係，そして道路網の階層性に着目した道路網の復旧優先度を数理的に明らかにする．

なお，本研究は，事前対策として道路整備や沿道建築物の整備によって頑健にすべきリンクを抽出することを想定する．また，大地震後の復旧段階における避難所や主要施設までの市民の移動や救援物資・瓦礫の輸送等を想定する．そのため，被災直後の広域避難のような極度の集中は発生しないものとし，流動量の多寡による所要時間の変化といった混雑現象は考えないこととする．

2. 仮想都市空間における復旧優先度

本章では，復旧優先度を表す指標を設定し，仮想都市空間における格子状道路網の復旧優先度を明らかにする．拠点の位置や階層ネットワークの有無による復旧優先度を算出し，復旧優先度に関する基礎的な知見を得る．

2.1 モデルの設定

13×13 の正方格子状に並んだ 169 個の需要点(かつ高速交通ネットワークのアクセス・イグレス点)からなる仮想都市空間を設定する．それぞれの需要点は，被災者が滞留する避難所を表しており，同時に，震災時に重要となる役所，消防署，病院，物資輸送拠点などを想定した拠点の配置候補場所となる．正方格子を縦横に結んだ１区間を１リンクとし，この仮想都市空間上には 312 本のリンクが存在している．1 リンクの移動時間は，1 かかるものとする．拠点から全ての避難所（或いはその逆）へ１単位の移動が発生するものとし,最短時間経路を通って移動するものとする．全ての移動にかかる時間の平均を平均所要時間と呼ぶ.

道路閉鎖の不確実性を表現するために，道路閉鎖確率 p を設定する．各リンクに[0, 1)の一様乱数を与え，その値が p よりも小さければ閉鎖，大きければ閉鎖しないものとして道路閉鎖パターンを発生させる．リンク毎の閉鎖確率の期待値は p となるが，全体として閉鎖しているリンクの割合は必ずしも丁度 p になるとは限らない．道路閉鎖のパターンは 10,000 パターン求め，それらのパターンに対して道路復旧のシミュレーションを繰り返す．これによって，震災時に重要なリンクを抽出する．閉鎖した道路の通行時間は，閉鎖していないときに対して 1,000 倍の移動時間がかかるものとする．これは，できるだけ閉鎖道路を迂回するように，領域全体の直径を移動するための所要時間よりも十分に長い移動時間を与えるためである．このような大きいコストを与えることにより，閉鎖道路はなるべく迂回するが，閉鎖道路を通らざるを得ないケースでは，これを通行して移動するように設定する．

需要点が孤立する状況を生み出さないように配慮することで，全てのノードを対象とした平均移動時間を計算できるようにしておき，閉鎖された道路を通らないと施設にアクセスできないような到達不能なノードも含めた復旧優先度の選定を可能としつつ，到達不能なノードを早期に無くすことを優先させた復旧順序を計算する．

復旧順序に関しては，逐次最適敷設の方法を用いる．逐次最適敷設とは，各期で平均所要時間を最小にするようにリンクを逐次的に復旧していく方法である．平均所要時間をそれ以上減少させることができなくなった時点で復旧過程を終了させる．

2.2 リンクの評価指標

ここで，リンクの復旧優先度を決めるために，各リンクの優先度を測るための指標を設定する．本論文では，効果指標 E，頻度指標 S，順序指標 O，順序指標 X の 4 つの指標を設定する．まず，n(=10,000)個の道路閉鎖パターンのうち k 番目のパターンにおいて，リンク i が復旧した時の平均所要時間の減少分を d_i^k とし,その累積を効果指標 E とする．この指標は，平均所要時間を減少させる効果を表す指標であり，ネットワークの復旧による効果の大きなリンクの位置を特定することができる．

効果指標
$$E_i = \sum_{k=1}^{n} d_i^k \qquad (1)$$

次に，k 番目のパターンにおいてリンクが復旧した場合には1,復旧しなかった場合には0をとる変数 b_i^k を設定し，n パターンの累積を頻度指標 S とする．この指標は，そのリンクが全期を通して復旧されたかどうかを示す指標であり,最終的に頑健にすべきリンクを特定することができる.

頻度指標
$$S_i = \sum_{k=1}^{n} b_i^k \qquad (2)$$

最後に，リンクが復旧した順序を評価する指標を設定する．その一つ目として，リンクが復旧した順序の早さを評価する順序指標 O を設定する．この指標は，それぞれの工期に対して線形の重みを与えて評価する指標である．復旧したリンクについては，総リンク数 312 からリンクが復旧した期の番号 o_i^k を差し引き，その総計を O とする．復旧しなかったリンクについては計上しない．リンクは全部で 312 本あり復旧にかかる期は最大で 312 であるため，順序

指標が負をとらないように312という定数を設定している．復旧された期が早いほど高く評価される指標であり，早期に復旧すべきリンクを特定することができる．

順序指標Ⅰ　$$O_i = \sum_{k=1}^{n} \{b_i^k (312 - o_i^k)\}$$　(3)

二つ目の順序指標Xも順序指標Oと同様に，早期に復旧されたリンクほど高く評価される指標であるが，順序指標Oと比べて，早期に復旧したリンクをより高く評価するものである．o_i^kの値に対して，$e^{-o_i^k}$の累積を順序指標Xとする．順序指標Oと同様に復旧しなかったリンクについては計上しない．

順序指標Ⅱ　$$X_i = \sum_{k=1}^{n} b_i^k \cdot e^{-o_i^k}$$　(4)

全てのリンクについてこの4つの指標を計算した上で，それぞれの値を十分位毎に分割し，図1のように復旧優先度を判定する．

図1：復旧優先度

2.3　拠点の位置による道路の復旧優先度

道路閉鎖確率pを0.5とおいて，前節の指標に基づき，区役所や消防署，病院，備蓄倉庫などの拠点の位置が道路の復旧優先度にどのような影響を与えるかを考える．ここでは，拠点数が1および2の場合を考える．図2および図3に拠点の位置と道路の復旧優先度の関係を示す．大きな黒丸が拠点，それ以外の小さい点が避難所を示している．

まず，効果指標Eで評価すると拠点が中央にある場合は，拠点から同心円を描くように広がる地域で復旧優先度が高いことがわかる．これに対して，拠点が西端，南西にある場合は，拠点から中央部の間に挟まれた地域に卵型の形状で優先度が高い地域が広がる．このように，拠点の位置の違いによって頑強なネットワークを整備すべき地域は異なることがわかる．

また，頻度指標Sで評価すると，いずれの拠点においても，拠点を中心に東西，南北に走るリンクの復旧優先度が高いことがわかる．これは，復旧が完了するために拠点を中心とした直線状に延びるリンクが重要であることを示している．

順序指標Oでの評価では，頻度指標Sと似たような傾向があり，復旧順序の面からみても，拠点を中心に東西，南北につながるリンクを頑健にすることが必要であることがわかる．

順序指標Xでの評価は，効果指標Eによる結果と似ており，端にあるリンクの優先度は低く，拠点や都市の中央に近いリンクほど復旧優先度が高いことがわかる．初期に復旧されるべきリンクは都市空間の端にあるリンクではなく，

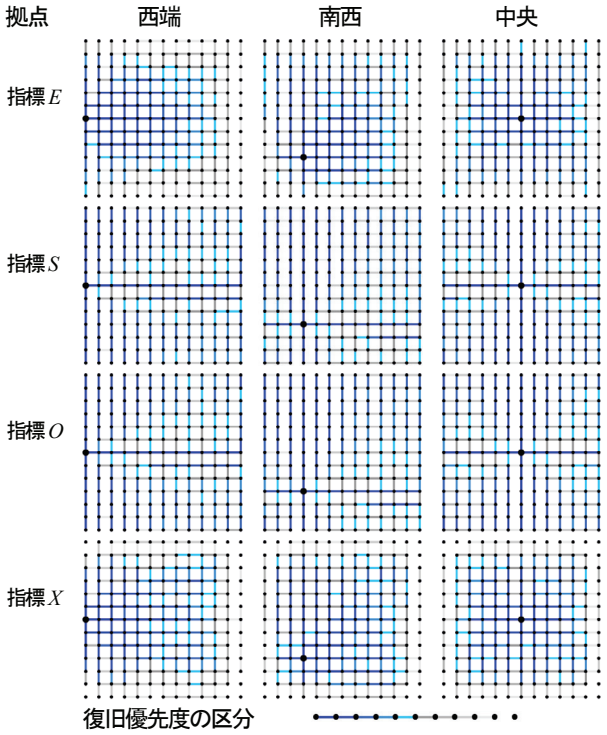

図2：復旧優先度(1拠点，p=0.5)

表1：復旧優先度の統計(1拠点，p=0.5)

拠点	値	西端	南西	中央
E指標	中央値	18839	17234	14917
	20%点	12348	10709	9679
	80%点	32566	29267	24775
S指標	中央値	1971	1965	1969
	20%点	624	440	467
	80%点	2255	2418	2337
O指標	中央値	329377	332510	336402
	20%点	114319	81102	85351
	80%点	385432	426589	403203
X指標	中央値	13.442	12.741	12.443
	20%点	4.230	4.476	4.089
	80%点	21.339	22.975	23.682

拠点の周辺や都市の中央部付近であることがわかる．

拠点が2つのケースであっても復旧優先度が高いリンクは，拠点が1つのケースと同様である．異なる点は，効果指標Eと順序指標Xでは，拠点に挟まれたリンクの復旧優先度が顕著に高くなっていることである．すなわち，拠点間を結ぶリンクを優先すべきであるということが示される．

図4に示すように道路閉鎖確率pにより孤立点の発生個数は当然異なり，孤立点が形成されたか否かは復旧効果に多大な影響を与える．p=0.3 以下の場合には，発生する孤立点の平均個数は20以下である．図5のように効果指標Eや順序指標Xによる優先度は，拠点から直線状に延びる道路の優先度が高いのは同様であるが，孤立点の平均個数が少ないために，中央部よりもむしろ迂回路が少ない縁辺部で高くなる．また，逆にpが大きく1に近づくと，優先度の高いリンクを求める問題は，更地から道路網を構成するネットワーク設計問題と同等となり，その解は特定の形状

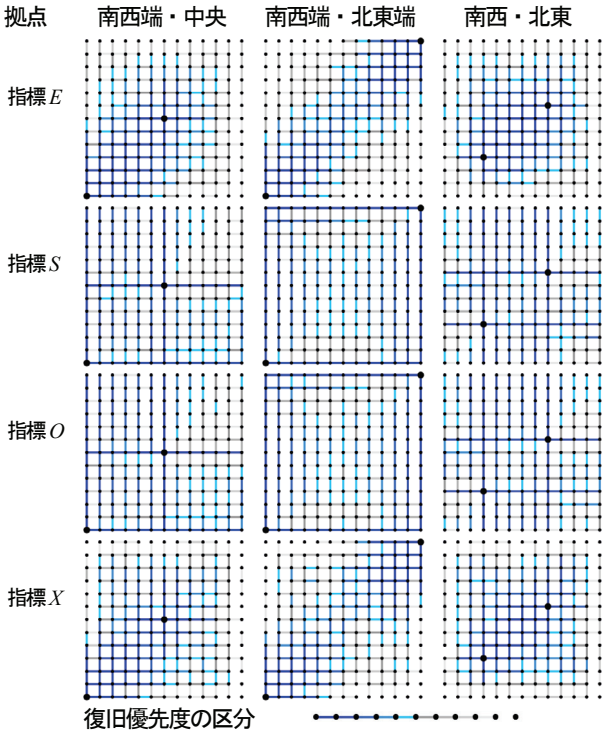

図 3：復旧優先度（2 拠点，p=0.5）

表 2：復旧優先度の統計（2 拠点，p=0.5）

指標	値	南西端・中央	南西端・北東端	南西・北西
E 指標	中央値	22885	28435	21933
	20%点	12565	14472	12351
	80%点	62577	51084	59013
S 指標	中央値	2344	2734	2184
	20%点	823	1060	782
	80%点	3517	3686	3372
O 指標	中央値	385155	434406	373474
	20%点	145927	179945	138921
	80%点	560459	581450	549275
X 指標	中央値	9.339	7.680	11.920
	20%点	3.310	4.184	3.669
	80%点	18.193	13.818	21.730

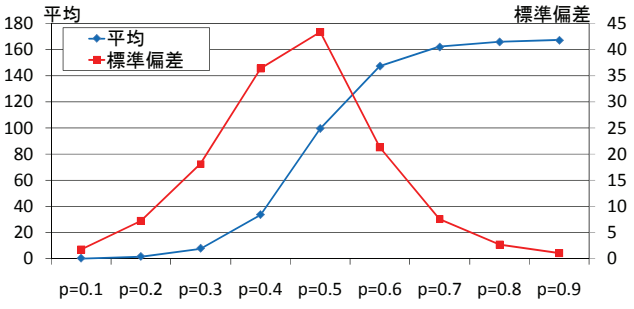

図 4：孤立点の発生頻度（拠点中央）

を形成することが確認できる．

復旧優先度を示す指標については，効果指標 E と順序指標 X，頻度指標 S と順序指標 O による復旧優先度が高い道路網がそれぞれ似た性質を持つことがわかる．効果指標 E と順序指標 X からは，道路の復旧の効果が大きいという意味で，早い段階で復旧が優先されるべき道路を抽出することができる．また，頻度指標 S と順序指標 O からは，当該リンクの利用者数が多いという意味で，早期の復旧が望ましい道路を抽出することができる．以降では，順序指標 X, O による復旧優先度はそれぞれ効果指標 E と頻度指標 S による優先度で代替できるとし，E と S のみを用いることとする．

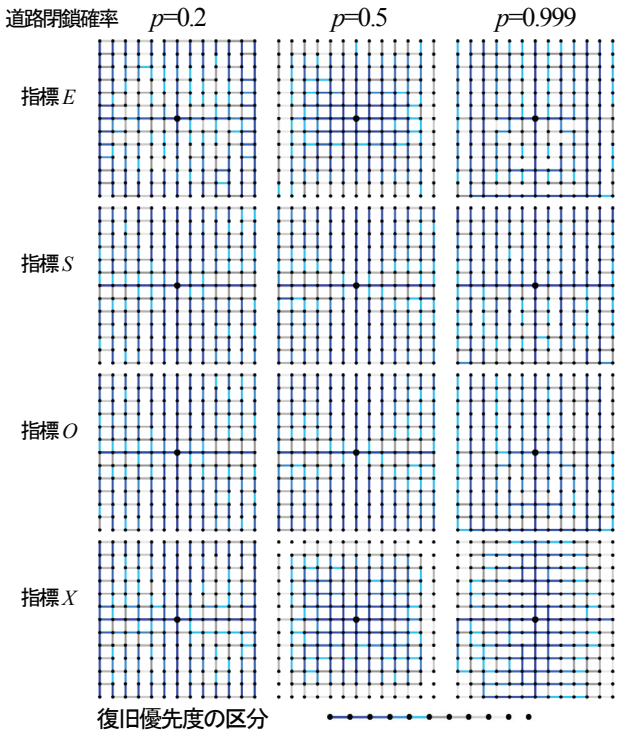

図 5：復旧優先度（1 拠点，p=0.2, 0.5, 0.999）

表 3：復旧優先度の統計

指標	値	p=0.2	p=0.5	p=0.999
E 指標	中央値	110	14917	19459
	20%点	15	9679	5599
	80%点	372	24775	57045
S 指標	中央値	347	1969	3142
	20%点	6	467	160
	80%点	403	2337	3367
O 指標	中央値	66964	336402	173859
	20%点	1184	85351	21256
	80%点	77834	403203	458834
X 指標	中央値	8.163	12.443	0.000
	20%点	0.798	4.089	0.000
	80%点	22.200	23.682	0.001

2.4 階層のあるネットワークにおける復旧優先度

道路を例にすれば，実際の都市においては，高速道路や一般国道から街路まで階層構造を有している．このようにネットワークに階層性を持たせ，機能に応じて道路区間の構造的頑強性に格差をつけることはネットワークの信頼性を高めるうえでも効果的であると考えられている [2]．そこで本節では，リンクの速度と閉鎖確率の違いによるネットワークの階層化が復旧優先度に与える影響を考察する．

図 6 に示すように中央を南北に走る高速リンク（以下，幹線リンク）があるネットワークを階層ネットワークとし，

それがないこれまでのネットワークをプレーンネットワークと呼ぶことにする. また, 幹線リンクではないリンクは, 一般リンクと呼ぶことにし, 幹線リンクでは一般リンクに対して c 倍$(0<c\leq 1)$の時間で移動できるものとする.

この階層ネットワークに対して, それぞれ 3 つの拠点配置ケースを設定し, 復旧優先度や平均所要時間の減少過程を考察する. ケース s における道路閉鎖の n(=10,000)パターンのうち k 番目のパターンでの j 期の平均所要時間を ${}_st_j^k$ として, 拠点配置ケース s における j 期の各パターンの平均所要時間の平均

$$ {}_sT_j = \sum_{k=1}^{n} {}_st_j^k / n \qquad (5) $$

を求め, さらに 3 ケースの ${}_sT_j$ の平均

$$ T_j = \sum_{s=1}^{3} {}_sT_j / 3 \qquad (6) $$

を計算し, 3 つの拠点同士の相対比較を行うために ${}_sT_j$ を T_j で除して相対比を求め, 各拠点同士の優劣を考察する.

2.4.1 リンクの速度が復旧優先度に与える影響

幹線リンクの速度比 c を 1.0 (プレーンネットワーク), 0.8, 0.2 (階層ネットワーク) と設定し, 復旧優先度について考察する. 図 7 の効果指標 E からは, 幹線リンクは一般リンクに対して優先度が高いことがわかる. また, 幹線リンクが一般リンクに比べて速度が速くなるほど, その優先度は増していくことが確認できる.

図 8 の頻度指標 S からは, 幹線リンクの優先度が高いことは上と同じであるが, それに加えて, 幹線リンクから直交して拠点のない地域へと延びる一般リンクの優先度が高いことと, 拠点が幹線リンク上にない場合は, 拠点と幹線道路を最短でつなぐ一般リンクの優先度も比較的高いことがわかる. また, 幹線リンクの速度が速くなるほど, 幹線リンクから延びる道路の復旧優先度が高くなっており, 速度が速いほど, 幹線リンクまでに至るためのアクセス道路がより重要であることがわかる.

図 9 は, 各ケースの相対比較をしたものであり, グラフの下方に位置しているほど, 平均所要時間の平均が小さく, 都市全体として望ましいと考えられる. 初期の段階では, 都市の中央に近い場所に位置する南西ケースが望ましいという結果になっている. しかし, c=0.2 の速い幹線リンクをもつ階層ネットワークでは, 幹線リンクの復旧が進むに

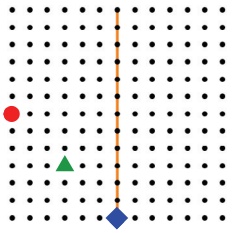

図 6 : 幹線リンクと拠点の配置パターン
(●:拠点 1, ▲:拠点 2, ◆:拠点 3)

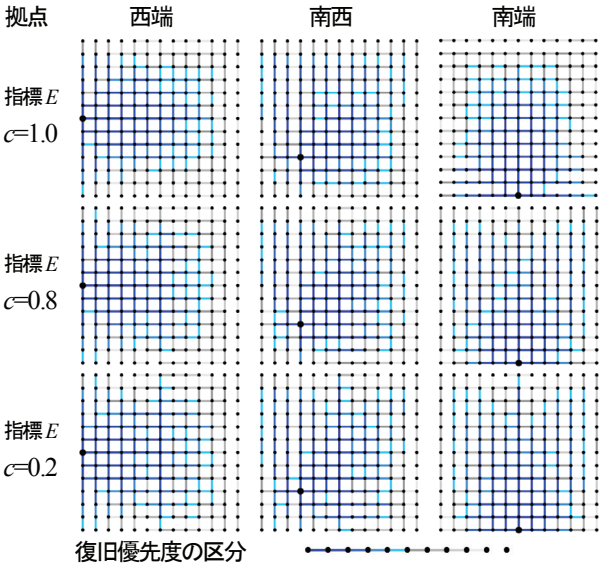

図 7 : 階層ネットワークの復旧優先度 (効果指標)

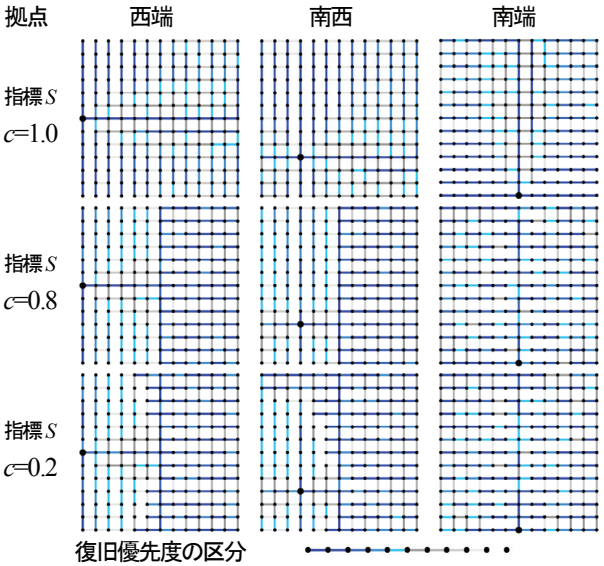

図 8 : 階層ネットワークの復旧優先度 (頻度指標)

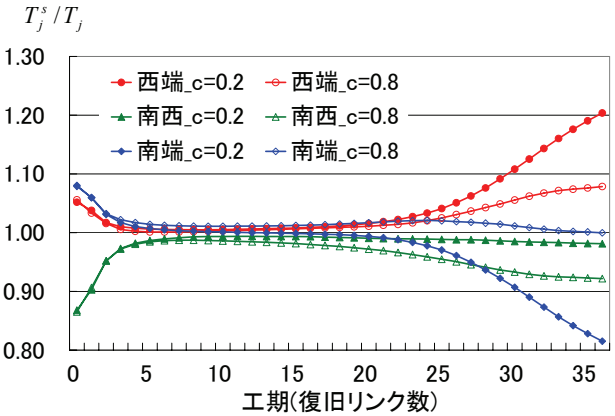

図 9 : 拠点別平均所要時間の相対比較

つれて，幹線リンク上に拠点が位置している南端ケースが望ましくなる．一方，c=0.8 と幹線リンクが遅い場合については，南西ケースが工期全体を通じて望ましい．これは，幹線リンクの平均所要時間を減少させる効果が小さいため，幹線リンクの速さがそれほど期待できない場合には，拠点は端部でなく中央になるべく近い場所に配置する方が望ましいためであると考えられる．

2.4.2 幹線リンクの閉鎖確率の管理による効果

次に，幹線リンクの閉鎖確率を一般リンクのそれよりも低くすることができるとした場合の効果を考えよう．すなわち，これまでリンクの閉鎖確率 p は全て 0.5 としてきたが，一般リンクの p の増加を許す代わりに，幹線リンクの p を減少させることを考える．ここで，閉鎖確率を実現するために要する道路整備費用は，閉鎖確率の減少分に比例すると考え，（確率の変化分）×（本数）の単位で表現されるものとする．これまでのモデルでは道路閉鎖確率 p を 0.5，リンク数を 312 本としていたので，全て復旧するとすれば，この都市に費やせる整備費用の期待値は，(1-0.5)×312=156 である．この整備費用の期待値の総額 156 は一定とし，幹線リンクの道路閉鎖確率を小さくするようにリンクの閉鎖確率を管理することを考える．幹線リンクと一般リンクの本数をそれぞれ l_1，l_2 とし，閉鎖確率をそれぞれ p_1，p_2 とするとき，以下の制約式を満たすように，確率 p_1，p_2 を決定する．

$$(1-p_1)\cdot l_1+(1-p_2)\cdot l_2=156 \qquad (7)$$

幹線リンクの閉鎖確率を小さくすることで，一般リンクの閉鎖確率は大きくなってしまうことに注意されたい．ここで，幹線リンクの閉鎖確率 p_1 を小さくすることを頑強整備と呼ぶことにし，p_1=0.50, 0.25, 0.00 のときの頑強整備基準をそれぞれ弱，中，強とおく．頑強整備基準が弱のネットワークは，階層のないプレーンネットワークである．一方，中（強）は，閉鎖確率の小さい（閉鎖されない）幹線リンクを整備する場合を意味している．式(7)から，幹線リンクと一般リンクの閉鎖確率および整備費用の関係は表 4 のようになる．

幹線リンクのある階層ネットワークとプレーンネットワークの優劣は，平均復旧本数と平均累積所要時間の 2 指標を用いて比較する．平均復旧本数とは，何本のリンクで全ての避難所への最短経路が確保されたかを示す指標である．これが少ない本数であるほど，早く復旧が完了したことを意味し，望ましいと言える．道路閉鎖の n(=10,000)パターンのうち k 番目のパターンで復旧した本数を r^k とおく（ただし k は添字）と，平均復旧本数 R は

$$R=\sum_{k=1}^{n} r^k / n \qquad (8)$$

で与えられる．また，平均累積所要時間は，復旧が完了するまでに都市全体として移動に関する時間的損失がどの程度あったかを表す指標である．この平均累積所要時間が少ないほど，効率的に復旧を進められたことを意味している．k 番目のパターンでの j 期の平均所要時間を t_j^k とおくと，平均累積所要時間 T は，

$$T=\sum_{k=1}^{n}\sum_{j=1}^{r^k} t_j^k / n \qquad (9)$$

となる．

表 4：階層化による閉鎖確率と整備費用

頑強整備基準	リンクの種類	閉鎖確率	本数	整備費用
弱	幹線	0.50	12	6
	一般	0.50	300	150
中	幹線	0.25	12	9
	一般	0.51	300	147
強	幹線	0.00	12	12
	一般	0.52	300	144

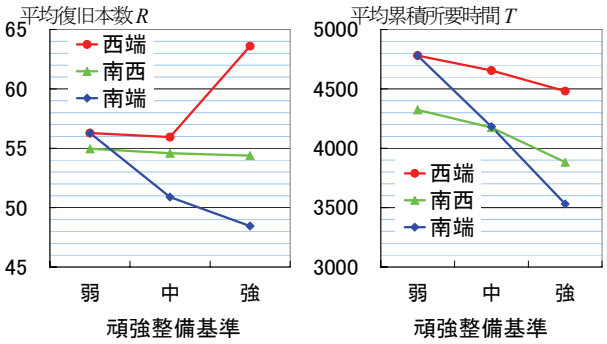

図 10：平均累積所要時間と復旧本数の比較

図 10 から，南端ケースの平均復旧本数は，幹線リンクを頑強にするほど復旧本数が少なくなっていることがわかる．一方，南西ケースの平均復旧本数は微減であるが，西端ケースについては，幹線リンクの閉鎖確率 p_1 が 0 になると，平均復旧本数が多くなっている．これは幹線リンクを頑強にすることによって，一般リンクが相対的に脆弱になり，閉鎖するリンクが増えてしまい，復旧本数が大きくならざるを得ないためであると考えられる．また，南西ケースや南端ケースに比べて，拠点が幹線リンクから離れていることも原因であると考えられる．南西ケースや南端ケースでは拠点から幹線リンクまでの距離が近いために，幹線リンクまでの一般リンクが開通さえすれば，閉鎖しにくい幹線リンクを通ることができる．しかし，西端からでは，幹線リンクまでの距離が遠く，むしろ近くの一般リンクから復旧した方が平均所要時間を減少させる効果が大きくなるため，結果的に平均復旧本数が大きくなってしまっていると考えられる．ただし，平均累積所要時間はどの拠点ケースにおいても幹線リンクを頑強にすることで減少しており，閉鎖確率を管理してネットワークを階層化させた方がより頑健なネットワークを構築できることがわかる．

3. 現実の道路網における復旧優先度

本章では，実際の都市における道路網を用いて，道路の復旧優先度を算出する．実際の道路網において各拠点から

の移動を考慮し，復旧優先度の高い道路を抽出することによって，規則的な格子状道路網では把握することができない形状に着目して復旧優先度の高い道路を考察する．ここでは規則的でない道路形状が復旧優先度にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを主目的とし，階層性は考慮せずに一律の閉鎖確率を与えての算出結果を示す．

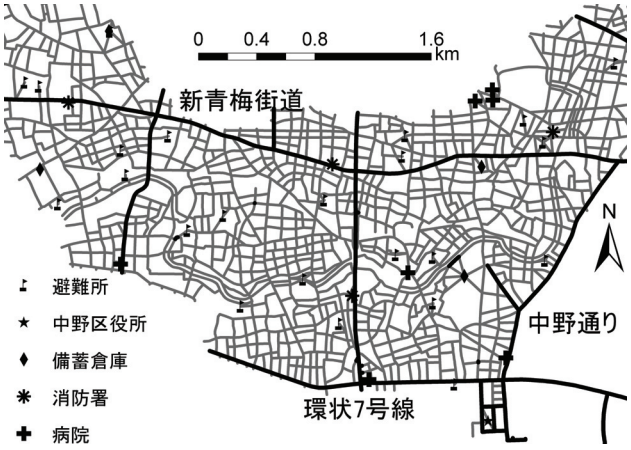

図 11：中野北部地区

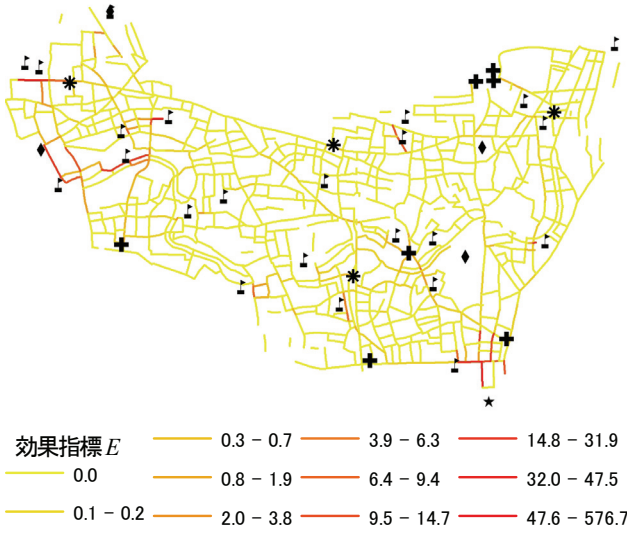

図 12：道路網の復旧優先度（効果指標 E，単位は分）

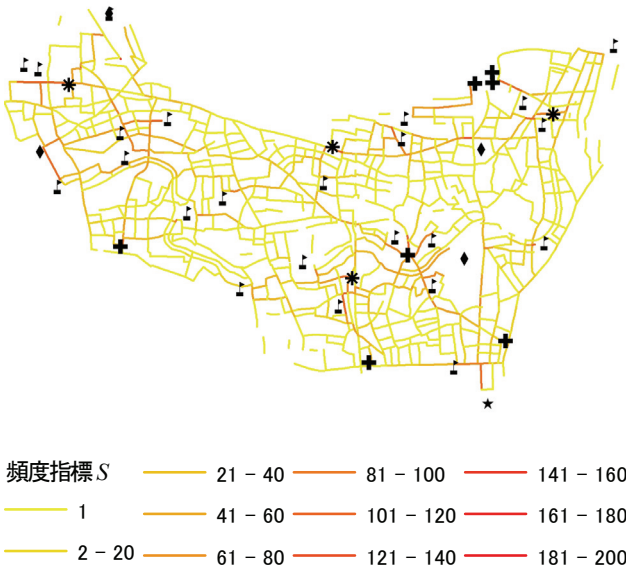

図 13：道路網の復旧優先度（頻度指標 S）

3.1 モデルの設定

東京都の被害想定によると，東京 23 区において道路閉塞率が高いと想定されている地域は，東京都東部の荒川沿いと環状 7 号線沿線である[8]．環状 7 号線が通る中野区は，都内でも木造密集市街地が多く広がっている地域であり，道路閉塞率も高いと想定されている[9]．そこで，中野区の中でも，東端は中野通り，南端は東西線で囲まれた環状 7 号線沿線を含む地区を中野北部地区として抽出し，対象地区とする（図 11）．震災時に重要となる施設は，①他地域との連絡や物資の供給拠点ともなる区役所，②消火活動を行う消防署，③救命救急活動を行う病院，④災害に備え約 3 日間程度の生活が可能な物資（食料，毛布，医薬品等）や資器材（かまど，応急トイレ等）が全て備蓄されている備蓄倉庫があげられる．また，それらの拠点からの物資の供給活動や救急活動をする先は，⑤収容避難所(以下，避難所)と想定する．震災時に行政の面から重要となる唯一の区役所からは全ての避難所への移動を考慮し，最近隣の拠点までの移動経路が確保されればよいと思われる消防署，病院，備蓄倉庫については，避難所から最近隣の施設までのみの移動を考慮する．移動量は全て 1 単位とする．

使用するデータは，数値地図 25000 を基本とする．備蓄倉庫と避難所については，中野区地域防災計画をもとに，東京大学アドレスマッチングサービスを使用して作成した[10]．また，数値地図 25000 では，各拠点と道路が接続されていないので，各拠点と最近隣の交差点ノードを接続したリンクを作成し，それを接続道路とした．ノード数は，1,703（避難所 23，区役所 1，消防署 4，病院 7，備蓄倉庫 4，交差点 1,664），リンク数は 2,503 本である．

これらのリンクは 2 章のモデルと同様に閉鎖確率 p で閉鎖するものとする．東京都の被害想定では道路閉塞の危険性が高いと予測された地域の道路閉塞率は20%以上と想定され，中野区近辺のそれはおよそ 20%とされている[8]．そ

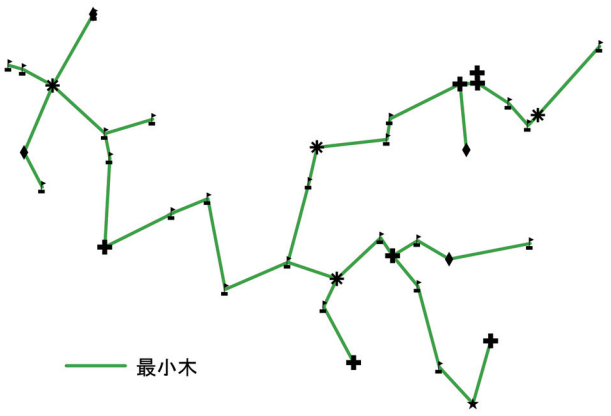

図 14：最小木

こで，本章のモデルでは，道路閉鎖確率 p を 0.2 として，ランダムな道路閉鎖パターンを 1,000 回発生させて計算する．また，各リンクの移動時間は，交差点間距離から速度を 70m/分として計算して与える．本論文では，おおよその閉鎖確率が与えられたときの復旧優先道路の形状が規則的でない道路網を持つ市街地でどのようになるかを求めることが目的であるため，例えば沿道建築物の属性などのデータを用いたリンク毎の閉鎖確率の精緻な計算は行わない．

3.2 効果指標 E による復旧優先度

効果指標 E では，拠点の周辺における道路の復旧優先度が高いことが顕著に表れている（図 12）． 2 章の仮想都市空間においても拠点の周囲の復旧優先度が高く，実際の道路網においても拠点の周囲の道路を復旧することによる平均所要時間が減少する効果が大きいという性質は変わらない．特に区役所周辺の道路の復旧優先度が高い．これは区役所から全ての避難所への移動を考慮しているためであると考えられ，区役所のような重要な拠点の周囲の道路の重要性を確認することができる．

3.3 頻度指標 S による復旧優先度

頻度指標 S からは，それぞれの拠点から避難所への通行可能道路を確保するために重要な道路を考察することができる（図 13）．まず，復旧優先度の高いリンクの集合が大きく 3 つの地域に分かれている．これは，2 章で確認された結果と同様，それぞれの地域に病院，消防署，備蓄倉庫などがあり，そこから最近隣の避難所への路線を確保するような道路の優先度が高いことによるものと考えられる．さらに，これらの地域同士を結ぶような路線も優先度が高いことがわかる．特に，中野北部地区を斜めに走る道路の優先度が高いことが顕著である．この道路は幅員 5.5m 以下の路線で幹線道路ではないが，地域を結ぶリンクとして重要であることがわかる．

避難所と区役所などの拠点をつなぐ最小木を図 14 に示す．前述した 3 つの地域の優先度の高い道路や，3 つの地域をつなぐ優先度の高い道路の大まかな形状が，最小木の形状と概ね同じになることがわかる．これは，道路復旧の際は拠点間を最短距離でつなぐという効率的な復旧が望まれることを示している．各拠点を最小距離で結ぶことは移動効率から考えても望ましく，少ない復旧本数で都市の機能を早く回復させることにもつながるためと考えられる．

4. おわりに

本論文では，道路閉鎖という不確実性を考慮した復旧モデルを構築し，復旧優先度が高く頑強にすべきリンクの位置や形状，幹線道路と拠点の位置関係を求め，考察を行った結果，以下のような知見が得られた．

① 順序指標 X による復旧優先度は，効果指標 E による優先度と同様，復旧の効果が大きい道路が高くなる一方，頻度指標 S と順序指標 O では，拠点から避難所への通行可能道路を確保するために重要な道路が優先される．
② どの指標によっても，拠点から直線状に延びる道路の優先度が高くなる．
③ 効果指標 E と順序指標 X による復旧優先度は，道路閉鎖確率が小さいうちは縁辺部の道路が高くなるが，道路閉鎖確率が大きくなると中央の道路の方が高くなる．
④ 速度によって階層化されたネットワークでは，幹線道路に接続するリンクが優先される．拠点の配置は中央部の方が望ましいが，幹線道路の速度が速い場合には，ネットワーク上に配置される方が望ましい．また，幹線道路の頑強性を向上させて閉鎖確率を下げることは，復旧本数が少なさや平均累積所要時間の削減の意味からも有利である．
⑤ 中野北部地区の道路網での復旧優先度は，仮想都市での結果と整合する．優先度の高い道路形状は，現実の道路網形状の複雑さが反映されるが，拠点施設の集中具合により優先度の高い地域が形成され，それらの地域内でのかたまりと地域間を結ぶ形状が現れ，その大まかな形状は最小木に似る．

これらの結論は単純な仮定の下で得られた結果ではあるが，道路網の整備計画に基礎的な情報となりうると考えられる．また，このモデルは道路における除雪の優先順序や土砂崩れの啓開順序等にも応用できると考えられる．

今後の課題としては，現実への適用に向けたパラメータ等のファインチューニングに加えて，復旧のためにかかる時間を考慮し時間対効果を考察することや，ボトルネックとなる道路を抽出するために流動量を考慮することなどが挙げられる．さらに，復旧のための機材が運び出される拠点や撤去された瓦礫を集める集積所の位置を考慮することで，実際の復旧作業に近い優先度を明らかにできるものと考えられる．

謝辞

研究内容について貴重な助言をいただきました慶應義塾大学栗田治先生，東京大学廣井悠先生に謝意を表します．なお，本研究は，日本学術振興会科学研究費による研究成果の一部である．

参考文献

1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会 (1998)：『阪神・淡路大震災調査報告－土木・地盤編 10－交通施設と農業施設の被害と復旧』．丸善．
2) 国土交通省 (1998)：『第 5 次全国総合開発計画「21 世紀の国土のグランドデザイン」』．
3) 山田善一・家村浩和・野田茂 (1986)：「道路交通網の最適な震後復旧過程の評価」，土木学会論文集，Vol.368 (I-5), pp.355-362.
4) 山田善一・野田茂・五十嵐晃 (1988)：「震後の道路交通機能の実用的な復旧予測シミュレーション」，土木学会論文集，Vol.392 (I-9), pp.385-394.
5) 久貝壽之・加藤孝明・ヤルコン・ユスフ・小出治 (1999)：「道路閉塞からみた地区レベル街路網の防災性能評価手法の提案」，地域安全学会論文集，Vol.1, pp.25-34.
6) 宮川雅至 (2005)：「移動距離の増加から見た施設閉鎖・道路閉塞による損失の一体的評価」，都市計画論文集，Vol.40-3, pp.187-192.
7) 谷脇るり子 (2007)：『被災道路復旧計画問題の遺伝アルゴリズムによる解法』．高知工科大学情報システム工学科学位論文．
8) 東京都 (2006)：『首都直下地震による東京の被害想定報告書』．
9) 中野区 (2005)：『中野区地域防災計画』．
10) 相良 毅：東京大学アドレスマッチングサービス http://www.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/~sagara/geocode/overview.html

（2008 年 4 月 18 日 受付）