

残存ネットワーク容量を考慮した 緊急輸送道路指定に関する研究

倉内文孝¹・井上祐花²

¹正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:kurauchi@gifu-u.ac.jp

²学生会員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

過去の地震災害において、物資の輸送等を優先する交通規制が行われたが、規制されない道路では混雑が発生していたことも多い。また、地域防災計画には緊急輸送道路が指定されているが、決定根拠が明らかではない。過度な緊急輸送道路の指定は、混雑の原因となりうるため、何らかの根拠を持った指定方法を検討すべきである。本研究では、緊急輸送道路の事前指定および修正を行う際に参考となることを目的とした緊急輸送道路デザインモデルを構築した。これは、緊急輸送道路の速達性と一般車両のネットワーク容量とのトレードオフを表現し、一般車両の残存ネットワーク容量を考慮できる。構築したモデルを仮想ネットワークと実ネットワークに適用し、モデルの有用性を確認した。

Key Words : *Earthquake disaster, Emergency route, Traffic management, Disaster Prevention Plan*

1. はじめに

近年、日本では数多くの地震災害が発生している。地震により道路構造物が被害を受け、通行止めや交通容量低下が生じる。また、被災者の救助や復旧のための緊急車両、一般車両等によって道路は混雑し、救助活動や消火活動に支障をきたす可能性もある。本研究では、緊急輸送道路の事前指定および修正を行う際に参考となることを目的とした緊急輸送道路デザインモデルを提案する。

2. 過去の地震災害と交通ニーズ

地震は震源地によって内陸型地震と海溝型地震に分類され、被害の種類や範囲も異なる。阪神・淡路大震災は、都市部で発生したため、倒壊した構造物による道路の閉塞と阪神高速道路の倒壊によって交通容量が低下して大渋滞が発生した。阪神高速道路は被災地を通過して日本の東西をつなぐ道路であったため、日本の東西の交通路が断たれ、迂回をしなければならなかった。緊急車両や鉄道代替バスを優先する交通規制も行われたが、道路状況は混乱していた。この地震において、はじめて地震発生後の渋滞、そしてそれによる物資輸送や人的移動の困難を経験したといえる。

新潟県中越大地震は、中山間地域で発生した直下型地震であるが、このときには、旧山古志村（現長岡市）と周辺市町村を結ぶ道路が土砂災害等によって全て寸断さ

れ、旧山古志村の14集落全てが孤立し、住民はヘリコプターで避難した。山古志村の14集落を含め、新潟県内では道路の不通によって61集落が孤立し、ひとつの路線が不通になっても代替経路が確保されるような重層ネットワークの必要性が明らかとなった。広域的な移動の視点からは、地震によって新幹線が脱線し、上越新幹線と在来線の上越線は不通となった。また、道路が被災したため、関越自動車道、国道17号が通行止めとなり、東京と新潟を接続する交通網は寸断され、道路の全面復旧には約1ヶ月、鉄道の全面復旧には約2ヶ月かかっている。しかし、東京と新潟間には他の経路が整備されていたため、代替経路を活用することができた。新潟空港と羽田空港間の臨時航空便が運航され、高速道路では磐越自動車道、上信越自動車道が代替経路として利用された。新幹線の不通区間では、代替バスの運行も行われた。このように、ネットワークの重層性の効果も観測されている。

東日本大震災では、津波によって沿岸部は甚大な被害を受けた。内陸部を通る東北自動車道と国道4号から沿岸部へ向かう道路は津波による瓦礫で寸断された。内陸部から沿岸部に向けて車両が通行できる道を確保する道路啓開のためにくしの歯作戦が行われている。東日本大震災では、主たる交通規制は、広域の移動を担う高速道路のみに限定されている¹⁾。阪神・淡路大震災では一般道路を含め広く指定したが、今回は規制から除外しなければならない車両が増えると担保が困難であること、規制効果が低下することなど鑑み、指定範囲を最小限度に

と定めることとされている¹⁾。

これらの結果から交通の地震災害対策として考慮すべき点を以下にまとめた。

1. 平常時から緊急輸送道路と規制方法を指定すべき
2. 地震発生時には被害に応じて緊急輸送道路や交通規制を変更できる体制を整備する
3. 交通規制は、道路の復旧状況、交通量、被災地の状況等に応じて規制範囲を変化させる
4. 緊急輸送道路の耐震化を図る
5. 高規格道路の整備を進め、延焼防止効果を高める
6. 斜面崩壊の危険性のある箇所の補強をする
7. 広域の道路ネットワーク整備を進め、地震災害発生時の接続性を確保できるようにする

上記の踏まえ、道路整備及び災害発生後の交通規制方法を検討していく必要があると考える。

3. 緊急輸送道路デザインモデル

(1) モデル化の方針

過去の経験を踏まえると、交通状況や被害に応じて何らかの形で緊急輸送道路を設定する方法論を確立しておくことが重要といえる。そのために、まず緊急輸送道路を利用可能な緊急車両と、それ以外の一般車両のニーズを考えてみる。緊急車両に求められるのは、目的地まで円滑に移動することが可能であることである。阪神・淡路大震災においては、交通渋滞が大きな問題としてクローズアップされたが、災害発生後からある程度の日数を経た後には、少なくとも緊急輸送道路上は円滑な交通が確保されていたといえる。そのため、緊急輸送道路上の移動のしやすさを示す指標として、「緊急車両が移動するODペア間の最短経路所要時間」を用いることとする。一方、被災者自身の復旧復興活動においても自動車は重要な交通手段である。したがって、緊急輸送道路を広範に設定すると、それ以外の道路しか利用できない一般車両の移動に齟齬が生じ、結果として被災者自身の復旧活動に支障をきたす。一般に、緊急輸送道路の設定を行う前提として、規制がなければ深刻な交通渋滞が懸念されるためといえる。したがって、緊急輸送道路規制外の道路ネットワークの残存容量は、交通需要を下回ることが想定される。そのため、緊急輸送道路を利用できない一般車両の移動のしやすさを示す指標として、「緊急輸送道路以外で構成される残存ネットワークの交通容量」を用いることとする。

緊急車両に対して絶対的な優先度を付与することとした場合、緊急車両が移動すべきODペア（緊急輸送ODペア）の最短経路の和集合を緊急輸送道路に設定すればよい。一方で、緊急輸送道路の指定が多ければ多いほど残存ネットワーク容量は減少するため、この2つの指標に

は明らかなトレードオフが生じているといえる。

なお、緊急輸送道路の設定方法に関する研究として、木保²⁾は、地点間の連結性を評価する方法を用いて地震時緊急路網の整備計画を評価する方法論を提案している。また、南³⁾も同様に、道路ネットワーク構造のリダンダンシーの観点から、道路網評価を進めてきており、山口県緊急輸送道路網についてその評価を行っている。これら2つの研究は、いずれも道路網整備という観点での評価である。一方、地震災害等の発生後における交通規制方法について取り扱った研究もいくつかある。若林・平松⁴⁾、飯田ら⁵⁾は、阪神淡路大震災後にエリア単位で一般車両を規制することが可能となったことを受け、エリア交通規制を提案し、その効果検証を行っている。また、梶谷ら⁶⁾は、緊急車両を考慮し、それらの円滑性を確保するための一般車両の交通需要抑制量を算出している。これらは、主に一般車両の利用規制について論じている。後述するが、本研究においても平常時と比較した容量比を算定しており、それらの結果は一般車両の利用規制に活用可能である。以上関連する文献をレビューしたが、一般車両の移動性と緊急車両の速達性を同時に扱った研究は見当たらなかった。

(2) 緊急輸送道路評価に関する定式化

緊急輸送道路の評価は、最短経路所要時間であることから、緊急車両が接続すべき緊急輸送ODペアの緊急輸送道路上での最短経路の総和を最小化すればよいことになる。ここでは、緊急車両は緊急輸送道路のみを走行可能とし、緊急輸送ODペアを必ず接続するものとする。なお、緊急輸送ODペアごとにその重要度が異なることを想定し、重み β_w で結合することとする。定式化は以下の通りである。

$$\min \sum_w \beta_w \sum_a t_a x_{aw} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{a \in \text{Out}(o_w)} x_{aw} = 1, \quad \sum_{a \in \text{Out}(d_w)} x_{aw} = 0 \quad \forall w \in \mathbf{W}_e \quad (2)$$

$$\sum_{a \in \text{In}(o_w)} x_{aw} = 0, \quad \sum_{a \in \text{In}(d_w)} x_{aw} = 1 \quad \forall w \in \mathbf{W}_e \quad (3)$$

$$\sum_{a \in \text{In}(k)} x_{aw} - \sum_{a \in \text{Out}(k)} x_{aw} = 0, \quad (4)$$

$$\forall k \in \mathbf{N}, k \neq o_w, k \neq d_w, w \in \mathbf{W}_e$$

$$x_{aw} - y_a \leq 0 \quad \forall a \in \mathbf{A}, w \in \mathbf{W} \quad (5)$$

$$y_a = 0 \quad \forall a \notin \mathbf{A}_y \quad (6)$$

$$x_{aw} = \{0,1\}, y_a = \{0,1\} \quad \forall w \in \mathbf{W}_e, a \in \mathbf{A} \quad (7)$$

変数定義は以下の通りである.

- x_{aw} : リンク a が OD ペア w の最短経路に含まれていれば 1, そうでなければ 0 をとる二値変数 (未知変数)
- y_a : リンク a が緊急輸送道路に指定されていれば 1, そうでなければ 0 をとる二値変数 (未知変数)
- β_w : OD ペア w の重み (OD ペアごとに重要度が変わることを想定)
- t_a : リンク a の所要時間
- \mathbf{W}_e : 緊急輸送道路で接続すべき OD ペアの集合
- \mathbf{N} : ノードの集合
- \mathbf{A} : リンクの集合
- \mathbf{A}_y : 緊急輸送道路に指定されるリンクの集合
- o_w : OD ペア w の出発地ノード
- d_w : OD ペア w の目的地ノード
- $In(n)$: ノード n に流入するリンクの集合
- $Out(n)$: ノード n から流出するリンクの集合

目的関数である式(1)は, OD ペアごとの最短経路所要時間の重み付き総和を最小化している. 制約条件(2)~(4)は, 最短経路が一筆書きになることを条件としており, 出発地から流出するリンクのうちひとつが, 目的地に流入するリンクのうちひとつが最短経路を構成し, そしてそれ以外のノードでは最短経路を構成する流出リンクと流入リンクの数が等しくなることを条件としている. 式(5)は, 最短経路は緊急輸送道路上で設定する必要があるため, そのリンクが緊急輸送道路に設定されていない (すなわち $y_a=0$) ならば自動的に最短経路に含まれない (すなわち $x_{aw}=0$) となるための条件である. 式(6)は, 緊急輸送道路に指定されるリンクの集合でなければ y_a をゼロ, すなわち緊急輸送道路に指定されない, ということを示している. 例えば, 緊急輸送道路は, ある一定規格以上の道路に限定したい場合などに, \mathbf{A}_y を設定すればよい. 式(7)はデザイン変数である x_{aw} , y_a が二値変数であることを示している.

なお, この式をみると, 緊急輸送道路のデザイン変数 y_a は制約条件(5), (6)のみに含まれており, 式(6)より緊急輸送道路の候補路線でなければ y_a はゼロとなるが, それ以外は全て 1 (緊急輸送道路に指定する) とすることで, 目的関数を最小化できることがわかる. したがって, 緊急輸送道路に指定されていないネットワークの残存容量を算定するモデルと結合することで前述のトレードオフを表現することとする.

(3) 残存ネットワーク容量の算定

緊急交通路に指定された道路は, 一般車両は利用できないため, 一般車両の移動のしやすさを, 緊急輸送道路以外の残存ネットワークのネットワーク容量をもって評価する. ネットワーク容量とは, 混雑を発生させずに最大限受け入れることができる生成交通量である. なお,

計算にあたって, 一般車両のODパターンが必要であるが, 非常時のパターンを知ることは困難である. ここでは, 被災者が日常の生活に戻ることが最大の目的として, 平常時の目的地選択確率を用いることとした.

一般的に, ネットワーク容量を算定する際には, 利用者均衡を仮定することが多い. しかし, この場合非線形最適化問題を解く必要があり, 複雑な問題ではないものの2レベル最適化問題として定式化される. この場合, 求解が容易ではなくなるため, ここでは総走行時間の最小化問題として定式化した. 混雑を発生させない, という制約条件を考慮することから, 所要時間の増加はそれほど深刻ではないとし, 各リンクの所要時間は定数として取り扱うこととする. この結果, 総走行時間最小化問題は下記の線形計画問題に帰着する.

$$\max s \quad (8)$$

subject to

$$\sum_{a \in In(k)} v_{ad} - \sum_{a \in Out(k)} v_{ad} + s \sum_{w \in \{w | o_w = k, d_w = d\}} p_w = 0 \quad \forall k \in \mathbf{N}, k \neq d, \forall d \in \mathbf{D} \quad (9)$$

$$\sum_d v_{ad} \leq (1 - y_a) c_a \quad \forall a \in \mathbf{A} \quad (10)$$

$$v_{ad} \geq 0 \quad \forall a \in \mathbf{A}, d \in \mathbf{D} \quad (11)$$

変数定義は以下の通りである.

- s : ネットワーク容量 (未知変数)
- v_{ad} : 目的地 d へ向かうリンク a の交通量 (未知変数)
- p_w : 一般車両 OD ペア w の OD 確率
- c_a : リンク a の容量
- \mathbf{D} : 目的地の集合

目的関数である式(8)は, 所与の OD 確率 p_w のもとで生成交通量 s を最大化することを意味する. なお, 未知変数は, ネットワーク容量 s と, 目的地別リンク交通量 v_{ad} である. 式(9)は, フロー保存則を示しており, 任意のノード k において, そのノードに流入する交通量とそのノードから発生する交通量の和が当該ノードから流出する交通量に等しいことを示している. 式(10)は, 容量制約であり, なおかつリンク a が緊急交通路として指定されている場合には, 右辺=0 となり, 利用不可能となるように設定される. 最後に, 式(11)はリンクフローの非負制約条件を示している.

(4) 残存ネットワーク容量を考慮した緊急輸送道路デザインモデルの定式化

以上を踏まえ, 残存ネットワーク容量を考慮した緊急交通路の指定問題を定式化する. 具体的には, 上記の 2 つの最適化問題を双方の重みを示すパラメータ α を通じ

て結合することを考える。ただし、それぞれの指標の単位が異なるため、それぞれ基準化することとする。つまり、緊急輸送 OD ペア間の最短経路所要時間については、全てのリンクが利用可能とした場合の目的関数値 T からの増加比率（以下所要時間増加比）、そして残存ネットワーク容量については、全てのリンクが利用できるとした場合の目的関数の値 S からの減少比率（以下ネットワーク容量減少比）とし、それらを重み付きで結合する。1 番目の問題は最小化、2 番目は最大化であることに留意して最適化問題を定式化すると以下の通りとなる。

$$\min \alpha \frac{\sum_w \beta_w \sum_a t_a x_{aw}}{T} - (1 - \alpha) \frac{S}{S} \quad (12)$$

Subject to

$$\sum_{a \in \text{Out}(o_w)} x_{aw} = 1, \quad \sum_{a \in \text{Out}(d_w)} x_{aw} = 0 \quad \forall w \in \mathbf{W}_e \quad (13)$$

$$\sum_{a \in \text{In}(o_w)} x_{aw} = 0, \quad \sum_{a \in \text{In}(d_w)} x_{aw} = 1 \quad \forall w \in \mathbf{W}_e \quad (14)$$

$$\sum_{a \in \text{In}(k)} x_{aw} - \sum_{a \in \text{Out}(k)} x_{aw} = 0, \quad \forall k \in \mathbf{N}, k \neq o_w, k \neq d_w, w \in \mathbf{W}_e \quad (15)$$

$$x_{aw} - y_a \leq 0 \quad \forall a \in \mathbf{A}, w \in \mathbf{W} \quad (16)$$

$$\sum_{a \in \text{In}(k)} v_{ad} - \sum_{a \in \text{Out}(k)} v_{ad} + s \sum_{w=\{w|o_w=k, d_w=d\}} p_w = 0, \quad \forall k \in \mathbf{N}, k \neq d, \forall d \in \mathbf{D} \quad (17)$$

$$\sum_d v_{ad} \leq (1 - y_a) c_a \quad \forall a \in \mathbf{A} \quad (18)$$

$$y_a = 0 \quad \forall a \notin \mathbf{A}_y \quad (19)$$

$$x_{aw} = \{0, 1\}, y_a = \{0, 1\} \quad \forall w \in \mathbf{W}_e, a \in \mathbf{A} \quad (20)$$

$$v_{ad} \geq 0 \quad \forall a \in \mathbf{A}, d \in \mathbf{D} \quad (21)$$

この問題は、未知変数が一部二値変数である、混合整数線形計画問題（MILP, Mixed Integer Linear Programming Problem）となっていることがわかる。未知変数の数は、緊急交通路の指定が A 個、OD 別最短経路情報が $A \times W_e$ 個、目的地別リンク交通量が $A \times D$ 個、ネットワーク容量が 1 個の合計 $(W_e + D + 1) \times A + 1$ 個である。

(5) 一般車両の冗長経路削除のためのサブ問題

(4) で定式化された問題を解くと、緊急交通路とネットワーク容量を計算することが可能である。しかしながら、一般車両のネットワーク容量を算定する際に所要時間を考慮していないことから、冗長な経路への割り当て

を行うことがある。ただし、得られたネットワーク容量は一意に与えられるため、最適解であるネットワーク容量 s が求まった後に以下のサブ問題を解き、冗長な動きを除去した上での目的地別リンク交通量 v_{ad} を求める。

$$\min \sum_a t_a \sum_d v_{ad} \quad (22)$$

subject to

$$\sum_{a \in \text{In}(k)} v_{ad} - \sum_{a \in \text{Out}(k)} v_{ad} + s \sum_{w=\{w|o_w=k, d_w=d\}} p_w = 0 \quad (23)$$

$$\forall k \in \mathbf{N}, k \neq d, \forall d \in \mathbf{D}$$

$$\sum_d v_{ad} \leq (1 - y_a^*) c_a \quad \forall a \in \mathbf{A} \quad (24)$$

$$v_{ad} \geq 0 \quad \forall a \in \mathbf{A}, d \in \mathbf{D} \quad (25)$$

ただし、 s^* は(4)で求められた最適解である。

(6) 計算手順

提案したモデルの求解においては、Matlab を使い、最適化計算においては Gurobi Optimizer を利用した。計算手順は以下に示すとおりである。

Step0: ネットワーク情報などによりインプットのベクトル、行列を作成する。

Step1: 緊急輸送道路利用者にとって、全ての緊急交通路設定対象道路が利用できるとした場合に式(1)から(7)の最適化問題を解いて、最短経路所要時間の重み付き和 T を求める。

Step2: 被災者にとって全ての道路が利用できるとした場合に、式(8)から(11)を解いて、総ネットワーク容量 S を求める。

Step3: 式(12)から(21)を解いて、最大ネットワーク容量を求める。

Step4: 式(22)から(25)を解いて一般車両の最適フローを求める。

4. 仮想道路ネットワークにおける適用計算

(1) 計算設定

上記の計算を図-1 に示す簡単な道路ネットワークに対して適用した。図-1(a)にはリンク番号を、図-1(b)にはリンク所要時間と容量を示した。また、図-1(c)には緊急輸送 OD ペアを、図-1(d)には一般 OD ペアを示している。ノード 3 を外部と接続しているノード、ノード 4 を域内中心ノード、ノード 8 を接続すべきノードと考えて設定している。また、一般 OD は 3, 4, 8 に加えて、6 との接続も保証するように想定した。

(2) 緊急輸送道路の指定を限定しないケース (Case

1)

Case1 は、全ての道路が緊急輸送道路に設定できる場合である。表-1 に所要時間比とネットワーク容量比の推移を、図-2 にモデル適用の結果得られた緊急輸送道路に設定されたリンクを示した。ここでは、 α を 1 から順次小さくしていき、緊急輸送道路デザインが変化した 0.99, 0.8, 0.1 の結果を示している。これらの図表より、目的関数の相対重みをあらかずパラメータ α を変化させることによって、緊急輸送道路の設定が変化することが確認できた。 α の値が小さい場合、一般車両のネットワーク容量の重みが相対的に大きくなるため、一般車両のネットワーク容量が増加するが、緊急輸送道路の所要時間は長くなり、速達性が失われる。この例においては、 $\alpha=0.99$ の場合には所要時間比は 1.00 と全ての緊急輸送 OD について最短経路を使用できているが、 $\alpha=0.1$ の場合には、1.069 倍になっている。逆に、 α の値が大きくなると、緊急輸送道路の所要時間の重みが大きくなるため、所要時間は短縮されるがネットワーク容量は減少する。 $\alpha=0.99$ の場合、ノード 3 から流出する 2 つのリンクがいずれも緊急輸送道路に指定されたため、一般車両が移動できず、一般車両のネットワーク容量は 0 (ネットワーク容量比は 1) になる。 $\alpha=0.8$, $\alpha=0.1$ の場合は、緊急輸送 OD ペアがリンクを共有して使用することで、所要時間比は 1.02 と増加するものの、ネットワーク容量比が 0.435 と改善していることが確認できる。この結果より、適切なパラメータ α を設定することで、一般車両の移動のしやすさを示すネットワーク容量を考慮した緊急輸送道路のデザインが可能であることが確認できた。

$\alpha=0.1$ の場合の目的地別の一般車両が使用するリンクを図-3(a)~(d)に、それぞれのリンクの混雑度を図-4 に示す。図-3(c)より、ノード 4 からの発生交通量は 433 台のうち 300 台はリンク 8 (4→1) へ、133 台はリンク 10 (4→7) へ走行させている。リンク 8 の容量は 1000 台であるのに対し、図-3(a)の 433 台と(c)の 300 台の計 733 台が使用している。図-4 より、ノード 4, 1, 2, 5 を接続するリンク 8, 1, 5 は容量に余裕がある。しかし、リンク 13 (5→6) は 300 台が使用し混雑率は 1 であり、容量の少ないリンクがネットワーク全体の容量を決めていることがわかる。緊急輸送道路がリンク 7 (3→6) を使用するため、ノード 3 から 6 への移動ができず、一般車両の多くは反時計回りに外周のリンクを使用して移動しており、図-4 において外周の反時計回りの混雑率はほぼ 1 であるが、時計回りは混雑率が 1 になるリンクはない。以上のように、得られた結果より、緊急車両の利用経路だけでなく、一般車両の移動すべき経路や緊急輸送道路に指定されていない道路のうちで容量を規定している場所を特定することができる。

図-3(a)~(d)に、それぞれのリンクの混雑度を図-4 に示す。図-3(c)より、ノード 4 からの発生交通量は 433 台のうち 300 台はリンク 8 (4→1) へ、133 台はリンク 10 (4→7) へ走行させている。リンク 8 の容量は 1000 台であるのに対し、図-3(a)の 433 台と(c)の 300 台の計 733 台が使用している。図-4 より、ノード 4, 1, 2, 5 を接続するリンク 8, 1, 5 は容量に余裕がある。しかし、リンク 13 (5→6) は 300 台が使用し混雑率は 1 であり、容量の少ないリンクがネットワーク全体の容量を決めていることがわかる。緊急輸送道路がリンク 7 (3→6) を使用するため、ノード 3 から 6 への移動ができず、一般車両の多くは反時計回りに外周のリンクを使用して移動しており、図-4 において外周の反時計回りの混雑率はほぼ 1 であるが、時計回りは混雑率が 1 になるリンクはない。以上のように、得られた結果より、緊急車両の利用経路だけでなく、一般車両の移動すべき経路や緊急輸送道路に指定されていない道路のうちで容量を規定している場所を特定することができる。

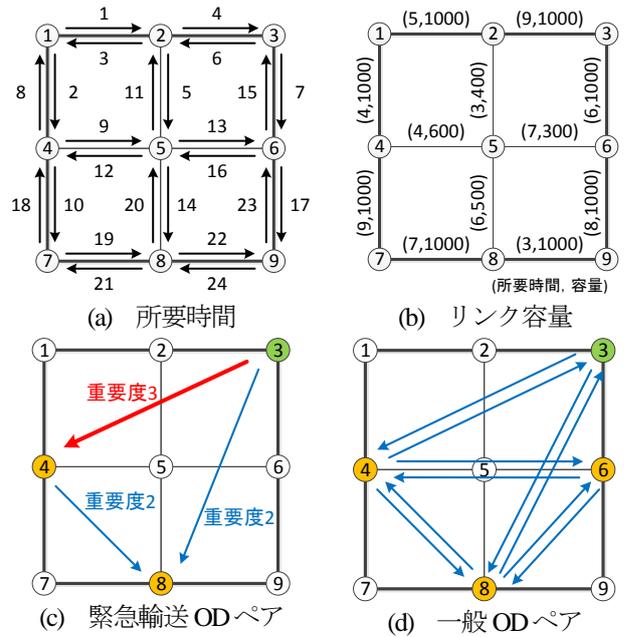


図-1 例題ネットワーク

表-1 所要時間とネットワーク容量 (Case 1)

	基準	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.99$
目的関数値		-0.571	0.703	0.990
所要時間	102.0	109.0	104.0	102.0
所要時間減少比		1.069	1.020	1.000
ネットワーク容量	5750	4333	3250	0
容量減少比		0.246	0.435	1.000

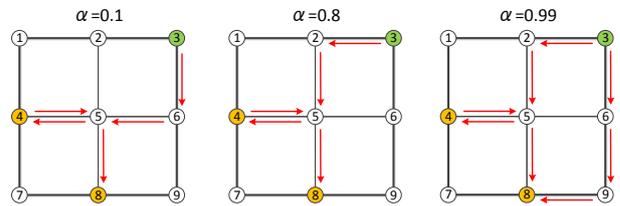


図-2 緊急輸送道路の使用リンク (Case 1)

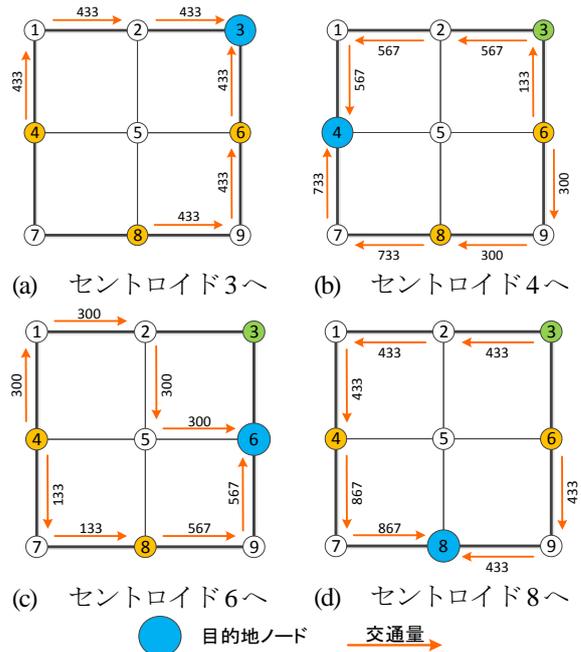


図-3 一般車両の使用リンク (Case1, $\alpha=0.1$)

(3) 緊急輸送道路の指定を限定するケース (Case 2)

災害発生時において、道路種級の低い道路は十分な幅員がなく、地震災害の発生によって道路閉塞が起こりうる。幹線道路は交差点が限定されていることなどにより、現実に指定されている緊急輸送道路は主要幹線道路となっていることがほとんどである。そのため、Case 2 では、緊急輸送道路を一定ランク以上の道路に限定する場合について考える。ここでは、外周の道路（図-1中の太いリンク）のみが緊急輸送道路として設定できるとして計算を実施した。表-2 に所要時間増加比とネットワーク容量減少比を、図-5 に得られた緊急輸送道路に指定されたリンクを示す。幹線道路のみ緊急輸送道路に指定される場合には、当然限定しない場合よりも緊急輸送道路の所要時間が長くなる。Case 2 では緊急輸送道路に指定できるリンクが限定されているため、たとえ緊急輸送道路の速達性のみに重みをおいても、所要時間はCase 1 よりも長くなる。この計算では、所要時間比は1.176であった。また、 $\alpha=0.8$ では、ノード3から流出する全てのリンクが緊急輸送道路に指定されることから、一般車両のネットワーク容量は0となっている。

(4) Case 1, 2の比較

Case 1 と 2 の $\alpha=0.1$ の場合を比較する。所要時間はCase 1 では154.0であるのに対し、Case 2 では109.0であり、ネットワーク容量は、Case 1 では3250であるのに対し、Case 2 では4333であった。Case 2 はCase 1 よりも所要時間は長く、ネットワーク容量も減少していることがわかる。つまり、緊急輸送道路を一定ランク以上に限定したことにより、両方とも悪化する。この理由としては、緊急輸送道路指定を限定すると、どうしても遠回りになりがちとなるためと考えられる。一方で、緊急輸送道路は比較的容量の大きな路線を指定することが多く、一般車両はそれ以下の道路を主に利用しなければならないため、このような状況が生じたと考えられる。これより、地域防災計画の緊急輸送道路には主要幹線道路が事前指定されていることが多いが、やみくもに容量の大きな幹線道路を指定することは緊急輸送道路の速達性だけでなく、一般車両の移動性を損ねるため適切とはいえない、といえる。このように、モデルを用いて緊急輸送道路を一定ランク以上の道路に限定した場合についても表現することができ、限定した場合とそうでない場合のトレードオフを提案したモデルにより検討可能であるといえる。

5. 岐阜市道路ネットワークにおける適用

(1) 分析対象ネットワークと計算設定

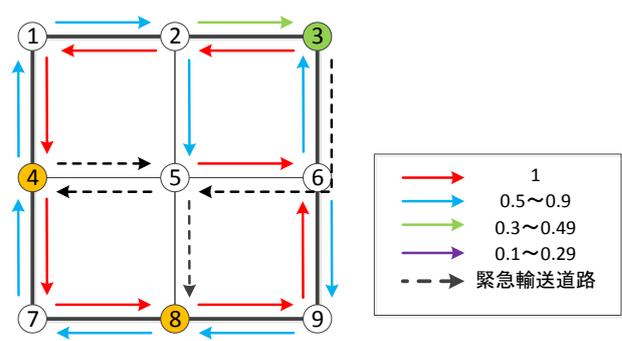


図-4 一般車両の混雑率 (Case 1, $\alpha=0.1$)

表-2 所要時間とネットワーク容量 (Case 2)

	基準	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.8$
目的関数値		-0.358	0.941
所要時間	102.0	154.0	120.0
所要時間減少比		1.510	1.176
ネットワーク容量	5750	3250	0
容量減少比		0.435	1.000

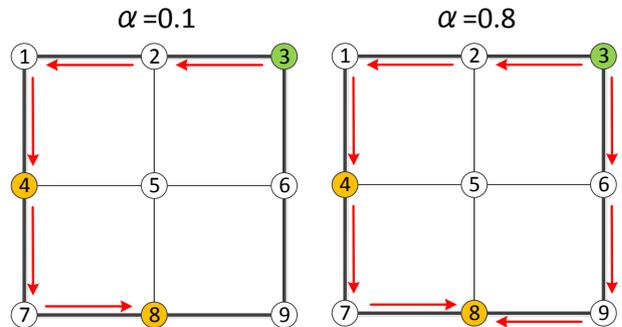


図-5 緊急輸送道路の使用リンク (Case 2)

(a) 対象ネットワーク

4では、仮想ネットワークに緊急輸送道路デザインモデルを適用して、モデルの挙動を確認し、想定した結果を与えることを確認した。引き続き、ここでは、岐阜市のネットワークを対象にして緊急輸送道路デザインモデルの適用を行い、実用規模のネットワークにおいても計算が可能かどうかの検証を行う。計算にあたり、まず岐阜市ネットワークを2005年の道路交通センサスのデータを用いて作成した。なお、ベースとした道路ネットワークデータの制約もあり、今回の計算においては、ネットワークは国道、県道を対象とする。ただし、接続のために一部、市道を含めている。ネットワークは、双方向のリンク数676、ノード数215、内部セントロイド数28で構成される。なお、28のセントロイドに外部セントロイドが5つ加わるため、セントロイドの総数は33となる。図-6に分析対象ネットワークの図を示す。

(b) リンクの設定

リンクの所要時間、ネットワーク容量は、2005年の道路交通センサスデータを用いて設定した。ただし、外

部セントロイドに接続するリンクは、所要時間は 0.001 分（最小）、ネットワーク容量は 500000（最大）とする。なお、岐阜県ではあらかじめ緊急輸送道路の候補となる路線を指定している。これらは、地域統合型 GIS ぎふ⁷⁾の岐阜県緊急輸送道路（平成 20 年度指定）を参考にして作成した。なお、緊急輸送道路デザインモデルの結果得られる緊急輸送道路との混同を避けるため、ここでは県指定の緊急輸送道路を「県指定道路」と称することとする。計算においては、これらを考慮し分析を進める。図-7 に県指定道路を示しておく。

(c) 一般車両 OD

一般車両の OD 交通量は、平成 17 年道路交通センサスデータを用いて、岐阜市セントロイドに係るデータのみを抽出して作成した。まず、内部セントロイド間の OD 交通量については、道路交通センサスデータをそのまま用いる。内外、外内交通量は、外部セントロイドとの接続リンクからの流入（流出）リンク交通量を流入（流出）交通量とし、重力モデルおよびデトロイト法を用いて、その目的地（あるいは出発地）を内部セントロイドに配分して作成した。外々交通量は無視している。

(d) 緊急車両 OD

本来ならば、想定する時点に併せて適切な緊急車両 OD パターンを設定し分析を進める必要があるが、ここでは実ネットワークでの適用計算の可能性を確認することを目的として、岐阜市役所と外部ノードを接続するケースについて検討した。具体的には、岐阜市の東西南北の外部ノードとの接続を緊急輸送 OD ペアとし、それぞれ往復方向を指定することとした。また、岐阜市役所へ向かう交通の重要度を 2、逆に外部への移動を 1 とここでは設定している。

(2) 県指定1次緊急輸送道路のみに候補路線を限定した場合 (Case A)

まずは、図-6 で赤い太線で示された県指定の 1 次緊急輸送道路のみを指定候補とした場合の計算結果を示す。表-3 がその計算結果である。パラメータ α を大きくしても、ネットワーク容量は 0 にはならなかった。ネットワーク容量比は $\alpha=0.001$ の場合は 0.289、 $\alpha=0.999$ の場合は 0.501 であった。緊急輸送道路に指定されるリンクは容量が大きいため、一般車両が使用できるネットワーク容量は減少する。しかし、緊急輸送道路に指定されるリンクが限られているため、一般車両が移動できなくなるという状態にはならないといえる。

(3) 県指定1次、2次緊急輸送道路を候補路線を限定した場合 (Case B)

次に、県指定の 1 次および 2 次の緊急輸送道路のみから緊急輸送道路を設定できるとした場合について考察す

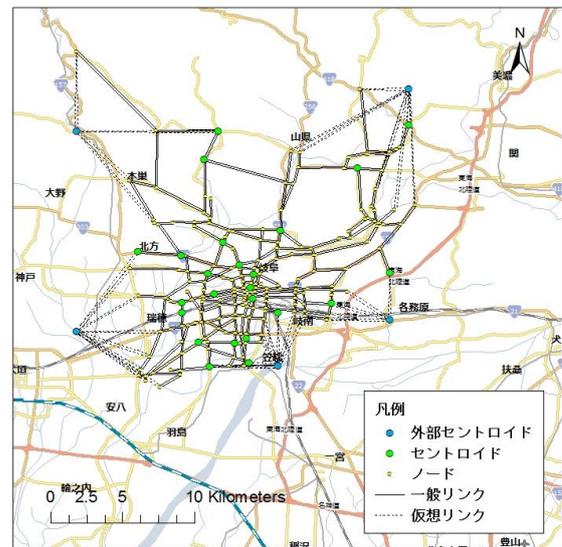


図-6 岐阜市道路ネットワーク

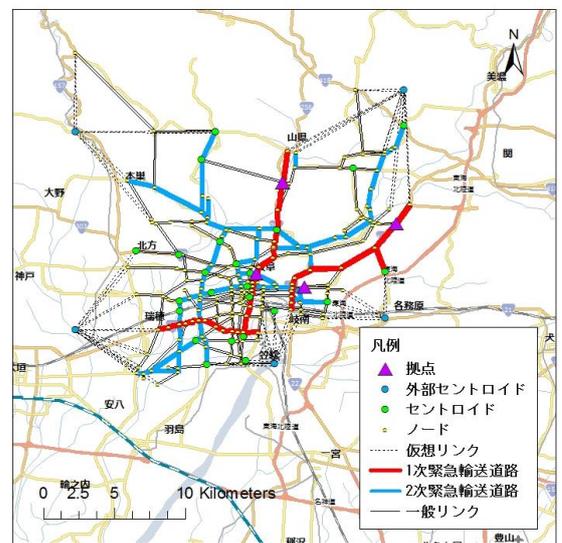


図-7 県指定の緊急輸送道路

る。パラメータ α の値ごとの所要時間およびネットワーク容量とそれらの比の推移について表-4 に示す。緊急輸送道路を 1 次および 2 次に限定した場合では、緊急輸送道路に重みをおいた $\alpha=0.999$ の結果において、一般車両の移動ができなくなり、ネットワーク容量減少比が 1、すなわち一般車両は 1 台も移動できない結果となった。一方で、 $\alpha=0.001$ の場合のネットワーク容量比は 0.161 と Case A の 0.289 に比較してかなり改善している。Case A と同様に緊急輸送道路に指定されるリンクは限定されているものの 2 次緊急輸送道路も使用できるため、緊急輸送道路の所要時間は短縮され、一般車両のネットワーク容量も増加したと考えられる。

(4) 候補路線を限定しない場合 (Case C)

最後に、全てのリンクから緊急輸送道路を指定可能とした場合の、パラメータ α の値ごとの結果について表-5 に示す。緊急輸送道路を限定しない場合、限定したとき

よりも所要時間，ネットワーク容量ともに改善する。 $\alpha=0.999$ の場合，所要時間比は 1 となり，他の結果と異なり，最短となっている。このときネットワーク容量は 0 であり，一般車両は移動できない。一方で， $\alpha=0.001$ とした場合には，ネットワーク容量比は 0.113 とほぼ 90% の一般車両が移動できる。Case A および B と比較して，所要時間もネットワーク容量も良い結果となるが，緊急輸送道路に指定されるリンクが限定されないということは，緊急輸送道路に不適切な道路も指定されることを意味する。地震災害に車線数が少ない道路や幅員が狭い道路が指定されることは理想的とはいえず，どの道路を緊急輸送道路に指定するかどうかは，慎重な議論が必要だろう。

5. おわりに

本研究では，緊急輸送道路の事前指定および修正を行う際に参考となることを目的とした緊急輸送道路デザインモデルを提案した。緊急車両については，緊急輸送 OD ペア間の速達性を，それ以外の一般車両については残存する道路ネットワークの容量を評価指標として，その重み付き和を最小にする緊急輸送道路のデザインモデルを定式化した。仮想道路ネットワークへの適用の結果，モデルは，緊急輸送道路の速達性と残存ネットワークの容量のトレードオフを適切に表現できることが確認された。また，岐阜市の道路ネットワークへ適用した結果，現実的な計算時間で解を得ることができ，その実用性も高いことが確認できた。

一方で，検討すべき課題も多い。まず，本研究では一般車両のネットワーク容量を総走行時間最小化問題として解いている。一般に，システム最適状態は利用者均衡状態とは異なるため，その妥当性について検討を加える必要があるといえる。さらに，一般車両の OD パターンとして平常時のものを利用することの正当性，緊急輸送 OD ペアの決定方法，緊急車両の速達性と一般車両のネットワーク容量の相対的重み α の決定方法などの検討も必要であろう。これらの課題について検討をすすめて，実用的な緊急輸送道路デザインモデルへの発展を進めていきたい。

謝辞：本研究は，京都大学防災研究所共同研究「地震ならびに洪水を想定した災害発生時の交通管理と避難計画に関する研究 (23G-10)」，2011～2012 年，研究代表者：

表-3 所要時間とネットワーク容量 (Case A)

	基準	$\alpha=0.001$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.999$
目的関数値		-0.709	-0.286	1.116	1.293
所要時間	148.4	210.7	207.1	192.2	192.2
時間減少比		1.420	1.395	1.25	1.295
ネットワーク容量	218666	155415	154463	109033	109033
容量減少比		0.289	0.294	0.501	0.501

表-4 所要時間とネットワーク容量 (Case B)

	基準	$\alpha=0.001$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.999$
目的関数値		-0.834	-0.452	0.863	1.029
所要時間	148.4	162.3	162.3	153.7	152.8
時間減少比		1.094	1.094	1.035	1.030
ネットワーク容量	218666	183397	183397	150145	0
容量減少比		0.161	0.161	0.313	1.000

表-5 所要時間とネットワーク容量 (Case C)

	基準	$\alpha=0.001$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.999$
目的関数値		-0.885	-0.497	0.831	0.999
所要時間	148.4	161.9	157.8	148.6	148.4
時間減少比		1.091	1.063	1.002	1.000
ネットワーク容量	218666	193978	193978	154463	0
容量減少比		0.113	0.113	0.294	1.000

倉内文孝，所内研究者：畑山満則」の成果の一部である。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 警察庁：「東日本大震災に伴う交通規制」，www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/traffic/koutu_kisei/koutsukisei.pdf (2013/5/5 アクセス)
- 2) 木俣昇：「地震時緊急路網の整備計画に関する基礎的研究—ソフト・システムズ・アプローチ—」，土木計画学研究・論文集，No.7，pp.75-82，1989.12
- 3) 南正昭：「防災点検データを用いた道路網整備計画の一評価技法」，土木計画学研究・論文集，No.17，pp.811-818，2000.9
- 4) 若林拓史，平松茂樹：「エリア規制による震災時道路網の交通流改善効果」，地域安全学会論文集 No.2，pp.87-94，2000.11
- 5) 飯田恭敬，倉内文孝，嶋田博文：「2段階エリア交通規制による震災時道路交通管理」，土木計画学研究・講演集，No.23(2)，723-726，2000.11
- 6) 梶谷有三，下夕村光弘，浦田康滋，田村亨，斎藤和夫：「緊急車両を考慮した震災時における発生・集中可能交通量について」，土木計画学研究・論文集，No.14，pp.585-593，1997.9
- 7) 県域統合型GISぎふ：<http://www.gis.pref.gifu.jp/> (2013/5/5 アクセス)

(2013.5.7 受付)

Emergency Route Design Model Considering the Residual Network Capacity for Non-emergency Vehicles

Fumitaka Kurauchi and Yuuka INOUE

At previous earthquake disasters traffic regulation by setting emergency routes to prioritise emergency vehicles has been carried out. Smoother traffic may have been guaranteed on the emergency routes, but traffic congestion may have occurred on the rest of the roads. Also, the emergency routes have been identified in advance in regional disaster plans, but the criteria of identifying them are not clear. Since severe congestion may occur on the rest of the road, emergency routes should carefully be determined. This study proposes the emergency route design model which can be used to identify the candidate emergency routes in advance before disaster happens, and to modify the emergency routes after the disaster. The model considers the trade-offs between accessibility of emergency vehicles and the residual network capacity that non-emergency vehicles can use. The model is applied to hypothetical as well as practical size network and its efficiency has been confirmed.