

# 道路網の機能的階層性と 災害時の時間信頼性との関連

朝倉康夫<sup>1</sup>・柏谷増男<sup>2</sup>・藤原健一郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790松山市文京町)

<sup>2</sup>フェロー 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790松山市文京町)

<sup>3</sup>正会員 工修 セントラルコンサルタント(株) 広島支店 (〒732広島市東区光町1-9-27)

本論文の目的は、ネットワークの機能的階層性の指標を示すとともに、階層性と災害時における信頼性の関連について考察することにある。機能的階層性の指標は、道路区間に期待される計画機能別にネットワーク化したときそれぞれのネットワークで連結しているODペア数の割合の積である。容量制約を持つ需要変動型利用者均衡モデルにより災害時のネットワークフローを記述し、それをを用いて災害時の時間信頼性指標を計算する方法を新たに示した。小規模ネットワークにおける数値計算を通して、機能に差のないプレーンなネットワークや階層性を持たないランダムなネットワークと比較して、機能的階層性の高いネットワークは災害外力が大きい場合の信頼性も良好であることを検証した。

**Key Words:** road network, functional hierarchy, natural disaster, reliability, transport network flow

## 1. はじめに

自然災害に見舞われやすい狭隘な国土に高密度な活動が集中するわが国では、国民生活の多様化や産業活動の高度化・広域化とあいまって、道路交通システムの信頼性を確保することがますます重要な課題のひとつとなってきた。道路ネットワークシステムの信頼性に関する研究の蓄積は、ここ数年の間はかなり進んできているものの、交通に固有の特性に見合う信頼性概念は必ずしも体系的に整理されたとはいえない。

言うまでもないことであるが、「道路網計画にあたっては、多種多様な機能を持つ道路で構成される道路網を体系的・統一的に整備していく基本的な軸として道路の機能分類を考え、この考え方に基づき、道路の規格・構造を決定しなければならない。」(道路構造令)とされている。道路がその機能を十分に発揮するには、階層的かつ有機的なネットワーク構成とすることが重要とされているにもかかわらず、後述するようにネットワークの階層性に関する研究は多く見あたらない。階層性を持った道路網は、平常時には安全で円滑な交通サービスを提供するのに有効である一方で、個々のリンクの機能

に応じて構造的な頑強性を差別化することにより、災害時には階層性の低いネットワークに比較して相対的に高い信頼性を確保しうることが期待される。

そこで本稿では、ネットワークの機能的階層性の指標を示すとともに、階層性と災害時における信頼性の関連について考察することを目的としている。以下、第2章では、道路ネットワークの機能的階層性の指標について述べる。第3章では、ネットワークフローを考慮した災害時の時間信頼性指標について述べる。第4章では階層性と信頼性の関連についての仮説を述べる。第5章では小規模ネットワークでの数値計算を通して、道路ネットワークを階層化することが災害時の信頼性向上に貢献するかを調べる。最後に第6章で結論を述べている。

## 2. 道路ネットワークの機能的階層性

### (1) 階層性に関する従来の研究

著者らの知るところでは、交通ネットワークの階層性に関するこれまでの研究事例は多いとはいえない。交通ネットワークの形態論からのアプローチ(たとえば、太田<sup>1)</sup>)を見ても、階層性を具体的に

指標化した研究は見られない。このような中で、岡田・田中<sup>2)</sup>は、フラクタル次元を適用して道路網の形態学的特性の計量指標化を行っており、岡田・田中<sup>3)</sup>は、道路網の整備水準を評価するための指標として、区間地位指数、路線地位指数、経路構成重要度指数の3つの指標を提案している。また、四茂野・岡部<sup>4)</sup>は、無秩序網モデルによる規範的な道路網を基準に実際の道路網の絶対評価を行っている。しかし、これらの研究はいずれもネットワークの構造分析に主眼が置かれ、道路を利用する交通の流れを考慮して階層性を議論するには至っていない。

飯田他<sup>5)</sup>は交通量配分シミュレーションにより道路区間のトリップ長分布を推定し、仮想的な道路網の階層構造を分析している。同様に、朝倉・柏谷<sup>6)</sup>は、道路に期待される計画機能と実際の利用を反映した実態機能との間の不整合がさまざまな道路交通問題を生じさせているとの認識の下に、交通量配分によるOD内訳を用いて地方小都市の道路機能と階層性について論じている。

## (2) ネットワーク階層性の考え方

道路ネットワークの階層性を指標化するに際して、ネットワークを構成する個々の道路区間（リンク）の機能区分（たとえば、主要幹線、幹線、補助幹線、区画道路）について考えてみよう。このとき、リンクの機能には、「計画機能」と「実態機能」が存在することに注意する必要がある。計画機能とは、計画時点において当該リンクがその役割を果たすことを期待されている機能であり、あるべき機能であるといえる。これに対し、実態機能とは、実際の利用形態からみて当該リンクが果たしていると考えられる機能である。

一般に、計画機能と実態機能は必ずしも一致しない。たとえば、主要幹線道路にトリップ長の短い地域内の生活交通が多く流れたり、逆に生活道路に通過交通が流入しているようなケースである。本研究では、階層性の高い道路網とは、「リンクに期待された計画機能が発揮されるようにネットワークが構成され（条件1）、その下で計画機能と実態機能が整合する（条件2）ようなネットワーク」をいうものとする。本稿では、第一の条件である計画機能からみたリンクの配置と結合関係による階層性の程度を指標化することにする。したがって、ここでは交通の流れについては考慮しない。第二の条件である計画機能と実態機能の整合性の議論については、たとえば、朝倉・柏谷<sup>6)</sup>を参照されたい。

## (3) 計画機能からみた階層性指標

ネットワークの形状（リンクとノードの結合関係）は与えられており、個々のリンクの計画機能はいくつかのランクに分けられているとする。ランク1を最も高い機能、ランクnを最も低い機能であるとする。さらに、ある機能ランクに分類されるリンクは少なくとも1本以上であるとする。以下では2つの階層性指標を示す。

### a) 階層性指標 1

機能に基づいて階層化された道路網では、計画機能のランクが同じリンクのみによりサブネットワークを構成した場合にも、それぞれのネットワークが期待される役割を果たすと考える。計画機能のランクが幹線と非幹線の2ランクであるとするれば、幹線リンクだけで構成されたサブネットワークと、非幹線だけで構成されたサブネットワークのそれぞれが期待された役割を果たし、ネットワークが全体として機能するような性質を持つときそのネットワークは階層性が高いとするのである。

このことを以下のように指標化する。ODペア間に少なくとも1本の経路が存在しているとき、ODペア間は連結しているという。このとき、OD間ではトリップ運行が可能であるから、その意味でODペアは機能しているとみなすことができる。さらに、本稿では、連結されているODペア数が多いほど、ネットワークが全体として機能している度合いが高いものとする。

個々のランクのリンクのみで構成されたネットワークが機能しているか否かの測度として、すべてのODペアのうち連結しているODペア数の割合をとる。この割合をそれぞれのランクのネットワークごとに求めて、それらの積をネットワーク全体の階層性の指標値とする。

要するに、ここでいう階層性の指標は、「道路区間に期待される計画機能別にネットワーク化したとき、それぞれのネットワークにおいて連結しているODペア数の割合の積」である。いまネットワークを構成するリンクがn個のランクの計画機能にわけられているとすると、この指標は次式で示される。

$$H_1 = \prod_{i=1}^n \frac{s_i}{S} \quad (1)$$

ここに $s_i$ はランク $i$  ( $i=1, \dots, n$ ) のネットワークで連結しているODペア数、 $S$ はネットワーク内の全ODペア数である。

指標1の問題点はODペア間の空間的關係、とくにODペア間の近接性が反映されていない点である。たとえば、長距離のODペア間は計画機能の高

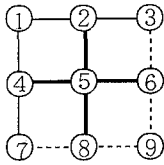


図-1 ネットワーク例

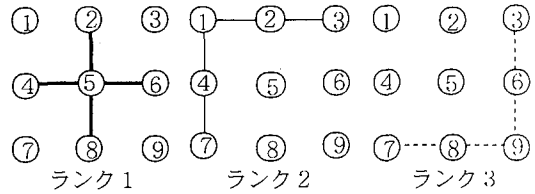


図-2 リンクの計画機能別のネットワーク

いリンクで連結されているべきであるのに対して、短距離のODペア間は計画機能の低いリンクで連結されていれば十分であると考えられる。つまり、各ランクのネットワークには受け持つべきODペアがあると考えられる。しかしながら、指標1にはこのことが考慮されているとはいえない。

### b) 階層性指標 2

長距離のトリップは計画機能の高い幹線系の道路区間を利用し、短距離のトリップは幹線系の道路区間を使わなくてもトリップできるようなネットワークであれば、リンクに期待された計画機能が発揮されると考えられる。そこで、長距離のODペア間は計画機能の高いリンクで連結され、短距離のODペア間は計画機能の低いリンクを使って行き来できるネットワークは階層性が高いとみなす。

このことを具体的な指標で表現するために、ODペア間の経路上のリンク構成をODペア間の距離の長短に対応させて考える。まず、ODペアを距離によってランク分けし、リンクの計画機能のランク数と等しくなるよう距離帯 $j$  ( $j=1, \dots, n$ ) を設ける。最も長距離のODペアは距離帯1に、最も近隣のODペアは距離帯 $n$ に区分される。まず、ある距離帯 $j$ に対してODペアが機能しているか否かの測度を定義する。ODペア間の最短経路を構成しているリンクが3本以上の場合は、経路の最初（発ノードから計画機能の高いリンクへのアクセス）と最後（着ノードへのアクセス）のリンク以外がランク $j$ のリンクであるとき、そのODペアは機能しているとみなす。経路を構成しているリンクが2本以下の場合は、ランク $j$ のリンクが経路に含まれていれば、そのODペア間は機能的に連結しているとする。

距離帯ランク $j$ に該当するすべてのODペアのうち、このような条件を満足するODペア数の割合をランク $j$ のネットワークが機能している測度と考える。指標1と同様に、ネットワーク全体の階層性の指標値は、それぞれの距離帯の測度の積とする。階層性指標2は次式で示される。

$$H_2 = \prod_{j=1}^n \frac{k_j}{K_j} \quad (2)$$

$$k_j = k_j^A + k_j^B$$

ここに $k_j^A$ は距離帯 $j$ のODペアのうち、経路を構成するリンクが3本以上の場合について、経路の最初と最後の2本のリンク以外がランク $j$ のリンクで経路が構成されているODペア数、 $k_j^B$ は距離帯 $j$ のODペアのうち、経路を構成するリンクが2本以下の場合について、経路にランク $j$ のリンクが含まれているODペア数である。 $K_j$ は距離帯 $j$ に該当するODペア数である。

なお、(3)の冒頭に述べたように、ある計画機能ランクに分類されるリンクは少なくとも1本以上という前提を設けたため、リンクの機能に全く差を設けないプレーンなネットワークや、 $n$ 個の機能ランクのいずれかを持たないネットワークの階層度を指標1または2により評価しようとする、それらの値はいずれもゼロとなる。提案した指標を用いてそのようなネットワークの階層性を評価するには限界があることになる。したがって、指標の適用においては、機能ランクを過度に細かく区分することがないようにしなければならない。

また、(2)で述べたように、ここで提案した階層性の指標1および2はいずれも計画機能からみた指標である。これらの値はネットワーク構成と個々のリンクの計画機能のみに依存し、交通フローは考慮されていない。それぞれのODペアをたとえばOD交通量の大小により区別しないという意味では、均一なODパターンを前提とした指標であるともいえる。いずれにしても、提案した指標値は要因を限定して単純化を図っている。とりわけフロー特性は考慮されていないので、実態機能から見た階層性評価に用いることは適切でないことに注意されたい。

### (4) 階層度の数値計算例

図-1のネットワークを構成するリンクは、3つの異なったランク（高位、中位、低位）の計画機能のいずれかを与えられているとする。リンク長はすべて1である。ネットワークを計画機能ごとにネットワーク化すると図-2に示す3枚のネットワークが得られる。いずれのネットワークも連結しているODペアは20ペアであるので、階層性指標1の値は、

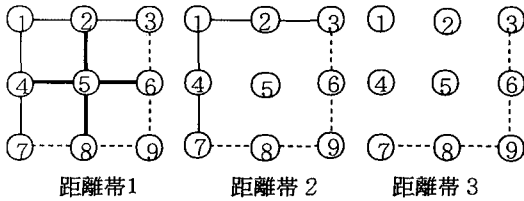


図-3 リンクの計画機能をもとにしたネットワーク

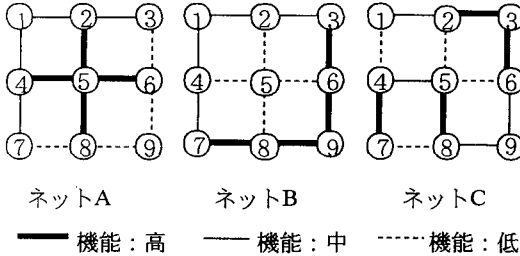


図-4 3種類のネットワーク図

$H_1 = (20/72)^3 = 0.0214$ となる。

階層性指標2の値はつぎのように求められる。距離4のODペア(①→⑨, ③→⑦, ⑦→③, ⑨→①の4ペア)を距離帯1とし、距離3のODペア(16ペア)を距離帯2、距離2および1のODペア(52ペア)を距離帯3とする。距離帯1のODペア間はランク1のリンクで、距離帯2のODペア間はランク2のリンクで経路の中央部が構成されていればよい。また、距離帯3のリンクはランク3のリンクが経路に含まれていればよい。

そこで、図-3に示す3枚(左から順に距離帯1,2,3のODペアに対応)のネットワークを考える。距離帯1のODペアについては図-3左のネットワークを調べると、4ペアすべてが先に示した条件を満足していることがわかる。同様に、距離帯2と距離帯3のODペアについては、それぞれ図-3中央と右のネットワークを調べると、距離帯2は16のうち8ペア、距離帯3は52のうち14ペアが条件を満足している。したがって、階層性指標2の値は、

$H_2 = (4/4) \times (8/16) \times (14/52) = 0.1346$ となる。

ネットワークの構成の違いによる階層性指標の差異をみるために、図-4に示す3種類のネットワーク(ネットA,B,Cと呼ぶ)を比較する。いずれのネットワークもリンクの計画機能は3段階であり、それぞれのランクごとのリンク数は同数であるが、その配置は異なっている。ネットAは図-1に示したものと同一ネットワークである。ネットAにおける機能の高いリンクと低いリンクの配置を入れ替えたネットワークがネットBである。ネットCは機能別リン

表-1 階層度の値

	ネットA	ネットB	ネットC
指標1	0.0214	0.0214	0.0027
指標2	0.1346	0.0481	0.0240

クをランダムに配置したネットワークである。

これら3種類のネットワークのそれぞれについて、階層性指標1と指標2の値を表-1に示す。どちらの指標で見ても、ネットCはネットA,Bに比べて階層性の度合いは低いことがわかる。また、指標1ではネットA,Bの階層度は同じ値であり両者を区別できないが、指標2ではネットA,Bを区別することができ、ネットAのほうがネットBよりも階層性が高いことがわかる。以下では、ネットAを階層ネットワーク、ネットCをランダムネットワークと呼ぶ。

### 3. 災害時の道路網の信頼性指標

#### (1)信頼性に関する従来研究

道路ネットワークの信頼性に関する従来研究は、交通フローを明示的に扱うか否かによって大別できる。ネットワークの状態によるフローの変化を考慮しないものとして、たとえば飯田他<sup>7)</sup>は、道路区間の通行規制確率が与えられたとき、ネットワーク上の任意の2点間の連結確率を効率的に計算する方法を開発している。高山<sup>8)</sup>は、道路管理者により実施される事前規制を対象として、道路網の連結性能からみた信頼性評価手法(トポロジー変換法)を提案し、奥能登地域への適用計算を行っている。朝倉他<sup>9)</sup>は、交通行動が時間や空間の制約の中での活動であることを考慮し、迂回距離(あるいは時間)の上限を指標値に反映させた連結度指標を提案している。これらの研究では、いずれも交通網を純粋ネットワーク(pure network)として扱っている。リンクが通行不能になった際のトリップメーカーの経路変更に伴う交通流の変化や、結果として生じる可能性のある代替経路の機能低下などは考慮されていないのである。

一方、ネットワークの信頼性解析の中で交通フローを明示的に扱うことを試みた研究の例として、Sanso and Milot<sup>10)</sup>は、都市交通網において交通事故などの障害が発生した状態におけるネットワークのパフォーマンス指標を評価できるモデルを開発している。Du and Nicholson<sup>11)</sup>は、災害時によりネットワーク上に通行規制区間が発生し、システムの機能

が低下した状態のときに、ネットワークが維持している交通処理能力の推定を行い、これに基づいて道路網の信頼性評価を行うモデルの枠組みを提案している。朝倉他<sup>12)</sup>は、過去5年間の四国地域の道路通行規制データの分析から規制確率を推定するとともに、Du and Nicholsonにより提案された信頼性評価の枠組みを適用して幹線道路ネットワークの信頼性解析を行い山間部や海岸部のODペアに信頼性の低いものが多いことを確認している。これらは、流れのネットワーク (flow network) を扱うもので、道路網の一部区間が通行不能になったときのネットワークフローの変化を考慮できるという利点を持つ。しかしながら、そのことによるモデル構造の複雑化や計算量の増加は避けられない。

### (2)信頼度の定義

本研究では、災害時においてネットワークが有する交通処理能力 (所要時間) をリンク容量制約付きの需要変動型利用者均衡問題を解くことによって推定し、その結果を用いて所要時間に関する信頼性の評価を行う。災害時のネットワーク信頼性の評価指標として時間信頼度 (以下信頼度) を用いるという考え方の詳細は、藤原他<sup>13)</sup>を参照されたい。ODペアrs間の時間信頼度は「平常時のネットワーク上での所要時間に対し、許容できる迂回の範囲内の所要時間でトリップを完了することができる確率」と定義される。災害時においてもODペア間があるサービス水準以上に保たれて連結している確率を信頼度と呼ぶのである。なお、フローを考慮しないpure networkにおけるODペア間の連結度指標<sup>7)</sup>は、サービス水準をきわめて低く設定し、いくら時間がかかっても到達できればよいとした場合の時間信頼度に他ならない。

### (3)信頼度の計算方法

#### a)ネットワークの状態と発生確率

N本のリンクからなる連結されたネットワークを考える。障害はリンクのみで発生し、ノードでは発生しないとする。ノードの機能停止を考える必要があるなら、ノードの部分の詳細にネットワーク表示し、ひとつのノードをいくつかのノードとリンクで記述すればよい。

障害が発生したリンクは物理的に非連結となり、上下線とも完全に通行不可能な状態となる。このとき、ネットワーク上で発生する可能性のある状態を  $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n, \dots, x_N\}$  で表し、状態ベクトル  $\mathbf{x}$  と呼ぶ。状態ベクトルの要素  $x_n$  はリンクが連結され通行可能

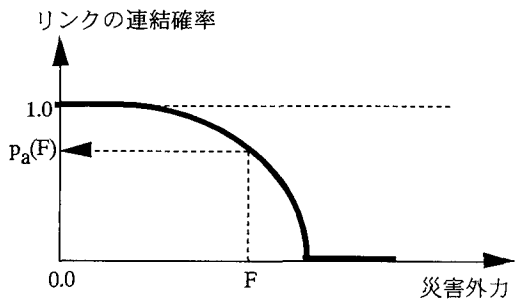


図-5 災害外力とリンク連結確率の模式図

であれば1, そうでなければ0である。それぞれのリンクごとに障害はランダムに発生し、その発生はリンク間で相互に独立であると仮定する。ネットワークに外力Fが作用したとき、ネットワークの状態が  $\mathbf{x}$  となる確率は次式で示される。

$$P(\mathbf{x}|F) = \prod_a p_a(F)^{x_a} \{1 - p_a(F)\}^{(1-x_a)} \quad (3)$$

ここに  $p_a(F)$  は外力Fに対するリンクの物理的連結確率である。

図-5は、ひとつのリンクの連結確率と災害外力の関係を定性的に表した図である。リンクの物理的頑強性の如何にかかわらず、災害外力の増加とともにリンクが機能する確率である連結確率は低下し、災害外力Fが非常に大きければ  $p_a(F) = 0.0$ , 非常に小さければ  $p_a(F) = 1.0$  となる。

#### b)ネットワークフローの記述

ネットワークの一部のリンクが通行不可能な状態がある程度長期間にわたって継続する場合は、利用者均衡仮説は妥当性を持つと思われる。たとえば、豪雨による斜面崩壊などにより、通行規制が数週間から数カ月継続するような場合である。

本研究では、リンク容量制約付きのOD需要変動型利用者均衡配分モデルを用いて、所要時間を算出する。このモデルは、ネットワークのサービス水準によって交通需要の変化が記述できるという利点を持ち、災害時の交通需要の減少を記述できる。また、リンクの容量制約を明示的に設けることにより、容量制約のない均衡問題に比較して、特定経路に交通が集中した場合のボトルネックの発生とサービス水準の低下を表現しやすい。

需要変動型の均衡モデルにはトリップエンドでの発生あるいは集中交通量の制約を持つタイプも考えられるが、ここではいずれの制約も持たないものを用いる。発生あるいは集中交通量の制約を設けると、OD間でネットワークが非連結となる場合や、

連結網であってもリンク容量制約が厳しい場合には、実行可能なネットワークフローが存在しないケースが出現する。このことを避けるためである。

もちろん、災害時のネットワーク交通流を記述するのに需要変動型均衡モデルが常に適切であるとは言えないだろう。たとえば、巨大地震災害の直後の混乱した交通状態を均衡モデルで記述できるとは考えていない。均衡モデルを適用できるのは、少なくとも災害発生後ある程度の時間が経過して、交通状態が落ちついた場合に限られよう。また、災害時における利用者均衡モデルの現象記述力に限界があるとしても、ひとつの交通行動規範を仮定して数理的解析を行うことには、少なくとも災害時の交通フロー分析の参照点を与えるという意味があると考えられる。

### c)稼働・停止関数

ネットワークの状態が $\mathbf{x}$ であるとき、ODペア $rs$ 間が稼働しているか否かを次式の稼働・停止関数 $Z_{rs}(\theta, \mathbf{x})$ により表す。

$$Z_{rs}(\theta, \mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_{rs}(\mathbf{x})/t_{rs}(\mathbf{x}_0) \leq \theta \\ 0 & \text{if } t_{rs}(\mathbf{x})/t_{rs}(\mathbf{x}_0) > \theta \end{cases} \quad (4)$$

この式は、状態 $\mathbf{x}$ のときのODペア $rs$ 間の所要時間 $t_{rs}(\mathbf{x})$ が平常時のODペア $rs$ 間の所要時間 $t_{rs}(\mathbf{x}_0)$ に比較して許容できる範囲にあれば、ODペア $rs$ 間は機能していると判断することを表現している。ODペアが機能しているとき稼働・停止関数は1であり、そうでなければ0である。 $\theta$ はODペア間の所要時間に関する判断基準 ( $1 \leq \theta < \infty$ ) であり、その値は外生的に与えられるものとする。

### d)信頼度の近似解法

ODペア $rs$ 間の信頼度の厳密解 $R_{rs}(\theta)$ は稼働・停止関数の期待値として次式で与えられる。

$$R_{rs}(\theta) = \sum P(\mathbf{x}|F) Z_{rs}(\theta, \mathbf{x}) \quad (5)$$

しかしながら、式(5)によって厳密解を求めるには全ての状態ベクトルを抽出しなければならないので、大規模ネットワークでは計算コストが膨大となる。そこで、式(3)に示した状態発生確率の大きい方から $J$ 番目の状態ベクトルに対する稼働・停止関数の値を計算し、その値を用いて信頼度の上、下限値を求め、信頼度を近似値を求めるものとする。この考え方は、pure network における距離を指標とした信頼度の近似計算法(朝倉他<sup>11)</sup>)をflow networkの

時間信頼度に適用したものである。

発生確率の大きい方から $J$ 番目の上限値 $R_{rs,j}^U(\theta)$ 、下限値 $R_{rs,j}^L(\theta)$ はそれぞれ以下のように計算できる。

$$R_{rs,j}^U(\theta) = \sum_{j=1}^J P(\mathbf{x}_j) Z_{rs}(\theta, \mathbf{x}_j) + (1 - \sum_{j=1}^J P(\mathbf{x}_j)) \quad (6.a)$$

$$R_{rs,j}^L(\theta) = \sum_{j=1}^J P(\mathbf{x}_j) Z_{rs}(\theta, \mathbf{x}_j) \quad (6.b)$$

信頼度の近似解を上、下限値の平均値とすれば、それは次式で与えられる。

$$R_{rs}(\theta) = \{R_{rs,j}^U(\theta) + R_{rs,j}^L(\theta)\} / 2 \quad (7)$$

収束判定は、次式で与えた上、下限値の差が十分小さい正の数 $\varepsilon$ 以下であるかどうかで判断する。

$$R_{rs,j}^U(\theta) - R_{rs,j}^L(\theta) \leq \varepsilon \quad (8)$$

## 4. 階層性と信頼性の関連

### (1)リンクに期待される機能と頑強性

ネットワークの災害時の信頼性を向上させるには、災害外力に対して個々のリンクが常に通行可能な状態を保つことができるように物理的な頑強性を強化することが有効であることは明らかである。しかしながら、経済的制約を考慮すると、計画機能の高低にかかわらずすべてのリンクの構造的頑強性を同一の水準まで一様に高めることはかなり困難である。そこで、計画機能が上位のリンクほど、同じ値の災害外力に対する構造的頑強性が高くなるように、計画機能に比例してリンクを差別化することを考える。図-6はリンクの計画機能が3ランクに分けられるときのリンクの連結確率を模式的に表現した図である。いずれの計画機能を持つリンクでも外力 $F$ の増加に伴う連結確率 $p_{rs}(F)$ の低下は避けられないが、計画機能の高いリンクほど物理的に頑健で、外力に対する連結確率の値が大きいことを示している。

### (2)階層化による信頼性の向上

個々のリンクの計画機能に応じて頑強性を差別化すると同時に、ネットワークを機能的に階層化することによって、大きな災害外力に対してもネット

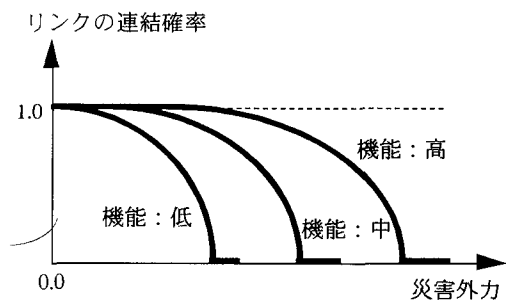


図-6 リンクの連結確率の模式図

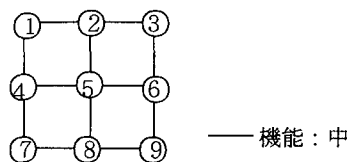


図-7 プレインネットワーク (ネットD)

表-2 リンクの通行可能確率

	ランク1	ランク2	ランク3
外力小	1.0	0.95	0.75
外力大	0.95	0.75	0.55

ワークの信頼性の向上が期待される。このことを定性的に理解するために先の図-4に示した3種類のネットワーク (ネットA,BおよびC) と、比較のためにすべてのリンクが中ランクの機能と頑強性を持つプレインなネットワーク (ネットD) を考える。

災害外力が小さい場合は、頑強性が低いリンクを含む階層ネットワーク (ネットA) は中程度の頑強性のリンクのみで構成されるプレインネットワークに比べて信頼度が低いことが予想される。しかし、外力が小さいために頑強性が低いリンクでも通行不可能となる確率が小さいので、階層ネットワークでも著しく信頼度が小さくなることは考えられない。

一方、災害外力が大きい場合は、頑強性が高いリンク以外はほとんどのリンクで通行不可能となる確率が高くなる。したがって、すべてのリンクが中程度の頑強性であるプレインネットワークでは、頑強性の高いリンクを含む階層ネットワークと比較して信頼度が小さくなる。また、外力の大きさにかかわらず、計画機能がランダムに入り交じったランダムネットワーク (ネットC) よりも階層性の高いネットワークAおよびBの信頼度が高いと考えられる。これらのことを次の計算例で確認しよう。

## 5. 小規模ネットワークでの数値計算例

### (1)前提条件

図-4に示す3種類のネットワークと図-7に示すプレインネットワークを用いて、階層性と信頼性の関係を数値計算により調べる。図-6に示すように、災害外力が極端に小さかったり、逆に極端に大きい場合には、すべてのリンクの通行可能確率が1または0に近い値となるため、階層性と信頼性の関係を議論することは意味がなくなる。このことを考慮して、災害外力が大きい場合と小さい場合について、個々のリンクの通行可能確率を表-2のように与えるものとした。表-2の設定によれば、機能の高い

リンクは外力が小さい場合には通行不能となることはなく、外力が大きい場合でもかなり高い確率で通行可能である。これに対し、機能の低いリンクは外力が低い場合でも通行不能になることがあるが、外力が大きい場合でも0.5以上の確率で通行可能である。以下の計算はこのような外力の範囲を想定したものである。

走行時間関数、需要関数はそれぞれ次式に示すものである。

$$\text{走行時間関数: } t_a(V_a) = t_a^0 \left( 1 + \frac{JV_a}{C_a - V_a} \right) \quad (9)$$

$$\text{需要関数: } D_a(t_a) = D_a^U \{ -\gamma(t_a - t_a^0) \} \quad (10)$$

ここに $t_a^0$ はリンクaの自由走行時間、 $C_a$ はリンクaの容量、 $V_a$ はリンクaの交通量、 $J$ はパラメータ ( $0 < J \leq 1$ ) である。 $t_a$ はODペアrs間の所要時間、 $t_a^0$ は自由走行時のODペアrs間の所要時間、 $D_a^U$ はOD需要の上限値、 $\gamma$ はパラメータである。信頼度の収束判定基準は $\varepsilon = 0.02$ 、所要時間の判断基準は $\theta = 3.0$ として計算を行った。

### (2)災害外力が小さい場合

災害外力が小さい場合について、いくつかのODペア間の信頼度を表-3に示し、図-8に信頼度のヒストグラムを示す。

階層ネットワーク (ネットA) とプレインネットワーク (ネットD)の信頼度を比較すると、階層ネットワークのほうが信頼度が高いODペアはネットワーク内の全72ペアのうち30ペア (全体の約42%)であった。また、階層ネットワークのODペア間の信頼度の平均値は0.94、プレインネットワークの平均値は0.97となり、全体的にみると、外力が小さい場合は必ずしも階層ネットワークのほうが信頼度が

表-3 いくつかのODペア間の信頼度（外力：小）

ODペア	ネットA	ネットB	ネットC	ネットD
2⇔5	0.99	0.74	0.85	0.94
5⇔8	0.99	0.93	0.95	0.94
6⇔9	0.58	0.99	0.94	0.94
8⇔9	0.58	0.99	0.93	0.94
全OD平均	0.94	0.96	0.94	0.97

表-4 いくつかのODペア間の信頼度（外力：大）

ODペア	ネットA	ネットB	ネットC	ネットD
2⇔5	0.95	0.50	0.50	0.68
5⇔8	0.94	0.62	0.64	0.68
6⇔9	0.47	0.90	0.72	0.73
8⇔9	0.47	0.90	0.70	0.75
全OD平均	0.79	0.72	0.66	0.72

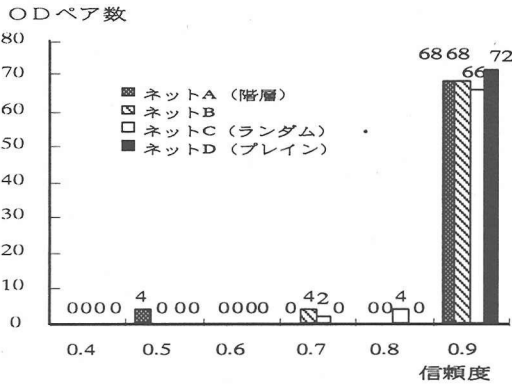


図-8 信頼度のヒストグラム（外力：小）

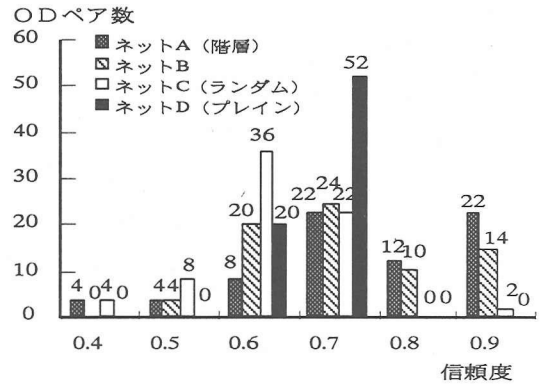


図-9 信頼度のヒストグラム（外力：大）

良好であるとはいえない結果となった。しかし、階層ネットワークでも68のODペア（同94%）で信頼度が0.9以上を確保しており、信頼度が著しく低いとはいえない。階層ネットワークとプレインネットワークの信頼度の差が著しいのは、セントロイド3,7,9を中心としたODペアである。これらのセントロイドは、頑強性が最も低いランク3のリンクで連結されているのが原因であると考えられる。

階層ネットワーク（ネットA）とランダムネットワーク（ネットC）を比較すると、42のODペア（同58%）で階層ネットワークのほうがランダムネットワークよりも信頼度が高かった。このことからリンクの頑強性に差を設けても、階層的にネットワークを構成しなければ信頼度の値は向上しないことが示唆される。しかし、ランダムネットワークでもODペア間の信頼度の平均値は0.94であり、階層ネットワークとほとんど変わらない。信頼度が0.9以上であるODペアが66ペア（92%）存在しており、外力が小さい場合には階層化による信頼度の向上効果は必ずしも顕著ではない。

階層ネットワーク（ネットA）と階層度が中程度のネットワーク（ネットB）を比較すると、個々には信頼度の大きさが逆転するODペアも見られたが、全体的にはほとんど同じ程度の信頼度であった。これらの結果から、外力が小さい場合には階層度の差異に比べて信頼度の差異は大きくないことがわかる。

### (3)災害外力が大きい場合

表-4に災害外力が大きい場合について、表-3と同じODペア間の信頼度を示す。図-9に信頼度のヒストグラムを示す。

階層ネットワーク（ネットA）とプレインネットワーク（ネットD）を比較すると、54ペア（全体の75%）で階層ネットワークのほうがプレインネットワークより信頼度が高い。また、ODペア間の信頼度の平均値も階層ネットワークの0.79に対してプレインネットワークでは0.72である。このことから全体的には、階層ネットワークのほうが信頼度が高いといえる。もちろん、階層ネットワークでは信頼度が0.6未満のODペアが8ペア存在しており、必ずしもすべてのODペアに対して階層ネットワークのほうが信頼度が高いとはいえない。しかし、階層ネットワークでは信頼度が0.8以上のODペアが34ペアあるのに対し、プレインネットワークでは信頼度が0.8以上のODペアは存在しない。このことから、階層ネットワークのほうがプレインネットワークよりも全体的に信頼度が高いといえる。

階層ネットワーク（ネットA）とランダムネットワーク（ネットC）を比較すると、58のODペア（同80%）で階層ネットワークのほうがランダムネットワークより信頼度が高かった。ODペア間の信頼度の平均値も階層ネットワークの0.79に対してランダムネットワークでは0.66である。ランダムネットワークは信頼度が0.8以上のODペアが2ペアしか



く、0.7未満のODペアが48ペアもある。このことより、外力が大きい場合についても外力が小さい場合と同様に、ランダムネットワークよりも階層ネットワークのほうが信頼度が高いことがわかる。

階層度が中程度のネットワーク（ネットB）のODペア間の信頼度の平均値は0.72であった。この値はプレインネットワークとほぼ同じであり、階層ネットワークとランダムネットワークの中間的な値である。ネットBの信頼度のヒストグラムを見ると、プレインネットワークやランダムネットワークよりも信頼度の高いほうに分布がシフトしているが、階層ネットワークには及ばないことがわかる。

これらの結果から、外力が大きい場合には階層化されたネットワークのほうが全般に信頼度が高くなる傾向にあることが確認できた。

## 6. おわりに

本研究では、ネットワークの機能的階層性の指標を示し、道路網の階層性と災害時における道路網の時間信頼性の関連を調べた。仮想的なネットワークにおける数値計算により得られた知見は以下のように要約できる。

- (1)外力の大きさにかかわらず、階層化されたネットワークのほうがリンクの機能をランダムに置いたネットワークよりも信頼度が高くなった。
- (2)外力が小さい場合は、階層ネットワークはプレインネットワークよりも信頼度が小さくなるが、その値が著しく劣ることはない。
- (3)外力が大きい場合、個々のODペアについてみると階層度の高いネットワークでも信頼度がかなり悪くなるODペアも存在し、必ずしもすべてのODペア間の信頼度がプレインネットワークよりも良好であるとはいえない。しかし、全体的にみると階層度の高いネットワークのほうがプレインネットワークやランダムネットワークよりも信頼度が高く、階層化による信頼性向上効果が認められる。

本研究はこれまでに必ずしも十分に研究されてこなかったネットワークの機能的階層性に着目し、ネットワークを階層化することの意味について災害時の信頼性の面から論じてきた。階層性指標で見ると、ランダムネットワーク（ネットC）に比べて階層ネットワーク（ネットA）の階層度は約8倍（指標1）ないし約6倍（指標2）であり、階層化の度合いはかなり高い。階層化の度合いが中程度のネットBでも、ランダムネットワークに対して階層度は2倍（指標2）である。したがって、階層度の差がこの程度に大きい場合には、災害外力が大きいとき

階層化による信頼度の向上効果が期待できる。

しかしながら、数値例で用いたネットワークは小規模であり、リンクとノードの接続関係が異なる形状のネットワークや複数のODパターンを組み合わせた網羅的な計算を行ったわけではない。また、階層度の差が小さい場合については、階層性と信頼性の関係は必ずしも十分には確認できていない。したがって、ここで得られた結論がすべてのネットワークに対して一般的に成立すると断言することはできないが、少なくともネットワークを機能的に階層化することが信頼性の向上に寄与することを確認できたことの意義は認められよう。

今後は、ネットワークの規模を拡大した数値計算例を蓄積することはもちろん、階層性指標値については距離帯の区分などに任意性が残っており、改良の余地がある。また、災害時の信頼性についてもネットワークのパフォーマンスを時間信頼度のみで評価しており、均衡問題を解いて得られる需要や余剰といった指標を用いた信頼性評価については不十分である。これらの点については今後の課題としたい。

## 参考文献

- 1) 太田勝敏：交通ネットワークの形態論。第18回土木計画学講習会テキスト（交通ネットワークの分析と計画：最新の理論と応用）。土木学会編，pp.190-195，1987。
- 2) 岡田憲夫，田中成尚：形態特性からみた道路整備度の計量指標化に関する研究。土木計画学研究論文集，No.5，pp.195-202，1987。
- 3) 岡田憲夫，田中成尚：ネットワーク特性を考慮した道路機能水準の計量指標化に関する研究。土木学会論文集，第389号/IV-8，pp.65-74，1988。
- 4) 四茂野英彦，岡部篤行：無秩序網モデルにもとづく道路網の階層性の分析方法。都市計画学会学術研究論文集，No.21，pp.211-216，1986。
- 5) 飯田恭敬，中崎剛，宮川佳典：シミュレーションを用いた道路網の階層構成に関する考察。土木計画学研究講演集，No.13，pp.615-622，1990。
- 6) 朝倉康夫，柏谷増男：リンク交通量のOD内訳に着目した地方都市内道路網の機能分類。都市計画学会学術研究論文集，No.28，pp.349-354，1993。
- 7) 飯田恭敬，若林拓史，福島博：道路網信頼性の近似解法の比較研究。土木学会論文集，No.311/IV-11，pp.107-116，1989。
- 8) 高山純一：異常気象時における道路網の連結性能評価法。土木計画学研究講演集，No.12，pp.559-565，1989。
- 9) 朝倉康夫，柏谷増男，藤原健一郎：交通ネットワークにおける迂回の限度を考慮したODペア間信頼度の

- 指標. 土木学会論文集, No.555 /IV-34, pp.41-49, 1997.
- 10) Sanso, B. and Milot, L. : A Reliability Model for Urban Transportation Planning. Preprints in TRISTAN-II Conference in Capri, pp.617-622, 1994.
  - 11) Du, Z.P. and Nicholson, A.J.: Degradable Transportation Systems Performance, Sensitivity and Reliability Analysis. Research Report 93-8, Dept. of Civil Eng., University of Canterbury, NZ., 1993.
  - 12) 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. 土木計画学研究論文集, No.12, pp.475-484, 1995.
  - 13) 藤原健一郎, 朝倉康夫, 柏谷増男: 交通ネットワークにおける災害時のフローの変化を考慮したODペア間の信頼度の指標. 土木計画学研究講演集, No.18(2), pp.737-740, 1995.

(1997.3.4受付)

## FUNCTIONAL HIERARCHY OF A ROAD NETWORK AND ITS RELATIONS TO TIME RELIABILITY

Yasuo ASAKURA, Masuo KASHIWADANI and Ken-ichiro FUJIWARA

This paper aims to show the relations between the time reliability and the functional hierarchy of a road network. For given functions of links, two measures of network hierarchy are proposed. The network User Equilibrium with variable demand and strict link capacity constraint is applied for calculating travel times between an OD pair of the network with some degraded links. Reliability is defined as the probability of whether travel time is kept within an acceptable level, and an approximation algorithm common for calculating reliability models is proposed. Numerical examples suggest that improving functional hierarchy will increase the time reliability of a road network.