

# 特別研究報告

題目

ネットワークの相互接続構造が  
大域的な信頼性に与える影響の評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

竹下 結花

平成 25 年 2 月 12 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

ネットワークの相互接続構造が大域的な信頼性に与える影響の評価

竹下 結花

## 内容梗概

インターネットは急速に大規模化が進み、いまや誰もが利用するサービスとなった。利用形態の多様化が進み、インターネットは今では我々の生活に欠かせない社会基盤としての重要な役割を担っている。その重要性からインターネットは機器の故障や災害によるネットワーク機器の障害が発生した場合でも、通信機能を維持し、サービスの提供を途切れさせない高信頼性を持つことが望まれる。これまでもネットワークの高信頼化へ向けたネットワークトポロジーの構築手法や、障害発生時に短時間で復旧可能な経路制御手法など、様々な研究が行われてきたが、その多くは単一のネットワークを対象としたものであった。しかし現実にはインターネットは複数の AS (Autonomous System, 自律システム) 間が接続することにより形成されており、個々の AS が管理するネットワークは小さな局所ネットワークが相互に接続することによって構成されているため、一つのネットワークの設計を考えるだけでは不十分である。インターネットは現在も新たな AS の出現に伴い成長を続けており、今もなお AS 間の接続関係は複雑さを増している。そのため、単一のネットワークの性能向上だけでなく、複数のネットワーク間の接続構造を考慮した信頼性の向上を目指す必要がある。

そこで本報告では、ネットワーク全体の高信頼化のために、複数のネットワーク間をどのように接続すればよいかを明らかにする。様々なネットワーク間の接続構造について障害に対する信頼性を比較評価することにより、ネットワーク間のリンク本数が同一の条件下では、ネットワークの中心部およびその周辺を密に相互接続し、かつネットワーク内の位置情報に依存しない様々なノードを相互接続に用いることで、上層のみを密に接続した場合に比べ、2000 ノード規模のネットワークにおいて障害発生時の平均ホップ長を最大でおよそ 0.3 抑えることが可能となることが明らかになった。

## 主な用語

べき則、BA モデル、信頼性、相互接続構造、Multiscale 構造

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>関連研究</b>	<b>7</b>
2.1	単一ネットワークの故障耐性 . . . . .	7
2.2	相互作用により接続されるネットワークの故障耐性 . . . . .	9
<b>3</b>	<b>局所ネットワーク間の相互接続による大域ネットワークの構築手法</b>	<b>11</b>
3.1	局所ネットワークの構築手法 . . . . .	11
3.2	大域ネットワークの構築手法 . . . . .	11
<b>4</b>	<b>相互接続構造が大域ネットワークの信頼性に与える影響</b>	<b>15</b>
4.1	評価指標 . . . . .	15
4.2	単一障害に対する信頼性 . . . . .	15
4.3	複数同時障害に対する信頼性 . . . . .	26
<b>5</b>	<b>おわりに</b>	<b>36</b>
	<b>謝辞</b>	<b>37</b>
	<b>参考文献</b>	<b>38</b>

## 目 次

1	$(\lambda, \zeta)$ に基づく $P(i, j)$ の算出方法 . . . . .	8
2	$(\lambda, \zeta)$ に基づく $P(i, j)$ の算出方法 (拡張) . . . . .	12
3	$(\lambda, \zeta)$ により得られる大域ネットワークの構造 . . . . .	14
4	パラメータ $(\lambda, \zeta)$ による平均ホップ長の差 . . . . .	17
5	パラメータ $(\lambda, \zeta)$ による到達可能性の差 . . . . .	18
6	$\zeta = 0.1$ および $\lambda = 0.4, \zeta = 0.4$ における信頼性の差 . . . . .	19
7	単一障害に対する平均ホップ長の平均値 (ノード数 500, 平均次数 2) . . . . .	21
8	単一障害に対する平均ホップ長の平均値 (ノード数 500, 平均次数 3) . . . . .	22
9	単一障害に対する平均ホップ長の平均値 (ノード数 1000, 平均次数 2) . . . . .	23
10	単一障害に対する平均ホップ長の平均値 (ノード数 1000, 平均次数 3) . . . . .	24
11	単一障害に対する到達可能性の平均値 (ノード数 500, 平均次数 2) . . . . .	25
12	単一障害に対する到達可能性の最悪値 (ノード数 500, 平均次数 2) . . . . .	27
13	単一障害に対する到達可能性の最悪値 (ノード数 500, 平均次数 3) . . . . .	28
14	単一障害に対する到達可能性の最悪値 (ノード数 1000, 平均次数 2) . . . . .	29
15	単一障害に対する到達可能性の最悪値 (ノード数 1000, 平均次数 3) . . . . .	30
16	複数同時障害に対する信頼性の最悪値 (ノード数 500, 平均次数 2) . . . . .	32
17	複数同時障害に対する信頼性の最悪値 (ノード数 500, 平均次数 3) . . . . .	33
18	複数同時障害に対する信頼性の最悪値 (ノード数 1000, 平均次数 2) . . . . .	34
19	複数同時障害に対する信頼性の最悪値 (ノード数 1000, 平均次数 3) . . . . .	35

## 表目次

1	$(\lambda, \zeta)$ の値とトポロジー構造の関係 . . . . .	13
2	各階層に属するノード数 (ノード数 500, 平均次数 2) . . . . .	19
3	$\lambda = 0.5, \zeta = 0.5$ による局所ネットワーク間リンクが接続する階層 . . . . .	19
4	$\lambda = 0.3, \zeta = 0.1$ による局所ネットワーク間リンクが接続する階層 . . . . .	20

## 1 はじめに

近年、インターネットの大規模化が急速に進んでいる。モバイル端末の普及や SNS (Social Networking Service, ソーシャルネットワーキングサービス) の普及による利用者数の増加は著しく、その利用形態の多様化が進んでいる。インターネットは社会インフラとしても重要な通信基盤となっており、様々なサービスがインターネットを介して提供されている。鉄道や金融取引などの、インターネットにより提供される様々な通信サービスは、もはや生活に欠かすことは出来ないものとなっている。インターネットはその重要性から、機器の故障や災害などの障害が発生した場合においても、本来のパフォーマンスを損なわない信頼性を有することが望まれる。

そのため、これまでもネットワークの高信頼化についての研究は広く行われてきた。例えば文献 [1] では、ネットワークの階層構造に着目し、各階層に属するノード間の接続構造とネットワークの輻輳やノード故障に対する故障耐性との関係性を評価している。また、インターネットの AS (Autonomous System, 自律システム) レベルトポロジーやルーターレベルトポロジーには、接続リンク数が  $k$  本のノードの出現確率が  $k^{-\gamma}$  ( $\gamma$  は定数) に比例するというべき則の性質を有することが知られており [2]、べき則の性質を有するネットワークの特徴についてはこれまで様々な研究がなされている [3]。これらの研究により、べき則の性質を有するネットワークはランダムなノード障害に対しては接続性を容易に損なわない堅牢性を有する一方で、リンク数の大きいノードが優先的に攻撃された場合には接続性が容易に損なわれる脆弱性を有することが明らかになっている。他にも、ネットワークの階層構造やべき則の性質など、ネットワークの構造的特徴と信頼性の関係を示した研究もなされている [4]。

しかしながら、これまでの研究では原則として障害が設計対象に含まれていた [5,6]。障害を事前に想定することで対応可能な場合もあるが、機器数の増大に伴い、考慮すべき同時故障数が増大するため設計が極めて困難となる。障害の多くは小規模障害であるが、大規模障害が発生した場合でもノード同士の接続が保たれ、かつ、通常時に近いホップ長を維持出来るような信頼性の高いネットワーク設計が求められている。

更に、これらの研究を始めとしたネットワークの高信頼化についての研究の多くは単一のネットワークを対象としたものである。しかし、インターネットは 1 つの大きなネットワークではなく、小さなネットワークが相互に接続することで構築されている。従来、インターネットは ISP (Internet Service Provider, インターネットサービスプロバイダ) などの多数の AS がそれぞれの判断に基づき相互に接続関係を構築してきた。しかし、個別の判断に基づく接続関係の構築だけでは、十分な性能を得ることが非常に困難である。そのため、インターネット全体の高信頼化設計を実現するには、単一のネットワークの設計だけではなく、

それらのネットワーク間をどのように接続するかについても考える必要がある。

近年では、複数のネットワークの相互接続により形成されたネットワークの性質が注目されつつある。例えば、電力網と電力網、電力網と制御網、港湾網と航空網など、相互に依存するネットワークは社会に多々存在する。この点に着目した文献 [7-9] などでは、大域的なネットワークを構成する局所ネットワーク間を接続するリンクの数やリンク両端のノード次数、および局所ネットワーク間を接続するリンクを持つノードのクラスタリング性などが、ネットワークのカスケード障害に対する信頼性に影響を与えることが示されている。しかしこれらの文献では、局所ネットワーク間を接続するリンク両端のノード次数や隣接関係のみに着目しており、局所ネットワーク間を接続するリンクにより形成される接続構造 (以下、相互接続構造と呼称する) に着目した評価はされていない。また、ネットワーク構築の観点からは局所ネットワーク間の接続リンク数は少なく抑えることが望ましく、そうした接続リンク数に制約がある中でも障害に対する信頼性を損なわないような局所ネットワーク間の接続構造を明らかにする必要がある。

こういった状況において、すべての障害を事前に想定してネットワークを設計することは、コスト面、アルゴリズム面から非常に困難である。そこで本研究では、2つの局所ネットワークをどのように接続すれば、リンク本数を少なく抑えつつ様々な障害に対応出来る信頼性を維持できるかを、トポロジー構造の観点から明らかにする。ここでは、2つの局所ネットワークの接続における高信頼設計に着目するものとし、個々の局所ネットワーク内の高信頼設計には踏み込まない。様々な局所ネットワーク間の接続構造の障害に対する信頼性を比較評価することにより、局所ネットワーク間のリンク本数が同一の条件下での、ネットワークの構造と故障時の信頼性の関係を明らかにする。計算機シミュレーションにより接続構造と信頼性の関係を評価した結果、ネットワーク間のリンク本数が同一の条件下では、ネットワークの中心部およびその周辺を密に相互接続し、かつネットワーク内の位置情報に依存しない様々なノードを相互接続に用いることで、上層のみを密に接続した場合に比べ、2000 ノード規模のネットワークにおいて障害発生時の平均ホップ長を最大でおよそ 0.3 抑えることが可能となることが明らかになった。

本報告の構成として、まず、2章では関連研究を述べる。次に3章で、評価対象とする局所ネットワーク間の相互接続構造の構築手法について説明し、得られたネットワークについて故障に対する信頼性の評価を4章に示す。最後に、本報告のまとめと今後の課題について述べる。

## 2 関連研究

### 2.1 単一ネットワークの故障耐性

文献 [1] では、階層構造と地域間を結ぶリンクの存在確率に着目してトポロジーの構造を 5 種類に分類し、それぞれの構造を持つネットワークの故障耐性を評価している。

#### 2.1.1 トポロジーが持つ構造の分類

この文献では、階層数が  $L$ 、各ノードが持つ子の数が  $b$  のツリー型トポロジーに、確率的にリンクを追加することで様々なトポロジーを生成している。ノードペア  $(i, j)$  にリンクを追加する確率  $P(i, j)$  は、式 (1) で定義されている。

$$P(i, j) \propto e^{-D_{ij}/\lambda} e^{-x_{ij}/\zeta} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  は  $(i, j)$  の共通の親ノードである  $a_{ij}$  の位置する階層の深さ、 $\zeta$  は  $(i, j)$  間の距離を調整するためのパラメータである。また、ツリーの根から  $a_{ij}$  までのホップ数を  $D_{ij}$ 、ノード  $i, j$  間の相対距離  $x_{ij}$  を  $x_{ij} = (d_i^2 + d_j^2 - 2)^{1/2}$  と定義する。ここで、 $d_i, d_j$  はそれぞれノード  $i, j$  から  $a_{ij}$  までのホップ数である。これらを図 1 に示す。 $\lambda, \zeta$  それぞれの値を変えることで、5 種類の構造を有するトポロジーが生成可能であると述べられており、その内訳は以下の通りである。

- Random (R)  $\cdots (\lambda, \zeta) \rightarrow (\infty, \infty)$   
あらゆる階層に、距離に関係なく 2 ノード間を結ぶリンクを有する。
- Local Team (LT)  $\cdots (\lambda, \zeta) \rightarrow (\infty, 0)$   
各階層ごとに距離が近いノード間を結ぶリンクを有する。
- Random Interdivisional (RID)  $\cdots (\lambda, \zeta) \rightarrow (0, \infty)$   
距離が大きく離れた場所に位置する下層のノード間を接続するリンクを有する。
- Core-periphery (CP)  $\cdots (\lambda, \zeta) \rightarrow (0, 0)$   
上層は密に接続され、距離が離れた下層の 2 ノード間をつなぐリンクはほとんど存在しない。
- Multiscale (MS)  $\cdots (\lambda, \zeta)$  の値は上記の中間の値を取る  
上記の 4 構造の中間的な構造を持つ。上層から下層、近距離から遠距離の様々なリンクを持つ。Random とは上層のリンク密度が高い点で異なり、Core-periphery とは距離が離れた 2 ノード間にもリンクを有する点で異なる。

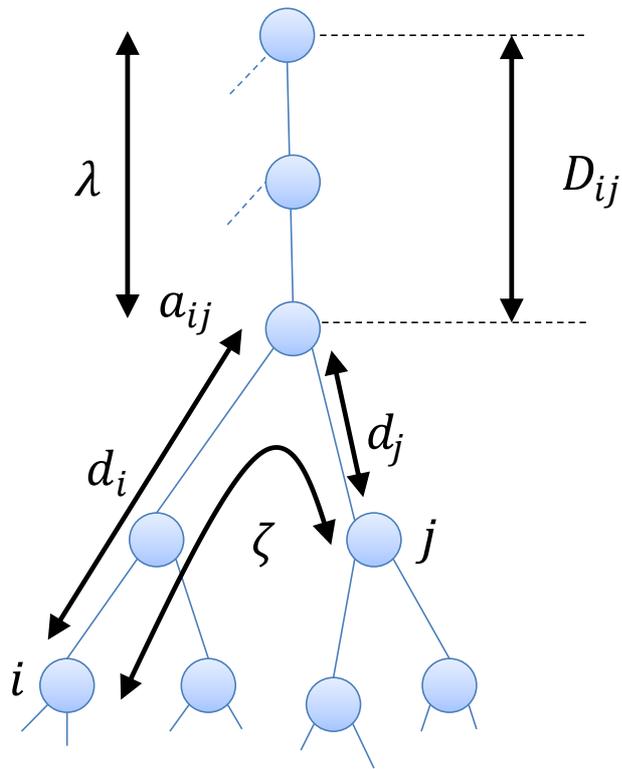


図 1:  $(\lambda, \zeta)$  に基づく  $P(i, j)$  の算出方法

### 2.1.2 トポロジーが持つ構造と故障耐性の関係

この文献では、2つの観点からネットワークの性能を評価している。一方は Congestion Robustness であり、フローが流れるノードペアが2ノード間の距離  $x$  と  $c$  から求められる確率  $P \propto \exp(-x/c)$  に基づき選択された場合にノードに加わる負荷の最大値 ( $\rho_{max}$ ) を評価指標として用いている。Core-periphery 構造や Multiscale 構造は他の構造に比べ負荷の最大値を抑えられているが、Core-periphery 構造はリンクの密度によって負荷の値が変動するため、Multiscale 構造が最も Congestion Robustness が高い構造であると述べられている。

もう一方は Connectivity Robustness であり、ノードが取り除かれたときの残りのノードの接続性により評価している。Local Team 構造や Core-periphery 構造は少ないノード障害でも接続性が容易に失われてしまい、Multiscale 構造や Random などが高い接続性を持つことがわかる。なお、ハブを順に取り除いたとき、カスケード障害を起こしたとき、ランダムに取り除いたときも同様の傾向が見られると述べられている。

これら2つの結果より、過度な負荷の集中を抑えつつ、故障時にも接続性を維持可能である Multiscale 構造が最も故障耐性が高い構造であると述べられている。

## 2.2 相互作用により接続されるネットワークの故障耐性

文献 [8] では、2つのノード数が等しい局所ネットワークの相互接続により構成される1つのネットワーク (Interdependent Network) の故障耐性について議論している。この文献の著者らは、2つの局所ネットワーク間が Inter-similarity が高い構造により接続されている場合に、カスケード障害に対する故障耐性が高くなる可能性が大きいと述べている。Inter-similarity は、Inter Degree-Degree Correlation (IDDC) および Inter Clustering Coefficient (ICC) の2つの指標が高い値を示すほど高くなるとされている。IDDC は局所ネットワーク間を接続するリンクの両端のノードが近い次数を持つほど高い値をとり、ICC は局所ネットワーク間を接続するリンクの両端のノードに隣接したノードもまた局所ネットワーク間を接続するリンクを持つ傾向が強いほど高い値をとる。

IDDC および ICC の定義について以下で述べる。2つの局所ネットワーク A および B により構成されるネットワークの IDDC の値  $r^{AB}$  ( $-1 \leq r^{AB} \leq 1$ ) は、2つの局所ネットワーク間をつなぐリンクの両端のノードの次数相関により定義されている。2つの局所ネットワークの次数分布  $p_k^A$  および  $p_k^B$  が等しい場合、 $r^{AB}$  は以下のように定義される。

$$r^{AB} = \frac{1}{\sigma_q^2} \sum_{jk} jk(e_{jk} - p_j p_k) \quad (2)$$

ここで、 $e_{jk}$  は局所ネットワーク A 内の次数  $j$  のノードが局所ネットワーク B 内の次数  $k$  のノードと接続する確率、 $\sigma_q^2$  は正規化のための因子である。 $r^{AB}$  は次数の近いノード同士が接続する傾向が強いほど 1 に近く、次数の離れたノード同士が接続する傾向が強いほど -1 に近い値をとる。なお、ランダムグラフでは  $r^{AB} = 0$  となる。

ICC の値  $c^{AB}$  は 2 つの局所ネットワーク間を接続するリンクの両端のノードに隣接したノードもまた局所ネットワーク間を接続するリンクを持つ傾向が強いほど高い値を示し、以下のように定義される。

$$c^{AB} = \frac{1}{M} \sum_j t_j \quad (3)$$

ここで、 $M$  は 2 つの局所ネットワーク間をつなぐリンクの総数を表し、 $t_j$  は相互に接続する 2 つの異なる局所ネットワークに属するノードペア  $A_j, B_j$  と隣接するノード間をつなぐリンクの総数を表す。

この文献においては 2 つの BA モデルにより生成された局所ネットワークを結合して生成したネットワークの故障耐性を評価している。

- $(r^{AB}, c^{AB}) = (0, 0)$
- $(r^{AB}, c^{AB}) = (1, 0)$
- $(r^{AB}, c^{AB}) = (0, 0.4)$  ( $r^{AB} = 0$  で固定した時の最大値)
- $(r^{AB}, c^{AB}) = (1, 1)$

の 4 パターンを比較した場合、 $(r^{AB}, c^{AB}) = (1, 1)$  が最もカスケード障害に対して高い故障耐性を持つことが示されている。また、空港のネットワークと港のネットワークが相互に依存するネットワークが、 $r = 0.2$  とやや高い IDDC を持ち、 $r = 0$ 、すなわちランダムに接続された場合に比べ高い故障耐性を持つことが示されている。

文献 [8] の発展研究である文献 [7] では、2 つ以上の複数の局所ネットワークから形成されるネットワークの性能を数式モデルにより評価している。この文献の中では、局所ネットワークが ER グラフである場合とランダム格子 (全ノードの次数が等しい ER グラフ) である場合を比較すると、ランダム格子の故障耐性が高くなると述べられていることから、多数の局所ネットワークを接続して 1 つのネットワークを形成する場合も IDDC が高くなるように次数の近いノード間を接続することで故障耐性を高めることができると考えられる。

### 3 局所ネットワーク間の相互接続による大域ネットワークの構築手法

本章では、局所ネットワーク間を接続する方法について述べる。評価対象とするネットワークの構築の順序としては、まず局所ネットワークを BA モデルに基づいて生成する。得られたトポロジーを複製し一対の同一なトポロジーを得た後、ノードの位置情報から計算される確率式に基づいて局所ネットワーク間にリンクを追加していく。以降、一対の同一な局所ネットワーク間を接続することで得られたネットワークを局所ネットワークと明確に区別するため、大域ネットワークと呼ぶものとする。

#### 3.1 局所ネットワークの構築手法

局所ネットワークのトポロジーは BA モデル [10] に基づいて生成する。BA モデルはべき則に従うトポロジーを生成するモデルであり、次数の大きなノード (ハブノード) を持つことが知られている。特徴としては、ノードを順に追加し成長させることで得られること、新規に追加されるノードは次数の大きい既存ノードとリンクを張る傾向を持つことが挙げられる。具体的には、以下の手順でトポロジーを生成する。

1.  $m_0$  個のノードを持つ完全グラフを配置する。
2. ノード数  $n$  に達するまで以下の処理を繰り返す。
  - (a) 新規ノードを追加する。
  - (b)  $k_i / \sum_j k_j$  ( $k_i$  はノード  $i$  の次数) の優先的確率で  $m (\leq m_0)$  個のノードを選択し、選択したノードと新規ノードの間にリンクを追加する。

BA トポロジー生成のためのパラメータ  $(n, m)$  は、 $(500, 2)$ ,  $(500, 3)$ ,  $(1000, 2)$ ,  $(1000, 3)$  とし、いずれの場合においても  $m_0 = 3$  とする。また、最も次数の高いノードを最上位層とし、そこからのホップ数を各ノードの属する階層とする。

#### 3.2 大域ネットワークの構築手法

##### 3.2.1 局所ネットワーク間の接続方法

1. 接続するノードペアの選択

一方のトポロジーに対して図 1 を参考にノード  $i, j$  間の距離  $x_{ij}$  と共通の親ノードの階層  $D_{ij}$  を計算し、ノードペア  $i, j$  間が接続される確率  $P(i, j)$  を以下の式 1 により求める。

$$P(i, j) \propto e^{-D_{ij}/\lambda} e^{-x_{ij}/\zeta} \quad (1)$$

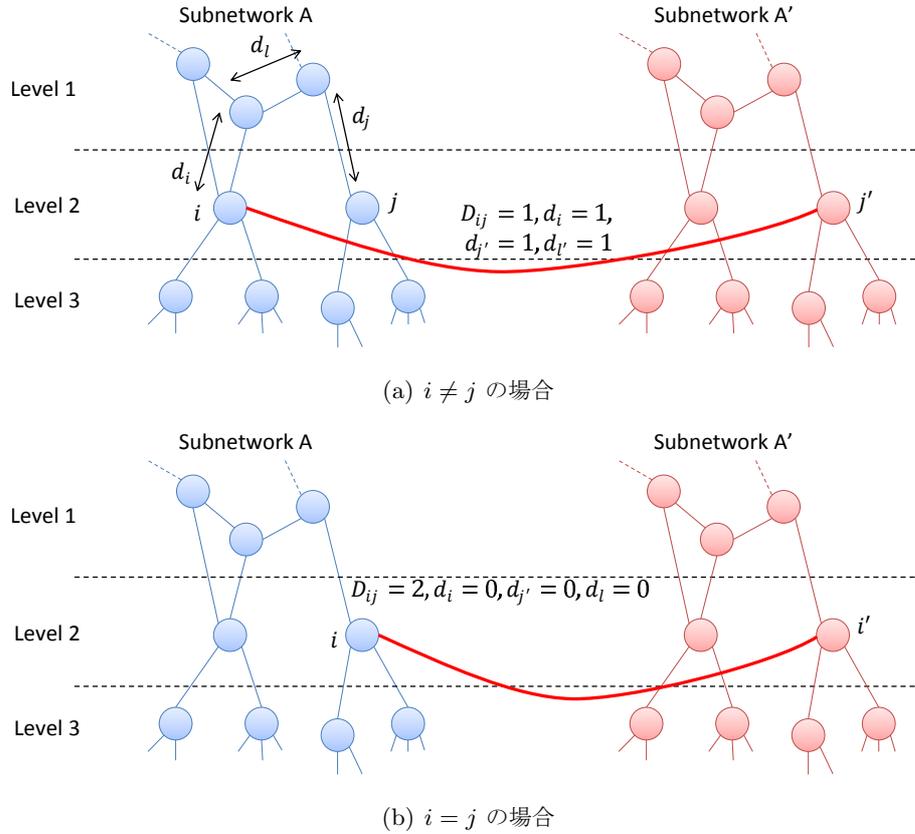


図 2:  $(\lambda, \zeta)$  に基づく  $P(i, j)$  の算出方法 (拡張)

ただし  $n$  分木を基本構造としている文献 [1] とは異なり、同一階層に属するノード間を接続するリンクによるループ構造が存在するトポロジーを考えるため、距離  $x_{ij}$  の定義を拡張する。ノード  $i$  からノード  $j$  までの最短経路の中で、ノード  $i$  から最も高い階層までの上り方向のホップ数を  $d_i$ 、最も高い階層から  $j$  までの下り方向のホップ数を  $d_j$ 、同一階層に属するノード間のホップ数を  $d_l$  とし、 $x_{ij}$  を  $(d_i^2 + d_j^2 + d_l^2)^{1/2}$  とする (図 2)。

## 2. 対となるトポロジーとの接続

$P(i, j)$  の値に応じて対となるトポロジーと接続するリンクを追加する。一方のトポロジー内のノードペア  $(i, j)$  を式 (1) の確率に基づいて選択し、もう一方のトポロジー内でノード  $j$  と同じ場所に位置するノード  $j'$  とノード  $i$  間を接続する。

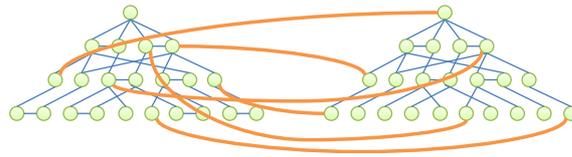
### 3.2.2 接続に用いるパラメータ

局所ネットワーク間の接続に用いるパラメータ  $(\lambda, \zeta)$  の一覧を表 1 に示す。また、それによって構築される大域ネットワークの構造を簡略化したものを図 3 に示す。ただし、Multiscale

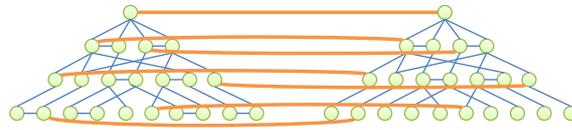
構造は他の 4 つの構造の中間的な構造となりパラメータを一意に定めることが出来ないため、 $(\lambda, \zeta) = (0.5, 0.5)$  以外のパラメータについても評価を行うものとする。また、局所ネットワーク間のリンク本数は 50, 100, 200 本とする。

表 1:  $(\lambda, \zeta)$  の値とトポロジー構造の関係

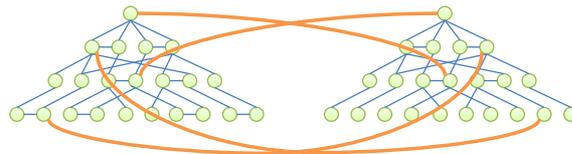
構造名 (略称)	$(\lambda, \zeta)$
Random (R)	$(\infty, \infty)$
Local Team (LT)	$(\infty, 0.05)$
Random Interdivisional (RID)	$(0.05, \infty)$
Core-periphery (CP)	$(0.05, 0.05)$
Multiscale (MS)	$(0.5, 0.5)$



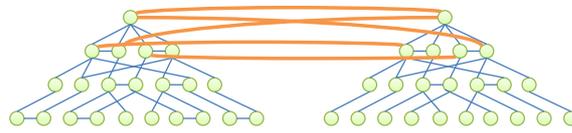
(a) Random



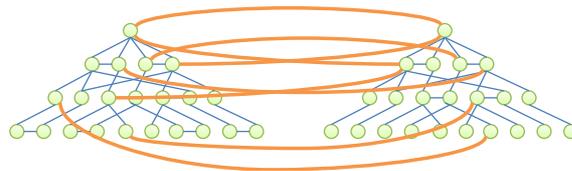
(b) Local Team



(c) Random Interdivisional



(d) Core-periphery



(e) Multiscale

図 3:  $(\lambda, \zeta)$  により得られる大域ネットワークの構造

## 4 相互接続構造が大域ネットワークの信頼性に与える影響

### 4.1 評価指標

ネットワークの信頼性として、故障規模に対する平均ホップ長と到達可能性を評価する。ネットワークのノード数を  $N$ 、ネットワークに含まれる到達可能なノード集合のうち最も大きなノード集合を  $B$  とする。

- 平均ホップ長  $H$

ネットワークに含まれる任意のノードから任意のノードまでに要するホップ長の平均である。Dijkstra 法によりノード  $i$  からノード  $j$  への最短ホップ長  $d_{ij}$  を計測し、式 (2) により平均ホップ長  $H$  を求める。

$$H = \frac{\sum_{i \in B} \sum_{j \neq i, j \in B} d_{ij}}{|B|(|B| - 1)} \quad (2)$$

- 到達可能性  $C$

$B$  に含まれるノード数がノード全体の中でどの程度かを表す。故障ノードの集合を  $B_1$ 、 $B$  に含まれるノードから到達不能なノード集合を  $B_2$  とし、 $B$  に含まれるノード数  $|B|$  を  $|B| = N - |B_1| - |B_2|$  と表す。ただし、 $B_1 \cap B_2 = \emptyset$  とする。式 (3) により到達可能性  $C$  を求める。

$$C = \frac{|B|}{N - |B_1|} \quad (3)$$

### 4.2 単一障害に対する信頼性

単一障害として、ネットワークに含まれるノードがランダムに 1 ノードずつ故障することを考える。ネットワークのノード数  $N$ 、故障ノード数  $r$  のときの故障率  $r/N$  に対する信頼性の値を評価する。

#### 4.2.1 Multiscale 構造のパラメータ調整

まず、他の構造との比較のために、Multiscale 構造の中での最適なパラメータ設定を求める。Multiscale 構造は、2.1.1 章で述べたように 4 つの構造 (Random, Local Team, Random Interdivisional, Core-periphery) の中間的な構造であるため様々な  $\lambda, \zeta$  の値の組み合わせを考えることができ、パラメータを一意に定めることが出来ない。そこで、文献 [1] で最も高い信頼性を示した  $\lambda = 0.5, \zeta = 0.5$  以外でも高い信頼性を示すパラメータを調査する。最も高い信頼性を示したパラメータを表 1 に加え、6 種類のトポロジーについて次節以降の評価を行う。

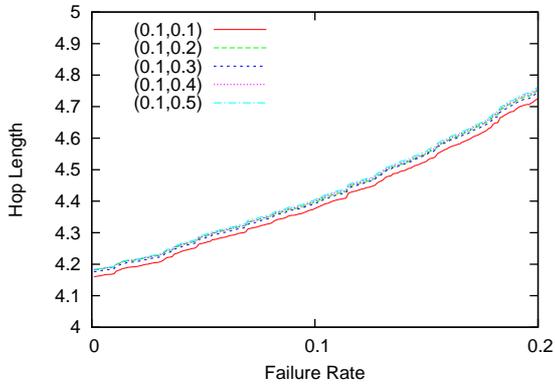
文献 [1] では、Multiscale 構造のパラメータを Core-periphery 構造に寄せたときにも Congestion Robustness が高くなることが示されている。そこで、Core-periphery 構造に近い領域に着目し、パラメータ  $(\lambda, \zeta)$  をそれぞれ 0.1 から 0.5 まで 0.1 刻みで変化させ、ネットワークの信頼性を評価する。なお、ここでは簡単のため元となる局所ネットワークの BA トポロジーはノード数 500、平均次数 2 とし、局所ネットワーク間の接続リンク数は 200 本の場合のみを考えるものとする。以降のシミュレーション評価では、100 パターンの障害を発生させて評価した値の平均値を求めている。

平均ホップ長の評価を図 4 に、到達可能性の評価を図 5 に示す。それぞれの図の横軸はノード故障率を表し、縦軸は各指標の計測結果を示している。これらの図では、 $\lambda$  の値を固定し、 $\zeta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  の、5 つの値をとる場合の比較を行なっている。 $\lambda = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$  のとき、 $\zeta = 0.1$  のトポロジーが、 $\lambda = 0.4$  のとき、 $\zeta = 0.4$  のトポロジーがわずかに平均ホップ長を低く抑えることが出来ている。また、いずれの  $\lambda$  の値でも、到達可能性に顕著な差は見られない。

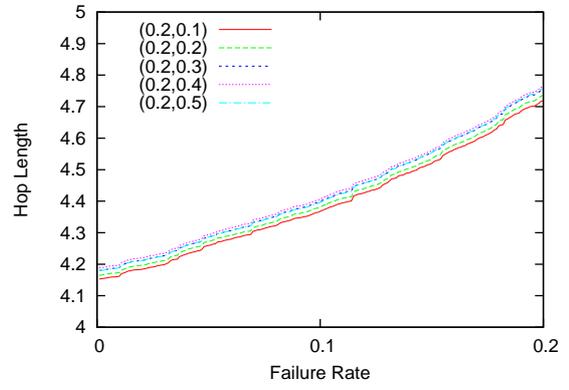
続いてこれらを比較するため、 $\zeta$  を 0.1 に固定し、 $\lambda = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  の、5 つの値をとる場合と、 $\lambda = 0.4, \zeta = 0.4$  の場合のトポロジーの信頼性の比較を行った結果を図 6 に示す。この図における横軸、縦軸が表す値は、図 4 および図 5 と同じである。 $\lambda = 0.1, \zeta = 0.1$  のトポロジーが平均ホップ長を短く抑えているが、 $\lambda, \zeta$  がともに小さいパラメータは Core-periphery 構造に類似した性質を持っていると考えられるため、Multiscale 構造のパラメータとしては採択しないものとする。残った他のトポロジーについて、平均ホップ長、到達可能性ともに大きな差は見られないが、 $\lambda = 0.3, \zeta = 0.1$  のトポロジーが到達可能性でわずかに良い値を示しているため、パラメータ  $\lambda = 0.3, \zeta = 0.1$  を高い信頼性を示す Multiscale 構造のパラメータとみなす。

$\lambda = 0.3, \zeta = 0.1$  が高い信頼性を示す理由として、BA モデルにより生成した局所ネットワークにおける各階層に属するノード数、およびどの階層のノードがネットワーク間の接続に用いられているかに関係していると考えられる。ノード数 500、平均次数 2 として生成した局所ネットワークにおける、各階層に属するノード数を表 2 に示す。また、5 つの階層のうち、どの階層とどの階層の間に何本のリンクが存在するかを表 3, 4 に示す。これらの表の 1 行目と 1 列目は、それぞれの局所ネットワークの階層を表している。

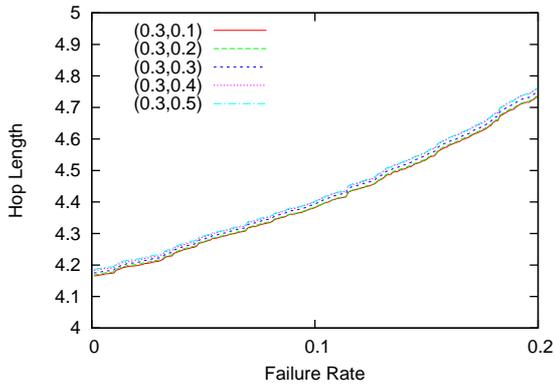
これらの表から、 $\lambda = 0.3, \zeta = 0.1$  の大域ネットワークの方が、第 2 層のノードが局所ネットワーク間リンクを持つ割合が高いことが分かる。 $\lambda = 0.5, \zeta = 0.5$  のトポロジーでは第 2 層のノード数 61 に対して、第 2 層に属するノードが持つリンクの数は 49 本あり、第 2 層に属するノード同士を接続するリンクはそのうち 6 本のみである。一方、 $\lambda = 0.3, \zeta = 0.1$  では第 2 層に属するノードは 72 本のリンクを持ち、第 2 層に属するノード同士も 10 本のリンクで接続されている。次数の大きなハブノードである最上位層のノードと接続する



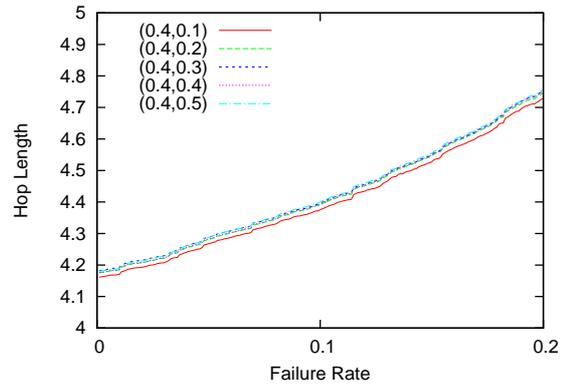
(a)  $\lambda = 0.1$



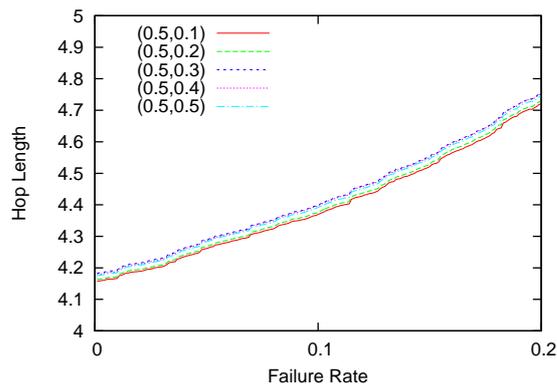
(b)  $\lambda = 0.2$



(c)  $\lambda = 0.3$

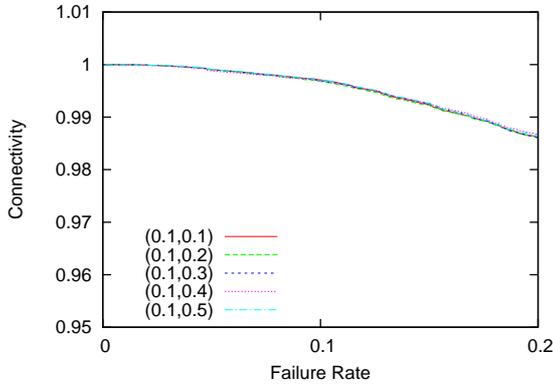


(d)  $\lambda = 0.4$

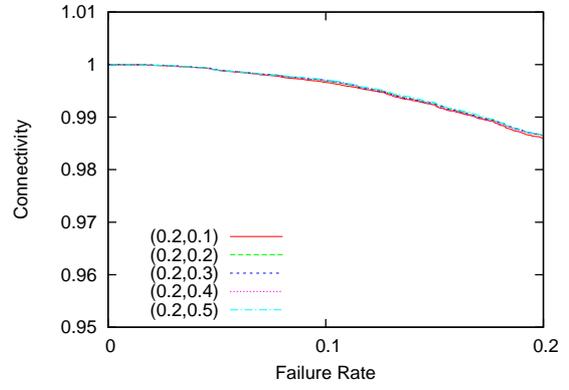


(e)  $\lambda = 0.5$

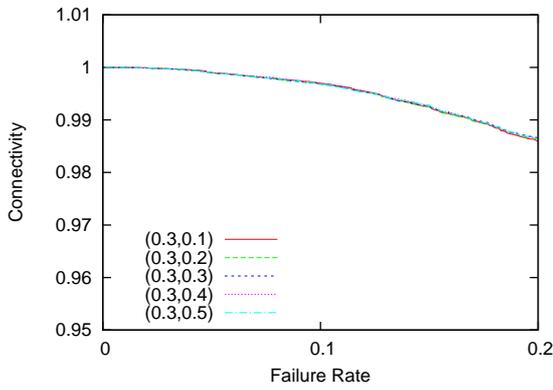
図 4: パラメータ  $(\lambda, \zeta)$  による平均ホップ長の差



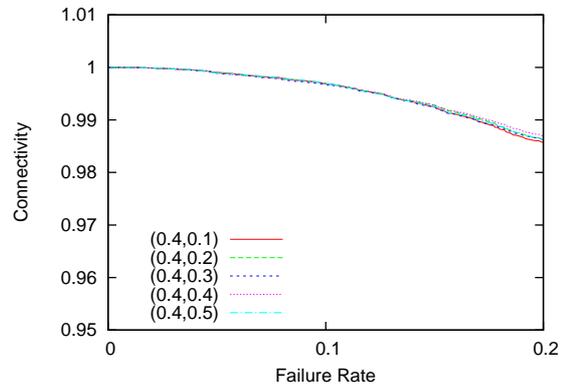
(a)  $\lambda = 0.1$



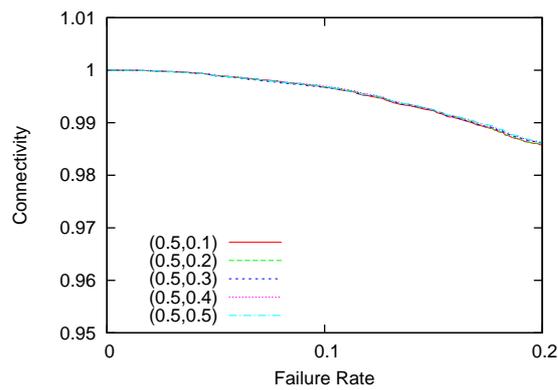
(b)  $\lambda = 0.2$



(c)  $\lambda = 0.3$



(d)  $\lambda = 0.4$



(e)  $\lambda = 0.5$

図 5: パラメータ  $(\lambda, \zeta)$  による到達可能性の差

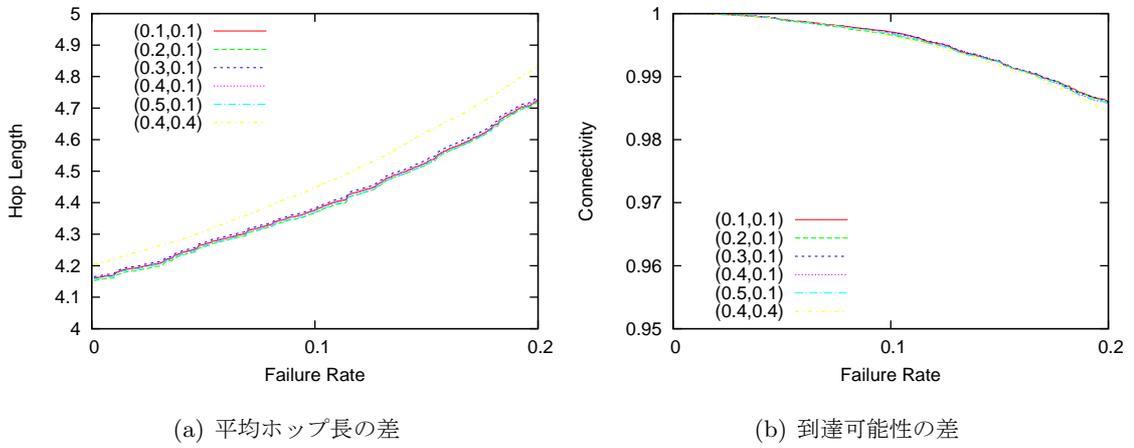


図 6:  $\zeta = 0.1$  および  $\lambda = 0.4, \zeta = 0.4$  における信頼性の差

表 2: 各階層に属するノード数 (ノード数 500, 平均次数 2)

階層	ノード数
Lv.1.	1
Lv.2.	61
Lv.3.	169
Lv.4.	228
Lv.5.	41

表 3:  $\lambda = 0.5, \zeta = 0.5$  による局所ネットワーク間リンクが接続する階層

	Lv.1.	Lv.2.	Lv.3.	Lv.4.	Lv.5.
Lv.1.	0	0	0	2	0
Lv.2.	0	6	8	12	3
Lv.3.	0	9	23	28	8
Lv.4.	1	10	27	45	10
Lv.5.	0	1	2	3	2

表 4:  $\lambda = 0.3, \zeta = 0.1$  による局所ネットワーク間リンクが接続する階層

	Lv.1.	Lv.2.	Lv.3.	Lv.4.	Lv.5.
Lv.1.	0	0	0	0	0
Lv.2.	1	10	21	12	1
Lv.3.	0	17	29	20	6
Lv.4.	0	9	28	33	2
Lv.5.	0	1	5	4	1

第 2 層のノードを接続することで、一方の局所ネットワーク内のノードからもう一方の局所ネットワーク内のノードまでのホップ数を低く抑える効果が得られていると考えられる。

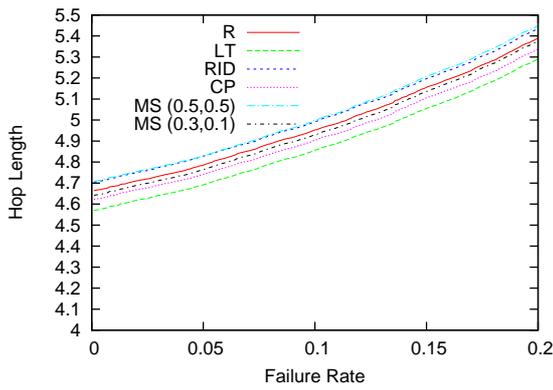
なお、次節以降では  $\lambda = 0.3, \zeta = 0.1$  により接続された構造を MS (0.3,0.1) と示すものとする。

#### 4.2.2 局所ネットワーク間の相互接続構造と信頼性

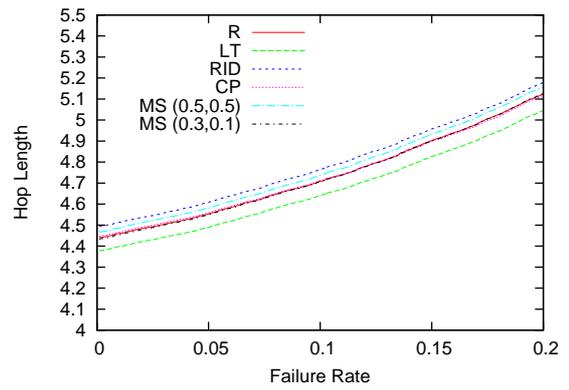
表 1 で示した 5 種類の基本的な構造に加え、前節で求めた最適な Multiscale 構造を構築するパラメータ設定を含めた、6 種類の相互接続構造を持つ大域ネットワークの信頼性の値を評価する。ここでは、局所ネットワークの BA トポロジー生成に用いたパラメータを、(ノード数, 平均次数) で表すものとする。なお、シミュレーションの試行回数は前節と同様である。

平均ホップ長の評価を図 7 から図 10 に示す。それぞれの図の横軸はノード故障率を表し、縦軸は平均ホップ長の計測結果を示している。これらの図より、Core-periphery 構造や Local Team 構造など、上層が密に接続された構造において、平均ホップ長を短く抑える傾向にあることが分かる。しかし、局所ネットワーク間のリンク本数や、局所ネットワーク内のノード数やリンク数によっては Random と同程度まで平均ホップ長が伸びる場合もあり、評価環境により結果にばらつきが見られる。一方、MS (0.3,0.1) は、局所ネットワーク間のリンク本数や、局所ネットワーク内のノード数やリンク数に関わらず、安定して平均ホップ長を低く抑えることが出来ている。

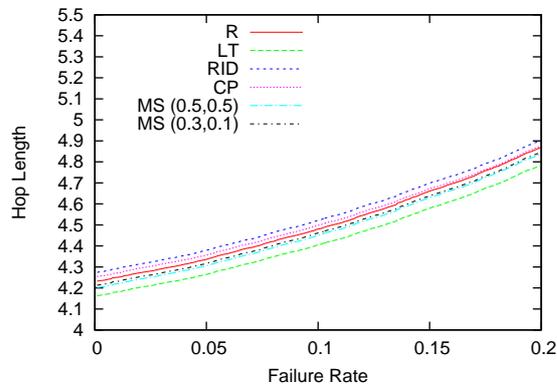
続いて、故障率  $r/N$  に対する、到達可能性の評価を図 11 に示す。この図の横軸はノード故障率を表し、縦軸は到達可能性の計測結果を示している。図 11 は局所ネットワークの BA トポロジーをノード数 500、次数 2 で生成した場合の評価結果であり、いずれのリンク本数においても、局所ネットワーク間の相互接続構造の違いによる顕著な差は見られなかった。また、局所ネットワークの生成に用いるパラメータを変更した場合においても、同様に顕著な差は見られなかった。



(a) リンク 50 本

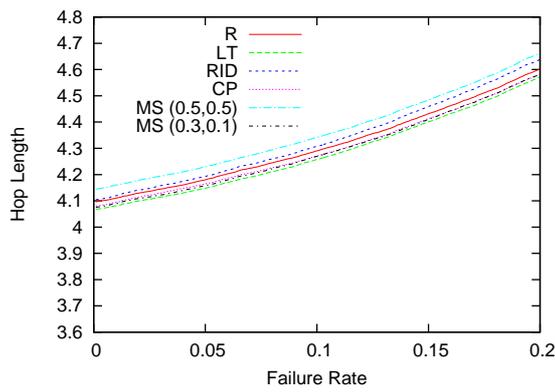


(b) リンク 100 本

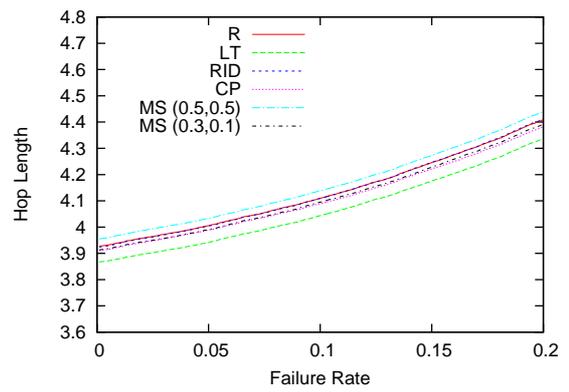


(c) リンク 200 本

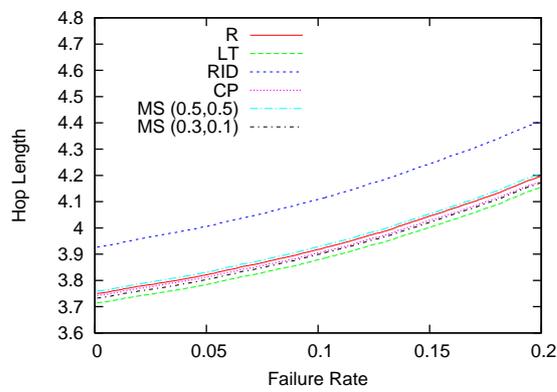
図 7: 単一障害に対する平均ホップ長の平均値 (ノード数 500, 平均次数 2)



(a) リンク 50 本

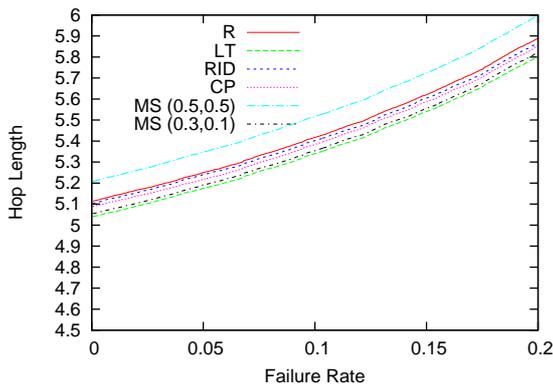


(b) リンク 100 本

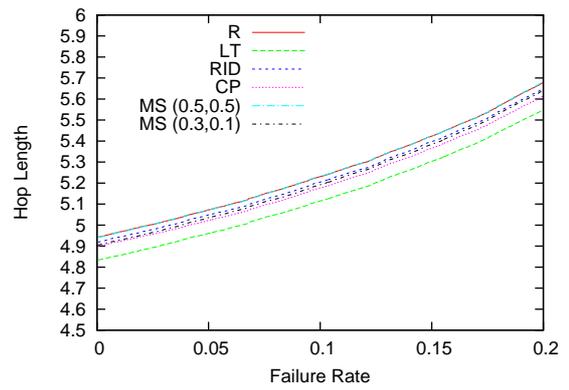


(c) リンク 200 本

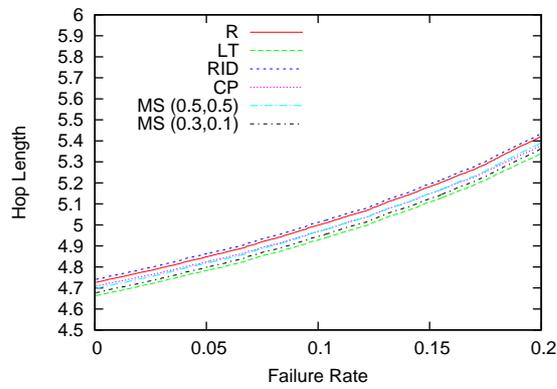
図 8: 単一障害に対する平均ホップ長の平均値 (ノード数 500, 平均次数 3)



(a) リンク 50 本

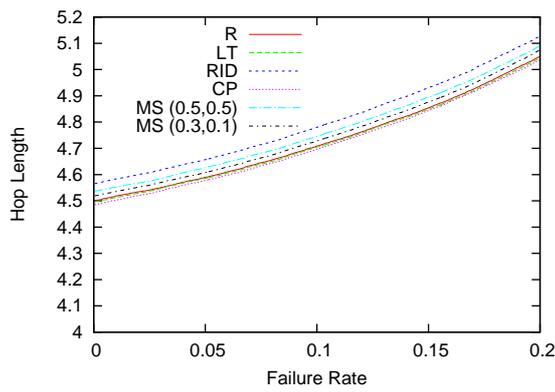


(b) リンク 100 本

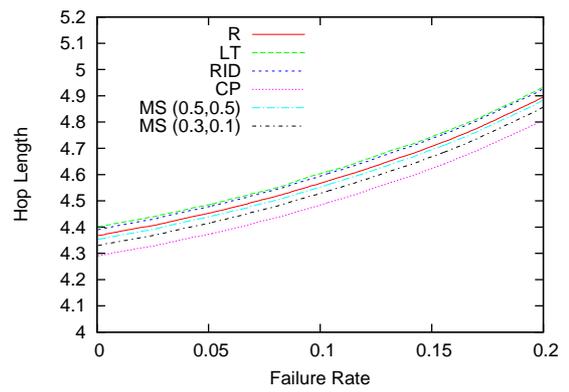


(c) リンク 200 本

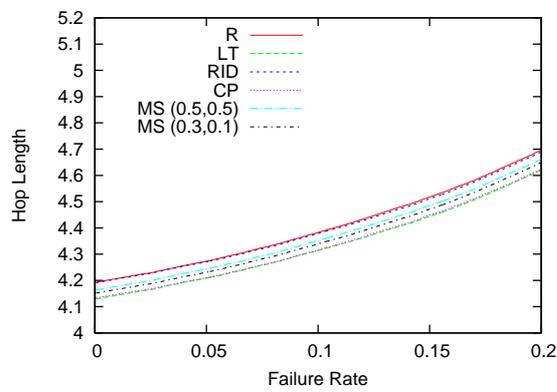
図 9: 単一障害に対する平均ホップ長の平均値 (ノード数 1000, 平均次数 2)



(a) リンク 50 本

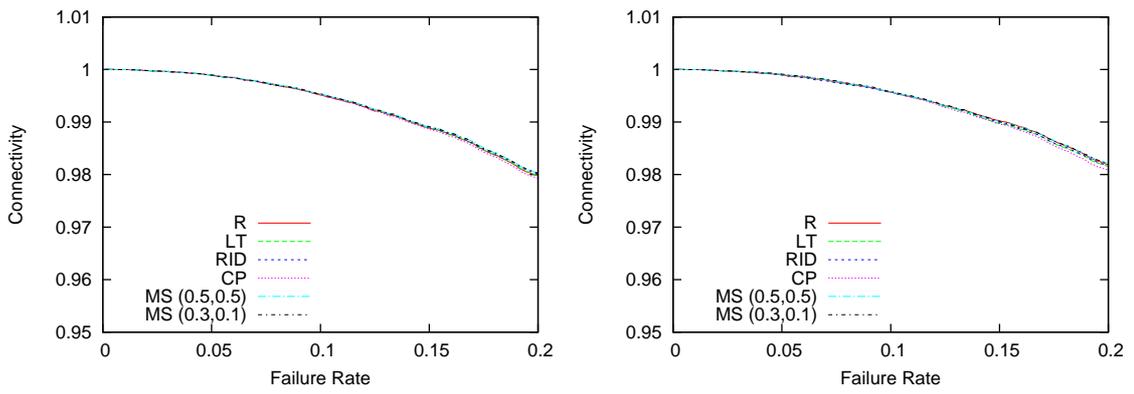


(b) リンク 100 本



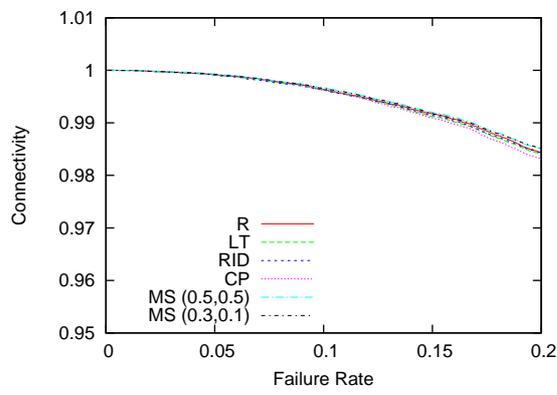
(c) リンク 200 本

図 10: 単一障害に対する平均ホップ長の平均値 (ノード数 1000, 平均次数 3)



(a) リンク 50 本

(b) リンク 100 本



(c) リンク 200 本

図 11: 単一障害に対する到達可能性の平均値 (ノード数 500, 平均次数 2)

そこで、平均値ではなく、故障率に対して到達可能性の値が最も低くなる場合、すなわち最悪値に着目し、そのときの値を図 12 から図 15 に示す。それぞれの図の横軸、縦軸が表す値は、図 11 と同じである。図 12 では故障率が大きくなるにつれて、Local Team 構造において到達可能性の値が他の構造に比べ 1% 程度低くなっていることが分かる。

また、図 14(c) では、MS (0.3,0.1) が故障規模に対して最も到達可能性を維持出来ており、他の構造に比べて到達可能性の値 1 を確保出来る故障規模が約 4 倍となっている。

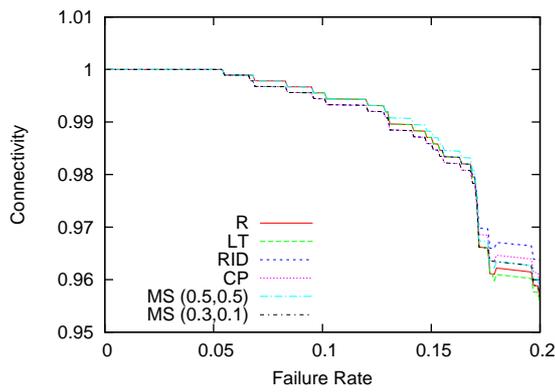
その他の図において、局所ネットワーク間の相互接続構造の違いによる顕著な差は見られなかったが、その理由として、局所ネットワークとして BA トポロジーを用いたことが関係していると考えられる。べき則の性質を有する BA トポロジーは、ランダムなノード障害に対しては接続性を容易に損なわない堅牢性を有することが知られている。また、局所ネットワーク間には十分な数のリンクが張られており、そのすべてが断線することは考えにくい。そのため、局所ネットワーク間の相互接続構造に関わらないすべての大域ネットワークにおいて、到達可能性を高く維持することが出来たため、差が見られなかったと考えられる。

障害発生時も平均ホップ長を低く抑えられた構造のうち、到達可能性を高く維持することの出来る MS (0.3,0.1), Core-periphery 構造が、単一障害に対して信頼性の高い局所ネットワーク間の相互接続構造であることが明らかになった。

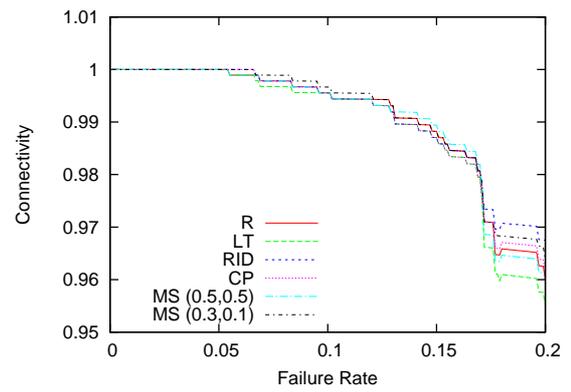
### 4.3 複数同時障害に対する信頼性

ネットワークにおいては障害は常に 1 つのノードのみで発生するのではなく、隣接した複数のノードで同時に障害が発生する場合も考えられる。そこで、ネットワークに含まれるノードの中から、1 つノードを選択し、選択されたノードと、そのノードのすべての隣接ノードが故障する、複数同時障害発生時の信頼性を評価する。複数同時障害は大規模災害のようなある地点に集中した障害を想定しており、複数箇所同時に起こるとは考えにくいいため、障害は 1 回のみ発生するものとする。また、シミュレーションによる評価では障害の規模によらない信頼性を評価するという目的のため、評価値が最も低くなる場合、すなわち最悪値に着目する。そのため、ノード故障が最も大きく影響すると予想されるハブノードを複数同時障害の基点とする。

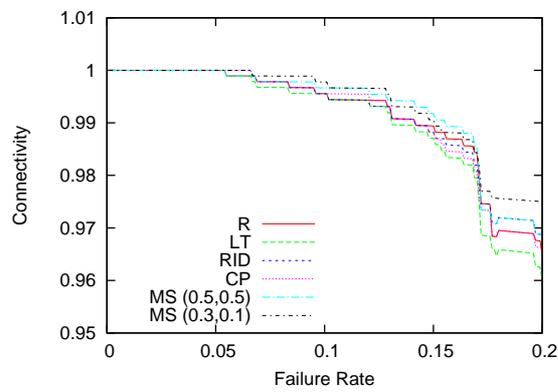
最悪値の評価結果を図 16 から図 19 に示す。それぞれの図の横軸は平均ホップ長の計測結果を、縦軸は到達可能性の計測結果を示している。また、それぞれの相互接続構造について 2 点ずつプロットしているが、これらはそれぞれ故障前後の平均ホップ長と到達可能性の値を示しており、図の左上に近い点が故障前、図の右下に近い点が故障後の値である。この図では、故障前後のプロット間に引かれた直線が長く、また直線の傾きが小さいほど、かつ、プロットが左上に位置する相互接続構造ほど信頼性が高いと判断することが出来る。



(a) リンク 50 本

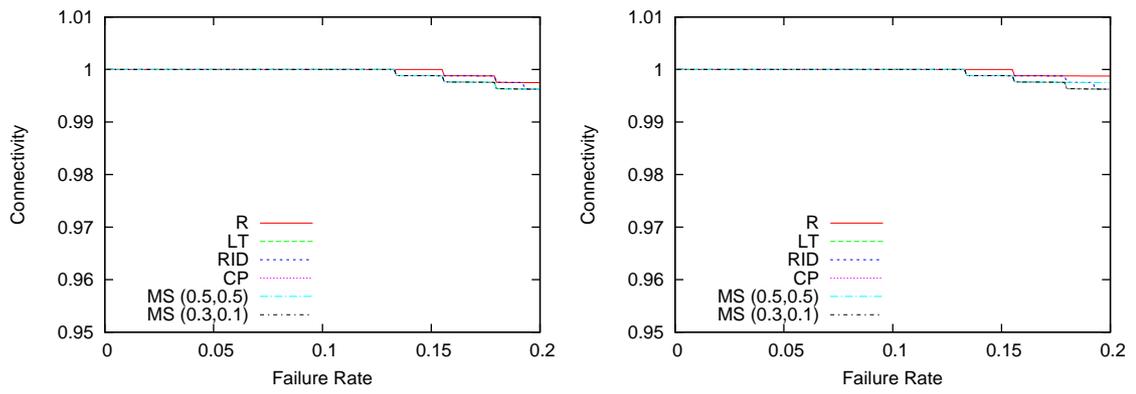


(b) リンク 100 本



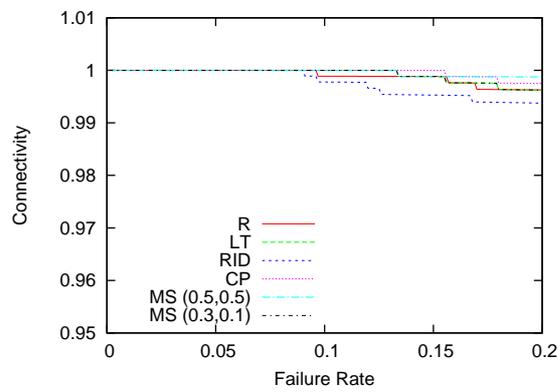
(c) リンク 200 本

図 12: 単一障害に対する到達可能性の最悪値 (ノード数 500, 平均次数 2)



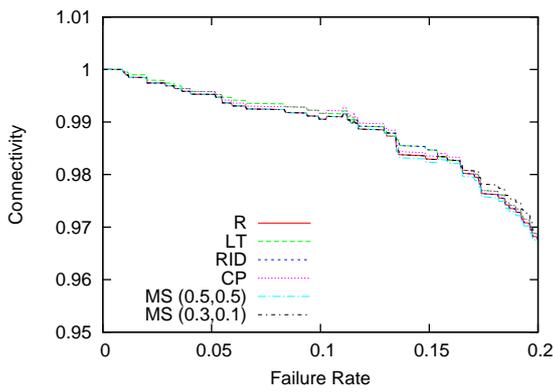
(a) リンク 50 本

(b) リンク 100 本

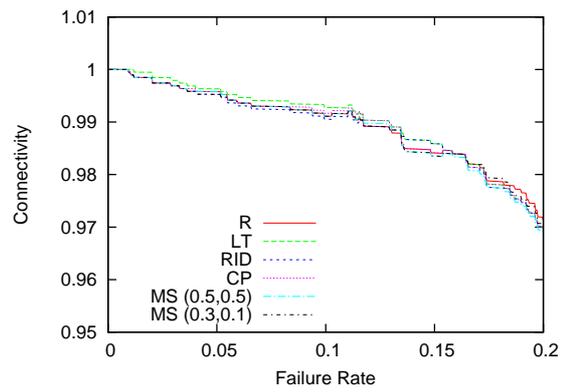


(c) リンク 200 本

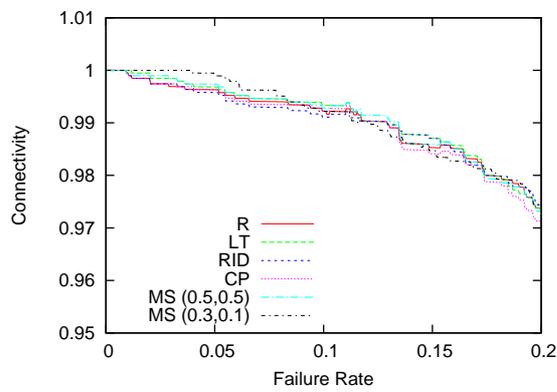
図 13: 単一障害に対する到達可能性の最悪値 (ノード数 500, 平均次数 3)



(a) リンク 50 本

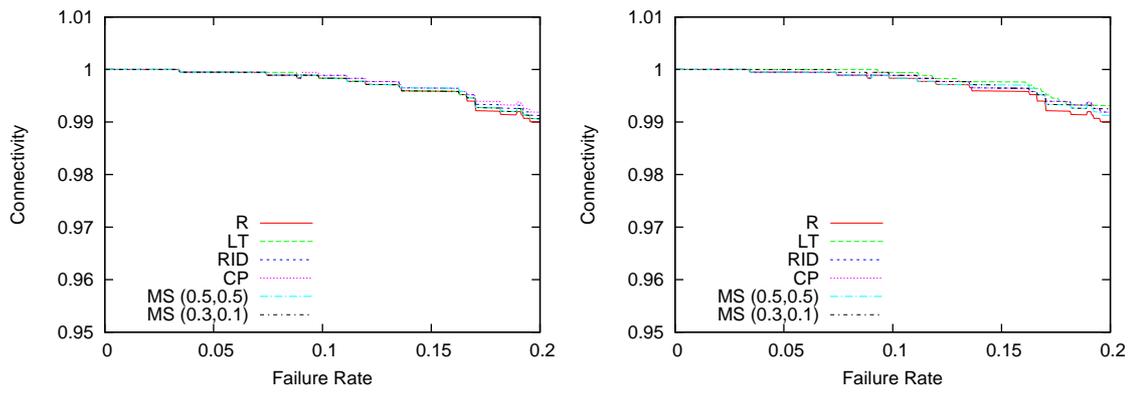


(b) リンク 100 本



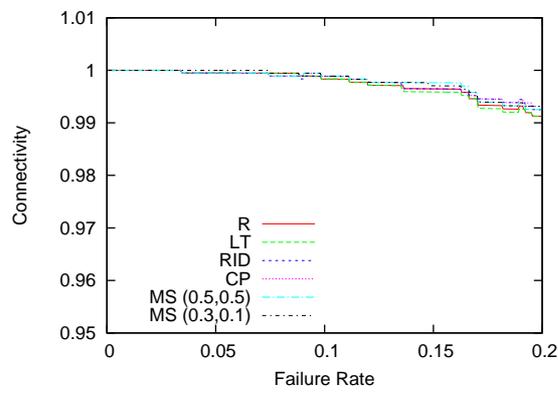
(c) リンク 200 本

図 14: 単一障害に対する到達可能性の最悪値 (ノード数 1000, 平均次数 2)



(a) リンク 50 本

(b) リンク 100 本



(c) リンク 200 本

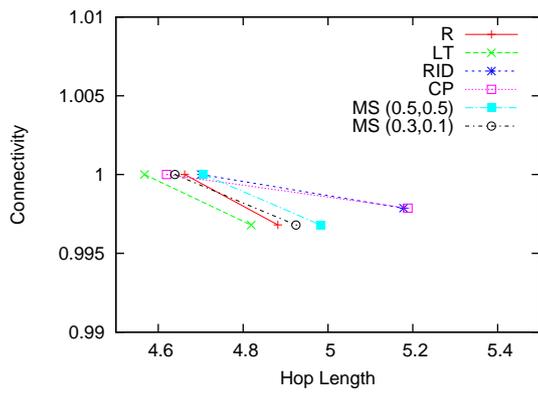
図 15: 単一障害に対する到達可能性の最悪値 (ノード数 1000, 平均次数 3)

これらの図より、MS (0.3,0.1), Local Team 構造が複数同時障害に対しても平均ホップ長を短く抑える傾向にあることが分かる。一方で、Core-periphery 構造、Random Interdivisional 構造は、局所ネットワークのノード数やリンク数によっては平均ホップ長が長くなる場合があることが分かる。

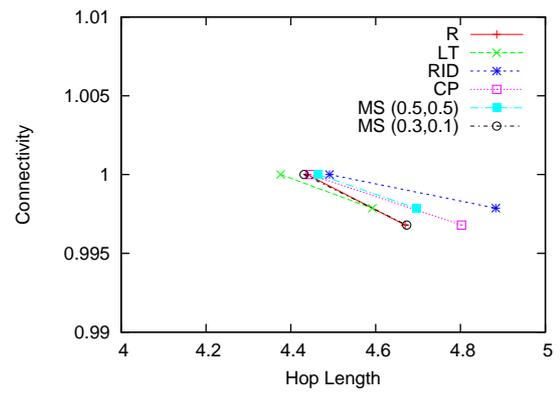
また、いずれのリンク本数においても、局所ネットワーク間の相互接続構造の違いによる到達可能性の値に大きな差は見られない。これは、ネットワーク中心部への攻撃に対しては脆弱性を有するという BA トポロジーの性質に反しているが、故障が 1 回しか発生せず、また大域ネットワークには少数とはいえ複数のハブノードが存在していることが関係していると考えられ、次数の大きなノードが連続して故障する場合には到達可能性にも差が現れると予想される。

到達可能性に関しては明確な差が見られなかったため、複数同時障害に対して最も信頼性の高い局所ネットワーク間の相互接続構造は障害発生時も平均ホップ長を低く抑えられる構造である MS (0.3,0.1), Local Team 構造であることが明らかになった。

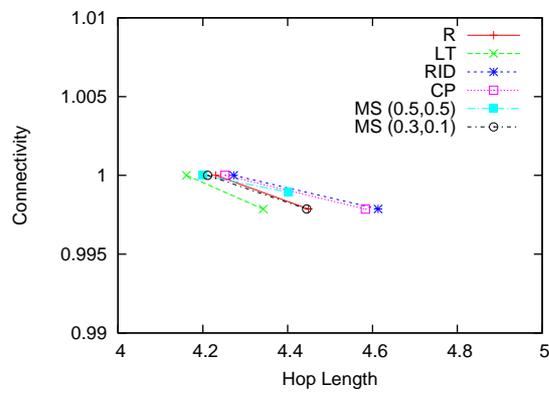
単一障害に対する結果を考慮すると、局所ネットワーク間のリンク本数が同一の条件下において障害に対して信頼性の高い局所ネットワーク間の相互接続構造は、MS(0.3,0.1) 構造であることが分かる。すなわち、局所ネットワークのネットワーク中心部とその周辺を密に接続し、かつ局所ネットワーク全体にもリンクが存在するように接続することで大域ネットワークの信頼性が高くなることが明らかとなった。



(a) リンク 50 本

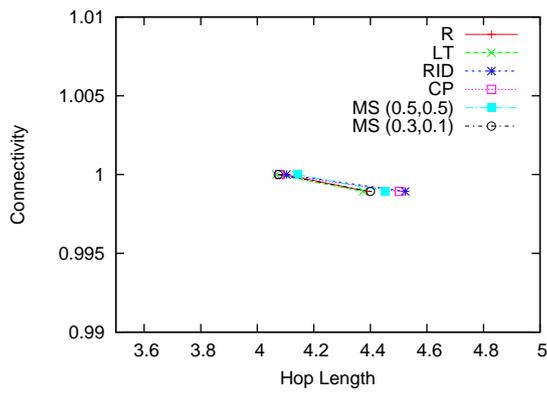


(b) リンク 100 本

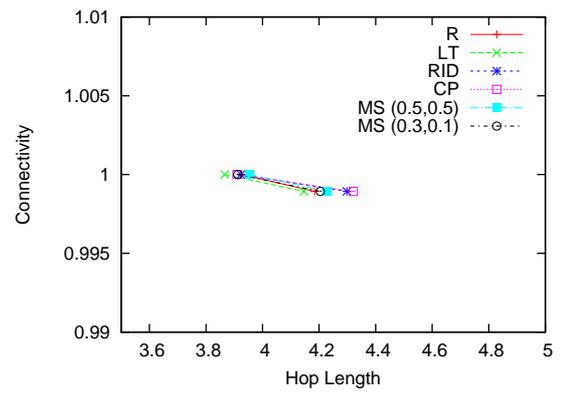


(c) リンク 200 本

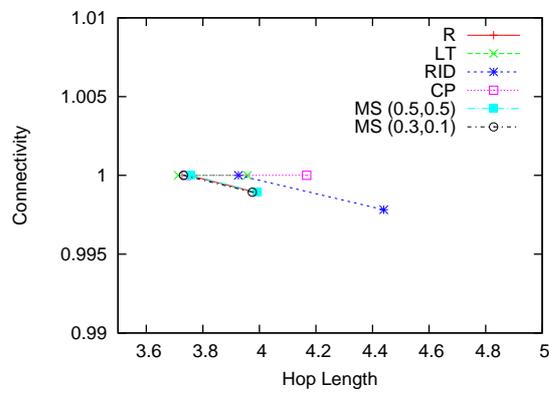
図 16: 複数同時障害に対する信頼性の最悪値 (ノード数 500, 平均次数 2)



(a) リンク 50 本

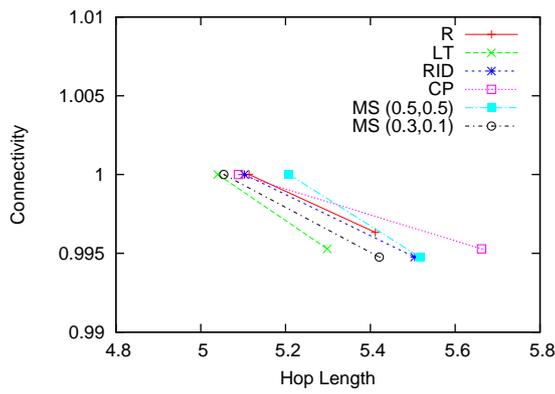


(b) リンク 100 本

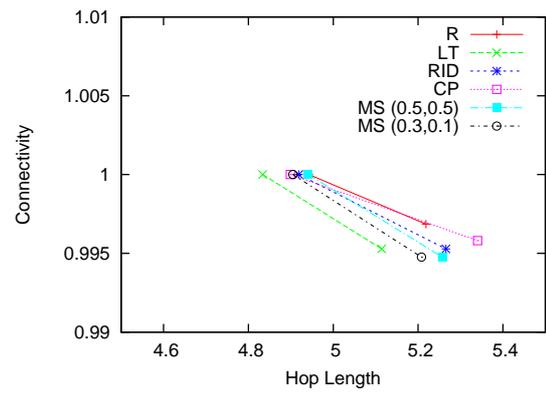


(c) リンク 200 本

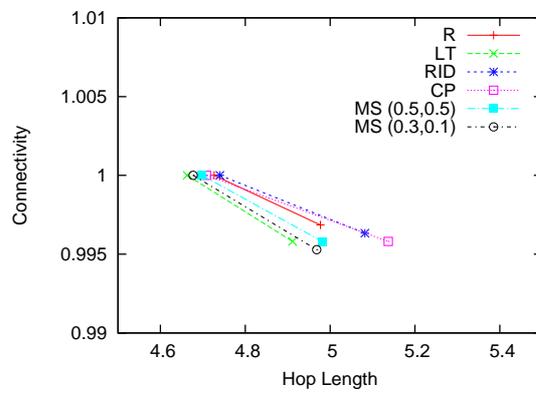
図 17: 複数同時障害に対する信頼性の最悪値 (ノード数 500, 平均次数 3)



(a) リンク 50 本

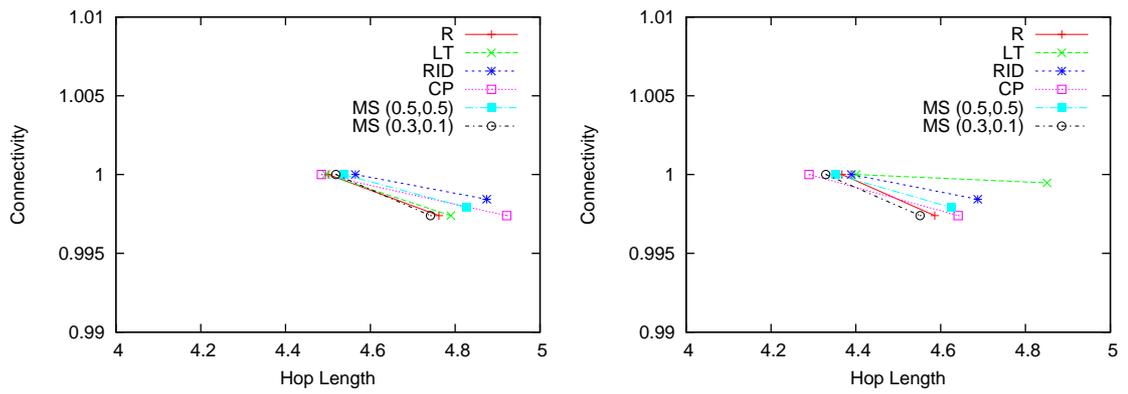


(b) リンク 100 本



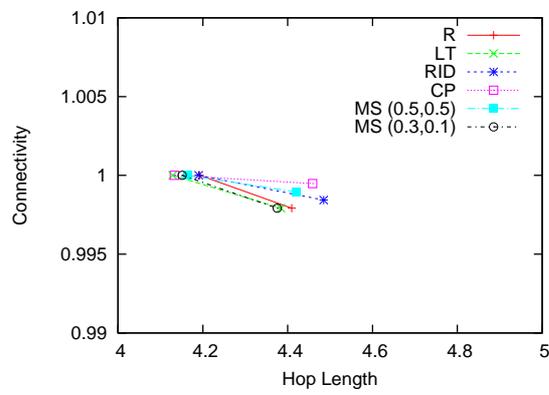
(c) リンク 200 本

図 18: 複数同時障害に対する信頼性の最悪値 (ノード数 1000, 平均次数 2)



(a) リンク 50 本

(b) リンク 100 本



(c) リンク 200 本

図 19: 複数同時障害に対する信頼性の最悪値 (ノード数 1000, 平均次数 3)

## 5 おわりに

本報告では、ネットワーク全体の高信頼化のために、複数のネットワーク間をどのように接続すればよいかを明らかにした。一対の同一なネットワークを用いて様々なネットワーク間の相互接続構造を構築し、得られたネットワークについて障害に対する信頼性の比較評価を行った。障害としては、ランダムに1ノードずつ故障する単一障害と、あるノードとその隣接ノードが一度に故障する複数同時障害を考えた。シミュレーションによる評価により、ネットワーク間のリンク本数が同一の条件下では、ネットワークの中心部およびその周辺を密に相互接続し、かつネットワーク内の位置情報に依存しない様々なノードを相互接続に用いることで障害に対して高い信頼性を示した。具体的には、上層のみを密に接続した場合に比べ、2000ノード規模のネットワークにおいて障害発生時の平均ホップ長を最大でおよそ0.3抑えることが可能となることが明らかになった。

今後の課題として、異なる構造の局所ネットワーク間を接続する際に、どのようなノードを接続すれば信頼性が向上するのかを明らかにする。

## 謝辞

本報告を終えるにあたり、御指導、御教授くださいました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に心より御礼申し上げます。ならびに、日頃より直接御指導くださいました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授に心より御礼申し上げます。また、本報告の作成に関して助言をくださいました大阪大学大学院情報科学研究科の天下裕一助教授に心より御礼申し上げます。最後に、本報告に関して日頃より様々な助言をくださいました平山孝弘氏、中田侑氏、シン・ルー氏を始めとする村田研究室の方々に厚く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] P. S. Dodds, D. J. Watts, and C. F. Sabel, “Information exchange and the robustness of organizational networks,” *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 100, pp. 12516–12521, Oct. 2003.
- [2] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 29, pp. 251–262, Oct. 1999.
- [3] X. Wang and G. Chen, “Complex networks: small-world, scale-free and beyond,” *IEEE, Circuits and Systems Magazine*, vol. 3, pp. 6–20, Jan. 2003.
- [4] Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, “Analyzing and utilizing the collaboration structure for reliable router-level networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E95-B, pp. 2013–2021, Jun. 2012.
- [5] L. Shen, X. Yang, and B. Ramamurthy, “Shared risk link group (SRLG)-diverse path provisioning under hybrid service level agreements in wavelength-routed optical mesh networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 13, pp. 918–931, Aug. 2005.
- [6] A. Hansen, A. Kvalbein, T. Čičić, and S. Gjessing, “Resilient routing layers for network disaster planning,” *Lecture notes in computer science*, vol. 3421, pp. 1097–1105, Apr. 2005.
- [7] J. Gao, S. V. Buldyrev, H. E. Stanley, and S. Havlin, “Networks formed from interdependent networks,” *Nature Physics*, vol. 8, pp. 40–48, Dec. 2011.
- [8] R. Parshani, C. Rozenblat, D. Ietri, C. Ducruet, and S. Havlin, “Inter-similarity between coupled networks,” *Europhysics Letters*, vol. 92, p. 68002, Jan. 2011.
- [9] C. D. Brummitt, R. M. D’Souza, and E. A. Leicht, “Suppressing cascades of load in interdependent networks,” *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 109, pp. 681–689, Mar. 2012.
- [10] A. Barabási and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.