

修士論文

ノード負荷を考慮したルーティングによる
カスケード故障の抑制

1610015

内山 直弥

主指導教員	林	幸雄
審査委員主査	林	幸雄
審査委員	上原	隆平
	小谷	一孔
	吉高	淳夫

北陸先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科 情報科学

平成30年2月

目次

第1章	はじめに	3
1.1	研究背景	3
1.2	研究目的	5
1.3	論文の構成	6
第2章	シミュレーションを行うネットワーク	7
2.1	ネットワークの基本的用語	7
2.2	スケールフリーネットワークとその構築モデル	8
2.3	玉ねぎ状ネットワークとその構築モデル	10
2.4	ネットワークの性質の比較	11
2.4.1	次数分布	11
2.4.2	媒介中心性分布: ノード負荷の分布	12
2.4.3	次数相関	12
2.4.4	トポロジー的頑健性	13
第3章	カスケード故障	14
3.1	代表的なカスケード故障のモデル	14
3.2	本研究で扱うカスケード故障のモデル	15
3.2.1	負荷と許容負荷	15
3.2.2	初期故障ノード	15
3.2.3	評価	16
3.2.4	シミュレーションのプロセス	17
第4章	カスケード故障の対策	18
4.1	従来対策	18
4.1.1	生け贄的なノード除去による対策	18
4.1.2	リンクの繋ぎ変えによる対策	19
4.1.3	次数を考慮したルーティングによる対策	20
4.2	提案する対策	21
4.2.1	ノード負荷を考慮したルーティングによる対策	21
4.2.2	シミュレーション方法	22
第5章	負荷ルーティングのシミュレーション結果	23
5.1	スケールフリーネットワークにおけるシミュレーション	23
5.1.1	シミュレーション結果	23
5.1.2	結果の分析	24
5.2	玉ねぎ状ネットワークにおけるシミュレーション	27
5.2.1	シミュレーション結果	27
5.2.2	結果の分析	28

第 6 章	従来の対策との比較	31
6.1	ノード除去による対策との比較	31
6.1.1	スケールフリーネットワークにおける結果	31
6.1.2	玉ねぎ状ネットワークにおける結果	32
6.2	次数ルーティングとの比較	33
6.2.1	スケールフリーネットワークにおける結果	33
6.2.2	玉ねぎ状ネットワークにおける結果	34
第 7 章	異なる許容負荷定義	36
7.1	Dou モデル	36
7.1.1	Dou モデルによる許容負荷定義	36
7.1.2	シミュレーション結果	38
7.2	Zhao モデル	38
7.2.1	Zhao モデルによる許容負荷定義	38
7.2.2	シミュレーション結果	40
第 8 章	複数の初期故障ノード	41
8.1	初期故障ノードの選択方法	41
8.2	シミュレーション結果	41
8.2.1	スケールフリーネットワークにおける結果	41
8.2.2	玉ねぎ状ネットワークにおける結果	43
第 9 章	おわりに	47

第1章 はじめに

1.1 研究背景

現実に存在する様々な社会システムは、要素をノードによって、繋がりや相互作用をリンクによって表すことでネットワークとして記述できる。例えば電力網は発電所や変電所をノードとして、送電線をリンクとして表すことができ、インターネットはルーターをノードとして、ケーブルなどをリンクとして表すことができる。このようにノードとリンクから成る単純なネットワークとして表現することによって、要素も機能も全く異なる様々なシステムの間にも驚くほど共通する構造的性質があることが1990年代後半以降に複数発見されている。その中でも重要な性質の1つとして、1999年に発見された、少数のノードが他の多くのノードと接続する一方で、大多数のノードは少数の他のノードとしか接続しないという、べき乗次数分布に従うスケールフリー性が挙げられる [1]。スケールフリー性を持つネットワークは、接続が集中したハブノード群が僅かな割合でも除去されると連結性が失われ、複数の連結成分に分断されることが知られている。つまり、トポロジーのような静的な観点から考えると、現実に存在するネットワークの多くは、破壊を意図した攻撃に対しては非常に脆弱であり、トポロジー的に頑健性が低いと言える。このことが明らかになって以降しばらくは、最適な攻撃耐性を持つ構造が何かについては未解決であったが、正の次数相関を持つことを特徴とする玉ねぎ状構造に、最適に近いトポロジー的頑健性があることが2011年にパーコレーション理論解析とシミュレーションによって発見された [2]。この玉ねぎ状構造は、頑健な次世代のネットワークの構造として期待でき、ノード追加による成長を基本とする現実的な玉ねぎ状構造の構築モデルもごく最近見つかった。

以上のようなネットワークの頑健性はトポロジーという静的な側面にのみ注目している。しかしながら、現実のネットワーク上の通信におけるパケット転送や物流における輸送のフローなどに関する動的な側面を考慮すると、カスケード故障と呼ばれるより一層壊滅的なネットワーク崩壊が起こりえることが2002年に明らかにされた [3]。このカスケード故障では例えごく一部のノード故障でさえ、ネットワーク全体を崩壊させることがあり、そのメカニズムはフローを考慮することで次のように説明できる。

1. 事故や意図的なノード攻撃など何らかの理由によってネットワークの一部が機能不全となって故障する。
2. ネットワーク上のフローは故障したノードを避ける必要があり、その経路変化に伴って周辺の負荷を変化させる。
3. 故障発生による負荷変化は他のノードの過負荷による故障を誘発するため、ノード故障は連鎖的に拡大する。
4. これらの結果として、ネットワーク全体の崩壊を引き起こし得る。

カスケード故障は次の2つのケースに被害が大規模になる傾向がある [3]。1つはネットワーク上の負荷分布が不均質なとき。もう1つは引き金となる初期故障源の負荷が大きいときである。現実のネットワークの多くはスケールフリー性を持ち、その負荷分布は非常

に不均質であるため、負荷が大きい要素が故障することで大規模なカスケード故障を引き起こしやすい。つまり、スケールフリー性を持つネットワークはトポロジ的に脆弱であるだけでなく、カスケード故障に対しても大きなリスクを持つ。一方で、次世代のネットワークとして期待できる玉ねぎ状構造におけるカスケード故障についての議論はこれまでに全く行われていない。

カスケード故障は、何らかのフローにより成り立つネットワーク状のシステムであれば、どのようなものでも引き起こされる可能性がある。例えば、電流を運ぶ電力網の崩壊、パケットを運ぶインターネットにおける輻輳、車両が通る道路網における複数の道路にわたる大規模渋滞などが考えられる。数多くのシステム上で引き起こされ得るカスケード故障は社会に甚大な被害を及ぼす可能性があり、その基本的な仕組みを理解し、被害規模を縮小させる基本的な要因や方法を把握する事は極めて重要である。

一方、これまでに多くのカスケード故障のモデルが提案され、シミュレーションを中心とした研究が取り組まれている。その中で、特にカスケード故障に対する対策としては、2004年に生け贄的なノード除去による方法 [4] が、2006年にリンク繋ぎ変えによる方法 [5] が提案されている。しかし、これらの方法では配線コストや犠牲が生じるため、電力網などの現実のネットワークにそのまま適用するには検討の余地がある。また他の対策として、次数を考慮したルーティングによって、ネットワークの効率を低下させずにカスケード故障を抑制する方法が2007年に提案されている [6]。しかし、各ノードの負荷の許容量（許容負荷）を次数を考慮したルーティングのもとでフローを輸送した場合の初期負荷に比例した値で定義することが前提となる。つまり、ノードの許容負荷を容易に変化させることができないような既存のシステムや設計時に許容負荷の決め方に制限がある場合などへの適用は難しい。以上の研究以降もカスケード故障に関する研究は盛んに取り組まれているが、その中心は2010年に Buldyrev らが発表した論文 [7] を皮切りに、相互に依存するネットワークのネットワーク上でのカスケード故障に関するテーマに移り、カスケード故障の対策として現実的なものは未だに明らかになっていない。そのため、従来の対策の問題点を克服したより現実的な対策が求められる。

カスケード故障の現実的な対策としての有効性を確認するために、従来の単なる被害規模の評価に加えて次の2つを検討する必要がある。1つ目は許容負荷の定義方法に対する柔軟性である。許容負荷の定義方法は、最も基本的なノードの初期負荷に比例した値で定義するケースや、次数に応じて割り当てる許容量を変えるケースなど様々な方法が提案されている。そのため、許容負荷の定義方法によらずに被害を抑制できることを確かめることは重要である。2つ目は複数のノード故障をカスケード故障の引き金とした際の被害の検討である。カスケード故障のシミュレーションでは基本的に1つのノード除去を引き金とするが、意図的な攻撃を想定すると被害が大きくなるように選択された複数のノードがターゲットとなることは十分考えられる。そのため、引き金となる故障ノード数が増えた場合でも被害を抑制できることを確認する必要がある。

1.2 研究目的

カスケード故障の引き金となる初期故障発生後に全てのノードが過負荷状態になるわけではなく、余裕を残すノードも存在する。この点に注目すると、本来なら負荷が集中し余裕が無くなるノードの負荷を余裕があるノードに分散させることで、過負荷故障の発生を抑制できると考えられる。そこで本研究では、従来法の問題点を克服した新しいカスケード故障の対策を目指して、余裕が無いノードは迂回して余裕があるノードを通るように経路選択を行う、負荷に注目した迂回ルーティングによる対策を提案する。また、提案手法がカスケード故障の被害を大幅に抑制できることを、シミュレーションによって示す。シミュレーションは現実のネットワークに相当するスケールフリーネットワークと次世代のネットワークとして期待できる玉ねぎ状ネットワークにおいて行い、特に次の点を調査する。

- カスケード故障の被害規模
- ルーティングによるネットワークの経路長に関する効率への影響
- 生け贄的なノード除去法などの従来方法との比較
- ネットワークの許容負荷分布による影響
- 初期故障ノードの選択方法や複数故障による影響

1.3 論文の構成

第2章 本研究で扱うネットワークの基本的用語を述べる. また, カスケード故障において比較すべきネットワークの構造として, 現実の多くのシステムに相当するスケールフリーネットワークと, 現時点で最適な攻撃耐性を持つ玉ねぎ状ネットワークについて説明する.

第3章 カスケード故障の基本的なモデルを紹介した後, 本研究で扱うモデルの詳細を述べる.

第4章 カスケード故障の対策としてこれまでに提案されている方法と, 本研究で新たに提案する方法を述べる.

第5章 提案する対策を適用した時のシミュレーション結果とその分析について述べる.

第6章 提案する対策と従来の方策で結果を比較する.

第7章 許容負荷分布を変化させた時のシミュレーション結果について述べる.

第8章 複数のノード故障を引き金とした時のシミュレーション結果について述べる.

第9章 本研究をまとめる.

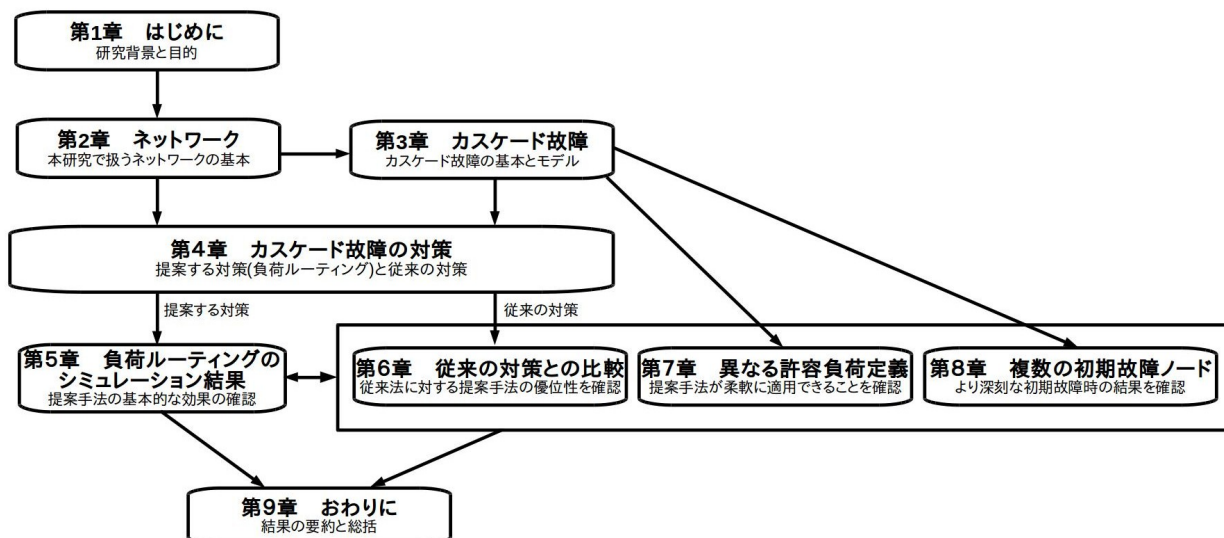


図 1.1: 論文の構成図

第2章 シミュレーションを行うネットワーク

本章では、2.1 で本研究で扱うネットワークの基本的な用語を、2.2 と 2.3 でカスケード故障のシミュレーションを行うスケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワークについて説明する。2.4 では、2.2 と 2.3 で説明したそれぞれのネットワークの性質を比較する。

2.1 ネットワークの基本的用語

本研究で議論するネットワークは、ノード (頂点) の集合 $V = 1, 2, \dots, N$ とノードをつなぐリンク (辺) の集合 $E = e_{ij}$ からなり、グラフ理論におけるグラフとほぼ同じ意味である。また、リンクの両端のノードが等しくなる自己ループと、2つのノード間に複数のリンクが存在するような多重辺は認めていない単純グラフである。ネットワークの構造は隣接行列 A を使って表すことができ、その要素はノード ij 間にリンクが存在する場合は $A_{ij} = 1$ 、存在しない場合は $A_{ij} = 0$ になる。リンクの向きを考慮する場合は有向グラフ、考慮しない場合は無向グラフと呼ぶが、本研究で扱うネットワークは、特に言及しない限りは無向グラフとする。

ネットワークを分析する際、様々な特徴量を用いて議論される。以下に、本研究と関わりが深い特徴量として、次数、次数相関、媒介中心性について説明する。

次数

あるノード i の次数 k_i は、そのノードのリンク数のことであり、以下のように定義される。

$$k_i = \sum_j A_{ij} \quad (2.1)$$

リンク 1 つにつき次数は 2 ずつ増えるため、次数を全てのノードで合計すると、総リンク数 M の 2 倍に等しくなる。ネットワークを分析する上では、ある次数 k を持つノードの存在確率 $p(k)$ の分布である次数分布で議論することが多い。

次数相関

次数相関とは隣接するノード間の次数の相関のことであり Pearson の相関係数をリンク両端のノードの次数に対して適用することで次式の様に定量化できる [8]。

$$r = \frac{\sum_{ij} (A_{ij} - k_i k_j / 2M) k_i k_j}{\sum_{ij} (k_i \delta_{ij} - k_i k_j / 2M) k_i k_j} \quad (2.2)$$

ここで, δ_{ij} は Kronecker のデルタであり $i = j$ のとき 1 に, $i \neq j$ のとき 0 になる. また, 式 2.2 を変形することで次式が得られる.

$$r = \frac{S_1 S_e - S_2^2}{S_1 S_3 - S_2^2} \quad (2.3)$$

ここで,

$$S_1 = \sum_i k_i, \quad S_2 = \sum_i k_i^2, \quad S_3 = \sum_i k_i^3, \quad S_e = \sum_{ij} A_{ij} k_i k_j \quad (2.4)$$

である.

上式で計算される次数相関 $-1 \leq r \leq 1$ が負の時は次数が異なるノード同士が隣接しやすいことを示し, 逆に正の時は次数が同じノード同士が隣接しやすいことを示す.

媒介中心性

ネットワーク上のフローがある特定のノードを頻繁に経由するのであれば, そのノードはフローを中継する上で重要な役割を果たしているといえる. 媒介中心性とはこのようなノードのフロー中継役としての重要度を示す指標である. 媒介中心性 B_i は全ノードペア間でフローを交換するときに各ノード i がフローを中継する頻度として以下式で定義される [9].

$$B_i = \sum_{s \neq t \neq i} \frac{g_{st}(i)}{g_{st}} \quad (2.5)$$

ここで g_{st} は始点ノード s から終点ノード t をつなぐ最小ホップ経路の数で, $g_{st}(i)$ はその経路の中でノード i を含む経路の数である.

媒介中心性はノードがフローを中継する頻度を示すため, フローの通る経路として最小ホップ経路が選択される場合のノードの負荷とみなすことができる. また, 最小ホップ経路は Dijkstra 法などを用いて計算することができる.

媒介中心性ではフロー経路として最小ホップ経路を想定しているが, g_{st} を何らかのルーティング基準で選択された経路の数として考えることで, より一般化して適用することができる. この媒介中心性を拡張したものはルーティング中心性と呼ばれ [10], 何らかのルーティング基準により経路選択を行う場合におけるノードの負荷として考えることができる.

2.2 スケールフリーネットワークとその構築モデル

1.1 で述べたように, 現実に存在するネットワークの多くはスケールフリー性を持つスケールフリーネットワーク (scale-free network) であり, その次数分布は $p(k) \sim k^{-\gamma}$ のべき乗則に従うことが知られている. 例えば, 電力網は $\gamma=4$, www は $\gamma=2.1$ のべき乗則の次数分布に従う [1]. 全く異なるネットワークに, このような共通する性質が出現する理由は共通する構築原理にあり, その基本は BA モデル (Barabasi-Albert model) [1] によって示されている. BA モデルによると, スケールフリー性を出現させる重要な要素は, 成長と優先的選択の 2 つである. 1 つ目の成長とは, ノードの数が時間の経過と共に増加し, ネットワークの規模が大きくなることである. これは, 都市の成長に伴うインフラの拡大などに相当する. 2 つ目の優先的選択とは, 新しく追加されるノードが, 接続先として次数が小さい既存ノードより, 次数が大きい既存ノードに接続しやすい傾向である. 次数が大きいノードに接続すると他のノードへのアクセスが容易になるなどの利点が存在する. そのため, 現実のネットワークにおいて新ノードが利己的な理由で接続先を選ぶと次数が大きいノード

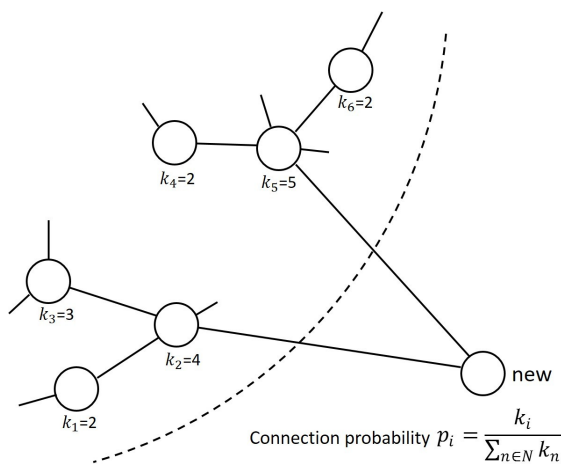


図 2.1: BA モデルによるネットワーク構築 (Step1, Step2)

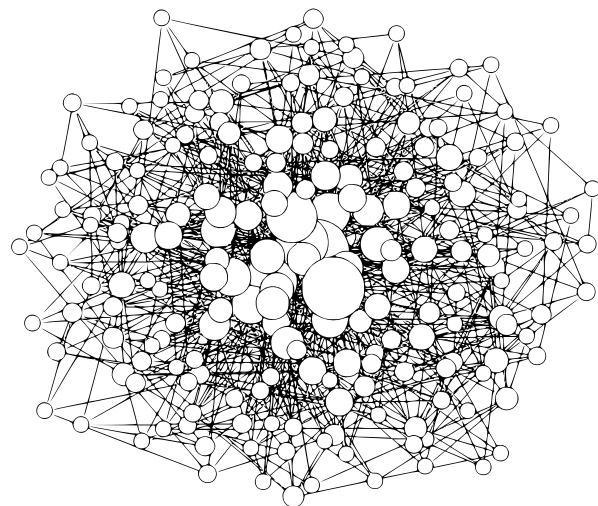


図 2.2: BA モデルで構築したスケールフリーネットワーク ($N = 200, m = 4$)

が選択されやすい。優先選択はこの現実の傾向を反映している。以上の成長と優先的選択によって、ネットワークが成長するに従い、次数が大きいノードはより次数が大きくなり、ハブと呼ばれる接続が集中したノードが発生する。

成長と優先的選択の考え方を取り入れた、BA モデルによるネットワーク構築のアルゴリズムは次の通りである。また、図 2.1 に Step1, Step2 の概要図を、図 2.2 に BA モデルで構築したネットワーク ($N=200, m=4$) を示す。

Step0: 時刻 $t = 0$ にノード数が $N(0)$ 個の連結な初期ネットワークを構築する。この初期ネットワークはノード数が Step1 でノードと共に追加されるリンクの数 m 以上であればどのようなものでも良いが、本研究ではノード数が $m + 1$ の完全グラフを用いる。

Step1: 毎時刻 $t = 1, 2, 3, \dots$ にリンクを m 本持つノードを 1 つネットワークに追加する。

Step2: 追加したノードのリンクをそれぞれ既存ノードと接続する。このとき、接続先の既存ノード i は以下の確率 p_i で選択される。また、多重接続は禁止する。

$$p_i = \frac{k_i}{\sum_{j=1}^{N(t)-1} k_j} \quad (2.6)$$

Step3: 所望のノード数に達するまで Step1, Step2 を繰り返す。

本研究では、この BA モデルで構築したスケールフリー性を持つネットワークを現実のネットワークの構造と位置づけ、カスケード故障のシミュレーションを行う。

2.3 玉ねぎ状ネットワークとその構築モデル

スケールフリー性の発見は、現実のネットワークに存在する驚くほど共通した構造的特徴としてだけでなく、攻撃に対するトポロジ的脆弱性を明らかにし、大きな注目を集めた [1]. その後の研究により、現在ではトポロジ的頑健性を持つネットワークの構造として、玉ねぎ状構造がパーコレーション理論解析とシミュレーションによって発見されている [2]. この構造は正の次数相関を持つことを特徴とし、次数が大きいノードを中心に次数が小さい順に同心円上にノードを配置することで玉ねぎのような多層構造が現れることから玉ねぎ状構造と呼ばれている. 玉ねぎ状構造を持つネットワーク (以後、玉ねぎ状ネットワーク onion-like network と呼ぶ) の構築方法として現在提案されているものには、任意の次数分布が固定的に与えられている上で全てのリンクを繋ぎ変える方法 [11] がある. しかしより自然と考えられる、BA モデルと同じノード追加による成長による構築モデルが、ごく最近発見された. この方法は、ネットワークのループ (サイクル) 構造に注目したものであり、次の手順でネットワークを構築する. また、図 2.3 に Step1, Step2 の概要図を、図 2.4 にこのモデルで構築したネットワーク ($N=200$, $m=4$) を示す.

Step0: 時刻 $t = 0$ にノード数が $N(0)$ 個の連結な初期ネットワークを構築する. 初期ネットワークはノード数が Step1 でノードと共に追加されるリンクの数 m 以上であればどのようなものでも良いが、本研究ではノード数が $m + 1$ の完全グラフを用いる.

Step1: 毎時刻 $t = 1, 2, 3, \dots$ にリンクを m 本持つノードを 1 つネットワークに追加する.

Step2: 追加したノードのリンクをランダムに選択した既存ノードと、そのノードから一定ホップ数 $l - 2$ だけ離れた既存ノード集合 (指定したホップ数 $l - 2$ 先のノードが存在しない場合は、最も遠いノード集合) の中で次数が最小のノードと接続する. これを $m/2$ 回繰り返す. また、多重接続は禁止とする.

Step3: 所望のノード数に達するまで Step1, Step2 を繰り返す.

このモデルでは Step2 のプロセスで、 l 個のノードからなるループ (サイクル) が構築される. このループ構造がトポロジ的頑健性を向上させる重要な要素であると考えられている. 本研究ではこの名称が定着していない構築モデルをループモデル (loop model) と呼ぶことにした.

玉ねぎ状ネットワークはテロやハッキングなどの意図的な攻撃に対してトポロジ的頑健性を持つ次世代のネットワークとして期待できる. しかし、カスケード故障に対する耐性についてはこれまで検討されていない. そこで、本研究ではループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワークを次世代のネットワークの構造と位置づけ、スケールフリーネットワークと共にカスケード故障のシミュレーションを行う. また、ループのサイズ l を 3, 5, 7 として構築したネットワークにおいてシミュレーションを行い、それぞれについて比較する.

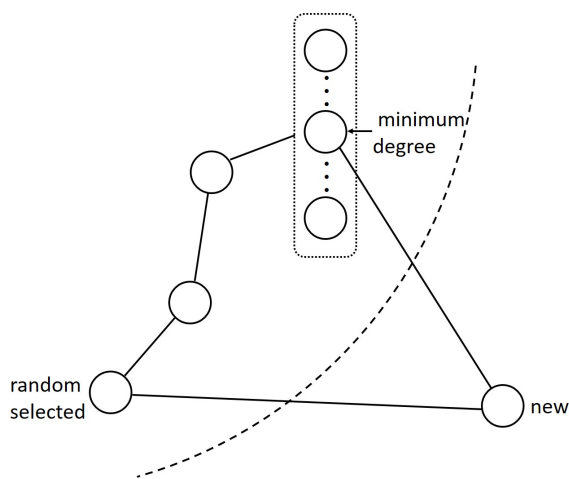


図 2.3: ループモデルによるネットワーク構築 (Step1, Step2)

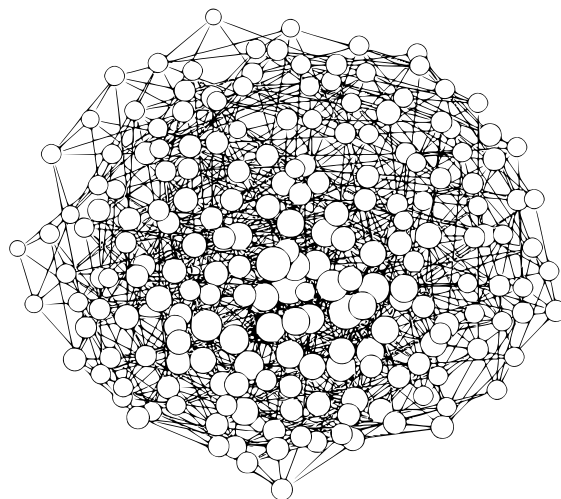
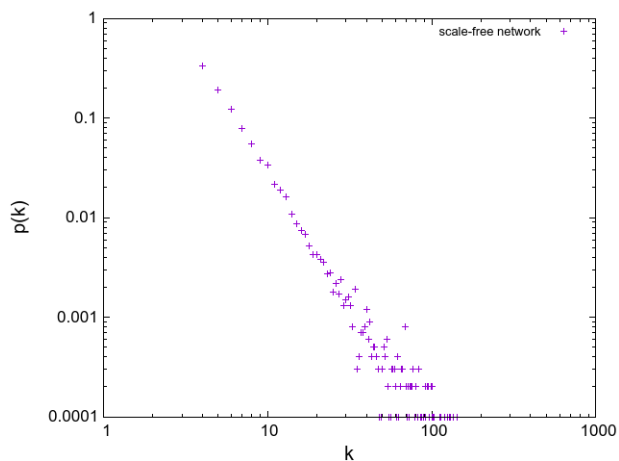
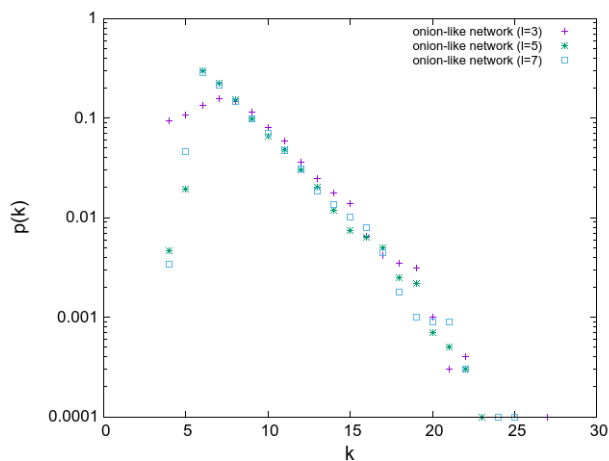


図 2.4: ループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワーク ($N = 200, m = 4$)



(a) スケールフリーネットワーク



(b) 玉ねぎ状ネットワーク

図 2.5: 次数分布の比較

2.4 ネットワークの性質の比較

本節では, 2.2, 2.3 で述べた BA モデルで構築したスケールフリーネットワークとループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワークを次数分布, 媒介中心性分布, 次数相関, トポロジ的頑健性の点でそれぞれ比較する. また, ネットワークはノード数 $N = 1000$, $m = 4$ の条件で構築した.

2.4.1 次数分布

図 2.5 の (a), (b) にスケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3, 5, 7$) の次数分布を示す. また, (a) は両対数で, (b) は片対数で示す.

結果から, スケールフリーネットワークの次数分布は, べき乗則に従いスケールフリー性を持つことが分かる. 対して, 玉ねぎ状ネットワークはループサイズ l が 3, 5, 7 のいずれの場合でも指数分布に従う.

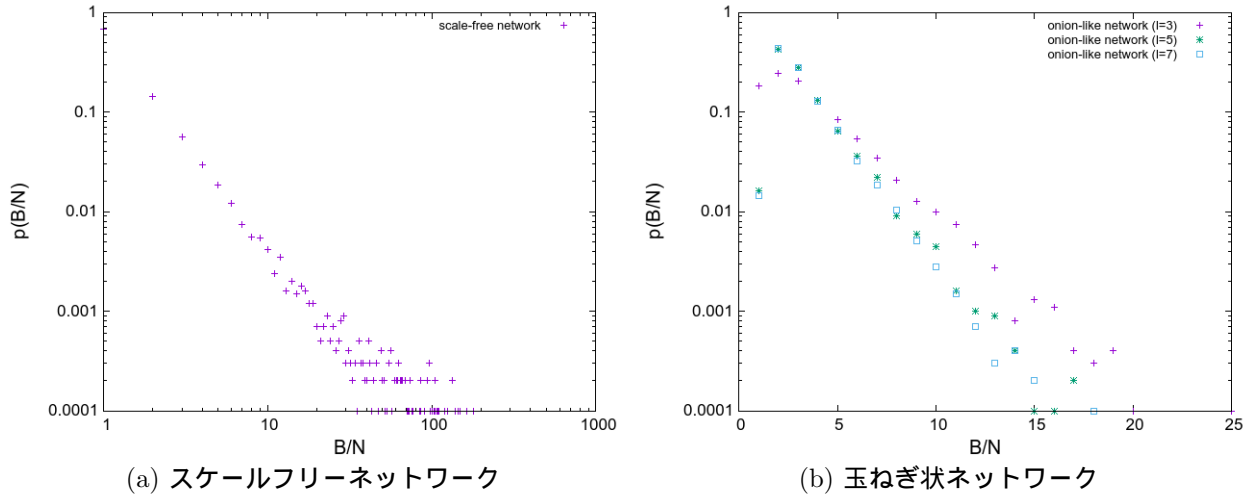


図 2.6: 媒介中心性分布の比較

表 2.1: 次数相関 r

ネットワーク	次数相関 r
スケールフリーネットワーク	-0.062843
玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3$)	0.395872
玉ねぎ状ネットワーク ($l = 5$)	0.361846
玉ねぎ状ネットワーク ($l = 7$)	0.343567

2.4.2 媒介中心性分布: ノード負荷の分布

図 2.6 の (a), (b) にスケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3, 5, 7$) の媒介中心性の分布を示す. また, (a) は両対数で, (b) は片対数で示す.

結果から, 次数分布の場合と同じく媒介中心性分布もスケールフリーネットワークではべき乗則に従い, 玉ねぎ状ネットワークではループサイズ l にかかわらず指数分布に従うことが確認できる. 媒介中心性はフローが常に最小ホップ経路を通る場合のノードの負荷として考えることができる. そのため, 媒介中心性の分布がべき乗則に従うということは, スケールフリーネットワークのノード負荷分布が非常に不均質であることを示す. このことはスケールフリーネットワークにおいてカスケード故障の被害が大きくなることと関係する.

2.4.3 次数相関

表 2.1 にスケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3, 5, 7$) の次数相関 r を示す.

スケールフリーネットワークでは次数相関 r がほぼ 0 になっている. 対して, 玉ねぎ状ネットワークではループサイズ $l = 3, 5, 7$ のいずれでも 0.3 以上になり, 玉ねぎ状ネットワークの重要な特徴である正の次数相関を持つことが分かる. また, ループサイズが大きくなるに従って次数相関 r は小さくなっている.

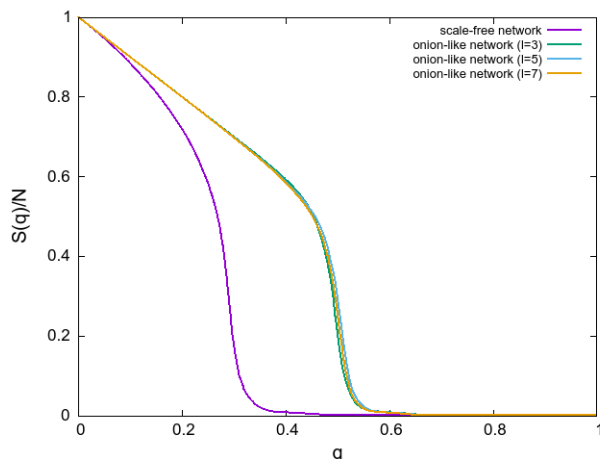


表 2.2: 頑健性 R

ネットワーク	頑健性 R
スケールフリーネットワーク	0.234154
玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3$)	0.371928
玉ねぎ状ネットワーク ($l = 5$)	0.375196
玉ねぎ状ネットワーク ($l = 7$)	0.372469

図 2.7: ノード除去率 q に対する最大連結成分比 $s(q)$ の変化

2.4.4 トポロジ的頑健性

本節の最後に、スケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3, 5, 7$) のトポロジ的頑健性を比較する。

ノード除去に対して連結性が維持できるとき、ネットワークは高いトポロジ的頑健性を持つと言える。そのため、ノード除去に対する最大連結成分の変化でネットワークの頑健性を評価することができる [2]。この方法では、ネットワークの頑健性 R は次の式で計算する。

$$R = \frac{1}{N} \sum_{q=1/N}^1 s(q) \quad (2.7)$$

ここで、 N はネットワークの初期ノード数で、 $s(q)$ はノード除去率が q の時の最大連結成分比 (初期ノード数 N に対する最大連結成分のノード数比) である。

図 2.7 に各ネットワークのノード除去率 q に対する最大連結成分比 $s(q)$ の変化を、表 2.2 に頑健性 R を示す。ここで、ノードは次数が大きい順に割合 q だけ除去している。

図 2.7 から BA モデルによるスケールフリーネットワークでは、ノード除去率が 0.4 の時に最大連結成分比がほぼ 0 になり、ネットワークがバラバラに分断されていることが確認できる。対してループモデルによる玉ねぎ状ネットワークではループサイズ $l = 3, 5, 7$ のいずれでもノード除去率が 0.6 で最大連結成分比がほぼ 0 になっている。頑健性 R の値を比較すると、玉ねぎ状ネットワークではループサイズ $l = 3, 5, 7$ のいずれにおいても約 0.37 になり、スケールフリーネットワークより約 60% 向上している。

第3章 カスケード故障

カスケード故障とは、災害や悪意のある攻撃によるネットワークの一部分の機能障害が周囲に伝播することで、大域的なネットワーク崩壊に繋がる現象である。電力崩壊、大渋滞、連鎖倒産など、巨大で複雑な現実のネットワーク上で引き起こされる現象であることから、研究はシミュレーションを中心として取り組まれ、そのモデル化が重要になる。ネットワークはリンクの向きや重みの有無など、それ自体の様々な状態を考えることができ、カスケード故障も数多くのプロセスが有り得る。そのため、カスケード故障のモデルは多岐に渡り、これまでに様々なモデルが提案されてきた。この章では、3.1 でカスケード故障の最も基本的なモデルを紹介し、3.2 で本研究におけるカスケード故障のモデルを説明する。

3.1 代表的なカスケード故障のモデル

代表的なモデルは、Motter らによって提案されたノード故障を基本とするモデルである(以後、ML モデルと呼ぶ)[3]。ML モデルでは、リンクの重みや許容負荷は考えず、ノードは故障すると事実上ネットワークから除去されるものと考え、また、各ノード i の負荷 L_i はフローが常に最小ホップ経路を通ると想定して媒介中心性で定義され、カスケード故障は1つのノード故障を引き金として発生する。ノードには処理できる負荷の最大値である許容負荷 C_i が予め割り当てられ、初期状態では全てのノードの負荷が許容負荷を下回るため安定している。しかし、一度ノード故障が発生すると、そこを通ることができなくなった任意の2ノード間の最小ホップ経路が変化するため、それに伴い各ノード i の負荷 L_i が変化する。このとき、もし次式の条件を満たしてノードの負荷 L_i が許容負荷 C_i を超えるならば、そのノードは過負荷故障を引き起こしたと考え、ネットワークから除去する。

$$L_i > C_i \quad (3.1)$$

この過負荷故障の発生は、さらにノード負荷分布の変化させるため、過負荷故障の連鎖を引き起こし大規模な被害に繋がる。

以上のモデル以外にも、通信効率をリンクの重みとして持つ無向グラフ上でのカスケード故障[12]や、ネットワークの成長に伴う負荷変化により引き起こされるカスケード故障をモデル化したもの[13]、ノードの故障ではなくリンクの故障を基本としたカスケード故障[14]など様々なモデルが提案されている。本研究では、Motter により提案されたノード除去によるカスケード故障のモデルをベースにシミュレーションを行う。

3.2 本研究で扱うカスケード故障のモデル

この節では、本研究で扱うスケード故障のモデルについて説明する。本モデルは ML モデルがベースであり、ノードの過負荷故障が基本になるため、ノードの負荷と許容負荷を定義する必要がある。また、引き金となる初期故障ノードによって引き起こされるカスケード故障の規模が大きく異なるため、その選び方も重要である。そこで、3.2.1 で負荷と許容負荷の定義方法について説明し、3.2.2 で初期故障ノードについて述べる。3.2.3 では、カスケード故障の被害の評価方法を説明し、3.2.4 では、説明したことを踏まえカスケード故障のプロセスを説明する。

3.2.1 負荷と許容負荷

ノードの負荷と許容負荷は次のように定義する。

負荷

ノードの負荷は 2.1 で説明したルーティング中心性により定義する。また、経路選択を最小ホップ経路に限定しない点で、ML モデルと異なる。

ルーティング中心性による負荷定義では、各ノードは自分自身を除くすべてのノードとエネルギーや情報の交換を対等に行うものと暗黙的に想定している。また、複数の経路が同時に選択された場合は、フローを経路の数だけ分配する。

許容負荷

許容負荷 C_i は、ノード i が中継できるフローの最大量であり、故障が起きる前の各ノードの初期負荷 $L_i(0)$ に比例した値で次式のように定義される。

$$C_i = (1 + \alpha)L_i(0), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.2)$$

ここで、 α は耐久性パラメータと呼ばれ、この値が大きいくほどノードが中継できるフローが増え、基本的には過負荷故障は発生しにくくなる。しかし、その分だけ多くのコストが必要になるため、なるべく小さくなる方が好ましい。また、 N はネットワークのノードの総数である。本研究では、式 (3.2) による許容負荷定義を基本としてシミュレーションを行う。しかし、提案手法が異なる方法で許容負荷を定義したとしても柔軟に効果を発揮できることを示すため、第 7 章では、式 (3.2) 以外の方法で許容負荷を定義した場合についても検討する。

3.2.2 初期故障ノード

カスケード故障は、予期しない事故やテロまたはハッキングなどの意図的な攻撃によってネットワークの一部が初期故障することが引き金となる。ノード除去によるカスケード故障のモデルでは、初期故障ノードを次のように想定することができる。

- 予期しない事故を想定： ランダムにノードを除去する
- 意図的な攻撃を想定： 次数が最も大きいノードを除去する
負荷が最も大きいノードを除去する

ランダムにノードを除去した場合では、次数や負荷が最大のノードを除去した時よりもカスケード故障の被害が小さくなる。そこで、本研究では特に、意図的な攻撃を想定した最大次数ノード除去時または、最大負荷ノード除去時についてシミュレーションを行う。また、本研究でのシミュレーションでは、基本的に1つのノード除去によりカスケード故障を引き起こすものとするが、第8章では複数のノード除去を引き金とした場合についても検討する。

3.2.3 評価

ノード除去によるカスケード故障の被害は単純に故障前後の最大連結成分比で評価できる。しかし、本研究で提案するカスケード故障の対策はルーティングによるものなので、ネットワークの経路長に関する効率への影響についても検討する必要がある。そこで、本研究では最大連結成分比に加えて、ネットワークの効率も評価する。最大連結成分比 G とネットワークの効率 E は以下のように計算する。

最大連結成分比 G

カスケード故障の被害規模は以下式で計算される故障前後の最大連結成分比 G で評価する。

$$G = \frac{N'}{N} \quad (3.3)$$

ここで、 N はカスケード故障前のノード数で、 N' はカスケード故障後の最大連結成分のノード数を示す。カスケード故障の被害が大きくなればそれだけ多くのノードが過負荷故障によりネットワークから取り除かれることになる。そのため、被害規模に応じて G は最大値である1から小さくなる。また、過負荷故障によるノード除去で、元々1つの連結成分だったネットワークが複数の連結成分に分断されることも考えられる。この場合も G の値は小さくなる。

ネットワークの効率 E

ネットワークの効率 E は全てのノードペア ij 間の効率 e_{ij} の平均で計算される。ある2つのノード ij 間の効率 e_{ij} はホップ数で測った距離の逆数 $1/d_{ij}$ で定義できる。ただし、ノード ij が非連結ならばその距離は無限大となり、効率の値は0となる。ネットワーク全体での平均効率 E は以下の式で計算する [15]。

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} e_{ij} \quad (3.4)$$

ここで N はネットワークのノード数である。カスケード故障によりネットワークが複数の連結成分に分断された場合や、ルーティングによってより多くの中継ノードが必要になった場合にはこの値は小さくなる。また、あるネットワークにおける E の値は、常に最小ホップ経路を選択する場合に最大になる。

3.2.4 シミュレーションのプロセス

カスケード故障のシミュレーションは基本的に以下のプロセスで実行する.

Step0: 各ノード i の許容負荷 C_i を定義する.

Step1: 初期故障ノード (最大負荷ノードまたは最大次数ノード) をネットワークから除去する.

Step2: 各ノード i の負荷 L_i を再計算する.

Step3: 負荷が許容負荷を超えたノードを過負荷故障したものとみなし除去する.

Step4: 除去するノードがなくなるまで Step2, Step3 を繰り返す.

Step5: カスケード故障の被害 G とネットワークの効率 E を評価する.

第4章 カスケード故障の対策

本章ではカスケード故障の対策について述べる。まず、4.1 で代表的な従来の対策をいくつか紹介し、4.2 で本研究で提案するノード負荷を考慮したルーティングによる対策及びモデル上でのシミュレーション方法を説明する。

4.1 従来の対策

4.1.1 生け贄的なノード除去による対策

あるノードによって生成される負荷が、そのノードが担っている負荷よりも大きいとき、そのノードはネットワーク全体にとっての負担になっている。カスケード故障の引き金となる初期のノード故障が発生した直後に、このような負担になるノード群を意図的に除去することでネットワーク全体の負担を軽減し、カスケード故障を抑制する方法が Motter らによって提案されている [4]。

ML モデル上でのシミュレーションにおいて、各ノード i によって生成される負荷 L_i^g は次式で計算される。

$$L_i^g = \sum_j (D_{ij} + 1) \quad (4.1)$$

ここで、 D_{ij} はノード ij 間の最小ホップ経路長である。ノード除去による対策では、ノードの負荷 L_i からノードにより生成される負荷 L_i^g を引いた値 $\Delta = L_i - L_i^g$ が小さい順に一定の割合 f だけノードを除去する操作 (intentional removals:IRs) により、残ったノードの負荷を軽減し過負荷を防ぐ。図 4.1 に $N = 100$, $m = 2$ のスケールフリーネットワークで、IRs によって除去されるノード (塗りつぶされているノード) を示す。 Δ と次数の間には正の相関があるため、IRs によって次数が小さいノードが順に除去される傾向がある。次数が最も小さいノードが順に除去されたとしても、残ったノード間の連結性は失われないことから、IRs 自体によってネットワークが分断されることはない。また、ノードではなくリンク除去によっても同様の方法で、カスケード故障を抑制することができる。

この方法は、カスケード故障の引き金となるノード故障を直ちに検知でき、同時に過負荷故障が広がる前に、除去すべきノードの決定とノード除去を実行できる場合では有効である。しかし、被害を抑制するために除去しなければならない生け贄となるノードは数割程度であるとしても、現実の巨大なネットワーク上で瞬時に除去を実現できるかについて疑問が残る。また、被害を抑制するために決して少なくない数のノードの犠牲が必要になることは大いに問題である。

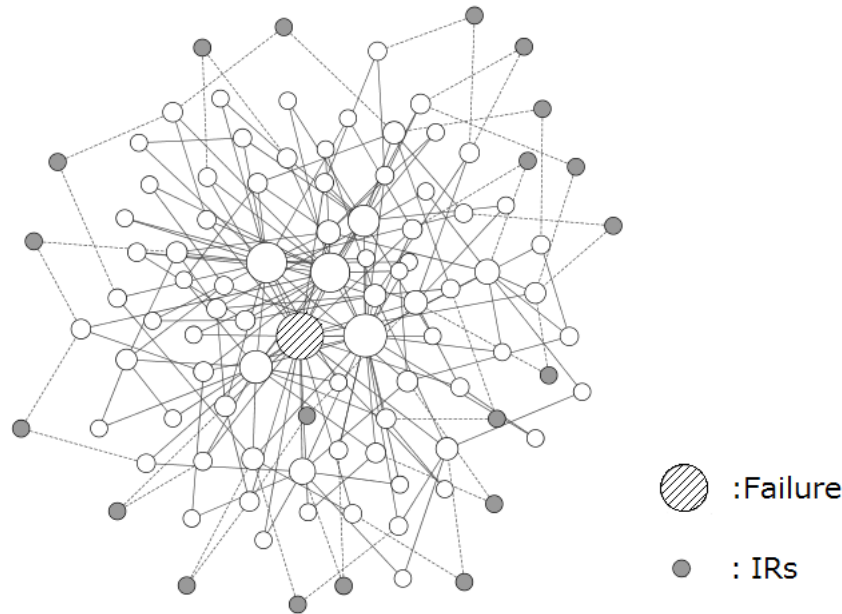


図 4.1: 生け贄的なノード除去による対策

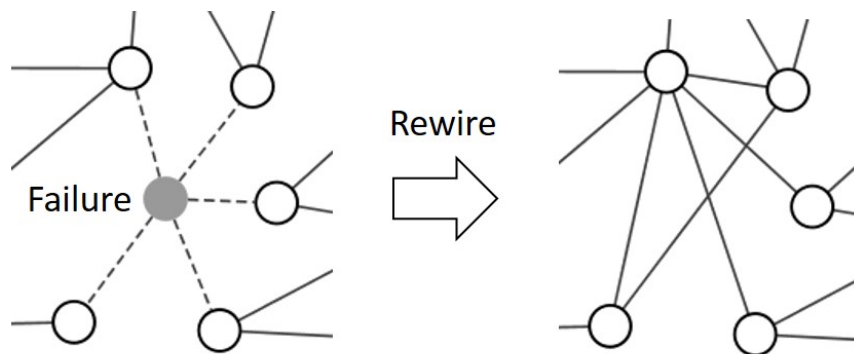


図 4.2: リンクの繋ぎ換えによる対策

4.1.2 リンクの繋ぎ換えによる対策

カスケード故障は、初期故障ノードの発生によってネットワーク上のフロー経路が変化することにより引き起こされる。そこで、図 4.2 の様に、初期故障ノードに隣接しているノード間にバイパス的な代替リンクを繋ぎ換えにより構築することで、フローの変化を最小限に食い止め、カスケード故障を抑制することができると考えられる。Hayashi らは様々なリンク繋ぎ換え方法を、複数の異なる次数相関を持つネットワークに対して適用し、カスケード故障の被害の抑制効果を検討した [5]。この研究により、リンク繋ぎ換えによる対策では、耐久性パラメータの値が大きく各ノードにある程度余裕がある場合に、カスケード故障を大きく抑制できることが示されている。リンク繋ぎ換えによる対策の利点として、ノード除去を必要としないことと、各ノードが保持する局所的な情報のみで実行することができることが挙げられる。その一方で、初期故障ノード発生後に速やかなリンクの繋ぎ換えが必要になるため、ケーブルなどによって物理的に連結されているネットワークに対しては適用が困難である。この方法は無線通信など繋ぎ換えが容易なネットワークに限り適用が可能である。

4.1.3 次数を考慮したルーティングによる対策

研究背景で述べたように大規模なカスケード故障は、ノード負荷分布が不均質で、なおかつ引き金となるノードの負荷が大きい時に引き起こされる。この点に注目すると、ノード負荷分布を均質化することでカスケード故障の被害を抑制できると考えられる。ノード負荷分布はネットワーク構造に強く依存し、スケールフリーネットワークのような不均質な次数分布を持つネットワークでは、高い次数を持つノードに負荷が集中する。これは、任意の2ノード間のフローを考えたとき、高次数ノードを経由した方が、より少ない中継ノード数ですむことが多いためである。そのため、もしフローが従来想定されてきたような最小ホップ経路を通るのではなく、中継するノードの次数を考慮した経路を通るならば、不均質な次数分布を持つネットワークにおいても、ノードの負荷分布をある程度均質にすることができる。

Zhao らは次数を考慮したルーティングによってカスケード故障を抑制する方法を提案した [6]。この方法では、フローが経路に含まれる中継ノードの次数の合計がなるべく小さくなるような経路を通るようにルーティングする。次数の合計が小さい経路を選択することで、高次数ノードへの負荷集中を防ぎカスケード故障の被害を抑制することができる。ただし、単純に次数の合計が最小になる経路を選択すると、中継ノードの数が増えてネットワークの効率が大幅に低下するため、Zhao らは、経路長も考慮されるように次のように経路を選択することを提案している。

ノード s から t へのフローは、通り得る経路 $P(s \rightarrow t) := s \equiv x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n \equiv t$ の内、次式で計算される $W(P(s \rightarrow t) : q)$ が最小になる経路を通る。

$$W(P(s \rightarrow t) : q) = \sum_{i=0}^{n-1} (1 - q + qk(x_i)/k_{max}) \quad (4.2)$$

ここで $k(x_i)$ はノード i の次数、 k_{max} はネットワークの最大次数、 $0 \leq q \leq 1$ はパラメータである。このパラメータ q によってルーティングの際に経路長、次数のどちらを重視するかを調整できる。パラメータ q が 0 の時は常に最小ホップ距離が選択される場合であり、 q が 1 の時は次数の合計が最小になる経路が選択される場合である。

この方法は、ノードの切り捨てや接続繋ぎ変えなどの初期故障発生後の処理が必要なく、初期故障ノードの検出も不要になる。しかし、許容負荷を式 (4.2) に従った経路選択による初期負荷で定義することが前提であり、例えば許容負荷を最小ホップ経路選択による初期負荷 (= 媒介中心性) で定義したネットワークに対して適用したとしても、カスケード故障の抑制効果は期待できないことを、6.2 に後に示す。

4.2 提案する対策

4.2.1 ノード負荷を考慮したルーティングによる対策

カスケード故障が発生する原因は、変化するフロー経路によってノードの負荷が許容負荷を超えてしまう程に増加し過負荷故障を引き起こすためである。しかし、初期故障ノード発生後に、全てのノードが過負荷になるわけではなく、余裕を残すノードも存在する。この点に着目すると、余裕があるノードを有効活用することでカスケード故障の被害を抑制できると考えられる。つまり、ネットワーク全体で各ノードの許容負荷に応じた形で負荷を分かち合うことにより、本来なら負荷が集中するノードの負荷を軽減し、過負荷故障の発生を抑制する。その結果、過負荷故障の連鎖を食い止めカスケード故障の被害を抑制できる。

以上を実現する方法として、余裕が無いノードは迂回して余裕があるノードを通るように経路を選択するような、ノード負荷を考慮したルーティングによる方法が考えられる。この方法では、過負荷故障が起こりそうなノードが発生したとしても、迂回できる他のノードに余裕がある限り過負荷故障は引き起こされない。このことから、平均次数が極端に小さく迂回できるノードがほとんど無いようなネットワークや許容負荷が極端に小さく設計されたネットワークでなければ、本手法の適用によりカスケード故障の被害の抑制効果が期待できる。本研究では、このノード負荷を考慮したルーティングによる対策を、カスケード故障に対する新たな対策として提案する。

提案手法の利点と欠点を以下にまとめる。

利点

- 次数のようなネットワーク構造に依存する静的な指標を必要としないため、ネットワークの構造や、許容負荷分布に対して柔軟に適用できる。
- ノード切り捨てや、リンク繋ぎ変えが必要ない。

欠点

- ルーティングが必要なため、フロー経路をある程度コントロールできる必要がある。特にシミュレーションでは問題とならないが、現実の通信網などにおける分散処理として迅速にどのようにコントロールするかについては今後の課題とする。

4.2.2 シミュレーション方法

提案手法の効果を調べるためのシミュレーションでは、ノード負荷を考慮した経路選択と、ノード負荷計算を次の通りを行う。

経路選択

ある時刻 T におけるノードの余裕の無さはそのノード i の負荷率 $L_i(T)/C_i$ で評価し、経路に含まれる中継ノードのノード負荷率の合計がなるべく小さくなるような経路を選択する。つまり、ある時刻 T におけるノード s から t へのフローは、通り得る経路 $P(s \rightarrow t) := s \equiv x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n \equiv t$ の中で、次式で計算される重み $W(P(s \rightarrow t) : T)$ が最小になる経路を通る。

$$W(P(s \rightarrow t) : T) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 + \frac{L_{x_i}(T)}{C_{x_i}}\right) \quad (4.3)$$

また、各ノードの負荷はフローを中継するたびに次式のように更新する。

$$L_{x_i}(T) = L_{x_i}(T-1) + \frac{\sigma_{st}(x_i)}{\sigma_{st}} \quad (4.4)$$

ここで、 σ_{st} は始点ノード s から終点ノード t への経路の数で、 $\sigma_{st}(x_i)$ はその経路の中でノード x_i を含む経路の数である。

負荷計算

本手法はノード負荷を用いてルーティングを行うため、各ノードの負荷はフローを中継するたびに動的に更新する必要がある。そのため、シミュレーションにおいては、3.2.4 で示したシミュレーションプロセスの負荷計算 (Step2) の過程で、以下の手順を実行する。

Step0: 各ノード i の負荷 L_i を 0 に初期化する。

Step1: まだ選択されたことのない始点ノード s と終点ノード t のペアをランダムに選び、式 (4.1) で選択される経路でフローを流す。

Step2: フローを中継したノードの負荷を式 (4.2) の通り更新する。

Step3: すべての st ペアが選択されるまで Step1, Step2 を繰り返す。

またシミュレーションにおいては、ルーティングに許容負荷の値を使うため許容負荷を定義するための初期負荷の計算に本手法は使えない。そのため、許容負荷は他のルーティング基準による初期負荷をもとに定義する。本研究では、特に言及しない限りは媒介中心性をもとに許容負荷を定義する。

第5章 負荷ルーティングのシミュレーション結果

本章では、4.2 で説明したノード負荷を考慮した迂回ルーティング (以後、負荷ルーティングと呼ぶ) を適用したカスケード故障のシミュレーション結果を示し、被害の抑制効果の確認と結果を分析を行う。5.1 で BA モデルで構築したスケールフリーネットワークに対する結果と分析を、5.2 でループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワークに対する結果と分析について述べる。

5.1 スケールフリーネットワークにおけるシミュレーション

5.1.1 シミュレーション結果

ノード数 $N = 1000$, $m = 4$ の BA モデルで構築したスケールフリーネットワークにおけるカスケード故障のシミュレーションを行い、負荷ルーティングを適用した場合 (load based routing) と、対策なしの場合 (shortest-path based routing) で結果を比較した。また、対策なしではフローが常に最小ホップ経路を通ることを想定している。カスケード故障の引き金となる初期故障ノードは最大次数ノードを選択した場合 (hub) と最大負荷ノードを選択した場合 (load) である。図 5.1 に耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワーク効率 E の変化を示す。 α は 0.0 から 1.0 まで 0.1 間隔で変化させている。また、結果は 10 個のネットワークの平均値である。

図 5.1 から、耐久性パラメータ α を大きくするに従って、負荷ルーティング適用時と対策なしのいずれにおいても、最大連結成分比 G が大きくなり、カスケード故障の被害が小さくなることを確認できる。これは、耐久性パラメータを大きくすることで各ノードの許容負荷が大きくなり過負荷故障の発生が抑制されるためである。また、最大連結成分比の結果を、負荷ルーティングを適用した場合と、対策なしの場合で比較すると、耐久性パラメータが 0 の時を除いて常に負荷ルーティングの方が値が大きくなっている。このことは、ノードの過負荷故障が抑制されたことを示し、負荷ルーティングを適用することによってカスケード故障の被害が抑制できていることが確認できる。また、負荷ルーティングを適用した場合は、耐久性パラメータが 0.2 以上の時で最大連結成分比の値がほぼ 1 になり、ある程度ノードに余裕をもたせればカスケード故障がほとんど引き起こされていないことが分かる。さらに、ネットワークの効率 E の値が対策なしの場合と比べて、ほとんど低下していないことが確認できる。つまり、負荷ルーティングを適用することによってエネルギーやパケットなどの輸送効率が犠牲にならない。次に、初期故障ノードによる結果の違いを比較すると、最大次数ノードの場合と最大負荷ノードの場合で結果がほとんど同じになっていることが確認できる。これは、シミュレーションを行ったネットワークで最大次数ノードと最大負荷ノードが一致したためである。

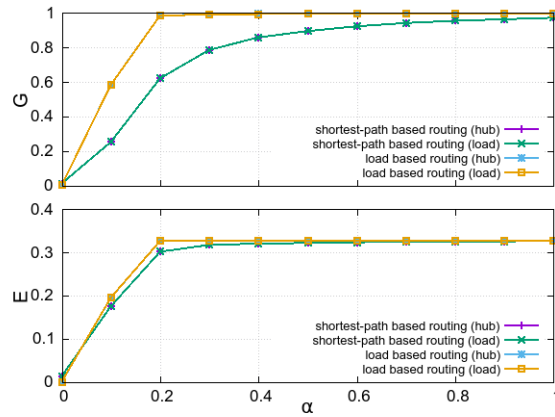


図 5.1: スケールフリーネットワークにおける耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワークの効率 E

5.1.2 結果の分析

負荷分散効果の確認

負荷ルーティングでは、余裕が無いノードを迂回して、余裕があるノードを通るようにルーティングすることで負荷を分散させ、過負荷故障ノード発生抑制を狙っている。そこで、ここでは負荷ルーティングによる負荷分散効果を確認する。図 5.2 に、初期故障ノード (最大負荷ノード) 除去後のノード負荷率 L/C の分布を、負荷ルーティング適用時と対策なしで比較したものを示す。また、耐久性パラメータ α は 0.5 の時である。

図 5.2 から、対策なしの場合では、ノードごとに負荷率が広く分散していることが確認できる。ノードごとに負荷率が分散した結果、約 10% のノードが負荷率 1 を超え過負荷状態になっている一方で、ノード負荷率が 0.5 以下の多くの余裕を残しているノードは全体の約 7% 存在する。対して、負荷ルーティングを適用した場合での分布では、ノード負荷率が約 0.7 の時に鋭い分布のピークを確認でき、ほとんどのノードの負荷率がほぼ同じ値になっていることが分かる。負荷率が分布のピーク値から、外れたノードもわずかに発生しているが、過負荷状態のノードは約 0.3% であり、対策なしの場合に比べて大きく減少している。

以上より、負荷ルーティングにはノードの負荷を許容負荷に応じて分散化し、各ノードの負荷率を均質にする効果があることが確認できた。この効果により、本来なら迂回フローによる負荷増加によって過負荷故障を引き起こしてしまうノードであっても、余裕があるノードに負荷を肩代わりさせることで負荷を軽減し、過負荷を防ぐことができる。過負荷を抑えることができれば、過負荷故障の連鎖を食い止めることができるため、カスケード故障の抑制につながったと考えられる。

耐久性パラメータに対するノード負荷率分布の変化

耐久性パラメータ α が小さい時に負荷ルーティングを適用した場合でも大規模な被害が発生している。この理由を明らかにするため、耐久性パラメータを変化させた時のノード負荷率 L/C 分布の変化を調べた。図 5.3 を見ると、耐久性パラメータの値を小さくしたとしてもほとんどのノードの負荷率がほぼ同じ値になり、負荷分散効果は耐久性パラメータの変化によって大きな影響を受けないことが分かる。しかし、分布のピーク位値に注目すると、耐久性パラメータの値が小さくなるに従って、徐々に右にシフトしていることが

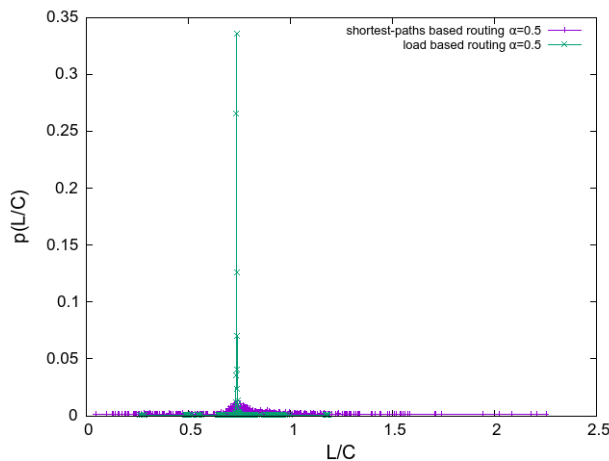


図 5.2: 対策なし及び負荷ルーティング適用時のノード負荷率分布の比較 (スケールフリーネットワーク)

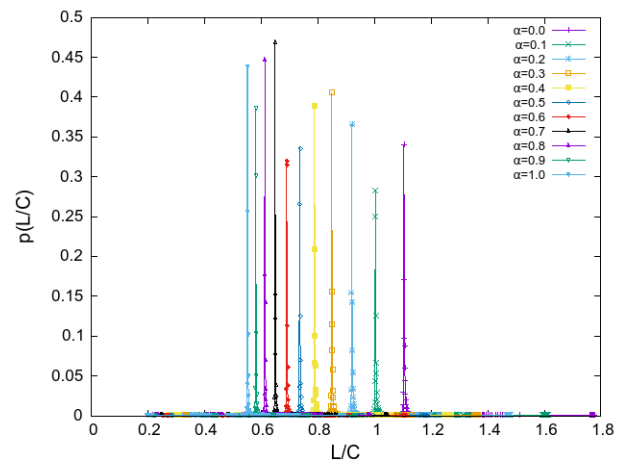


図 5.3: 負荷ルーティング適用時の耐久性パラメータ α ごとのノード負荷率分布 (スケールフリーネットワーク)

確認できる。耐久性パラメータの値が小さいと、各ノードに与えられる余裕は少なくなりネットワーク全体として活用できる負荷の許容量も少なくなる。つまり、ピーク位置のシフトはネットワーク全体としての余裕がなくなっていくことを示している。特に、耐久性パラメータが 0.0, 0.1 の時の分布に注目すると、ピーク位置がノード負荷率 1 以上に位置し、ほとんどのノードで過負荷状態になっていることが確認できる。負荷ルーティングでは負荷分散効果により、ネットワーク全体で故障ノード発生によって増加する負荷を吸収する。しかし、耐久性パラメータの値が小さくネットワーク全体でそもそも余裕があまり無い場合や、故障ノード発生によって増加する負荷が大きすぎる場合では、増加負荷を吸収しきれずカスケード故障が発生する。またその際は、ノード負荷率を均質化する負荷分散効果によりほとんどのノードが過負荷状態に陥る。しかし、耐久性パラメータの値を大きくし、ネットワーク全体で故障ノード発生による増加負荷を吸収できるだけの余裕をもたせれば、過負荷故障の発生を大幅に減らし、被害をほとんど発生させない。

カスケード伝播回数

カスケード故障では、負荷変化を引き起こす故障ノードの発生と、負荷変化による故障ノードの発生が連鎖的に繰り返されることで過負荷故障が伝播しノードの故障が広がる。負荷ルーティングでは、負荷分散効果により過負荷故障を抑制できるため、カスケード故障における過負荷の伝播回数は減少すると考えられる。そこで、負荷ルーティングによるカスケード伝播の抑制を確認するため、耐久性パラメータごとのカスケードの伝播回数を調べた。また、故障ノード(群)の発生から、結果引き起こされる負荷変動による故障ノード(群)の発生を 1 回のカスケード伝播としてカウントする。

負荷ルーティングを適用した場合と対策なしの場合のカスケード伝播回数の比較を図 5.4 に示す。結果は初期故障ノードとして最大次数ノードまたは最大負荷ノードを除去した場合で、10 個のネットワークの平均値である。

図 5.4 から、負荷ルーティングを適用した場合では対策なしの場合に対し、全体的にカスケードの伝播回数が大きく減少していることが分かる。対策なしでは耐久性パラメータが 0.1 以上で伝播回数 4 回から 3 回程度であるが、負荷ルーティングを適用した場合では、ほとんどのケースで 1 回以下で最も多く伝播した時でも 2 回に留まる。この、負荷ルーティングを適用した際の伝播回数の減少は、耐久性パラメータによって異なる理由によるもの

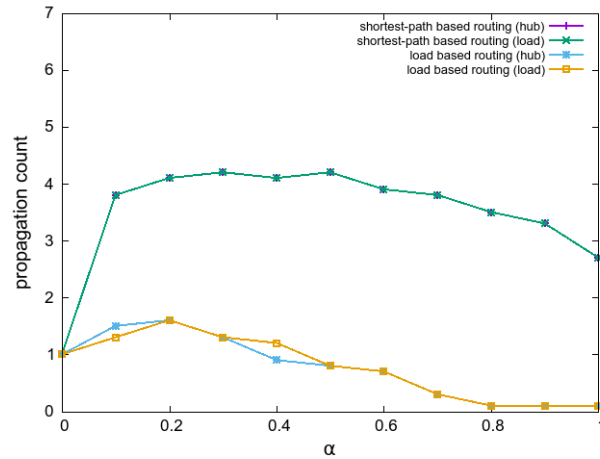


図 5.4: カスケード伝播回数 (スケールフリーネットワーク)

と考えられる。耐久性パラメータが小さく、負荷率分布のピーク位置が1を超える場合には、最初にほとんど全てのノードが過負荷故障を引き起こすため、伝播回数が小さくなる。逆に耐久性パラメータが大きく被害がほとんど発生していない時には、負荷分散効果により過負荷故障がほぼ発生しないため、伝播回数が小さくなる。また、耐久性パラメータの値が大きくなるに従って負荷ルーティング適用時にわずかに発生する過負荷故障ノードは減少するため、伝播回数は少なくなる。初期故障ノード違いによる伝播回数への影響はほとんど見られない。

ネットワークの効率 E が低下しない理由

負荷ルーティングの適用によってネットワークの効率 E がほとんど低下していないことが確認できた。ここでは、その具体的な理由について検討する。

ネットワークの効率は、フローを任意の2ノード間で流した時により多くの中継ノードを必要とするときに低下し、常に最小ホップ経路を通る場合で最大になる。そこで、負荷ルーティングを適用した場合に、どの程度最小ホップ経路が選択されるかを調べた。表5.1に初期故障ノード発生後において全経路中で最小ホップ経路が選択された割合を、耐久性パラメータごとに示す。また、2ノード間で複数の経路が選択された場合もそれぞれ1つの経路としてカウントしている。

表5.1から、最小ホップ経路が選択される割合が約0.945と高いことが分かる。また、耐久性パラメータの値によって割合はほとんど変わらない。この結果から、負荷ルーティングの適用によってネットワークの効率が低下しない理由は、フローを流す経路として最小ホップ経路が選択されやすいためであると考えられる。

重みが最小になる経路が選択される場合、中継ノード数が最小ホップ経路より1つでも多い経路は、そのノードの重みにより選択されにくくなる。そしてその傾向は、ネットワーク中のノードの重みの値が近ければより強まる。なぜなら、ノードの重みが均質ならば、中継ノード数が最小ホップ経路より多い経路のノードの重みの合計が、最小ホップ経路のノードの重みの合計を下回りにくくなるためである。負荷ルーティングでは負荷分散効果により各ノードの負荷率が均質になるため、ある時刻における2ノード間の経路選択のためのノードの重み $(1 + L/C)$ の値も近くなる傾向があると考えられ、その場合2ノード間の経路として、最小ホップ経路の中から選択されることが多くなると考えられる。また、対策なしの常に最小ホップ経路を選択する場合とは、複数の最小ホップ経路が存在するときの経路選択の方法が異なる。対策なしの場合では複数の最小ホップ経路が存在するときに均等

表 5.1: 全経路中で最小ホップ経路が選択された割合 (スケールフリーネットワーク)

耐久性パラメータ α	最小ホップ経路率
0.0	0.94506
0.1	0.94506
0.2	0.94507
0.3	0.94506
0.4	0.94506
0.5	0.94507
0.6	0.94507
0.7	0.94506
0.8	0.94506
0.9	0.94507
1.0	0.94507

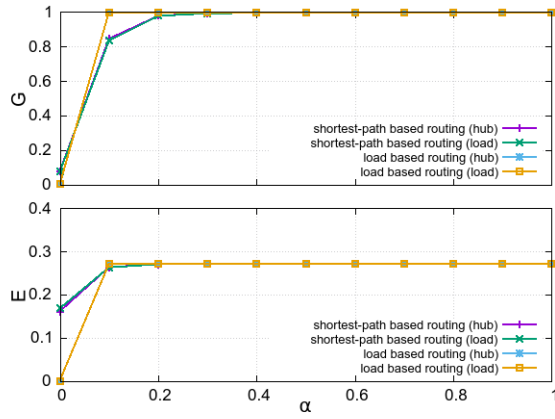
な確率で1つの経路が選択されるか均等にフローを分割する. その一方で, 負荷ルーティングでは, 複数の最小ホップ経路の中で, 最も余裕がある経路を選択する.

5.2 玉ねぎ状ネットワークにおけるシミュレーション

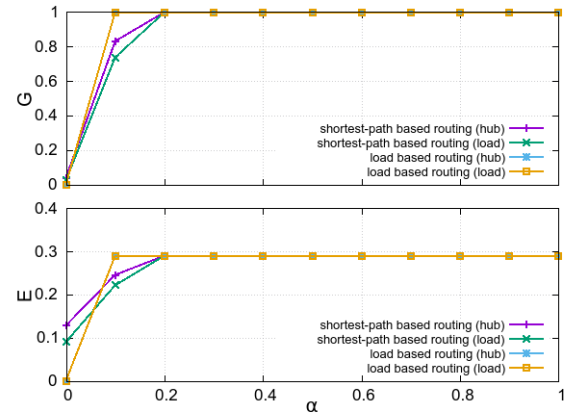
5.2.1 シミュレーション結果

スケールフリーネットワークの時と同じく, ループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワークにおいてカスケード故障のシミュレーションを行い, 負荷ルーティングを適用した場合 (load based routing) と, 対策なしの場合 (shortest-path based routing) で結果を比較した. カスケード故障の引き金となる初期故障ノードは最大次数ノードを選択した場合 (hub) と最大負荷ノードを選択した場合 (load) である. また, ノード数は $N = 1000$, $m = 4$ でスケールフリーネットワークの時と同じである. 図 5.5 にループモデルにおけるループサイズ $l = 3, 5, 7$ として構築した玉ねぎ状ネットワークにおける耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワーク効率 E を示す. 耐久性パラメータは 0.0 から 1.0 まで 0.1 間隔で変化させている. また, 結果は 10 個のネットワークの平均値である.

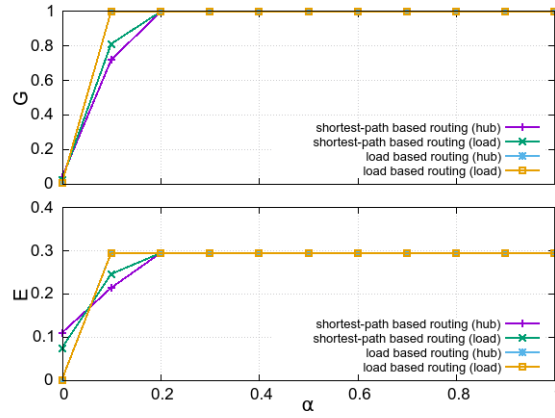
いずれの結果でも, 最大連結成分比 G は対策なしの場合でさえ耐久性パラメータが 0.3 以上でほぼ 1 になっていることが確認でき, ループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワークは, スケールフリーネットワークより大規模なカスケード故障が発生しにくいことが分かる. 次に, (a), (b), (c) それぞれの結果で負荷ルーティング適用時と対策なしの結果を比較すると, いずれの場合でも耐久性パラメータ α が 0.1 以上で負荷ルーティング適用時に最大連結成分比 G が大きくなる. この結果から, 負荷ルーティングは玉ねぎ状ネットワークにおいてもカスケード故障の被害を抑制する効果があることが確認できる. また, ネットワークの効率 E の結果からループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワークにおいても負荷ルーティングによってネットワークの効率をほとんど低下させないことが確認できる. 初期故障源による結果の違いを比較すると, 対策なしの場合で僅かに差が見られるが, 全体としてはほぼ同じである.



(a) $l = 3$



(b) $l = 5$



(c) $l = 7$

図 5.5: 玉ねぎ状ネットワークにおける耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワークの効率 E

5.2.2 結果の分析

負荷分散効果の確認

図 5.6 に, 初期故障ノード (最大負荷ノード) 除去後のノード負荷率 L/C の分布を, 負荷ルーティング適用時と対策なしで比較したものを示す ($l = 5$ のとき). また, 耐久性パラメータ α は 0.5 の時である.

図 5.6 から, 対策なしの場合では, ノードごとに負荷率が分散しているのに対して, 負荷ルーティング適用時はほとんどのノードの負荷率が約 0.67 になり高い負荷分散効果が確認できる. この負荷分散効果により過負荷故障の発生を抑制し, 玉ねぎ状ネットワークにおけるカスケード故障の被害を抑制したと考えられる. また, スケールフリーネットワークの時と比較すると, 対策なしと負荷ルーティング適用時のいずれにおいてもノード負荷率が比較的均質である.

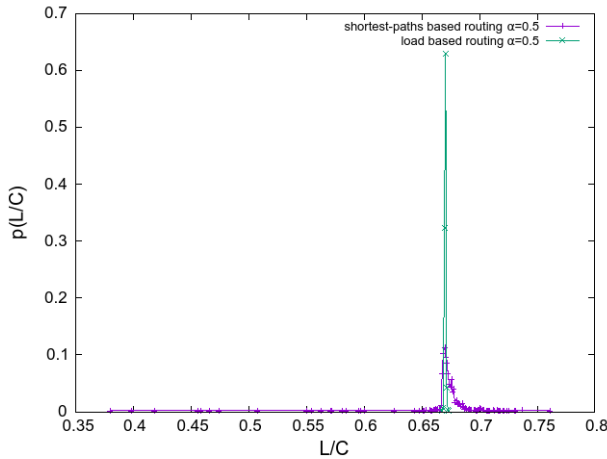


図 5.6: 対策なし及び負荷ルーティング適用時のノード負荷率分布の比較 (玉ねぎ状ネットワーク $l = 5$)

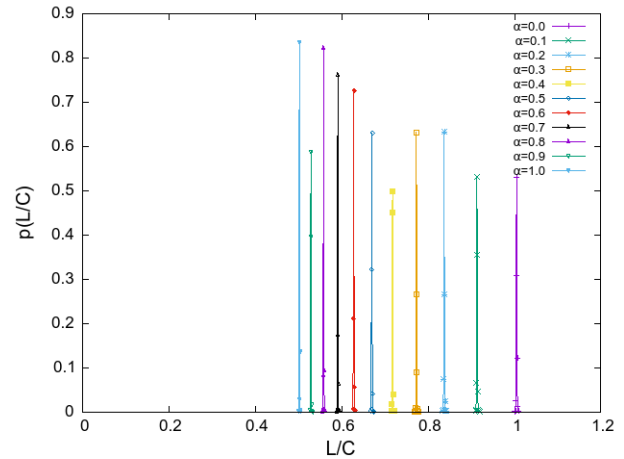


図 5.7: 負荷ルーティング適用時の耐久性パラメータ α ごとのノード負荷率分布 (玉ねぎ状ネットワーク $l = 5$)

耐久性パラメータに対するノード負荷率分布の変化

図 5.7 に耐久性パラメータ α を変化させた時の、負荷ルーティングを適用した場合におけるノード負荷率 L/C 分布の変化を示す ($l = 5$ のとき). スケールフリーネットワークの時と同じく、耐久性パラメータの値を小さくしたとしても全てのノードの負荷率がほぼ同じ値になり負荷分散効果は失われていない. また、耐久性パラメータを小さくするに従って分布のピークは徐々に右にシフトしていることも確認できる. 分布のピークは耐久性パラメータが 0.1 のときに 1 より小さくなる.

カスケード伝播回数

図 5.8 に負荷ルーティング適用時と対策なし時でカスケード伝播回数の比較を示す ($l = 5$ のとき). また、結果は初期故障ノードとして最大次数ノードまたは最大負荷ノードを除去した場合で、10 個のネットワークの平均値である.

対策なしでは、耐久性パラメータが 0.1 のときに伝播回数が最大次数ノード除去時で 6 回、最大負荷ノード除去時で 8 回程度まで大きくなっている. 対して負荷ルーティングを適用時では、初期故障ノードがいずれの場合でも、耐久性パラメータが 0.0 のときに 1 回伝播しているのみで、耐久性パラメータが 0.1 以上では伝播回数が 0 になっている. 耐久性パラメータが 0.0 のときでは、負荷分散効果により最初にほとんど全てのノードが過負荷故障を引き起こすため、1 回だけ伝播が起こるが、耐久性パラメータが 0.1 以上では、負荷分散効果により過負荷故障が完全に抑制されるため伝播回数が 0 になると考えられる. また、ループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワークではそもそもカスケード故障が大規模にならないため、対策なしの時でも耐久性パラメータが 0.3 以上でカスケード伝播が引き起こされていない.

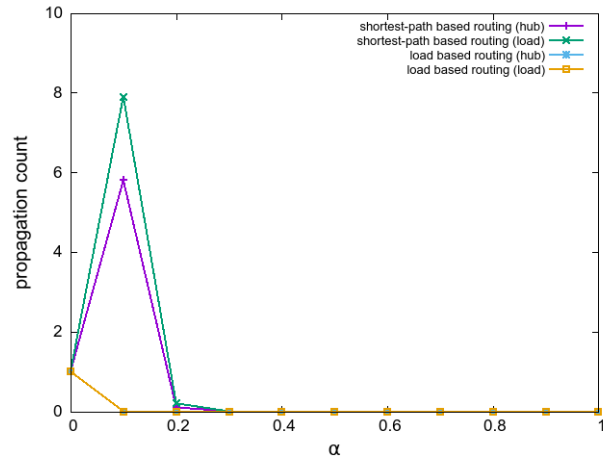


図 5.8: カスケード伝播回数 (玉ねぎ状ネットワーク $l = 5$)

表 5.2: 全経路中で最小ホップ経路が選択された割合 (玉ねぎ状ネットワーク)

耐久性パラメータ α	最小ホップ経路率		
	$l = 3$	$l = 5$	$l = 7$
0.0	0.99284	0.99527	0.9952
0.1	0.99284	0.99526	0.9952
0.2	0.99284	0.99527	0.9952
0.3	0.99283	0.99526	0.9952
0.4	0.99284	0.99526	0.9952
0.5	0.99284	0.99526	0.9952
0.6	0.99284	0.99526	0.9952
0.7	0.99284	0.99526	0.9952
0.8	0.99284	0.99526	0.9952
0.9	0.99284	0.99526	0.9952
1.0	0.99284	0.99526	0.9952

ネットワークの効率 E が低下しない理由

玉ねぎ状構造においても負荷ルーティングの適用によってネットワークの効率が低下していない。これは、スケールフリーネットワークの場合と同じく、経路として最小ホップ経路が選択されることが多いためである。表 5.2 に全経路中で最小ホップ経路が選択された割合を、耐久性パラメータごとに示す。

表 5.2 から、いずれのネットワークにおいても、耐久性パラメータの値にかかわらず最小ホップ経路が選択される割合が 0.99 以上になり、ほとんどの場合で最小ホップ経路が選択されていることが分かる。

第6章 従来の対策との比較

本章では、従来の対策と提案する負荷ルーティングのシミュレーション結果を比較する。6.1でノード除去による対策、6.2で次数を考慮したルーティングによる対策（以後、次数ルーティングと呼ぶ）との比較について述べる。また、シミュレーションを行うネットワークはノード数 $N = 1000$, $m = 4$ のスケールフリーネットワークと、玉ねぎ状ネットワーク（ループサイズ $l = 3, 5, 7$ ）である。ここで示す結果は、カスケード故障は最大負荷ノード除去を引き金とした場合であり、10個のネットワークの平均値である。

6.1 ノード除去による対策との比較

ノード除去率 $f = 0.1, 0.2$ としたノード除去による対策 (intentional removals) を適用した場合と、負荷ルーティングを適用した場合 (load based routing), および対策なし場合 (shortest-path based routing) で耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワークの効率 E を比較する。6.1.1でスケールフリーネットワークに対する結果を、6.1.2で玉ねぎ状ネットワークに対する結果を述べる。

6.1.1 スケールフリーネットワークにおける結果

スケールフリーネットワークにおける各結果の比較を図 6.1 に示す。

最大連結成分比 G の結果から、ノード除去による対策では、 $f = 0.1, 0.2$ のいずれにおいても耐久性パラメータの値が 0.1 以下で負荷ルーティング適用時よりカスケード故障の被害を抑制できていることが確認できる。しかし、耐久性パラメータを大きくしても、最大連結成分比はそれほど大きくならず、耐久性パラメータが 0.2 以上で負荷ルーティング適用時の値を下回っている。

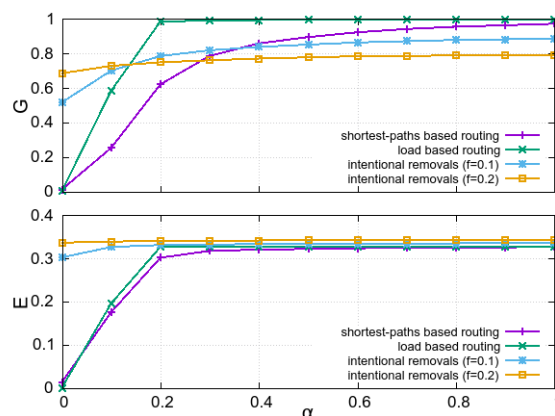


図 6.1: ノード除去による対策との比較 (スケールフリーネットワーク)

ノード除去による対策では、負荷の生成が負荷の処理より大きいノードを一定の割合だけ除去する操作 (IRS) によってネットワーク全体の負荷を減らし、過負荷ノードの発生を抑制している。そのため、例えば耐久性パラメータが 0 でノードに余裕を全く与えない場合でも、もしも十分に負荷を減らせるのであればカスケード故障の被害をある程度抑制することができると思われる。しかし、ノードを切り捨てる必要があるため、耐久性パラメータを大きくしたとしても故障後の連結成分比は $1 - f$ 以上には大きくならない。対して、負荷ルーティングでは、負荷を減らすのではなく、負荷を分散させることで、過負荷故障を防いでいる。そのため、耐久性パラメータが小さく設定され、ネットワーク全体で増加負荷を吸収するだけの余裕が無い場合ではカスケード故障を抑制できない。しかし、耐久性パラメータを一定以上大きくし十分な余裕を与えれば、過負荷故障の発生を大幅に減らすことができる。

また、ノード除去による対策のネットワークの効率 E に注目すると、低下しないか、むしろ少し上がることが確認できる。これは、除去されるノードとして、任意のノードからの平均ホップ距離が大きいノードが選択される傾向があるため、ノード除去後にノード間の平均経路長が小さくなったためであると考えられる。

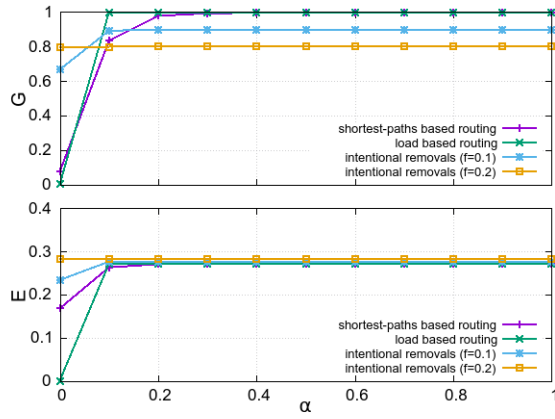
6.1.2 玉ねぎ状ネットワークにおける結果

玉ねぎ状ネットワークにおける各結果の比較を図 6.2 に示す。

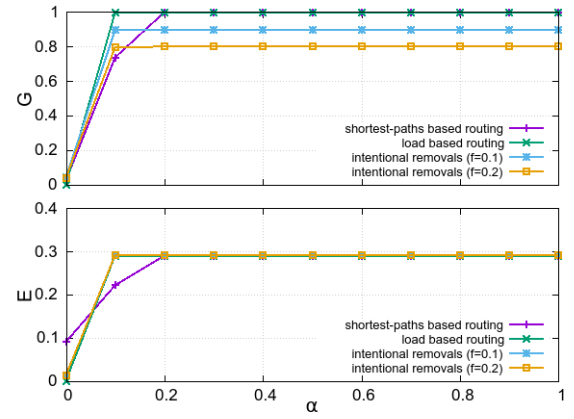
ノード除去による対策では、いずれの結果においても耐久性パラメータが 0.1 以上で最大連結成分比 G が $1 - f$ で頭打ちになっていることが確認できる。また、耐久性パラメータが 0 の時の最大連結成分比に注目すると、 $l = 3$ の時に被害の抑制効果が確認できるが、 $l = 5, 7$ の時ではノード除去率を 0.2 と大きくした場合でも、最大連結成分比が 0.1 以下になり大きな被害が発生している。対して、負荷ルーティング適用時では、いずれの結果においても耐久性パラメータが 0.1 以上で、被害をほとんど発生させていない。

スケールフリーネットワークでは、ノード除去による対策を適用することにより、耐久性パラメータが小さい時に被害を抑制できた。しかし、ループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワークにおいては、ノード除去による対策を適用したとしても必ずしも耐久性パラメータが小さい時に被害を抑制できるわけではないことが分かる。

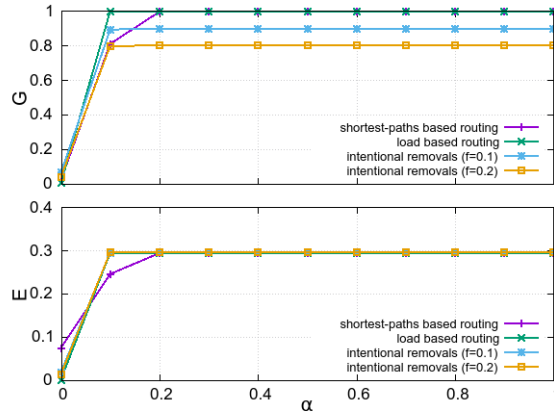
また、ネットワークの効率は、スケールフリーネットワークの時と同じく、耐久性パラメータが 0.1 以上で低下しないか、むしろ少し上がることが確認できる。



(a) $l = 3$



(b) $l = 5$



(c) $l = 7$

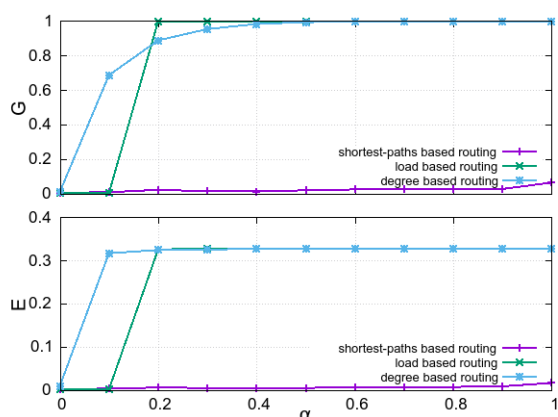
図 6.2: ノード除去による対策との比較 (玉ねぎ状ネットワーク)

6.2 次数ルーティングとの比較

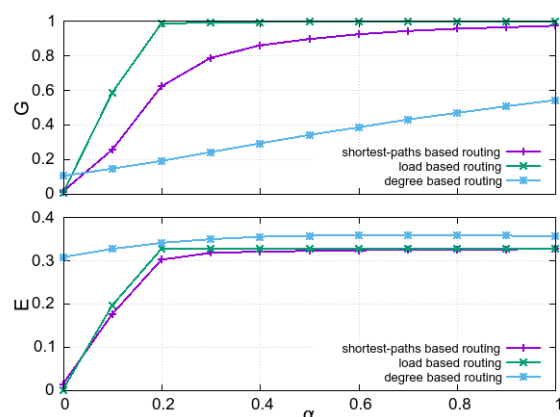
次数ルーティングでは、許容負荷を次数ルーティング適用時の初期負荷を使って定義することが前提となっている。そこで、許容負荷をこれまでと同じく最小ホップ経路を選択するときの初期負荷 (=媒介中心性) で定義した場合と、次数ルーティング適用時の初期負荷で定義した場合についてシミュレーションを行った。それぞれについて、次数ルーティング (degree based routing) を適用した場合と、負荷ルーティングを適用した場合 (load based routing)、および対策なしの場合 (shortest-path based routing) で耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワークの効率 E を比較する。また、次数ルーティングにおけるパラメータ q は 0.5 とした。6.2.1 でスケールフリーネットワークに対する結果を、6.2.2 で玉ねぎ状ネットワークに対する結果を述べる。

6.2.1 スケールフリーネットワークにおける結果

図 6.3(a) に許容負荷を次数ルーティング適用時の初期負荷により定義した場合の結果を、(b) に許容負荷を媒介中心性により定義した場合の結果を示す。



(a) 許容負荷を次数ルーティング適用時の初期負荷により定義



(b) 許容負荷を媒介中心性により定義

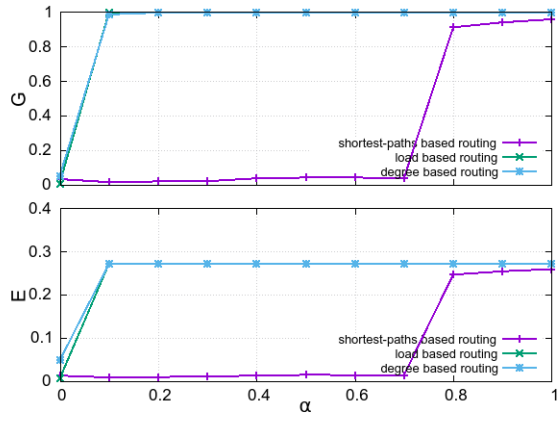
図 6.3: 次数を考慮したルーティングによる対策との比較 (スケールフリーネットワーク)

(a) の結果から、最大連結成分比が次数ルーティング適用時に対策なし時より常に上回ることが確認でき、カスケード故障の被害を抑制できていることが分かる。また、次数ルーティングの適用によってネットワークの効率も低下させていない。以上より、次数ルーティングは、許容負荷を前提通りに次数ルーティング適用時の初期負荷により定義することによって効果を発揮できることが分かる。一方で、(b) の許容負荷を媒介中心性により定義した時の結果では、次数ルーティングを適用したとしても、カスケード故障の被害を抑制することができていない。それどころか、耐久性パラメータが 0.1 以上で対策なしの場合より大きな被害が発生していることが分かる。次数ルーティングでは、任意の許容負荷分布に対して柔軟に適用することができず、許容負荷を次数ルーティング適用時の初期負荷で定義しないと効果を発揮できない。対して、負荷ルーティングを適用した結果では、(a)、(b) いずれにおいても耐久性パラメータが 0.2 以上でほとんど被害を発生させていない。また、次数ルーティングが効果を発揮している (a) の場合においても、耐久性パラメータが 0.2 以上で、次数ルーティングよりも被害を抑制している。

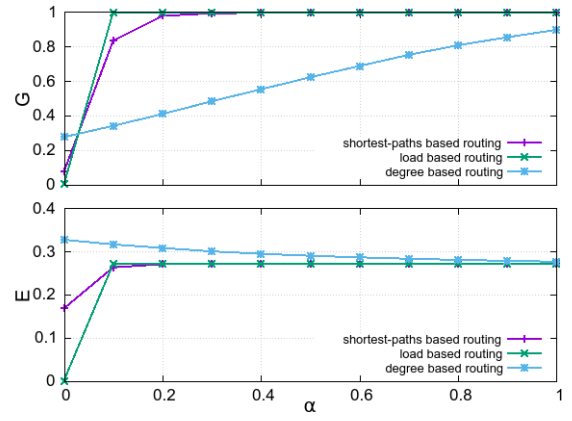
6.2.2 玉ねぎ状ネットワークにおける結果

図 6.4(a), (c), (e) に、各玉ねぎ状ネットワーク上で許容負荷を次数ルーティング適用時の初期負荷により定義した場合の結果を、(b), (d), (f) に、許容負荷を媒介中心性により定義した場合の結果を示す。

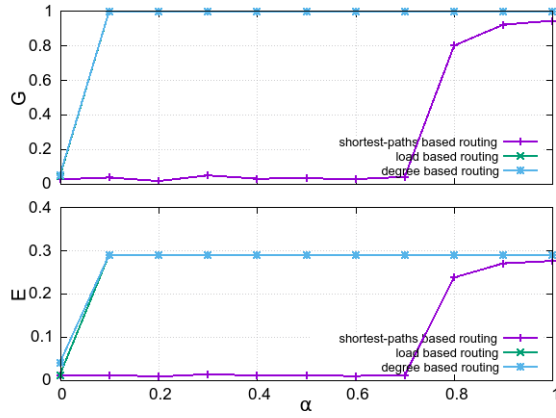
(a), (c), (e) から、次数ルーティングを適用することによって、いずれのネットワークにおいても耐久性パラメータが 0.1 以上でほとんどカスケード故障の被害を発生させていないことが確認できる。また、この時のネットワークの効率も低下させていない。一方で、(b), (d), (f) の許容負荷を媒介中心性で定義した時の結果では、耐久性パラメータが 0.1 以上で対策なしの最大連結成分比 G の値を下回り、被害をより拡大させていることが分かる。以上のことから、玉ねぎ状ネットワークにおいても次数ルーティングは、前提と異なる許容負荷分布に対して柔軟に適用することができないことが分かる。対して、負荷ルーティングを適用した場合は、いずれの結果においても耐久性パラメータが 0.1 以上で、変わらずカスケード故障の被害をほとんど発生させていない。



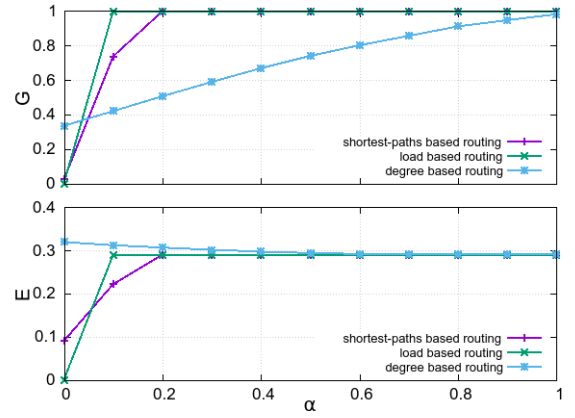
(a) $l = 3$



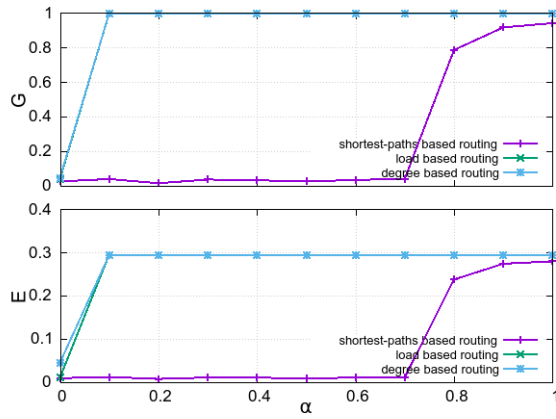
(b) $l = 3$



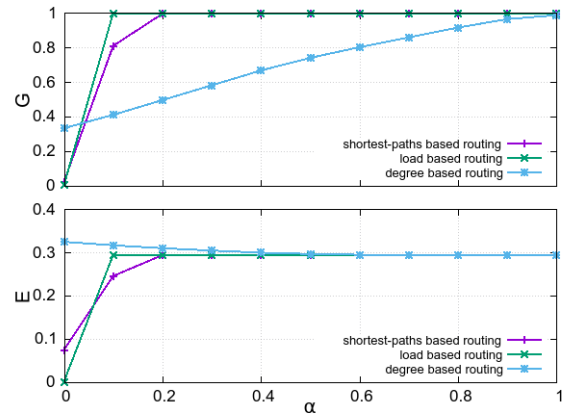
(c) $l = 5$



(d) $l = 5$



(e) $l = 7$



(f) $l = 7$

図 6.4: 次数を考慮したルーティングによる対策との比較 (玉ねぎ状ネットワーク)

第7章 異なる許容負荷定義

これまでのシミュレーションでは、式 (3.2) に従い各ノードの許容負荷はそのノードの初期負荷に比例した値で定義していた。本章では、負荷ルーティングによる対策が様々な許容負荷分布に対して柔軟に適用できることを確認するため、異なる方法で定義した許容負荷分布を持つネットワーク上でのシミュレーション結果を述べる。7.1 で許容負荷を Dou らによって提案されたモデル (以後、Dou モデルと呼ぶ) で定義した場合について、7.2 で Zhao らによって提案されたモデル (以後、Zhao モデルと呼ぶ) で定義した場合についてそれぞれ述べる。シミュレーションを行ったネットワークはノード数 $N = 1000$, $m = 4$ のスケールフリーネットワークと、玉ねぎ状ネットワーク (ループサイズ $l = 3, 5, 7$) である。また、カスケード故障は最大負荷ノード除去によって引き起こされた場合である。結果は全て、10 個のネットワークの平均値である。

7.1 Dou モデル

7.1.1 Dou モデルによる許容負荷定義

多くの現実のネットワークでは、式 (3.2) で想定している様に全てのノードに同じ比率だけ余裕をもたせているわけではなく、負荷が小さいノードにより多くの許容量を割り当てている [16]。この点を考慮した、より現実のネットワークに近い許容負荷定義モデルが Dou らによって提案されている [17]。このモデルでは、次式のように各ノード i の許容負荷 C_i が計算される。

$$C_i = L_i(0) + aL_i(0)^b \quad (7.1)$$

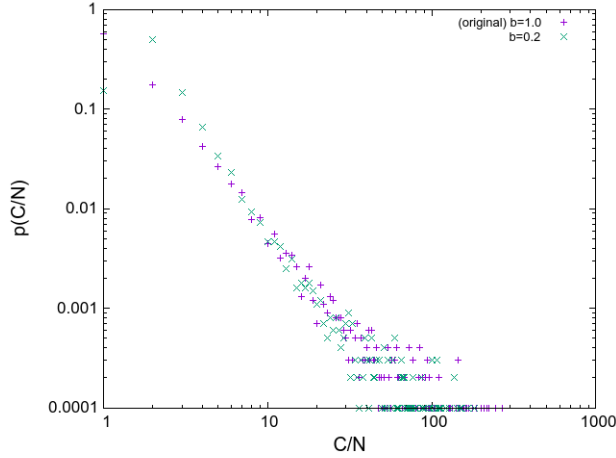
ここで、 $L_i(0)$ はノード i の初期負荷 (=媒介中心性) で、 a, b はパラメータである。 $b = 1.0$ のとき、式 (3.2) による許容負荷定義と等価になり、 b の値がそれより小さいほど負荷が小さいノードにより多くの許容負荷が与えられる。また、全てのノードの許容負荷の合計値が、式 (3.2) で許容負荷を定義したときの合計値と等しくなるようにパラメータ a は次のように計算する。

$$a = \alpha \frac{\sum_{i=1}^N L_i(0)}{\sum_{i=1}^N L_i(0)^b} \quad (7.2)$$

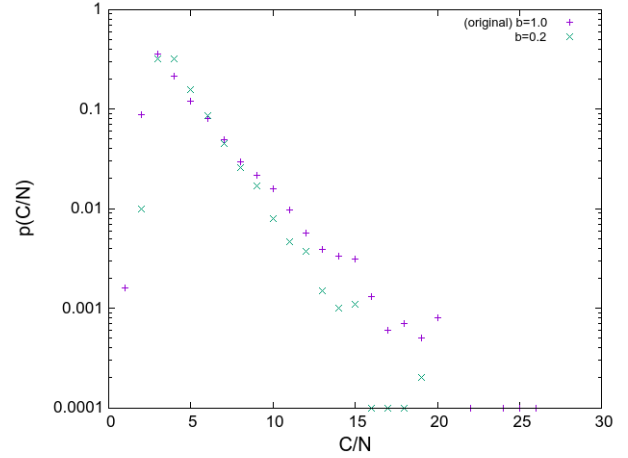
ここで α は耐久性パラメータである。

図 7.1 に、スケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワーク ($l = 5$) 上で、耐久性パラメータ $\alpha = 0.5$, $b = 0.2$ の時の Dou モデルで定義した許容負荷分布と式 (3.2) で定義した許容負荷分布 (original) を示す。

図 7.1 から、Dou モデルで定義した場合ではいずれのネットワークでも大きな許容負荷を持つノードの割合が式 (3.2) の場合に比べて減少していることが確認できる。これは、負荷が小さいノードに優先的に許容負荷を割り当てたため、負荷が大きいノードへ割り当てる許容負荷が減少したためである。

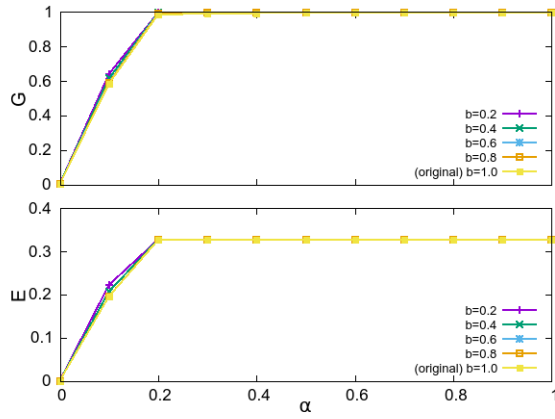


(a) スケールフリーネットワーク

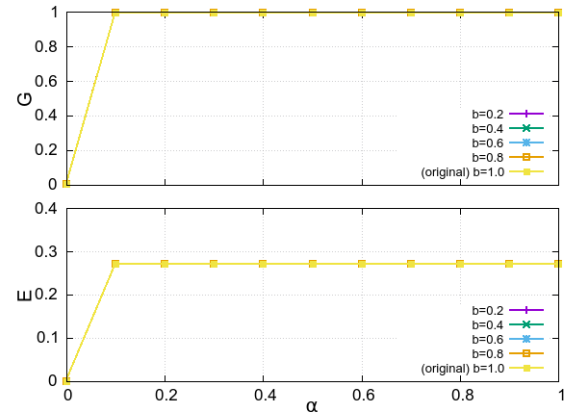


(b) 玉ねぎ状ネットワーク ($l = 5$)

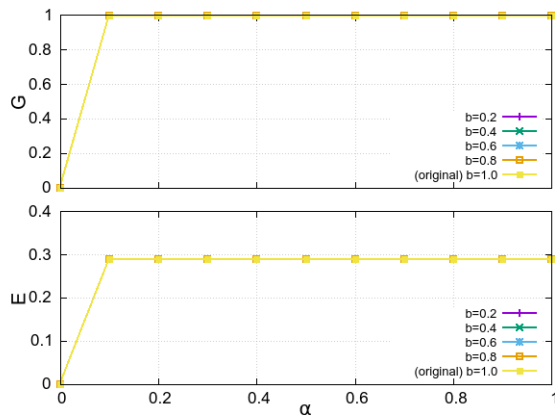
図 7.1: 許容負荷分布 ($\alpha = 0.5, b = 0.2$)



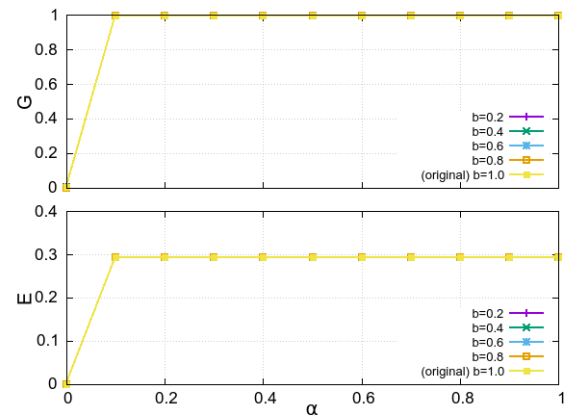
(a) スケールフリーネットワーク



(b) 玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3$)



(c) 玉ねぎ状ネットワーク ($l = 5$)



(d) 玉ねぎ状ネットワーク ($l = 7$)

図 7.2: Dou モデルで許容負荷を定義した場合のシミュレーション結果

本研究では、負荷が小さいノードに優先的に許容負荷を割り当てるケースとして、この Dou モデルで許容負荷を定義したそれぞれのネットワークについてシミュレーションを行った。

7.1.2 シミュレーション結果

Dou モデルで許容負荷を定義したスケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3, 5, 7$) 上でカスケード故障のシミュレーションを行い、その結果を式 (3.2) に従って許容負荷を定義した場合と比較した。図 7.2 に各ネットワークにおけるパラメータ $b = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の時の耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワーク効率 E の変化を示す。

図 7.2 から、どのネットワークにおいてもパラメータ b の変化によって、負荷ルーティングを適用した時の最大連結成分比 G とネットワークの効率 E にほとんど影響が出ないことが確認できる。この結果から負荷が小さいノードに優先的に許容負荷を与えたとしても、負荷ルーティングを適用することにより被害を抑制できることが分かる。

7.2 Zhao モデル

7.2.1 Zhao モデルによる許容負荷定義

Zhao らは、指数 b を持つ次数のべき乗関数によって許容負荷を定義した場合にスケールフリーネットワークにおけるカスケード故障のプロセスにどのような影響があるのかを調べた [18]。このモデルでは、各ノード i の許容負荷 C_i は次式で計算される。

$$C_i = [1 + a(k_i/k_{max})^b]L_i(0) \quad (7.3)$$

ここで、 $L_i(0)$ はノード i の初期負荷 (=媒介中心性)、 k_i は各ノード i の次数、 k_{max} は最大次数、 a, b はパラメータである。このモデルでは、 $b = 0.0$ のときに式 (3.2) による許容負荷定義と等価になり、 b の値が大きいほど次数が大きいノードにより多くの許容負荷が与えられる。また、全てのノードの許容負荷の合計値が、式 (3.2) で許容負荷を定義したときの合計値と等しくなるようにパラメータ a は次のように計算する。

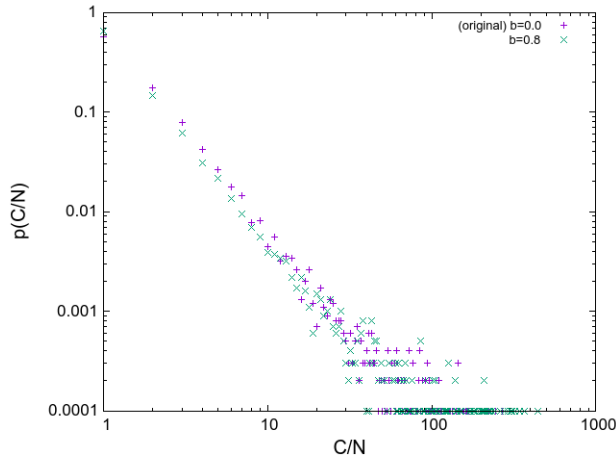
$$a = \alpha \frac{\sum_{i=1}^N L_i(0)}{\sum_{i=1}^N (k_i/k_{max})^b L_i(0)} \quad (7.4)$$

ここで α は耐久性パラメータである。

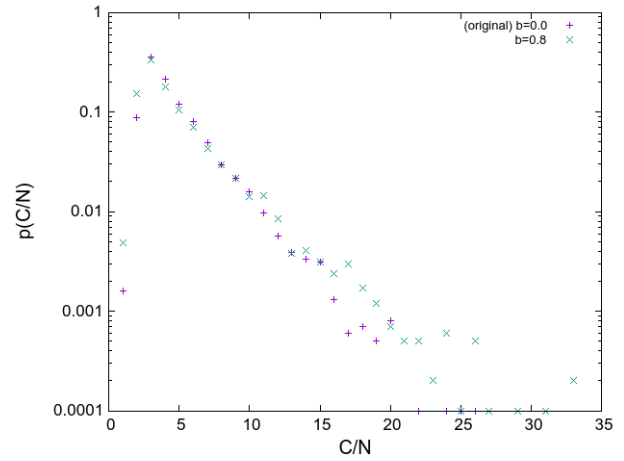
図 7.3 に、スケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワーク ($l = 5$) 上で、耐久性パラメータ $\alpha = 0.5$ 、 $b = 0.8$ の時の Zhao モデルで定義した許容負荷の分布と式 (3.2) で定義した許容負荷の分布 (original) を示す。

図 7.3 から、Zhao モデルで定義した場合ではいずれのネットワークでも大きな許容負荷を持つノードの割合が式 (3.2) で許容負荷を定義した場合に比べて増加していることが確認できる。次数とノード負荷との間には正の相関があるため、Zhao モデルにより次数が大きいノードに優先的に許容負荷を割り当てると結果的に大きな許容負荷を持つノード割合が増加する。

本研究では、次数が大きいノードに優先的に許容負荷を割り当てるケースとして、Zhao モデルで許容負荷を定義したそれぞれのネットワークについてシミュレーションを行った。

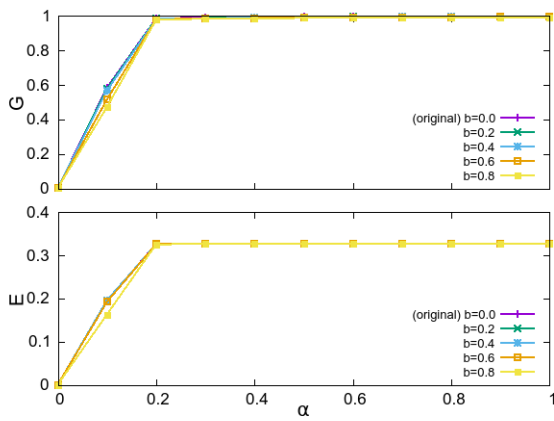


(a) スケールフリーネットワーク

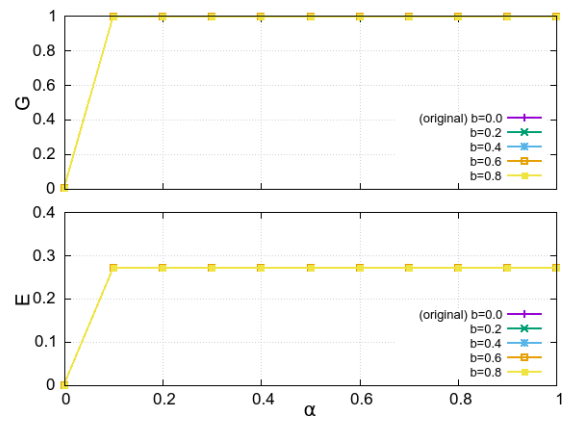


(b) 玉ねぎ状ネットワーク ($l = 5$)

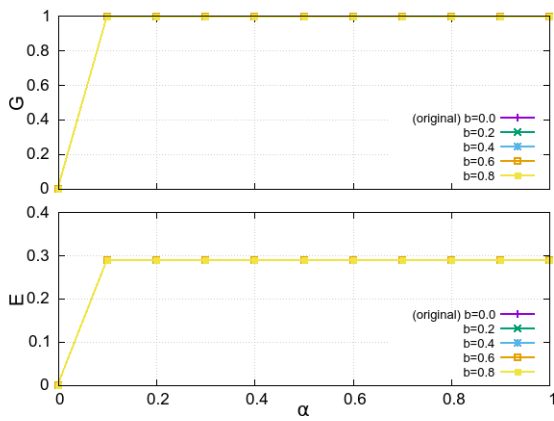
図 7.3: 許容負荷分布 $\alpha = 0.5$, $b = 0.8$



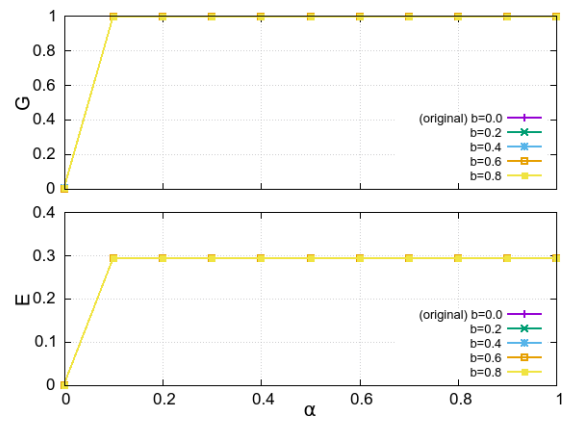
(a) スケールフリーネットワーク



(b) 玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3$)



(c) 玉ねぎ状ネットワーク ($l = 5$)



(d) 玉ねぎ状ネットワーク ($l = 7$)

図 7.4: Zhao モデルで許容負荷を定義した場合のシミュレーション結果

7.2.2 シミュレーション結果

Zhao モデルで許容負荷を定義したスケールフリーネットワークと玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3, 5, 7$) 上で、負荷ルーティングを適用してカスケード故障のシミュレーションを行い、その結果を式 (3.2) に従って許容負荷を定義した場合と比較した。図 7.4 にパラメータ $b = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の時の耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワーク効率 E の変化を示す。

図 7.4 からスケールフリーネットワークの場合では、耐久性パラメータが 0.1 の時に b を大きくするに従ってわずかに最大連結成分比 G とネットワークの効率 E が低下するものの、全体としてはどちらのネットワークにおいてもパラメータ b の変化によって、結果がほとんど変化していないことが分かる。この結果から次数が大きいノードに優先的に許容負荷を与える場合でも、負荷ルーティングを適用することにより被害を抑制できることが分かる。

第8章 複数の初期故障ノード

本章では、複数のノード故障を引き金としたカスケード故障のシミュレーションについて述べる。8.1 で引き金となるノード群の選択方法について説明し、8.2 でシミュレーション結果を述べる。また、シミュレーションを行うネットワークはノード数 $N = 1000$, $m = 4$ のスケールフリーネットワークと、玉ねぎ状ネットワーク (ループサイズ $l = 3, 5, 7$) である。結果は全て 10 個のネットワークの平均値である。

8.1 初期故障ノードの選択方法

これまでのシミュレーションではカスケード故障は単一のノード故障が引き金になると想定してきた。しかし、テロやハッキングなどの意図的な攻撃の場合、深刻なダメージを与えるように選択された複数のノードが同時に破壊されることも考えられる。そこで、負荷ルーティングによるカスケード故障の被害の抑制効果が、引き金となる初期故障ノード数を増やすことによって受ける影響を調べた。複数の初期故障ノードは、意図的な攻撃を想定した以下の 4 つの方法で選択する。

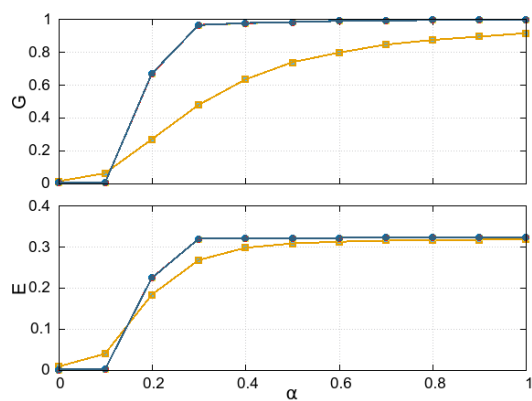
- a) 次数の大きい順にノードを AN 個除去する。
- b) 負荷の大きい順にノードを AN 個除去する。
- c) 次数が最大のノードを除去し、残った全てのノードの次数を再計算後、再び次数が最大のノードを除去する。これを除去数が AN 個になるまで繰り返す。
- d) 負荷が最大のノードを除去し、残った全てのノードの負荷を再計算後、再び負荷が最大のノードを除去する。これを除去数が AN 個になるまで繰り返す。

8.2 シミュレーション結果

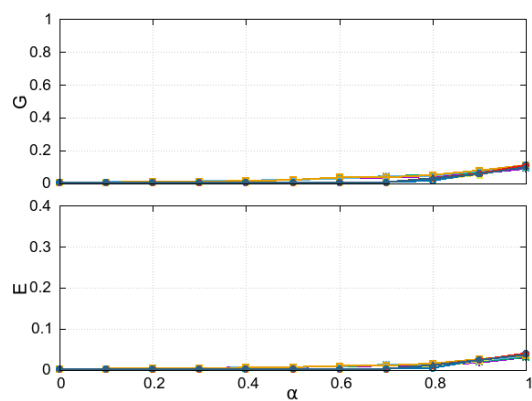
8.2.1 スケールフリーネットワークにおける結果

初期故障ノード数 AN が 2, 4, 8, 16, 32 のときの、スケールフリーネットワークにおける耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワーク効率 E を図 8.1 に示す。また、それぞれの結果で除去ノード選択方法を a), b), c), d) としたときの負荷ルーティング適用時の結果 (load based routing) と対策なし時の結果 (shortest-path based routing) を示している。

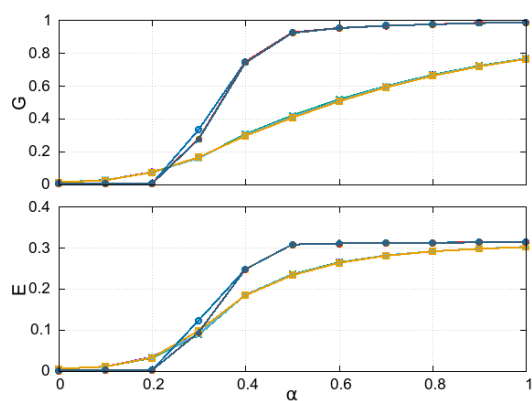
結果から、初期故障ノード数が 8 までは負荷ルーティングを適用することによりカスケード故障の被害を抑制できていることを確認できる。しかし、初期故障ノード数が増加することによって、負荷ルーティング適用時でもカスケード故障の被害が大きくなり、初期故障ノード数が 32 のときでは耐久性パラメータが 1.0 でも壊滅的な被害が発生している。また、初期故障ノードの選択方法によって、結果の違いはほとんどないことが分かる。



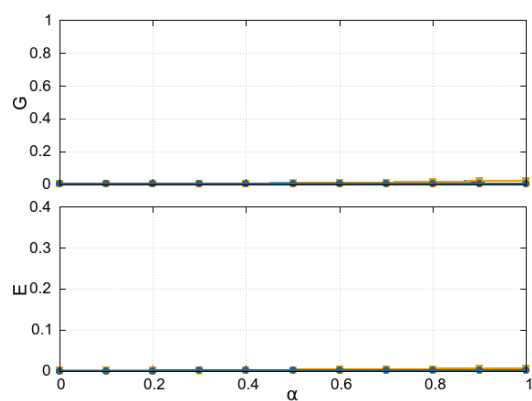
(a) $AN = 2$



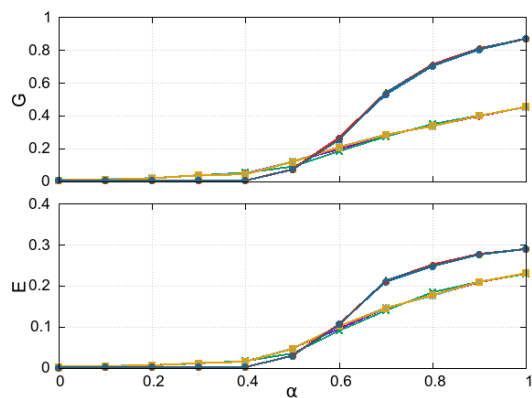
(b) $AN = 16$



(c) $AN = 4$



(d) $AN = 32$



(e) $AN = 8$

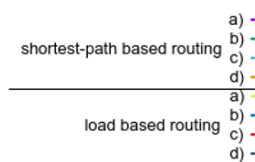
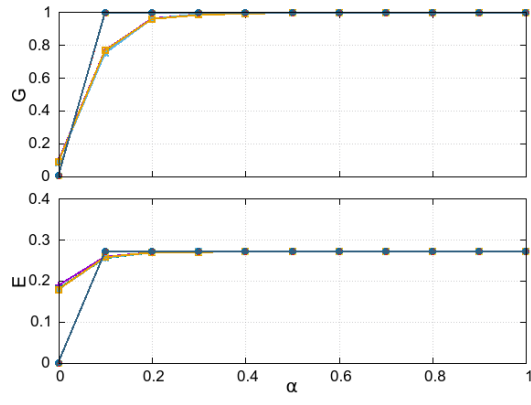


図 8.1: 複数のノード故障を引き金とした場合の結果 (スケールフリーネットワーク)

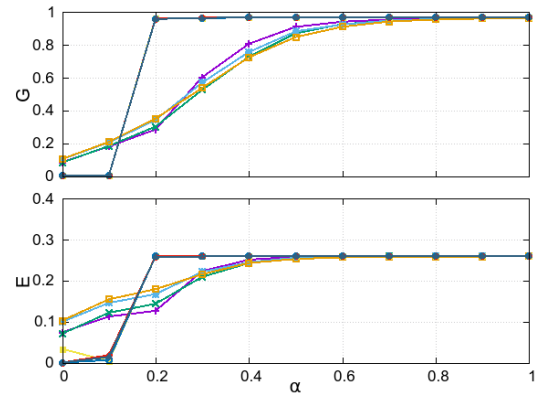
8.2.2 玉ねぎ状ネットワークにおける結果

初期故障ノード数 AN が 2, 4, 8, 16, 32, 64, 100 のときの、玉ねぎ状ネットワーク ($l = 3, 5, 7$) における耐久性パラメータ α に対する最大連結成分比 G とネットワーク効率 E を図 8.2, 図 8.3, 図 8.4 に示す。また、それぞれの結果で除去ノード選択方法を a), b), c), d) としたときの負荷ルーティング適用時の結果 (load based routing) と対策なし時の結果 (shortest-path based routing) を示している。

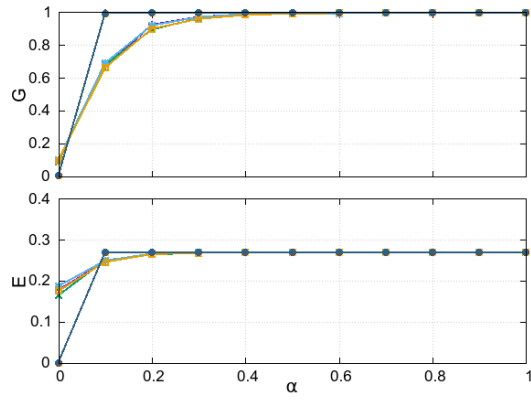
結果から、玉ねぎ状ネットワークにおいても複数のノード故障が引き金になった場合でカスケード故障の被害を抑制できることが確認できる。ただし、図 8.2 の $l = 3$ の時では、耐久性パラメータが小さい時に対策なしで負荷ルーティングを適用した場合よりも被害が抑制されている。また、初期故障ノード数を増やしたとしても、スケールフリーネットワーク上での結果よりもカスケード故障の被害が拡大しにくいことが分かる。初期故障ノード数が 100 で全ネットワークの 1 割に及ぶ数のノード除去が引き金になったとしても、耐久性パラメータが 0.6 以上で過負荷による故障をほとんど発生させていない。また、初期故障ノード数が 32 までは初期故障ノードの選択方法によって違いがほとんど無いが、64 ノード以上では、各方法によって差が生じている。図 8.2 の $l = 3$ の時では、b) の選択方法で最も大きな被害になる傾向があり、図 8.3 の $l = 5$ と図 8.4 の $l = 7$ では d) で最も大きな被害を生じさせている。一方で、a) の選択方法では、比較的被害が小さくなる傾向がある。



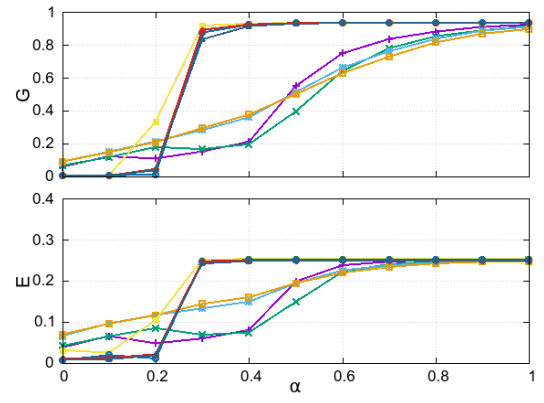
(a) $AN = 3$



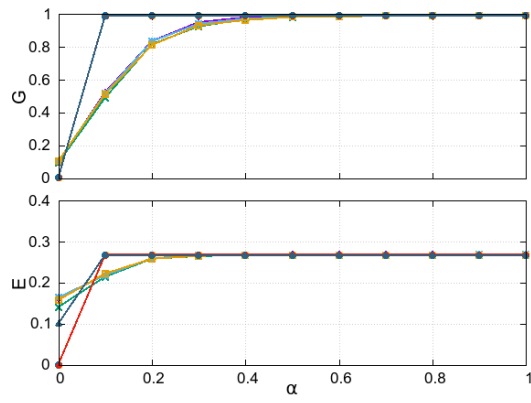
(b) $AN = 32$



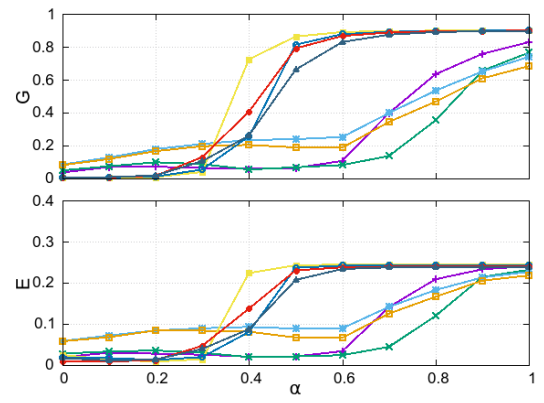
(c) $AN = 4$



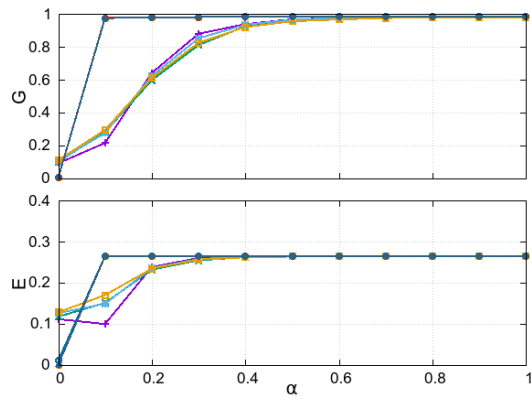
(d) $AN = 64$



(e) $AN = 8$



(f) $AN = 100$



(g) $AN = 16$

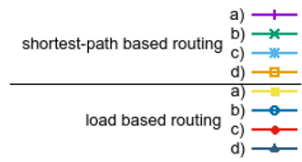
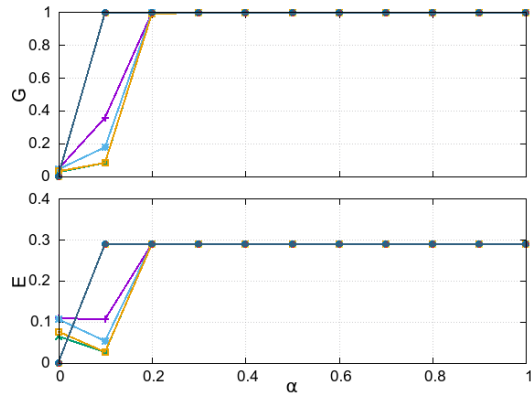
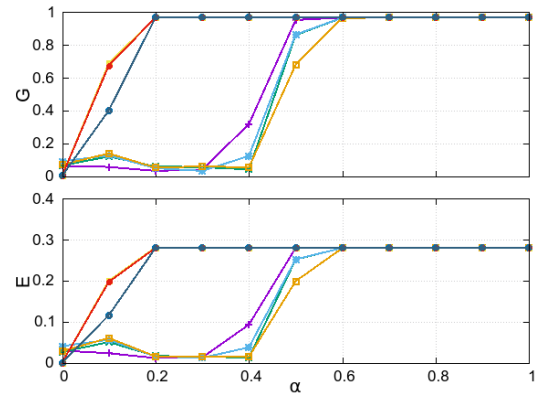


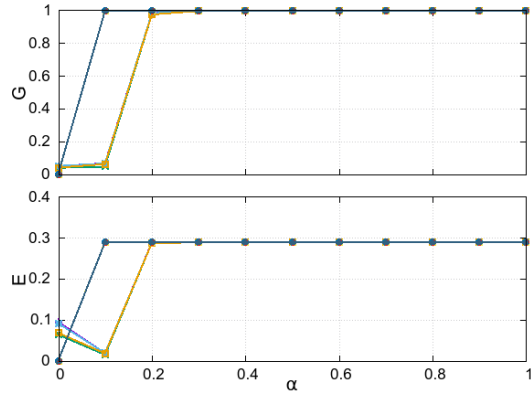
図 8.2: 複数のノード故障を引き金とした場合の結果 (玉ねぎ状ネットワーク $l = 3$)



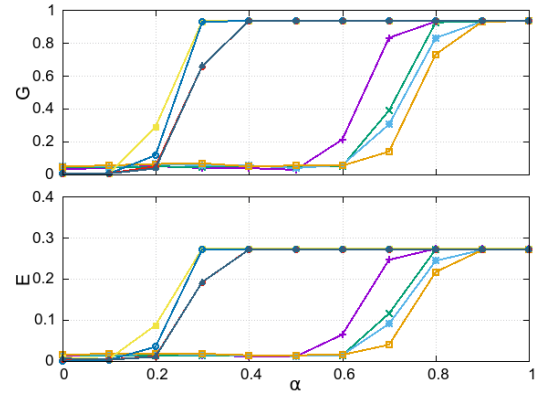
(a) $AN = 2$



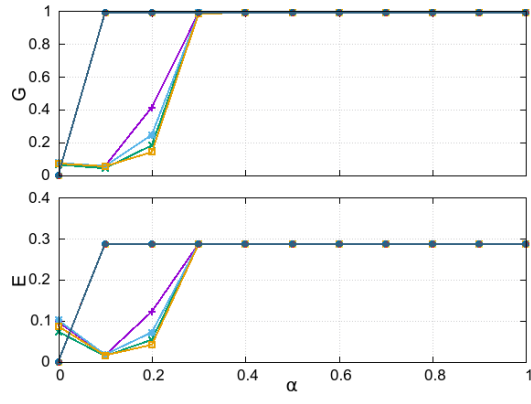
(b) $AN = 32$



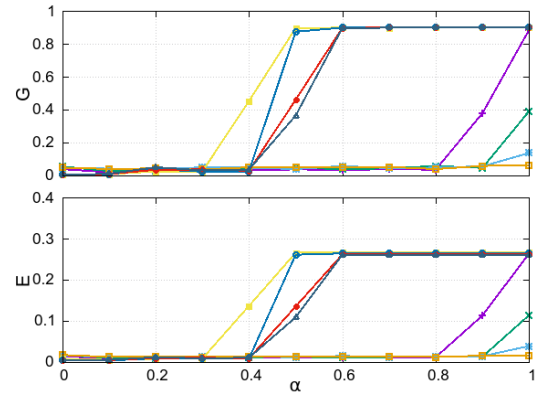
(c) $AN = 4$



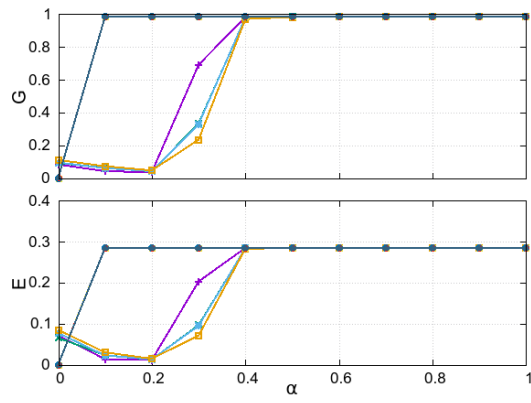
(d) $AN = 64$



(e) $AN = 8$



(f) $AN = 100$



(g) $AN = 16$

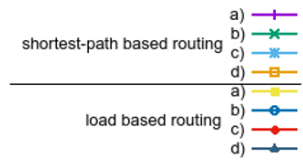
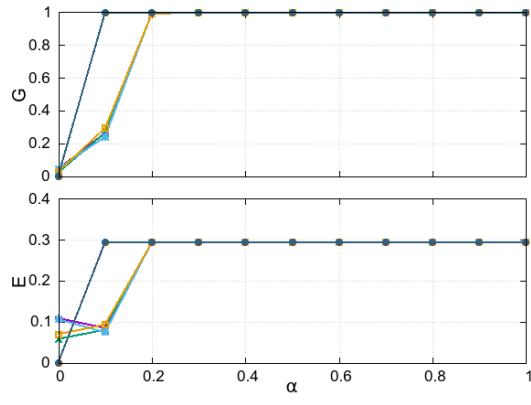
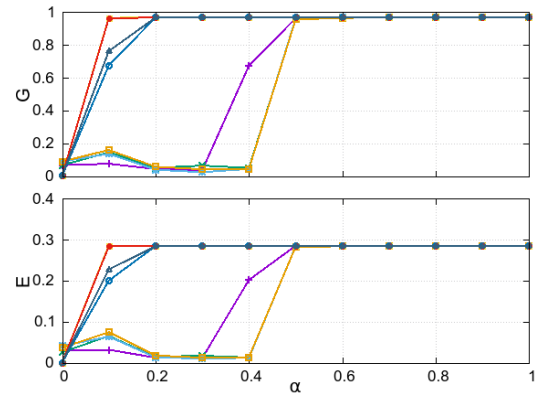


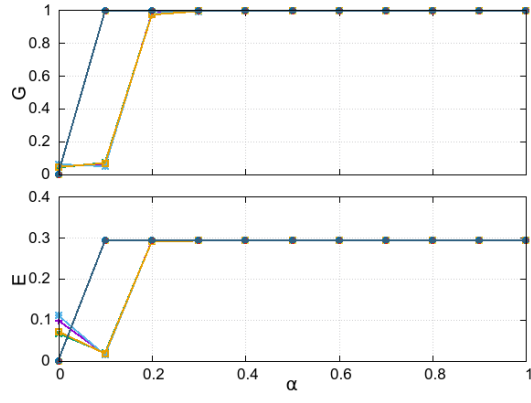
図 8.3: 複数のノード故障を引き金とした場合の結果 (玉ねぎ状ネットワーク $l = 5$)



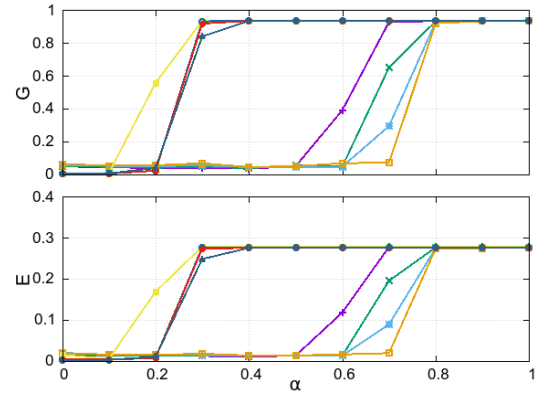
(a) $AN = 2$



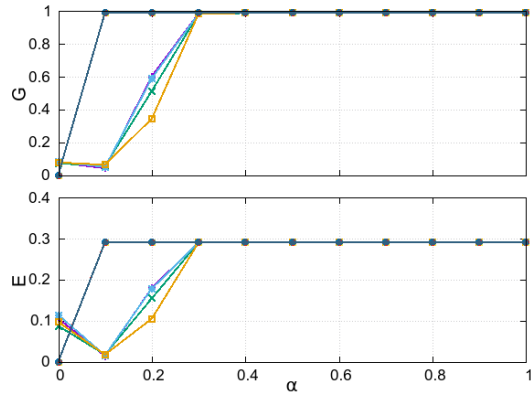
(b) $AN = 32$



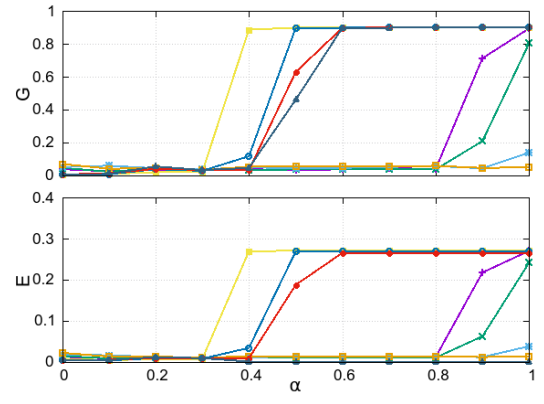
(c) $AN = 4$



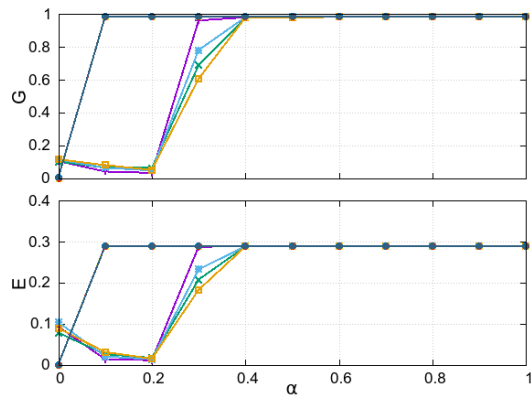
(d) $AN = 64$



(e) $AN = 8$



(f) $AN = 100$



(g) $AN = 16$

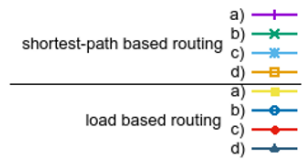


図 8.4: 複数のノード故障を引き金とした場合の結果 (玉ねぎ状ネットワーク $l = 7$)

第9章 おわりに

本研究ではノードの負荷を考慮したルーティングによるカスケード故障の対策を提案し、その過負荷連鎖の抑制効果をシミュレーションによって確かめた。また、シミュレーションは、現実のネットワークに相当する BA モデルで構築したスケールフリーネットワークと、最適な攻撃耐性を持ち次世代のネットワークとして期待できるループモデルで構築した玉ねぎ状ネットワーク上で行った。

以下にシミュレーション結果をまとめる。

- 提案手法を適用することによって、カスケード故障の被害を大幅に抑制できることを確認できた。また、耐久性パラメータをある程度大きくすることによって、被害をほとんど発生させないことが明らかになった。さらに、ルーティングによるネットワークの効率の低下もほとんど無い。提案手法を適用した時の、初期故障発生後のノード負荷率分布を調べると、ほとんどのノードの負荷率がほぼ同じ値になっていることが分かった。これは、負荷率が高いノードを避けるようなルーティングによるものであり、この効果が過負荷ノードの発生を抑制し、カスケード故障の被害を軽減したものと考えられる。
- 従来手法との結果の比較から、耐久性パラメータがごく小さい時を除き、ノード除去による対策および次数ルーティングによる対策と比べて被害を同等以上に抑制できることが確認できた。
- 異なる方法でノードの許容負荷を定義した時の結果から、提案手法は許容負荷分布を変えたとしても柔軟に適用できることを確認できた。
- 複数のノード故障を引き金とした時の結果から、初期故障ノード数の増加に伴って提案手法を適用したとしてもカスケード故障の被害が拡大するものの、対策なしの場合と比べるとカスケード故障の被害を抑制できることが確認できた。
- それぞれのネットワークでの結果の比較から、玉ねぎ状ネットワークでは、スケールフリーネットワークよりもカスケード故障の被害が小さくなることが本研究により初めて確認できた。また、玉ねぎ状ネットワークを構築する上でのパラメータであるループサイズによって結果がほとんど変化しないことも確認できた。

今回の研究では、ノード負荷を考慮したルーティングによるカスケード故障への基本的な効果を代表的なモデル上でのシミュレーションにより明らかにした。今後は本研究を基礎とし、電力網や通信網、道路交通網などの個々のネットワークへの適用可能性や効果を検討する必要がある。

参考文献

- [1] Barabási, A. L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *science*, 286(5439), 509-512.
- [2] Herrmann, H. J., Schneider, C. M., Moreira, A. A., Andrade Jr, J. S., & Havlin, S. (2011). Onion-like network topology enhances robustness against malicious attacks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2011(01), P01027.
- [3] Motter, A. E., & Lai, Y. C. (2002). Cascade-based attacks on complex networks. *Physical Review E*, 66(6), 065102.
- [4] Motter, A. E. (2004). Cascade control and defense in complex networks. *Physical Review Letters*, 93(9), 098701.
- [5] 林幸雄, 宮崎敏幸, (2006), 結合相関を持つ Scale-Free ネットワーク上のカスケード故障に対する防御戦略, *情報処理学会論文誌*, 47 (3), pp.802-812.
- [6] Zhao, H., & Gao, Z. Y. (2007). Cascade defense via navigation in scale free networks. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 57(1), 95-101.
- [7] Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E., & Havlin, S. (2010). Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291), 1025-1028.
- [8] Newman, M. (2010). *Networks: an introduction*. Oxford university press.
- [9] Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 35-41.
- [10] Dolev, S., Elovici, Y., & Puzis, R. (2010). Routing betweenness centrality. *Journal of the ACM (JACM)*, 57(4), 25.
- [11] Wu, Z. X., & Holme, P. (2011). Onion structure and network robustness. *Physical Review E*, 84(2), 026106.
- [12] Crucitti, P., Latora, V., & Marchiori, M. (2004). Model for cascading failures in complex networks. *Physical Review E*, 69(4), 045104.
- [13] Holme, P., & Kim, B. J. (2002). Vertex overload breakdown in evolving networks. *Physical Review E*, 65(6), 066109.
- [14] Holme, P. (2002). Edge overload breakdown in evolving networks. *Physical Review E*, 66(3), 036119.
- [15] Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical review letters*, 87(19), 198701.

- [16] Kim, D. H., & Motter, A. E. (2008). Resource allocation pattern in infrastructure networks. *Journal of physics A: mathematical and theoretical*, 41(22), 224019.
- [17] Dou, B. L., Wang, X. G., & Zhang, S. Y. (2010). Robustness of networks against cascading failures. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(11), 2310-2317.
- [18] Zhao, X. M., & Gao, Z. Y. (2007). How non-uniform tolerance parameter strategy changes the response of scale-free networks to failures. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 59(1), 85-92.

謝辞

本論文をまとめるにあたり指導教官である林幸雄教授には大変お世話になりました。深く感謝いたします。また、本学の上原隆平教授、吉高淳夫准教授及び北九州工業高等専門学校（北九州工業高等専門学校）の松久保潤准教授には大変有益な助言をいただきました。研究室のメンバーにはゼミの時間にご支援をいただきました。研究を支えてくださった全ての方々にこの場を借りて深く感謝いたします。