

Title	分散型電力供給の耐故障性に関する研究
Author(s)	佛明, 智
Citation	
Issue Date	2003-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/455
Rights	
Description	Supervisor: 林 幸雄, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

分散型電力供給の耐故障性に関する研究

指導教官 林 幸雄 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科 知識システム基礎学専攻

150064 佛明 .智

審査委員： 林 幸雄 助教授（主査）
中森 義輝 教授
佐藤 賢二 助教授
橋本 敬 助教授

2003 年 2 月

目 次

第1章 はじめに	1
1.1 研究の背景と動機	1
1.1.1 日本の電力制度	1
1.1.2 分散型電源の利点	1
1.1.3 分散型電力供給に関する研究の現状	3
1.2 研究の目的	4
1.3 論文構成	4
第2章 対象とする電力供給システム	5
2.1 電力供給システムの概要	5
2.1.1 電力供給システムのモデル化	5
2.1.2 各ノードの役割の決定方法	5
2.2 電力ネットワークモデルの構築方法	7
第3章 災害時の電力供給システムの評価方法	9
3.1 被害の発生方法	9
3.2 集中供給によるシミュレーション	11
3.3 分散供給によるシミュレーション	11
第4章 シミュレーション結果および考察	12
4.1 シミュレーションの方法	12
4.2 実験の結果	14
4.2.1 電力ネットワークモデルの検証	14
4.2.2 実験1の結果：被害の発生方法による比較（集中供給）	20
4.2.3 実験2の結果：Hubに対する故障率における分散供給	26
第5章 結果のまとめと考察	33
5.1 実験結果のまとめ	33
5.2 考察	34

5.2.1 被害の発生方法による比較（集中供給）	34
5.2.2 Hub に対する故障率における分散供給	35
5.2 おわりに	35
謝辞	36
参 考 文 献	37
発 表 論 文	39

第 1 章

はじめに

1.1 研究の背景と動機

1.1.1 日本の電力制度

日本の電力制度はこれまで、10 の電力会社が独占的に電力を供給してきた。ところが、規制緩和という流れの中で、電力供給システムの見直しが行われ、平成 11 年の電気事業法改正による電力の部分自由化がスタートし小規模分散電源を配電線に接続することが許された。そのため、近い将来、設備価格の低下に伴い、需要家側への小規模分散電源や小規模電力貯蔵装置の設置が進む事が予想される。これにより、従来の大規模集中型電力供給システムを補う、分散型電源による分散供給システムの可能性が近年注目されている。

1.1.2 分散型電源の利点

分散型電源による利点は、分散型電源は電力の需要地と近いため送電のロスが小さいことである。日本の送電ロス率は世界に比べて低い、それでもなお 2000 年度時点で 4%となっている。図 1 に示すように、送電ロスが 4%なら少ないと考えられるかもしれないが、一般的な集中供給の火力発電所の場合、原油などの一次エネルギーに対して発電効率は約 39%。この時点で排熱によるロスが 61%も出てしまう。さらに送電線のロス 4%が加わるので、最終的な消費地におけるエネルギー効率は約 35%になってしまうのである。それに対して分散供給のコージェネレーションシステムでは、電力の需要地とエンジンが近いため送電のロスがなく発電所の場合、捨てていた廃熱

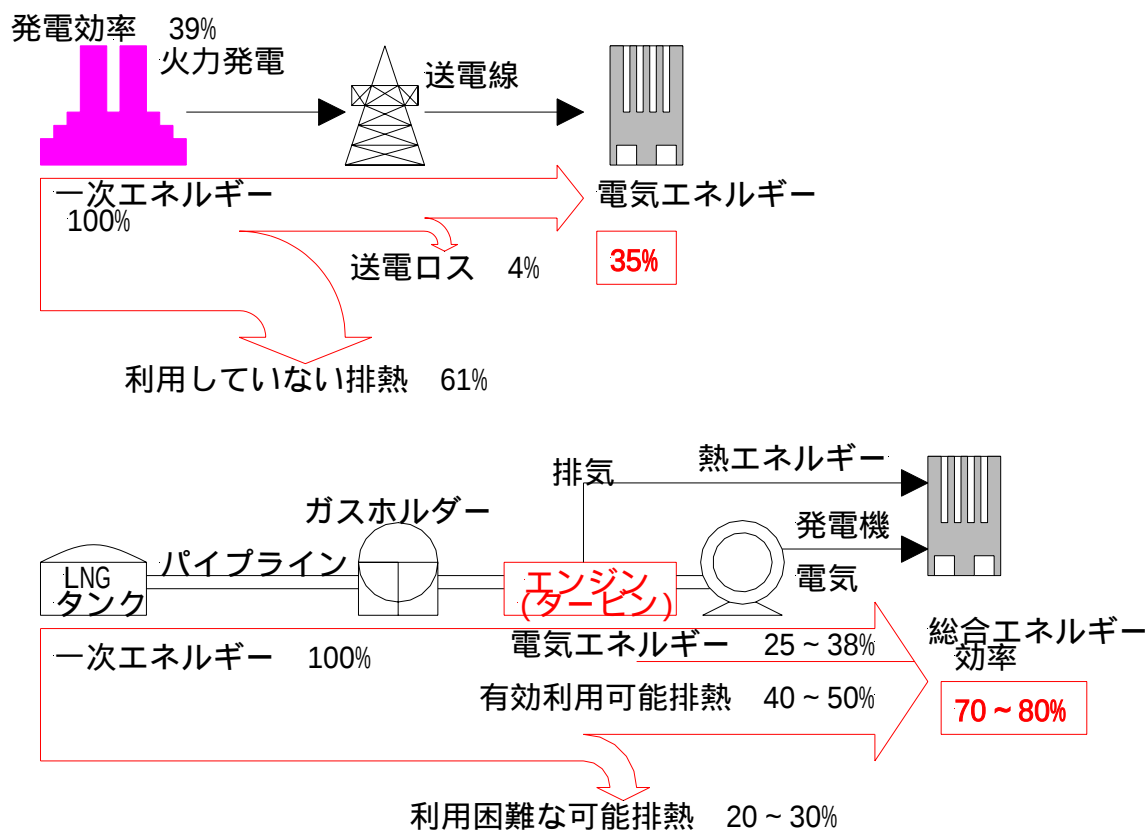


図 1：集中供給と分散供給の比較

も熱エネルギーとして活用できるため、総合エネルギー効率が 70～80%に達する。このように送電ロスを小さくすることは CO₂ 排出量の低減, 省エネの促進などにも貢献する。⁽¹⁾

もう一つの利点は、安全管理や危機管理の面が考えられる。電力を一箇所集中発電による供給ではなく、いたるところに設置された分散型電源による分散供給を行えば、例えば、事故による広範囲の停電等が起こった時、分散型電源を利用した電力分散供給システムでは、従来の系統電力に頼らない自立型電源が設置されているので、災害時の緊急用電源としての有効性も考えられる。

1.1.3 分散型電力供給に関する研究の現状

このような背景から，分散型電源による電力の分散供給システムを構築するために，これまでに電力流通を司る装置，電力ルータについて，その動作スケジュールを決定する方法の開発や実験室レベルの小規模な電力ルータの試作に向けた基礎的な検討や電力を蓄える燃料電池の開発など先駆的な研究が遂行されてきた．^{(2)～(10)}

一方，実際にこの分散型電力供給システムが既存のシステムと比較してどれくらい電力を供給できるのか，また故障や災害発生時にどのように制御すればよいのかという実現可能性については，あまり議論されていない．

そこで，本研究では連結性の観点から電力の分散供給のシミュレーションを行い，電力を分散供給すると電力供給源としてどれくらい供給できるのか，また，災害等が起きたときに分散供給システムがどれくらいのダメージまで耐えられるのか，というライフラインとしての面から電力の分散供給システムの可能性について検討する．

1.2 研究の目的

本研究では，計算機シミュレーションを通じて，現状の発電所からの集中的な電力供給と分散型電源による電力供給との比較を行い，分散型電源による電力供給の可能性について検討する．特に，災害時における電力供給システムの被害の大きさに対して，連結性の観点から電力供給能力がどの程度まで低下するか，という電力供給システムの耐故障性を明らかにする．

1.3 論文構成

本論文の構成は以下のようである．

第2章では，今回のシミュレーションのモデルとする電力供給システムについて説明する．

第3章では，災害時の電力供給システムの評価方法について説明する．

第4章では，集中供給，分散供給のシミュレーションの結果を示し，変電所の故障率や分散電源の普及率による耐故障性について述べる．

第5章では，本研究から得られた結果についてまとめる．

第 2 章

対象とする電力供給システム

本章では，対象とする電力供給システムの概要と，その電力供給システムのネットワークモデルの構築方法について述べる．

2.1 電力供給システムの概要

2.1.1 電力供給システムのモデル化

本研究では，発電所から需要家までにいたる電力供給システムのうち，シミュレーションの対象は，発電所から配電用変電所までのシステムを検討範囲とし，それ以降の末端部分を需要家とみなした．

シミュレーションでは，図 2.1 の電力供給システムのモデル化において示すように，発電所，変電所，需要家を各ノード，送電線を有向辺による各リンクとして表した．

2.1.2 各ノードの役割の決定方法

各ノードの役割としては，需要家は出次数が 0 のノード全てとした．一方，発電所は全ての需要家に電気が通じるようになるまで，入次数が 0 で出次数の大きいノードから順に選び，出次数が最大の発電所以外を下位発電所と呼ぶことにした．例えば，図 2.2 のようなネットワークの場合，まず出次数が 0 の⑧～⑰が需要家となる．次に，入次数が 0 で出次数が最大の①が発電所となる．①が発電所となると⑧～⑭には電気が通じているが，⑮～⑰には通じていない．そこで，①の次に出次数が最大のものを発電所にする．ここでは，②だが，②を発電所にしても発電所にする前と比較しても新たな需要家に電気を供給していないので，こういう場合は，発電所としない．次に出次数が最大のものは③なので，③を発電所とすると，⑮～⑰にも電気が通じる事にな

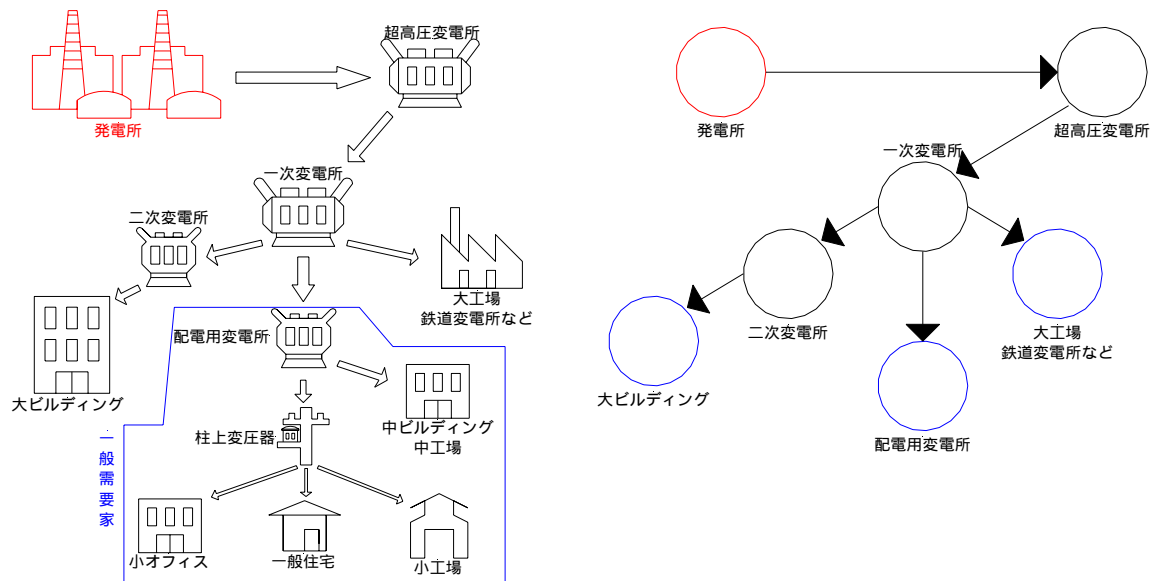


図 2.1：電力供給システムのモデル化

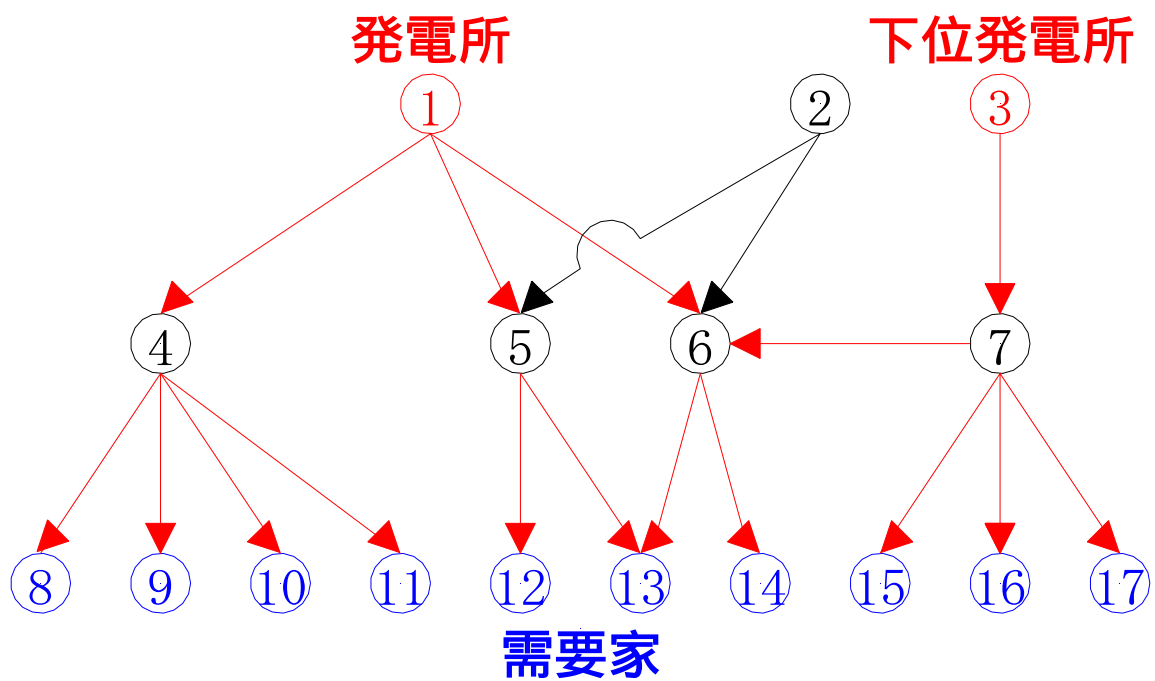


図 2.2：各ノードの役割の決定方法

り、全ての需要家に電気が通じる事になった。まとめると、①が発電所、③が下位発電所、⑧～⑰が需要家、それ以外が変電所ということである。

2.2 電力ネットワークモデルの構築方法

電力網をはじめ、インターネットのルータや WWW のリンク構造など、現実のネットワークには、べき乗則と呼ばれる特徴がある⁽¹¹⁾。電力網の場合、ノードとノードから出ていくリンク数 (Outdegree)、入ってくるリンク数 (Indegree) には対数スケールにして約-4 の傾きがあることが米西部の電力網に対する実測値からわかっている。つまり、リンクをあまり持っていないノードは多くて、リンクを多く持っているノードは少なくなるという法則である。例として、図 2.3 に北陸地域の電力システムの概略図を示す⁽¹²⁾。この図のように、ネットワークのトポロジーは規則的でもランダムでもどちらでもなく、ごく少数のハブ的な変電所 (加賀, 中能登, 越前等) と大多数の中継あるいは末端の変電所から構成され、その結合数の分布はべき乗則に従う。

このべき乗則に従うモデルを人工的に構成するために、 (α, β) モデル⁽¹³⁾を用いた。 (α, β) モデルでは、次のような手順でモデルの生成を行う。N 個のノード数をもつ系を作る場合、まず一つずつノードを生成させる。このときに k 本のリンクを生成する。その際リンクの生成には

- ① 新しく追加されたノードの自己ループ
- ② 新しいノードから古いノードへのリンク
- ③ 古いノードから新しいノードへのリンク
- ④ 古いノードから古いノードへのリンク

4 種類の生成の仕方がある。この 4 種類がそれぞれ確率的に選出される。②～④に関して、系の中でリンクを多く持つものが選ばれやすくなるようにするため、選出確率をリンクを多く持つものは高く、リンクをあまり持たないものは低くなるように振り分ける。但し、リンクを持たないものにも振り分けられる可能性を残すために全てのノードが必ず 1 本は持つような状態に設定した上で選出する。こうすることでリンクを持つものはさらに多く持つような構造に発展し、べき乗則にのるモデルになる。

●電力系統図 2002年8月末日現在

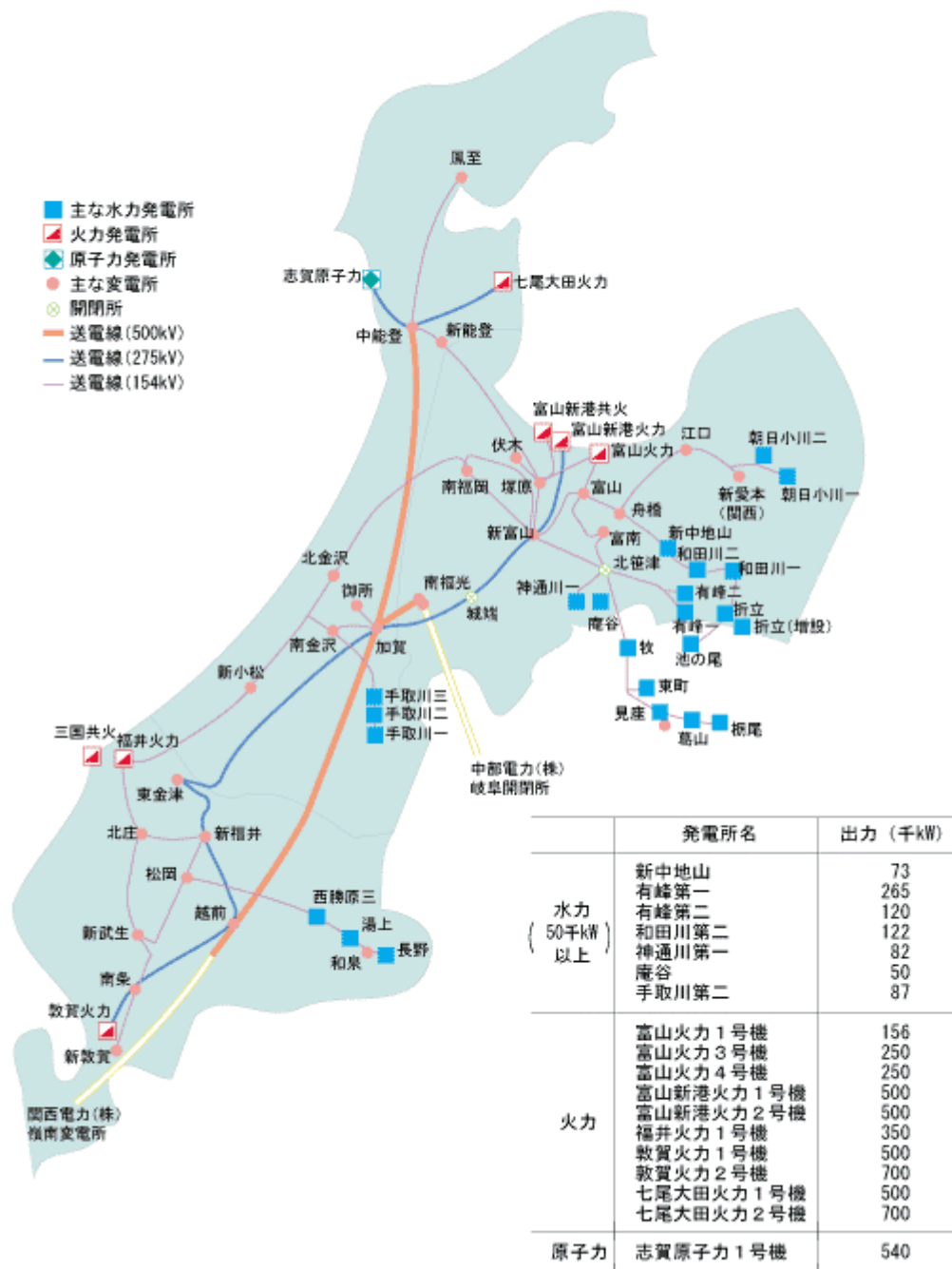


図 2.3 : 北陸地域の電力系統図

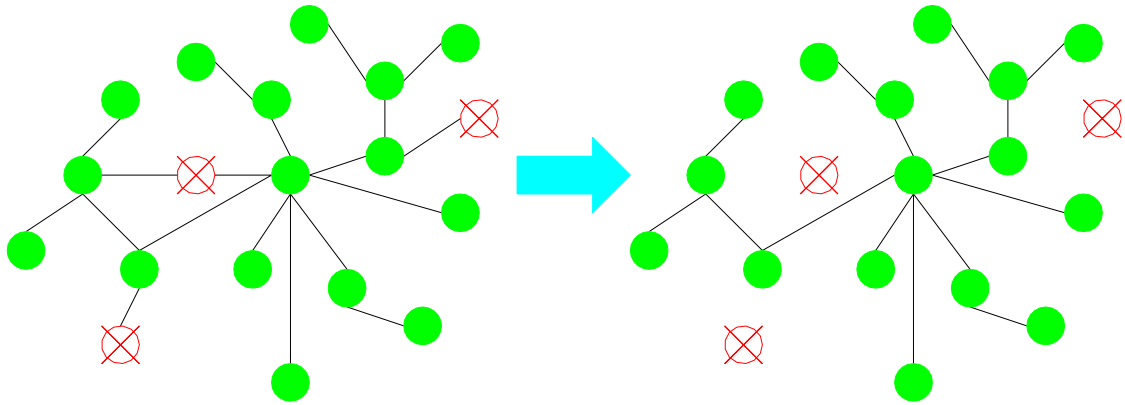
第 3 章

災害時の電力供給システムの評価方法

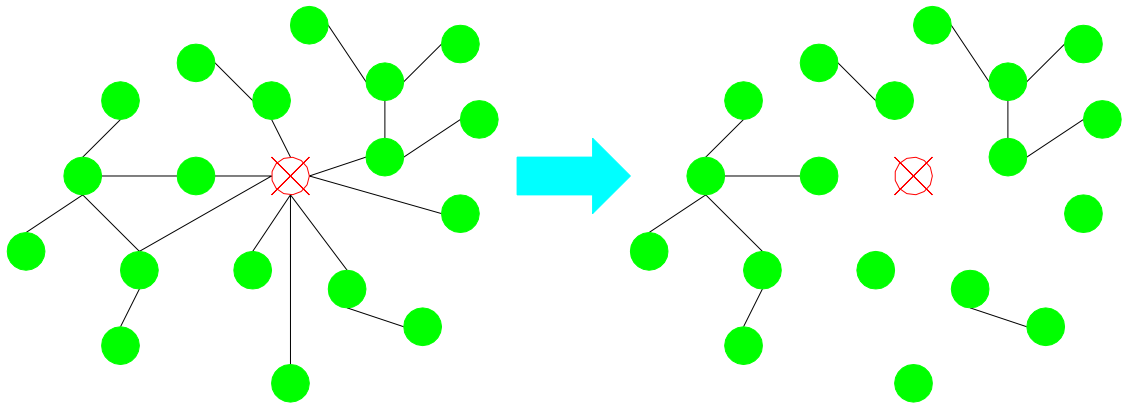
本章では，被害の発生方法と電力供給システムの評価方法について述べる．

3.1 被害の発生方法

被害の発生方法については，インターネットのアキレス腱⁽¹⁴⁾を参考にした．この研究では，電力供給システムと共通した特徴をもつ，べき乗則に従う WWW(World Wide Web)に対して，ランダムな故障とリンクが集中している ノード(Hub)の故障に対するネットワークの分断性の比較が行われている．ランダムに被害を与えた場合には，多くのノードにはリンクが一つか二つしかないため連結性は保持され，ネットワーク全体の受けるダメージは小さい．一方，Hub となっているところを集中的に故障させた場合には，図 3.1(b)のようにネットワークは極度に分断される．このように，WWW には，数は少ないがアキレス腱が存在していて，これらはWWWの弱点となっている．そこで，本研究の電力供給システムでもそのような現象が起こるのかどうかを確かめるために，被害の発生方法は，ランダムに故障させる場合と Hub となっているところを集中的に故障させる場合の 2 通りで行った．



(a) ランダムに故障させる場合



(b) Hub となっているところを集中的に故障させる場合

図 3.1 : ランダムと Hub の分断性

3.2 集中供給によるシミュレーション

被害を受ける対象としては，変電所を考えた．発電所と需要家については，電力供給システムの連結性（電力供給の可能性）をみるために被害に遭わないものとした．被害の発生方法は，故障率に応じて，ランダムに変電所を故障させていく場合と，Hub（出次数の多いノード）となっているノードから故障させていく場合で行い，発電所と需要家の連結性について調べた．

3.3 分散供給によるシミュレーション

分散供給については需要家で自家発電させ，需要家から直接繋がっている変電所に電力を供給するようにした．自家発電を行える需要家の選定方法は，自家発電の普及率に応じて，ランダムに需要家を選択していくこととした．分散供給について評価を行うために，まず，出次数が最大の発電所から順に，Hub となっているノードを故障させていくことにした．その際，Hub の故障によって分断された各クラスタ（連結領域の島）において，需要家がどのように分布しているのかを調べ，さらに，各々の故障率で自家発電の普及率を変化させていったときの，各クラスタの電力供給率について調べた．

第4章

シミュレーション結果および考察

本章では，電力供給システムにおける変電所の故障率や分散電源の普及率による耐故障性について述べる．

4.1 シミュレーションの方法

生成した電力供給システムの耐故障性を評価するために以下の2つの実験を行った．

実験1：被害の発生方法による比較（集中供給）

① ランダムに変電所を故障させた場合と，**Hub** となっている変電所を集中的に故障させた場合の需要家の電力供給率，電力供給システムの最大クラスタサイズ，平均クラスタサイズを調べた．

② ①をノード数 1000, 3000, 5000 について行い，比較した．ノード数 5000 は米西部の電力網に対応する．

◇ランダムに変電所を故障させる場合には，一つのネットワークに対して実験を 10 回行い，その結果を平均値で評価した．

実験2：**Hub** に対する故障率における分散供給

① 各々の故障率で，分散電源の普及率を変化させ，需要家の電力供給率を調べた．

② ①をノード数 1000, 3000, 5000 について行い，比較した．

以下に，それら実験の詳細とその結果について述べる．

本研究ではノード数が 5000 のものを 5 個, 3000 のものを 3 個, 1000 のものを 3 個生成した. ネットワークの個々のデータは表 4.1 のようになっている.

表 4.1 : 実験データ

	全ノード数	発電所(個)	発電所の 供給率(%)	下位発電所(個)	下位の供給率(%)	需要家(個)
電力ネットワーク モデル 1	4939	1	89.9408	8	10.0592	845
電力ネットワーク モデル 2	4938	1	90.791	7	9.209	847
電力ネットワーク モデル 3	4953	1	90.7386	6	9.2614	853
電力ネットワーク モデル 4	4923	1	90.0599	9	9.9401	835
電力ネットワーク モデル 5	4952	1	91.6076	6	8.3924	846
n=3000 モデル 1	3007	1	92.2201	2	7.7799	527
n=3000 モデル 2	2984	1	92.9273	3	7.0727	509
n=3000 モデル 3	2994	1	89.8129	8	10.1871	481
n=1000 モデル 1	1014	1	89.3855	5	10.6145	179
n=1000 モデル 2	1026	1	92.7835	5	7.2165	194
n=1000 モデル 3	1023	1	90.7386	8	9.2614	161

4.2 実験の結果

本章では、4.1 で述べた実験方法に基づいて行った結果を以下に記述する。

4.2.1 電力ネットワークモデルの検証

(1) ベキ乗則の検証

実験1,2で用いた電力ネットワークモデルがベキ乗則に準じているかどうかを見るために、電力ネットワークを生成した時点でその系に属するノードが持つ入次数、出次数についてリンクごとに計測した。

その結果を、図4.1～4.11に示す。

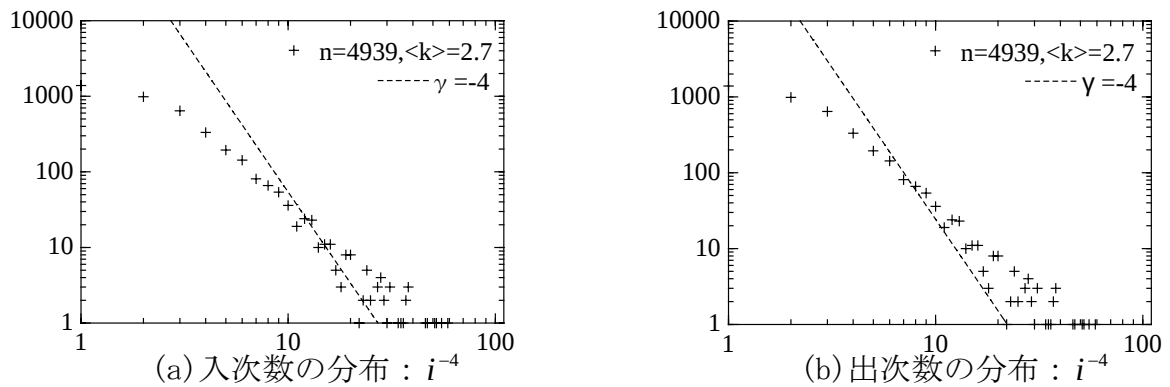


図 4.1 : 電力ネットワークモデル 1 (サイズ : $n=4939$)

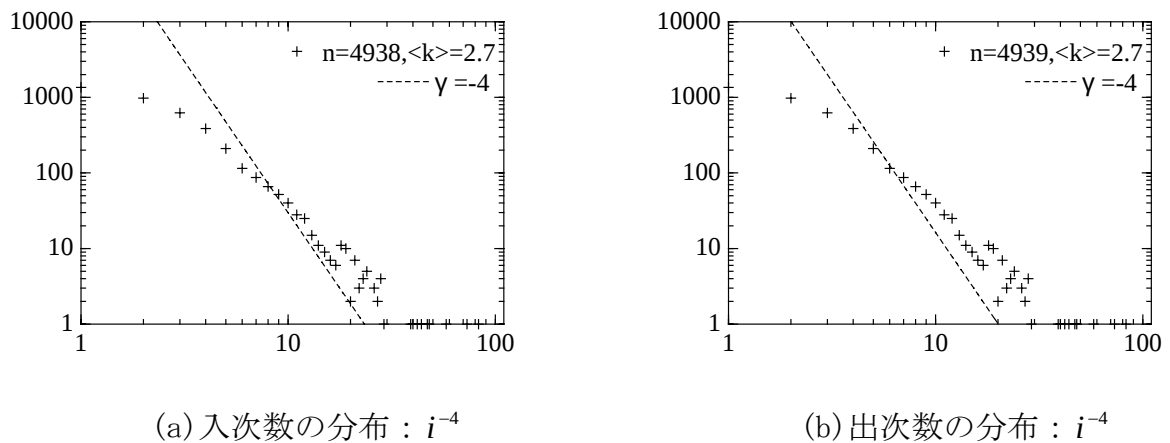
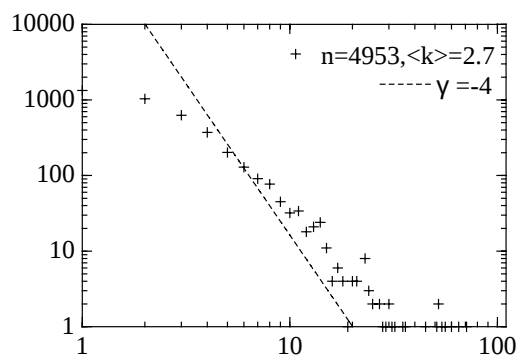
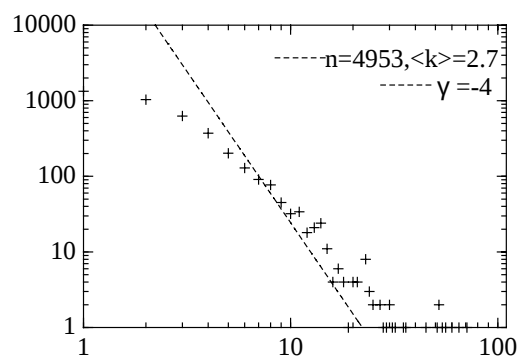


図 4.2 : 電力ネットワークモデル 2 (サイズ : $n=4938$)

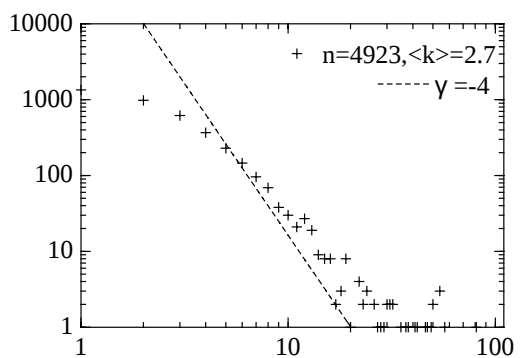


(a) 入次数の分布 : i^{-4}

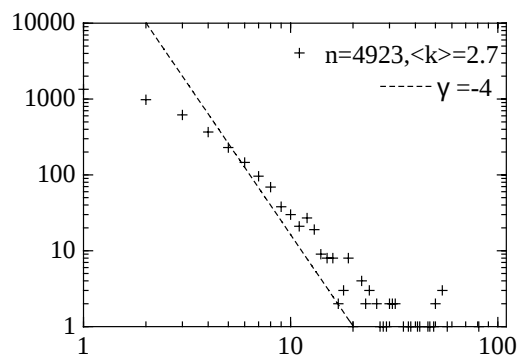


(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.3 : 電力ネットワークモデル 3 (サイズ : n=4953)

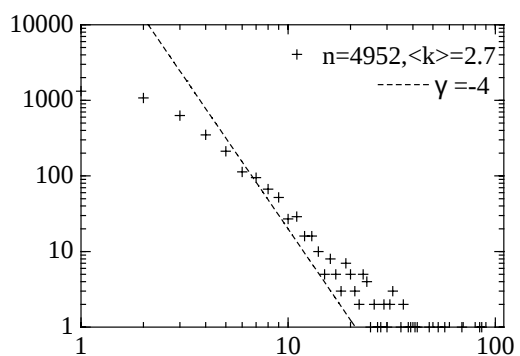


(a) 入次数の分布 : i^{-4}

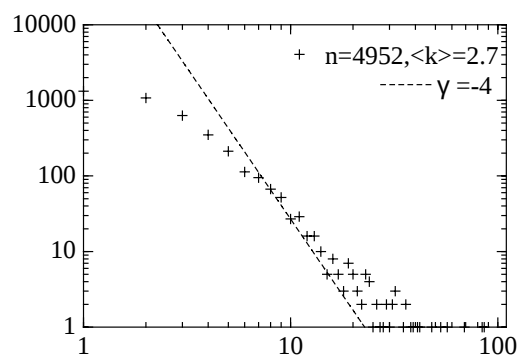


(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.4 : 電力ネットワークモデル 4 (サイズ : n=4923)

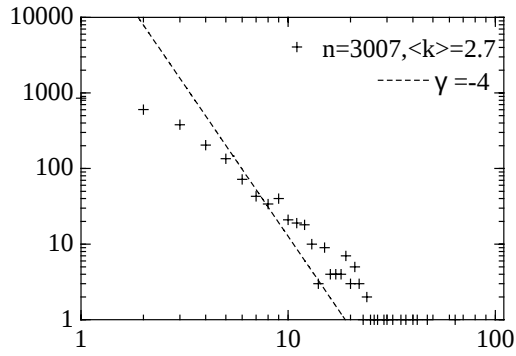


(a) 入次数の分布 : i^{-4}

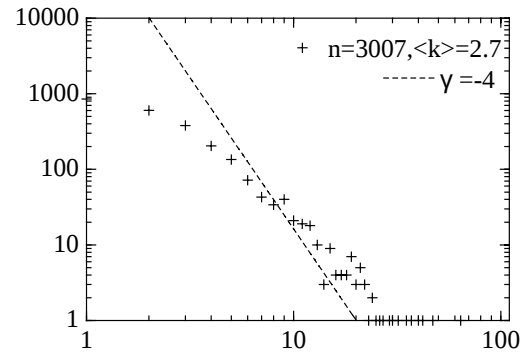


(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.5 : 電力ネットワークモデル 5 (サイズ : n=4952)

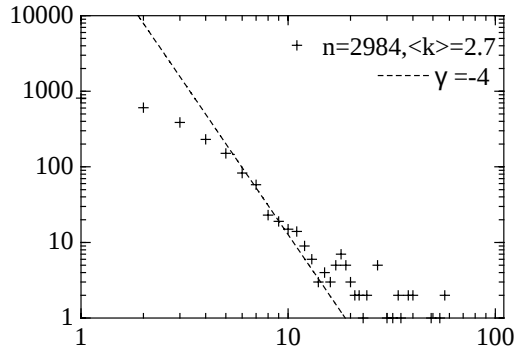


(a) 入次数の分布 : i^{-4}

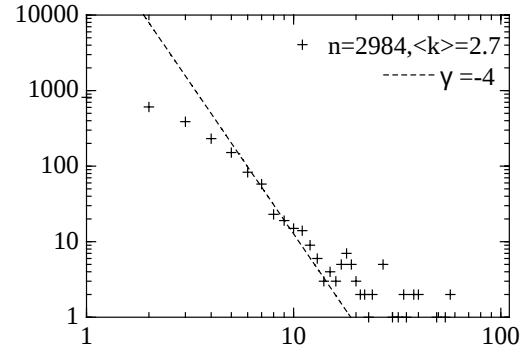


(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.6 : $n=3000$ モデル 1 (サイズ : $n=3007$)

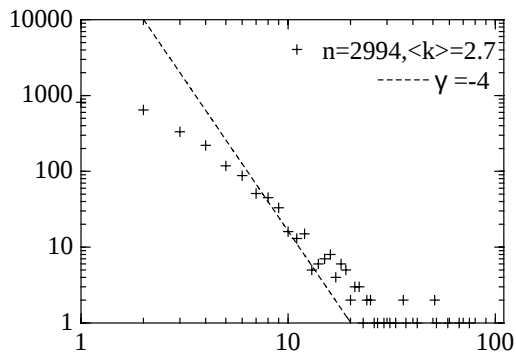


(a) 入次数の分布 : i^{-4}

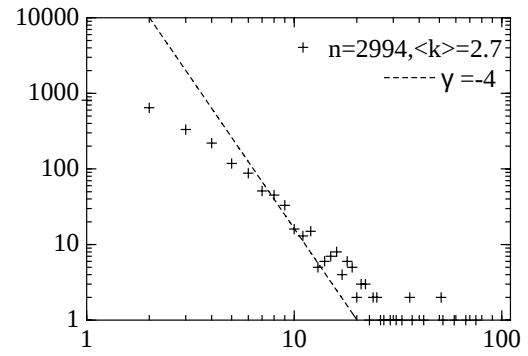


(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.7 : $n=3000$ モデル 2 (サイズ : $n=2984$)

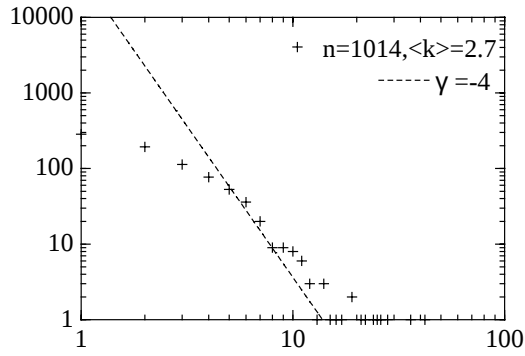


(a) 入次数の分布 : i^{-4}

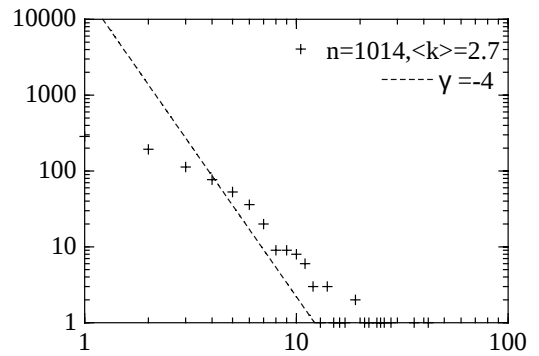


(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.8 : $n=3000$ モデル 3 (サイズ : $n=2994$)

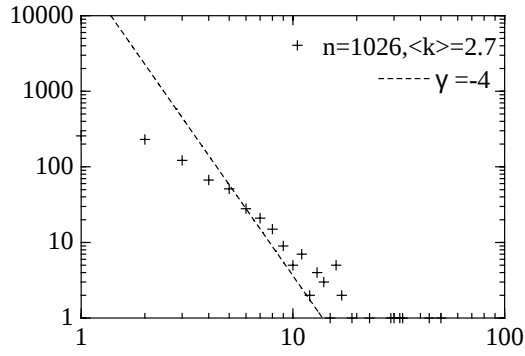


(a) 入次数の分布 : i^{-4}

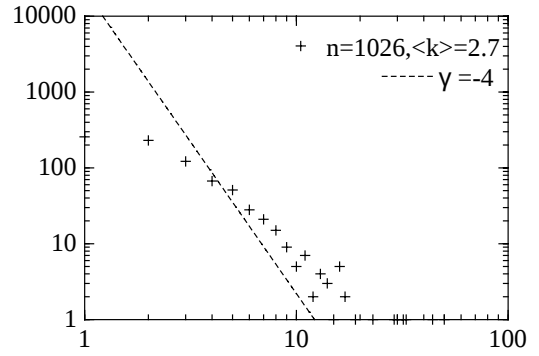


(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.9 : n=1000 モデル 1 (サイズ : n=1014)

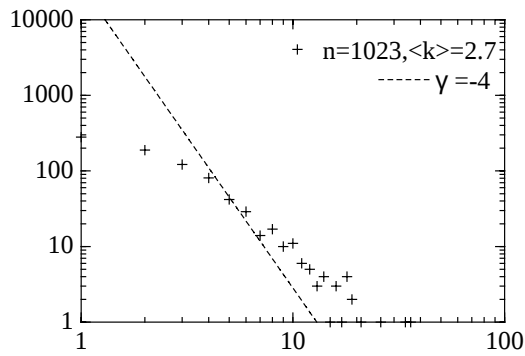


(a) 入次数の分布 : i^{-4}

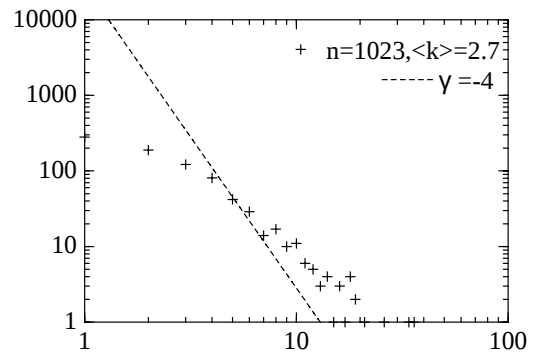


(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.10 : n=1000 モデル 2 (サイズ : n=1026)



(a) 入次数の分布 : i^{-4}



(b) 出次数の分布 : i^{-4}

図 4.11 : n=1000 モデル 3 (サイズ : n=1023)

図 4.1～図 4.5 はノード数 5000, 図 4.6～図 4.8 はノード数 3000, 図 4.9～図 4.11 はノード数 1000 に対応し, (a)は入次数, (b)は出次数の分布に対応している. 横軸はリンク数, 縦軸はノード数となっている. また図 4.1～図 4.11 に引いてある直線は米西部の電力網に対する実測値で導かれている傾き -4 となっている.

リンク数が少ないとき, 多いときが直線からのずれとなっているが, 実際のモデルも両極端のリンク数に関しては直線にのらず, 今回生成した結果のようにずれているので無視する. 図 4.1～図 4.11 はそれぞれ直線からの大きなずれはおこっておらず, べき乗則に従う結果となっている.

(2) 電力ネットワークモデルの入次数と出次数の分布について

生成したネットワークモデルの入次数と出次数の分布について, 表 4.2～表 4.4 にまとめた. これらの表は横軸に各ノードの出次数, 縦軸に入次数をとっている. すなわち, 影が付けられた列は出次数が 0 のノードなので, 全て需要家である.

表 4.2 : 電力ネットワークモデル 1 の入次数と出次数の分布(個)

in \ out	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	270	232	171	90	46	31	11	9	6	8	1
1	263	405	288	166	83	45	28	17	10	9	3	5
2	228	299	200	120	56	32	21	13	8	11	5	1
3	154	187	119	66	23	29	15	5	9	12	2	2
4	87	83	60	43	27	10	5	5	2	2	2	0
5	38	64	228	25	13	6	9	8	2	1	2	2
6	20	32	20	14	11	9	7	7	7	1	1	0
7	18	20	11	6	7	2	3	3	6	4	3	2
8	10	5	5	7	2	1	0	3	0	0	2	1
9	6	9	3	9	3	3	4	1	0	0	2	2
10	4	2	5	3	5	3	4	0	2	0	0	1
11	2	1	1	2	2	2	4	1	1	2	0	1

表 4.3 : n=3000 モデル 1 の入次数と出次数の分布(個)

in \ out	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	154	151	88	43	33	16	11	4	3	2	1
1	169	251	215	87	51	26	20	8	6	6	2	1
2	144	190	123	54	35	20	9	8	3	6	3	4
3	93	101	71	37	23	15	11	8	5	4	3	2
4	43	55	3	31	9	12	3	2	5	0	5	1
5	34	32	21	9	8	9	4	6	4	3	1	0
6	16	11	7	8	2	6	6	3	3	2	1	1
7	3	9	9	4	4	4	2	1	1	3	0	0
8	8	3	3	5	4	2	2	0	1	2	1	2
9	5	3	5	5	6	4	2	1	1	2	1	1
10	0	4	4	2	1	3	3	1	0	0	0	1
11	3	2	3	1	1	3	0	2	0	0	0	1

表 4.4 : n=1000 モデル 1 の入次数と出次数の分布(個)

in \ out	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	59	49	34	12	6	7	4	2	1	2	1
1	64	85	59	23	25	10	2	6	1	1	2	0
2	41	63	46	17	9	6	4	2	1	0	1	0
3	25	33	21	16	8	2	1	3	2	0	0	0
4	18	25	8	7	6	5	1	1	1	2	1	1
5	13	9	9	3	10	2	5	1	0	0	1	0
6	6	5	7	2	4	2	3	1	2	0	1	1
7	4	3	5	1	3	0	1	0	0	0	0	0
8	3	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
9	1	0	0	0	2	1	1	1	0	1	0	0
10	1	0	2	0	0	2	0	1	0	1	1	0
11	1	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0

これらの表をからも、入次数、出次数ともに、リンクをあまり持っていないノードは多く、リンクを多く持っているノードは少なくなるというべき乗則に従っているのが見てとれる。

4.2.2 実験1の結果：被害の発生方法による比較（集中供給）

次に, 実験1の結果を以下に記述する.

（1）発電所と需要家の連結性（電力供給の可能性）について

ランダムに変電所を故障させた場合と, Hub となっている変電所を集中的に故障させた場合の需要家の電力供給率を図 4.11, 図 4.12 に示す. また, 5 個の記号は, 電力ネットワーク 1~5 に対応している.

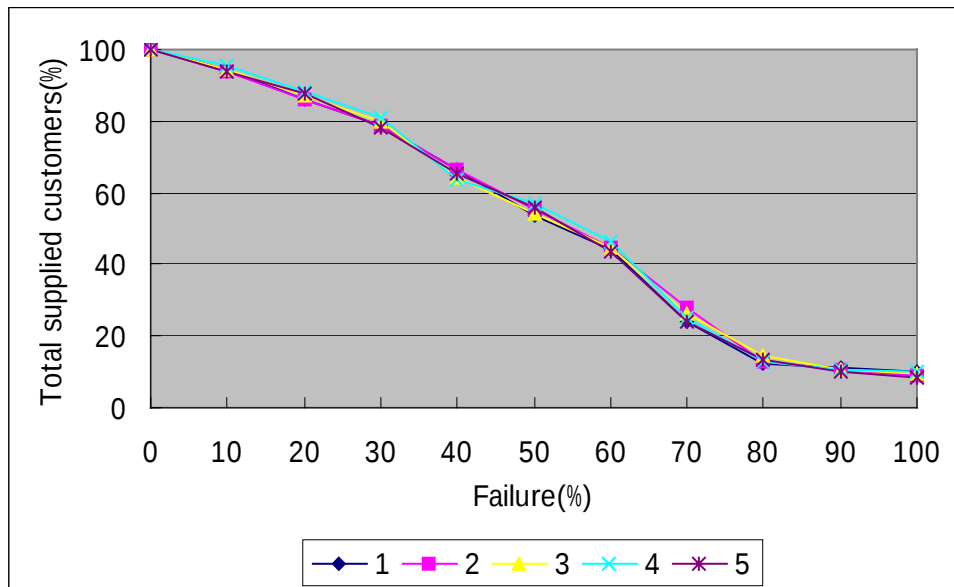


図 4.11：ランダムに被害を与えた場合の電力供給率

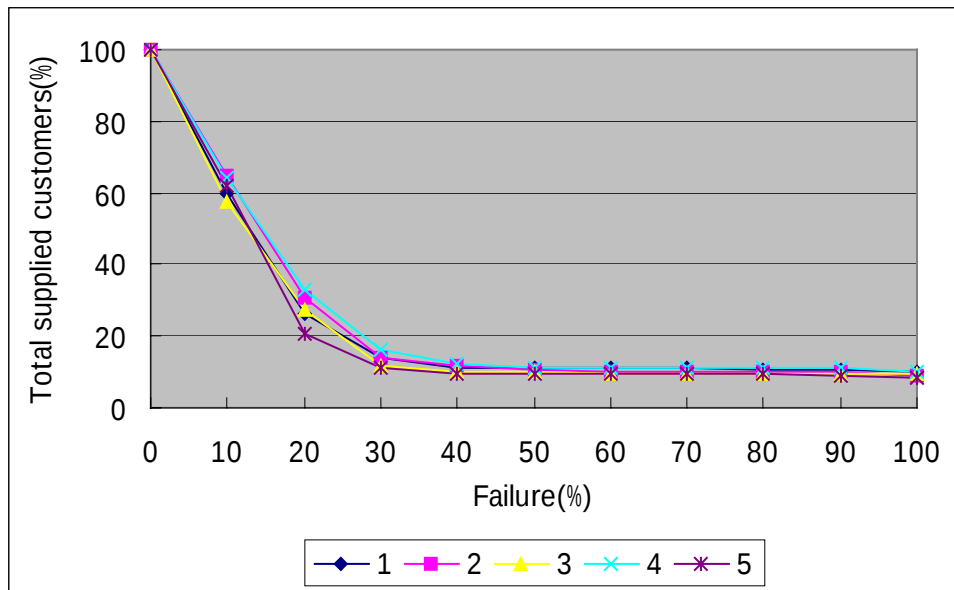
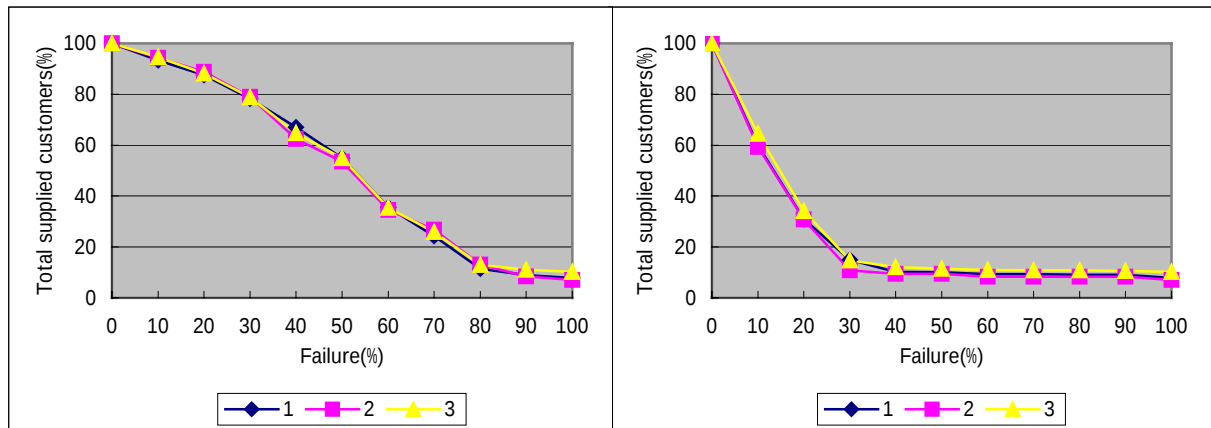


図 4.12 : Hub に被害を与えた場合の電力供給率

これらを見ると、電力供給システムが Hub に対する故障率がわずか 20% で発電所から需要家への連結性が保持されないまでに分断されるのに対して、ランダムな故障では、逆に 80% までは頑強であることが分かる。また、異なるネットワークを生成した場合においてもランダムな故障によるネットワークの分断性には、ほとんど差が見られないことが分かった。次にサイズが異なる $n=3000$ モデル、 $n=1000$ モデルについても電力供給率を調べた。その結果を図 4.13 と図 4.14 に示す。また、3 個の記号は、 $n=3000$ モデルと、 $n=1000$ モデルのモデル 1~3 に対応している。

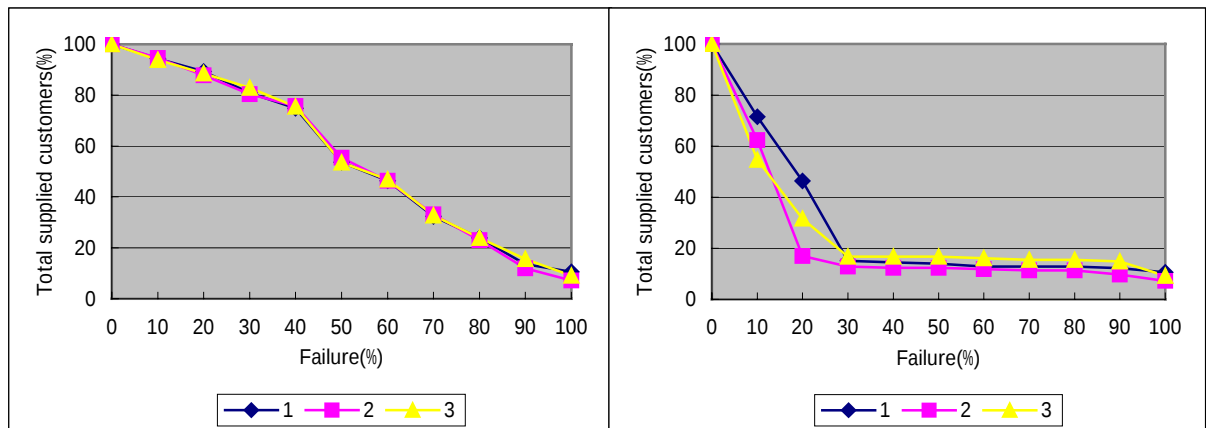
これらの結果より、べき乗則に従っているネットワークでは発電所と需要家の連結性（電力供給の可能性）にはサイズが関係していない事が確認できた。



(a) ランダムな場合

(b) Hub に対する場合

図 4.13 : $n=3000$ モデルの電力供給率



(a) ランダムな場合

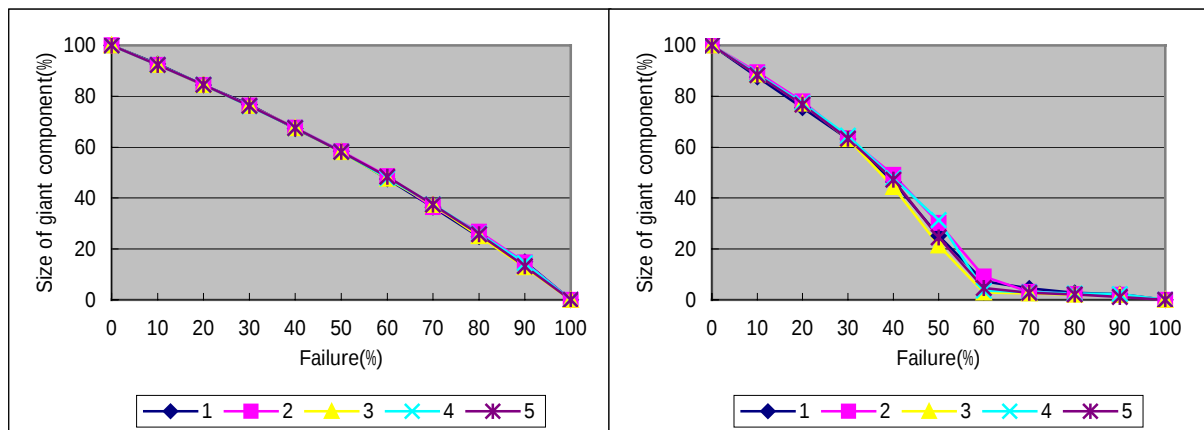
(b) Hub に対する場合

図 4.14 : $n=1000$ モデルの電力供給率

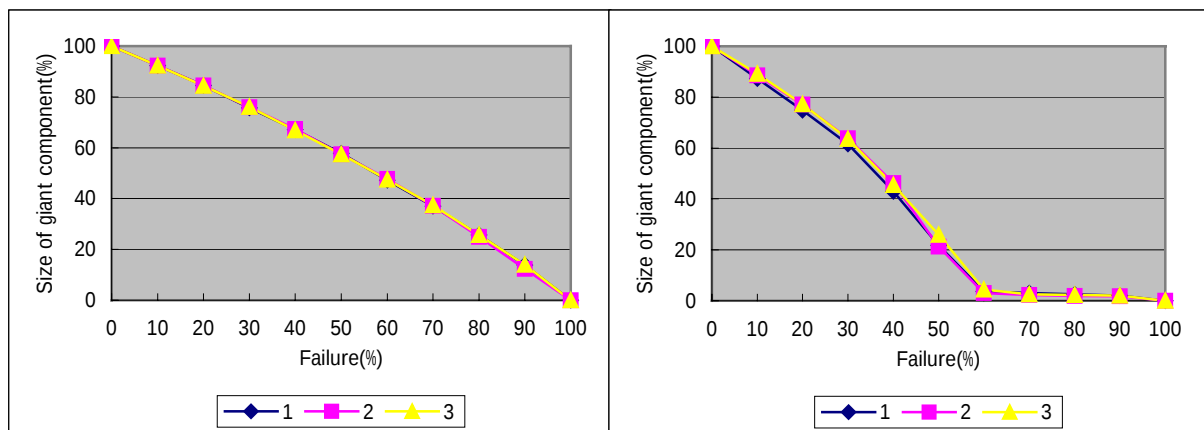
(2) 被害を受けた時の最大クラスタサイズについて

電力供給システムネットワークの構造に対する被害の影響を理解するために、ランダムに変電所を故障させた場合と、Hub となっている変電所を集中的に故障させた場合の最大クラスタサイズを調べた。以下の図 4.15～図 4.17 に示す。

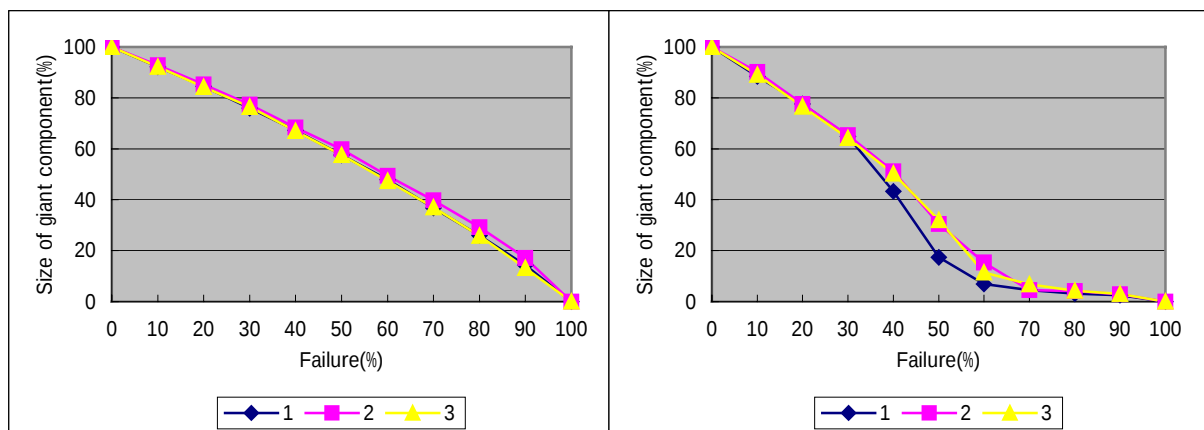
これらを見ると、最大クラスタが、Hub に対する故障率が 60% で消滅するのに対して、ランダムな故障では、逆に、100% 近くまで残っているのが分かる。また、べき乗則に従っているネットワークでは被害を受けた場合の最大クラスタサイズには最初のサイズが関係していない事が確認できた。



(a) ランダムな場合 (b) Hub に対する場合
図 4.15 : 電力ネットワークモデルの最大クラスタサイズ



(a) ランダムな場合 (b) Hub に対する場合
図 4.16 : $n=3000$ モデルの最大クラスタサイズ

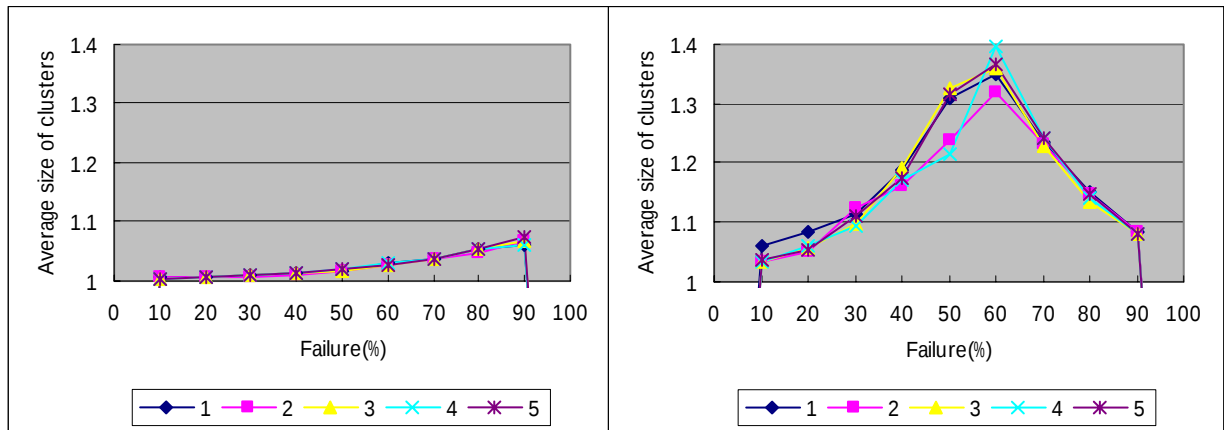


(a) ランダムな場合 (b) Hub に対する場合
図 4.17 : $n=1000$ モデルの最大クラスタサイズ

（３）被害を受けた時の平均クラスタサイズについて

ランダムに変電所を故障させた場合と，Hub となっている変電所を集中的に故障させた場合の平均クラスタサイズ（最大クラスタは除外している）を調べた．以下の図 4.18～図 4.20 に示す．

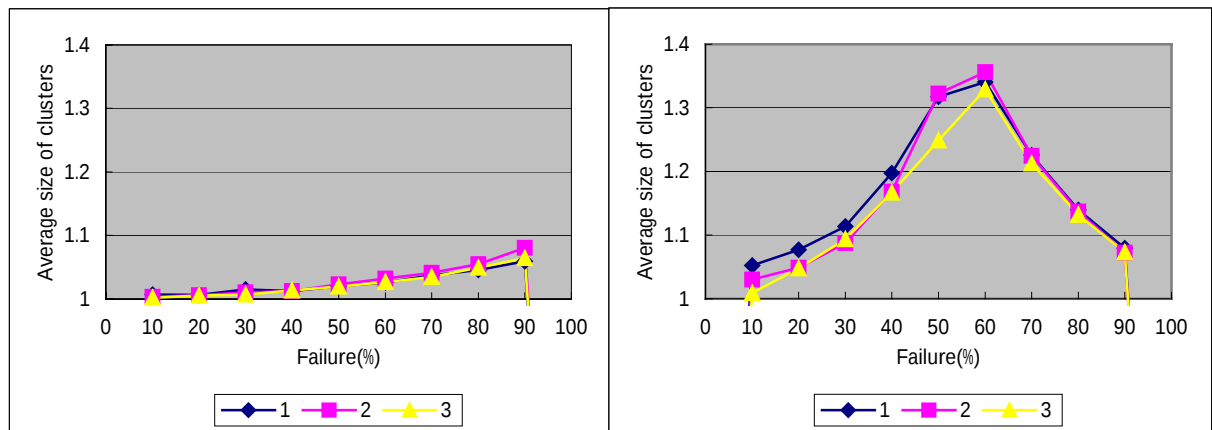
これらを見ると，平均クラスタサイズは，ランダムに故障させた場合には，故障率が高くなるに従って，増加しているのに対し，Hub に対する故障の場合には，（２）で最大クラスタが消滅した 60%のところで，最大となっている．また，べき乗則に従っているネットワークでは被害を受けた場合の平均クラスタサイズにもネットワークのサイズが関係していない事が確認できた．



(a) ランダムな場合

(b) Hub に対する場合

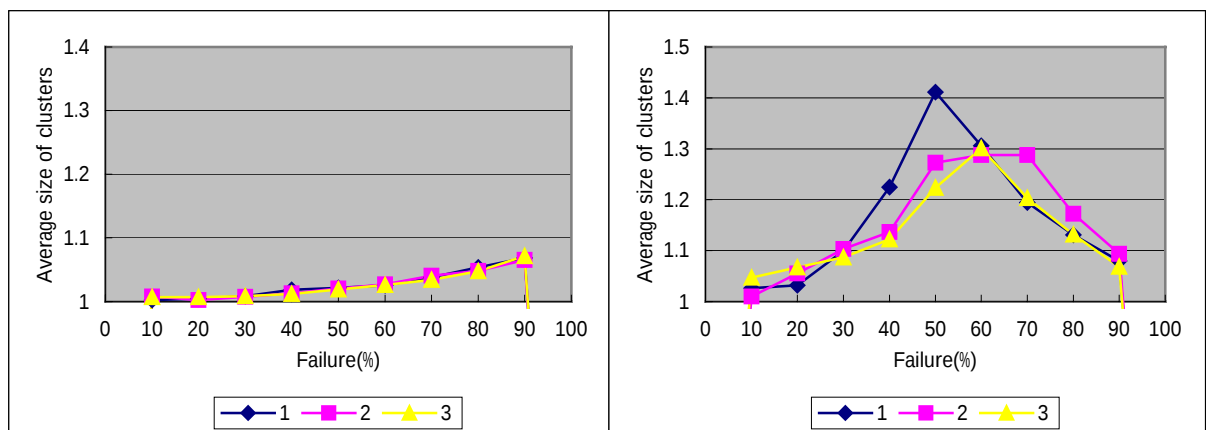
図 4.18 : 電力ネットワークモデルの平均クラスタサイズ



(a) ランダムな場合

(b) Hub に対する場合

図 4.19 : n=3000 モデルの平均クラスタサイズ



(a) ランダムな場合

(b) Hub に対する場合

図 4.20 : n=1000 モデルの平均クラスタサイズ

4.2.3 実験2の結果：Hub に対する故障率における分散供給

次に，実験2の結果を以下に記述する．

(1) 需要家の分布について

各々の故障率で需要家がどのように分布しているのかを見るために以下の4クラス

- ① 下位発電所に電力を供給されている
- ② 最大のクラスタから①を除いたもの
- ③ 分断されたクラスタに2個以上需要家があるもの
- ④ 分断されたクラスタに1個しか需要家がないもの

の分布を図4.21に示す．n=3000モデル，n=1000モデルにおける需要家の分布も図4.22と図4.23に示す．

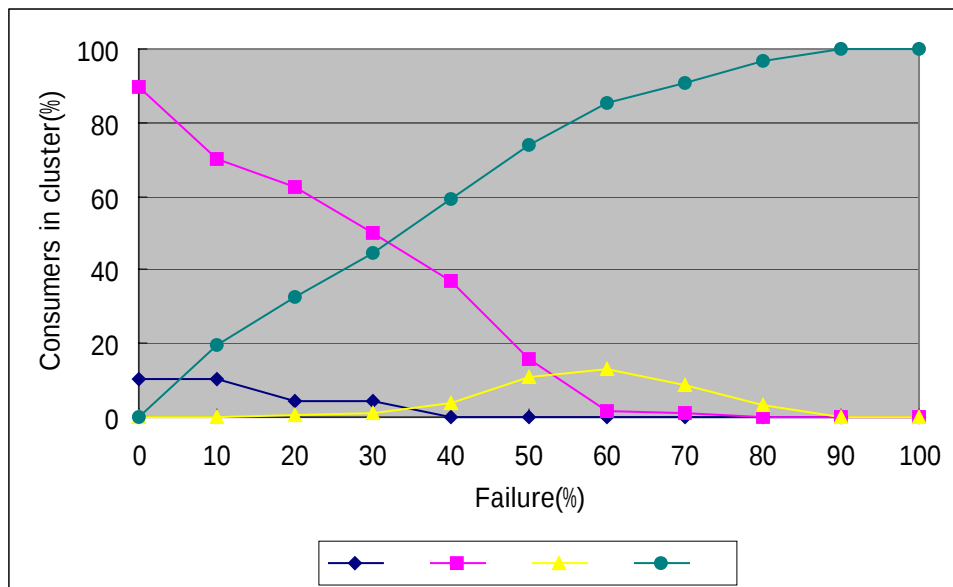


図 4.21：電力ネットワークモデルの需要家の分布

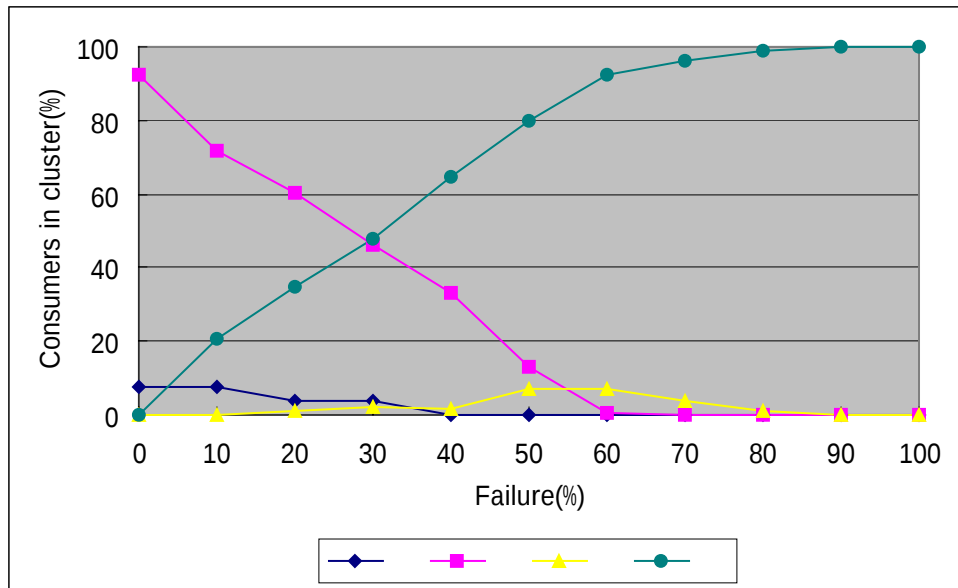


図 4.22 : n=3000 モデルの需要家の分布

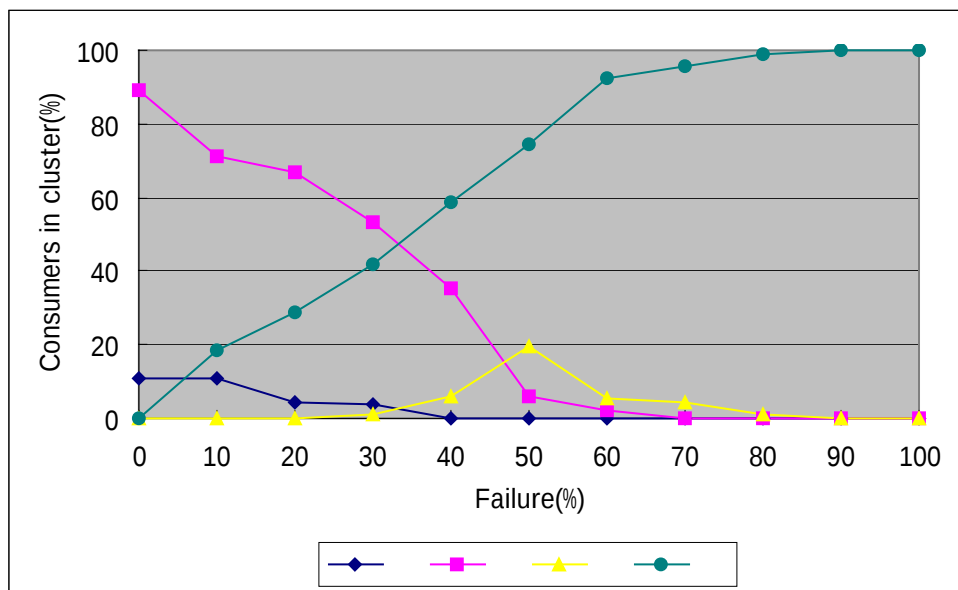


図 4.23 : n=1000 モデルの需要家の分布

いずれの場合も、故障率が高くなるに従って、②の需要家が減少していき、故障率 60%でほぼ消滅する。一方、④の需要家はほぼ線形に増加している。また、③については 60%付近で最大となっている。需要家の分布についてもサイズが関係していない事が確認できた。

(2) 各故障率における各々のクラスタでの電力供給率について

故障率 5, 20, 40, 60%の時に, 自家発電を普及させた時の各々のクラスタでの電力供給率を以下に示す.

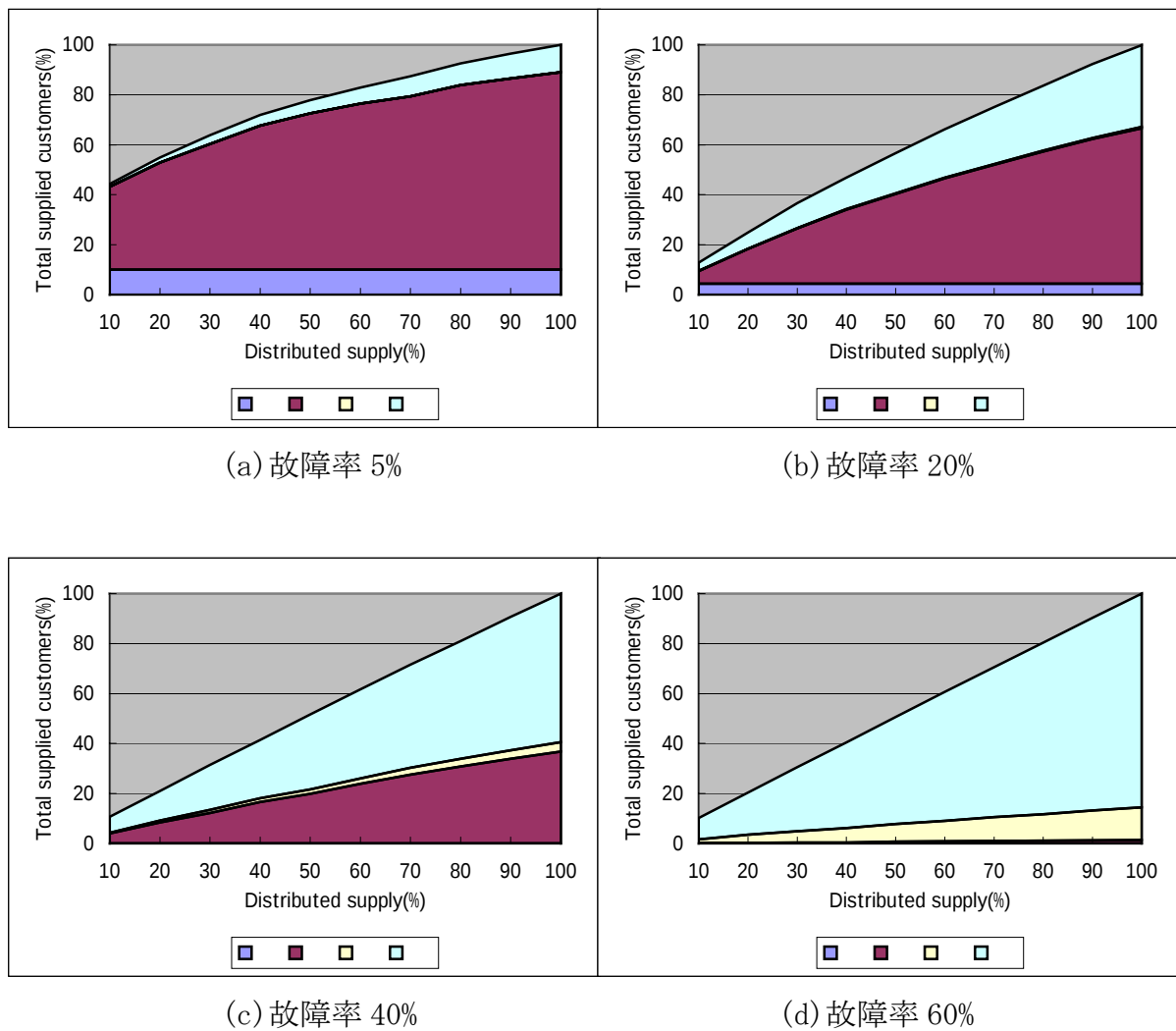
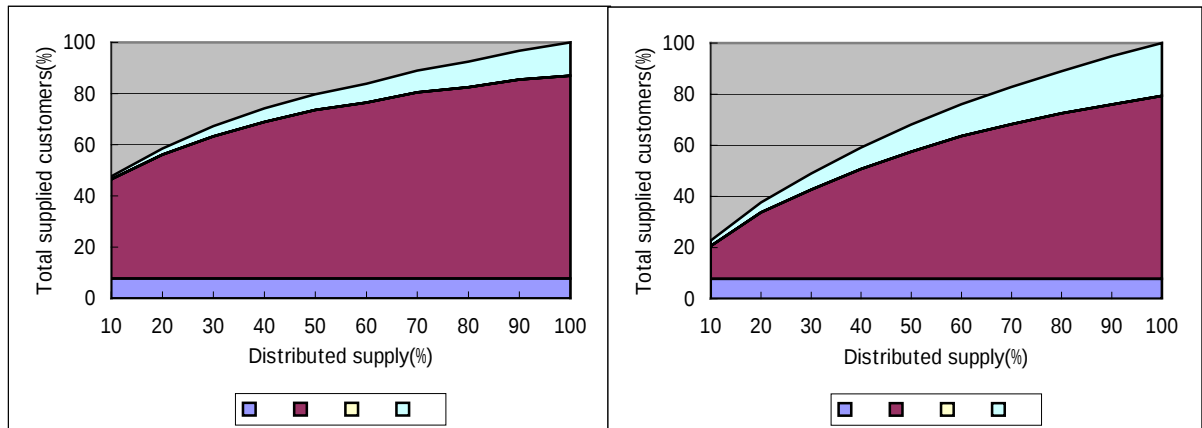
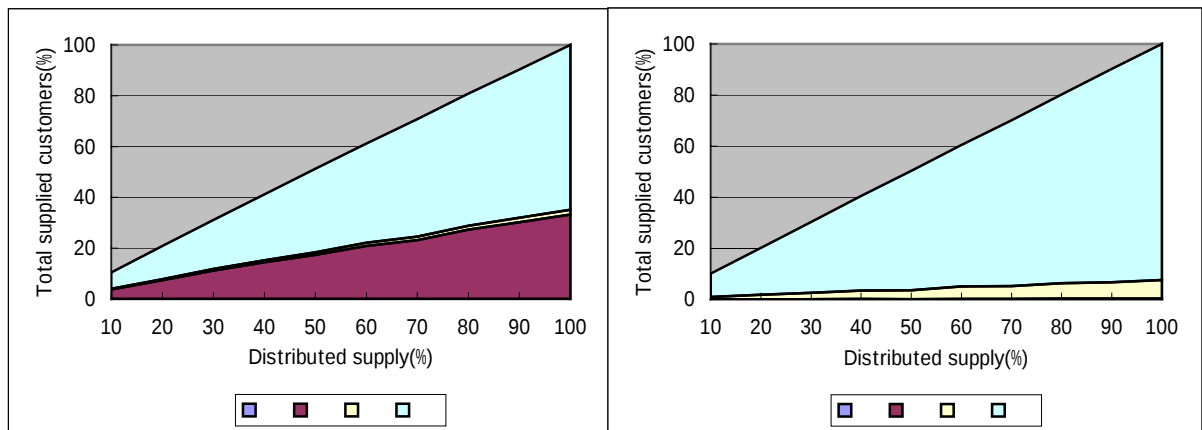


図 4. 24 : 電力ネットワークモデルにおける各々のクラスタでの電力供給率



(a) 故障率 5%

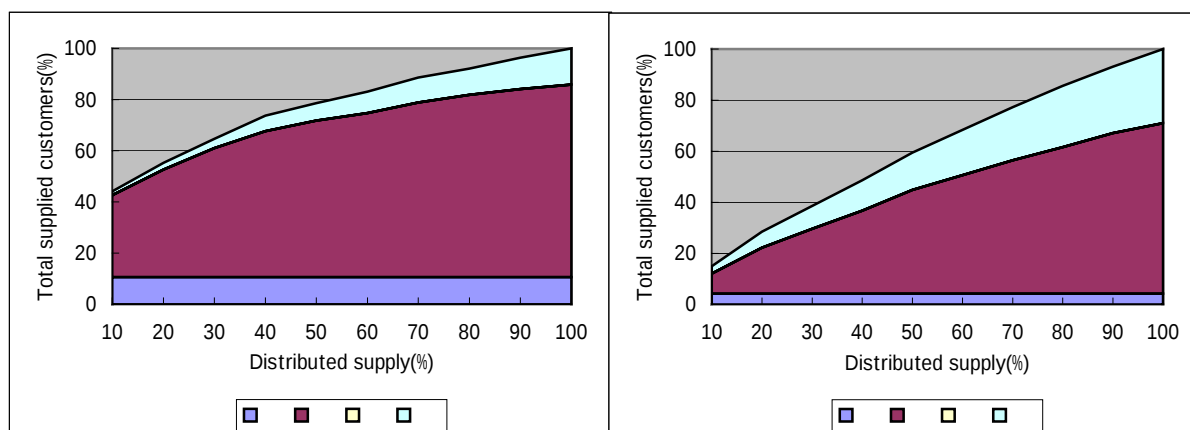
(b) 故障率 20%



(c) 故障率 40%

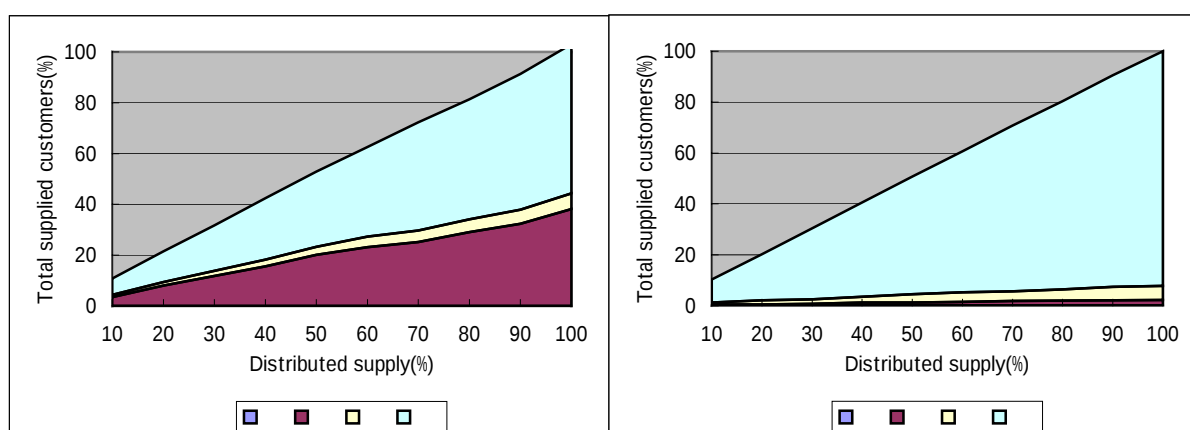
(d) 故障率 60%

図 4.25 : $n=3000$ モデルにおける各々のクラスターでの電力供給率



(a) 故障率 5%

(b) 故障率 20%



(c) 故障率 40%

(d) 故障率 60%

図 4.26 : n=1000 モデルにおける各々のクラスターでの電力供給率

いずれの場合も全体として、自家発電の普及率を上げていくと、電力供給率が増加していくことが確認できた。特に、故障率が 5%における②の需要家の場合には普及率がわずかに10%で需要家全体の約35%に電力を供給しており、災害時の緊急用電源としての有効性があると考えられる。また、故障率が 40%以上になると、下位発電所も被害に遭うため、①の需要家が消滅している。④の需要家については、いずれの故障率であっても、電力供給率がほぼ線形に増加していった。

(3) 自家発電普及率における故障率に対する電力供給効率について

ここでは、10～90%のそれぞれの普及率における故障率に対する電力供給効率を比較する。電力供給効率とは、②の需要家が一つの自家発電に対してどれだけ他の需要家に電気を供給しているのかを示したものである。各モデルにおける電力供給効率を以下に示す。

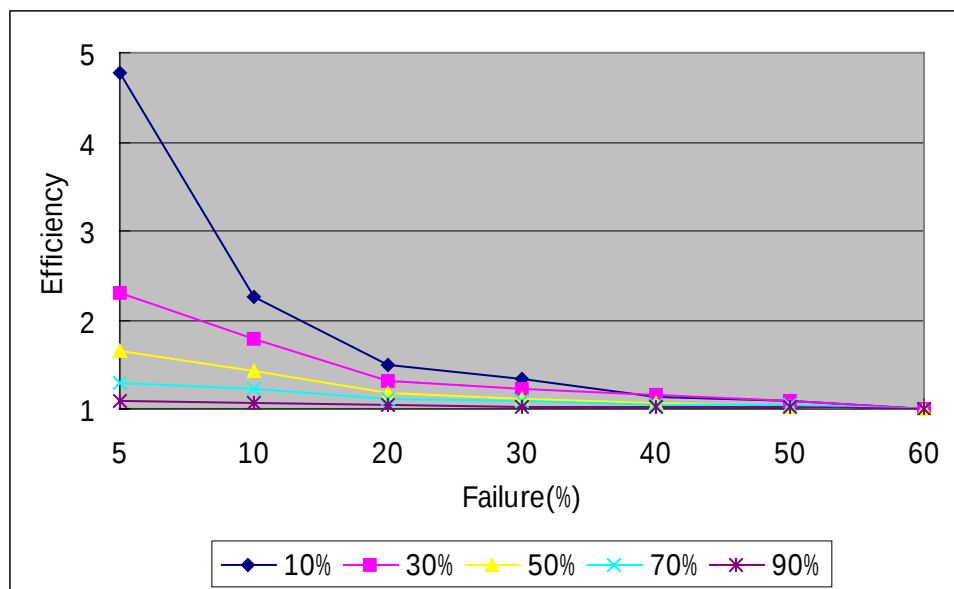


図 4.27：故障率に対する電力供給効率（電力ネットワークモデル）

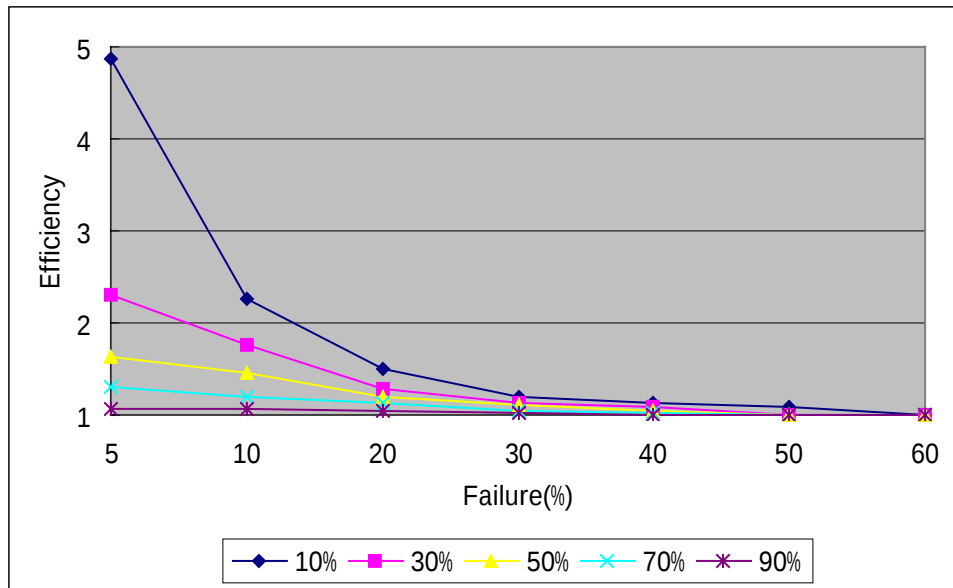


図 4.28：故障率に対する電力供給効率（n=3000 モデル）

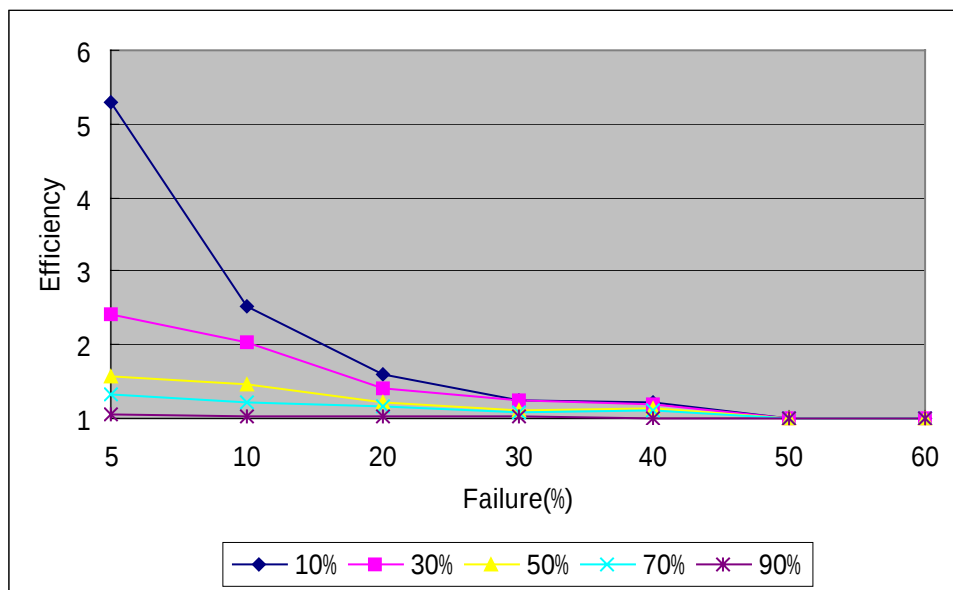


図 4.29：故障率に対する電力供給効率（n=1000 モデル）

いずれの場合も故障率が高くなるほど、効率は悪くなる。一方、同じ故障率でグラフを比較すると、普及率が低いほど、その効率は良い。特に、故障率 5%で普及率が 10%のときには、電力供給効率が約5となりかなり多くの需要家を助けることが確認できた。

第 5 章

結果のまとめと考察

5.1 実験結果のまとめ

4 章で行った実験結果を以下にまとめる.

○電力ネットワークモデルの検証

べき乗則に従うネットワークを人工的に構成するために, (α, β) モデルを用いた. 現実的なモデルとして, 米西部の電力網に対する実測値に基づいて, 入次数と出次数に関するパラメータ $\alpha=0.75$, $\beta=0.75$ と平均リンク数 $\langle k \rangle=2.7$ を設定した結果, べき乗則に従う電力ネットワークモデルを生成することが確認できた.

○被害の発生方法による比較 (集中供給)

電力供給システムの連結性は, ランダムな故障に対しては (故障率 80% まで) 非常に頑健であるが, Hub に対する故障に対しては, 非常にもろい (故障率 20% で分断). 電力供給システムネットワークの構造に対する被害の影響については, Hub に対する故障率が 60% で最大クラスタが消滅するのに対して, ランダムな故障では, 逆に 100% 近くまで残ることがわかった. (考察については 5.2.1 で述べる)

○Hub に対する故障率における分散供給

分散供給では, 自家発電の普及率 10% で全体の 35% が供給可能となり, しかも, 現実的な故障率 5~20% (ランダムの場合: 30~70%) の時, 電力供給効率が約 1.5~5 となり, 緊急用電源としての有効性が確認できた. (考察については 5.2.2 で述べる)

5.2 考察

本章では，5.1 で述べた実験結果の考察を行う．

5.2.1 被害の発生方法による比較（集中供給）

故障率に対する需要家の電力供給率，最大クラスタサイズ，平均クラスタサイズが異なるサイズのモデルでも同様な結果を得るということはべき乗則に従うネットワークの場合，スケールに対する依存性がないということである．また，最大クラスタが，Hub に対する故障率が 60%で消滅するのに対して，平均クラスタサイズは故障率が 60%になるまでは，故障率が高くなるに従って増加し 60%のところで最大となり，また減少していく．これは，故障率が 60%になるまでは，最大クラスタから切り離されるクラスタのサイズが徐々に大きくなるので，平均クラスタサイズが増加し，それ以降はその切り離されたクラスタをさらに細かく分断していくため平均クラスタサイズが減少していくものと考えられる．一方，ランダムに故障させた場合は，最大クラスタが 100%近くまで残っており，平均クラスタの方を見てもわずかに増加しているだけとなっている．このことから，ランダム故障の場合には，最大クラスタから切り離されるクラスタのサイズが小さく，平均クラスタサイズがあまり大きくならないようになっているのがわかる．

5.2.2 Hub に対する故障率における分散供給

故障率に対する需要家の分布，それぞれの普及率における故障率に対する電力供給効率ともに，異なるサイズのモデルでも同様な結果を得ている．このことから，べき乗則に従うネットワークの場合，スケールに対する依存性がないということがわかる．また，故障率が高くなるに従って，電力供給効率が悪くなる．一方，同じ故障率でグラフを比較すると，普及率が低いほど，電力供給効率が良くなっている．これは，故障率が高くなると電力ネットワークが細かく分断され需要家同士が一つのクラスタ内に存在する事ができなくなるからであると考えられる．また，普及率が高くなると，一つのクラスタ内に電力を供給する需要家が複数存在し，他の需要家に電気を供給するときに重複し，電力供給効率が低くなると考えられる．

5.2 おわりに

計算機シミュレーションを通じて，現状の発電所からの集中的な電力供給と分散型電源による電力供給との比較を行う形で研究を進めることで，電力供給システムの連結性，分散型電源の緊急用電源としての有効性を示した．本研究では変電所や送電線を単一のノードやリンクでモデル化し，それらの連結性のみから電力供給システムの耐故障性について考えたが，一つの発電所が供給できる電力量や分散電源を設置した時に生じる潮流の問題など，より現実的な状況を考慮したカスケード故障などに対するシミュレーションへの拡張が今後の課題として考えられる．

謝辞

本研究を進めるにあたって，多くの方々に多大なご支援をいただきました．この場を借りて，感謝の意を表したいと思います．

指導教官の林幸雄助教授には，研究とはどうあるべきか，発表の仕方はどのようにあるべきか，論文はどうあるべきか，など，様々なご教示，ご指導を賜りました．自由な研究環境をはじめとし，日頃の研生活全般への配慮に深く感謝いたします．また，様々な面で協力して頂いた，同講座の皆様に感謝いたします．

最後に 24 歳という年齢にもなって働きもしないで学生をやっている自分に対して寛容な心で石川での一人暮らしの心の支えになってくれた自分の家族に感謝をしたいと思います．

参 考 文 献

- (1) 社団法人 エネルギー・情報工学研究会議：機関紙「EIT」 No.34, pp.9～10, (2002).
- (2) 斎藤浩海, 佐々木明夫, 豊田淳一：分散した中都市群の電気エネルギー供給を支える開放型ネットワークの可能性, 平成 4 年度電気学会 電力・エネルギー部門大会, No.164, pp.126～127, (1992).
- (3) 岡村幸壽, 元治崇：分散型電源を含む大容量型レギュラーネットワーク系統の事故時保護協調, 電気学会論文誌 B, No.113, pp.405～412, (1993).
- (4) 八木雅浩：分散電源への期待－分散型電源の系統連系ガイドラインについて－, 電気評論, pp.6～10, (1993).
- (5) 斎藤浩海, 豊田淳一：開放型電気エネルギーネットワークの基本構想, 平成 5 年度電気学会 電力・エネルギー部門大会, No.226, pp.247～248, (1993).
- (6) 浅野浩志, 桑畑暁生：コージェネレータを含む電力供給システムのゲーム論的解析, 電気学会論文誌 B, No.113, pp.713～719, (1993).
- (7) 豊田淳一：自律的電力流通を実現するためのパケット電力輸送方式, 平成 6 年度電気学会 全国大会, No.1273, pp.256～227, (1994).
- (8) 斎藤浩海, 豊田淳一：分散型電源群の微小発生電力を効果的に輸送する将来の新しい電力ネットワーク, 電気学会論文誌 B, No.115, pp.568～575, (1995).
- (9) 斎藤浩海, 宮森敏, 島田亘, 豊田淳一：開放型ネットワークにおける自律分散的電力流通を実現する機構の基礎検討, 電気学会論文誌 B, No.117, pp.10～17, (1997).
- (10) 今中健雄, 山地憲治：不確実性を伴う需要成長下における分散型電源の配置に関する検討, 電気学会論文誌 B, No.119, pp.1035～1041, (1999).
- (11) R.Albert and A.Barabasi : “Statistical mechanics of complex networks,” Reviews of Modern Physics, Vol.74, pp.47～97, (2002).
- (12) 「北陸電力の現状」：<http://www.rikuden.co.jp/genjyo/info/main.html>.

- (13) R.Kumar, P.Raghavan, S.Rajagopalan, and A.Tomkins : "Extracting large-scale knowledge based from the web" Proc of the 25th VLDB Conf., pp.7-10, (1999).
- (14) R.Albert, H.Jeong, and A.Barabasi : "Error and attack tolerance of complex networks," Nature, Vol.406, pp.378~382, (2000).

発 表 論 文

- ・ 佛明智，林幸雄，災害時の分散型電力供給システムの耐故障性，電気学会 全国大会，東北学院大学，3 月 19 日，2003.