

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560406

研究課題名（和文） 大規模ネットワークの組織化原理とそのマクロな設計指針の解明

研究課題名（英文） AN ELUCIDATION OF THE ORGANIZING PRINCIPLE FOR LARGE-SCALE NETWORKS AND ITS MACRO DESIGN GUIDELINE

研究代表者

氏名（ローマ字）：平田 廣則（HIRONORI HIRATA）

所属機関・部局・職：千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60111415

研究成果の概要：

本研究では、ネットワーク構造を持つ大規模（複雑）システム（大規模ネットワーク）に対して、その組織化原理と、それを利用したマクロな設計指針を解明することを目的とした研究を行った。その結果、現実のネットワークをより近似するモデルを設計するためには、相互作用の大きさや内部リンク構造の変化のように、現実の大規模ネットワークが本来有している性質や組織化原理を考慮して設計を行うことが有効であることを確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
19年度	2,500,000	750,000	3,250,000
20年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：システム工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：システム工学，ネットワーク，マルチエージェント，自己組織化，生態学

## 1. 研究開始当初の背景

ネットワーク構造の立場でモデル化することが可能なシステムは、情報（インターネット、WWW など）、経済（生産・投資活動など）、工学（電力系統など）、生体（神経ネットワークなど）、生態（生態コミュニティ）などの分野に多数存在する。これらのシステムをネットワークとしてとらえることは、大規模なシステムの背後にある普遍的な組織化の原理を突き止める強力な手段となることが期待できる。

ネットワーク構造の本質は、要素（ノード）とその間の相互作用（リンク）からなり、要素間のつながりのトポロジー（リンクの有無）とその相互作用の大きさ（リンクの太さ（重み））の2点である。近年のネットワーク構造を持つシステムに対する研究では、ランダムネットワーク、スモールワールドネットワーク、スケールフリーネットワークなどを中心に、現実の大規模ネットワークをある程度表現するモデルが多数提案され、有益な結果が多数求められている。しかし、それらの議論では、直接に安定性や安全性につながる

動的性質の議論が欠落している。その原因は、これらネットワークモデルでは、トポロジー（リンクの有無）を考慮に入れているのみで、相互作用の大きさ（リンクの太さ（重み））を無視している点にある。

これまで、トポロジーだけでなく相互作用の大きさをも対象としたネットワークの議論、ならびに、ネットワークの組織化に着目した研究は、国内外にその例をみない。本研究では、相互作用の大きさを考慮したネットワークモデルの解析を行うが、その成果によって、従来のトポロジーのみに基づく研究を補完し、大規模ネットワークの動的性質の解析・設計に関する研究の重要性の一端を示すことが期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、各リンクが重みを持つ重み付きネットワークに注目し、その組織化原理とマクロな動的性質の解明を行い、トポロジーのみのデータで得られた結果を補完するとともに、より発展した議論を展開することを目的として研究を行った。

具体的には、コンピュータネットワークにおける重み付け指標を応用した、新しい重み付きスケールフリーネットワークモデル生成モデルを例として、その特徴量（ネットワークを特徴づける量）の詳細な解析を通して、重み付けのないネットワークとの違いを明らかにするとともに、その解析結果をもとに、より現実のネットワークに適応するネットワーク生成モデルの設計についての考察を行う。そして、その成果をもとに、一般的な組織化原理の解明を目指すことを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、(1)で説明する重み付きスケールフリーネットワーク生成モデルを例として、(2)で説明する特徴量の解析を行い、その成果をもとに、(3)で説明する設計指針の考察を行った。また、(4)で説明する種々の工学的ネットワークに対する考察も行った。

### (1) コンピュータネットワークにおける重み指標を用いた BA モデル

現実のネットワークをよく近似するモデルとして、スケールフリーネットワークが提唱されている。スケールフリーネットワークとは、多数のリンクを持つノードである少数のハブと、数本のリンクを持つ無数のノードからなるネットワークである。このスケールフリーネットワークを生成するモデルとして、Barabasi らによって BA モデルが提案さ

れている。BA モデルは、成長と優先的選択によってスケールフリーネットワークを生成するネットワーク成長モデルである。ここで、成長とは、時間ステップごとにノードを追加する操作のことであり、優先的選択とは、追加されたノードが既存ノードとのリンクを生成する際に、そのリンク先として、よりリンク数の多いノードを選択させることである。BA モデルによって生成されるネットワークは、その特徴量のうち、ネットワーク中のノードの密集度を表現するクラスタリング係数が、現実のネットワークが持つべき値より小さくなってしまいう傾向があった。また、現実のネットワークは、重み付きネットワークであるのに対し、BA モデルではリンクの重みが考慮されていなかった。

研究代表者らは、重み付きスケールフリーネットワークモデルとして、コンピュータネットワークにおける重み指標を BA モデルに応用したネットワーク生成モデルとして PageRank BA モデルを提案している。このモデルでは、各リンクを有向リンクに置き換えたうえで、リンクに対して Google で採用されている PageRank で算出される重みを付加し、この重みを利用して優先的選択を行っている。本研究では、PageRank BA モデルを例として、重み付きネットワーク生成モデルが持つ性質の解明を行った。

### (2) 重み付きネットワークモデルの特徴量解析

本研究では、(1)で説明した PageRank BA モデルに対して、その特徴量を解析し、従来の BA モデルとの比較を通して、重み付きネットワークが持つ性質の解明を行った。本研究で解析する特徴量とは、次数分布、平均経路長、クラスタリング係数である。次数分布とは、各ノードが持っているリンクの本数（次数）の分布のことである。平均経路長とは、ノード間の距離の平均値のことである。クラスタリング係数とは、ノードの密集度を表現する指標である。一般に、ネットワークの特徴は、上述の特徴量を用いて議論され、現実のネットワークが持つ特徴量についても、さまざまな研究によって、そのオーダがどの程度であるかが知られている。

### (3) 大規模ネットワークのマクロな設計指針の考察

(2)で説明した重み付きネットワークモデルの性質の解析の成果をもとに、まず、(1)で説明したモデルに改良を加えることで、より現実のネットワークに近いネットワークを生成するモデルの設計を行った。そして、その成果をもとに、一般の大規模ネットワークに対するマクロな設計指針の解明へ向け

た理論的考察を行った。

#### (4) 種々の工学的ネットワークに対する考察

(1)で考えたモデル以外にも、工学的ネットワークには、重みを考慮したネットワークが多数存在する。そこで、工学的ネットワークについても同様の解析・考察を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 重み付きネットワークの性質の解析

本研究では、前述した PageRank BA モデルの特徴量解析を行い、重みのない BA モデルとの比較を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ① 次数分布の解析結果から、PageRank BA モデルから生成されたネットワークが、BA モデルと同じく、スケールフリー性（次数分布が、次数のべき乗に比例する性質）を有していることを確認した。
- ② 平均経路長の解析結果から、PageRank BA モデルから生成されたネットワークが、BA モデルと同じく、スモールワールド性（総ノード数を  $N$  としたとき、平均経路長が  $\log N$  に比例する性質）を有していることを確認した。
- ③ クラスタリング係数の解析結果から、PageRank BA モデルから生成されたネットワークが、BA モデルから得られるネットワークより大きなクラスタリング係数を有することを確認した。

以上の結果から、重み付きネットワーク生成モデルの1つである PageRank BA モデルは、重みのない BA モデルの持つクラスタリング係数についての問題点がある程度解消し、より現実のネットワークに近いネットワークを生成していることを確認した。この結果は、現実のネットワークが本来有している、相互作用の大きさ（重み）をネットワーク生成モデルに導入することが、現実のネットワークをよく近似するモデルを設計するにあたって有効であることを示唆している。

#### (2) 内部リンク構造の変化を伴う重み付きネットワークの提案

上述したように、PageRank BA モデルは、重みのない BA モデルと比較して、クラスタリング係数が大きくなるという意味で、より現実のネットワークに近いネットワークを生成することを確認したが、現実のネットワークが持つクラスタ性（クラスタリング係数が、総ノード数とは関係なく定数関数的な値をとる）を満たすほど大きい値にはならない。

ところで、現実のネットワークの成長過程では、ノードが追加されずにリンクだけが増減する、すなわち、リンク構造の変化が起きることが知られている。

そこで本研究では、ネットワークの成長原理に、一定確率（この確率をリンク構造変化率とよぶ）で、ノードの追加の代わりに、リンクの重みを考慮したリンク構造の変化を行う操作を加えた「内部リンク構造の変化を伴う PageRank BA モデル」を提案し、その性質についての解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ① 次数分布の解析結果から、内部リンク構造変化を伴うモデルから生成されたネットワークが、従来のモデルと同様に、スケールフリー性を有することを確認した。
- ② 平均経路長の解析結果から、平均経路長が、リンク構造変化率について可変で、リンク構造変化率が大きいほど、平均経路長が小さくなることを確認した。また、リンク構造の変化率をあまり大きくすると、スモールワールド性が失われることも確認した。
- ③ クラスタリング係数の解析結果から、クラスタリング係数が、リンク構造の変化率について可変であり、リンク構造変化率が大きいほど、クラスタリング係数が大きくなることを確認した。

以上の結果から、内部リンク構造の変化を導入することにより、平均経路長とクラスタリング係数が可変なネットワーク生成モデルを構築でき、内部リンク構造変化率を適切に設定すれば、より現実のネットワークに近いネットワークを生成し得ることを確認した。この結果は、現実のネットワークが本来有している、内部リンク構造の変化をネットワークの組織化原理として、ネットワーク生成モデルに導入することが、現実のネットワークをよく近似するモデルを設計するにあたって有効であることを示唆している。

#### (3) 大規模ネットワークのマクロな設計指針と今後の展望

(1)と(2)で得られた知見から、現実のネットワークをより近似するネットワーク生成モデルを設計するためには、相互作用の大きさ（重み）や内部リンク構造の変化のように、現実のネットワークが本来有している性質や組織化原理を考慮して設計を行うことが重要であることを確認した。また、(2)で得られた知見から、内部リンク構造の変化率のように、適切な組織化原理に伴う調整パラメータの導入によって、ネットワークの特徴量を適切に調整可能であることも確認した。

本研究では、現実のネットワークをより近似することを目的として研究を進めてきたが、本研究で得られた設計指針は、望まれる（所望の）構造・特性を有する大規模ネットワークを生成するための最適設計に応用することができる。今後の展望としては、種々の最適化手法の援用した、所望の大規模ネットワーク最適設計手法の開発が期待される。

#### (4) パルスニューラルネットワークの学習法の改良

生物における脳の神経回路ネットワークの工学モデルの1つで、重み付きネットワークの1つであるパルスニューラルネットワークに注目し、その学習効率を改善する手法を提案した。ここでいう「学習」とは、重み付きネットワークの重みを調整する操作に相当し、これを適切に調整する手法は、重み付きネットワークの最適設計手法への応用が期待される。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 山本 健二, 小坏 成一, 岡本 卓, 平田 廣則, パルスニューラルネットワークのための学習率最適化を用いた誤差逆伝搬法, 電気学会論文誌 C, 査読あり, 第 128 巻, 第 7 号, 2008 年, 1137-1142,

[学会発表] (計1件)

- ② 安部 尚大, 小坏 成一, 岡本 卓, 平田 廣則, リンク構造の変化を伴う PageRank BA モデルの解析, 平成 20 年 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2008 年 8 月 21 日, 公立はこだて未来大学(北海道函館)

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

平田 廣則 (HIRONORI HIRATA)  
千葉大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60111415

#### (2) 研究分担者

小坏 成一 (SEIICHI KOAKUTSU)  
千葉大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70241940

岡本 卓 (TAKASHI OKAMOTO)  
千葉大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40451752

#### (3) 連携研究者