社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

論文の引用・共著関係から何が分かるか?

— ネットワーク分析手法からのアプローチ —

杉山　浩平† 　大崎　博之† 　今瀬　眞†

† 大阪大学 大学院情報科学研究科
〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5
E-mail: †{k-sugi,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　近年、現実に存在するさまざまな複雑ネットワークの構造への注目が高まっている。このようなネットワークの構造が持つ特性は、例えば情報検索・データマイニング等へ、さまざまな形で応用が可能であると考えられる。しかし、ネットワークの構造からどのようなことが分かるか、また、ネットワークの構造をどのように活用できるかについては、これまで十分な検討が行なわれていない。そこで本稿では、論文の参考文献一覧・著者情報をもとに、論文の引用関係ネットワークおよび論文の共著関係ネットワークを構築する。さらに、ソーシャルネットワークの分析に用いられている、ネットワーク分析手法を適用することにより、論文の引用・共著ネットワークがどのような構造になっているかを明らかにする。その結果、論文の引用関係ネットワークはグループ構造を持たないこと、ノードの入次数 (論文の被引用数) の分布がべき乗則に従うことなどが分かった。また、論文の共著関係ネットワークはグループ構造を持つこと、スケールフリー構造を持つことなどが分かった。
キーワード　論文の引用関係ネットワーク、論文の共著関係ネットワーク、ソーシャルネットワーク、スケールフリーネットワーク

Structural Analysis of Paper Citation and Co-Authorship Networks

— Approach from Network Analysis Techniques —

Kouhei SUGIYAMA†, Hiroyuki OHSAKI†, and Makoto IMASE†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan
E-mail: †{k-sugi,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　In recent years, attention to the structure of existing several complex networks has been increasing. The characteristic of such structure of complex networks is applicable in several forms to, for instance, information retrieval and data mining applications. However, in the literature, it has not been sufficiently investigated what the structure of complex networks tells and how the structure of complex networks is applicable. In this paper, we therefore build a paper citation network and a paper co-authorship network from information on authors and references of a large number of research papers. We then investigate structures of paper citation/co-authorship networks by applying several network analysis techniques, which have been widely used in social network analysis. Our findings include that the paper citation network has less grouped structure, and that the tail of the in-degree distribution function follows a power law with $\gamma = 2.7$. We also found that that the paper co-authorship network has grouped structure, and that it has a scale-free property.
Key words　Paper Citation Network, Paper Co-Authorship Network, Social Netwrok, Scale-Free Network

1　はじめに

近年、現実に存在するさまざまな複雑ネットワークの構造への注目が高まっている [1]。例えば、現実のネットワークの構造から、どのようなことが分かるかを明らかにする研究の一つとして、人と人の交流によって構築されるソーシャルネットワークに関する研究がさかんに行われている [2–4]。また、ネットワーク分析手法と呼ばれる手法を用いることにより、Web ページのハイパーリンク構造や学術論文の共著者関係 (論文を共同で執筆したことがあるかどうかの共著関係) など、現実のさまざまなネットワークの構造を分析する研究もさかんに行われている [1,5,6]。例えば文献 [5] では、映画俳優のネットワーク (映

画で共演したことがあるかどうかを表すネットワーク) を分析している。その結果、映画俳優のネットワークでは、任意の俳優 (= ノード) 間のネットワーク距離 (ノード間の最短経路の最大値) が小さいこと、ネットワークがクラスタ構造を持つことなどが示されている。また文献 [6] では、数学の共著者関係ネットワークの特徴を明らかにしている。数学の共著者関係ネットワークでは、一つの論文に対する共著者が 3 人程度と少なく、ネットワークがクラスタ構造を持つことなどが示されている。

現実に存在するネットワークの構造が、どのような規則によって決定されているのか、また、現実に存在するさまざまなネットワークが、なぜスモールワールドやスケールフリーと呼ばれる性質を持つのかについても数多くの研究がなされている [7, 8]。例えば文献 [7] では、ソーシャルネットワークの特徴を再現できる、簡単なネットワーク生成モデルを提案している。

このようなネットワークの構造が持つ特性は、さまざまな形で応用が可能であると考えられる。例えば、ネットワークの構造が持つ性質を利用することにより、単なるキーワード検索ではなく、一歩進んだ情報検索システムの構築が可能になると期待される。近年、ネットワークの構造を利用した情報検索手法もいくつか提案されているが [9]、ネットワークの構造からどのようなことが分かるか、また、ネットワークの構造をどのように活用できるかについては、これまで十分な検討が行なわれていない。

そこで本稿では、現実に存在するネットワークとして、論文の引用関係ネットワークおよび論文の共著関係ネットワークに着目し、それらのネットワークの構造からどのようなことが分かるかを調査する。ここで、「論文の引用関係ネットワーク」とは、各論文間の引用関係を表現したネットワークであり、「論文の共著関係ネットワーク」とは、論文の著者間の共著関係の有無を表現したネットワークである。ネットワーク分析手法を適用することにより、論文の引用・共著者関係ネットワークの構造を明らかにすることを目標とする。

本稿では、まず、論文の引用・共著関係をネットワークとして表現する。具体的には、文献データベース [10] から引用関係および共著関係の情報を抽出し、論文の引用・共著関係ネットワークを構築する。次に、ネットワーク分析手法を適用することにより、論文の引用・共著関係ネットワークの構造を分析する。その結果、論文の引用関係ネットワークはグループ構造を持たないこと、ノードの入次数 (論文の被引用数) の分布がべき乗則に従うことなどを示す。また、論文の共著関係ネットワークはグループ構造を持つこと、スケールフリー構造を持つことなどを示す。

本稿の構成は以下の通りである。2 章では、論文の引用関係ネットワークを、文献データベースからどのように構築したかを説明する。さらにネットワーク分析手法を用いることにより、論文の引用関係ネットワークの平均経路長・クラスタリング係数・次数分布を調査する。3 章では、2 章と同様の手法により、論文の共著関係ネットワークを構築するとともに、ネットワーク分析手法により、その特性を調査する。最後に、4 章において本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 論文の引用関係ネットワーク

2.1 ネットワークの構築

本稿において、「論文の引用関係ネットワーク」とは、各論文間の引用関係を表現したネットワークを意味する。一般に、各論文は複数の論文を引用しており、引用された論文を末尾に参考文献一覧として記載している。論文の引用関係ネットワークでは、各論文がノードに対応し、論文間の引用関係がリンクに対応する。

論文の引用関係の例を図 1 に示す。図 1 のように、論文 A や論文 B をノード A やノード B として表現する。論文 B が論文 A を引用していれば、この引用関係をノード B からノード A の有向リンクとして表現する。このように、論文の引用関係をネットワークとして表現することで、論文間の引用関係の構造を分析することが可能となる。

本稿では、文献データベース [10] から論文の参考文献一覧の情報を入手し、論文の引用関係ネットワークを構築した。この

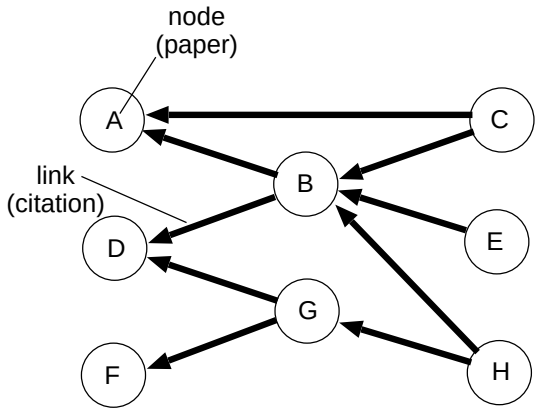

図 1: 論文の引用関係ネットワークの例

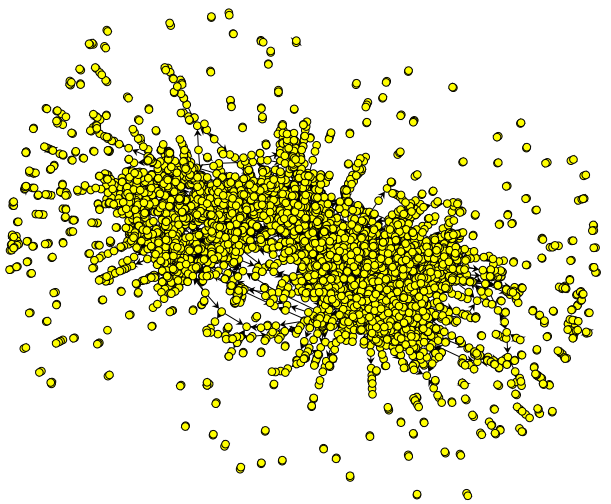

図 2: 論文の引用関係ネットワーク

文献データベースは、1952 ~ 2004 年に IEEE Communications Society の論文誌・国際会議予稿集に掲載された論文の情報を収録している。このデータベースには、各論文のタイトル・著者・キーワード・参考文献一覧などの情報が含まれている。

この文献データベースにエントリが存在する論文を、論文の引用関係ネットワークのノードに対応させた。また、参考文献一覧の情報より、論文の引用関係ネットワークのリンクを生成した。論文の引用関係ネットワークは有向グラフとして表現した。論文の参考文献一覧には、このデータベースに含まれていない論文が存在するが、それらの論文へのリンクは生成していない。このようにして構築した、論文の引用関係ネットワークを図 2 に示す。

論文の引用関係ネットワークの基本的な特性を表 1 に示す。この表から分かるように、ノード数 N は 27,865 であり、平均次数 $\overline{k}$ は 3.69 である。また表中には、平均距離 ℓ およびクラスタリング係数 C の値も示しているが、これらの値の意味は次節以降で説明する。

2.2 平均経路長

まず、論文の引用関係ネットワークの平均経路長 ℓ を求める。これにより、論文の引用著関係ネットワークにおいて、論文と論文がネットワーク的にどのくらいの距離を持つのか、つまり、それぞれの論文がどの程度密接に引用関係を持っているのかを調査する。

2.1 節では、論文の引用関係ネットワークを、有向グラフと

表 1　論文の引用・共著関係ネットワークおよびソーシャルネットワークの特性

	N	$\overline{k}$	ℓ	C
論文の引用関係ネットワーク	27,865	3.69	40	0.24
論文の共著関係ネットワーク	24,841	4.76	2	0.76
Web ハイパーリンク構造 [11]	269,504	5.55	11.27	0.29
インターネットにおける AS 間のトポロジ [11]	10,697	5.98	3.31	0.39
数学の共著関係ネットワーク [6]	70,975	3.9	9.5	0.59
物理の共著関係ネットワーク [12]	52,909	9.27	6.19	0.56
映画俳優のネットワーク [5]	225,226	61	3.65	0.79

して表現した。平均経路長を求めるために、以下では、論文の引用関係ネットワークを無向グラフとして表現する。これは、論文と論文が引用関係数によって、どの程度の距離があるかを調査するためである。

ノード数を N とすると、ネットワークの平均経路長 ℓ は次式で定義される [13]。

$$\ell \equiv \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} \ell_{ij} \tag{1}$$

ここで、ℓ_{ij} は、ノード i からノード j への最短経路の長さである。なお、ノード数 N、平均次数 $\overline{k}$ である、ランダムネットワークの平均経路長 ℓ_{rand} は

$$\ell_{rand} \sim \frac{\ln N}{\ln \overline{k}} \tag{2}$$

となることが知られている [1]。

平均経路長の計算に要する計算量のオーダは、ネットワークのノード数を N とすると $O(N^3)$ である [14]。論文の引用関係ネットワークでは、ノード数 N が大きいため、平均経路長を計算するためには膨大な計算が必要となる。そこで本稿では、論文の引用関係ネットワークの部分ネットワークの平均経路長を計算することにより、ネットワーク全体の平均経路長を推定する [15]。具体的には、論文の引用関係ネットワークから N' 個のノードをランダムに選択することにより、部分ネットワークを生成する。異なるノード数 N' に対して、部分ネットワークの平均経路長を計算することにより、論文の引用関係ネットワーク全体の平均経路長を推定する。

論文の引用関係ネットワークの部分ネットワークのノード数 N' と平均経路長の関係を図 3 に示す。図 3 では、ノード数 N' を変化させた時の、部分ネットワークの平均経路長をプロットしている。図中には、ランダムネットワーク、Web のハイパーリンク構造 (web hyperlink) [11]、インターネットにおける AS 間のトポロジ (Internet) [11] の平均経路長もあわせて示している。これより、論文の引用関係ネットワークの平均経路長 ℓ は、ノード数 N' が増加するにつれ増加していることが分かる。この結果から論文の引用関係ネットワーク全体の平均経路長は $\ell = 40$ 程度と推定される。

2.3　クラスタリング係数

次に、論文の引用関係ネットワークのクラスタリング係数を求める。これにより、論文の引用関係ネットワークが、どの程度クラスタ構造を持っているかどうかを調査する。すなわち、各論文が特定の研究分野などのグループを構成し、そのグループ内で閉じた引用関係を持っているのか、もしくは、そのようなグループ構造が存在しないのかを調査する。

2.1 節では、論文の引用関係ネットワークを、有向グラフとして表現した。クラスタリング係数を求めるために、以下では、論文の引用関係ネットワークを無向グラフとして表現する。これは、論文と論文の引用関係の有無によって、グループ構造の有無を調査するためである。

クラスタリング係数とは、ネットワークの中で、ノードがどの程度クラスタ構造を有しているかを示す指標である。具体的には、各ノード間に経路長が 3 の閉路が存在する比率であり、ネットワーク全体のクラスタリング係数 C は次式で定義される。

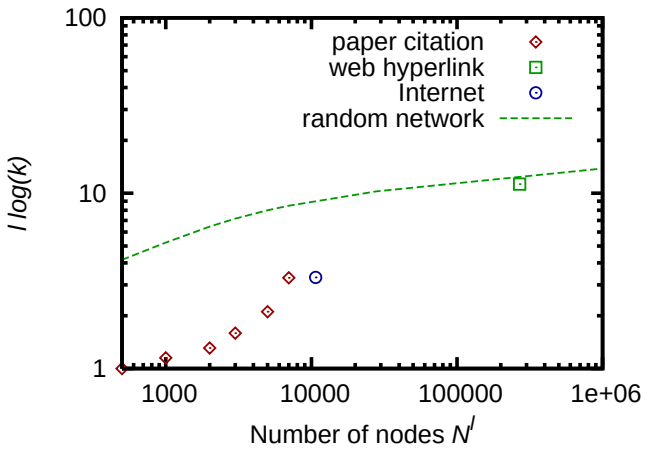

図 3: 論文の引用関係ネットワークにおけるノード数と平均経路長の関係

$$C \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} C_i \tag{3}$$

ここで、C_i はノード i の局所クラスタリング係数であり、次式で定義される。

$$C_i \equiv \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \tag{4}$$

上式において、k_i はノード i の次数である。E_i は、ノード i から、ノード i が隣接している k_i 個のノードを介して、再びノード i に戻る経路の総数である。なお、ノード数 N、平均次数 $\overline{k}$ である、ランダムネットワークのクラスタリング係数 C_{rand} は、

$$C_{rand} = \frac{\overline{k}}{N} \tag{5}$$

となることが知られている [1]。

図 4 に、論文の引用関係ネットワークのノード数とクラスタリング係数 (正確には、クラスタリング係数 C を平均次数 $\overline{k}$ で正規化した値) の関係を示す。図中には、ランダムネットワーク、Web のハイパーリンク構造 (web hyperlink) [11]、インターネットにおける AS 間のトポロジ (Internet) [11] のクラスタリング係数もあわせて示している。これより、論文の引用関係ネットワークのクラスタリング係数 C は、ランダムネットワークのクラスタリング係数 C_{rand} より大きいことが分かる。これは、論文の引用関係ネットワークでは、ランダムネットワークと比較すれば、ノード (論文) がよりグループ構造を有していることを意味している。これは、ある論文に引用されている複数の論文は、相互に関連していることが多いためと考えられる。しかし、Web のハイパーリンク構造や、インターネットにおける AS 間のトポロジと比較すれば、クラスタリング係数の値は小さい。これは、ある論文を引用している論文の中には、ある程度異なる研究分野の論文も含まれているためと考えられる。

式 (3) のように、クラスタリング係数 C は、各ノードのクラ

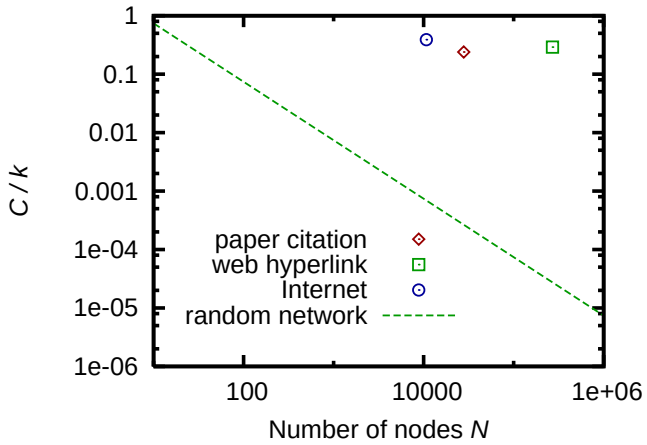

図 4: 論文の引用関係ネットワークのクラスタリング係数 (点線はランダムネットワークの場合)

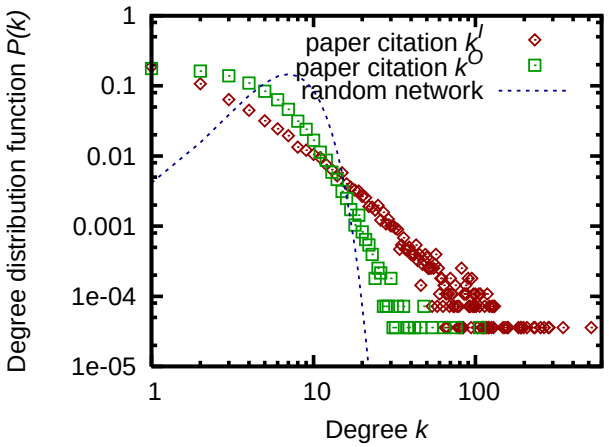

図 6: 論文の引用関係ネットワークの次数分布 (点線はランダムネットワークの場合)

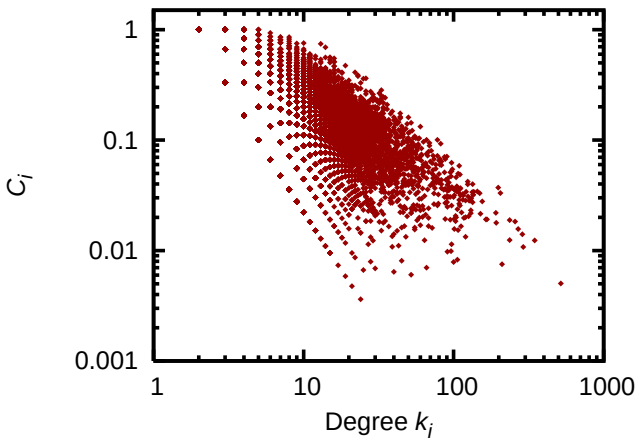

図 5: 論文の引用関係ネットワーク (次数 vs. 局所クラスタリング係数)

スタリング係数 (局所クラスタリング係数) の平均値として定義されている。ここで、各ノードの次数と局所クラスタリング係数の関係を図 5 に示す。これより、各ノードの次数 k_i が大きくなるほど、局所クラスタリング係数 C_i は小さくなる傾向があることが分かる。これは、次数が大きいノードは有名な論文であり、さまざまな分野の論文から引用されているためと考えられる。一方、次数が小さいノードはそれほど有名でない論文であり、類似した論文からのみ引用されていることが多いためと考えられる。

2.4 次数分布

次に、論文の引用関係ネットワークの次数分布を調査する。つまり、論文の引用関係ネットワーク中のノード (論文) の引用数および被引用数の偏りを調査する。これにより、論文の引用関係ネットワークにはハブとなるノード (膨大な数の引用関係を有する論文) が存在するかどうかを明らかにする。

ノードの次数分布は、ノードの次数分布関数 $P(k)$ によって決定される。ここで $P(k)$ は、ネットワーク中のノードをランダムに選択した場合、そのノードの次数が k である確率である。

ノード数 N が大きい時には、平均次数 が $\overline{k}$ であるランダムネットワークの次数分布関数 $P(k)$ は、近似的に次式のポアソン分布に従うことが知られている [1]。

$$P(k) \simeq e^{-\overline{k}} \frac{\overline{k}^k}{k!} \tag{6}$$

一方、現実のソーシャルネットワークの多くは、ランダムネットワークとは異なり、スケールフリー構造を持つことが報告されている [16]。つまり、次数分布関数 $P(k)$ の裾野部分が、次式のようなべき乗則に従うことが報告されている。

$$P(k) \sim k^{-\gamma} \tag{7}$$

ここで γ は定数であり、「べき指数」と呼ばれる。これまで報告されているスケールフリーネットワークの多くは、べき指数 γ が 2.0 ~ 3.4 の値を取ることが知られている [1]。

論文の引用関係ネットワークの次数分布を図 6 に示す。図 6 では、ノードの入次数 k^I および出次数 k^O に対する、次数分布関数の推定値を示している。図中には、ランダムネットワークの次数分布関数を点線で示している。

この図より、まず、論文の引用関係ネットワークの入次数の次数分布は、ランダムネットワークのポアソン分布と大きく異なっていることが分かる。また、次数分布関数 $P(k)$ の裾野部分がべき乗則に従っていることが分かる。これは、平均次数 $\overline{k}$ が 3.69 と比較的小さいにもかかわらず、入次数が 500 以上のハブとなるノードが少数ながらも存在していることからも分かる。回帰直線によってべき指数 γ を推定した結果、$\gamma = 1.8$ であった。一方、論文の引用関係ネットワークの出次数の次数分布は、同様にランダムネットワークのポアソン分布とは異なっているが、次数分布関数の裾野部分はべき乗則に従っていないことが分かる。

3 論文の共著者関係ネットワーク

3.1 ネットワークの構築

本稿において、「論文の共著関係ネットワーク」とは、論文の著者間の共著関係の有無を表現したネットワークである。共著関係とは、論文を過去に共同で執筆したことがあるかどうかの関係を示す。一般に、論文は複数の著者によって執筆されている。論文の引用関係ネットワークでは、各著者がノードに対応し、著者間の共著関係がリンクに対応する。

論文の共著関係の例を図 7 に示す。図 7 のように、著者 A や著者 B をノード A やノード B として表現する。ある論文が、著者 A や、著者 B、著者 C によって執筆されていれば、著者間の共著関係を、ノード A とノード B 間のリンクや、ノード A とノード C 間、ノード B とノード C 間のリンクとして表現する。このように著者間の共著関係をネットワークとして表現することで、論文の共著関係の構造を分析することが可能となる。

本稿では、2.1 節で述べた文献データベース [10] より、論文の共著関係の情報を入手し、論文の共著関係ネットワークを構築した。このデータベースの詳細は 2.1 節を参照されたい。

この文献データベースにエントリが存在する論文の著者を、論文の共著関係ネットワークのノードに対応させた。また、各

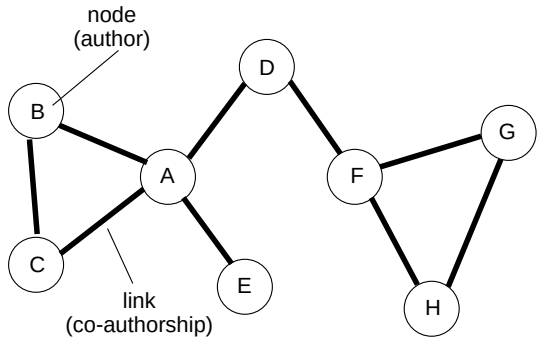

図 7: 論文の共著関係ネットワークの例

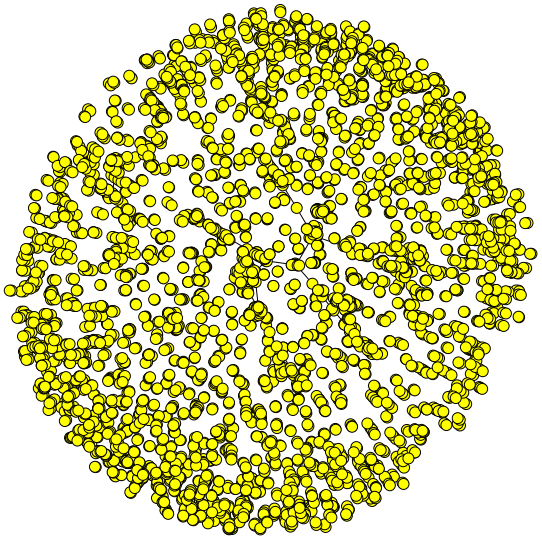

図 8: 論文の共著関係ネットワーク

論文の著者一覧の情報より、論文の共著関係ネットワークのリンクを生成した。論文の共著関係ネットワークは無向グラフとして表現した。このようにして構築した、論文の共著関係ネットワークを図 8 に示す。

論文の共著関係ネットワークの基本的な特性を表 1 に示す。この表から分かるように、ノード数 N は 24,841 であり、平均次数 $\overline{k}$ は 4.76 である。

3.2 平均経路長

まず、論文の共著関係ネットワークの平均経路長 ℓ を求める。これにより、論文の共著著関係ネットワークにおいて、著者と著者がネットワーク的にどのくらいの距離を持つのか、つまり、それぞれの著者がどの程度密接に共著関係を持っているのかを調査する。

本稿では、2. 2 節と同じ理由から、論文の共著関係ネットワークの部分ネットワークの平均経路長を計算することにより、ネットワーク全体の平均経路長を推定する。

論文の共著関係ネットワークの部分ネットワークのノード数 N' と平均経路長の関係を図 9 に示す。図 9 では、ノード数 N' を変化させた時の、平均経路長の値をプロットしている。図中には、ランダムネットワーク、数学の共著関係ネットワーク (math. co-authorship) [6]、物理の共著関係ネットワーク (physics co-authorship) [12]、映画俳優のネットワーク (movie actors) [5] の平均経路長もあわせて示している。これにより、論文の共著関係ネットワークの平均経路長 ℓ は、ノード数 N' が増加するにつれ、増加していることが分かる。論文の共著関係ネットワーク全体の平均経路長は $\ell = 4$ 程度と推定できる。これにより、著者が密接に関連していることが分かる。

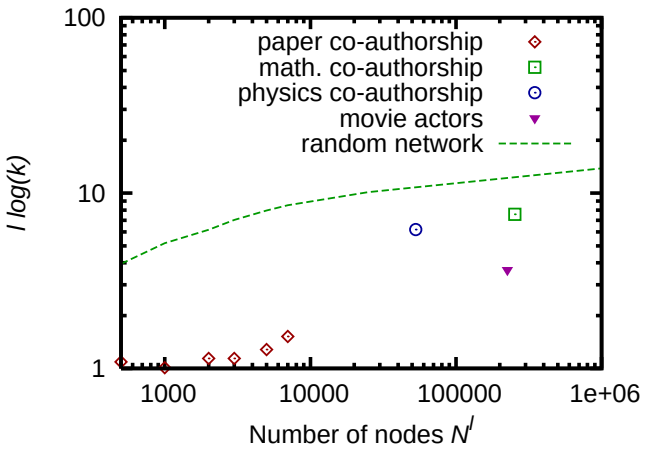

図 9: 論文の共著関係ネットワークにおけるノード数と平均経路長の関係

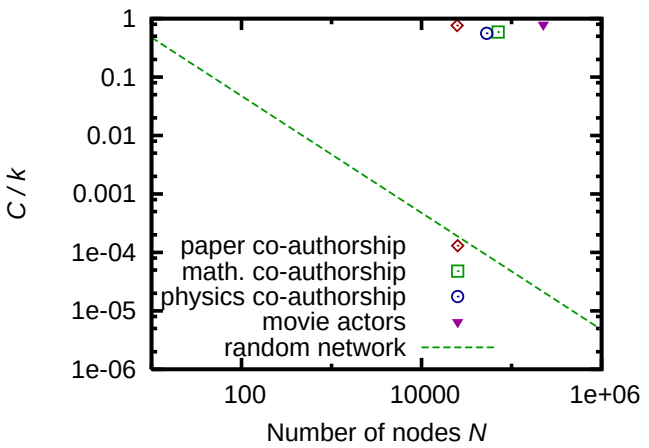

図 10: 論文の共著関係ネットワークのクラスタリング係数 (点線はランダムネットワークの場合)

3.3 クラスタリング係数

次に、論文の共著関係ネットワークのクラスタリング係数を求める。これにより、論文の共著関係ネットワークがどの程度クラスタ構造を持っているかどうかを調査する。すなわち、各著者が特定の研究グループを構成し、そのグループ内で閉じた共著関係を持っているのか、もしくは、そのようなグループ構造が存在しないのかを調査する。

図 10 に、論文の共著関係ネットワークのノード数とクラスタリング係数 (正確には、クラスタリング係数 C を平均次数 $\overline{k}$ で正規化した値) の関係を示す。図中には、ランダムネットワーク、数学の共著関係ネットワーク (math. co-authorship) [6]、物理の共著関係ネットワーク (physics co-authorship) [12]、映画俳優のネットワーク (movie actors) [5] ののクラスタリング係数もあわせて示している。これより、論文の共著関係ネットワークのクラスタリング係数 C は、ランダムネットワークのクラスタリング係数 C_{rand} より大きいことが分かる。これは、論文の共著関係ネットワークは、ランダムネットワークと比較して強いグループ構造を有していることを意味している。また、数学や物理の共著関係ネットワークと比較すれば、クラスタリング係数は同程度である。

式 (3) のように、ネットワークのクラスタリング係数は、各ノードのクラスタリング係数 (局所クラスタリング係数) の平均値として定義されている。ここで、ノードの次数と局所クラスタリング係数の関係を図 11 に示す。

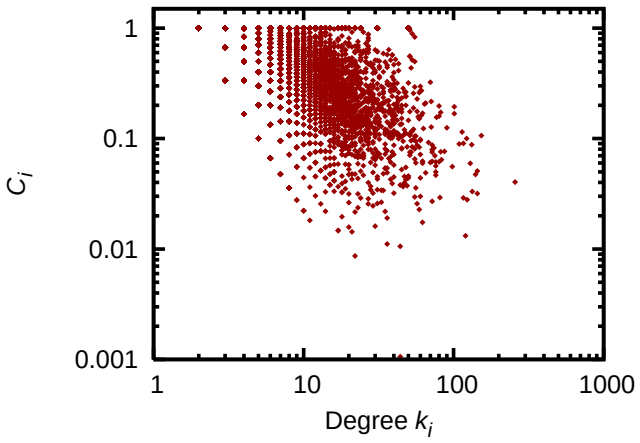

図 11: 論文の共著関係ネットワーク (次数 vs. 局所クラスタリング係数)

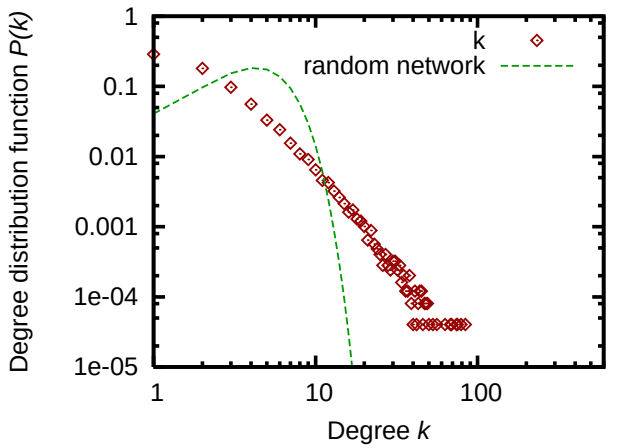

図 12: 論文の共著関係ネットワークの次数分布

これより、次数が 10 以上であるにもかかわらず、局所クラスタリング係数 C_i が 1.0 のノードが複数存在していることが分かる。これは、ある著者は 10 人以上と共著関係をもっており、その共著関係を持っている人すべてが互いに共著関係をもっていることを意味している。これは、何らかの研究グループが存在しているためと考えられる。

3.4 次 数 分 布

最後に、論文の共著関係ネットワークの次数分布に着目する。これにより、論文の共著関係ネットワーク中のノード (著者) の共著関係数の偏りを調査する。これにより、論文の共著関係ネットワークにはハブとなるノード (膨大な共著関係を有する著者) が存在するかどうか、また、ネットワークがスケールフリー構造を持つかどうかを調査する。

論文の共著関係ネットワークの次数分布を図 12 に示す。図 12 では、ノードの次数 k に対する、次数分布関数 $P(k)$ の推定値を示している。

これより、論文の共著関係ネットワークの次数分布は、ランダムネットワークのポアソン分布と大きく異なっていることが分かる。また、次数分布関数 $P(k)$ の裾野部分がべき乗則に従っていることが分かる。これは、平均次数 $\overline{k}$ が 4.76 と比較的小さいにもかかわらず、次数が 50 以上のノードが存在していることからも分かる。回帰直線によってべき指数 γ を推定した結果、べき指数 $\gamma = 2.7$ であった。これより、論文の共著関係ネットワークはスケールフリー構造を持つと考えられる。

4 まとめと今後の課題

本稿では、まず、論文の参考文献一覧の情報 [10] をもとに、論文の引用関係ネットワークを構築した。論文の引用関係ネットワークに対してネットワーク分析手法を適用することにより、平均経路長・クラスタリング係数・次数分布を調査した。その結果、論文の引用関係ネットワークはグループ構造を持たないこと、ノードの入次数 (論文の被引用数) の分布がべき乗則に従うことなどが分かった。また、同様に論文の著者情報をもとに、論文の共著関係ネットワークを構築した。ネットワーク分析の結果、論文の共著関係ネットワークはグループ構造を持つこと、スケールフリー構造を持つことなどが分かった。

今後の課題として、文献 [17] と同様のアプローチにより、ノード (論文もしくは著者) の価値を推定する手法の考案が挙げられる。また、本研究で明らかとなった論文の引用・共著関係ネットワークの構造を利用した、新たな情報検索サービスの考案などが挙げられる。

文　　献

[1] R. Albert and A.-L. Barabasi, "Statistical mechanics of complex networks," *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, June 2002.

[2] G. F. Davis, M. Yoo, and W. E. Baker, "The small world of the american corporate elite, 1982-2001," *Strategic Organization*, vol. 1, pp. 301–326, Aug. 2003.

[3] E. Holger, M. Lutz-Ingo, and B. Stefan, "Scale-free topology of e-mail networks," *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, vol. 66, pp. 1–4, Sept. 2002.

[4] M. Granovetter, "The strength of weak ties: a network theory revisited," *Sociological Theory*, vol. 1, pp. 201–233, Sept. 1983.

[5] D. J. Watts and S. H. Strogatz, "Collective dynamics of 'small-world' networks," *Nature (London)*, vol. 393, pp. 440–442, Oct. 1998.

[6] A. L. Barabasi, H. Jeong, Z. Neda, E. Ravasz, A. Schubert, and T. Viesek, "Evolution of the social network of scientific collaborations," *PHYSICA A*, vol. 311, pp. 590–614, Jan. 2002.

[7] M. Jin, M. Girvan, and M. E. J. Newman, "The structure of growing social networks," *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, vol. 64, pp. 381–399, Oct. 2001.

[8] D. Liben-Nowell and J. Kleinverg, "The link prediction problem for social networks," in *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'03)*, pp. 556–559, June 2003.

[9] L. Page, S. Brin, R. Motwani, and T. Winograd, "The pagerank citation ranking: Bringing order to the web," tech. rep., Stanford Digital Library Technologies Project, 1998.

[10] IEEE Communications Society, "Communications Engineering Technology A Comprehensive Collection of Papers 1952-2004." `http://www.comsoc.org/headlines/dvd.html`, 2005.

[11] M. E. J. Newman, "The structure and function of complex networks," *SIAM Review*, vol. 45, pp. 167–256, Mar. 2003.

[12] M. E. J. Newman, "The structure of scientific collaboration networks," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 98, pp. 404–409, Jan. 2001.

[13] W. S. Lovejoy and C. H. Loch, "Minimal and maximal characteristic path lengths in connected sociomatrices," *Social Networks*, vol. 25, no. 4, pp. 333–347, 2003.

[14] A. M. Frieze and G. R. Grimmett, "The shortest path problem for graphs with random arc-lengths," *Dicrete Applied Mathematics*, no. 1, pp. 55–57, 1985.

[15] A. L. Barabasi, 新ネットワーク思考 ~ 世界のしくみを読み解く ~. NHK 出版社, Dec. 2002.

[16] S. H. Storogatz, "Exploring complex networks," *Nature*, vol. 410, pp. 268–276, Mar. 2001.

[17] 杉山 浩平, 本田 治, 大崎 博之, 今瀬 真, "ネットワーク分析手法を用いた企業間の取引関係ネットワー ク分析," 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2005-28), pp. 83–88, June 2005.