モジュラリティに基づくリサーチフロントと学問の階層構造の分析

Analysis of Research Front and Hierarchical Structure of Science Based on Modularity

武田善行*, 梶川裕矢
Yoshiyuki TAKEDA, Yuya KAJIKAWA

東京大学大学院工学系研究科

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16工学部9号館

E-mail: takeda@biz-model.t.u-tokyo.ac.jp

共引用や書誌結合を用いたクラスタリング手法は学問領域の構造を分析する有力な手段であるが、クラスタリング時の閾値設定の恣意性が問題となる。本研究では、複数の学問領域に対し、引用ネットワークのモジュラリティを追跡した。結果、引用ネットワークのクラスタリングは3つの段階からなり、その構造は対象分野によらないことが分かった。第一段階では、分野のコアとなるクラスタが形成し、成長する。第二段階ではコアクラスタの成長と並行して、周辺的なクラスタが形成される。第三段階では、再びコアクラスタが成長する。このようにクラスタリングの素過程に着目することで、最終的なクラスタリング結果からは見ることでない、学問の階層構造や各論文の位置づけを判断することができる。

Clustering using cocitation and bibliographic coupling is an effective tool to analyze the structure of scientific research, but its arbitrariness in the setting of clustering threshold is a problem. This study tracked modularity of citation networks in research domains, and we found that there are three stages in clustering of citation networks and it is universal across our case studies. In the first stage, core clusters in the domain are formed. In the second stage, peripheral clusters are formed, while core clusters continue to grow. In the third stage, core clusters grow again. By focusing on elementary process in clustering, we can understand a hierarchical structure of domain and judge the location of each paper, which cannot be seen in the final clustering results.

キーワード: 引用分析, リサーチフロント, 階層構造, モジュラリティ
citation analysis, research front, hierarchy, modularity

1 緒言

学術論文の引用情報に基づいた文書ク

ラスタリングは、膨大な数の学術論文から成る研究分野を俯瞰するための重要な方法である^[1,2]。計量書誌学の分野では、

文章間の類似度を測る手法として、共引用^[3]、ならびに書誌結合^[4]が用いられてきた。例えば、Smallは共引用を用いて医学や材料科学分野の学術文献群をクラスタリングすることで、萌芽期にある重要な学術分野を特定することに成功している^[5]。またTakedaらは直接引用を類似度も指標として、学術分野の俯瞰や近年の論文数の増加の大きいアクティブな研究分野の特定を行っている^[6,7]。

しかし、文書クラスタリング手法には、文書間の類似度の設定方法、その後のクラスタリングの際の停止条件の選択における恣意性が問題となる。そのようなクラスタリング条件の選択が結果に及ぼす影響を調べた論文は必ずしも多くない。

例えば、Klavans-Boyackは、学術雑誌の引用ネットワークを対照として、類似度の設定方法として、共引用と直接引用を用いたいくつかの類似度指標の有効性の比較検討を行っている^[8]。その結果、直接引用は、共引用よりも優れたパフォーマンスを示すことが分かっている。

本研究の目的は、直接引用を用いて文書クラスタリングを行う際の停止条件の検討を行うことである。クラスタリングのステップ数を変化させた時のネットワークの構造を分析することで、クラスタリングが進むにつれ、結果がどのように変化するかを追跡する。複数のコーパスに対し、同様の分析を行うことで、学術論文の引用ネットワークに共通の構造を抽出する。

2 手法

本研究が対象とした学術分野は、1) エネルギー資源(E&F)、2)燃料電池(FC)、

3)太陽電池(SC)、4)化学気相成長法(CVD)、5)ナノバイオテクノロジー(NB)である。書誌情報の収集には、Institute for Scientific Information (ISI) の Web of Scienceを用いた。1)はISI- Journal Citation Reports中、Energy and Fuelsに分類される68ジャーナルに掲載された全論文、2)-4)は、それぞれ、“fuel cell*”, “solar cell*”, “chemical vapor deposition”, “nano* and bio*”を検索語として収集した。収集したデータに含まれている引用情報に基づき、最大連結成分を取得し、分析対象とした。ただしその際、収集した論文の引用先もノードとして追加している。結果、最大連結成分にはそれぞれ、1,088,444 (E&F)、152,164 (FC)、154,445 (SC)、471,509 (CVD)、451,329 (NB)のノードが含まれる。

上記、最大連結成分に対し、Newman 法^[9]を用いてクラスタリングを行った。Newman 法はモジュラリティ(Q)に基づきクラスタリングを行う。Q は次式で定義される。

$$Q = \sum_{s=1}^{N_m} \left[\frac{l_s}{l} - \left(\frac{d_s}{2l} \right)^2 \right]$$

ここで、 N_m はクラスタ数、 l はネットワーク内におけるリンクの数、 l_s はクラスタ s 内におけるリンク数、 d_s は、クラスタ s 内に存在するノードのリンク数の合計である。Qが示すものは、[モジュール内でのノード間にリンクが存在する確率の実測値]−[ランダムネットワークと仮定した場合のモジュール内におけるリンクの割合の理論値]である。Newman 法におけるクラスタリングの停止点は通常、Q が最大となるところに設定される。つまり、クラスタ内のリンク数がクラスタ間

のリンク数に比べ、最も大きくなる地点で凝集的なクラスタリングを停止する。 Q の最小値は0であり、クラスタリングされた構造がランダムであることを示す。 Q が大きいほどクラスタの独立性が高くなる。最終的に全てのクラスタが凝集し、ネットワーク内のクラスタ数が1と成る時 $Q=1$ である。

3 結果と考察

図1はクラスタリング時におけるステップ数に対する Q 値の変化を示したものである。 Q 値はステップ数4万程度までは複数の変曲点が見られるが、その後は緩やかな凸の関数となり、step数約15万で最大値に達した後、急速に減少する。図はFCにおけるものを例と示しているが、我々が行った5つの分野、全てにおいて同様の傾向が見られた。

図1 クラスタリングの進展に伴う Q 値の変化

クラスタ内リンク密度を最大、クラスタ間リンク数密度を最小にするというクラスタリングの観点からは、 Q が最大となる点($Q_{\max}$)をクラスタリングの停止条件とするのが適切であるが、その間にどのようにクラスタリングが進展しているのかは明らかでない。

その点を確認するため、クラスタリン

グの各stepにおいて凝集する2つのクラスタのうち、ノード数の大きい方のクラスタのノード数(クラスタのサイズ)を図2(a)に、小さい方のクラスタのサイズを図2(b)に示す。図2から、step数約4万程度以前のクラスタリングの初期段階には、特定のクラスタがノード数10未満の小さいクラスタを吸収しながら成長していることが読み取れる。しかし、クラスタリングの中盤(ステップ数約4万~10万)においては、主に数十~数百程度のサイズのクラスタが合一を繰り返しており、クラスタリングの終盤(ステップ数~約15万)では、初期に形成したクラスタが再び成長している。この過程もまた、我々が分析対象とした5つの分野全てにおいて共通であった。

図2 各ステップにおけるクラスタサイズ

以上に示した引用ネットワークのクラスタリングの様子を模式的に表したものが図3である。クラスタリングの過程は3つの段階に分かれる。初期課程(I)にお

いては、各分野においてコアとなる少数のクラスタが個別の論文もしくは、サイズの小さな(概ね10以下)クラスタを吸収しながら優先的に成長する。この段階で形成されるクラスタを以降クラスタAと呼ぶ。クラスタAはクラスタリングの後期課程(III)においてもサイズが他に比して大きく、それぞれの分野における主要クラスタであると見做せる。

次に、より小さなサイズのクラスタが形成される中期過程(II)がある。この段階で形成されるクラスタをクラスタBと呼ぶ。この中期に形成されるクラスタBはクラスタAと同様、その形成初期には個別論文や概ね10以下の論文から成る小さなサイズのクラスタを集めながら成長する。しかし、その後は互いに融合を繰り返しながら、クラスタリングが進展する。ただしこの第II期に形成されるクラスタBはクラスタAに比べクラスタ数は多いものの、それぞれのクラスタのサイズは小さく各分野の中堅クラスタであると思做せる。

クラスタリングの後期(III)においてはクラスタAが再び個別論文、もしくは小さなクラスタを吸収しながら成長を始める。この段階でクラスタAに取り込まれるノードは初期(I)に取り込まれるノードに比べ、コーパス全体の中で周辺的な位置を占めていると推察できる。

またクラスタリングを $Q=Q_{\max}$ となるステップ数を超えて進展させた場合(クラスタリングの最終段階IV)、クラスタA同士においても、クラスタの併合が起きる。結果、Q値は大きく低下し、得られるクラスタ構造はランダムなものに近づいていく。すなわち、適切なクラスタリン

グ結果とはいえなくなってくる。

図3 クラスタリング過程の概要. I 主要クラスタ形成期, II 中堅クラスタ形成期, III 主要クラスタ成長期.

以上の分析結果から、引用ネットワークのクラスタリング結果を解釈する場合に対し、以下の示唆が得られる。まず、各研究分野における中心的な研究分野(クラスタA)と、周辺的な研究分野(クラスタB)の峻別である。クラスタAはそのサイズ、密度ともにクラスタBを大きく上回ることからその分野の主要な研究トピックを包含していると思われる。一方、クラスタBはそのクラスタ群内の密度(1ノード当たりのリンク数)が、クラスタA群内のそれに比して小さく(表1)、クラスタAに関して未成熟であると思われる。またそれらは、クラスタリングの中期(II)において複数のクラスタが合一した結果として形成されたものであり、その内部には異なる複数の結果が含まれると考えられる。また、内部の密度が低いことからクラスタリング時の頑健性も低いことが予想され、結果の解釈には注意が必要である。ただし、クラスタAにおいても、クラスタリング後期(III)で取り込まれたものに関しては、クラスタ内の他の論文との関連性が低いと思われることから、その部分に関しては注意が必要である。

表1 ネットワークの密度

	E&F	FC	SC	CVD	NB
A群	1.95	2.77	2.47	2.76	2.12
B群	1.11	1.10	1.14	1.15	1.14

4 結言

結果, 引用ネットワークのクラスタリングは3つの段階からなり, その構造は対象分野によらないことが分かった. 第一段階では, 分野のコアとなるクラスタが形成し, 成長する. 第二段階ではコアクラスタの成長と並行して, 周辺的なクラスタが形成される. 第三段階では, 再びコアクラスタが成長する. 以上の結果は, クラスタリング結果の解釈に対し, 各領域・論文の中心性, 結果の頑健性という点において有用な指針を与える.

参考文献

- [1] Small, H.: “Visualizing science by citation mapping”, Journal of the American Society for Information Science, Vol.50, pp.799-813, 1999.
- [2] Börner, K.; Chen, C.; Boyack, K.W.: “Visualizing knowledge domains”, Annual Review of Information Science & Technology, Vol.37, pp.179-255, 2003.

[3] Small, H.: “Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents”, Journal of the American Society for Information Science, Vol.24, pp.265-269, 1973.

[4] Kessler, M.M.: “Bibliographic coupling between scientific papers”, American Documentation, Vol.14, pp.10-25, 1963.

[5] Small, H.: “Tracking and predicting growth areas in science”, Scientometrics, Vol.68, pp.595-610, 2006.

[6] Takeda, Y. Kajikawa, Y., Matsushima, K.: “Citation network of CVD research: research topics and journals”, Chemical Vapor Deposition, Vol.10, pp.523-525, 2007.

[7] Takeda, Y.; Mae, S.; Kajikawa, Y.; Matsushima K.: “Nanobiotechnology as an emerging research domain from nanotechnology: A bibliometric approach”, Scientometrics, in press.

[8] Klavans, R.; Boyack, K.W.: “Identifying a Better Measure of Relatedness for Mapping Science”, Journal of the American Society for Information Science and Technology, Vol.57, pp.251-263, 2006.

[9] Newman, M.E.J.: “Fast algorithm for detecting community structure in networks”, Physical Review E, Vol.69, artNo.066133, 2004.