

## 研究助成ネットワークにおける高次リッチ・クラブ現象 Higher-order rich-club phenomenon in research grant networks

中嶋 一貴<sup>†‡</sup>  
Kazuki Nakajima

首藤 一幸<sup>†§</sup>  
Kazuyuki Shudo

増田 直紀<sup>‡</sup>  
Naoki Masuda

### 1. はじめに

科学研究におけるチームワークへの貢献度は、過去数十年にわたって高まっている [1]。例えば、複数の著者によって執筆された論文の割合は過去 1 世紀にわたって増加傾向にあり、そうした論文は単独の著者によって執筆された論文よりも引用される傾向がある [1]。チームサイズ (= 論文の著者数) の他にも、研究成果に影響を与えるチームの様々な特徴が明らかにされている [2]。さらに共著者ネットワークの解析により、研究者間の共著関係の特徴や研究者の論文生産性 (例: 論文数や論文の被引用数) との関係が明らかにされてきた [2]。

現代の科学研究における普遍的な傾向の 1 つは、異なる機関に所属する研究者同士が連携し合うことである [1]。例えば、助成を受ける研究課題は複数の機関にまたがって実施される傾向が高まっている [3]。Ma らは、英国の研究助成ネットワーク (= ノードが機関、エッジが研究助成における機関間の連携関係を表すネットワーク) を解析し、多くの研究助成を獲得した機関同士が密に連携し合うリッチ・クラブ現象を明らかにした [3]。こうした研究助成ネットワーク解析による知見は、政府や利害関係者が研究者や機関の間で助成金を配分する際の検討材料になり得る。

本研究では、研究助成における機関間の連携関係を二部ネットワークとして表現する。なお、Ma らは 3 つ以上の機関間の高次の連携関係を 2 つの機関間の連携関係として表したネットワークを解析した [3]。このような射影されたネットワークは、ノード間の高次の相互作用が稀でない場合、元のネットワーク構造を説明するには限界がある [4]。実際に、3 つ以上の機関が連携することは助成金額の大きい研究課題では珍しくない [5]。多くの研究者を巻き込むチームは生産性が高くなる傾向があり [6]、そのようなチームとの連携は将来の助成金獲得につながりうる [7]。この傾向は、連携する機関の数の増加に寄与する可能性があり、高次の研究助成ネットワークの解析が動機づけられる。

研究助成と論文生産性の関係は様々な側面から調査されている。このような関係の理解は、論文生産性を高めるための助成金配分の議論に寄与しうる。機関が受け取った研究助成の金額と機関の論文生産性の間には正の相関がある一方で [3]、多額の助成金を受け取る機関の 1 ドルあたりの生産性は低下する傾向にある [8]。これを踏まえて、本研究では、研究助成ネットワークにおけるリッチ・クラブ現象と 1 ドルあたりの論文生産性の関係を調べる。

<sup>†</sup> 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

<sup>§</sup> 京都大学 Kyoto University

<sup>‡</sup> ニューヨーク州立大学バッファロー校 State University of New York at Buffalo

This is an unrefereed paper.

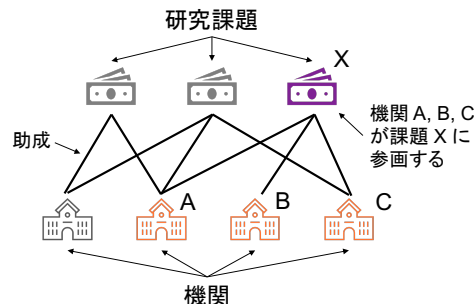


図 1: 機関と共同研究課題の二部ネットワーク。

### 2. データ

2000 年から 2020 年の間に米国国立科学財団の助成を受けた共同研究課題データを使用する。一連の研究課題から、機関が研究課題に参画する場合にエッジが張られる二部ネットワークを構築した (図 1)。各エッジは、1 つの機関が 1 つの研究課題で獲得した助成に対応する。各助成には個別の助成金額と助成金番号が割り当てられている。

共同研究課題の研究成果を定量化するために、Web of Science データベースを使用して米国国立科学財団 (National Science Foundation) への謝辞が記載された一連の論文を収集した。収集した各論文の被引用回数および謝辞に記載された一連の助成金番号を特定した。そして、助成金番号に基づき、各助成に論文を対応させた。その結果、各研究課題には少なくとも 5 件の論文が対応した。

### 3. 研究助成における高次リッチ・クラブ現象

研究助成ネットワークの高次リッチ・クラブ現象を解析する。このために、ネットワークのリッチ・クラブ構造の検出手法 [9] を二部ネットワークの場合に拡張する。まず与えられた閾値  $k$  に対して、 $k$  件より多くの助成を獲得した機関のみが参画する研究課題を数える。その件数を  $\phi(k)$  とする。次に、トポロジーをランダム化した二部ネットワークにおける件数  $\phi_{\text{rand}}(k)$  を計算する。正規化リッチ・クラブ係数を  $\rho(k) = \phi(k)/\phi_{\text{rand}}(k)$  と定義する。係数  $\rho(k)$  が 1 より十分に大きいとき、それらの機関はリッチ・クラブを形成する、と言う。この手法設計では、二部ネットワークのランダム化手法 [10] を展開した。

図 2 は、全ての研究課題から構築される二部ネットワーク、および参画する機関数が  $s$  の研究課題から構築される部分ネットワークの正規化リッチクラブ係数を  $k$  の関数として示したものである。機関が獲得した助成の数の閾値  $100 \leq k \leq 200$  に対して、全体の二部ネットワークにおけるリッチ・クラブ現象を観察した (図 2 の赤色の点)。リッチ・クラブ係数は  $k = 144$  で最大値 1.21 を取り、 $k = 144$  のデータ点は米国の一流研究大学 34 校を含む。また、 $s = 2$  の部分ネットワークではリッチ・クラブ係数

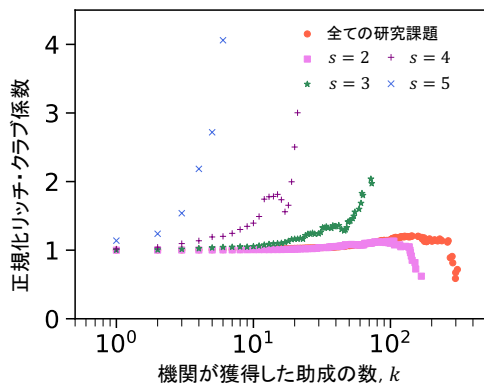


図 2: 獲得した助成の数の関数としての正規化リッチ・クラブ係数.

の値は最大値 1.14 と控えめである。対照的に、 $s=3$  の部分ネットワーク、 $s=4$  の部分ネットワーク、および  $s=5$  の部分ネットワークでは、比較的強いリッチ・クラブ現象が  $k$  の範囲にわたって見られる。したがって、3 つの機関、4 つの機関、あるいは 5 つの機関を巻き込む研究課題に多く参画する機関よりも密に連携する傾向がある。なお、全体の二部ネットワークのリッチ・クラブ係数 (図 2 の赤色の点) は、 $s=2$  の部分ネットワークのリッチ・クラブ係数 (図 2 の桃色の点) によってほとんど決定される。これは、2 つの機関の間で実施される研究課題が多く、全ての研究課題の約 67% を占めているためである。

#### 4. リッチ・クラブと論文生産性の関係

リッチ・クラブ内の機関にまたがって実施された研究課題の正規化論文生産性を測定し、リッチ・クラブと論文生産性の関係を探る。まず、各助成の 1 ドルあたりの論文生産性を助成に紐づけられた全ての論文の総被引用数を助成金額で割った値として定義する。次に、各閾値  $k$  に対して、 $k$  件より多くの助成を獲得した機関のみが参画する研究課題の集合  $U_{>k}$  を求める。 $U_{>k}$  を構成する助成の 1 ドルあたりの論文生産性の平均値を  $x_{\text{grant}}(k)$  とする。また、 $U_{>k}$  に参画する一連の機関が獲得した全ての助成の 1 ドルあたりの論文生産性の平均値を  $x_{\text{inst}}(k)$  とし、正規化論文生産性を  $x_{\text{grant}}(k)/x_{\text{inst}}(k)$  と定義する。正規化生産性が 1 より大きい場合、研究課題  $U_{>k}$  の論文生産性は、 $U_{>k}$  に参画する機関の平均生産性よりも高いことを意味する。

図 3 に、全ての研究課題から構築される二部ネットワークのリッチ・クラブ係数と正規化論文生産性を  $k$  の関数として示す。係数  $\rho(k)$  が 1 より大きい場合、 $U_{>k}$  の正規化生産性が 1 より大きい傾向があることがわかる。例えば、 $\rho(k)$  は  $k=144$  で最大値 1.21 を取り、144 件より多くの助成を獲得した一連の機関はランダムな二部ネットワークより約 21% 密に連携する。そして、それらの機関の間で実施された研究課題  $U_{>144}$  は、加盟機関の平均生産性よりも約 14% 生産性が高い。ただし、 $k=299$  では、 $\rho(299)=0.67$  なのでリッチ・クラブは存在せず、 $U_{>299}$  の生産性は加盟機関の平均生産性よりも 30% 低い。閾値  $k$  に対するリッチ・クラブ係数と正規化生産性の組をデータ点とみなした時のピアソン相関係数は  $r=0.85$  ( $P<0.001$ ) である。

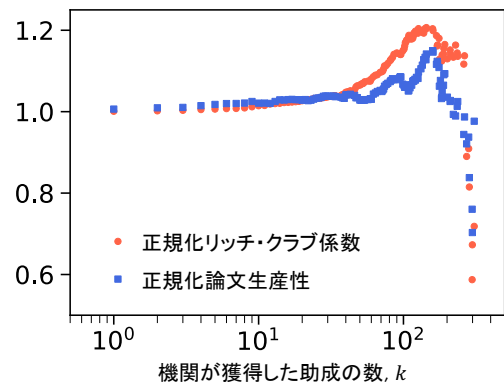


図 3: 正規化リッチ・クラブ係数と正規化論文生産性の関係.

#### 5. おわりに

研究助成ネットワークにおける高次のリッチ・クラブ現象を解析した。この目的のために、二部ネットワークのリッチ・クラブ構造を検出する手法を開発した。全体の二部ネットワークと、参画する機関数が  $s$  の研究課題から構築される部分ネットワークの両方で、リッチ・クラブ現象が観察された。 $s=3$ 、 $s=4$ 、および  $s=5$  の部分ネットワークでは、 $s=2$  の部分ネットワークよりも強力なリッチ・クラブ現象が見られた。さらに、リッチ・クラブ内の機関にまたがって実施された研究課題は 1 ドルあたりの生産性が高い傾向があることがわかった。なお、図 3 と同じ解析を単一機関で実施された研究課題に対して行うと、正規化生産性は任意の閾値  $k$  で 1 に等しくなる。これらの結果は、リッチクラブ内の機関にまたがる共同研究が論文生産性の面で有利であることを示唆している。

#### 参考文献

- [1] S. Fortunato, S. et al., "Science of science", Science, Vol. 359, Article No. eaao0185 (2018).
- [2] A. Zeng et al., "The science of science: From the perspective of complex systems", Phys. Rep., Vol. 714–715, pp. 1–73 (2017).
- [3] A. Ma et al., "Anatomy of funded research in science". Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 112, pp. 14760–14765 (2015).
- [4] F. Battiston, et al., "Networks beyond pairwise interactions: Structure and dynamics", Phys. Rep., Vol. 874, pp. 1–92 (2020).
- [5] J. D. Adams et al., "Scientific teams and institutional collaborations: Evidence from U.S. universities, 1981–1999", Res. Policy, Vol. 34, pp. 259–285 (2005).
- [6] I. Cook et al., "Research groups: How big should they be?", PeerJ, Vol. 3, Article No. e989, (2015)
- [7] A. Ebadi and A. Schiffauerova, "How to receive more funding for your research? Get connected to the right people!", PLOS ONE, Vol. 10, Article No. e0133061 (2015).
- [8] K. Aagaard et al., "Concentration or dispersal of research funding?", Quant. Sci. Stud, Vol. 1, pp. 117–149 (2020).
- [9] V. Colizza et al., "Detecting rich-club ordering in complex networks", Nat. Phys, Vol. 2, pp. 110–115 (2006).
- [10] K. Nakajima, K. Shudo, & N. Masuda, "Randomizing hypergraphs preserving degree correlation and local clustering". IEEE Trans. Netw. Sci. Eng., Vol. 9, pp. 1139–1153 (2022).