

複雑ネットワークの科学

スケールフリー・ネットワークとネットワーク上の相互作用過程など

増田 直紀

理化学研究所 脳科学総合研究センター（当時）
東京大学大学院 情報理工学系研究科 数理情報学専攻（現在）

E-mail: masuda@mist.i.u-tokyo.ac.jp

今回は、『複雑ネットワーク入門』（2005, 産業図書）を出版されたばかりの増田先生にご報告をお願いした。

社会学者のネットワークへの関心が社会構造の影響力の探求に立脚しているとする、複雑系研究者の主たる関心は、“一見、複雑なネットワークは、どのような規則に従ってできているのか”言いかえれば、“複雑なネットワークを、いかに単純なルールから作れるか”ということだと考えられる。現実社会のネットワークの構造（その多くは十分に複雑である）をふまえ、その複雑な全体構造に近いものを単純な局所ルールから作り出せるか。これは、社会ネットワーク分析の従来研究者とは異なる問いのたてかたであり、社会学者から見ると、法則追求を至上命題とする統計物理学にふさわしい堂々たる問いである。

報告は、（1）複雑ネットワーク入門、（2）スケールフリー・ネットワークのモデル、（3）ネットワーク上の相互作用過程、（4）複雑ネットワークと社会ネットワーク研究の四部で構成されていた。

まず、中規模から大規模まで、現実のさまざまなネットワークを可視化した先行研究が紹介された。カラテクラブの友人関係、アナログテレビの回路、インターネット、脳の領野間のネットワーク、シーエレガンスのニューラルネットワーク、代謝のネットワークなどである。関係はもともと不可視なものであり、図にすることで初めて全体像をおぼろ

¹ 本稿は2005年8月5日開催の社会ネットワーク研究会での報告を安田雪（東京大学）が整理したものである。以下は、報告内容のうち、特に重要だと考えられる点、筆者の印象に残った点をまとめたものであり、文責は筆者にある。

げながら理解しうる。社会関係にとどまらず、自然科学分野においてもネットワーク構造を抽出し、図示することの重要性が認識されている。

続いて関連領域における先行研究が紹介された。先行研究のサーベイは、構造と機能に分けられた。構造では、実データにもとづいてネットワークの構造特性を知るための指標（スモールワールド、スケールフリー、次数相関、階層性、モジュラリティとコミュニティ構造）が紹介された。スモールワールドやスケールフリーは、社会ネットワーク分析の領域でも頻繁に用いられる概念だが、次数相関とモジュラリティという概念は新規性がある。

機能については、ランダムウォーク、投票者モデル、感染症、同期、砂山モデル、ネットワークフロー、パケット通信、スピン系、マルチエージェントダイナミクス、進化ゲームが紹介された。この機能のモデル化こそが、複雑系ネットワーク研究の強みであり、現状の社会ネットワーク分析における弱みであろう。具体的には、社会ネットワーク分析の多くの研究は、静的ネットワークの構造解析にとどまり、変化するネットワークを記述するモデルをうまく扱った研究がほとんどない。

ノードが増加し、その際、すでに多くの紐帯を保持しているノードに紐帯を付与していくという優先的選択モデルをはじめ、ネットワークの成長を記述するモデルは多い。新しくノードが追加され、そのノードからランダムに紐帯がはりめぐらされていく「ランダム・グラフ」（あるいは、ランダムグラフモデル）、ノードが増加するにつれ、既存の構造の特徴をフラクタル的に増幅させていく紐帯がはられていく「階層的モデル」などがある。後者は一見、複雑に見えるが、いかにも人工物といった感を与える精緻なネットワークであり、現実社会における自然発生的な社会関係にはあてはまりにくい。だが、ダイナミックなネットワークの成長を分析する技術が不足している社会ネットワーク分析の研究者にはきわめて示唆に富むものである。

もちろん、変化するネットワークが、必ずしもすべて成長するわけではない。DEBモデルなどは成長しないネットワークの変化を扱うモデルである。このモデルの特徴は、ノード数が一定のネットワークにおける紐帯の発生と消滅という変化を巧みに扱う点である。なお、ネットワークの成長とは、ノード数の増加を意味しており、関係の強弱というような要素は含まない。また、閾値モデルという変化すらせず静的なモデルもある。

ついで、所与のネットワーク構造の上で、ノードに生じる変化の過程を記述するパーコレーションモデルが紹介された。パーコレーションモデルは、特定の構造をもつネットワークにおいて、ネットワークの構成要素の性質が白から黒、非感染から感染といった変化

を遂げる過程を記述する。格子型ネットワークやランダムネットなど、いろいろなネットワークの構造のうえで、病気の感染力すなわち感染が起こる速度をパラメータとして設定し、変化の拡散程度を検証する。拡散には、人数と紐帯の分布、さらには人々のつながり上の位置が問題となる。格子状のつながり、ランダムなつながり、スケールフリーなつながりという全体構造のありかたも、拡散に影響を及ぼす。ネットワーク内の各人の位置取りも本人の感染、非感染に影響する。現実のデータで、次数が等しい、あるいは格子型に結合した規則的ネットワークを発見することはきわめて稀である。研究当初は、規則的なつながりを仮定したモデルを前提に感染が論じられることが多かったが、現在では多様なネットワーク構造を前提とした議論が進められているようだ。

感染モデルでは、感染力が特定の閾値を越えると、ネットワーク全体への感染が起こり、閾値未満の場合ではネットワーク全体には感染が広まらず、感染が一部で抑えられる。研究者が注目するのは、この際の閾値、とりわけ、ネットワーク構造の違いによる閾値の違いである。雪崩現象が生じる臨界点（ティッピングポイント）の探索は、集合行為論にも共通した問題関心である。これに関連して、エラー耐性モデル、別名サイト・パーコレーションと呼ばれるモデルがあるが、これは所与のネットワークから順次、ノードを除去していくと、ネットワーク全体がどの程度、断片化してしまうかという頑健性を検討するためのモデルである。感染モデルの詳細によらずスケールフリー・ネットワークではそうでないネットワークよりも感染が著しく起こりやすくなる、また、ハブによって大規模な感染が媒介される。

最後に、社会学、統計物理学、数学など、異なる領域で発展しつつあるネットワーク研究だが、今後も、統計データやフィールドワークからの実際のネットワークデータの収集、ネットワーク指標の算出、構造の解析と理解、モデル化、そしてそのネットワーク上で生じる事象のプロセス分析の研究が相互に関連しあって発展していくことが望ましいというご意見が出された。

聴衆からは、複雑ネットワーク研究、ネットワーク分析、ネットワーク生態学、ネットワーク科学など多くの研究分野名もあり、問題関心はそれぞれ微妙に異なるが、ネットワークに関わる研究は百花繚乱状態である、この報告のような異なる分野からの新しいアプローチは斬新で興味深い、学際的な研究ができればネットワークに関する研究のますますの発展が期待できるといった意見が出された。

参考文献

増田直紀, 今野紀雄 (2005) 『複雑ネットワークの科学』産業図書.

赤門マネジメント・レビュー編集委員会

編集長 新宅 純二郎

編集委員 阿部 誠 粕谷 誠 高橋 伸夫 藤本 隆宏

編集担当 西田 麻希

赤門マネジメント・レビュー 6巻12号 2007年12月25日発行

編集 東京大学大学院経済学研究科 ABAS/AMR 編集委員会

発行 特定非営利活動法人グローバルビジネスリサーチセンター

理事長 高橋 伸夫

東京都千代田区丸の内

<http://www.gbrc.jp>