

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 曹 崑

近年、大規模で複雑なネットワークが自然界や社会に遍在していることが明らかとなり、複雑系科学の分野において、ネットワーク上の伝播現象や拡散現象を理解するための数理的研究の重要性が増してきている。感染症の流行、コンピュータウィルスの蔓延、ロコミ等による情報の伝播、世論形成、人の集団における協力行動の進化などの多くの社会現象には伝播ダイナミクスが重要な役割を果たしており、その本質的機構を明らかにすることは社会的に大きな意義を持つ。本論文は、数理モデリングと数理解析手法を通じて、そのような伝播ダイナミクスの解明を目指すものである。

本論文は「Spreading Dynamics on Complex Networks」（複雑ネットワークにおける伝播ダイナミクス）と題し、6章からなる。

第1章「Introduction」（序論）では、様々な伝播ダイナミクスを局所的な相互作用の種類によって4つに分類し、複雑ネットワーク科学分野における近年の研究動向を概説している。そして、本論文で着目する伝播・拡散ダイナミクスの位置づけ、重要性及びアプローチ法について説明している。

第2章「Prevalence of infectious diseases on metapopulation networks」（メタ個体群ネットワークにおける感染症の流行）では、広場、学校、劇場等の多くの人が集まる公共の場で感染症の伝播が拡大しやすいという現象に注目し、集合効果（Rendezvous effects）を取り入れたメタ個体群ネットワーク上の感染伝播モデルを提案している。理論計算と数値解析によって、集合効果が感染症の伝播過程及び流行閾値に与える影響を明らかにしている。感染症の流行期には、実効的に集合効果を軽減するため、大規模な集会の禁止や外出規制等の予防対策が必要であるという結果を示している。

第3章「Diffusion of information via message spreading on networks」（メッセージの伝播によるネットワーク上の情報拡散）では、情報の有無ではなく情報の量に着目して、人間関係のネットワークにおける情報の拡散過程を考察している。各人は実数で表現される情報量を保持し、他者とのメッセージ交換を通じて情報量を更新すると仮定して、スケールフリー・ネットワーク上の情報拡散過程を理論的・数値的解析によって明らかにしている。また、階層型ネットワークにおいて、情報交換できる人間関係のショートカットの導入が情報拡散過程に与える影響を測る指標を提案し、効率的な情報拡散を実現する社会階層ネットワークの構造について考察している。

第4章「Promotion of cooperation on adaptively weighted networks」（適応重み付きネットワークにおける協力行動の促進）では、進化ゲーム理論の分野における重要な研究課題の一つである協力行動の進化に着目し、パートナー選択の役割について数理的に考察している。協力者と非協力者から成るネットワークにおいて、隣接する協力者とは関係性を強め、非協力者とは関係性を弱めるというパートナー選択の仕組みを導入し、個体間の関係性の強さに対応する「重み」が適応的に更新されるような、協力行動の伝播を表す数理モデルを提案している。そして、この適応重み付きネットワークのダイナミクスの理論解析に基づいて、パートナー選択は個体集団における協力行動の適応進化を促進するという

結果が示されている。

第5章「Spread of fairness in networked evolutionary ultimatum games」（ネットワークにおける進化最後通牒ゲームでの公平性の伝播）では、人間の非合理的な判断を説明するのに使われる進化最後通牒ゲームに着目し、利己的な個体集団における公平性の伝播過程について調べている。各個体は最後通牒ゲームにおいて隣接する他者と同じ戦略を取りやすいという局所的な共感が働くと仮定し、戦略の更新過程を数理的手法によって解析している。各個体の利己性が増加してある閾値を超えると非合理的な公平志向を持つ個体が出現するが、この閾値（selfishness tolerance）は平均パス長やクラスターリング係数等のネットワーク構造の特徴量に依存することを様々なネットワークの解析によって示している。

第6章「Conclusion」（結論）では、以上の結果に対するまとめと考察を述べている。

付録「Combination of infectious epidemics and evolutionary games」（感染症と進化ゲームの統合）では、感染症や進化ゲーム等の複数の伝播ダイナミクスを統一的に扱うためのモデルの枠組みを提案している。

以上を要するに、本論文は複雑ネットワーク上の疾病伝播や進化ゲームなどの動的過程を数理モデルに基づいて理論的および数値的に解析し、多彩な伝播現象に関する新たな知見を得ている。これは数理情報学および複雑ネットワーク科学に貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。