

学位論文題名

# Emergence of Global Characteristics from Diversification of Network Structures and Element Attributes

(ネットワーク構造及び要素属性の変化による大域的特性の創発)

## 学位論文内容の要旨

本論文は、複雑ネットワーク上のダイナミクスの解明を目的とする。現在、複雑系、システム工学に対する研究によって多数の要素からなる系の理解が進み、また、近年、複雑ネットワークに対する研究によってネットワーク構造についての知見が蓄積されている。しかし、複雑ネットワーク上でのダイナミクスについては、その解明に至っていない。これは、複雑ネットワーク上のダイナミクスは、ネットワーク構造と各要素がお互いに緊密に関連しており、問題設定が非常に複雑になるためであると考えられる。本研究では、ネットワーク構造と要素機能の変動を固定した上で、それらの振る舞いを観測し、複雑ネットワーク上でのダイナミクスを解明した。

本論文では、ネットワーク構造及び要素機能に着目し、それぞれを固定した上でその振る舞いを観測し、複雑ネットワーク上でのダイナミクスに関する研究を行う。ネットワーク構造の変動とは、WWWにおいて新たなリンクが追加されることに代表されるように、辺の構造が時刻に応じて変化することを指す。また、要素機能の変動とは、Webサイトのコンテンツが変わることに代表されるように、要素の機能が時刻に応じて変化することを示す。

研究の対象としては、以下を扱う。第3章及び第6章においては、情報の伝播を対象とする。これは、複雑ネットワークであるWWWや社会ネットワークを通して情報が伝播する、典型的な複雑ネットワーク上のダイナミクスであることに加えて、WWW上での情報の伝播は従来のマスコミュニケーション中心のものとは異なると考えられるため、応用面においても重要である。また、WWW上の情報は消去されない限り何時でも、どこからでも観測可能であるため、観測が容易であるという利点がある。第4章、第5章においては、マルチエージェントシステムの視点からネットワーク構造と要素属性を検討する。これは、設計に応じてネットワーク構造や要素機能を自由に変更できるためである。

本論文は以下のような各章によって構成されている。

第一章では研究の目的を述べると共に、その目的に至った背景を解説する。また、その領域においてこれまでに成されてきた主な研究の流れを概説する。また、全体の構成として、複雑ネットワーク上のダイナミクスを研究するに当たって、ネットワーク構造と要素機能のそれぞれを固定した場合と変化させた場合の組み合わせである4パターンについての研究を行うことを示す。

第二章では、ネットワーク構造、要素機能、及び大域的特性を表現するため、数理的な定義について記述する。

第三章では、ネットワーク構造によって決定付けられる情報伝播規模特性について述べる。ここで

は、ネットワーク構造及び要素機能の双方を固定する。

第四章では、Boolean Multi-Cell Automata に関する研究について述べる。ここでは、ネットワーク構造を可変にし、要素機能を固定する。

第五章では、自律分散システムにおける行動学習の解析について述べる。ここでは、ネットワーク構造を固定し、要素機能を可変にする。

第六章では、実世界におけるネットワーク上複雑系の諸様相について述べる。ここでは、ネットワーク構造と要素機能の双方が可変である。双方が可変であるため、その挙動は非常に複雑になる。そのため、この領域の研究は少ないが、現実社会にはこの領域に属すると考えられる事例が多く存在する。そのため理論的にも応用面から見ても重要である。具体的な事例として、ブログ上の情報伝播規模特性、Web ページの情報源としての価値の推定方法、ポイント交換ネットワークの特徴抽出について解析結果を明らかにする。

第七章では、本論文によって明らかになった事柄をまとめ、結論について述べる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 古 川 正 志  
副 査 教 授 大 内 東  
副 査 教 授 和 田 充 雄  
副 査 教 授 栗 原 正 仁

学位論文題名

## Emergence of Global Characteristics from Diversification of Network Structures and Element Attributes

(ネットワーク構造及び要素属性の変化による大域的特性の創発)

本論文は、複雑ネットワークにおける構造及び要素属性のダイナミクスから創発される大域的特性の創発メカニズムの解明を目的としている。複雑ネットワークでは、ネットワーク構造自体とそれを構成する各要素の属性が時間軸において相互に影響しあい、ネットワークのダイナミクスを実現している。本論文では、このようなネットワークのダイナミクスから創発される大域的特性を、理論モデルの作成と実システムの観察による双方の特性から比較検討し、複雑ネットワーク上で創発される大域的特性ダイナミクスのメカニズムを解明している。

上記の目的のため、本論文では、複雑ネットワークをネットワーク構造及びそれを構成する要素の属性からなると定義し、ネットワーク構造及び要素の時間的变化を定式化した上で、構造及び属性の変化が一定の場合と時間変化がある場合の組み合わせによるアプローチを採用している。本論文において、ネットワーク構造の時間変化とは WWW において新たなリンクが追加・消滅のように、辺の構造が時刻に応じて変化すること、要素属性の変動とは Web サイトのコンテンツの追加・削除や入れ替えのように、要素の属性が時刻に応じて変化することを指している。

具体的な研究としては、第二章及び第六章において、世論形成メカニズム、伝染病感染、風評被害等に見られる、複雑ネットワーク上の情報伝播ダイナミクスがもつテッピング現象を、WWW を対象として解明している。第四章及び第五章においては、マルチエージェントシステムの視点から、エージェントの協調及び競合関係をネットワーク構造の動的変化、エージェントの行動を要素属性として、エージェント全体の大域的な行動特性及びエージェント個々の行動を対象として解明している。本論文の各章は、以下のような内容で構成されている。

第一章では研究の目的を述べると共に、従来の複雑系システム及び複雑ネットワークの研究を概説している。また、複雑ネットワークのダイナミクスの解明には、構造と要素属性のそれぞれを固定した場合と変化させた場合の組み合わせ 4 パターンについてそれぞれ調べる必要性があることを述べている。

第二章では、複雑ネットワークのダイナミクス解明において、その問題を明確にするため、複雑

ネットワークをそのネットワーク構造及び要素属性から構成する数理モデルを作成し、この数理モデルに基づいて問題の所在を明確化している。

第三章では、ネットワーク構造及び要素属性の双方の時間的変化を固定した上で、ネットワーク構造により異なる情報伝播規模特性が生まれるかを明らかにしている。具体的には、二次元正方格子、スモールワールド性を示す **Watts-Strogatz** モデル、スケールフリー性を示す **Barabasi-Albert** モデルのそれぞれのネットワークにパーコレーションに基づくシミュレーションを実施し、結果として得られたクラスターサイズを観測し、ネットワーク上の情報伝播規模を再現している。

第四章および第五章では、マルチエージェントシステムを用いてネットワーク構造のみを可変とした場合と要素属性のみを可変とした場合のシステム全体の適応能力を検証している。第四章では、ネットワーク構造を可変にし、要素属性を固定した上で、**Boolean Multi-Cell Automata** を提案し、協調行動からエージェント全体の行動が振動特性を持つ結果が得られることを数値実験から明らかにしている。第五章では、ネットワーク構造を固定し、要素属性を可変にした上で、エージェントがシステム全体に合目的な学習を個々に行わせると、ヘテロジーニアスなエージェント属性が創発され、属性が近いエージェント間では、エージェントを入れ替えてもシステムが維持されることを水上蛇型ロボットの実験から検証したこと述べている。

第六章では、実世界における複雑ネットワーク上のダイナミクスを示す 3 現象を解明している。対象としては、(1) ブログ上の情報伝播規模特性を三章で明らかにした数理モデル結果と比較し、スケールフリー性ネットワークの特性と一致することの検証、(2) Web ページの情報源としての価値の推定方法を提案し、情報源はページランク等による従前の価値推定では得られないが、提案手法では推定可能であること、(3) 企業間ポイント交換ネットワークはスケールフリー特性を持つが **WWW** とは異なる特徴を抽出できること、等を明らかにしている。

最後に第七章では、本論文により明らかになった事柄をまとめ、結論について述べている。

これを要するに、著者は **WWW** 上の情報伝播を主として複雑ネットワークのネットワーク構造及び要素属性のダイナミクスに関して新知見を得たものであり、情報科学の進歩に寄与するところ大である。よって著者は、北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。